

清洁能源应用研究系列报告

中国蓄热储能产业发展报告

(2024)



2024年5月

编委会

主编：代彦军 陈讲运 李鸿波

编委：（按姓氏笔画）

丁 胜 王 会 孔俊龙 毕 扬 刘洪绪 孙田津 苏士强
苏万振 李 智 李海建 李培伦 宋岷桦 张玉杰 张吉礼
张慧鑫 陈进周 庞 静 赵辰溟 郭海新 韩荣涛 谭持中
樊建华 魏晨晨

审稿专家：郭炳庆 路 宾 杨旭东 李建强 孙培军

主编单位：

中国建筑金属结构协会清洁能源应用分会

太阳能发电及制冷教育部工程研究中心

法兰克福展览（上海）有限公司

中展智奥(北京)国际展览有限公司

参编单位：

中国建筑金属结构协会采暖散热器委员会

上海交通大学

中国电力科学研究院

中国科学院过程工程研究所

中国建筑材料科学研究总院

大连理工大学

丹麦科技大学

北京建筑材料检验研究院

内蒙古梅捷新能源科技有限公司

江苏昂彼特堡能源集团有限公司

山东盛拓科能源有限公司

山东力诺瑞特新能源有限公司

杭州华源前线能源设备有限公司

远能（苏州）环境科技有限公司

北京热力装备制造有限公司

前言

根据《Renewables2023》，2022年热能是终端用能占比最高的能源消耗，热能消耗约占最终能源消耗总量的一半。当前，热能生产主要以化石能源为基础，其中只有13%来自可再生能源。全球工业领域总共消耗的能源主要由燃烧一次能源—石油、煤炭和天然气产生，可再生能源做出的热能贡献仅占12%。预计2023年至2028年期间，全球工业部门热能需求将增长16%。根据国际能源署的相关报告，建筑的区域供热和制冷系统仍然主要依赖化石能源（约占总供热量的90%）。2020年9月，中国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标。实现“双碳”目标，需要大幅度压减使用化石燃料。

根据《BP世界能源统计年鉴2023》，2022年全球太阳能风能发电装机容量达到了220GW的历史新高，其中中国太阳能和风能发电的增长比率最大，分别达到了37%和41%。为了提升可再生能源的稳定性、平衡可再生能源的波动性，高比例消纳可再生能源，蓄热储能技术已成为新能源系统的重要组成部分。

为响应国家新能源政策，提升新能源利用率，推动“双碳”目标实现，中国建筑金属结构协会与太阳能发电及制冷教育部工程研究中心合作，调研、分析了中国蓄热储能行业发展情况。主要工作有：对蓄热储能技术进行调研、归纳、对比分析；查找、归纳了中国乃至世界范围内的蓄热储能技术的政策以及相关标准；分析了全球蓄热储能技术利用现状、各类技术的特点；立足蓄热行业上游、中游和下游，从蓄热设备、相变材料等方面分析了产业链情况；介绍了蓄热储能项目的工程设计和施工；讨论了中国蓄热储能技术的趋势、机遇和挑战；提供了中国蓄热储能发展的建议。

由于时间紧、调查范围广，工作团队掌握的资源有限，不足之处敬请各位读者批评指正。

编制组
2024年5月

目录

1. 概述	5
1.1 蓄热储能发展历程	5
1.2 应用价值	8
1.2.1 平衡可再生能源的波动性	9
1.2.2 提高能源利用效率	10
1.2.3 高灵活性	12
1.2.4 助力双碳	13
2. 型式分类	16
2.1 显热蓄热储能	16
2.1.1 显热蓄热方式	17
2.2 潜热蓄热储能	19
2.2.1 潜热蓄热储能材料	20
2.2.2 潜热蓄热储能方式	25
2.3 热化学蓄热储能	28
2.3.1 吸附/吸收蓄热储能	29
2.3.2 化学反应蓄热储能	31
2.4 其他	34
2.4.1 复合蓄热储能	34
2.4.2 物理吸附/吸收蓄热储能	34
3. 政策与标准	36
3.1 中国蓄热储能支持政策	36
3.2 其他国家蓄热储能支持政策	39
3.2.1 美国	39
3.2.2 欧盟	40
3.2.3 日本	43
3.2.4 加拿大	44
3.2.5 澳大利亚	44
3.3 中国蓄热储能标准	44
3.4 其它国家蓄热储能标准	45
4. 蓄热储能市场	47

4.1 市场概况	47
4.2 蓄热储能技术对比分析	51
4.2.1 三种蓄热储能技术对比	51
4.2.2 多种蓄热储能技术对比	54
5. 蓄热储能技术应用领域以及案例	56
5.1 以热源为分类的应用	58
5.1.1 谷电蓄热储能	58
5.1.2 可再生能源及工业余热作为蓄热储能热源	62
5.2 建筑蓄热储能供热和供冷案例分析	69
5.2.1 相变材料蓄热储能技术案例分析	72
5.2.2 固体蓄热储能案例分析	77
5.2.3 熔盐蓄热储能技术案例分析	81
5.2.4 水/冰蓄冷储能技术案例分析	83
5.2.5 土壤蓄热储能技术案例分析	86
5.3 工农业蓄热储能案例分析	89
5.3.1 工农业用热现状	89
5.3.2 酒、饮料和精茶制造业蓄热储能	92
5.3.3 纺织业蓄热储能	94
5.3.4 工业余热蓄热储能案例	96
5.3.5 农业蓄热储能案例分析	98
5.4 电力领域蓄热储能案例分析	100
5.4.1 熔盐蓄热与聚光太阳能热发电系统	101
5.4.2 蓄热储能参与电网调峰	103
6. 中国蓄热储能产业链分析	107
6.1 产业链上游分析：蓄热储能材料与配件	109
6.1.1 相变蓄热储能材料发展现状	109
6.1.2 相变蓄热储能材料制造商及其产品概况	110
6.2 产业链中游分析：蓄热储能设备和系统	110
6.3 其他蓄热储能产业链	115
6.3.1 电锅炉+水蓄热储能产业链	115
6.3.2 固体电蓄热锅炉技术产业链	116

6.3.3 熔盐蓄热产业链	117
6.4 产业链下游分析：工程设计	117
6.4.1 工程设计	117
7.中国蓄热储能技术趋势、机遇与挑战	123
7.1 中国蓄热储能技术趋势	123
7.1.1 电力	123
7.1.2 工业	124
7.1.3 建筑	128
7.2 中国蓄热储能机遇	129
7.3 中国蓄热储能挑战	132
7.3.1 固体蓄热储能面临的挑战	132
7.3.2 相变蓄热储能面临的挑战	132
7.3.3 化学蓄热储能面临的挑战	133
8. 中国蓄热储能发展建议	135
参考文献：	137
图表清单：	142

CCMSA 清洁能源应用系列报告 010-58934233

1. 概述

1.1 蓄热储能发展历程

蓄热储能技术有着悠久的历史。最古老的能源储存形式是从湖泊、河流和山脉中收集天然的冰雪，用于食物保存、冷饮和空间冷却。当时的人类利用简单的蓄冷方式储存自然界所馈赠的冰或雪。周朝时，中国已经运用储存的冰块来保证食物的口感和降低房间的温度（西汉的冰窖，如图 1-1）；古罗马人和古希腊人依靠运输山顶上的积雪来制作冰饮；时至今日，日本的一些地区（京都、金泽和草松）还依然保留着将天然冰收集在冰舍中以供夏天解暑使用的习惯。



图 1-1：故宫博物馆的冰窖（现在已经改造为餐厅）

蓄热储能的概念可以追溯到 19 世纪初，当时发明了防止黄油融化的冰盒。现代蓄热储能的发展始于 20 世纪初和 20 世纪 70 年代末的建筑供暖和制冷以及用于聚光太阳能热发电【1】【2】。

20 世纪 60 年代前后，中国首次提出地下含水层蓄能系统。上海市依靠该系统将大量的地下水提取出来用于工业冷却的系统，为了抑制沉降便将地表水注入含水层，发现储存的水在注入后仍然保持冷态，从而可继续用于工业冷却。1970 年前后进一步建议在含水层中储存热能，法国、瑞士、美国和日本对其进行了现场试验和可行性研究。目前全球有超过 2800 个地下含水层蓄能系统运行，每年

超过 2.5 亿千瓦时的能量用于供暖和制冷。

早在 1873 年，美国麦克马洪（MacMahon）设计了以高温热水的形式间接地储蓄蒸汽的方案，取得了专利，为现代的蒸汽蓄热器奠定基础。20 世纪中期出现了蒸汽蓄热罐的技术【3】。而中国于 1961 年在上海渔轮厂装用自行设计的一台 22 立方米蒸汽蓄热器；1964 年铁道部运用蒸汽蓄热罐配合小锅炉在机车洗车前回收机车锅炉内余热【3】。70 年代时，日本和西欧国家发现蒸汽蓄热系统吸收锅炉的余热可以将锅炉热效率效率提升 10%【4】。之后，我国专家致力于发掘除锅炉余热以外的冶金、化工等工业冷却生热作为热源耦合蒸汽蓄热罐以用于供热、供暖等领域。

20 世纪 60 年代，美国伊利诺伊大学的 Penrod 首次提出了将太阳能集热器与埋管换热器组合的技术设想【5】。到 20 世纪 70 年代后半期，欧洲也开始了对太阳能跨季节蓄热系统的研究并用于供暖系统，并取得了一定的成果。从 1979 年起，太阳能跨季节蓄热已成为国际共同研究的课题。在国际能源署（IEA）的大力支持下，跨季节蓄热的研究取得了较大的进展。

显热蓄热技术起源于蓄热罐。蓄热罐多用于回收转炉余热，以此解决转炉间歇性工作带来的热水温度不一致的问题。例如锅炉对工业淬火炉废热进行二次加热继而利用于蒸汽式制冷和蓄热式供暖的方法【4】。

全世界太阳能研究热潮发生在 20 世纪 70 年代，促进了蓄热技术的发展。美国俄亥俄州迈阿密斯堡安装了一套供热系统，巧妙地结合了集热和蓄热的过程，能够全年收集和储存太阳能，用于工业和住宅区的供热【6】。20 世纪 90 年代，中国科研人员开始关注太阳能集热器与土壤蓄热结合，并进行模拟分析。

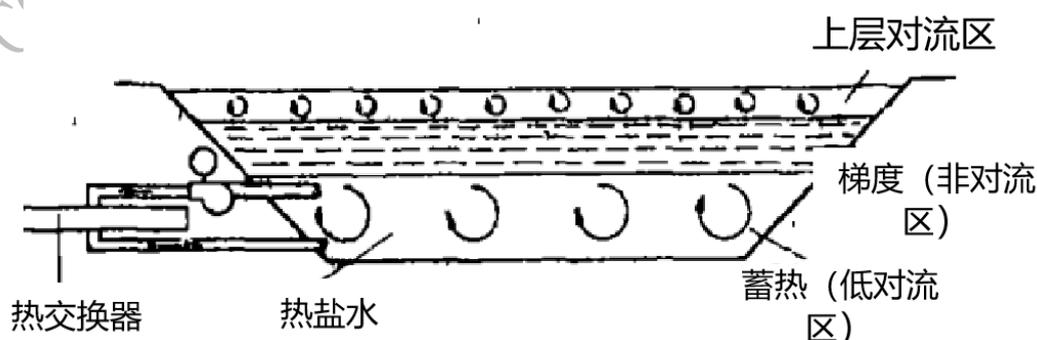


图 1-2：太阳能蓄热池【7】

20 世纪 80 年代，研究人员逐步关注到相变蓄热领域。1981 年，从潜热被动式太阳能房的蓄热墙体以及建筑围护结构耦合相变蓄热材料的研究工作开始，逐步拓展了相变蓄热的应用范围，聚焦于相变蓄热材料和蓄热器的研发。早期主要研究对象是相变蓄热材料中的无机水合盐类。20 世纪 90 年代中期，研究重点转向有机蓄热材料及“固-固”相变蓄热材料（例如多元醇、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 等）。此外，研究人员在相变材料方向上不断突破，发展了具有多孔结构特性的相变材料。

“地源热泵”的概念，于 1912 年由瑞士的专家提出。1946 年美国在俄勒冈州的波特兰市中心区建成第一个地源热泵系统。中国在地源热泵方面的研究起源于 20 世纪 80 年代。其中土壤源热泵发展最快，地表水地源热泵的工程运用范围最广【8】。

1993 年中国第一个冰蓄冷系统在深圳电子科技大厦正式运用。截至到 2006 年中国大陆已有 300 多个蓄冷项目【9】。

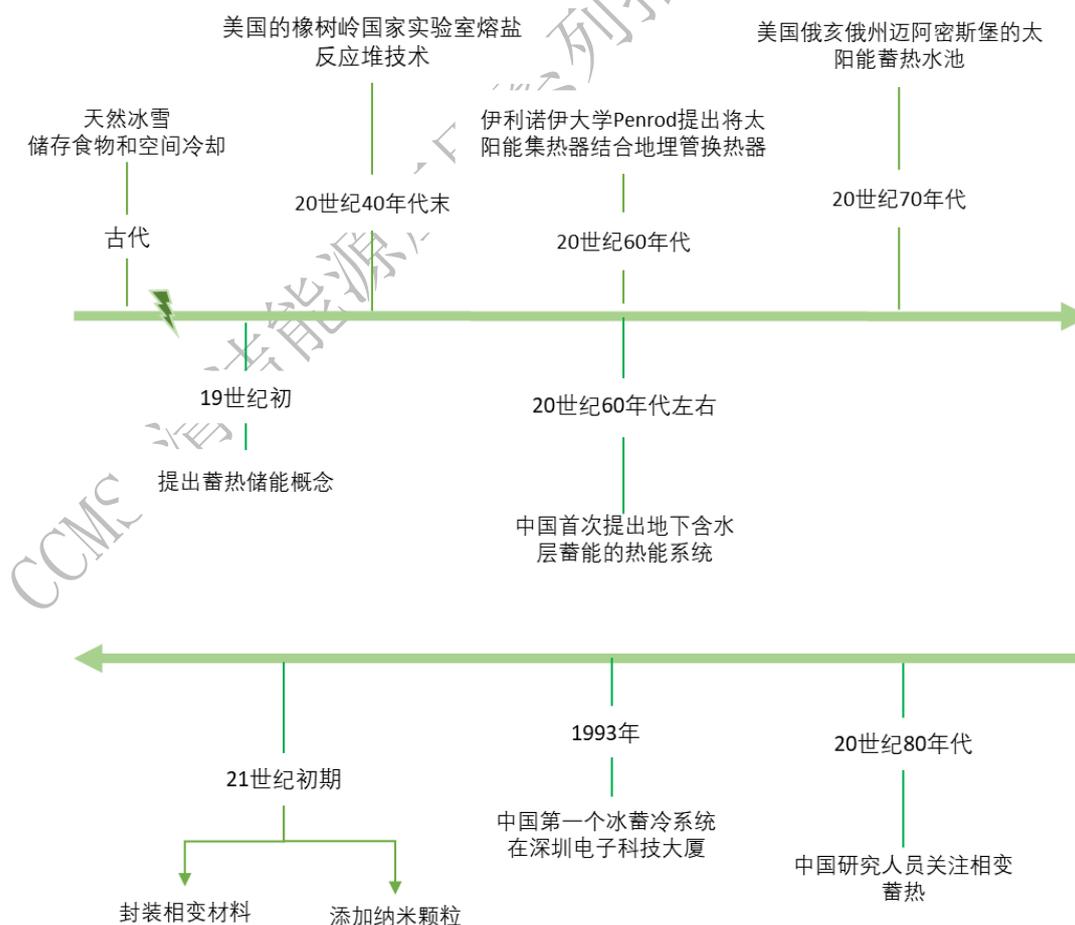


图 1-3：发展历程示意图

1.2 应用价值

蓄热储能是一种储能技术，其原理是将热能储存起来，在需要时以热能或其他能量形式释放出来的一种技术。推广这种技术的目的是实现错时用能，以便匹配能源供给与需求之间的时间不同期问题，提高能源系统的运行效率。

蓄热储能技术具有重大的应用价值。

首先，蓄热储能技术可以有效缓解可再生能源的间歇性特性。通过将太阳能和风能等不稳定能源的多余能量转化并储存起来，再在需要时释放，可以提高能源利用率、降低能源浪费，从而增强能源系统的稳定性和可靠性。蓄热储能技术有助于提高能源供应的灵活性。在能源需求高峰时段，可以释放储存的能量以满足需求，从而平衡供需关系，减少能源供应不足的情况发生，保障能源安全。

其次，蓄热储能技术还能够提升能源的利用效率。通过将太阳能和风能等可再生能源的能量进行储存和调度，可以实现清洁能源的稳定供应，减少对传统化石能源的依赖，推动能源结构向清洁、低碳方向转型。

最后，蓄热储能技术在节能方面潜力巨大。将工业等部门的余热运用在建筑热能的运行阶段，例如废热余热供暖、废热余热供热等，减少了由一次能源燃烧带来的气候问题。将夜间电能储存用于白天的热能需求，既减少了燃烧化石燃料产生的电能的浪费，也减少了白天需热、重新燃烧一次能源带来的能源浪费和二氧化碳排放。

蓄热储能具有独特的优势，可以促进供暖和制冷系统的电气化，同时通过提供能源和热的灵活性来促进可再生能源发电。表 1-1 概述了不同市场中提供的服务。

表 1-1：蓄热储能服务和价值概述【10】

部门	服务	价值	具体内容
电力领域	联合可再生能源	加速可再生能源增长	蓄热储能被认为是弥补可再生能源间歇性的关键技术之一。这些系统能够储存来自可再生能源的多余能量，将其保留数小时甚至数周，甚至有些技术能够实现长达数月的储存，而不会有功率输出的损失，例如地下水中的显热储存。
		减少对化石燃料发电的依赖	在可再生能源发电量过剩的情况下，蓄热储能允许这些能源系统通过用储存的可再生能源取代碳排放的化石燃料发电，减少对日益昂贵的化石燃料的依赖。

	灵活性	供应安全	蓄热储能通过存储电网规模的可再生能源和优化本土能源的使用来提供能源安全（特别是在长期应用中）。
		利用电网基础设施	蓄热储能可以稳定电网并推迟对基础设施的维护需求。
	服务	能源套利	蓄热储能系统可以通过在低需求和低价格期间购买电力，并在高需求和高价格期间将其卖回电网来参与批发能源市场。这种做法被称为能源套利，使蓄热储能能够从价格差异中获益。
		稳定性服务	某些蓄热储能可以在几秒钟内对电网波动做出快速响应，以保持电网的频率稳定性。
加热和冷却	工业流程脱碳	减少对化石燃料的依赖	蓄热储能可以使工业界减少在其工业过程中使用不稳定的化石燃料，并降低总体生产成本。
		定制热能需求	不同的工业过程需要不同的加热能力和公用设施，如蒸汽、空气和热水，可以应用不同的蓄热储能技术。
		优化电气化加热和冷却	蓄热储能可以允许电气化的工业级加热和冷却解决方案，以利用非高峰期的价格来降低生产成本。
		余热回收	蓄热储能可以优化工业过程排放的热能，使其再次用于能源系统，而不是作为废物排放。
	脱碳	减少对化石燃料的依赖	蓄热储能和电气化可以消除具有成本竞争力的化石燃料，满足供暖和制冷消耗。
		区域供热和制冷：	蓄热储能系统（地下蓄热储能、储罐和坑式存储）可用于在区域应用中每小时、每天或季节性提供大规模的热灵活性和供应安全性。
		优化电气化加热和冷却	蓄热储能可以允许电气化加热和冷却系统（热泵、电加热器等），通过最大限度地减少过度使用和利用非高峰价格来优化其运营和成本效益。
		余热回收	蓄热储能可以通过将余热转移到重复利用中来优化某些住宅和商业应用中的供热，并降低整体能源消耗。
联合	热电联产	热电联产与蓄热储能相结合，可以同时参与电力和热能市场，这有助于为消费者提供独特、更清洁的能源产品。	
	电厂转型	退役电厂的重新利用使传统上依赖化石燃料的地区能够公正地过渡到清洁能源地区。这使这些地区的能源生产保持稳定。	
能效	提高能源效率	节省成本	通过存储热能（减去损失），特别是废热，蓄热储能首先减少了热能的总产生量，从而降低了整个能源系统的成本。
		降低碳成本	蓄热储能可以使各个行业部门（食品、造纸、运输等部门）减碳。

1.2.1 平衡可再生能源的波动性

能源是推动社会经济发展的关键要素，但长期使用化石能源已经严重威胁到经济和环境的可持续性。因此，全球越来越多的国家和地区开始认识到可再生能源的重要性。可再生能源具有清洁、无污染的特点，是支持和推动可持续发展目标的基石，也将成为未来能源体系的重要组成部分。大力发展可再生能源不仅可

以减少对传统化石能源的依赖，降低碳排放，改善环境质量，还能促进经济转型升级，推动绿色低碳发展。

近年来，中国的可再生能源在能源部署中扮演着越来越重要的角色。从 2014 年至 2022 年，中国可再生能源发电量呈近乎直线增长，并且增速较快，实现了约 5.69 倍的增长。太阳能光伏装机容量也在持续增加，2022 年达到了 397121 兆瓦，是 2014 年的 13.8 倍【11】。

然而，可再生能源的间歇性带来了一定挑战，如天气和季节变化影响发电效率【12】。

为解决这一问题，储能系统被广泛应用，其中蓄热储能技术是一种重要的解决方案。除光伏发电系统外，太阳能集热技术也在供暖领域得到广泛应用。政策鼓励、技术进步和应用范围的拓展，使太阳能集热供暖系统在中国的西北、北方地区发展迅猛，如图 1-4。



图 1-4：我国“太阳能供热+蓄热储能技术”分布图（不完全统计）

1.2.2 提高能源利用效率

随着中国工业的不断发展，中国余热回收资源量也在不断上涨，由 2017 年额定 11.4 亿吨标准煤上涨至 2021 年的 17.7 亿吨标准煤，未来余热回收市场发展空间巨大【13】。

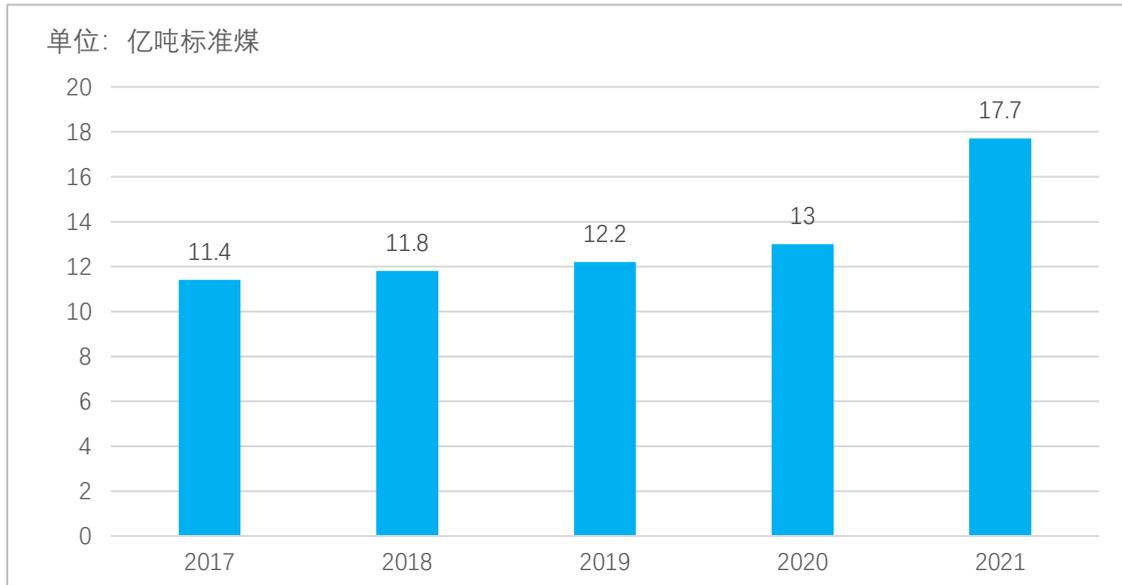


图 1-5: 2017-2021 年中国可回收余热资源均值【13】

工业、交通和建筑等领域的热能利用均存在热损失问题，包括火力发电厂排放的废气、设备和管道的热损失，以及燃气轮机和内燃机排放的废气。约 75% 的化石燃料被用于提供和维持热量，超过 60% 的能耗以低品位热能的形式损失【13】【14】。

在工业领域，众多制造和资源开采活动主要依赖天然气、石油和电力等大宗能源。此外，一些行业能够通过资源回收从废物中回收燃料，进一步提供辅助能源。工业设施常常生产蒸汽和电力，以供自身运行所需。在发电过程中，可以捕获副产品产生的热量，并将其用于工业蒸汽生产、加热或其他工业应用，有效提高能源利用率。传统的发电效率大约为 30%，而采用热电联产技术（也称为联合热电供应）则能将高达 90% 的燃料能量转化为可用能源，显著提高能源的综合利用效率【15】。

有效利用低品位废热能可以显著降低化石燃料的使用。已经开发了多种回收低品位废热能的技术，包括朗肯循环发电系统、热泵、固态电源转换器（如热电、热电化学电池、和热再生电池）等。尽管这些技术可以在一定程度上提高化石燃料燃烧的整体效率，但在某些情况下，它们无法回收热能。这主要归因于三个原因：低品位废热能通常是不连续的，供需位置不匹配，以及供需时间不匹配。这些限制严重制约了废热能回收技术的广泛应用，阻碍了化石燃料化学能的整体转化效率【13】。因此，迫切需要一种技术来确保低品位废热能的高效利用。

然而，由于热能供需之间存在空间和时间不匹配的问题，大部分废热难以回收。为了解决这个问题，蓄热储能技术，包括显热、潜热和热化学储热形式的技术，应运而生。近年来，蓄热储能系统因其密度大、长效、耐用和成本低等优点而得到发展，对于高效利用低品位余热至关重要。

1.2.3 高灵活性

蓄热储能技术在需求转移方面发挥的作用主要体现在平衡能源供需之间的差异【16】。通过将能源在低峰时段存储起来，在高峰时段释放，可以调节能源供应与需求之间的差异，从而实现更有效的能源利用和分配。这有助于提高能源利用效率，降低能源成本，并减少对高峰时段的能源需求压力。

通过推动部门整合，使整个能源系统受益，依靠可再生能源电力满足更大规模的能源需求【16】。蓄热储能技术与可再生能源发电系统集成，当太阳能或风力发电可用时，储存过剩的电力，并在需要时释放，以满足电力需求。工业领域，蓄热储能技术用于优化能源使用和生产过程。高峰期储存额外的能量，然后低峰期使用，以平衡能源需求。蓄热储能技术与建筑和住宅的暖通空调系统集成。太阳能热能或其他可再生能源供应充足时，储存多余的热量或冷量，并在需要时释放，以提供舒适的室内环境。蓄热储能技术与智能电网系统集成，通过预测和管理能源需求，优化能源供应和分配。这种整合可以提高电网的灵活性和韧性，降低能源成本，并促进可再生能源的大规模应用。

蓄热储能技术在电网管理中扮演着重要角色。蓄热储能技术帮助平衡电网的负载，减少高峰时段的电力需求压力，从而降低电网的运行成本和提升电网的稳定性。蓄热储能技术系统可以提高能源系统的灵活性，因为它们允许在低负荷时段存储能源，并在高负荷时段释放能源【16】。这种灵活性有助于缓解电网压力，因为它可以平衡能源供应和需求之间的差异，减少高峰时段的电网需求，从而降低了对电网的压力。此外，蓄热储能技术还可以降低昂贵的电网升级需求，通过优化能源利用来延迟或避免对电网基础设施的昂贵扩建或升级。

蓄热储能的灵活性也体现在季节性蓄热中。蓄热储能系统可以根据季节性的能源需求变化进行调整。在夏季时可以利用太阳能等可再生能源进行蓄热，然后

在冬季释放以供暖。这种灵活性使得能源供应能够适应季节性需求的变化。季节性蓄热储能系统灵活地应用于不同的能源系统中，包括供暖、制冷、热水供应等领域。可根据需要在不同的应用场景中进行调整和配置，满足不同的能源需求。

1.2.4 助力双碳

碳排放主要来自于化石燃料的燃烧，满足工业、建筑和交通等领域对热能的需求。全球能源相关排放中，约有 45%来自热能的使用。工业对热能的应用占据了总热需求的 40%，而建筑物的供暖和制冷需求也是一个重要贡献者，约占总热需求的 30%。工业用热产生二氧化碳排放量占全球与能源利用排放二氧化碳的 20%，建筑用热产生二氧化碳排放量占全球与能源利用排放二氧化碳的 10%【17】。

《Renewables2023》预计 2023~2028 年与热量相关的累计二氧化碳排放量将达到 86 吉吨，超过剩余碳预算的五分之一，将全球变暖限制在 1.5°C的可能性为 50%有望成为建设低碳社会的必经之路。

工业领域的余热是作为各种工业过程的副产品而产生的多余热量。例如钢铁工业：荷兰钢铁生产厂 Ijmuiden 的一个项目展示了充分利用该工厂废热的能源潜力。该项目的全面实施显示出令人印象深刻的结果：每年可以通过使用 500 兆瓦时的蓄热储能系统节省 230 万吉焦（6500 万 Nm³）的天然气消耗，并减少 130000 吨二氧化碳排放【18】。电力领域，北京热力集团“熔盐蓄热产业化推广供热供冷研究与示范”项目主要供应北京西站非采暖季制冷机组蒸汽需求和采暖季蒸汽需求。通过该项目，预计可以减少供热 42593 吨二氧化碳当量的温室气体排放。纸浆和造纸行业，热量用于加工和干燥材料，约占总热量需求的 8%，占全球工业二氧化碳排放量的约 2%。在总热量需求为 30 亿瓦时/年情况下，与天然气相比，可以避免 6667 吨二氧化碳排放，并且每兆瓦时节省高达 25%的热量。

农业领域，热量有多种用途，包括畜牧生产、耕地作物的干燥等。有效利用可再生热能来减少农业排放至关重要。举例来说，土耳其的 BalıkesirGönen 农业计划将其打造成一个近乎零排放区，通过利用可再生能源提供热能。项目拥有 1 兆瓦的蓄热储能装置，该系统将与为工业区供电的光伏电池板相结合，覆盖 800 公顷。多余的发电将以热能的形式储存在高达 400° C 的温度下。在这种情况下，

蓄热储能系统通过以下方式支持当地地热资源。据估计，通过该蓄热储能应用的调峰操作可以减少排放 128 吨二氧化碳【18】。

建筑领域，建筑供热/制冷脱碳是实现双碳目标的核心。蓄热储能提供稳定供暖，清洁柔韧性解决方案：1) 转向清洁的替代品，如清洁电力、太阳能热能和清洁燃料；2) 优化热能消耗，例如废热再利用和提高效率。

CCMSA 清洁能源应用系列报告 010-58934233

表 1-2：蓄热储能项目以及减排成效

部门名称	应用领域	项目名称	技术类型	减碳量 (t)
工业部门	电力部门	熔盐蓄热产业化推广供热供冷研究与示范	熔盐蓄热	42593 (供热应用)
		吉西基地鲁固直流白城140万千瓦外送项目	熔盐蓄热	293746 (光热)
		三峡能源海西基地格尔木光伏光热项目	熔盐蓄热	293746 (光热)
		水泥窑	整个行业	/
	余热利用	纸浆和造纸行业	/	6667 (热能需求为 30 GWh/年)
钢铁行业余		Ijmuiden 的项目 (荷兰)	/	130,000
	工业废热	德国汉堡易北河下的供热隧道 (国外)	显热地下蓄热	/
		静脉产业园余热综合利用项目	/	90000
	采暖	中国辽宁邮电指挥相变蓄热中心	相变蓄热	719.1
建筑部门		张家口崇礼二道沟热源厂固体蓄热煤改电项目	显热固体蓄热	119700
		新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目	显热固体蓄热	19091
		北京大兴国际机场场热源热泵供暖项目	显热地下蓄热	8304
		河北益民股份太阳能蓄热项目	显热地下蓄热	4723.5
		陕西省洋西新城地热清洁供热项目	显热地下蓄热	86000
	北京市穆家峪希望小镇太阳能+峰谷电采暖项目	显热蓄热水箱	8646.1	
农业部门	余热利用	土耳其的Balikesir Gönen农业计划	/	128

2. 型式分类

蓄热储能技术可分为显热蓄热储能、潜热蓄热储能和热化学蓄热储能。显热蓄热储能被认为是三者中最简单的一种，它使用蓄热材料将热量直接储存在材料体内。潜热蓄热储能利用热能诱导材料内部相变，然后在恢复到原始状态时释放热能【19】【20】【21】。热化学蓄热储能使用化学反应或者吸收（吸附）来产生热量【22】【23】【24】（分类可见图 2-1）。

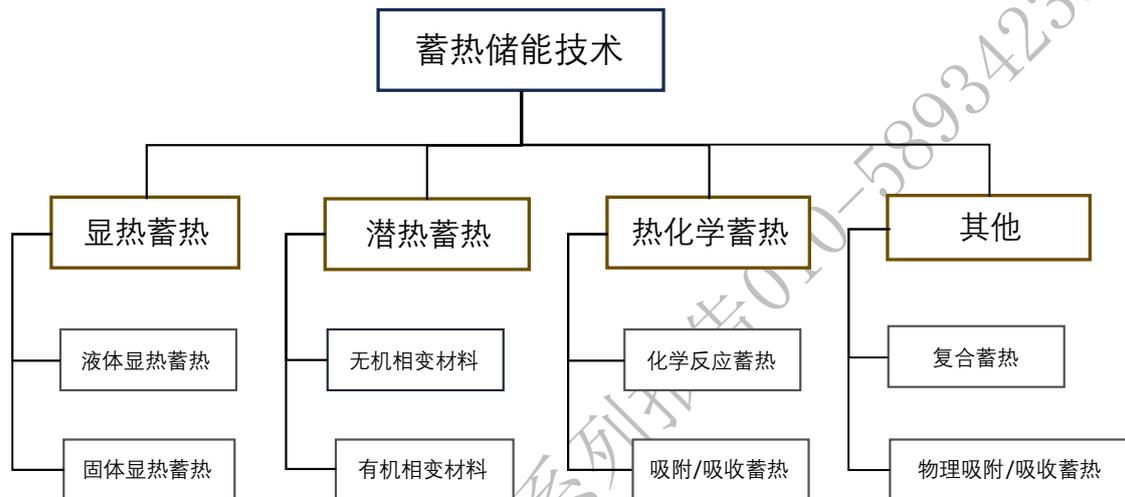


图 2-1：蓄热储能分类

除图 2-1 所示的分类方式之外，还有其他的分类方式。

显热蓄热储能主要包含使用水作为储能介质的罐式蓄热储能技术、地下蓄热储能技术、固态蓄热储能（例如陶瓷砖、岩石、混凝土等）、熔融盐等。潜热蓄热储能包括冰蓄冷、零度以下的相变材料（PCM）、低温 PCM、高温 PCM 等。热化学蓄热储能系统包含化学循环（钙循环）、水合盐、吸收式系统。

2.1 显热蓄热储能

显热蓄热储能是目前最发达的蓄热技术之一【25】，已在建筑和工业领域使用多年。显热蓄热储能主要依赖物质的温度变化来存储和释放热能，这种技术的具体应用形式包括利用热水和冰进行热能的存储，适合于日常供暖和制冷需求【16】。显热蓄热储能可根据蓄热介质分为液体（如水、油基流体、熔盐等）和固体（如蓄热砖、岩石、金属等）。

2.1.1 显热蓄热方式

对于显热蓄热储能，目前最常见的技术之一是家用热水罐。其他技术，如冰水和冷冻水储存，在包括澳大利亚、美国、中国和日本在内的几个国家发挥着重要作用，因为公用事业公司寻求减少峰值负荷，而消费者则寻求降低电费。地下热能储存系统经常运用在加拿大、德国和许多其他欧洲国家【16】。

(1) 罐式蓄热储能

使用流体（以水为最普遍的介质）作为储能介质储存热能的蓄热方式，通常运用在太阳能板、电力系统。小规模罐式蓄热可以和太阳能结合用于家庭住宅。罐式蓄热储能系统还用于空间供热、热电联产等。由于蓄热罐的体积在制造工艺和技术上有一定的困难，因此该技术在大型应用（商业、工业和区域供热）具有一定的局限性。

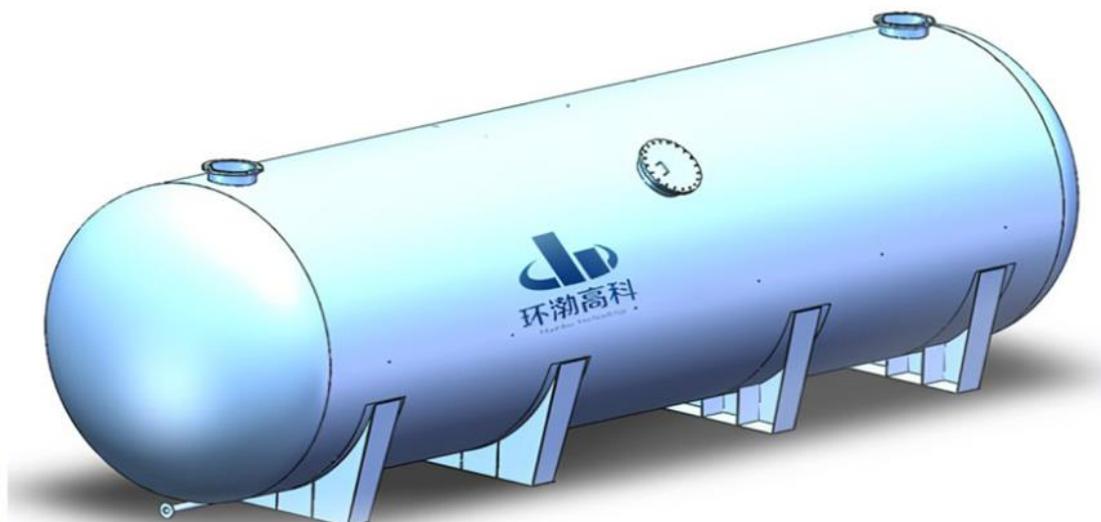


图 2-2：卧式蓄冷罐（图片来源：北京环渤高科能源科技有限责任公司）

最常见的储能系统之一是基于水的显热的热水箱。加热装置在绝缘水箱外部或内部加热水，储存很短的时间（最多几天）。储存的能量取决于热水温度和水箱容积。储罐的保温决定了热损失并限制了储存时间。

(2) 固态蓄热

固态或填充床储热是利用颗粒储存热能的技术，适用于各种规模。流体通过填充床传递热能，可以使用多种材料，如陶瓷砖或岩石混凝土。这种技术简单、成本低，常用于建筑领域。同时也在研发新材料和系统以满足更高温度输出的需

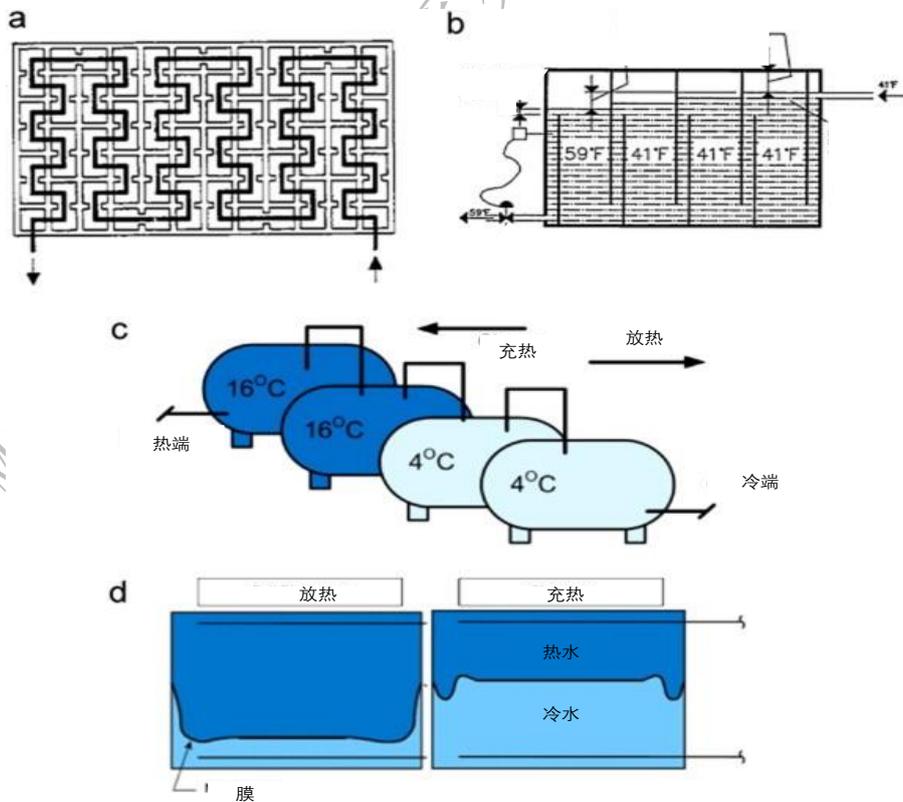
求。

(3) 熔盐

在环境温度下，盐通常呈固态，蓄热时盐温度逐步大于熔点并保持在因而呈液态。熔盐常用来储存高品位热能。但是它容易固化，因而有严重损坏辅助设备的可能。因此，熔盐的应用局限于需要高温的严格受控环境，例如电力部门。在电力部门中，几乎仅用熔盐帮助整合聚光太阳能技术（CSP），白天储存热能，晚上则将其释放以驱动涡轮机并保证持续发电。

(4) 水蓄冷技术

水蓄冷是利用水的显热实现冷量的储存技术。蓄冷系统与谷峰电价政策相结合，利用电力需求低谷、低电价时段进行蓄冷，在电力需求高峰、高电价时段释冷供应空调系统需求，均衡城市电网负荷，起到“削峰填谷”的作用。蓄冷槽是水蓄冷系统的关键设备，主要分为多蓄水罐（多蓄水槽）、挡板式、温度分层式蓄冷、迷宫式蓄冷和隔膜式蓄冷【30】。其中，温度分层式蓄冷利用不同温度下水的密度不同的特点，使得在蓄冷罐里密度较大蓄冷介质出现在底部。



(a) 迷宫式储罐、(b) 挡板储罐、(c) 多蓄水储罐 (d) 隔膜式罐

图 2-3: 蓄热罐种类【30】

(5) 地下蓄热储能

地下蓄热储能技术是将热能或冷能储存在地下。储能介质可能是由土壤、沙子、坚实基岩、人工井或含水层中的水组成的地质层。地下蓄热储能的关键技术有含水层蓄热(ATES)、地埋管蓄热技术(BTES)和热井蓄热技术(PTES)。

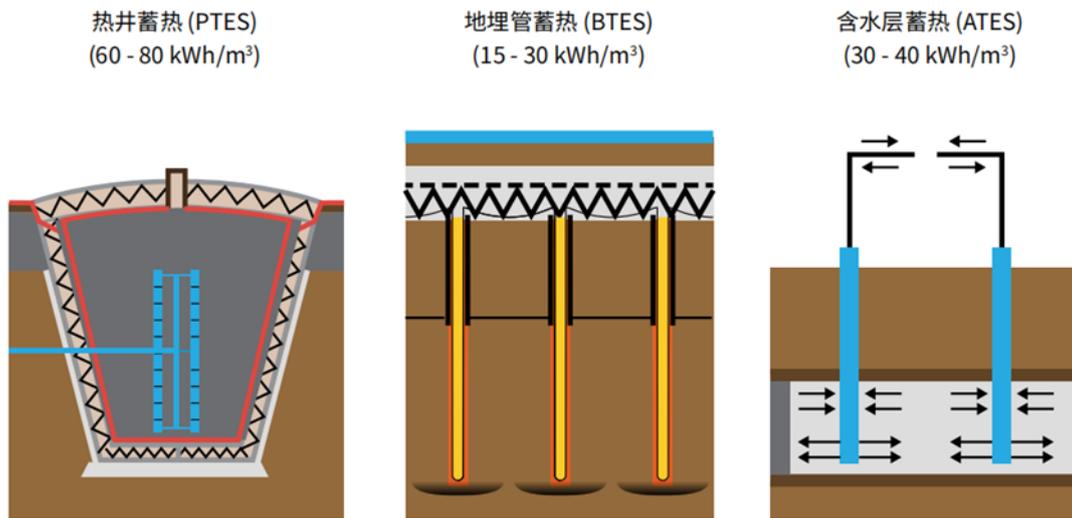


图 2-4：地下蓄热【16】

UTES 系统能够储存来自太阳能或工业工艺的热能，或者冬季空气中的冷能，并在需要时释放，用于供暖或制冷。ATES 系统利用地下水层为建筑提供供暖和制冷，而 PTES 系统则通过地下井和管道直接进行能量储存和释放。

2.2 潜热蓄热储能

相变储热具有能量密度高、热量充放过程温度近似恒定的优点。目前，最常见的是“固-液相变材料”。根据相变材料的化学成分和性质，可分为无机、有机及复合相变材料。无机相变材料包括熔盐、水合盐、金属合金等。其中，水合盐比较适用于中低温储能，但相变时易出现过冷和相分离问题。金属合金比较适合中高温储能，但价格昂贵。熔盐的价格经济，且具较大的储能密度。然而，多数无机类相变材料都具有一定腐蚀性。有机相变材料包括石蜡、脂肪酸、多元醇以及聚烯烃、聚多元醇等，其特点是无明显相分离及过冷现象(有机糖醇类除外)、腐蚀性小，但同时具有体积储热密度较小、热导率低、易燃烧等问题。

2.2.1 潜热蓄热储能材料

(1) 无机相变材料

1) 熔融盐相变储能材料

熔融盐类相变材料是一种应用广泛、具有巨大潜力的高温储能材料。主要适用于中高温范围，涵盖从 120°C 至 1000°C 的温度范围。这些相变材料在吸收和储存热量后，能够为其他设备或场合提供充足的热动力，因此在电站、太阳能发电以及工业余热回收等领域有着广泛的应用。

常见的熔融盐包括碳酸盐、氯化盐、硝酸盐和氟化盐。

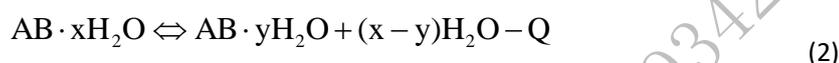
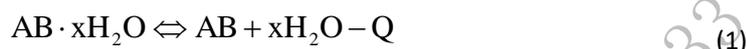
表 2-1: 几种重要的相变材料

材料名称	熔点 (°C)	潜热 (kJ/kg ⁻¹)	导热系数	密度 (kg/m ³)
NaNO ₃	307	172	0.5	2260
KNO ₃	333	266	0.5	2110
KOH	380	149.7	0.5	2044
NaCl	802	466.7	0.5	2160
K ₂ CO ₃	897	235.8	/	2290
Na ₂ CO ₃	854	275.7	0.5	2533
KF	857	452	0.5	2370
NaF	996	794	/	2558

2) 水合盐相变蓄热材料

水合无机盐具有适宜的相变温度、较大的相变潜热、原料廉价以及热导率较高（相对有机相变材料而言）等优势，有望成为中低温热利用领域（包括清洁供热、空调制冷、冷链物流等）理想的储热材料【16】。然而，水合盐容易产生过冷、相分离等问题。水合盐相变材料主要分为两类，一类是水合盐相变材料熔化过程中，其固相与液相中的盐分子稳定存在且含量相同，此类为稳定水合物；另一类为不稳定水合物，其在受热时会转变成含有较少物质的量的水的一种类型的水合盐，升温过程中由于该盐溶解度较低，甚至随温度升高溶解度下降，导致

即使温度高于熔点, 仍有部分盐未能溶解于结晶水中, 导致出现固液相分离现象。不稳定水合盐在实际应用中, 由于加热过程发生固液相分离, 导致底部存在部分盐不溶于自身脱落的结晶水中, 在凝固放热过程, 晶体产生主要从饱和溶液及固体沉淀物的交界处开始然后向上生长, 最终底部会存在部分无水盐。随着加热冷却循环, 底部沉淀逐渐增多, 导致结晶水合盐储热能力下降甚至丧失。结晶水合盐通常以 $AB \cdot xH_2O$ 表示, 储/释热机理见式 (1) 与式 (2)。



式中 x 和 y 代表结晶水合盐水分子个数; Q 表示水合盐相变过程的相变潜热。

表 2-2 为常见结晶水合盐相变材料热物性数据。

表 2-2: 常见结晶水合盐相变材料热物性

相变材料	相变温度 /°C	相变潜热 / (J·g ⁻¹)	密度 (kg·m ⁻³)		热导率 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	
			固液	固液	固液	固液
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29.0	190	1710			
LiNO ₃ ·3H ₂ O	29.9	296				
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.0	180	1485		0.56	0.45
	32.4	251				
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	34.0	251	1440			
Na ₂ HPO ₄ ·10H ₂ O	35.1	265	1422			
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	46.0	210	1666		0.76	0.38
CH ₃ COONa·3H ₂ O	58.0	180	1450			
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89.0	150				
NH ₄ Al(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	93.5	259.9				
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117.0	168.6	1569	1450	0.69	0.57

3) 合金相变蓄热材料

通常利用金属合金(由单一金属或多种金属等组成的二元、三元或四元合金)的相变特性,例如“固-液相变”或“固-气相变”来实现热能的储存和释放。这些材料在特定温度下会从固态转变为液态或气态,吸收大量热量并储存能量。当温度降低到一定程度时,这些材料又会从液态或气态转变回固态,释放之前吸收的热能。

表 2-3: 几种合金相变材料

合金相变材料名称	特点
Al-Si 合金	相变温度 576°C, 更适用于太阳能辐射强度(1.2~1.3kW·m ⁻²)较高的区域,且使用温度高达 800°C左右, 合金储热能力强、寿命长和经济性良好
Al-Cu 合金	蓄热性能和 Cu 的含量息息相关, 随 Cu 含量的增加, Al-Cu 合金的质量潜热呈递减趋势, 体积潜热却呈上升趋势
Zn-AlIII合金	相变温度 427°C, 更适用于太阳能辐射强度(0.8~0.9kW·m ⁻²)较低的区域,且使用温度高达 600°C左右
Ga 系低熔点金属储热材料	有望与传统的有机和无机储热材料进行竞争。的低温焊料(钎料)具有极高的导热系数和较低的比热容, 使其在亚微秒的时间内实现快速的充/释热, 运用在对材料重量要求不高的领域中。
Pb-Sn 合金	熔点为 183°C, 相变潜热为 104.2J/g, 低熔点相变储热材料含有铅和镉的合金受环保条件的限制, 用在军事或某些独立的民用领域。

(2) 有机相变材料

有机相变材料一般分为石蜡类(烷烃类及其混合物)和非石蜡类(脂肪酸、醇类、脂类等及其衍生物)。

有机相变材料具有许多优点,包括在固态状态下成型性较好、不易出现过冷和相分离现象、对材料的腐蚀性较小、性能稳定、毒性低以及成本低。另外,有机相变材料的热稳定性好,能够在高温环境下稳定存在。其能量密度高,相较于传统热储能材料,其能量密度可达到五倍以上。此外,有机相变材料可重复使用,使用寿命长。同时,它们也存在一些缺点,如导热系数小、密度较低、熔点低、

易挥发、易燃以及易氧化老化。

实际应用中，考虑到成本问题，大多采用工业石蜡（如图 2-5）。



图 2-5：石蜡相变蓄热【31】

(3) 复合相变材料

复合相变材料是指由不止一种相变材料构成的组合性相变材料。复合相变材料分为相变复合颗粒（如图 2-6）和相变储能胶囊/棒/碟/板等（如图 2-8，图 2-9）。多孔载体的尺寸可以决定不同粒径的相变复合颗粒，一般直径为 0.1 毫米~5 毫米。胶囊技术形成的颗粒，大小在 0.1 毫米~100 毫米之间。由于胶囊颗粒体积微小，相变微胶囊可以灵活地应用于芯片、纺织纤维、皮革制品、建材等领域中（如图 2-7）。



石墨基相变复合颗粒膨胀珍珠岩基相变复合颗粒



膨胀石墨基相变复合颗粒
图 2-6：相变复合颗粒【31】

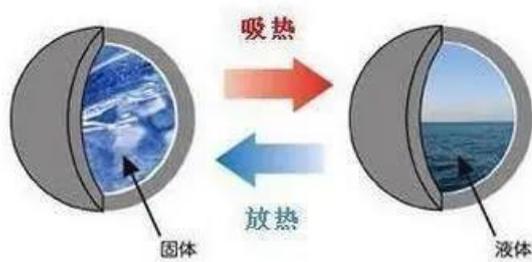


图 2-7：相变微胶囊示意图

采用棒、碟、板等形状的相变定形材料，产品尺寸在 220mm~790mm 之间，其储能量大、尺寸灵活，多用于大型储能项目、节能改造项目、冷库冷链等场景，可方便快捷应用到现有水箱、仓库中。



图 2-8：德国 kraftBoxx 各种形态相变定形材料示意图

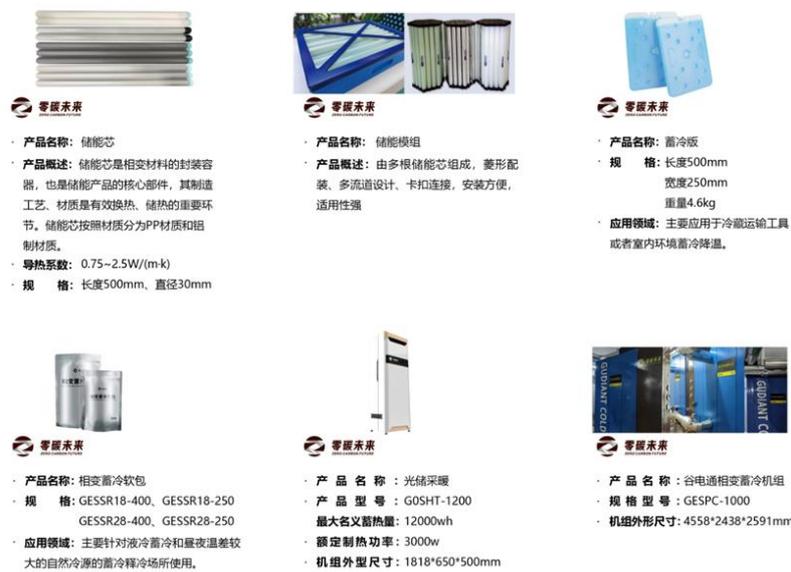


图 2-9:零碳未来（重庆）能源发展有限公司各种形态相变材料封装示意图

2.2.2 潜热蓄热储能方式

潜热储热技术具有储热密度大、相变温度稳定等优点，在太阳能热利用、废热余热回收、电力“移峰填谷”、热管理系统及建筑节能等诸多领域有着广泛应用。

(1) 冰蓄冷（ITS）

冰具备高熔化热（334kJ/kg）、高热容量（4.2kJ/kg·K）及无腐蚀性的特性。此外冰由水凝固而成，因此容易获得而且廉价。为了将冷能锁在冰中。为了将冷能锁在冰中，可以通过冷却装置或制冰机使用低谷或可再生电力冷冻水。ITS 系统中使用的传热流体可以是制冷剂，也可以是二次冷却水【34】。该技术的可靠性和简单性，它已被广泛用于主要在工作时间被使用的建筑物中，例如商场、校园建筑、医院、地铁站等。

冰蓄冷技术具有两种典型配置，即大容量冰蓄冷和冰盘管蓄冷。冰盘管蓄冷技术又进一步分为外部融化冰盘蓄冷和内部融化冰盘蓄冷技术。

外部融化冰盘在充能过程中，液态制冷剂或乙二醇溶液在热交换器盘管内循环，并在盘管的外表面产生冰。在排放过程中，负载返回的水通过蓄冰罐循环，并与冰直接接触冷却。外部融冰盘管装置的形状和充放电过程如图 2-10、图 2-11 所示。

在内部融冰盘管储存系统中，传热流体（如乙二醇溶液）通过被浸没在满水的蓄冷罐中的缠绕盘管循环。在充能过程中，低温乙二醇溶液流经罐内的盘管，盘管的外表面产生冰。在放能过程中，温热的乙二醇溶液流过盘管，导致冰从内到外融化(如图 2-12 所示)。



图 2-10：外部融化管冰盘【34】

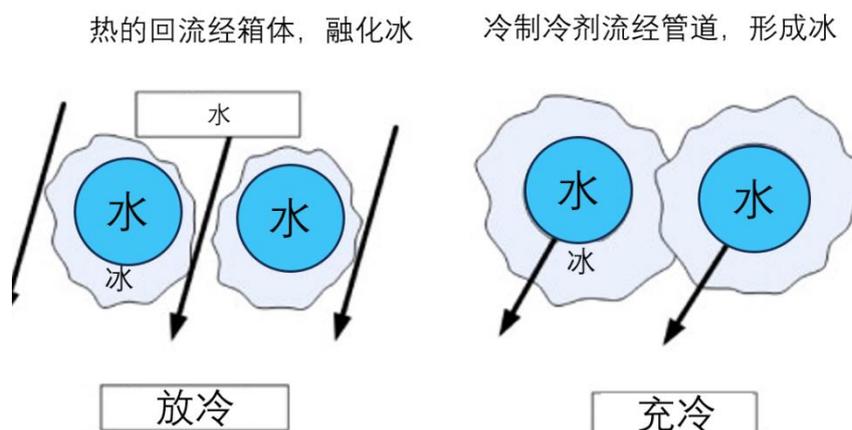


图 2-11：外部融冰储存系统的充放电程序【34】

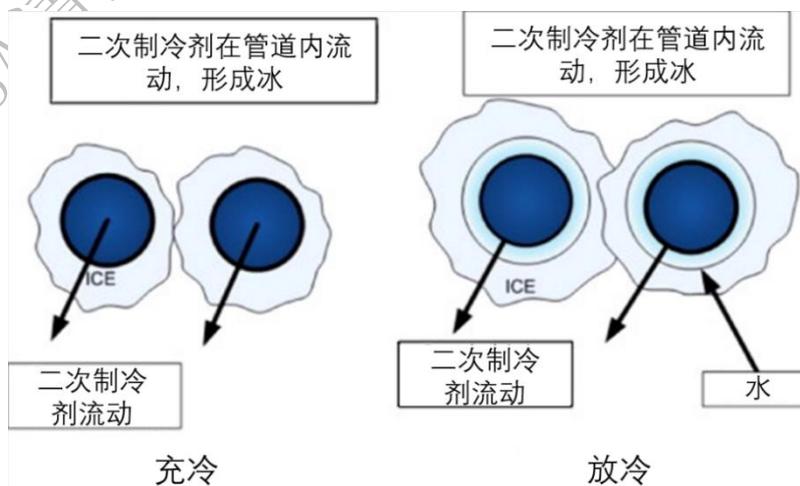


图 2-12：内部盘管冰存储系统的充放电程序【34】

大容量冰蓄热系统在冷冻温度下将冰储存于装有冷冻水和冰的一个储罐中。充能时，泵将冷却水从储罐传送到制冰机后，冰回落到储罐。释能过程中，使用另一台泵将储罐的冷却水循环至负荷处，之后温水再从负荷处返回到储罐顶部。冷能还能以冰浆的形式储存用作传热流体。

(2) 蒸汽蓄热

蒸汽蓄热技术是一种利用蒸汽作为媒质来储存和传输热能的技术。在这种技术中，蒸汽被用作热能的载体，通过加热水转化为蒸汽，将热能储存在蒸汽中，然后在需要时释放热能。蒸汽蓄热技术可以应用于工业生产、供暖系统和能源储存等领域，或者调节部分生产过程中“用汽负荷不均衡，高峰低谷用汽量波动很大”的场合，如太阳能聚光发电。

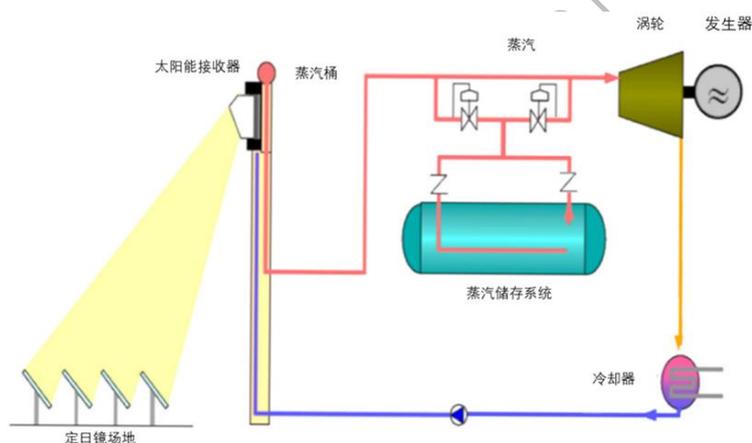


图 2-13: 主动式直接蒸汽蓄热储能系统示意图【35】

蒸汽蓄热器通常由一个圆柱形的钢制压力容器构成，末端为椭圆形，这种结构能够更好地承受高压和高温水/蒸汽。蒸汽蓄能器设计的关键在于考虑热循环，确保材料能够在整个使用寿命内承受而不发生故障。控制容器壁的温度梯度对于避免热机械应力对蒸汽蓄能器的影响至关重要。此外，即使通常使用类似锅炉的熟悉材料，也必须考虑到含水杂质可能引起的腐蚀问题。

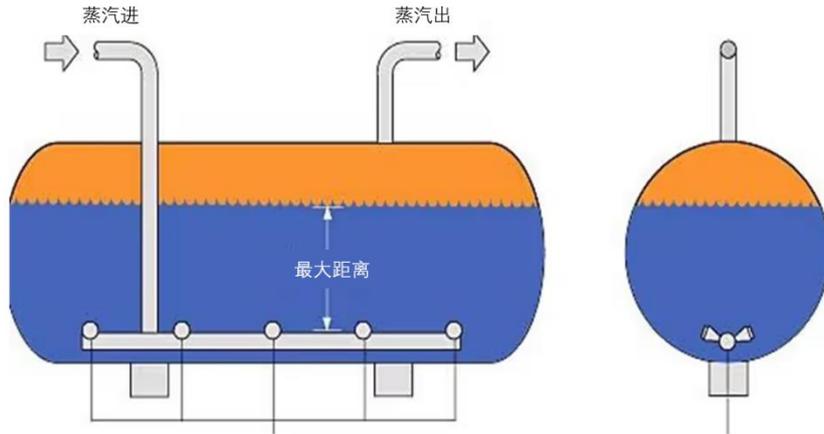


图 2-14: 蒸汽蓄热器示意图 (图片来源: 网络)

(3) 零度以下的相变

零度以下的相变材料 (PCM) 可以是单组分材料或由两种或多种材料组成的混合物, 例如共晶混合物。共晶混合物是按特定比例组合而成, 使其熔点低于单组分材料的混合物。盐水共晶混合物是将盐溶解在水中形成的溶液, 其冻结温度随盐的浓度而变化【16】。零度以下的 PCM 可以满足比标准空间供冷更低的温度要求, 例如在冷链中的供冷。PCM 通常封装以防止泄漏, 并且在大容量储能装置模块中使用, 通过吸收传热流体的热能来冷却到特定温度【16】。

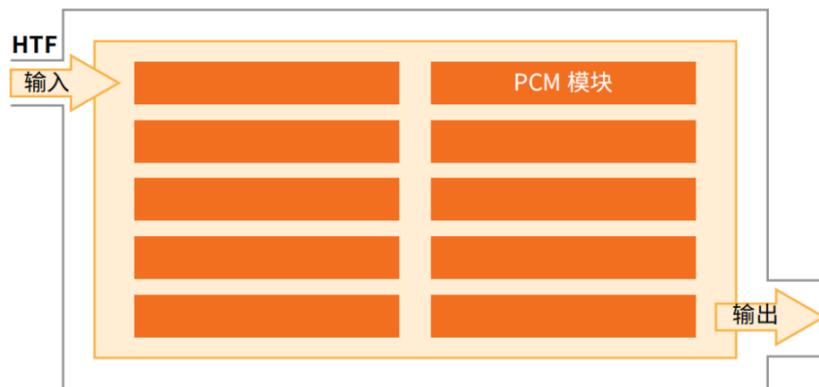


图 2-15: 大容量蓄热系统中的 PCM 封装 (HTF 意味着传热流体【16】)

2.3 热化学蓄热储能

化学蓄热方式适用于长期甚至季节性的热储存, 因为这种热量可以储存较长的时间, 没有显著的热损失【36】。热化学的储能效率高于其他两种方式。热化学的存储效率在 75%~近 100%之间, 然而显热蓄热和潜热存储效率分别在

50%~90%及 75%~90%【16】。此外，热化学蓄热的能量密度相比显热和潜热蓄热更高。化学蓄热材料的存储密度比显热蓄热高出大约 8 倍~10 倍，在类似的存储量方面比潜热蓄热材料高出 2 倍。

热化学蓄热原理的分类示意图如图 2-16 所示。

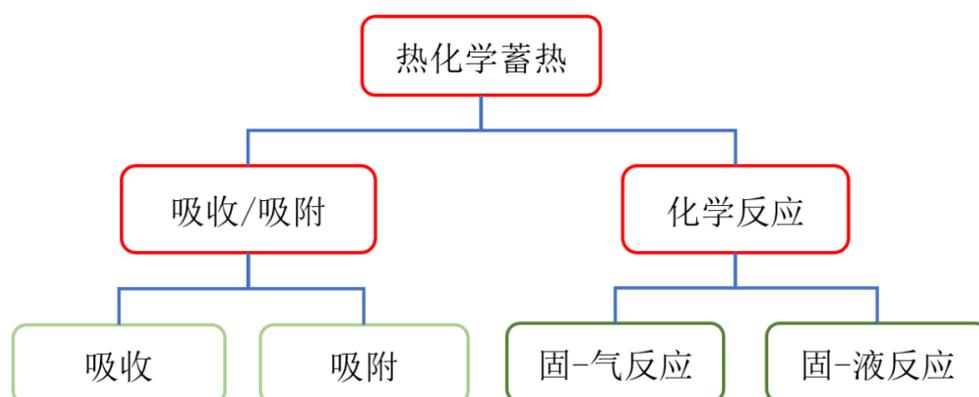


图 2-16: 热化学蓄热储能分类

2.3.1 吸附/吸收蓄热储能

吸收/吸附蓄热用于储存低品位热量(<100°C)和中品位热量(100°C~400°C)。这是由于低温下的高动力学特性使吸附过程对低温应用特别有吸引力，例如空间供暖、生活热水制备或其他低品位和中品位的热量用途【37】。

2.3.1.1 吸附/吸收蓄热材料

通常吸附材料为液体、固体和复合吸附剂，具体示例如下：

1) 液体吸收工作对

针对于液体工作对而言，具体如下表 2-4 所示。

表 2-4: 液体工作对性质【38】

序号	名称	蓄热温度 (°C)	蓄热容量 (Wh/kg)	蓄热密度 (kWh/m ³)
1	LiBr 溶液/H ₂ O	72	561	313
2	LiCl 溶液/H ₂ O	65.6	1219	400
3	CaCl ₂ 溶液/H ₂ O	44.8	254	119
4	NH ₃ 溶液/H ₂ O	155.5	366	98

5	NaOH 溶液/H ₂ O	50	433	154
6	KOH 溶液/H ₂ O	63	727	313

2) 固体吸附工作对

盐合物的特性使其成为在多个领域应用的理想材料，包括电热技术、废热利用以及太阳能集热器等。盐合物因其高能量密度和适合住宅应用的特性而备受关注。

表 2-5: 水合盐反应特性【38】

名称	反应方程	充能温度 (°C)	蓄热容量 (Wh/kg)
MgSO ₄ /H ₂ O	MgSO ₄ ·7H ₂ O ↔ MgSO ₄ ·0.1H ₂ O	150	694
Na ₂ S ₂ /H ₂ O	Na ₂ S·5H ₂ O ↔ Na ₂ S·0.5H ₂ O	约 83	1067
SrBr ₂ /H ₂ O	SrBr ₂ ·6H ₂ O ↔ SrBr ₂ ·H ₂ O	<80	250
MgCl ₂ /H ₂ O	MgCl ₂ ·6H ₂ O ↔ MgCl ₂ ·2H ₂ O	130	477

3) 复合材料

复合吸附剂是一种有多孔结构和高导热系数的添加剂，可以改善吸收/吸附蓄热材料出现的潮解、溶胀和团聚现象，提高反应的速率和效率。优点包括孔隙率高、传热传质效率高、稳定性强、防止膨胀和结块等。

2.3.2.1 吸收/吸附反应蓄热方式

吸收式热泵是一种利用热源驱动的热泵系统，与传统的压缩式热泵不同，它使用热能（如太阳能）而不是电力来驱动。在吸收式系统中，工作原理基于制冷剂和吸收剂之间的化学吸收和释放热能的过程。图 2-17 展示了吸收式系统示意图，该系统配备一个太阳能热源、一个吸收热泵以及分离的浓缩制冷剂和水罐。

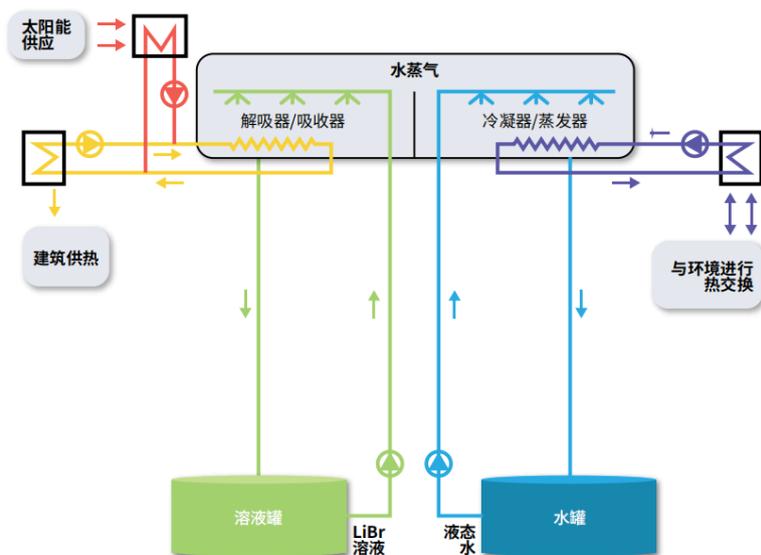


图 2-17: 配备分离器反应器的吸收式系统配置【16】

2.3.2 化学反应蓄热储能

2.3.2.1 化学反应蓄热材料

由于反应焓高，可逆的“固-气”反应相比于吸附过程拥有更高的储存密度的潜力。但由于反应焓高，其实际处理和使用过程相当复杂。

(1) 盐水合物脱水

当气相反应物（如水蒸气）是环境中的自然组成部分时，“固-气”反应变得易于处理。这种情况下，反应可以在开放系统中进行，无需冷凝或存储气态反应物。盐水合反应就充分展现了这一优势。表 2-6 说明盐水合物脱水反应的平衡温度范围适合低温应用

表 2-6: 盐水合物的反应【45】

序号	反应方程	温度范围/°C
1	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_2\text{O}$	100–150
2	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 5\text{H}_2\text{O}$	100–130
3	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 5\text{H}_2\text{O}$	150–200
4	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + 4\text{H}_2\text{O}$	120–160
5	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	210–260

此外，盐水合物脱水反应的热转化率高，理论上可实现的储存密度是热水储存的六到十倍（温度变化 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ ）。然而，这些材料的处理和实际使用非常复杂。

(2) 脱氨反应

氨的合成与分解反应是一个可逆反应，其正、逆反应都需要在高温高压以及催化剂的条件下才能进行。

表 2-7：脱氨反应【45】

序号	反应方程	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
1	$\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3 = \text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3 + 4\text{NH}_3$	25~100
2	$\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3 = \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3 + 2\text{NH}_3$	40~120
3	$\text{MnCl}_2 \cdot 6\text{NH}_3 = \text{MnCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3 + 4\text{NH}_3$	40~160

(3) 金属氢化物

金属氢化物（MH）是一种金属或合金材料，在氢气压力下加热后可实现可逆地吸收氢气形成的物质，其热能储存在金属和氢元素之间形成的化学键中。在释放氢气时，金属氢化物吸收的反应热与形成氢化物时释放的反应热相等，没有氢气被消耗【46】。

表 2-8：金属的氢化反应【45】

序号	反应方程	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
1	$\text{MgH}_2 = \text{Mg} + \text{H}_2$	200~400
2	$\text{Mg}_2\text{NiH}_4 = \text{Mg}_2\text{Ni} + 2\text{H}_2$	150~300

(4) 金属氢氧化物脱水

早在 1960 年， MgO 的水合就被广泛研究， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的脱水早在 1988 年就引起了广泛的关注。

表 2-9：金属氢氧化物的脱水【45】

序号	反应方程	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
1	$\text{Mg}(\text{OH})_2 = \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$	250~350

(2) 钙循环

钙循环 (CaL) 利用氧化钙 (CaO) 和二氧化碳 (CO₂) 之间的可逆反应形成碳酸钙 (CaCO₃)。在该反应中, CaCO₃ 吸收大量热能, 并将其储存在 CaO 和 CO₂ 分子的化学键中。随后, CaO 和 CO₂ 作为储能介质分别储存, 其储存时间可以达到数周甚至数月而不会有能量损失。当需要能量时, CaO 和 CO₂ 重新结合形成 CaCO₃, 并释放热能。

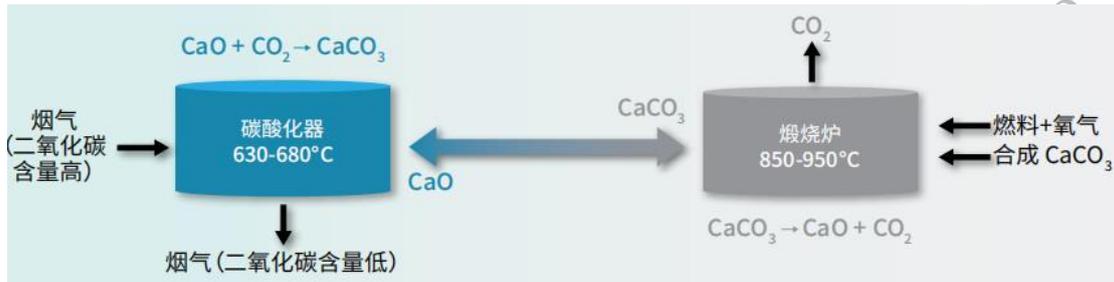


图 2-19: 钙循环过程【16】

2.4 其他

2.4.1 复合蓄热储能

存在两种及以上蓄热过程的蓄热方式称之为复合蓄热。在目前常见的复合蓄热方式是显热蓄热系统和潜热蓄热系统复合。显热和潜热蓄热系统存在储能能力低、温跃层退化高、显热储存出口温度下降快、相变材料导热性低等限制, 导致蓄热储能时间较长、成本较高, 阻碍商业化【47】。

2.4.2 物理吸附/吸收蓄热储能

物理吸附/吸收蓄热技术是利用吸附剂或吸收剂吸收热量并在需要时释放的技术。物理吸附/吸收蓄热材料包括硅胶/水、沸石/水、新型多孔材料等。该技术通常用于太阳能蓄热储能、工业废热利用、建筑空调系统等领域。图 2-20 (a、b) 显示了建筑供暖开放式吸附蓄热系统额充、放热模式。

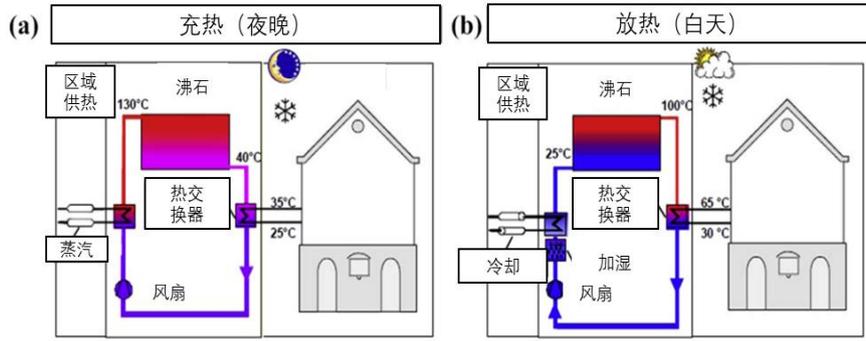


图 2-20：建筑供暖开放式吸附储热系统：(a)供热充电模式；(b)供热放电模式【38】

封闭的吸附蓄热系统包括两个独立的反应器如图 2-21 所示。

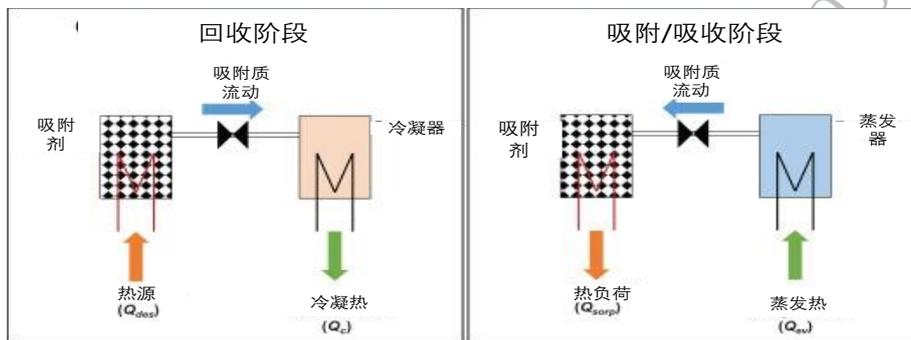


图 2-21：闭式吸附蓄热储能循环：充电和放电阶段【48】

3. 政策与标准

3.1 中国蓄热储能支持政策

近年来，国家发改委和国家能源局等部门先后印发了《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》、《“十四五”新型储能发展实施方案》等文件，鼓励发展电供暖与蓄热储能相结合供暖模式，鼓励建设蓄热储能系统，促进可再生能源电力消纳，助力实现碳达峰、碳中和目标。

表 3-1：中国储热行业相关政策

发布时间	发布单位	政策名称	基本内容
2021.2	国务院	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	提升可再生能源利用比例，大力推动风电、光伏发电发展，因地制宜发展水能、地热能、海洋能、氢能、生物质能、光热发电。加快大容量储能技术研发推广。
2021.10	国务院	《2030 年前碳达峰行动方案》	积极发展太阳能光热发电，推动建立光热发电与光伏发电、风电互补调节；推动既有设施绿色升级改造；推进熔盐储能供热和发电示范应用。
2017.9	国家发展和改革委员会等 6 部门	《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》 【49】	重点工作放在推进储能技术装备研发示范、推进储能提升可再生能源利用水平应用示范、推进储能提升电力系统灵活性稳定性应用示范、推进储能提升用能智能化水平应用示范和推进储能多元化应用支撑能源互联网应用示范的工作上。
2019.6	国家发展改革委办公厅等 4 部门	《贯彻落实<关于促进储能技术与产业发展的指导意见>2019-2020 年行动计划》 【50】	提出了完善落实促进储能技术与产业发展的政策：发展改革委牵头推动配套政策落地，能源局带动规范电网侧储能发展，各省自治区、直辖市和计划单列市能源投资主管部门建立储能项目备案制。

续表 3-1：中国储热行业相关政策

2021.7	国家发展改革委、国家能源局	《国家发展改革委、国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见》 【51】	到 2025 年，实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变。新型储能在推动能源领域碳达峰碳中和过程中发挥显著作用。到 2030 年，实现新型储能全面市场化发展。
2022.1	国家发展改革委、	《“十四五”新型储能发展实施方案》 【52】	电化学储能技术的性能将进一步提升，系统成本将降低 30%以上；氢储能、热（冷）储能等长时间尺度储能技

	国家能源局		术也将取得突破。新型储能的核心技术装备将实现自主可控，技术创新和产业水平将稳居全球前列。
2022.5	国家发展改革委、国家能源局	《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》【53】	蓄能行业需要明确新型储能市场定位，建立完善相关市场机制、价格机制和运行机制，提升新型储能利用水平的大方向。
2021.9	中国能源局	《能源局关于印发<新型储能项目管理规范（暂行）>的通知》【52】	规范新型储能项目管理，促进新型储能有序、安全、健康发展，支撑构建以新能源为主体的新型电力系统。对新型储能设备的规划引导、备案建设、并网运行和监测运行提出详细的准则说明
2022.8	科技部等9部门	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》	研发高可靠性、低成本太阳能热发电与热电联产技术，突破高温吸热传热储热关键材料与装备，研发具有高安全性的多用途小型模块式反应堆和超高温气冷堆等技术。
2017.2	国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心	《2017年能源工作指导意见》【54】	积极推进储能项目工程建设。年内计划建成苏州辉腾、西藏尼玛、大连融科(部分)、比亚迪长沙园区、山西阳光、贵州毕节等储能项目。

表 3-2：中国各地储能法规

年份	地区	政策名称	基本内容
2021	天津	天津市电力发展“十四五”规划	加快推动新型储能建设。结合系统实际需求，逐步加大“可再生能源+储能”模式推广力度，通过储能协同优化运行保障新能源高效消纳利用，为电力系统提供容量支撑及一定调峰能力
2021	天津	天津市可再生能源发展“十四五”规划	推动储能技术应用，推广“可再生能源+储能”模式，新增集中式风电、光伏发电项目原则上应配套建设一定比例储能设施，力争储能装机规模达到 50 万千瓦。
2021	陕西	关于进一步加强可再生能源项目建设管理的通知	推动源网荷储一体化和多能互补发展，合理配置储能。

2022	陕西	征求新型储能建设方案意见	以新能源电源侧配置新型储能为发展重点，以“大规模集中共享式储能”为主要发展模式，通过市场化竞争引入专业储能投资运营商提供优质储能服务。
2021	宁夏	自治区发展改革委关于加快促进储能健康有序发展的通知	依托地区清洁能源聚集优势，推进储能产业发展，在新能源富集的宁东、吴忠、中卫地区先行开展“新能源+储能”示范应用。
2020	福建	福建省电力调峰辅助服务交易规则	合理配置电储能设施，鼓励发电企业、售电企业、电力用户等投资建设电储能设施。
2021	福建	关于因地制宜开展集中式光伏试点工作的通知	鼓励共同参股建设相对集中的公共储能设施，构建光储一体化产业链。
2021	甘肃	关于加快推进全省新能源存量项目建设工作的通知	鼓励配置储能设施，保障全省新能源产业高质量发展。
2021	甘肃	关于“十四五”第一批风电、光伏发电项目开发建设有关事项的通知	配套新增储热型光伏发电、电化学储能。

续表 3-2：中国各地储能法规

2021	湖北	湖北省 2021 年新能源项目建设工作方案	为技术水平和销售总额位于行业全国前列的企业在鄂投资新建新能源装备制造产业（包括风电、光伏、氢能、化学储能装备等相关配套产业）配置新能源项目。
2021	江西	关于做好 2021 年新增光伏发电项目竞争优选有关工作的通知	积极推动电站、电网、用户和储能一体化协同发展，通过技术创新扩展电网消纳空间。
2021	青海	关于印发支持储能产业发展若干措施（试行）的通知	实行“新能源+储能”一体化开发模式；实行“水电+新能源+储能”协同发展模式。
2021	海南	实行“水电+新能源+储能”协同发展模式	全省集中式光伏发电平价上网项目同步配套建设不低于 10%的储能装置。
2021	河南	关于 2021 年风电、光伏发电项目建设有关事项的通知	结合储能设施，谋划一批具备灵活性调节能力的项目。

3.2 其他国家蓄热储能支持政策

3.2.1 美国

2006 年以来，美国政府发布了一系列关于蓄热储能技术的政策，内容包括制度保障、税收减免、成本分摊等。

表 3-3：美国储能相关政策

年份	法案	内容
2006 至今	联邦投资税收抵免(ITC)	基于私营单位、住宅侧用户安装光伏系统同时配备储能，30%税收抵免。延期退出，到 2022 年税收抵免 26%，2023 退坡至 22%。
2007	储能技术促进法	开展一项成本分摊的研发和示范计划，以支持用于电动汽车、固定应用以及电力传输和分配的储能系统保持全球竞争力。
2008	719 号法令	为储能进入电能批发市场提供制度保障
2011	745 号法案	电力公司和零售商支付大客户利用储能来替代电网调费的费用
2013	784 号法令	提出输电网运营商可以选择从第三方直接购买辅助服务以及电储能提供辅助服务的结算机制。
2015	太阳能美国计划	选定 12 个 CSP 项目进行授标谈判，包含太阳能蓄热项目
2018	FERC 第 841 号法案	系统运行商消除储能参与容量、能源和辅助服务市场的障碍。
2019	BESTAct 法案	拨款 10.8 亿美元用于储能等项目。
2020	FERC 第 2222 号法案	RTO 和 ISO 为分布式能源提供财务机制。
2020	储能大挑战路线图	到 2030 年建立并维持美国在储能利用和出口方面的全球领导地位，建立弹性、灵活、经济、安全的能源系统。
2021	2 万亿美元基础建设计划	2035 年实现 100%无碳电力，清洁能源发电和储能投资税收抵免及生产税收抵免期限延长 10 年。
2021	“长时储能攻关”计划	未来十年内，将数百吉瓦的清洁能源引入电网，将储能时间超过 10 小时的系统成本降低 90%。

各州也陆续设立了相应的储能目标，推动储能项目切实落地。加州早在 2001 年实施自发电激励计划：家用储能设备 (<10kW) 补贴\$200/kWh；大容量储能设

备（10kW）补贴\$350/千瓦时。2013 年加州要求 IOU 到 2020 年采购 1325 兆瓦储能，并于 2024 年前运营。马萨诸塞州要求 2025 年完成储能目标 1000 兆瓦时，新泽西州到 2030 年储能预计达到 2000 兆瓦时，弗吉尼亚州到 2035 年达到 3100 兆瓦。

3.2.2 欧盟

2015 年 2 月，欧盟委员会提出了《能源联盟战略》，其主要目标是确保欧洲安全、可持续、有竞争力和可负担的能源供应。欧盟将能源安全、内部能源市场、能源效率、经济去碳化等不同的政策领域整合为一个具有凝聚力的战略。为实现能源联盟的目标并推进能源转型，欧盟于 2015 年 7 月发布了一项立法提案，对 202 年~2030 年期间的欧盟排放交易计划进行审查。

欧盟于 2016 年 11 月发布了《全欧洲清洁能源一揽子计划》。欧盟委员会于 2016 年 6 月发布了第一份关于储能定义和原则的指导文件，随后于 2017 年发布了一份关于电力在储能中的作用的工作文件。这些原则随后反映在 2019 年通过的《全欧洲清洁能源一揽子计划》中。其中包括几项重要立法：被称为“能源市场设计”的《第三能源法》重要修正案；《加速清洁能源创新》；新《可再生能源指令》；以及《能源效率指令》。欧盟委员会在 2017 年 2 月发布的一份工作文件中讨论了该一揽子计划中具体涉及储能的方面，以及影响储能商业案例的其他障碍。

欧盟立法者正在消除储能市场的障碍。欧盟新《电力指令》（2019/944）规定，除非情况特殊，否则 TSO 和 DSO 不得拥有或运营储能设施。这一举措旨在加强竞争，确保其他市场参与者公平使用储能设施。与其他技术相比，新规则禁止歧视储能技术。依照此指令，欧盟成员国应在 2021 年之前将其转化为法律。欧盟指令旨在减少能源存储的障碍，并规定平衡服务的非歧视性和竞争性采购，以及网络接入和收费的公平规则。

根据 2020 年 5 月发布的一份关于储能的研究报告，到目前为止，欧盟的主要储能是抽水蓄能，但电池项目正在增加。除电池外，各种新的电力存储技术也在快速发展，并且更加具有市场竞争力。

自 2020 年起，欧盟委员会每年都会发布清洁能源技术竞争力进展报告，介

绍不同清洁低碳能源技术和解决方案的当前和预测状况。2022 年的报告包括通过电解水生产可再生氢和电池的专门章节，因为它们对于成功实现能源和交通部门的去碳化至关重要。

欧盟委员会于 2020 年通过了《欧盟氢能战略》，标志着氢能已成为欧盟能源系统一体化战略的重要组成部分。欧盟氢能战略和 REPowerEU 计划提出了一个全面的框架，以支持可再生和低碳氢能的利用，从而帮助欧盟以一种具有成本效益的方式实现脱碳，并减少对进口化石燃料的依赖。

2023 年 3 月 14 日，欧盟委员会建议书《储能支持欧盟能源系统的去碳化和安全》获得通过。该建议书向欧盟国家提出了有助于更广泛地部署储能的最重要问题。这些国家应考虑储能“消费者-生产者”的双重角色，采用欧盟电力监管框架，消除障碍，包括避免双重征税和简化许可程序。报告还建议确定不同时间尺度的灵活性需求，并确保系统运营商在规划网络发展时评估这些需求。

在融资方面，它建议提高收入的长期可见性和可预测性，以促进融资，例如允许存储运营商为其目前提供的某些服务收取报酬。欧盟国家还应考虑采用竞争性招标程序（符合国家援助规则）等手段，以实现必要的灵活性，并改进容量机制内某些参数的设计。

相关的工作文件（SWD(2023)57final）探讨了储能在能源转型中的作用和应用，强调了灵活性、可靠性和稳定性的必要性，以实现欧盟的去碳化目标，为欧盟以外的储能部署提供了一些全球展望，并以最佳实践展望作为结束【55】。

2023 年 11 月 22 日，欧洲供热协会（EHPA）讨论了蓄热储能技术在欧洲能源社区中的作用，并通过 ECHO 和 BEST-StorageHorizonEurope 项目的案例研究，揭示了未来应用所面临的挑战和机遇。ECHO 项目的目标是开发和展示新型模块化、紧凑型、高性能和即插即用的蓄热储能解决方案，用于供热、制冷和生活热水（DWH）生产。BEST-Storage 项目的目标是开发长期和短期高能量密度存储解决方案，并在欧洲四个示范案例中进行展示。

地下蓄热储能作为一种能够显著减少温室气体排放的技术，被广泛用于欧洲建筑中的供暖和制冷。地下蓄热储能系统在中欧（奥地利、德国和瑞士）和瑞典有着悠久的历史。其次，“比荷卢”经济联盟国家（法国、芬兰、爱尔兰和英国）

和东欧国家也形成了市场。在南欧，此类系统的使用仍处于起步阶段，但其实施潜力巨大，因为在使用水层蓄热储能制冷时，可实现最大的节能效果。目前需求的急剧增长改变了现有市场，导致经验和培训较少的新参与者参与进来。为防止对环境造成负面影响和损害公众对该技术的看法，迫切需要强有力的质量保证以及相关的培训和认证计划。

2009年，ENDWARE（非正式的欧洲饮用水监管机构网络）进行了首次探索性清查，调查的问题包括：地下蓄热储能在国家领土内的普及程度、监管机构是否考虑过对地下水资源的潜在影响，以及地下水保护区内外现有或预定的地下水系统政策和法规的可用性。

爱沙尼亚于2009年开始起草立法。波兰已尝试发布相关法规，但尚未有明确的立法。在波兰，土地所有者有权不受限制地开采地下水。瑞典、英国、瑞士、德国和奥地利等传统的地下蓄热储能国家实行全面监管。苏格兰的受控活动监管系统允许苏格兰环境保护局对可能影响水环境（包括地下水和地表水）的活动进行监管。这是苏格兰实现环境改善、以可持续的方式保护和改善水环境的关键立法，符合欧盟水框架指令的宗旨和目标。瑞典不仅使用地埋管蓄热储能和水层蓄热储能系统，还使用岩洞蓄热储能系统。瑞典不同地区对地埋管蓄热储能系统的规定各不相同。对于水层蓄热储能和岩洞蓄热储能系统，则适用水法律法规。此外，一项规范钻井施工的标准旨在保护地下水免受污染。荷兰目前也在制定类似的钻井指南【56】。

欧洲各国政府为储能提供的主要激励措施见表3-4。

表3-4：欧洲各国储能相关激励措施与政策【57】

国家	措施
德国	ENWG（免除新建楼宇储能和翻新 PHS 的网络使用费）
	EEG（确保可再生能源的储存将保留直接输入电网的报酬）
	KWKG（支持将蓄热纳入热电联产项目）
德国-捷克	侧重于工业领域的创新型蓄热储能系统的合作项目“弗劳恩霍夫材料与制造应用人工智能创新平台 FIP-AI@VSB-TUO”

斯洛伐克	降低抽水蓄能发电的电网电价
英国	低碳网络支持计划为创新项目提供示范资金
捷克	能源法规定的 TPA 豁免
爱沙尼亚	投资 780 万欧元用于蓄热、储电
瑞士	《能源战略 2050》

3.2.3 日本

日本从一开始就没有关于热能的政策。空调、热泵、隔热和节能只是作为零星名词单独出现，但缺乏系统的关于热能的政策。在日本，札幌市的热能消耗占住宅能耗的 80%，而日本的这类全国平均数字为 50%。这种政策缺失可归因于日本能源政策的历史和结构原因。

首先，日本的能源政策历来具有浓厚的强调工业的政治文化。法律体系以《企业法》（如《电力企业法》、《天然气企业法》和原《石油企业法》）为核心，政府部门按各企业法的管辖范围划分，可以说《能源工业政策》是基于供给方的视角。因此，在电力、热能、交通、工业等需求方中，热能的框架并没有被纳入商业法体系的供给方视角。而政府并没有针对储能制定具体或全面的政策和监管框架。

表 3-5：日本关于储能的相关法规【58】

法规		负责机构
电网互连的技术要求指南（2004 年，2013 年修订）		经济产业省（METI）
电网互连规范（JEAC9701-2006）（已被 JEAC9701-2012 取代）		日本电力协会（JEA）
电力商务法	超过 80000kWh 的大型电力储能系统需要获得批准	经济产业省（METI）
消防法	超过 1000L 有机电解质溶液的危险物质需要特别注意	消防和灾害管理机构，内政通信省
防火条例	大型电池（4800Ah/个）的建设需要防火审批	
建筑标准法	建筑施工关于防火的部分	土地、基础设施、交通和旅游省

3.2.4 加拿大

加拿大政府于 2009 年设立清洁能源基金，旨在通过示范"绿色"技术减少温室气体排放，以支持可再生和清洁电力及热力技术的进一步整合。该基金投资 8.5 亿加元用于技术开发和示范。其中 6.5 亿加元用于大型碳捕集与封存（CCS）示范项目，2 亿加元用于较小规模的可再生和替代能源技术示范项目。此外，还有 1.5 亿加元的研究经费。该基金旨在支持将间歇性可再生能源和清洁能源技术整合到电网和建筑环境中，包括：智能电网概念、电能和热能存储、混合系统（包括有限化石燃料输入的系统）、海洋能、太阳能光伏发电、太阳能热发电、超低水头水力发电和内流河水流系统、地热和生物能源。

加拿大《2022 年秋季经济声明》提出，自 2023 年预算发布之日起，为清洁技术投资提供 30% 的退税抵免，从 2032 年开始逐步取消，投资领域包括蓄热储能领域。

3.2.5 澳大利亚

澳大利亚政府与南澳大利亚州政府就《州能源与减排协议》达成一致。

该协议拨款 10.8 亿澳元，用于为电网增加更多安全、可负担的低碳能源发电能力，并实现《巴黎协定》的目标。该协议还针对南澳大利亚州与新南威尔士州之间的新互联以及天然气供应（以防止市场短缺）。

该协议包括为南澳大利亚州的太阳能光热和其他储能项目提供高达 1.1 亿澳元的联邦优惠融资。

联邦将为总预算提供 6.6 亿澳元，南澳大利亚州将提供 4.22 亿澳元。

3.3 中国蓄热储能标准

表 3-6：中国蓄热储能标准

标准号	标准名称	发布日期
NB/T34023-2015	太阳能热水器搪瓷储热水箱	2015-10-27
NB/T34034-2016	空气源热泵热水器搪瓷储热水箱	2016-08-16

NB/T34042-2017	供热搪瓷储热水箱	2017-08-02
NB/T34043-2017	太阳能热水工程不锈钢常压储热水箱	2017-08-02
NB/T34044-2017	季节蓄热太阳能热利用工程技术规范	2017-08-02
GB/T39288-2020	蓄热型电加热装置	2020-11-19
DL/T5622-2021	太阳能热发电厂储热系统设计规范	2021-11-16
NB/T10775-2021	农村户用储热装置	2021-11-16
GB/T41308-2022	太阳能热发电站储热系统性能评价导则	2022-03-09
NB/T11038-2022	太阳能短期蓄热和空气源热泵联合采暖系统通用要求	2022-11-04
NB/T11243-2023	设施农业太阳能季节蓄热供热工程技术规范	2023-05-26
DL/T2703.1-2023	热电厂蓄热装置技术条件第1部分	2023-12-28
NB/T11401-2023	热电厂储热系统设计规范	2023-12-28
DL/T2704-2023	斜温层储热罐热力性能验收试验规程	2023-12-28

3.4 其它国家蓄热储能标准

表 3-7：其它国家蓄热储能标准

国家或组织	标准名称	发布时间
ASME	蓄热储能-1-2020	2020
ASME	蓄热储能-1-2023	2023
ASME	Mechanical and Thermal Energy Storage Systems 【59】	2023
ASHRAE	ASHRAE Standard 189	2009
ASHRAE	ANSI/ASHRAE Standard 94.3-2010 【60】	2010
ASHRAE	ASHRAE Standard 189.1-201 【61】	2017
AHRI	ANSI/AHRI Standard 900(I-P)	2014(2020 重申)
AHRI	ANSI/AHRI Standard 901(S-I) 【62】	2014(2020 重申)
AHRI	Specifying the Performance of Cool Thermal Storage Equipment	2017

英国能源安全部	ThermalEnergyStorage(蓄热储能)Technologies	2016
---------	--	------

CCMSA清洁能源应用系列报告010-58934233

4. 蓄热储能市场

4.1 市场概况

根据《Thermal Energy Storage Market Size, Growth, Report 2023-2032》报告，2022 年全球蓄热储能市场规模估计为 216.6 亿美元，预计到 2032 年将超过 505.7 亿美元，2023 年至 2032 年将以 8.9% 的复合率增长【64】。这得益于人们对可再生能源发电，以及对暖通空调中蓄热储能系统需求的持续增长。



图 4-1： 2022 年-2032 年全球蓄热储能市场规模及预测（单位：十亿美元）【64】

在 2022 年全球各地区的蓄热储能市场规模占比中，欧洲的市场规模占比最大，达到了 36.7%。欧洲的蓄热储能市场得益于 2021 年的急速增长，市场规模在 2022 年平稳发展。亚太地区的蓄热储能技术规模的增长幅度仅次于欧洲，位于第二，比例达到了 28.9%【64】。

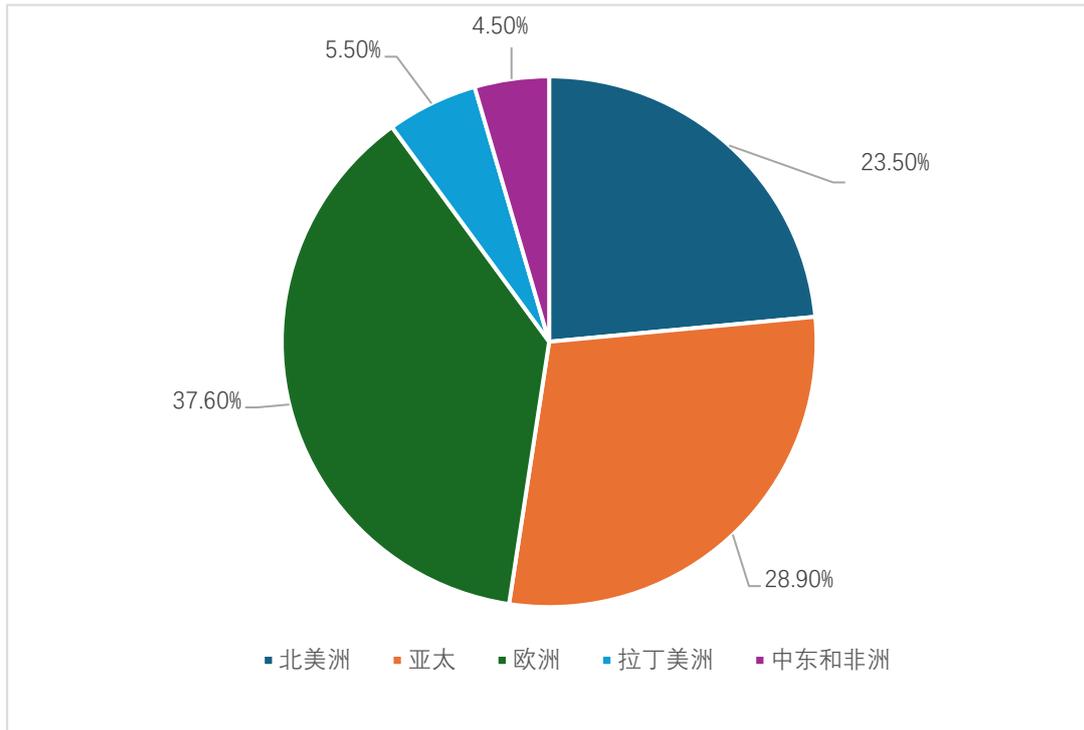


图 4-2:2022 年全球各个地区蓄热储能市场收入占比【64】

在蓄热储能市场中，显热蓄热储能具有最大的市场，占据 2022 年市场总量的 84.8%(如图 4-3)。这主要是因为显热储热技术适用于大规模暖通空调(HVAC)系统，并且在太阳能供热系统需求不断增长的情况下，适合运用于大型暖通空调系统中。其中潜热蓄热的市场比例不足 10%【64】。

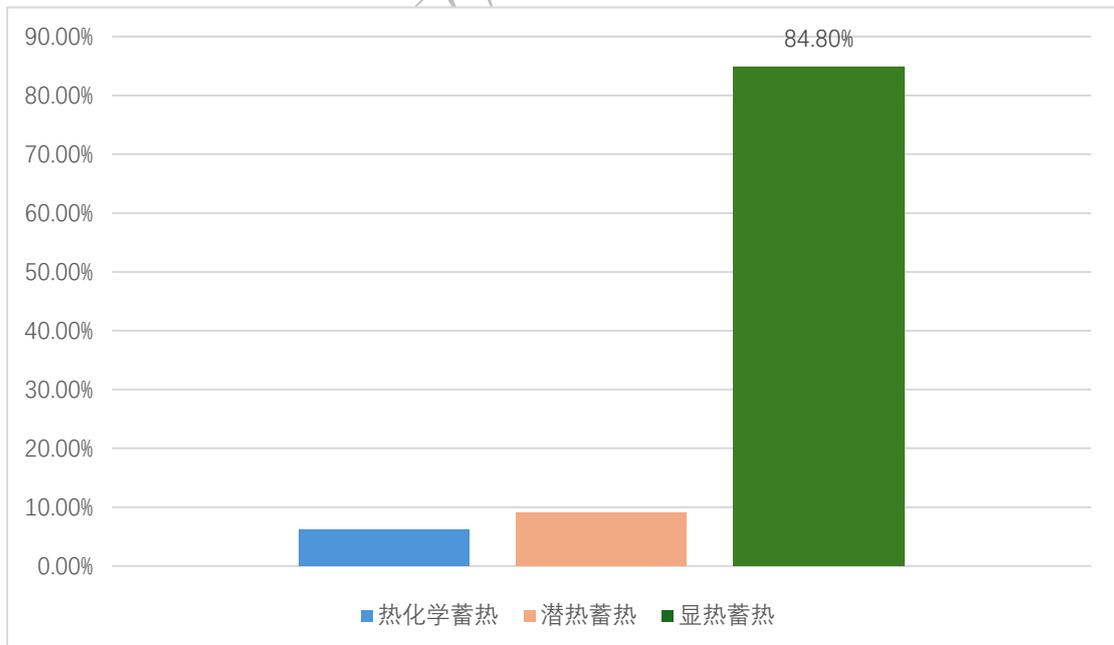


图 4-3:2022 年蓄热技术市场规模占比【64】

在未来的几年内，热化学储热领域将实现最快的复合年增长率，达到 13.8%【64】。这是因为化学储存系统，在发生逆向反应时不同介质储存的热量会释放

出来。相较于潜热或显热储热系统，热化学储能系统提供更高的能量密度。化学蓄热储能更适合长期储存，因为能量损耗仅会在充电和放电阶段发生，不会随着时间的推移而改变。

以终端用户为基准，2022 年工业领域的蓄热储能市场为 40%，居各行业之首。这些部门负责将发电产生的电力分配给商业和住宅区，以满足它们在能源方面的需求，使其被广泛应用于水加热、空间供暖和空调等领域【64】。预计未来一段时间内，工业领域将继续保持领先地位。随着基础设施开发和建设支出的增加，对于暖通空调系统的需求也将随之上升，从而进一步推动工业领域的发展。

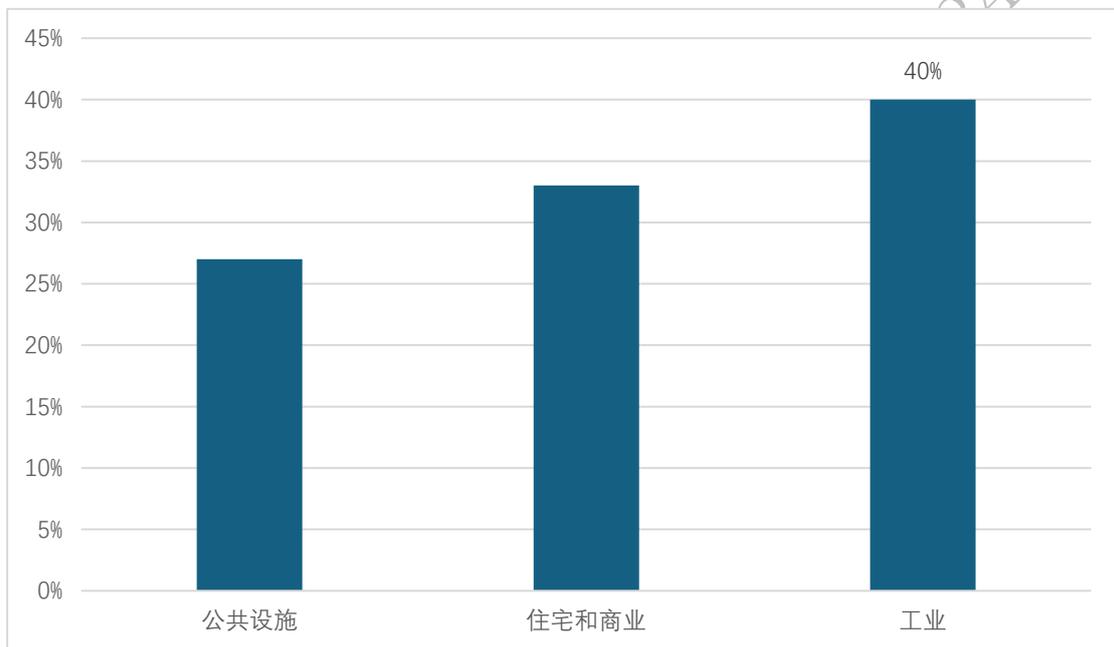


图 4-4：2022 年以终端用户为基准的蓄热技术市场占比【64】

欧洲是全球大部分大型储热技术设施的主要来源地。2009 年 3 月，西班牙的 Andasol 光热发电站成为全球首个商业化 CSP 电站成功使用熔盐储热系统。除此之外，欧洲有大量的蓄热储能系统，用于空间供暖、水供暖、区域供热和制冷以及发电。西班牙是欧洲市场增长的最大贡献者，因为其拥有大量正在运营的蓄热储能项目【65】。

由于美国蓄热储能项目数量的增加，未来几年美国市场预计将出现大幅增长。举例来说，2018 年，美国在建项目数量占全球的 33%（18 个项目中有 6 个在美国），而在运营项目方面，美国占全球的 41%（1,361 个项目中有 558 个在美国）。预计美国蓄热储能市场进一步增长。美国政府正在投资可再生能源工厂，以实现可持续能源的未来。据国际能源署报道，美国政府已对采用可再生能源的能源工

厂（如聚光太阳能（CSP）和蓄热储能站）的安装和运营实行多年税收抵免延期。政府对可再生能源工厂和发电站的安装和运营的支持性环境政策正在推动区域对蓄热储能的需求。

预计亚太地区市场在预测期内将以 14.3% 的最高复合年增长率扩张【65】。中国等发展中国家完善的基础设施和政策支持，都将推动蓄热储能技术市场规模的进一步扩大。

2022 年，中国市场在亚太地区蓄热储能市场中占据主导地位，到 2028 年将继续占据主导地位。经过“十二五”和“十三五”期间国家的投入，中国储能技术的水平快速提升，在关键技术和示范项目方面均取得重要进展，中国已成为世界储能技术研发和示范的主要核心国家之一。当前阶段我国蓄热储能的相关行业正在推广应用的阶段，然而国际先进水平的蓄热储能行业已经进入了初步商业化阶段。伴随着国家供热面积的增大以及太阳能发电技术的投入、我国的蓄热储能技术在清洁供暖、电力领域会得到更加充分的发展。中国蓄热储能在 2030 年市场规模将扩大到 2020 年的三倍。

此外，如图 4-5 所示，中国是全球蓄热储能市场发展最快的国家。而欧洲是目前蓄热储能市场最大的国家。

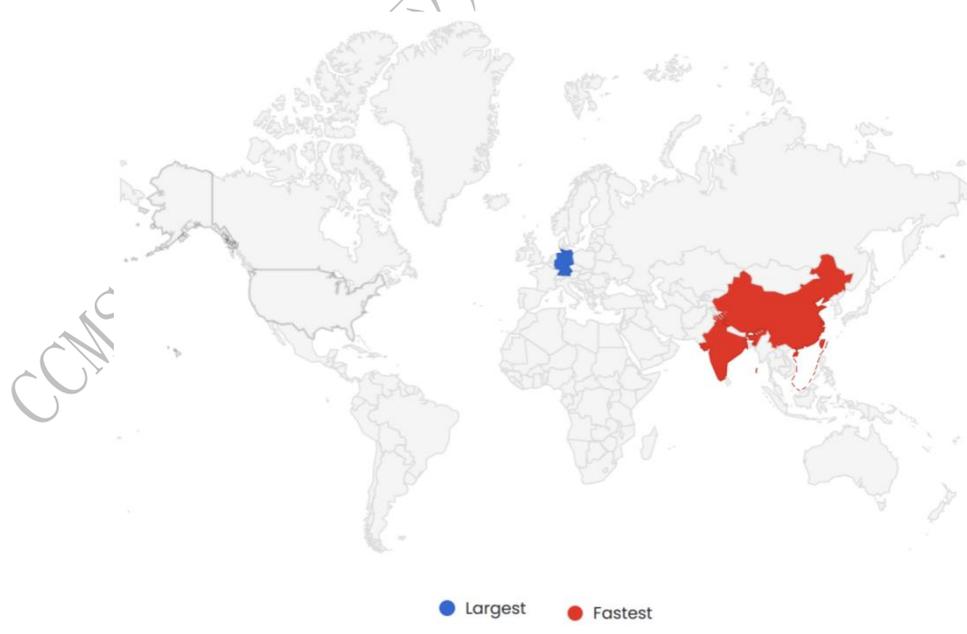


图 4-5：全球蓄热市场发展最快和最大的地点【66】

4.2 蓄热储能技术对比分析

4.2.1 三种蓄热储能技术对比

三种主要的蓄热储能方式，各具特色。

显热技术在长期储存时存在较大的热损失，储能设备庞大，且只能进行短距离的运输，但经济成本较低。

潜热蓄热技术具有较高的储能密度、材料稳定性好、材料腐蚀性强，储热系统体积相对较小，但是不适合长距离输送和长时间储存。因此显热和潜热蓄热技术由于热损失较大，更适合短期能量存储需求，例如日常能源调峰。

最后，热化学蓄热技术不论是质量蓄热密度还是体积蓄热密度都是最大的，适用于长距离运输和长期能量储存，比如季节性能源调度的情况。然而，热化学蓄热技术的复杂性和较高的成本使其面临挑战。

尽管显热蓄热和潜热蓄热的蓄热密度低于热化学蓄热，但它们的技术相对成熟，并已投入生产和应用中。具体内容如表 4-1 所示。

表 4-1：三种主要蓄热储能对比分析【16】

	显热蓄热	潜热蓄热	热化学蓄热
体积密度	低（约为50 kW·h·m ⁻³ ）	中（约为100 kW·h·m ⁻³ ）	高（约为500 kW·h·m ⁻³ ）
质量密度	有限（有热损失）	有限（有热损失）	理论上无限
热损失	长期储存时较大	长期储存时大	低
温度	充能阶段温度	充能阶段温度	环境温度
储存时期	短（热量损失）	短（热量损失）	长（理论上无限）
运输	短距离	短距离	理论上无限制
优点	成本低	储能密度中等、储热系统体积小	储能密度高、长距离运输、热损失小
缺点	热损失大、所需储能装置庞大	热导率小、材料腐蚀性强	技术复杂，投资成本高
技术现状	商业化应用	部分技术成熟	实验研究阶段

不同的蓄热储能技术在运用上具有一定的限制，具体体现在使用规模、存储时间和相关能量矢量上。各种蓄热储能技术在实际运用中确实存在一定的限制。

首先，针对使用规模而言，显热蓄热技术和潜热蓄热技术通常适用于小型或中型能量储存系统，而热化学蓄热技术则更适用于大型能量储存系统，因其较高的储能密度和长期稳定性。

此外，不同的蓄热储能技术还涉及到相关能量矢量的选择和应用。显热蓄热技术中的水蓄热的输入能源可以是电、热、冷。但是输出的能源只能是热、冷等。具体其他约束，可以参考表 4-2。因此，在应用时需要根据具体的能源类型和使用需求进行选择。不同类型的蓄热储能技术需要技术系统的容量范围或者电力范围、工作温度往返效率以及储存时间，能量密度和使用寿命不同，这都将影响着设备的选取。表 4-3 对于蓄热储能技术进行了简单地总结，给予了相关参数的大致范围，以便更加了解技术的局限和适用范围。

表 4-2：所选蓄热储能技术的适用规模、工作时间和相关能量矢量【16】

TES 类型	TES 技术	适用规模			存储时间				潜在矢量					
		小型	区域	公共事业	小时	天	周	月	输入			输出		
显热	WTES								H	C	P	H	C	P
	UTES								H	C	P	H	C	P
	固态								H	C	P	H	C	P
	熔融盐								H	C	P	H	C	P
潜热	冰蓄热								H	C	P	H	C	P
	零度以下的PCM								H	C	P	H	C	P
	低温PCM								H	C	P	H	C	P
	高温PCM								H	C	P	H	C	P
热化学	化学循环(钙循环)								H	C	P	H	C	P
	水合盐								H	C	P	H	C	P
	吸收式系统								H	C	P	H	C	P

注：绿色表示适用；红色表示不适用；C=冷能；H=热能；P=电力

不同的蓄热储能技术关键性技术属性各不相同。适合长时间蓄存的是显热技术中的地下蓄热储能和热化学蓄热当中的化学循环和水合盐。显热技术的容量范围相对于潜热技术的容量范围有一定的优势。显热蓄热适合低温应用，潜热蓄热

的温度工作范围更宽广，而化学蓄热适合高温区间工作。

表 4-3：所选蓄热储能技术的关键技术属性【16】

蓄热储能技术类型	蓄热储能技术	容量范围	电力范围	工作温度	充放热效率	储存时间	能量密度	使用寿命(年限或者循环次数)
显热	水体蓄热储能	kWh 到 1GWh	kW 到 10MW	10 到 90°C	50-90%	数小时至数月	15-80kWh/m ³	15-40 年
	地下蓄热储能	MWh 到 GWh	MW 到 100MW	5 到 95°C	最高为 90%	周至月	25-85kWh/m ³	50 年
	固态	10kWh 到 GWh	kW 到 100MW	-160 到 1300°C	>90%	数小时至数月	0.4-0.9kWh/m ³ ·K(热能容量)	>5000 次循环
	熔融盐	MWh 到 5GWh	1kW 到 300MW	265 到 565°C	98%	数小时至数天	70-200kWh/m ³	>20 年
潜热	冰蓄冷	kWh 到 100MWh	kW 到 10MW	-3 到 3°C	95%	数小时至数天	92kWh/m ³	>20 年
	0 度以下的 PCM	kWh 到 100kWh	kW 到 10kW	最低到 -114°C	90%	小时	30-85kWh/m ³	>20 年
	低温 PCM	kWh 到 100kWh	kW 到 10kW	最高到 120°C	90%	小时	56-60kWh/m ³	300-3000 次循环
	高 PCM	10kWh 到 GWh	10kW 到 100MW	最高到 1000°C	90%	数小时至数天	30-85kWh/m ³	>5000 次循环
热化学	化学循环(钙循环)	MWh 到 100MWh	10kW 到 1MW	500-900°C	45-63%	月	800-1200kWh/m ³	>30 年
	水合盐	10kWh 到 100kWh	N/A	30-200°C	50%(开放系统) 60%(封闭系统)	月	200-350kWh/m ³	20 年
	吸收式系统	10kWh 到 100kWh	10kW 到 1MW	5-165°C	COP: 0.7-1.7	数小时至数天	180-310kWh/m ³	50 年

注：(1)水罐蓄热和地下蓄热储能的能量密度基于 20°C 的参考温度；潜热能量密度计算中不考虑显热；(2)固态能量密度由工作温差决定；能量密度=热能容量 x 温差；(3)用于“太阳能盐”

(60%NaNO₃ 和 40%KNO₃) ; (4)仅指钙循环（而非其他化学循环示例）；

kW=千瓦；MW=兆瓦；MWh=兆瓦时；COP=性能系数 N/A 表示没有发现主要需求。

4.2.2 多种蓄热储能技术对比

此外，目前能源存储系统包括抽水蓄能、传统铅酸电池、锂离子电池、飞轮存储和压缩空气存储。然而，蓄热储能具有显著的优势。蓄热储能在往返效率、安装效率和较低的操作成本方面有明显优势。具体内容如表 4-4。

表 4-4 多种储能技术的分析对比【68】

	抽水蓄能	传统 (Na-S 和铅酸电 池)	高级 (锂离子和其他电 池)	飞轮空气能 量	压缩空气 储能	水热储 存
技术发展 程度	成熟	成熟	发展中	发展中	发展中	储存
安全问题	适中	低	√	√	适中	低
选址的灵 活性	非常低	非常高	非常高	非常高	非常低	低
预计寿命 (年)	40+	7~15	7~10	20	40+	40+
往返效率	70%~85%	80%~90%	85%~90%	90%	70%~80%	接近 100%
单位功率 成本 (美 元 /kWh)	310~380	500~750	350~500	7800~13760	200	80~200

在图 4-6 中，显示了一些关键技术的相关初始资本投资需求和技术风险与它们当前的开发阶段。

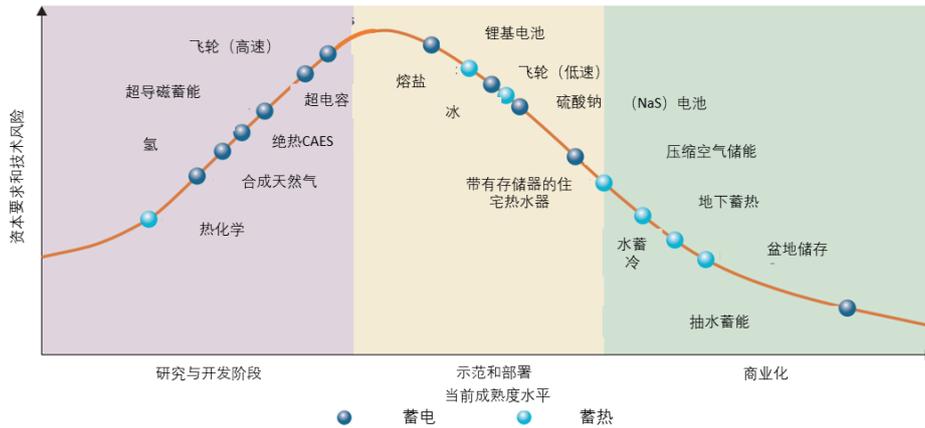


图 4-6: 多种储能技术的成熟度、资本要求和技术风险示意图【69】

电化学蓄热是一种利用化学反应将电能转化为热能并存储起来的技术。常见的应用包括电暖器、电热水器等。其优点在于可以通过电能转化为高效的热能/电能，同时具有较高的能量密度和较快的响应速度。然而，电化学蓄热系统的成本相对较高，而且在长时间存储时可能存在能量损耗的问题。

蓄热储能优点在于成本相对较低，且能够长时间储存热能而能量损耗不大。此外，蓄热储能系统在适用场景广泛，可以应用于供暖、制冷、热水等多个领域。

综合来看，电化学储能适用于对响应速度和能量密度要求较高的场景，而蓄热储能则适用于长时间存储和成本控制较为重要的场景。在实际应用中，可以根据具体需求和场景选择合适的储能技术。

5. 蓄热储能技术应用领域以及案例

供暖和制冷主要用于工业和建筑领域，如图 5-1 所示，占全球最终能源消耗的不少于 50%，约占当今所有能源排放的 45%(不包括电力)，因此脱碳供暖是实现净零排放的重要手段。



图 5-1：全球各行业能源消费占比【67】

蓄热储能技术因其高效、清洁、灵活等特点，逐渐成为解决能源存储和调度的重要手段之一。如图 5-2 所示，在全球范围内，已安装的项目超过 200 个，储热容量超过 20GWh。其中，最大的储热容量集中在欧洲和北美，其中西班牙的装机容量超过 5GWh，主要用于聚光太阳能发电。中国蓄热储能项目装机容量不足 1GWh，滞后于欧美国家【67】。

本报告探讨蓄热储能技术在四大场景的应用，如图 5-3 所示，并通过案例分析其价值与潜力。报告根据热源的不同分类，如利用谷电、可再生能源作为主要热源。分析其在建筑和区域的供热制冷、工农业工艺过程、电力和冷链等领域的应用：在建筑供热制冷领域，蓄热储能技术可以通过收集太阳能、余热等热源，将其储存起来，用于供暖和制冷系统，从而提高能源利用效率，减少能源消耗成本；在工农业工艺过程中，蓄热储能技术可以通过储存工业生产中产生的余热或太阳能等热能资源，用于加热水、蒸汽等，满足工艺过程中的能源需求；在电力领域，熔融盐可用于使聚光太阳能热发电厂在夜间释能，且新型显热蓄热技术也有望实现大容量独立储能。为政府、企业和研究机构提供蓄热储能技术发展现状和趋势。

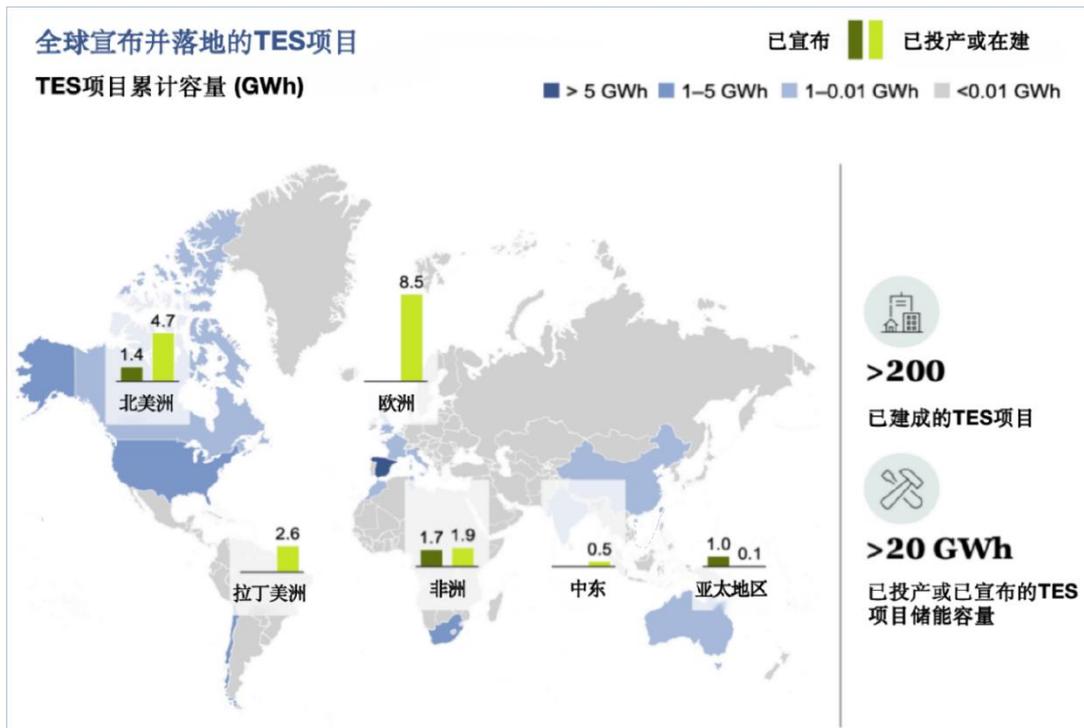


图 5-2：全球年度蓄热储能项目建成数量及储热量统计【67】



图 5-3：蓄热储能技术在各领域中的应用【16】

5.1 以热源为分类的应用

5.1.1 谷电蓄热储能

本节总结了谷电蓄热储能技术，展示了不同场景的应用案例，提出了未来发展的建议，以促进谷电蓄热储能技术在我国能源领域的应用和推广。

5.1.1.1 谷电蓄热储能概况

截至 2022 年底，全国风电、光伏装机 7.6 亿千瓦，占全国累计发电装机容量的约 30%，全国风力、光伏累计发电量约 1.2 万亿千瓦时，占比不足 14%【70】。由于电网削峰填谷和可再生能源电力就地消纳问题突出，造成了能源的极大浪费。与此同时，我国北方地区主要依赖燃煤供暖，占 83% 的总供暖面积，但其中约一半使用散烧煤，导致严重的大气污染和雾霾【71】。为改善冬季环境和经济发展，迫切需要推广清洁供暖技术，包括利用清洁能源实现高效低碳取暖。

电供暖作为一种环保、无污染的供暖方式备受瞩目，特别是采用低谷电能进行蓄热的供暖方式。这种技术利用电网低谷时段的廉价电能，通过启动电锅炉，将产生的热量存储在蓄热装置中，然后在高峰时段将储存的热量供给用户，从而降低高峰时段的用电需求，甚至可以完全避免用电。因此，采用低谷电能蓄热的清洁供暖技术不仅有助于平衡电网负荷，解决能量供求在时间和空间上不匹配的矛盾、调能源利用率，还可以缓解可再生能源电力的波动，促进可再生能源的利用。

如图 5-4 所示，典型的谷电蓄热供暖系统的工作原理是在谷电时段电锅炉工作加热循环水，通过循环泵把热水中的热量带入热库，为热库充热。夜间末端如果需要供热，直接运行二次侧，所需热量由电锅炉直接提供。在非谷电时段，循环泵工作，带出热库中的热量，通过板换把热量换到二次侧，为末端供暖。

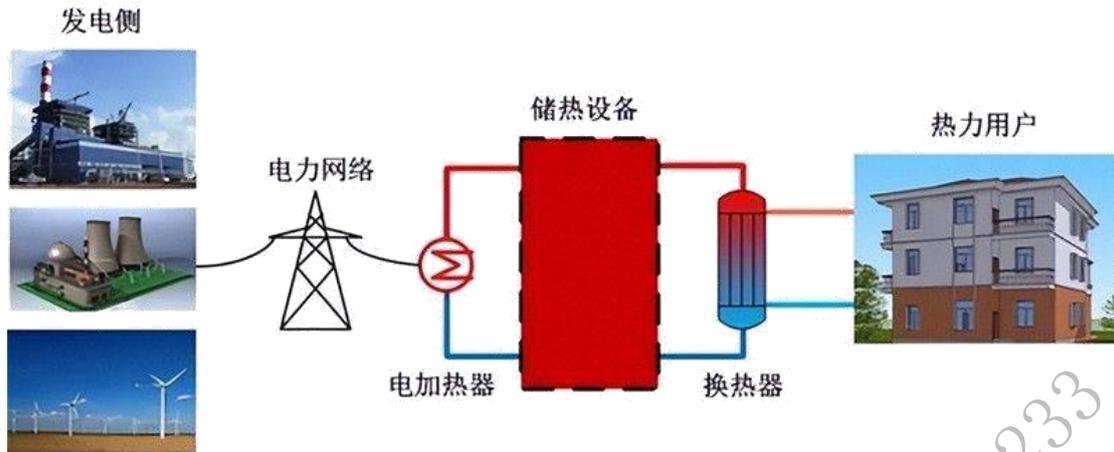


图 5-4：谷电蓄热技术原理示意图

5.1.1.2 德国赛尔夫坎特养老公寓热电联产项目

德国赛尔夫坎特养老公寓共 8 个住宅单元，配置 20 千瓦光伏系统以及 2x19 千瓦的热泵系统，为公寓供热及提供生活热水；夏季用于调温。



图 5-5：德国赛尔夫坎特养老公寓

本次改造采用 3 个储能罐：供热系统的 800 升储热罐、制热的 800 升的储热罐、温度调节的 800 升储冷罐。储能系统采用了 kraftBoxx 相变材料 heatstixx 胶囊，温度分别为 50℃、36℃、15℃，满足整个项目改造需求。具体设计及实现情况见图 5-6。



图 5-6：储热罐示意图

5.1.1.3 德国施克伦生物质发电厂热电联产项目

该生物质发电厂发电功率为 5.36 兆瓦、热功率为 17.2 兆瓦，需要对其进行改造，以扩展现有的本地供热网络，且该网络已满负荷运转，但出于平衡考虑仍然存在潜力，因此只有通过额外的存储容量才可能实现扩展，实现调峰填谷。



图 5-7：德国施克伦生物质发电厂

本地供热网络为多个单户家庭供热，通过中转站将热能输送至各楼。每栋楼设置约 40 千瓦时的分散式存储系统，其储热材料采用 kraftBoxx heatstixx 58°C，详情见图 5-8。



图 5-8: 德国施克伦生物质发电厂热电联产项目储能罐示意

5.1.1.2 天津水游城商业中心谷电相变蓄热储能供暖项目

天津水游城商业中心之前采用市政供暖，考虑层高因素按照建筑面积 13 万平方米收费，采暖费为 40 元/平方米，整个采暖季总费用 521 万元。目前该项目实施了电锅炉+热库采暖系统，利用相变储能技术，在夜间谷电(23:00~次日 7:00)时段，维持空间防冻保温采暖的同时对热库充热，并在其他时段利用热库供暖，个别极端天气采用平电补充。



图 5-9: 谷电蓄热供暖系统现场

在系统设计阶段，对天津水游城两个采暖季的每天实际用热量记录数据分析后，得到该商业体平均每天用热需求量。查询了近 10 年天津当地气温纪录，根据天津水游城谷电时间为 23:00 至次日 7:00 的情况，确定谷电时间段内需存储的热量为 132365 兆焦。考虑到系统管理热损失和电锅炉效率限制等实际条件，确定电加热功率为 4936.6 千瓦。图 5-9 为项目施工完毕后的现场实景。

从项目的运行效果来看，项目完成后的第一个采暖季，采暖费比原来节省 331 万元。使用热库采暖系统后，天津水游城每天平均用于供暖的电量为 30639

千瓦时，其中谷电 27882.4 千瓦时，平电 2322.5 千瓦时，峰电 434.1 千瓦时，平均每天可转移 1364.1 千瓦峰电时段用电负荷。

5.1.2 可再生能源及工业余热作为蓄热储能热源

5.1.2.1 太阳能或工业余热跨季节储热储能介绍

可再生能源如风能、水能、地热能等资源丰富，具有清洁、可再生的特点，为能源供应和环境保护问题提供解决方案。同时，若工业生产过程中产生的大量余热得不到有效利用，将导致能源浪费和环境污染。利用可再生能源和工业余热蓄热储能，不仅有助于提高能源利用效率，还可以实现能源的灵活调度。在以可再生能源及余热资源为基础的低碳热源供热体系中，大规模跨季节储热的应用在实现低碳热源的可靠供热方面发挥着重要作用。

表 5-1：世界各国跨季节储热项目及相关参数

跨季节储热类型	国家	项目位置	年份	储热容量(m³)	供热面积(m²)	太阳能集热面积(m²)	储存温度(°C)	蓄热量(MWh)	年减排量(CO ₂ e)	井深度(m)
罐式储热	德国	汉诺威	2000	2 750	7 365	1 350	-	694	-	-
	丹麦	里瑟	2001	5 000	3 575	-	-	-	-	-
	德国	慕尼黑	2007	5 700	24 800	2 900	39-95	2 300	-	-
	土耳其	加齐安泰普	2010	300	100	20	14-40	12	10	-
	瑞典	斯德哥尔摩	2013	250	-	50	25-40	8.9	5	-
	中国	河北省石家庄市	2013	20 000	30 000	11 600	40-60	15 413	27 000	-
	韩国	镇川	2017	2 000	214 639	1 600	40-90	1 356	1 200	-
	法国	马赛	2018	200	1 465	120	30-60	63	100	-
	荷兰	潘宁恩	2021	121 100	300 000	20 600	20-90	28 333	28 000	-
	德国	施泰因富特	1999	1 500	3 800	510	30-90	325	-	-
	德国	艾根斯泰因	2008	4 500	12 000	1 600	10-80	910	-	-
	池式储热	丹麦	马斯塔尔	2012	75 000	-	26 000	25-50	33 300	-
丹麦		德龙宁隆	2013	6 200	-	37 573	12-86	36169	-	-
丹麦		哥本哈根	2023	70 000	-	-	最高90	3 300	6 200	-
德国		梅尔多夫	2023	43 000	-	-	最高90	1 500	1 000	-
中国		河北省张家口市	2019	3 000	3 000	-	43-90	100	150	20
德国		罗斯托克	1999	20 000	7 000	980	10-50	497	-	2
含水层储热/地埋管储热	荷兰	埃因霍温	2000	-	-	-	-	15 000	-	36
	比利时	布拉斯哈特	2000	-	-	-	8-18	6 140	-	2
	瑞典	马尔默	2001	-	-	-	4.5-15	3 900	-	10
	土耳其	梅尔辛	2001	-	1 400	-	18	-	-	2
	比利时	洛克伦	2003	-	3 000	-	8-11	-	-	2
	德国	新勃兰登堡	2005	-	-	-	75-80	-	-	2
	美国	新泽西州	2008	-	-	-	6.1-8.9	2 025	-	6
	瑞典	阿兰达	2009	-	-	-	5-20	20 000	1 100	11
	丹麦	哥本哈根	2010	-	-	-	-	-	-	10
	日本	信州	2011	-	-	-	-	-	-	5
	丹麦	哥本哈根	2015	-	-	-	-	10 000	1 550	10
	中国	内蒙古赤峰市	2016	500 000	100 000	1 000	-	-	-	468

跨季节蓄热储能技术能够有效解决太阳能、余热资源等在时间、空间上供需不匹配的问题，是提高可再生能源利用率的关键技术。本节分析了国内外跨季节储热项目，为我国因地制宜地大规模推广应用太阳能跨季节水体蓄热储能技术提供参考。

5.1.2.2 国外跨季节储热案例分析汇总

跨季节蓄热储能技术包括 4 种类型：罐式蓄热储能、池式蓄热储能、埋管蓄热储能与含水层蓄热储能，如图 5-10 所示。

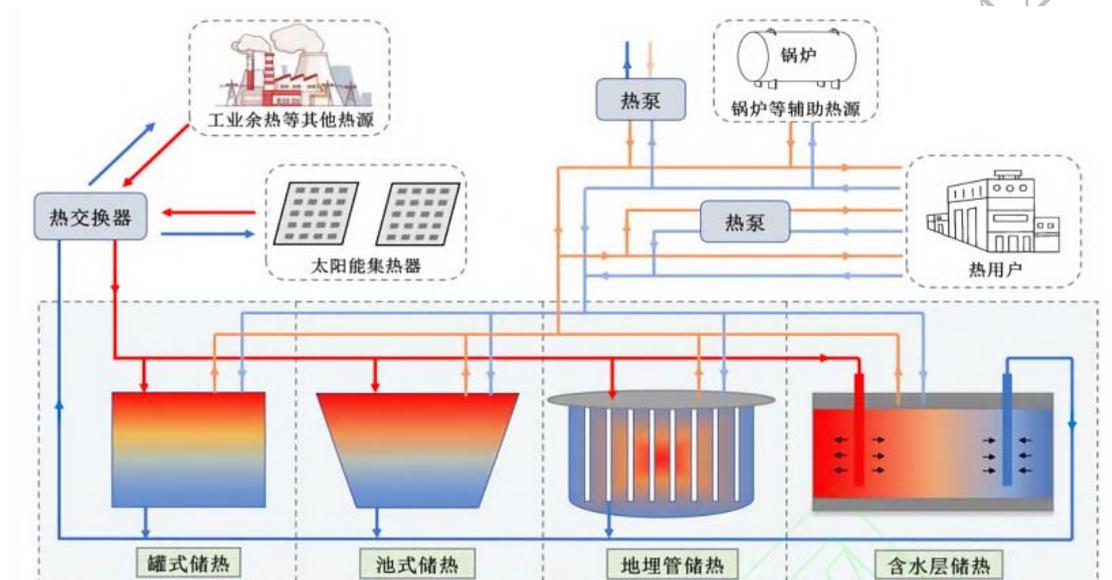


图 5-10：跨季节蓄热储能技术原理示意图【72】

早期规模较大的罐式蓄热储能系统，如德国 1996 年 Friedrichshafen 地区的太阳能跨季节蓄热储能项目、2000 年 Hannover 的跨季节罐式蓄热储能项目等，均实现了一定范围的区域供热。

近年来，跨季节蓄热储能项目在不断增加。2017 年，韩国在镇川市建设了节能小镇跨季节蓄热储能项目，该系统通过 800 平方米平板集热器与 800 平方米真空管集热器收集太阳能并储存在总容量为 4161 立方米的储罐中，用于冬季 20000 平方米的区域供热。

池式蓄热储能具有高储热密度与储热效率的优势，广泛应用于大型跨季节蓄热储能系统中。丹麦在跨季节池式蓄热储能建设方面处于领先地位，建设有全球最早(马斯达尔市)及最大(沃延斯市，储热容积 205000 平方米)的太阳能跨季

节储热区域供热系统。如下图所示，2022 年丹麦哥本哈根市又建设了一座热容量为 3300 兆瓦时的跨季节池式蓄热储能项目，其储热水池长 180 米、深 14.5 米、宽 52 米~72 米，总储热容积达 70000 立方米，为当地区域供热系统供热，满足 500000 用户的供热需求。



图 5-11：丹麦哥本哈根跨季节储热水池项目图纸与实景图

对于地埋管与含水层蓄热储能技术，挪威德拉门市一项跨季节地埋管光伏储能项目在 2022 年开展了测试。该系统利用 1000 平方米的光伏板组件为二氧化碳热泵提供电力，以空气为热源产生热量，并于春、夏、秋季存储在埋管系统中，为附近学校建筑供暖，系统热容量约为 350 兆瓦时。除此之外，荷兰 2018 年在代尔夫特理工大学 Deltares 校区投入运行了一项跨季节含水层储热系统。夏季将 2 栋建筑 50 兆瓦时的余热与 120 根真空管太阳能集热器收集的 25 兆瓦时的热量储存在含水层中，冬季通过水源热泵承担实验楼 100 兆瓦时供暖需求。

5.1.2.3 国内跨季节储热案例分析

随着能源结构调整和可再生能源利用的重视，中国开始关注跨季节储热技术的研究与应用，陆续开展了一系列示范项目。

- 张家口涿鹿县太阳能塔式跨季节水体储热供热示范项目

2019年张家口涿鹿县建立了如图 5-12 的太阳能跨季节池式蓄热储能示范项目。该项目分为太阳能塔式集热、跨季节储热和供热 3 个子系统，由 760m² 的塔式集热场及吸收器、容积为 3000m³ 的跨季节储热水池、热循环管道等组成，可为室内 3000~5000m² 的区域供暖。储热水池储水量和热分层的实验与模拟研究表明，第一年总热损失为 98 兆瓦时，储热效率为 62%。



图 5-12：张家口涿鹿县太阳能塔式跨季节水体储热供热示范项目实景图

- 太阳能 PVT 热泵土壤跨季储能热电冷近零碳能源示范项目

建设于辽宁省的太阳能 PVT 热泵土壤跨季储能热电冷近零碳能源示范项目也是中国跨季节蓄热案例的典型。项目总建筑面积约 3600 平方米，其中羽毛球馆功能区域面积 1200 平方米，冬季采用地暖供热，空调使用时间为早八点至晚十点；体能培训场馆面积 1200 平方米，冬季地暖散热，空调使用时间为早八点至晚五点；篮球馆面积为 600 平方米，空调使用时间为早八点至晚十点；综合房面积 600 平方米，24 小时采暖制冷。项目各功能区采暖及空调使用时间均不相同。项目系统主要包括：太阳能 PVT 组件阵列、土壤埋管蓄热体、地源热泵系统等。项目工作原理为夏季通过地源热泵为建筑提供冷量，同时将地源热泵机组的冷凝热量和太阳能 PVT 组件产生的热量储存到地埋管中供冬季采暖使用。项目设计 PVT 装机容量 100 千瓦，全年总发电量约为 12 万千瓦时。项目配置蓄热

井共计 45 口，采用双 U 型管换热方式，从而实现项目冬季供暖、夏季制冷及全年耗电的需求。



图 5-13：项目实景图

- 西藏自治区浪卡子县及仲巴县大型太阳能跨季节蓄热储能采暖项目

西藏自治区浪卡子县及仲巴县大型太阳能跨季节蓄热储能采暖项目也是中国跨季节蓄热储能项目的代表。其中浪卡子项目可以满足县城约 9 万平方米的建筑采暖需求，惠及全城 6400 余居民。该项目年产能 37408 兆瓦时，采暖季可提供 29029 兆瓦时，占采暖总需求的 90%以上。2019 年建设的西藏日喀则市仲巴县跨季节蓄热储能项目作为世界海拔最高的大型太阳能集中供暖项目，采用高效大型平板太阳能集热器+蓄热水池用于冬季供暖，最大限度地利用太阳能。太阳能集热面积为 34650 平方米，提供 118000 平方米的采暖，室内温度达到 20℃以上。

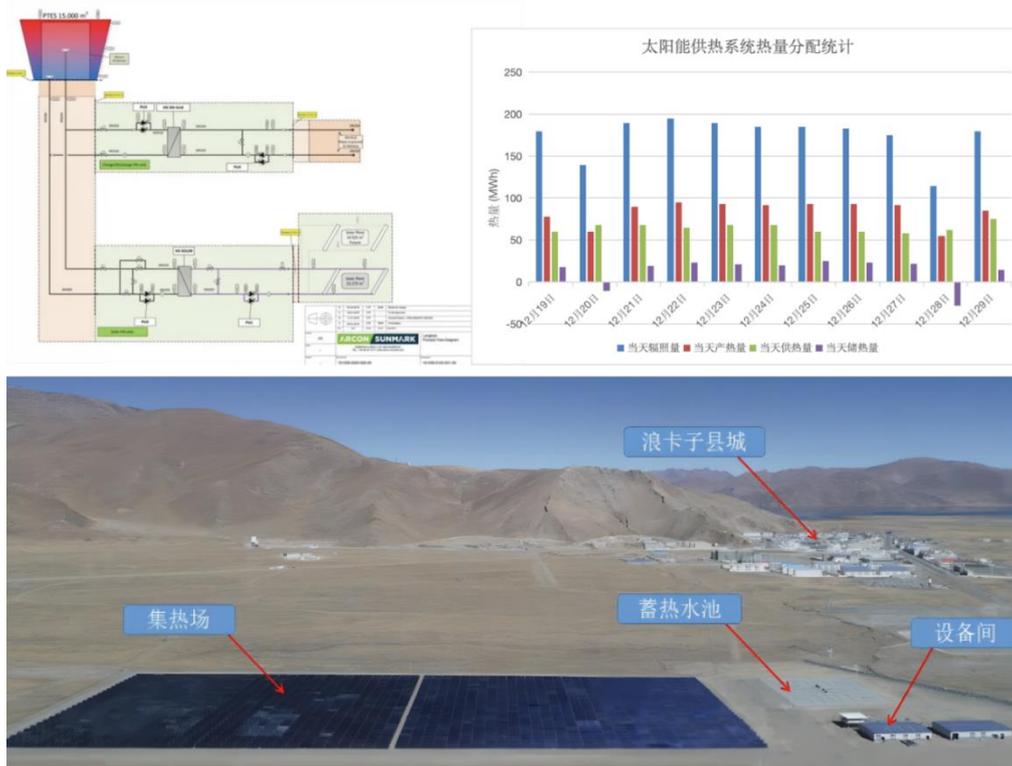


图 5-14: 西藏浪卡子大型太阳能集中供热项目实景图



图 5-15: 西藏仲巴县大型太阳能集中供热项目实景图

5.2 建筑蓄热储能供热和供冷案例分析

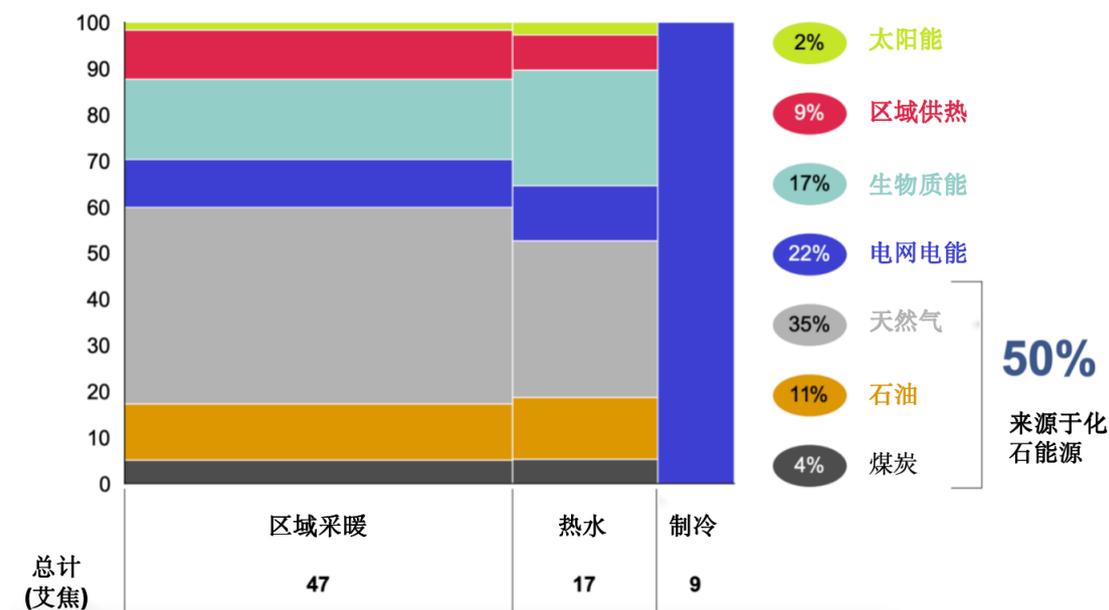


图 5-16: 全球建筑热能耗占比示意图【67】

目前建筑能耗约占整个社会能源消耗 40%，制冷和供热能耗约占建筑能耗的 40% 以上，其中 50% 的热量来源于化石燃料的燃烧（见图 5-16）【70】。国家统计局 2023 年发布的中国统计年鉴的数据显示，我国工业领域的能源消费量为 9608 万吨标准煤，约占全国总能源消费总量的 1.83%【73】。2023 年我国北方城镇供暖二氧化碳排放量 5.5 亿吨，占全社会碳排放量的 5.7%，占建筑运行过程中碳排放总量的约 26%。为降低供暖碳排放，进而实现供热领域“碳中和”，传统的建筑能源“供应—输送—需求”系统应向“源—网—荷—储—用”的综合能源系统转型，蓄热储能成为能源转型中的关键。因此如果能对建筑的供暖进行蓄热调峰，对整个电网的电力需求将会有重大的意义【74】。

区域供热供冷涵盖多个建筑甚至整个社区或城市，使用隔热管网将热量或冷气从集中的生产源输送到多个建筑物。最终用户主要是有空间供热/供冷和/或水供热/供冷需求的家庭或商业场所。这种能源生产和分配方式通过提高效率来降低排放和成本，并为可再生能源大规模整合到城市中心提供了空间。

建筑或区域的蓄热储能可分为被动蓄热储能和主动蓄热储能两大类，如图 5-17。其中被动蓄热储能，其储热和释热的驱动力仅是存储与周围环境之间的温差。而主动蓄热储能指的是储热和释热在泵或风扇的帮助下驱动的蓄热储能方式。由

于在建筑中，大部分蓄热储能采用的是主动蓄热储能模式，因此本节选取主动蓄热储能模式中的五种典型蓄热储能技术进行分类和细分，并结合典型项目进行案例分析（见表 5-2），从而更深入地了解蓄热储能技术在建筑领域的应用情况。

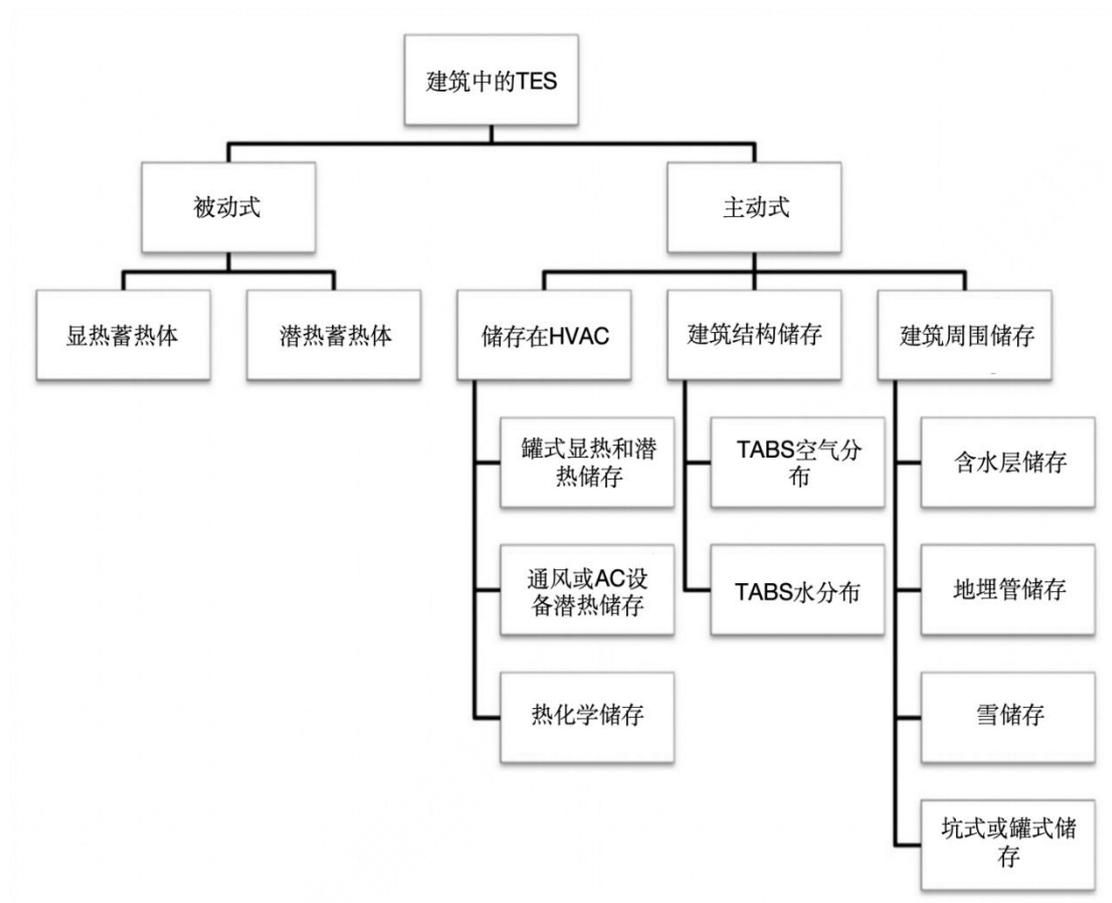


图 5-17: 建筑蓄热储能技术细分【75】

CCMSA 清洁能源

表 5-2：建筑或区域蓄热储能供热供冷典型案例

技术分类	年份	项目名称	蓄热(冷)周期		应用类别	作用面积(m ²)	作用温度(°C)	减碳量(t)
			长	短				
相变材料蓄热技术	2020	意大利“HEART”相变材料储热项目	√		热水	2 550	45	-
	2021	蒙古国乌兰巴托某幼儿园供暖项目	√		采暖	-	-	150
	2022	华润生命科学园相变储热供暖项目	√		采暖	46 000	-	5 639
	2022	中国辽宁邮电指挥相变储热系统	√		采暖	-	18-20	719.1
	2023	深圳某大厦中央空调相变蓄冷项目	√		空调制冷	114 000	-	-
固体蓄热技术	2017	张家口凯博风尚商城电热式固体储能供热项目	√		采暖	23 000	-	454.2
	2018	山西省灵丘县40万千瓦风电供暖示范项目	√		采暖	800 000	22-25	800 000
	2019	内蒙古赤峰市德润排水有限公司供暖项目	√		采暖	42 000	8-22	-
	2020	新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目	√		采暖	80 000	24	-
	2022	赤峰市党政综合楼供暖项目	√		采暖	76 000	22	3 600
熔盐蓄热技术	2017	辽宁省韩家店镇人民政府供暖系统改造项目	√		采暖	6 000	23	-
	2018	河北辛集崇阳小区熔盐绿色供热示范项目	√		采暖	133 000	-	3 537
水/冰蓄冷技术	2017	一汽大众天津工厂联合站房水蓄冷项目	√		空调制冷	-	最低8	-
	2022	广州华润创智园动态冰蓄冷中央空调供冷站项目	√		空调制冷	120 000	-	-
地源热泵技术	2015	陕西省洋西新城地热清洁供热项目	√		采暖	20 000 000	20	860 000
	2019	北京大兴国际机场地源热泵供暖项目	√		采暖	2 940 000	-	8 304

5.2.1 相变材料蓄热储能技术案例分析

5.2.1.1 北京黄村镇政府大楼相变蓄热储能项目

相变材料蓄热储能技术在建筑中有着广泛的应用,其原理是利用相变材料在相变过程中吸收或释放大热量。

该项目总供暖制冷面积 11730 平米,配备了 14 台 600MJ 储能设备,将传统的电锅炉供暖与高效 PCM 相变蓄热系统相结合,综合供热负荷指标 40 W/m²,总供热负荷 469.2 KW,总用电负荷 650 KW (谷电)。



图 5-18: 北京黄村镇政府大楼相变蓄热储能项目

如图 5-18 所示,该项目平米耗热量指标 0.4 吉瓦/平方米/供暖季,保证供暖室内温度 20℃ 以上,供暖季运行成本 25 元/平方米/供暖季,年总运行费用 29.325 万元。制冷系统进行智慧化节能优化,每年可减少空调能耗 30% 左右。

5.2.1.2 中国科学院过程工程研究所张家口冬奥会 8000m²“相变储热-电网谷电”清洁供暖示范项目

本项目属于“中国科学院战略性先导科技专项——变革性洁净能源关键技术与示范”(课题XDA21070300)。工程位于冬奥会张家口赛区山地转播中心;工程建设单位为:北京中兴能科技有限公司。基于过程所等研制的长寿命和高储热密度的水合盐相变材料,在冬奥会张家口赛区山地转播中心,建成总供暖面积 8000 平方米、系统总功率 1.2 兆瓦的清洁供暖示范工程,解决了极寒气候下复杂结构山地建筑清洁能源供暖的储热难题,入选中国科学院 2021 年第 4 季度亮点成果,为绿色、低碳冬奥提供了技术支撑。

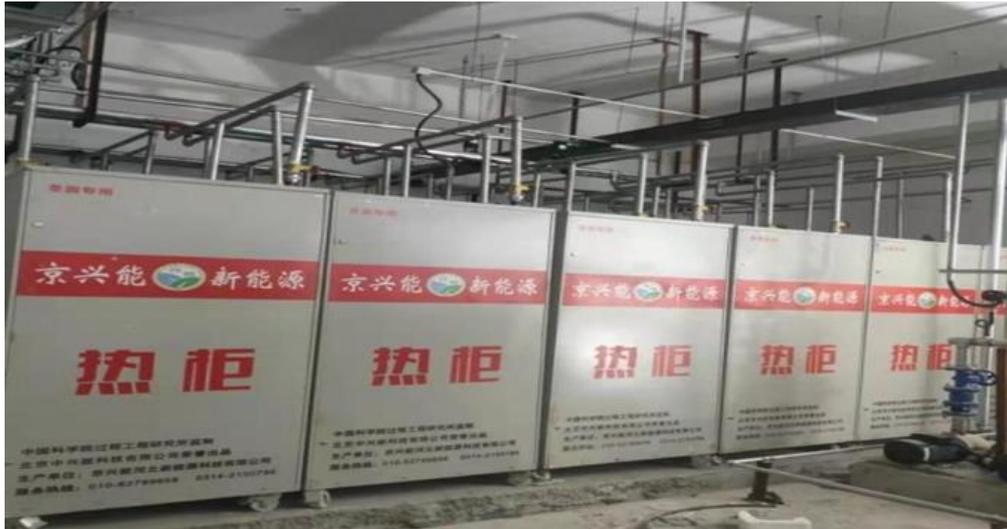


图 5-19：张家口山地转播中心“相变储热-电网谷电清洁供暖示范项目”



图 5-20：张家口山地转播中心

5.2.1.2 零碳智慧园区相变蓄热储能系统项目

辽宁邮电规划设计院打造的“零碳智慧园区”，主体建筑四栋。热力主要用于冬季采暖。园区原来采用市政供暖方式，年采暖费用共计 51.8 万元，供暖效果不佳，供暖季室内平均温度低于 16℃。该项目采用清洁能源供暖方式替代传统市政供暖，利用谷电热库全蓄热式供暖系统，对 7-2 行政办公楼、7-3 系统集成楼食堂、7-4 电力系统楼、7-5 网络协会楼供暖。系统利用夜间谷电产生热能并储存在热库里，非谷电时段不再消耗电能（水泵正常循环），利用已经储存在热库的热量，按需按时精准释放，为建筑物用供暖、供热水。该项目设备包括电锅炉 1 台（1.4MW）、板换 1 套、循环泵 6 台、水处理装置 1 套、控制柜 1 台、供电

柜 1 台。除此之外，采用固体蓄热储能技术对 7-3 系统集成楼三层进行供暖，利用低谷电蓄热，根据用量逐步释放，达到降低运行费用的目的。项目设备主要包括 1 台电锅炉（300kW）、循环泵 3 台、控制柜 1 台、供电柜 1 台。



图 5-21：辽宁邮电智慧相变蓄热储能系统实景图

从项目的运行效果来看，该项目利用谷电蓄热储能技术进行冬季供暖，供暖季总耗电量约为 691146 千瓦时、总电费约为 26 万元。与该项目原来 51.8 万元的供暖费相比，每年节省 49.8%。与此同时，该系统每年节省 276.8 吨标煤、减少二氧化碳排放量 719.1 吨、减少二氧化硫排放量 2350.27 千克、减少细小颗粒物排放（PM2.5）3318 千克，具有良好的节能减排和环境保护作用。

5.2.1.3 华润生命科学园相变蓄热储能供暖项目

由北京安兴高科新能源发展有限公司规划、设计、承建的相变蓄热供暖合同能源管理项目，旨在将园区办公楼的供暖方式由燃气锅炉改造为高效 PCM 相变柔性热池谷电蓄热供暖，用非化石能源代替化石能源供暖。该项目涉及供暖面积 4.6 万平方米。

该项目采用安兴高科自主研发的高效相变柔性热池蓄热储能技术。该项目可

有效消纳“谷电”，实现“削峰填谷”，减小电网负荷峰谷差，使发电、用电趋于平衡，累计可帮助国家消纳谷电 16000 兆瓦，折合每年节省 4888 吨标准煤、减少 5639.29 吨二氧化碳排放，具有极高的环境保护作用。

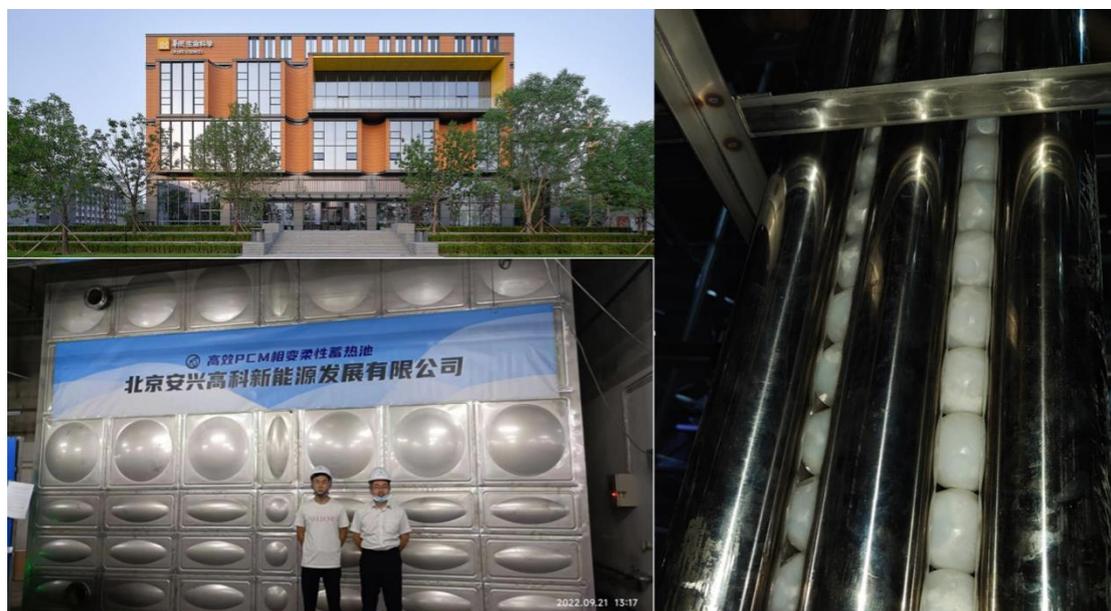


图 5-22：华润生命科学园相变储热供暖项目实景图

5.2.1.4 蒙古国乌兰巴托某幼儿园供暖项目

远能（苏州）环境科技有限公司规划、承建的位于蒙古国乌兰巴托的某幼儿园供暖项目，将 50kWp 光伏系统电能转化为热能，热能暂时储存在潜热储存罐中。当罐中的相变储热材料融化时，热能被储存在潜热储存罐中。而当相变材料硬化时热能被释放。热量通过绝缘水管传导至各个房间进行供热。通过与相变蓄热储能技术的结合，可实现太阳能不并入电网也能在冬季得到有效利用。据统计，该项目可减少 150 吨二氧化碳排放。



图 5-23：项目实景图

5.2.1.5 深圳招商局港口大厦“相变蓄冷-电网谷电”中央空调蓄冷项目

中国科学院过程工程研究所和企业共同研发了新型相变蓄冷材料 PCM7.5，基于此项成果研制出谷电通相变蓄冷机组并进行工程示范。该工程位于深圳市。该项目的谷电通蓄冷机组由零碳未来(重庆)能源发展有限公司提供。该大厦总建筑面积 11.4 万平方米，其中主塔楼 25 层，高 100 米，五栋裙楼均为三层，为主塔楼提供银行、餐饮等商业配套。根据项目空调系统配置测算，办公区蓄冷量为 14 770 kWh、商业区蓄冷量为 6 954.1 kWh。一期项目采用 8 台相变蓄冷机组，蓄冷量为 7kWh，为该大厦商业区进行供冷。该项目利用原备用制冷机组采用夜间谷电进行制冷，并将冷能存储在自主研发的复合高分子相变储能材料中，在白天冷量需求高峰时使用，有效解决了系统能耗高的问题。该项目储冷设备的成本为 200~300 元/kWh，低于单位千瓦时的储电成本。



图 5-24：深圳招商局港口大厦 “相变蓄冷+电网谷电” 中央空调蓄冷项目实景图

5.2.2 固体蓄热储能案例分析

电固体蓄热储能将低谷电能转化成热能储存，用于峰电期间供暖或供热水。

图 5-25 展示了设备的工作原理。



图 5-25：固体蓄热装置工作流程示意图【77】

5.2.2.1 新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目

新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目于 2020 年 10 月由沈阳兰昊新能源科技有限公司投运。该项目供暖面积约 8 万平方米，设计建设安装两台 4 兆瓦热水型固

体电蓄热设备进行供暖。项目采用谷电蓄热，利用夜间 10 小时，下午 2 小时，共 12 小时的谷电时间进行蓄热，当地电价为 0.165 元/kWh，系统全天供暖，保证居民供暖以全镇建筑供暖温度在 24℃以上，供暖季白天无需启动平电补热，靠全谷电即可满足供暖需求。



图 5-26：新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目及居民家中“煤改电”采暖设备实景图

该项目每年供暖运行电费约 170 万元，比原来每年约 200 万元的采暖费节省费用 30 万元。

5.2.2.2 张家口凯博风尚商城电热式固体蓄热储能供热项目

张家口凯博风尚商城电热式固体蓄热储能供热项目由河北泽瑞节能新能源有限公司于 2017 年投运。该商城供热面积为 2.3 万平方米，原采用 2 台 2 吨的燃煤热水锅炉，每年采暖季燃煤成本达 80 万左右。

该项目采用一台 1.8 兆瓦的固体储能供热设备，将低谷电能转化成热能储存在蓄热体中，在峰电期间释放热量，满足采暖需求。该项目采暖末端为暖气片，谷电时长 10h，商场供热系统每天满负荷运行时间 12 小时。



图 5-27：项目实景图

该项目实施前每年燃煤成本 80 万元，实施后谷电采暖每年用电量 148 万度电，折合电价 41.5 万元，每年供热成本较项目实施前年节省 38.5 万元，供热成本降低 48.13%。该项目年减少 454.2 吨 CO₂排放量。

5.2.2.3 内蒙古赤峰市德润排水有限公司固体电蓄热供暖项目

该项目将燃煤锅炉替换为固体电蓄热供暖，由沈阳兰昊新能源科技有限公司于 2019 年投运。该项目共有建筑面积约 3.2 万平方米，安装两台 1.5 兆瓦热水型固体电蓄热设备进行供暖。项目利用谷电电力蓄热，谷电时长为 9 小时，白天正常上班之前开始供暖，保证办公室温度在 22℃ 以上，车间温度在 8℃ 以上。供暖季期间，全天仅靠谷电即可满足供暖需求，每年供暖成本约 100 万元，相较于改造前，采用固体电蓄热设备供暖后，每年节省费用 80 万元。具有较好的经济效益。



图 5-28：项目固体电蓄热设备

5.2.2.4 山西省大同市灵丘县 40 万千瓦风电供暖示范项目

该项目由大连传森科技有限公司于 2018 年投运。项目采用风电场无法上网的风电，通过固体蓄热技术+智能电网负荷调配系统，实现供暖季 165 天集中供暖，使得室内温度可以达到 22-25℃的供热需求。设备利用弃风电力对固体蓄热机组中的镁砖进行加热蓄热，在用户采暖用热时段释热供暖。



图 5-29：项目固体蓄热机组

从项目的整体运行效益来看，80 万平米的电蓄热锅炉供暖，可取代 70 万吨燃煤锅炉，每年可节约标煤 28 万吨，减少排放二氧化硫 300 吨，碳氧化物 280.6 吨，二氧化碳 80 万吨。与此同时，该项目减少弃风小时数约 283h，约占风资源等效利用小时数的 11.8%，可以大大提高弃风电量的利用。

5.2.2.5 赤峰市党政综合楼供暖项目

该项目于 2022 年由内蒙古梅捷新能源科技有限公司投运。项目对赤峰市党政综合楼 7.6 万平方米的建筑进行制供暖。原供暖方式为地源热泵，改造后利用固体蓄热技术进行建筑供暖。

在自动化控制程序的操作指令下，设备在夜间低谷时段开始时启动，通过发热丝给固体储热砖进行升温，从而将电能转化为热能存储在固体储热砖中。当温度达到设定蓄热温度或谷电时间段结束，设备自动切断高压接触器，蓄热结束。当用热时，设备内置换热器配套高温循环风机开始运转，蓄热砖中的热量以热风形式送入内置换热器，通过内置换热器可将流经换热器的采暖循环水等循环介质

加热，从而达到热量输出的目的和要求。



图 5-30：项目实景图

从项目的运行效果来看，相比于之前建筑采用地源热泵供暖的方式，项目改造后耗电电费为 249.2 万元，整体节能占比为 11%。每年供暖用水可节约 491.83 万吨/年。与此同时，该项目在 6 个月的采暖期能够节省煤炭 2000 吨，有效节能减排二氧化碳 3600 吨，减少排放污染烟尘 13820 吨和二氧化硫污染物 9360 吨，相当于种植植被 20 万公顷。现可使室内冬季供暖温度可达 22℃ 以上，既符合经济节能要求又达到了用户的供暖需求。

5.2.3 熔盐蓄热储能技术案例分析

熔盐蓄热储能技术利用高温盐类（通常是氯化钾和氯化钠的混合物）来储存热量，并在需要时释放热能，从而可以用来解决建筑领域能源储存和利用的问题。某些现代建筑已经开始采用熔盐蓄热储能技术作为供暖和制冷系统的一部分，用于提高能源利用效率，减少对传统能源的依赖，减缓气候变化带来的环境影响。

熔盐蓄热储能技术的技术流程通常可以分为充放两个阶段：

1) 充热阶段：首先利用外部能源（如太阳能、风能、电力等）将熔盐加热到高温状态。加热后的熔盐被储存在热储存罐或热盐槽中，通常位于建筑内或附近的地方。

2) 放热阶段：当建筑需要供暖或其他热能需求时，通过管道系统将熔盐从热储存罐中输送至建筑内的热交换器。在热交换器中，熔盐释放热量给建筑内的空气或水。这些载热介质可以被用来供暖建筑，提供热水，或者用于其他热能需求。经过热交换后，熔盐冷却下来，凝固成固态，然后重新循环回热储存罐进行

再次充电，循环利用热能。

整个技术通过充放电的过程来实现热能的储存和利用，可以根据建筑的能源需求进行调节，使其更加灵活高效。

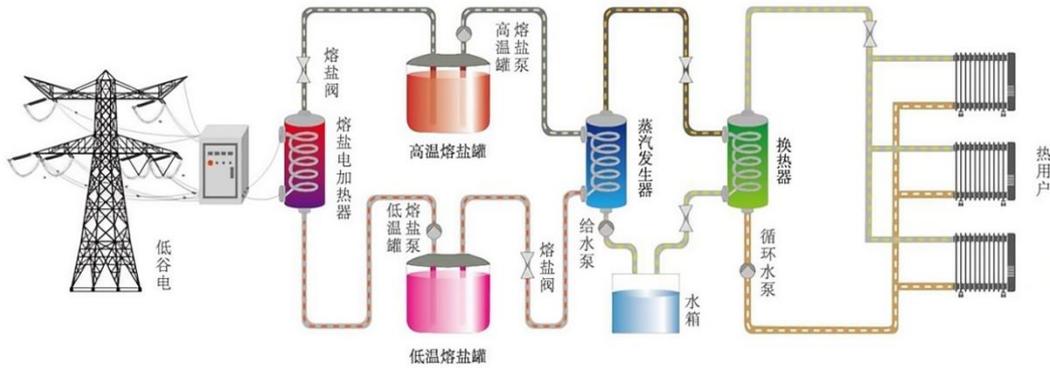


图 5-31：熔盐储热技术流程图

5.2.3.1 河北辛集崇阳小区熔盐绿色供热示范项目

该小区供暖项目于 2016 年 5 月开工，项目总投资 1700 万元，供热面积可达 13.3 万平方米，相当于一台 1310 蒸吨锅炉的供热面积。项目采用了 450 吨低熔点熔盐，安装了两个熔盐罐，罐体尺寸为直径 8 米*高 4.5 米，蓄热容量 37 兆瓦时。



图 5-32：项目实景图

该系统将熔盐作为储热介质，利用夜间谷电，把低温熔盐加热到高温并储存，白天不用峰电，让高温熔盐通过换热器放热，实现全天供暖。据统计，该项目供

暖面积 7.5 万平方米，可为 700 多户居民供热。每年可减排二氧化碳 3537 吨、粉尘 131 吨、二氧化硫 11.1 吨、氮氧化物 9.67 吨，具有良好的环境效益。

5.2.3.2 辽宁省韩家店镇人民政府供暖系统改造项目

该项目采用百吉瑞（天津）新能源有限公司研发的新型煤改电熔盐蓄热单罐供暖系统，是低熔点熔盐储能系统在供暖工程中的首次应用，实际供暖面积近 6000 平方米，供暖时间 150 天/年，室内平均实测温度 23℃，与燃煤锅炉供暖时期相比，供暖费用没有增加。经过一个供暖期的运行测试，该系统运转平稳。供暖效果良好，运营费用低且各项监测指标均达到预期值。



图 5-33：项目熔盐蓄热单罐供暖系统

5.2.4 水/冰蓄冷储能技术案例分析

建筑中的水/冰蓄热（冷）储能技术利用水或冰作为载热介质来储存和释放冷量。

水蓄冷工作原理：

1) 充能阶段：在低峰时段或夜间，利用低成本电力或可再生能源等热源，通过冷却设备将水冷却至较低温度（通常在 0℃ 至 10℃ 之间），并将其储存在储水罐或水箱中，以供后续释放冷量时使用。

2) 释放冷量：在高峰时段或需要制冷的时候，通过冷水管道系统将冷水输送至建筑内的热交换器，冷水在热交换器中吸收室内热量，从而降低室内温度。

冰蓄冷工作原理：

1) 冷却阶段：在低峰时段或夜间，利用低成本电力或太阳能等可再生能源，通过冷却设备将水冷却至结冰点以下，并将其储存在冰蓄冷槽或冷水储存罐中。以供后续释放冷量时使用。

2) 释放冷量：在高峰时段或需要制冷的时候，通过冷水管道系统将冷水输送至建筑内的热交换器，冷水在热交换器中吸收室内热量，从而降低室内温度。

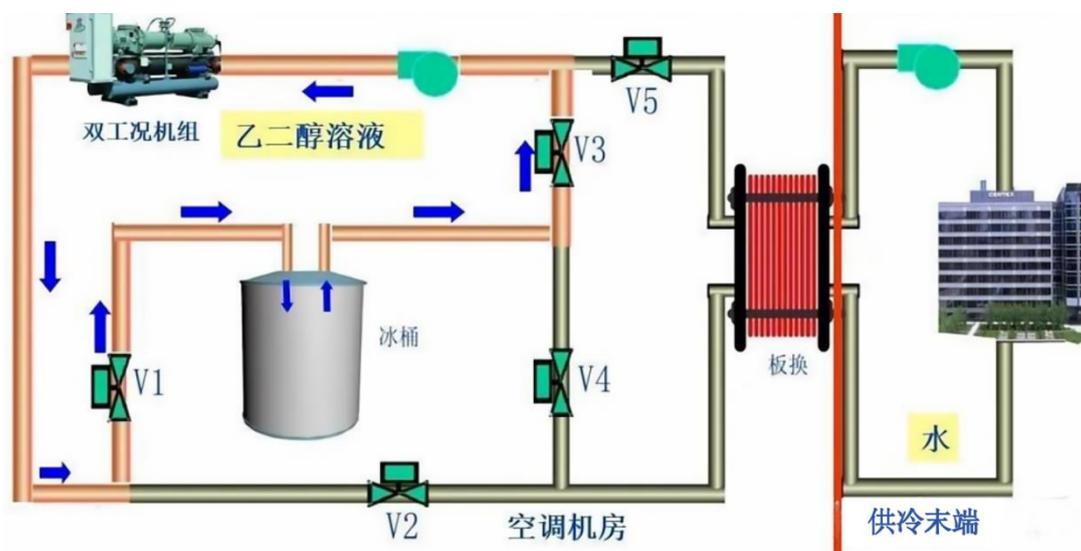


图 5-34：冰蓄冷技术原理流程图【78】

5.2.4.1 一汽大众汽车有限公司天津工厂联合站房水蓄冷项目

该项目选用 1 台 14000 立方米的蓄冷罐，总蓄冷量约为 130000 千峰瓦时从而减少涂装车间、总装车间及冲焊联合厂房以及全厂空调用冷费用。如图 5-29，该蓄冷罐安装于室外。罐体直径 30 米，设备液位高度 20 米，总高度约 23 米；蓄冷罐的蓄冷水温差为 8°C ($6/14^{\circ}\text{C}$)。



图 5-35：项目水蓄冷罐实景图

项目工厂全年存在用冷需求，夏季夜间采用 2 台 9500 千瓦离心式冷水机组为蓄冷罐蓄冷。白天高峰时段停止冷机运行，采用蓄冷罐直接供冷，系统最高液位点比蓄冷罐低，因此无板换换热，进一步提高蓄冷罐的使用效率。蓄冷罐的低温水向涂装车间、总装车间及冲焊联合厂房以及全厂空调用冷供冷。春秋季节，用冷需求减少，蓄冷罐内存储的冷冻水不仅仅提供高峰时段的冷量需求，也覆盖到平段的需求。通过蓄冷调峰，减少了系统在尖峰用冷时期的需求，减少尖峰机组投入，降低设备装机容量和配套变配电投资。解决制能与用能时间和规模不匹配的问题。通过移峰填谷，节省运行电费达 20-70%。

5.2.4.2 广州华润创智园动态冰蓄冷中央空调供冷站项目

该项目园区位于广州市黄埔区科学城，园区总建筑面积约 12 万平方米，夏季空调尖峰负荷大，且昼夜负荷差巨大。为了响应“双碳”目标下节能减排的号召，对于园区的中央空调供冷，采用动态冰浆蓄冷技术方案，利用夜间电网的低谷电力储存冷量，在白天电力高峰时段则用储存的冷量代替部分制冷机组供冷，统一向园区各个建筑物供给冷量，从而显著降低冷站的高峰电力消耗量。图 5-36 展示了该项目实景图。

该项目采用冰蓄冷技术，在夜间蓄冷谷电时段，通过 3 台 660RT 的双工况离心式主机全力蓄冰，双工况主机在蓄冰工况下的乙二醇防冻液出水温度为全程稳定的 -3°C ，制冰工况下的能力约为 7°C 出水空调工况下的 75%，单台机组每小时蓄冷量 495RTh，对应配置 3 台 KDI600 型动态制冰机组。夜间低谷时段 8 小时总蓄冷量 11880RTh，设计蓄冷密度 $12\text{RTh}/\text{m}^3$ ，蓄冰槽设计容积为 1000 立方米，设计日蓄冰率约 33%。

据实际运行测算，项目在夏季高峰时段可以削峰 2100 千瓦电力负荷，设计日移峰 10000 千瓦时/日的峰电，全年移峰 150 万千瓦时的峰电。不但实现了园区能源费用的显著节约，同时也为电网负荷的移峰填谷创造了积极的效益，从而间接对电网发电侧的节能减排和对绿电利用率的不断提高产生了积极的贡献。

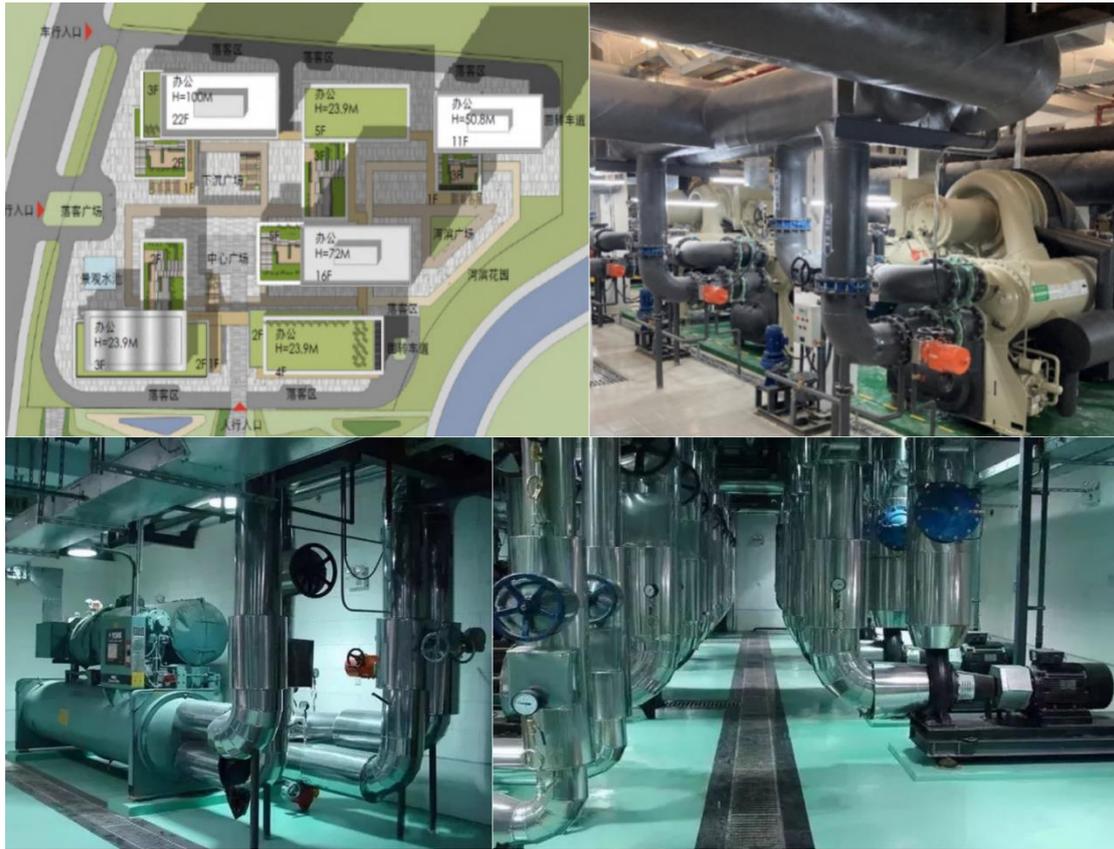


图 5-36：项目实景图

5.2.5 土壤蓄热储能技术案例分析

土壤蓄热技术通过地源热泵系统，利用地下土壤或地下水体中相对稳定的温度来进行热能的吸收和释放，从而实现建筑供暖和热水供应等功能。

5.2.5.1 陕西省洋西新城地热清洁供热项目

项目采用“只取热不取水”的方式将中深层地热能用于建筑供暖，提供清洁热源。如图 5-37 所示该项目通过安装在钻孔中的金属套管换热器中传热流体（软化水）流动，从地下深处（2-3 千米深，储存着温度高达 70°C 的地热能）获取热量，然后热量将通过地面热泵机组和供热管网供应给地面建筑。该地热清洁供热系统主要由中深层换热孔、换热站（热泵机组）、供热系统一次管网、用户侧计量和控制设备（建筑物）等组成。图 5-38 展示了该地热清洁供热项目的施工现场以及地热供热机房实景图。

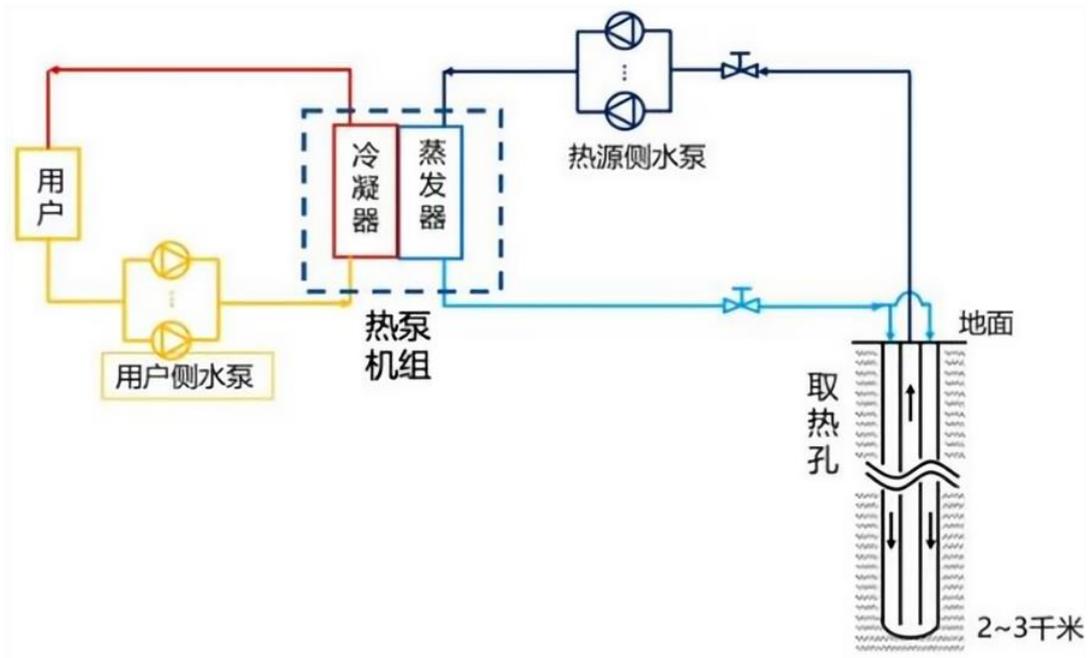


图 5-37：沔西新城地热清洁供热项目工艺流程图



图 5-38：项目施工现场及地热供热机房实景图

该项目可供给陕西省西咸新区沔西新城内约 2000 万平方米建筑，保障供暖季建筑室内温度不低于 20°C 。一个采暖季相比燃煤锅炉供热，可代替标准煤约

32 万吨，减少二氧化碳排放量约 86 万吨。

5.2.5.2 北京大兴国际机场地源热泵供热项目

北京大兴国际机场地源热泵供热项目位于永定河蓄滞洪区内，项目建于 2019 年。机场场区供热面积将近 294 万平方米，建有 8 台 7.1 兆瓦地源热泵机组，设置换热孔 10680 个，规模为全国浅层地热利用前列。地源热泵冬天可供暖、夏天可供冷，一年四季均可使用，与传统的锅炉供热方式相比，也不产生烟气等排放物，非常环保。图 5-39 展示了该项目实景图。



图 5-39：项目实景图

在项目运行的四年里，大兴机场地源热泵站在供热季已提供了 39.8 万吉焦绿色能源，相当于减少天然气使用 1153 万立方米，节省 10444 吨标煤，减少 8304 吨的碳排放，实现了供暖季年可再生能源利用率从 11.4%到 12.52%连续四年提升。

5.3 工农业蓄热储能案例分析

5.3.1 工农业用热现状

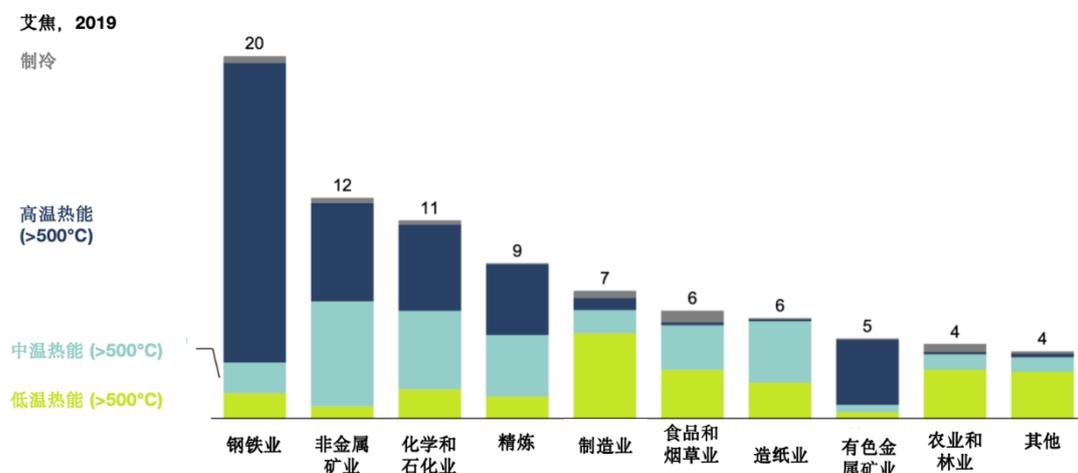


图 5-40: 2019 年全球各工业能源消耗与各温区应用占比【67】

根据国家统计局于 2023 年发布的中国统计年鉴中给出的数据，我国工业领域的能源消费量为 348551 万吨标准煤，约占全国总能耗的 66%，而发达国家工业能耗只占到三分之一左右【73】。图 5-40 展示了 2019 年全球各工业能源消耗与各温区应用占比，可以看到工业能源消耗主要集中在高温应用领域。另外，由图 5-40 展示的全球工业能耗以用热温区划分后的供热热源占比图可见，有至少 70% 的工业热量来源于化石燃料的燃烧【67】。传统的能源供应方式往往效率低下且环境影响大。为了解决这一问题，蓄热储能技术被引入工农业工艺过程中，以实现能源的高效利用和节能减排。在节重点分析工农业工艺过程中的蓄热储能案例，以展示该技术在实践中的应用效果和可行性。

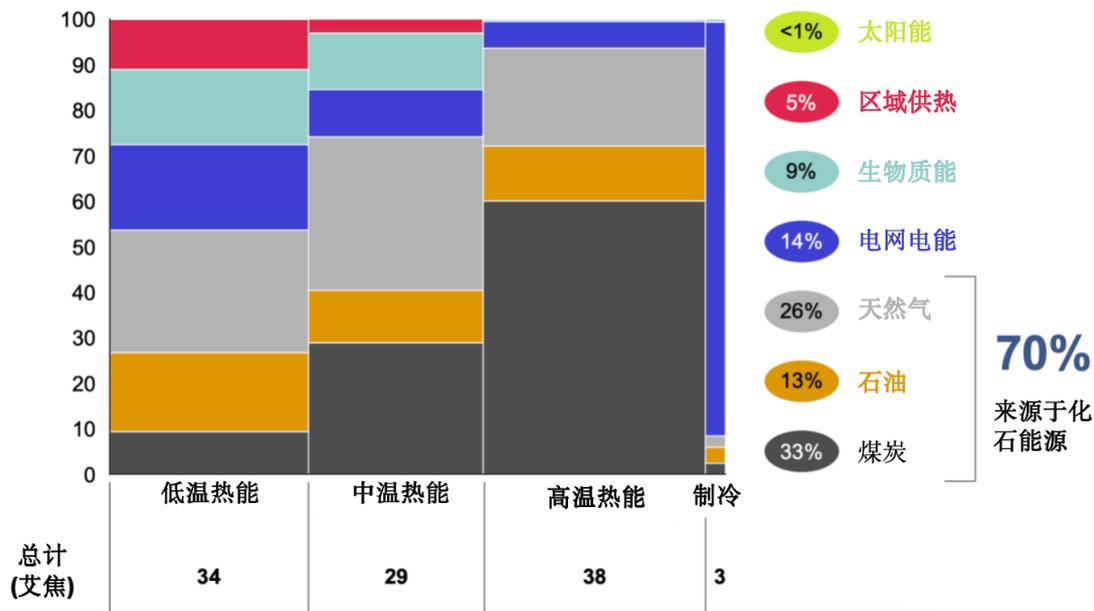


图 5-41：全球工业能耗以用热温区划分后的供热热源占比【67】

除去钢铁制造工业、非金属采矿业、石油加工业以及化学原料和化学制品制造业等重型工业领域对大于 500°C 的高温热能有需求外，其余的如食品工业、纺织工业、木材加工业等工业领域对 500°C 以下的热能是有更高需求的。在这些工业的生产过程中，很多都涉及到清洗、干燥、预热等工艺，其中大部分的工艺对温度的需求都在 100°C-300°C，这些场景非常适合利用上述提到过的包括相变储热，太阳能储热等技术在内的清洁蓄热储能方式【79】。表 5-3 列举出了工业领域主要行业的用热情况作为参考，并选取了一些领域内利用蓄热储能技术供热的案例进行分析。

我国工业余热资源丰富，钢铁、化工、水泥、建材等行业的余热资源约占其燃料消耗总量的 17%-67%，其中可回收利用的余热资源约占余热总资源的 60%。目前我国余热资源利用比例低，大型钢铁企业余热利用率约为 30%~50%，其他行业则更低，余热利用提升潜力大。另外，在所有的余热资源来源中，高温烟气余热和冷却介质余热占比最高，分别达到余热总资源的 50%和 20%左右，是余热回收利用的主要来源【80】。

表 5-3：工业领域用热情况【79】

工业应用领域	用途	热能形式	温度 (°C)
食品加工	冲洗	水蒸气	80-150
	浓缩	蒸汽	130-190
	干燥	蒸汽 (空气)	130-240
酒、饮料和精制茶制造	冲洗	蒸汽	60-80
	消毒	蒸汽	60-90
	杀菌	蒸汽	60-70
塑料加工	引发	蒸汽	130-150
	快速分离	蒸汽	150
	挤压	蒸汽	150
	干燥	蒸汽 (空气)	180
	混合	蒸汽	150
玻璃加工	压平	空气	110-150
	干燥纤维	空气	130-180
化学工业	加热浸折	蒸汽 (空气)	150-180
	烘干	蒸汽 (空气)	150-180
造纸工业	牛皮纸漂白	蒸汽	150-180
	干燥	蒸汽	150
木材加工	窑内烘干	空气	80-120
	胶合板制备	蒸汽	120-180
	热压纤维板	蒸汽	200
合成橡胶	引发	蒸汽	130
	单体回收	蒸汽	130
	干燥	蒸汽 (空气)	130
纺织工业	漂白	水	80-100
	处理	蒸汽	80-130
	干燥	蒸汽 (空气)	80-140
公路建设	融化沥青	蒸汽	120-180
烟草行业	制丝	蒸汽	150-200

因此，通过利用工业生产过程中产生的余热，将其储存起来，可以在需要时释放出来，用于供热、供能等用途，从而提高能源利用效率。这种方式不仅可以减少能源的浪费，还能降低工业生产过程中的碳排放量，实现能源的节约与环境保护的双重目标。

表 5-4：各工业行业余热占该行业燃料消耗量的比例【80】

行业	余热资源来源	占燃料消耗量的比例
冶金	轧钢加热炉、均热炉、平炉、焙烧窑等	33%以上
化工	化学反应热，如造气、合成气、变换气等的物理显热；可燃烧热，如炭黑尾气、电石气等的燃料热	15%以上
建材	高温烟气、窑顶冷却、高温产品等	约40%
玻璃	玻璃窑炉、搪瓷窑、坩埚窑等	约20%
造纸	烘缸、蒸锅、废气、黑液等	约15%
纺织	烘干机、浆纱机、蒸煮炉等	约15%
机械	锻造加热炉、冲天炉、热处理炉及汽锤排汽等	约15%

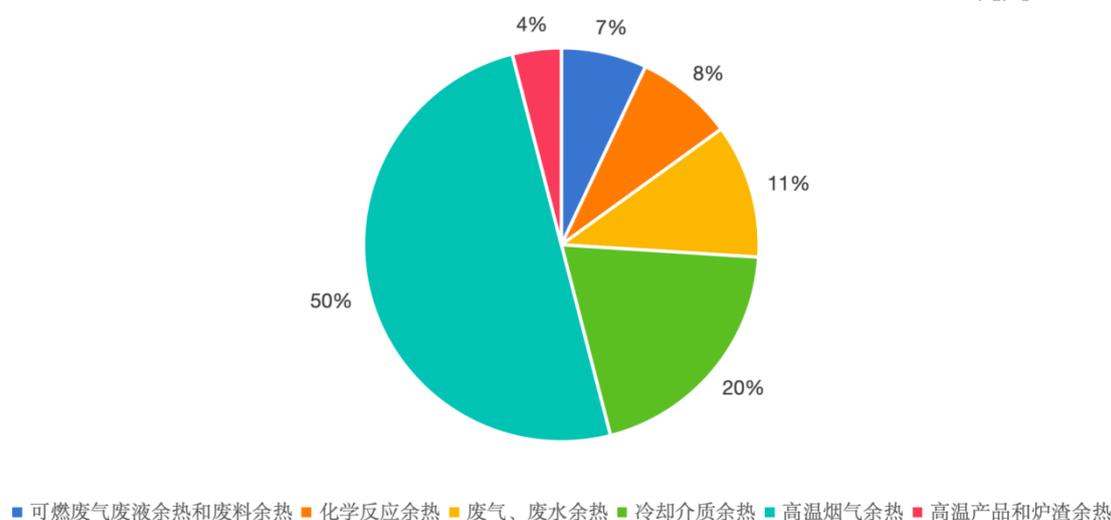


图 5-42：中国余热资源结构图（2020 年）

5.3.2 酒、饮料和精茶制造业蓄热储能

5.3.2.1 酒、饮料和精茶制造业能耗概况及热利用分析

根据国家统计局 2023 年发布的中国统计年鉴给出的数据，中国截止至 2021 年底，酒、饮料和精茶制造业，共有 5765 家企业。行业能耗占到了工业总能耗的 0.37%。全国规模以上酒、饮料和精茶制造业能耗值同比增长 7.3%【73】。

酒、饮料和精茶制造业是一个将原材料转化为高附加值产品的过程。在制造过程中，常见的操作包括提取、发酵、加热、降温、浓缩、消毒、灭菌包装等步骤，以保证产品的品质、口感和安全性，其中许多步骤都不同程度地对生产环境中的热能供应有一定需求。其中热能主要应用于消毒（60-90℃）与杀菌（60-70℃）步骤。总体来看，酒、饮料和精茶制造业中，诸如蒸、煮、清洗、杀菌、消毒等工艺都会用到大量的热能，而这些热能都能通过利用蓄热储能技术后积蓄的热能来供应。因此，蓄热储能技术在酒、饮料和精茶制造业领域应用的潜力巨大。

5.3.2.2 习水县小糊涂仙酒厂固体蓄热式能源示范项目

随着产量的不断提升，该酒厂生产用汽量持续增长，车间原有的 2 台 10 吨/小时燃气锅炉长期处于高负荷运行状态，锅炉排污排废压力大，能耗高蒸汽成本高，且出现用气高峰期天然气供应压力不足导致锅炉效率低等现象等。因此，为了降低蒸汽的能耗成本，保证酒厂生产用汽连续稳定，安徽中科储能科技有限公司于 2022 年 9 月投运开展了该酒厂的固体蓄热式能源示范项目，在酒厂现有锅炉房基础上，新建一套固体蓄热式电锅炉，满足酒厂生产用汽需求，提高酒厂生产系统运行可靠性和稳定性，从而降低酒厂企业的运行成本。



图 5-43：习水县小糊涂仙酒厂固体蓄热式能源示范项目现场图片

项目设计回收酒厂废热，用于锅炉给水的初步加热，基本实现常温 5℃水加热到 70℃，存储在软水箱内。改造完成后，固体蓄热式电锅炉采用全谷电运行模式，每日加热 8 小时，实现向酒厂连续稳定供应 0.6-1.0 兆帕饱和蒸汽 10 小时，每日供应蒸汽约 100 吨，最大瞬时供汽量为 20 吨/时，全年可供蒸汽 27225 吨。

从项目的运行效果看，在该系统的运作下，每日可减少天然气燃烧 8000 余方，减少二氧化碳排放约 17.1 吨，在目前天然气单价 3.9 元立方米，谷电价格 0.2835 元/千瓦时的前提下，用汽成本下浮约 10%。同时，全年开工 275 天，供减排 4700 余吨，碳排放指标交易后可收益 26 万余元。

5.3.3 纺织业蓄热储能

5.3.3.1 纺织业能耗概况及热利用分析



图 5-44：中国纺织服装行业细分行业排放量【81】

截至 2021 年底，中国共有 20413 家企业。根据国家统计局 2023 年发布的中国统计年鉴给出的数据，截止至 2021 年底，纺织业能源消费总量为 7932 万吨标准煤，占到了工业总能耗的 2.28%【74】。目前，我国纺织行业作为高耗能行业，已经成为国家节能改革的重点行业。

在纺织业的生产过程中，热能是必不可少的资源。例如，在漂白过程中需要使用大量 80-100°C 的热水；在布料处理及干燥环节，需要使用 80-140°C 的高温蒸汽，以实现纤维的拉伸、染色或定型等工艺要求。事实上，大多数印染厂每天用热量大约在 500-5000 吨，每年消耗蒸汽约 1.7-18 万吨，且排放大量温室气体、废气及烟尘【70】。通过在纺织生产过程中合理利用蓄热储能技术，可以实现热能的高效利用和能源的节约。同时，蓄热储能技术还可以实现能源的可再生利用，减少对传统能源的依赖，有利于纺织业的可持续发展。

5.3.3.2 常州市卿卿针织厂谷电蒸汽蓄热锅炉项目



图 5-45：该针织厂内蒸汽储热罐、现场调试及生产用热过程实景图

2020 年 10 月，江苏省常州金坛区指前镇卿卿针织厂谷电蒸汽蓄热锅炉正式投运，该系统利用汽液相变蓄热转换装置，将高压蓄热器内 200℃ 的高温锅炉水汽化成蒸汽供工人熨烫、除湿等使用。

该厂位于江苏常州金坛区，企业厂房总面积达 23000 平方米，主要生产普通针织薄料服装、普通针织厚料服装和针织运动户外服等产品。企业原由一台厂区外的 10 吨燃煤锅炉供气，2017 年煤改电后在本厂区内使用电直热式蒸汽发生器替代原燃煤锅炉供气。每天蒸汽需求 5 吨左右。由于其生产时段主要在峰和平段，导致蒸汽成本每吨达到 500 元以上。

因此该厂为了实现降本增效，建设了一套 440 千瓦电热相变蒸汽锅炉，蒸汽能力为 0.63 吨/时。另外系统还搭配了一套相变蒸汽能量储存转化系统以及远程蒸汽蓄热自动控制系统，实现夜间蒸汽蓄热能力为 5-7 吨/日，满足白天生产蒸汽需要。按照该服装厂 2019 年提供的 10 天典型检测日分析给出的电力运行数据：10 日总耗电量为 25778 千瓦时，其中峰电占比 43.33%、平电占比 43.23%，谷电占比 13.44%。通过该谷电蒸汽蓄热锅炉技术，该厂每年可减少成本近 40 万元。

5.3.4 工业余热蓄热储能案例

5.3.4.1 包头钢铁蒸汽余热回收项目

在传统焖渣工艺过程中，热量被产生的蒸汽和冲渣水带走，直接外排并造成热能浪费。而包头钢铁厂每日产钢渣约 5850 吨以上，从转炉出来的钢渣温度达到 1300°C 以上，传输到闷渣坑前经自然散热变为 800-900°C，在闷渣坑内喷洒水降温，热量由产生的蒸汽和冲渣水带走，这造成了严重的工业余热资源的浪费【82】。单由于钢渣传送是间断的，但用户侧热能需求连续稳定的，所以该项目利用高密度低温相变蓄热装置和高效真空换热技术，通过负压罐将无压蒸汽引入相变蓄热装置底部的高效换热盘进行汽-水换热，蒸气凝结为水时产生更大负压吸引蒸气进入换热器换热后产生的冷凝水被重复利用，既回收利用余热又节约生产用水。



图 5-46：项目蒸汽负压余热回收装置和蓄热机组实景图

正常工况时对外供热温度 $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。目前焖渣的热量回收了三分之一，每天可回收热量 720 吉焦。供热能力 8.33 兆瓦，对外供暖面积达 50 万平方米。年采

暖季回收余热量 13 万吉焦，回收冷凝水 4.6 万吨。年节能量折合标煤 3.2 万吨，减排二氧化碳 10 万吨，创造价值 1536 万元。闷渣冷却放散蒸汽冷凝水全部回收循环利用时，日回收冷凝水 1680 吨。

5.3.4.2 内蒙古赤峰“工业余热+太阳能”跨季节蓄热供暖示范项目

本项目属于“科技部十二五科技支撑计划项目——太阳能储热技术研究与示范”（2014BAA01B00）。工程位于内蒙古赤峰市，以当地一家铜冶炼厂余热为热源，并配置 1000 平方米太阳能集热阵列，利用本项目开发的“多热源跨季节储热系统热源优化匹配技术”构建热源网络，优化系统取放热流程，实现工业余热与太阳能协同应用。基于本项目开发的“大规模高温地埋管跨季节储热技术”开发 50 万立方米地埋管储热系统，集成“地埋管管群优化排布”、“地埋管分区优化控制”等先进技术，实现储热效率提升，大幅降低系统成本。利用本项目开发的“低品位跨季节储热体高效取热技术”，实现储热体和低品位工业余热的协同提取。利用本项目组开发的储热理论对跨季节储热体及其与热源和热网系统集成进行优化，实现北方严寒城市集热、储热、供热系统一体化运行。

该项目是国内首个成功运行的跨季节储热项目，也是迄今世界上规模最大的地埋管跨季节储热项目。该项目将非采暖季铜厂约 70℃ 的废热储存到土壤中，将地温提升至 55℃，储热效率达到 83.9%，远高于国外地埋管跨季节项目（普遍低于 65%）。供热功率 7.5 兆瓦，年供热量 11.8 万吉焦，能满足项目所在地 15 万平方米建筑供热需求。储热成本 0.13 元/kWh，低于国外跨季节储热项目（普遍为 1~3 元/kWh）。低于项目所在地燃煤采暖的燃料成本。

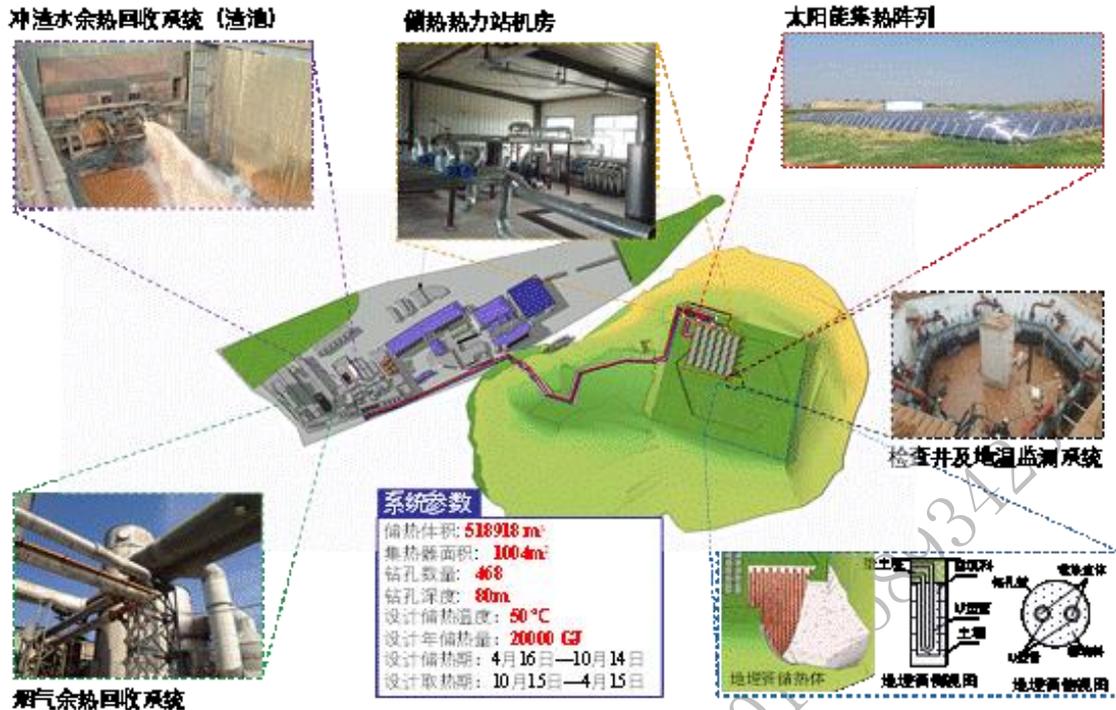


图 5-47:内蒙古赤峰“工业余热+太阳能”跨季节蓄热供暖示范项目

5.3.5 农业蓄热储能案例分析

在农业生产中，温室大棚供热是一项关键的技术应用，尤其是在寒冷地区或寒冷季节。蓄热储能技术在这一领域的利用，为解决温室大棚供热过程中能源消耗和能源波动等问题提供了可行性解决方案。通过蓄热储能技术，可以有效地收集、储存和利用太阳能或其他可再生能源产生的热能，为温室大棚提供稳定的供热能源。本节将探讨蓄热储能技术在农业生产中的应用情况、技术原理以及相关案例，以期为农业生产提供更加可持续、高效的能源解决方案。

5.3.5.1 敦煌种业玻璃温室电蓄热供暖项目

7.8 万平米农业水果蔬菜玻璃大棚清洁综合能源（蓄冷+蓄暖+热水）示范项目，地点位于酒泉市肃州区总寨镇戈壁农业产业示范园，供暖对象为玻璃温室，面积约 7.8 万平方米，单位热负荷 180 瓦/平方米，利用谷电对水蓄热系统进行储热以供给项目热源，保持玻璃大棚的恒温。



图 5-48：敦煌种业玻璃温室电蓄热供暖项目实景图

该项目每年节约燃煤 13537 吨，减排二氧化碳 33500 吨、二氧化硫 1600 吨、粉尘 9200 吨、氮氧化物 780 吨。利用玻璃大棚恒温+水蓄能系统+多能互补的组合式系统，能够有效利用光伏在大西北白天光照，使玻璃大棚恒温，利用水蓄热系统能够充分利用峰谷电价政策，有效节约运行费用，为农业蔬菜大棚能源管理节能运营提供了一个可借鉴的参考，为祁连山生态保护和“碳达峰”和“碳中和”的国家战略目标作出积极贡献。

5.3.5.2 赤峰市红山花卉市场温室大棚供热项目

温度是影响花卉生长发育最重要的环境因子之一，不同花卉对温度需求不同。作为内蒙古东部最大的花卉市场，赤峰市红山花卉市场的全年供暖时间为 180 天，冬季供暖室内温度和湿度公共区域需控制在 $16\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，商铺和花厅供暖室内温度在 $18\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，回水温度 $35\text{-}45^{\circ}\text{C}$ ，以保证花卉市场商家正常运营。

内蒙古梅捷新能源科技有限公司于 2021 年 11 月投运启动此项目。该花卉市场供暖总面积 5 万平方米，分为商铺和花厅及公共区域。项目采用固体储能蓄热技术供暖，主要通过 10 千伏高压直连的方式，利用夜间谷电储能，运行过程中无“三废”排放，通过设置温度、湿度、时间等参数恒温供暖。



图 5-49：红山花卉市场谷电固体蓄热供暖机组实景图

在 6 个月的采暖期内，该项目消纳可再生能源电量 1077 万千瓦时，节省燃煤 1480 吨，有效节能减排二氧化碳 3940 吨，相比于传统的燃煤锅炉，每年可节省燃煤 178 万元。该项目对农业领域的大棚采暖起到示范化作用，有力推动了绿色农业的发展和节能降碳的进程。

5.4 电力领域蓄热储能案例分析

到 2050 年，预计风能和太阳能光伏合计将占全球总发电量的 61%【83】。与潮汐、地热和生物质等其他可再生能源不同，太阳能和风能的波动性和间歇性给能源系统带来了挑战。热储存系统可以帮助缓解短期和周期性电力供应波动，减少弃电。

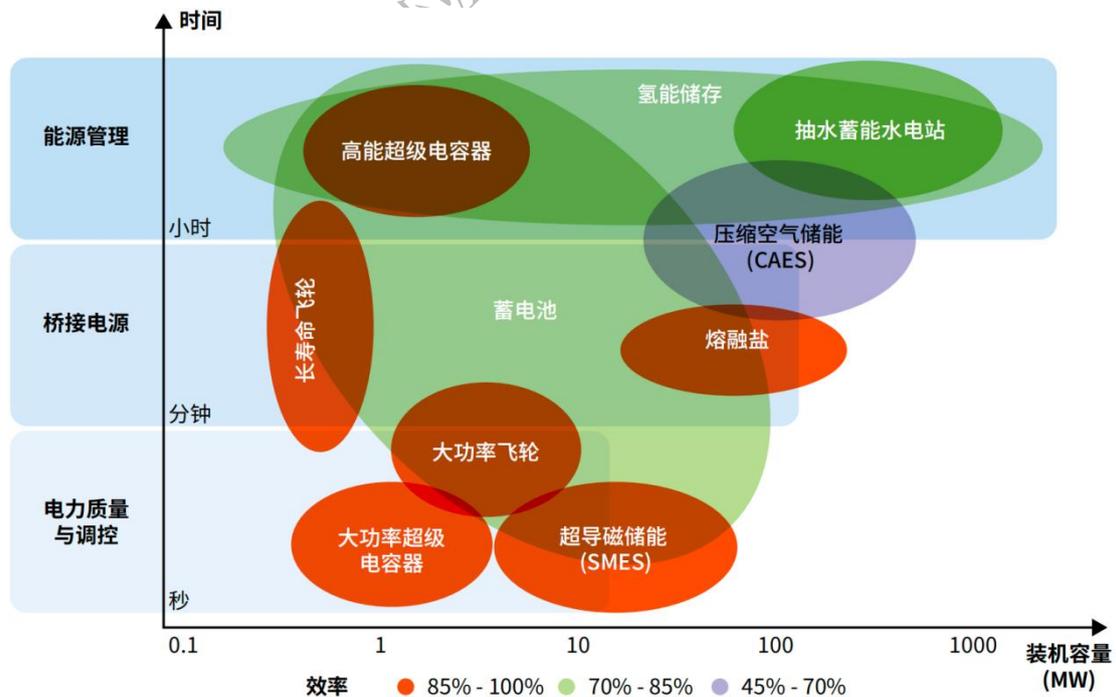


图 5-50：各种储能技术及其在电力系统中的作用【16】

如图 5-50，电池技术容量和响应时间的结合有助于改善电力质量与调控，或提供桥接电源服务。但是，除了抽水储能和 CAES 之外，少有储能技术能在系统中发挥能源管理作用，且抽水储能和 CAES 仅限于特定的地理位置。由于具备以低成本实现规模化的潜力，蓄热技术（熔盐、液态空气储能、压缩空气储能/绝热压缩空气储能和固态热储存）有机会向系统提供能源管理服务。然而目前除了熔盐热储存与 CSP 并置的模式得到了商业化以外，其余的技术均尚在研究阶段【16】。

5.4.1 熔盐蓄热与聚光太阳能热发电系统

图 5-51 展示的是配备熔融硝酸盐直接储热系统的商业化塔式电站。该系统可实现低成本的太阳能热存储，使聚光太阳能热发电电站即使在缺少阳光的情况下也可以稳定供应可调度的低成本电力。该电站中熔融硝酸盐储热技术属于显热技术，常见的商业熔盐储热材料是一种由 $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ （质量分数为 60%/40%）混合而成的非共晶熔盐混合盐【84】。

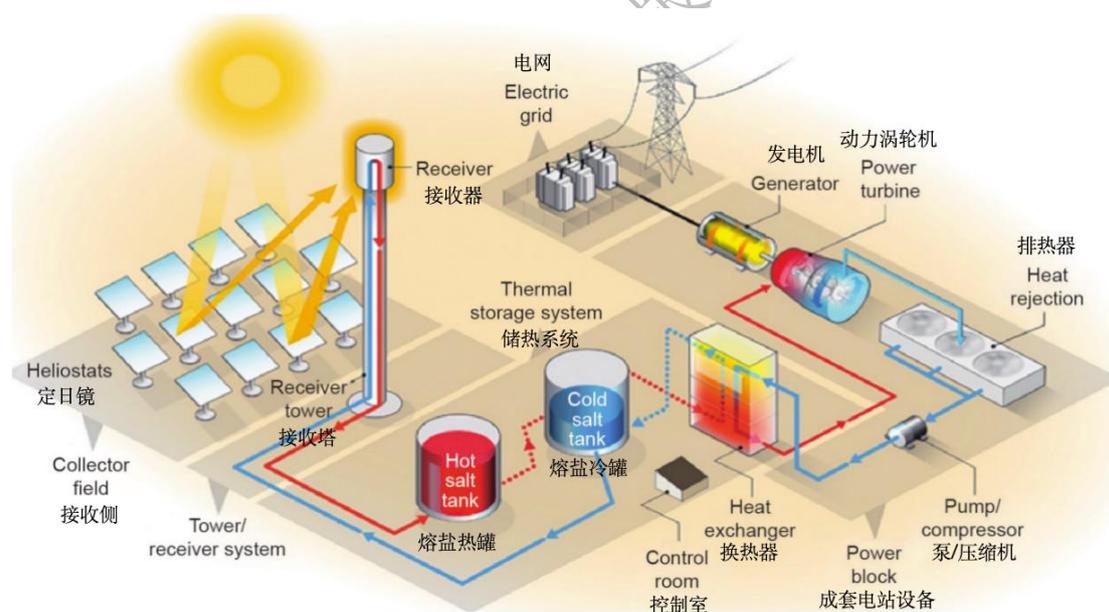


图 5-51：配备熔融硝酸盐直接储热系统的商业化塔式电站【84】

5.4.1.1 西班牙 Solgest-1 混合太阳能发电项目

该项目是西班牙首个混合太阳能发电项目，总装机规模为 150 兆瓦。



图 5-52：混合太阳能发电项目整体鸟瞰图和项目使用的双罐熔盐储热系统

Solgest-1 建设装机 110 千瓦的光热发电系统(见图 5-52)，并配置超过 1900 兆瓦时的双罐融盐储热，以实现在夜间或多云天气发电。

5.4.1.2 青海中控德令哈 50 兆瓦塔式熔盐储能光热项目

项目位于青海省海西州德令哈市，装机容量 50 兆瓦，采用塔式熔盐技术，配置 7 小时熔盐储能系统，镜场由 27135 台 20 平方米的定日镜组成(见图 5-53)。

项目总投资 11.3 亿元，建设前设计年发电量 1.46 亿千瓦时，相当于 8 万余户家庭一年的用电量，每年可节约 4.6 万吨标准煤，同时减排二氧化碳气体约 12.1 万吨，具有良好的经济效益与社会效益。



图 5-53：项目实景图

2019 年 7 月开始移交生产运行。移交生产后的首个完整年度，电站实际发电量即达到 1.22 亿千瓦时；2022 年度电站实际发电量 1.464 亿千瓦时，达到年度

设计发电量的 100.26%；自投运至今，电站累计发电量已达 5.591 亿千瓦时。

5.4.1.3 青海共和 50 兆瓦塔式熔盐储热光热项目

中电建青海共和 50 兆瓦光热示范电站位于青海省海南州共和县生态太阳能发电园区，是国家首批太阳能热发电示范项目之一（见图 5-54）。2020 年 11 月 6 日实现满负荷发电。电站总占地面积 2.12 平方千米，布置 3 万余面 20 平方米定日镜，汽轮机采用超高压、一次中间再热、8 级抽汽直接空冷式汽轮机，额定容量 50 兆瓦，熔盐储热时长 6 小时。该电站其由单塔式太阳能集热系统、定日镜场、熔盐储换热系统、汽轮发电机组等组成，不同于常规的风电和光伏发电项目，光热发电项目具备有常规火力发电连续、稳定输出等特点。



图 5-54：中电建青海共和塔式熔盐储热光热项目整体鸟瞰图和项目双罐熔盐储热系统实景图

5.4.2 蓄热储能参与电网调峰

储热技术作为一种重要的调峰手段，通过将电能转化为热能并储存起来，可以在电力需求高峰期释放储存的热能，提供额外的电力供应。这种技术不仅可以提高电力系统的调峰能力，还可以降低能源消耗和环境排放。因此，储热技术在电网系统中极具应用潜力，具有削峰填谷、缓解新能源并网波动、调控电能品质等优势，对于提升电力系统的稳定性和可靠性具有积极作用【85】。

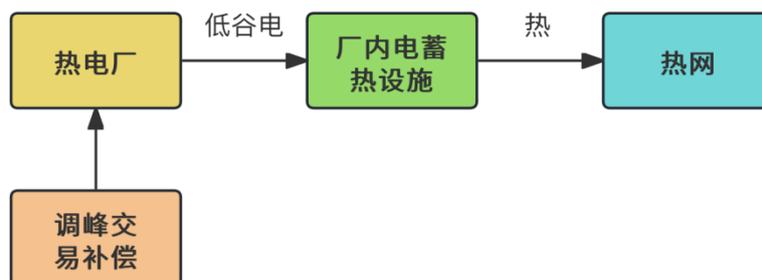


图 5-55：热电厂蓄热改造原理图

储热技术将电能存储于蓄热材料内，电力输出取决于储热装置储热容量，而储热装置释热过程根据热用户的需求而定，实现了分钟级甚至小时级电热错峰响应，为新能源电力消纳、高峰电力短缺提供了空间桥梁，加快推动清洁能源在各领域用热工艺中的替代步伐。热电厂的蓄热改造原理图见图 5-55。

在我国，储热技术在调峰工程上已有初步应用，借鉴国外储热供热参与电网调峰技术的发展，国内储热协同电网调峰技术将朝着多因素和全方位考虑方向发展，更充分考虑碳排放、新能源结合、经济指标以及长周期运行等影响因素。此外，随着不同储热技术参与电网调峰示范工程的递增，各种储热技术优势与劣势更加凸显，混合储热系统将是未来耦合电网调峰的主力。

5.4.2.1 大唐辽源热电厂供热机组灵活性调峰项目

该项目旨在通过在热电联产机组中增设储热系统，实现电力生产和热力生产的解耦运行，显著提升热电机组的供热调峰能力，有效缓解可再生能源消纳困境。项目由哈尔滨汽轮机厂辅机工程有限公司于 2018 年建设投运。该电厂进行调峰改造前承担的采暖供热面积约为 1075.5 万平方米。在采暖期用电高峰时段内，由于社会总用电负荷较高，需要热电厂提供的发电负荷较高。由于热电联产机组发电功率与供热功率之间存在耦合关系，发电负荷较高的同时，供热能力也较高。



图 5-56：项目水储热罐实景图

项目采用斜温层常压储热罐方案，储热罐实景图见图 5-56。水储热罐有效容积为 26000 立方米，有效储热量为 1188 兆瓦时，罐体直径为 30 米，罐体高度为 48.736 米。在电厂承担较高的发电负荷时，将斜温层储热罐底部约 50℃ 左右冷水通过泵升压后送至原热网首站热网循环水泵出口母管，而后再进入热网加热器加热至 90℃ 左右后流入储热罐顶部，通过上布水器均匀地流入储热罐液面，斜

温层在上部重力的作用下缓慢下移，底部冷水通过下布水器缓慢流出，斜温层到达储热罐底部后，储热过程结束。储热系统放热时，热网循环水泵启动升压，斜温层缓慢上移，热水自斜温层储热罐上部排出进入热网循环水供水管道对外供热，换热后温度降低的热网回水从储热罐下方通过下布水器返回储热罐，斜温层到达储热罐顶部后，放热过程结束。

当电网调度发出调峰指令时，热电厂逐渐降低发电功率至设定的调峰负荷或锅炉最低稳燃负荷，抽汽量减少，热电联产机组对外供热功率也将显著降低，当热网需要的热负荷基本等于供热功率时，热电联产机组与斜温层储热罐进行联合供热，从而在满足供热的同时允许热电厂负荷降低，实现热电解耦。

5.4.2.2 华能丹东电厂热电解耦改造储热罐项目

该项目由哈尔滨汽轮机厂辅机工程有限公司于 2020 年投运。项目以突破华能丹东电厂深度调峰与供热不足的瓶颈为目的，通过仅考虑目前现有 2×350 兆瓦机组供热能力下的储热系统及相关配套系统设计，使供热机组利用斜温层储热罐的蓄热能力，进一步增加供热机组的灵活性，实现更宽范围的热电解耦。项目实景见图 5-57。



图 5-57：项目实景图

本项目储热罐设计参数为持续供热 7 小时，有效容积 23200 立方米，高/低水温为 98℃/44℃，最大储热量 5040 吉焦。罐体直径为 32 米，罐体高度为 39.74 米。在深度调峰方面，在汽轮机承担较高的发电负荷时，汽轮机抽汽可以提供足

够多的热量，同时向热网供热并对储热罐中的水进行加热；由于调峰需要，降低汽轮机发电负荷时，汽轮机抽汽量减少，从汽轮机抽取的热量不足以满足向热网的供热需求，此时从斜温层储热罐抽出高温水向热网供热以补充汽轮机抽汽供热的不足，从而在满足供热的同时允许汽轮机负荷降低，实现了热电解耦。

在顶尖峰调峰方面，当电网需要调增负荷时，可快速关小或关闭供热抽汽，保证发电所需汽量，实现快速顶尖峰调峰，此时由储热罐中的高温水直接供给热用户来保证电厂供热能力，储热系统只要一键操作即可切换至储热罐对外供热，能够快速响应电网侧需求，实现机组快速顶尖峰能力。

储热罐投运后 2020-2021 年采暖季储热罐的投用在机组深调达 15% 额定负荷的情况下增加了机组在供暖期参与深调的“续航时间”。2021 年 1 号机组 45 兆瓦负荷连续运行，储热罐作用显著；在顶尖峰调峰方面，在严寒期保证对外供热温度、储热罐放热温度 92℃、流量 3200 吨/小时，可连续供热 7 小时以上，单台机组可增加 35 兆瓦顶尖峰能力，实现了热电解耦，增加了机组运行的灵活性。

5.4.2.3 华电昌吉热电厂辅助调峰服务项目

该项目于 2018 年由烟台卓越新能源科技股份有限公司建设投运(见图 5-58)。



图 5-58：该热电厂实景图及高压固体蓄热锅炉设备图

项目新建 285 兆瓦的蓄热设备，其中高压固体蓄热锅炉 6 台，总容量为 60 兆瓦；电极热锅炉按每台 45 兆瓦设计，共设 5 台，容量为 225 兆瓦。投入使用后，可使昌吉热电厂既可以满足昌吉地区供热需求，又可以扩大电网调峰裕度，有助于电网大规模地接纳风电、光电等新能源的入网，有效促进新能源的消纳，从而有效解决冬季供热电厂的大容量的调峰需求。

6. 中国蓄热储能产业链分析

2022年2月，中华人民共和国发展和改革委员会在《“十四五”新型储能发展实施方案》中提到，要求到2025年，新型储能由商业化初期步入规模化发展阶段，具备大规模商业化应用条件。针对新能源消纳和系统调峰问题，推动大容量、中长时间尺度储能技术示范。其中高效储热作为一种较为新型的储能技术应满足多时间尺度应用需求，将在“十四五”期间获得重点发展【86】。因此，要实现蓄热储能技术的商业化和产业化，需要建立完整的产业链条，包括从蓄热储能设备的制造到工程设计和施工等环节。上游的企业为中游设备商以及设备集成商家供应相应的材料和主要配件，之后通过工程设计工落地，运用在作为用户侧的末端用户。

图6-1显示了中国蓄热储能产业链图谱。具体来说，当前蓄热储能上游产业链企业主要负责生产包括蓄热材料和配件，如用于固体电蓄热锅炉系统的蓄热镁砖、用于相变储热系统的相变储能材料、用于熔盐蓄热系统中的熔融盐、蓄热水罐中的保温隔热材料以及高压电极锅炉中的电加热配件；中游产业企业负责利用上游企业生产的各种材料与配件进行上述蓄热设备的生产及储热系统的集成。这些生产或集成完毕的蓄热设备或系统，通过相对应的运输方式被运送到下游用户侧并应用到包括居民生活用水、工业蒸汽和热水、建筑供暖、火电灵活性改造以及综合能源服务等不同的应用领域【87】。

蓄热材料和配件本身作为蓄热载体进行储热和释热，其特性直接影响设备的工作效率。而蓄热储能设备是将热能储存和释放的关键设备，其设计和制造水平直接影响到系统的性能和成本。工程设计则是将蓄热储能技术应用于实际工程项目的关键环节，其合理性直接关系到项目的成功与否。因此本板块对中国蓄热储能产业链进行分析，重点关注蓄热材料、蓄热设备、工程设计等环节，为促进我国蓄热储能产业的发展 and 壮大提供有益的建议和支持。

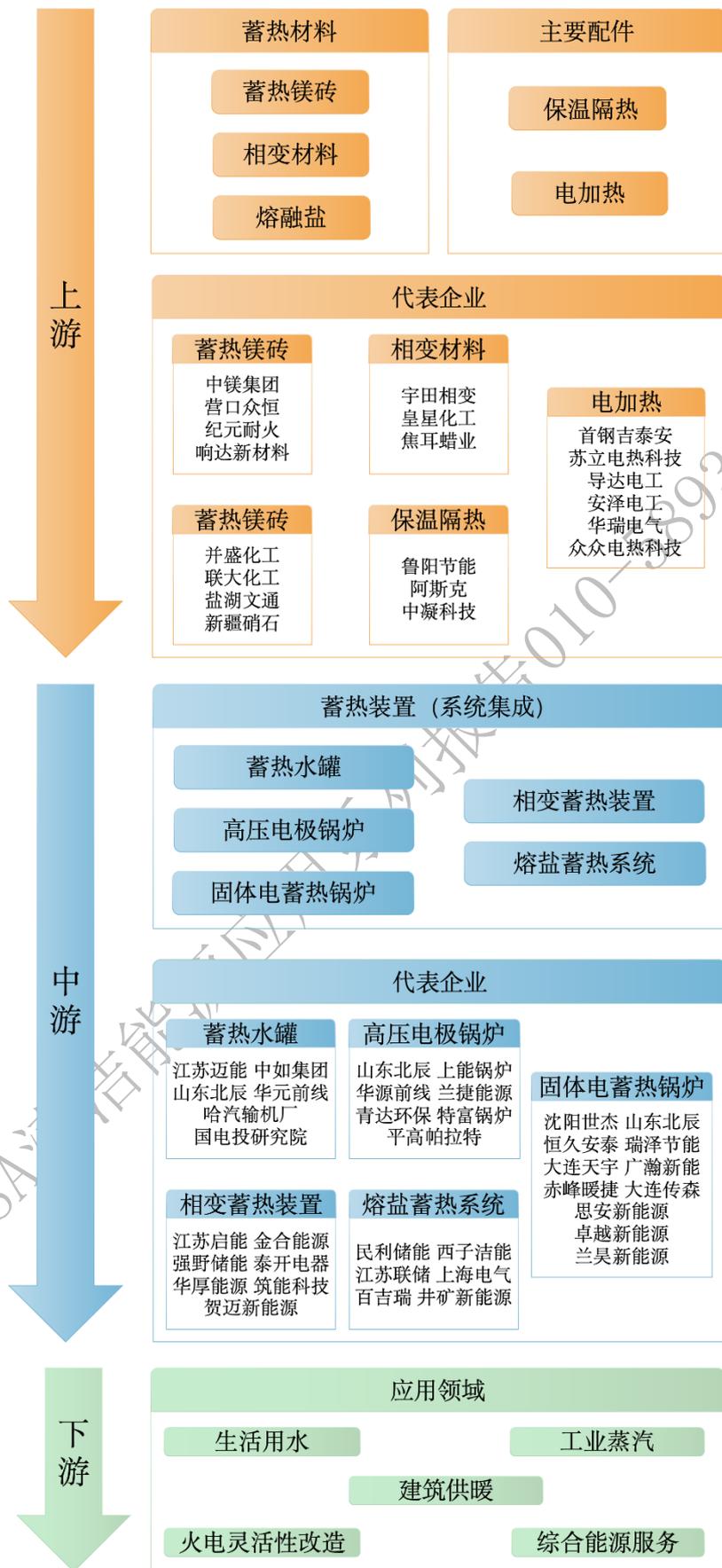


图 6-1：中国蓄热储能产业链图谱

6.1 产业链上游分析：蓄热储能材料与配件

在蓄热储能上游产业链，蓄热储能材料与配件中的相变储热材料作为关键组成部分，扮演着至关重要的角色。其特性和性能直接影响着蓄热储能系统的效率和稳定性。因此，本节以相变储热材料为例，对相变储热材料的上游供应链进行深入分析，为相关行业的研究和发展提供重要参考。

6.1.1 相变蓄热储能材料发展现状

目前，研究人员已经发现了上百种具有应用价值的相变材料，这些材料可以根据相变形式、材料组分以及应用温度进行分类，具体如图 6-2 所示。其中，对于助力实现节能降碳目标的相变储热材料，按照实际应用的温度范围，可以分为高温用相变储热材料和中低温用相变储热材料。

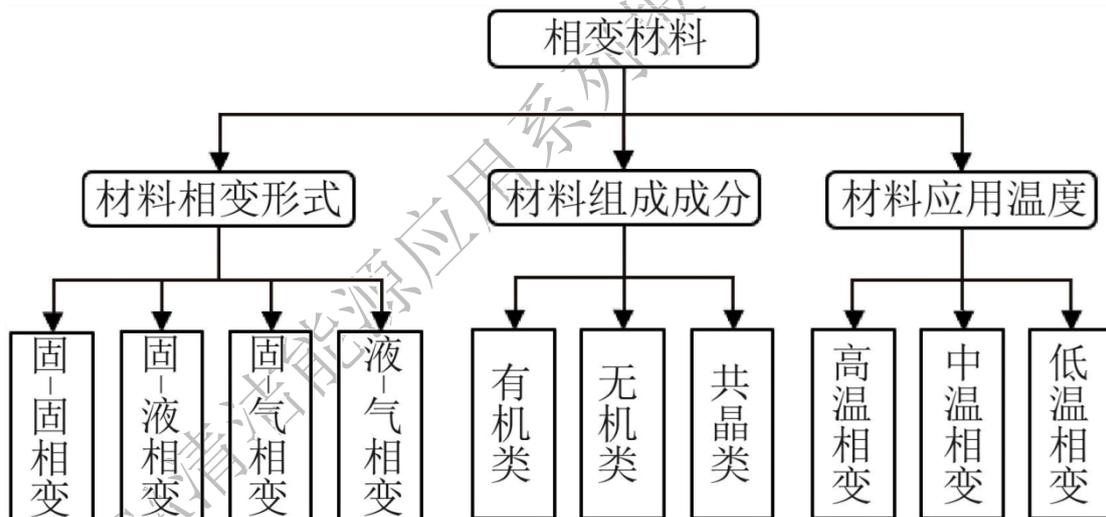


图 6-2：相变储热材料的分类【88】

在常规工业生产中，相变储热技术可以与换热器系统结合起来，利用高潜热值吸收存储工业生产过程中的余热资源，提高热能利用效率；在新能源发电领域，高效的相变储热技术可以弥补太阳能热发电系统存在的时空分布不均问题，同时相变储热技术可以增强储能电池的热管理，增加储能系统的安全性和使用寿命；在能耗较高的建筑领域，可以充分利用相变材料及其复合材料来打造“绿色建筑”，减少室外温度变化对建筑能耗的影响。总体上，在各个不同行业及领域中选择合适的相变储热材料并利用相变储热技术有助于实现节能降碳的社会发展目标。

6.1.2 相变蓄热储能材料制造商及其产品概况

作为蓄热储能设备的核心组成部分，中国相变储热材料的制造商不断推出符合市场需求的产品，为蓄热储能技术的发展和應用提供关键支持。因此本节以相变储热材料为例进行蓄热储能上游产业链分析。

如表 6-1 所示，从目前国内的相变储热材料生产業态来看，相变储热材料可根据材料的储热温度范围进行划分【89】。材料储热密度大、储热温度适配性强、充放热温度恒定、成本低且环境友好，可用于中游企业中包括相变储能微胶囊、中小型相变储热装置、大型相变储热装置在内的不同的功能性的相变蓄热装置的生产。

表 6-1：相变材料技术参数【89】

材料种类	相变温度(°C)	焓值(kJ/kg)	应用领域
超低温相变材料	-2~-52	200-300	深冷、冷藏、蓄冷、冻干
低温相变材料	2-18	217-316	冷冻、蓄冷、冷藏、保险、低温保护
中温相变材料	20-40	180-225	建筑建材储能调温、生命机体冷热保护、人体热舒适性调节、温蓄热利用、电子产品热管理
中高温相变材料	45-95	170-300	电池过热保护、低品位余热回收利用、储热供暖/生活热水
高温相变材料	115-350	260-370	储热供暖/生活热水、储热供蒸汽/热油、工业余热回收利用、中高温烘干
超高温相变材料	800	517	高温储热供蒸汽

6.2 产业链中游分析：蓄热储能设备和系统

蓄热储能设备和系统作为中国蓄热储能产业链的中游部分，在推动能源转型、促进可再生能源利用以及提高能源利用效率方面发挥着关键作用。

在相变储热技术中，相变储能功能性单元的设计也是至关重要的。通过多种封装技术将相变材料进行包裹，再结合相应的换热和保温系统，形成具有储能和换热功能的标准单元。选择合适的相变材料和封装技术是设计过程中的关键步骤，而换热和保温系统则有助于提高储能效率和稳定性。实现相变储能和释能的可控

化、可量化及积木化从而应用于建筑节能、太阳能利用等领域。目前，根据不同的应用场景，各相变储热设备制造公司已经设计出了包括相变储能微胶囊（图 6-3）、中小型相变储热装置（图 6-4）、大型相变储热装置（图 6-4、6-7）、谷电相变蓄热/蓄冷装置（图 6-5）在内的不同的功能性单元。本节列举了当前国内市面上的上述各项相变储能设备的参数作为参考，可分别见下表和下图【89】

表 6-2：相变储能微胶囊型号及参数【89】

型号	相变点 (°C)	焓值 (kJ/kg)	耐热性 (°C)	平均粒径 (μm)	应用领域
YT-MP-10	-10	>120	<100	<2	载热/冷流体工质、血液冷藏。
YT-MP-5	-5	>120	<100	<2	
YT-MP3	3	>130	<120	<2	电器、电子产品、电池等产品 过冷保护，载热/冷流体工质、 道路融雪。
YT-MP5	5	>130	<120	<2	
YT-MP8	8	>130	<120	<2	
YT-MP20	20	>140	<160	<3	生命机体保护、智能调温纺织、 建筑节能调温。
YT-MP23	23	>140	<160	<3	
YT-MP25	25	>140	<160	<3	
YT-MP28	28	>160	<160	<3	
YT-M30	30	>160	<180	<5	
YT-MP33	33	>140	<180	<5	电器、电子产品、电池等产品 过热保护，生命机体过热保护。
YT-MP35	35	>140	<180	<5	
YT-MP40-60	40-60	>150	<180	<5	

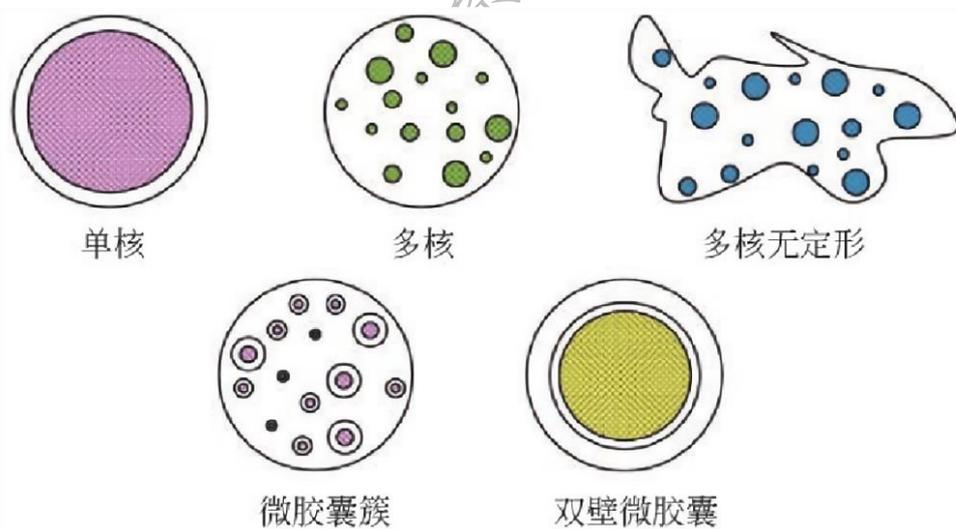


图 6-3：相变储能微胶囊（微单元）结构示意图【91】

表 6-3：中小型相变储热装置（单元）型号及参数【89】

型号 参数	单位	YT-H80-1080M 中型储热单元	YT-H80-680M 中型储热单元	YT-H60-380M 小型储热单元	YT-H48-200M 小型储热单元	YT-H60-50M 小型储热单元	YT-H80-10M 微型储热单元
储热容量	MJ	1080	680	380	200	50	11
	KWH	300	188	105	55	14	3
相变点	℃	80	80	60	48	60	80
储热温度	℃	85-95	85-95	70-75	50-55	70-75	85-95
放热温度	℃	40-80	40-80	40-60	40-48	40-60	40-80
长、宽、高	mm	1200*1200*1900	950*950*1900	950*950*190	650*650*1650	750*500*300	300*300*500
储热单元体积	m ³	2.7	1.7	1.7	0.7	0.11	0.045
应用领域		利用余热/谷电/弃电储热，用于分布式集中供暖和供生活热水。	利用余热/谷电/弃电储热，用于分布式集中供暖和供生活热水。	利用余热/谷电/弃电储热，用于分布式集中供暖和供生活热水。	利用光伏/谷电储热，用于家庭采暖和供生活热水。	利用光伏/谷电储热，用于家庭/局部区域供暖和供生活热水。	利用电能储热，用于移动场合的局部供暖和供热风。

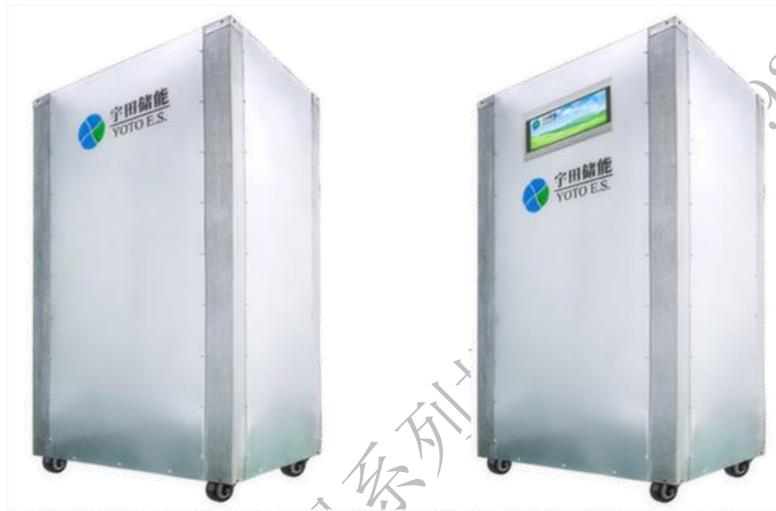


图 6-4 中小型相变储热装置示意图【89】

表 6-4：大型相变储热装置型号及参数【89】

型号 参数	YT-H90-15G 储热塔	YT-H90-10G 储热集装箱	YT-H80-12G 储热集装箱	YT-H80-5G 移动储热车
储热容量	15GJ	10GJ	10GJ	5GJ
	4166KWH	2777KWH	2777KWH	1388KWH
相变点	90	90	80	80
储热温度	95-120	95-100	85-95	85-95
放热温度	40-90	40-90	40-80	40-80
长、宽、高	3*3*7.8	12*2.3*2.2	12*2.3*2.2	8.35*2.5*3.8
储热单元体积	70.2	60.7	60.7	79
应用领域	收集并储存余热、利用谷电/弃电储热，用于城市集中供热。	收集/储存余热、利用谷电/弃电储热，用于分布式移动供热。	收集并储存余热、利用谷电/弃电储热，用于分布式移动供热。	移动运输热能，用于城市分布式供热。



图 6-5：大型相变储热装置示意图【89】



图 6-6：谷电通相变蓄热/蓄冷装置型号及参数

表 6-5: 谷电通相变蓄热/蓄冷装置型号及参数

规格/型号		GESHT-2000	GESHT-1500	GESHT-1000	GESHT-500
最大名义蓄热量 (KWh)		2000	1500	1000	500
蓄热工况	蓄热介质	复合高分子相变储能材料			
	相变温区(°C)	≥ 58			
	蓄热进出水口温度(°C)	80/ 55			
	释热进出水口温度(°C)	50 / 55			
	额定流量(m³/h)	245	180	120	60
	供水管径 (DN)	200	150	125	100
	水室承压(MPa)	≥1.0	≥1.0	≥1.0	≥1.0
	推荐流速 (m/s)	1.80	1.6	1.6	1.35
热源接入	蓄热水泵输入功率(Kw)	选配			
	太阳能集热器蓄热	承压设计, 无须板式换热器			
	空气源热泵蓄热	承压设计, 相变温度可定制			
	热力站蓄热调峰	承压设计, 无须板式换热器			
	谷电锅炉制热蓄热	承压设计, 无须板式换热器			
机组外形尺寸mm(L*W*H)		8558x2438x2591	6058x2438x2591	4558x2438x2591	2400x2400x2500
机组重量 (kg)		37000	25000	18000	11000



图 6-7: 大型相变储热装置示意图

表 6-6: 大型相变储热装置型号及参数

规格/型号		GESPCSDHT-500	GESPCSDHT-1000
蓄热单元	最大名义蓄热量 (kwh)	500	1000
	蓄热介质	复合高分子相变储能材料	
	相变温区(°C)	≥80	
	蓄热进出水口温度(°C)	85/80	
	放热进出水口温度(°C)	75/80	
	供回水管径 (DN)	65	80
制热单元	水室承压 (kPa)	≥0.8	≥0.8
	名义制热量 (kw)	60	120
	名义制热输入功率 (kw)	62	125
	制热性能系数 (COP)	0.95	0.95
	水流量(m ³ /h)	9.5	20
	电热锅炉	PT加热器	
	能量调节级数	2	4
	循环水泵 (充热)	额定流量12m ³ /h	额定流量24m ³ /h
		额定扬程 18m 额定功率1100w	额定扬程 18m 额定功率3700w
	控制方式	AI智能控制	
运行模式	蓄热模式/释热模式/直热模式		
运行工况	计量方式	电量/热量	
	机组外形尺寸(mm)	4585*1782*3200	4585*3100*3200(h)
	运行重量 (kg)	12000	21000

6.3 其他蓄热储能产业链

6.3.1 电锅炉+水蓄热储能产业链

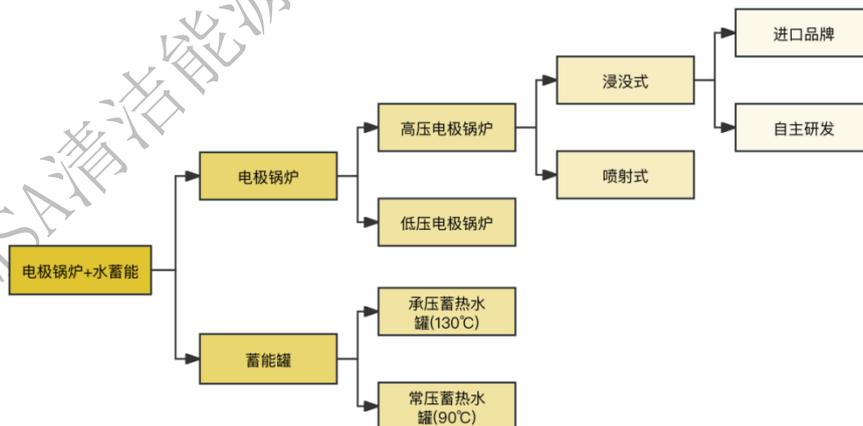


图 6-8: 电锅炉+水蓄热储能产业链图示

“电极锅炉+水蓄热装置”技术成熟，除在民用供暖应用以外，还常见于火电灵活性改造领域。布水器是大型蓄热水罐的关键设备，是蓄能水罐实现冷热分层的核心装置。当前，国内已经打破了国外对于布水器技术的垄断，实现其技术的

自主研发，国内应用较多的例如中如集团、国电投中央研究院等一些大型蓄能水罐厂商均掌握有布水器的核心技术。

而电极锅炉尤其是高压电极锅炉，技术主要来源于海外，例如上能锅炉与加拿大 ACME 进行合作，平高电气与帕拉特合资成立平高帕拉特（河南）能源科技有限公司推广高压电极锅炉产品等。与此同时，华源前线、山东北辰等国产高压电极锅炉品牌也正在加速发展，但由于自主研发的技术难度较大，高压电极锅炉国产品牌数量并不多，少数企业占据了国产市场的绝大部分份额【90】。

6.3.2 固体电蓄热锅炉技术产业链

固体蓄热材料种类繁多，目前市场上应用较多的为高温烧结的耐火镁砖材料，供应商多聚集在辽宁等镁矿资源丰富的地区。此外，采用特殊混凝土等作为固体蓄热材料的蓄热装置也已经进入市场。在民用供暖、工业蒸汽等方面，固体蓄热技术已有众多项目落地。

固体电蓄热锅炉多为蓄热模块与加热模块一体化设计，占地面积小，储热密度高，一般加热元件可将蓄热砖（镁砖）加热到 650℃ 以上。但与之相对应地，更高功率的固体电蓄热装置对于其电加热器、换热器等也提出了更高的耐高温、耐高压要求。以沈阳世杰电器、内蒙古梅捷为代表的一些企业主攻高电压、大功率的固体蓄热电锅炉，以此省去变压器等投资成本，当前全球首个 110kV 高压大功率固体蓄热供暖项目已落地中国崇礼。

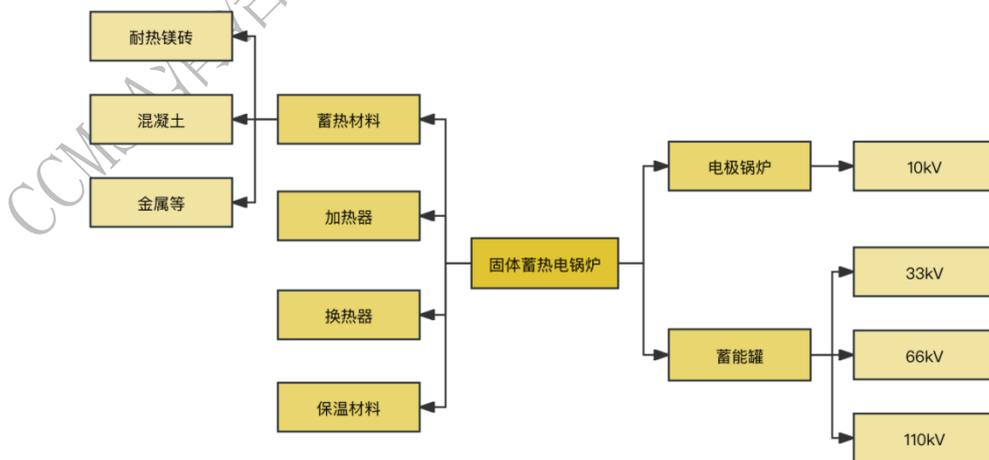


图 6-9：固体蓄热电锅炉产业链图示

6.3.3 熔盐蓄热产业链

首先，在原材料采购方面，熔盐是该技术的关键材料之一，主要成分是钾盐和钠盐，这些材料通常从国内熔盐供应商处取得。其次，研发设计阶段涉及到太阳能集热器、储热罐、热交换器等关键设备的设计和 optimization 工作。中国的科研机构、高校以及企业在这方面拥有丰富的研发经验和 technical 实力，不断推动着技术的进步和创新。制造加工环节需要生产制造相关设备和组件，中国拥有成熟的制造业基础和一些制造技术较为成熟的公司，如民利储能、西子节能、百吉瑞、上海电气等，能够满足熔盐蓄热系统的生产需求。

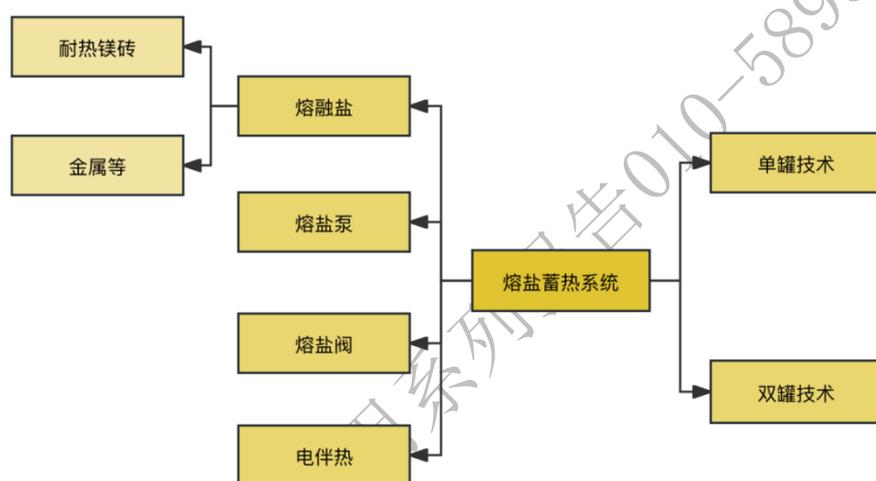


图 6-10: 熔融盐蓄热系统产业链示意图

6.4 产业链下游分析：工程设计

6.4.1 工程设计

在蓄热储能技术中，工程设计是确保蓄热储能设备在实际应用中高效运行的关键环节。工程设计涵盖了系统布局、热能传输、控制系统等方面，需要综合考虑各种因素，确保设备能够安全、稳定地运行，并实现预期的能源转换效率。本报告重点介绍蓄热储能中的工程设计原理和关键要点，并以甘肃省服务区敦煌收费站的蓄热式电锅炉供暖工程设计为案例，深入探讨工程设计在实际项目中的应用以供读者参考【92】。

6.4.1.1 工程概况

高速公路服务区远离城市中心，无集中供热和燃气源，且附近无可利用的废热和工业余热。实际工程应用，可采用电蓄热锅炉系统进行供暖。蓄热式电锅炉通过蓄热水箱在电力低谷期间蓄热，用电高峰时段不开锅炉或少开锅炉，起到移峰填谷的作用。

该项目位于甘肃省酒泉市及敦煌市境内高速公路 G215 线柳园至敦煌段，建设服务区敦煌收费站建筑包括综合楼、设备用房及门卫。当地执行峰谷电价，低谷电时段：23:00~07:00；平、峰时段 07:00~23:00。工程暖通设计方案采用蓄热式电锅炉作为采暖热源，在夜间低谷电时段水箱蓄热，在高峰段关闭电锅炉。系统工况分为电锅炉蓄热兼供暖、电锅炉供暖、电锅炉蓄热、蓄热水箱供暖及电锅炉与蓄热水箱联合供热五种，通过二通阀对运行工况进行控制调节。

6.4.1.2 热负荷与锅炉容量

采暖房间综合楼、设备用房及门卫各时段热负荷统计，可见表 6-7 所示。

表 6-7：服务区热负荷统计表【92】

建筑物名称	热负荷 23:00-11:00	热负荷 11:00-17:00	热负荷 17:00-23:00
综合楼	345 kW	304 kW	380 kW
设备用房	20.9 kW	20 kW	23 kW
门卫	3.2 kW	2.9 kW	3.5 kW

低谷电时段 23:00-07:00，开启电锅炉，将蓄热水箱中的水加热至 85℃，同时向用户供暖；平、峰时段 7:00-23:00，平电时段电锅炉开启 4 小时运行，边供热边蓄热。高峰时段，关闭电锅炉，用蓄热水箱中的热水向用户供热。各时段采暖热负荷统计，如图 6-11 所示。

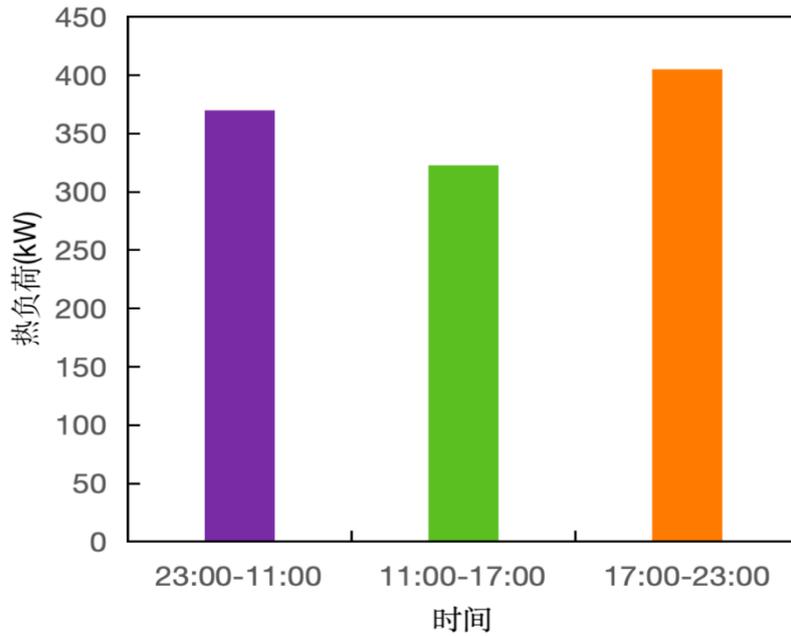


图 6-11: 各时段采暖热负荷汇总【92】

根据锅炉容量的计算公式(公式 9-1)与蓄热水箱容积计算公式(公式 9-2)可分别计算出设计选用 1 台 800kW 的常压式电锅炉, 2 个 36.75m³的蓄热水箱。

$$W = \sum Q_i \times t_i \quad (9-1)$$

其中, W 为供热耗电量; Q_i 为用蓄热装置各供暖时段的热负荷; t_i 为用蓄热装置各供暖时段的时间。

$$V = \frac{(N - N_g) \times t_x \times \eta \times 3600}{\Delta t \times \eta_1 \times K \times \rho \times 4.18} \quad (9-2)$$

其中, N 为锅炉功率; N_g 为谷电时段耗电功率; t_x 为蓄热时间; η 为锅炉效率; Δt 为蓄热水箱可利用温差; η_1 为蓄热水箱的保温效率; K 为蓄热水箱容积利用系数; ρ 为热水密度。

锅炉、水泵等设备分别设置于设备房内。蓄热水温为 85℃, 蓄热水箱保温要求较高, 相邻水箱间亦作保温处理, 采用聚氨酯现场发泡保温, 外加铝箔作为隔汽防潮层, 外护层为彩色钢板。板式换热器换热能力为 500 千瓦。锅炉房设备平面图, 如图 6-12 所示, 设备型号规格等参数见表 6-8。

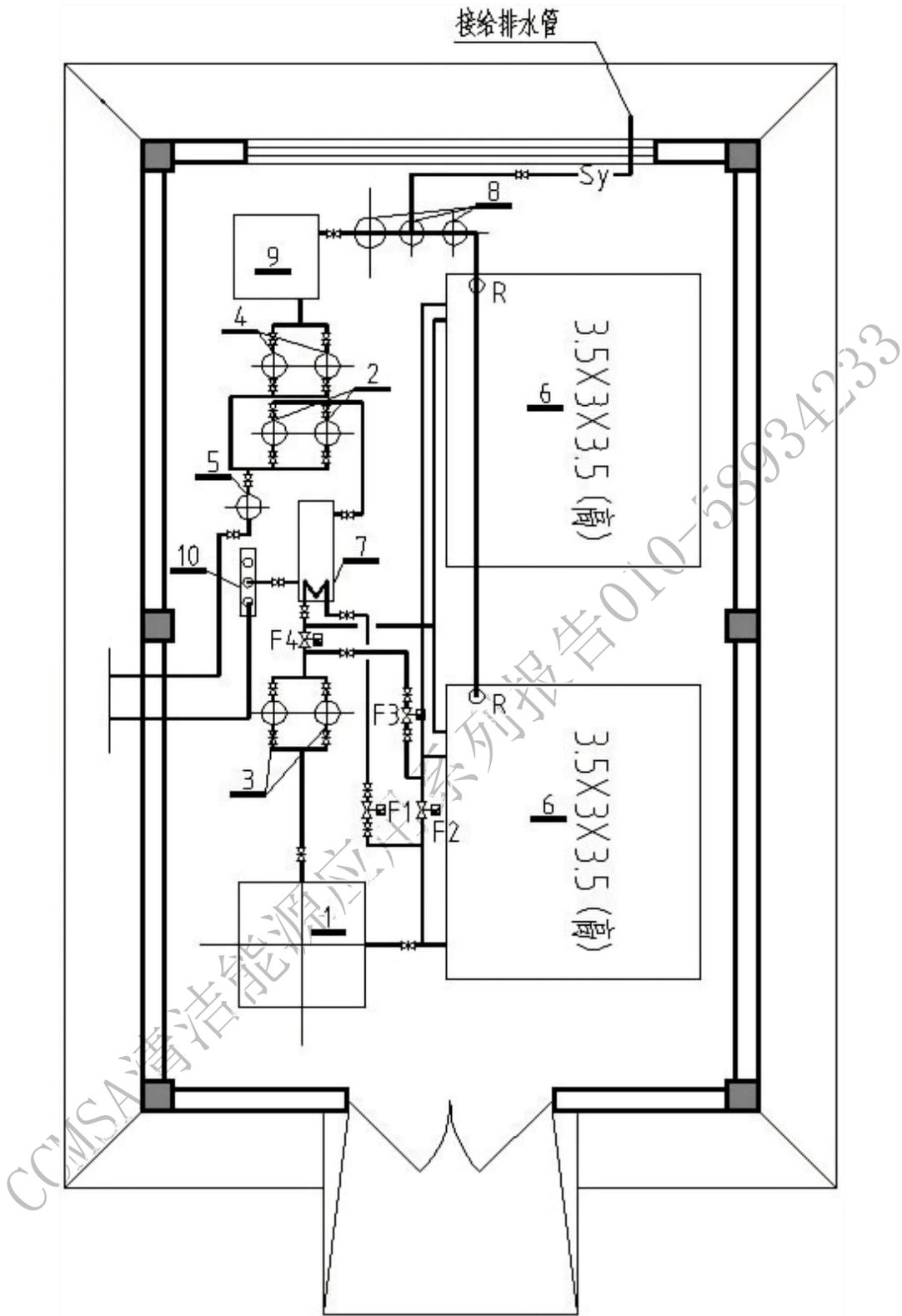


图 6-12：锅炉房设备平面图【89】

图中，1-电热水锅炉；2-循环水泵；3-蓄热水泵；4-变频补水泵；5-除污器；6-蓄热水箱；7-板式换热器；8-全自动离子交换软化水设备；9-不锈钢水箱；10-分水器。

表 6-8：蓄热式电锅炉设备参数【92】

名称	型号及规格	数量	备注
电热水锅炉	额定热功率 800 kW	1	供回水温度 85°C/60°C
循环水泵	Q = 14 m ³ /h, H = 30 m	2	立式热水泵 (一用一备)
蓄热水泵	Q = 28 m ³ /h, H = 10 m	2	立式热水泵 (一用一备)
变频补水泵	Q = 5 m ³ /h, H = 40 m	2	立式泵 (一用一备)
蓄热水箱	V = 36.75 m ³	2	05R401
板式换热器	500 kW (85°C/60°C, 75°C/50°C)	1	

本项目定压方式采用变频补水泵定压，设计选用 2 台流量 5 立方米/小时，扬程 40 米的变频泵，根据安装在定压点的压力传感器，反馈压力值控制变频水泵流量。

6.4.1.3 蓄热系统控制方式

蓄热电锅炉系统单独设置控制柜可控制锅炉在低谷时段运行，平时段运行 4 小时，高峰时段关闭。调节两通电子温控阀对系统供回水温度及锅炉运行进行调整。控制蓄热泵的启停，保证先启动泵后启炉，先停炉后停泵。其运行模式如下：

电锅炉蓄热兼供暖工况：二通阀 F1、F2、F4 开启，F3 关闭，开启蓄热水泵加热蓄热水箱存储 4569 千瓦的热量，同时电锅炉兼顾夜间采暖负荷。该模式在上午 7 时或当蓄热水箱温度达到 85°C 时，蓄热结束。电锅炉供暖工况：二通阀 F1、F4 开启，F2、F3 关闭，板式换热器工作，一次供回水温度为 85°C/60°C，二次供回水温度为 75°C/50°C；电锅炉蓄热工况：二通阀 F2、F4 开启，F1、F3 关闭，开启蓄热水泵加热蓄热水箱存储 4569 千瓦的热量，该模式在上午 7 时或当蓄热水箱温度达到 85°C 时，蓄热结束；蓄热水箱供暖工况：二通阀 F1 开启，F2 关闭，调节 F3、F4，关闭电锅炉，板式换热器工作，一次供回水温度为 85°C/60°C，二次供回水温度为 75°C/50°C；电锅炉与蓄热水箱联合供暖工况：二通阀 F1 开启，F2 关闭，调节 F3、F4，在供暖热负荷较大，单独电锅炉或蓄热水箱供暖不满足要求时，启动联合供暖。

综上，从项目工程设计的层面来看，该项目蓄热式电锅炉供暖充分利用当地夜间低谷电，白天高峰时段不开或少开电锅炉，起到移峰填谷的作用，同时降低了能源消耗，达到节能减排的目的。与此同时，蓄热式电锅炉夜间蓄热同时又兼并供热，控制系统较为复杂，自动化程度要求高，为了提高自控系统的可靠性，设备用房单独设置控制柜，通过调节两通电子温控阀精准控制取得较好的应用效果。

本节深入研究蓄热储能的工程设计，通过对甘肃省服务区敦煌收费站蓄热式电锅炉供暖工程设计案例的研究，读者可以了解到工程设计在蓄热储能项目中的关键作用，包括系统布局、热能传输、控制系统等方面的设计。工程设计的科学合理将直接影响设备的稳定性和效率，因此在实际项目中需要充分考虑各种因素，确保设备能够安全、稳定地运行，并实现预期的能源转换效率。通过本设计的研究，读者可以更加深入地了解工程设计在蓄热储能领域的实际应用，并为相关领域的技术研究和工程实践提供参考，总结现有研究成果，并提出未来发展的建议，以促进谷电蓄热技术在我国能源领域的广泛应用和推广从而构建清洁、低碳、高效的能源未来。

7.中国蓄热储能技术趋势、机遇与挑战

7.1 中国蓄热储能技术趋势

目前中国显热蓄热技术和潜热蓄热技术已基本成熟，已成功应用于清洁供暖系统，热化学储热技术仍处于实验室研究阶段。经过长期的发展，目前面向清洁供暖的储热技术有逐步聚焦的趋势。蓄热技术在建筑、区域供热制冷、工业、电力等方面都具有良好的发展前景。

蓄热的发展趋势可以概括为以下几点：

- 1) 更高的能量密度；
- 2) 更低的单位储热储能成本；
- 3) 更高的传热效率与更低的热损失；
- 3) 更高的可靠性。

7.1.1 电力

太阳能光伏发电正迅速成为电力部门的主流和富有竞争力的能源来源，预计它们将成为可再生能源增长的主要来源：到 2050 年，预计风能和太阳能光伏合计将占全球总发电量的 61%。与潮汐、地热和生物质等其他可再生能源不同，太阳能和风能的波动性和间歇性给能源系统带来了挑战。

2023 年 1 月，国家能源局综合司发布关于公开征求《新型电力系统发展蓝皮书（征求意见稿）》意见的通知。以 2030 年、2045 年、2060 年为新型电力系统构建战略目标的重要时间节点，制定新型电力系统“三步走”发展路径，即加速转型期(当前至 2030 年)、总体形成期(2030 年至 2045 年)、巩固完善期(2045 年至 2060 年)，有计划、分步骤推进新型电力系统建设的“进度条”。

蓄热储能有助于缓解可再生能源波动性带来的问题，同时还能够提高电力部门短期（即非季节性）供应侧灵活性。在太阳能资源不充裕的阴天或夜晚以及风能匮乏低风季节，将蓄热储能建设在 VRE（可变可再生能源）发电现场，即 CSP（聚光太阳能发电）形式的太阳能光伏发电能够缓解短期和周期性电力供应波动，在输电或配电电表前安装蓄热储能仅向电网提供服务。可利用减少弃电及通过减

少弃电延缓网络加固的形式实现网络管理。

蓄热技术在电力行业的发展趋势可以概括为：在 5 年内下一代熔融盐技术的工作温度范围和性能将得到进一步改善，从根本上提高 CSP 电厂的转化效率，而成本降低则有利于增加其他技术的可行性。可能出现更多固态储能和新型独立熔融盐蓄热电池试点。在 5 年~10 年内 LAES（液态空气储能）、绝热 CAES（绝热压缩空气储能）和固态储能系统的成本降低将扩大蓄热储能在风能和太阳能光伏发电中的利用范围，并且有望成为 CSP 熔盐的有效替代品。在 10 年以后，热化学储能的发展可提高 CSP 工厂的转化效率。熔盐储能可重新利用化石燃料发电厂进行可再生能源储能，从而节省退役成本。熔盐将在材料方面进一步发展，走向高温领域。先进绝热 CAES 技术将得到发展，配合更高效的压缩机、膨胀机和储气技术实现更高比例的可再生能源消纳和更强的灵活性电力部门目前已实现商业化的蓄热储能技术只有熔融盐一种形式。熔盐在 CSP 电厂中的使用已超过 20 年，目前熔盐技术的发展趋势是更高的工作温度。较高的工作温度有助于提高 CSP 电厂的热电效率。目前电厂工作温度不高是因为所使用蓄热储能材料的功能温度范围限制。例如，熔盐蓄热储能材料的热稳定性极限将最高工作温度限制为 565°C。若要实现高温工作，蓄热储能材料需要特殊的热物理属性，包括低熔点（以增加工作温度范围）、高热容量和高导热系数以及高热稳定性。中国正在研究开发应用于 CSP 的下一代蓄热材料。

固态混凝土储热相比熔盐可为 CSP 应用提供更廉价的替代品。另一方面，混凝土储热几乎在环境压力下工作，因此无需压力容器，这进一步降低了投资成本。此外，它具备良好的机械性能且是无毒、惰性且不易燃的。典型的混凝土蓄热储能系统将管道嵌入混凝土砖中，以在砖块和传热流体之间进行热交换。遗憾的是，目前这些设施的使用寿命有限，这是因为其最高工作温度及高温下的剥落所导致的反复的热胀冷缩循环会导致裂缝【93】。使用寿命有望通过研发活动得到提高。中国目前正在开发的两个项目将使用固态配制的混凝土作为蓄热设备，是国内广泛部署 20 个 CSP 示范项目的一部分。

7.1.2 工业

工业中使用的大部分能源用于工艺热能生产，因此在利用蓄热储能与可再生

能源结合实行脱碳方面具备一定潜力。将热能从发电中分离将有助于应用灵活性和智能能源，并通过间歇性的可再生能源发电满足持续需求，从而减少浪费和中断。蓄热储能可以用于储存热泵热电或现场太阳能热电厂产生的低温热能。当前使用可再生资源难以产生中高温工艺热能，但未来潜在的热化学蓄热储能解决方案可能发挥作用，帮助促进可再生能源的整合。目前来看，与太阳能热电厂结合使用的水罐蓄热当前处于不断增长的发展阶段，用于产生和储存低温工艺热能。

工业方面热能利用的发展趋势包括：短期内，降低成本、提高相关认识以及改进现有罐式蓄热储能的整合、管理和控制系统将鼓励需要低温热能的工艺更多地部署太阳能热发电。中期内，能够提供一种相对成本较低的储存形式，为工业工艺提供电力和热能。高能量密度的高温复合相变材料和水合盐储能解决方案将有效减少蓄热储能系统的占用空间，从而潜在扩大其应用范围。改进的整合及管理系统也将提高效率。长期内，与可再生能源一起整合到制造工艺中的化学循环和其他热化学蓄热系统可帮助需要高温热能的工艺实现脱碳。高温亚临界水蓄热技术能够带来显著的效益提升，结合储热水箱的新型结构和分层理论的发展有望得到广泛使用。

同时，工业部门已经开始应用分散式可再生能源发电厂以缓解波动性电网供应带来的风险、克服电网接入问题（例如在偏远运营环境中）、应对燃料价格上涨风险及解决一部分脱碳运营问题。工业部门通往未来更广泛的脱碳途径包括：部署太阳能热发电和热泵以应用于低温热能工艺；更多地将生物质应用于可产生中高温热能的现场热电联产厂。

低温工艺和制造应用中，蓄热储能可储存现场波动性太阳能热电厂产生的热能以及由波动性可再生能源提供动力的热泵产生的热能。中高温应用中，蓄热储能可与以生物质为动力的热电联产厂耦合，以消除工业工厂的热电供应。这些用例将提高输入或现场可再生电力和热能的利用率。在电力成本不断变化的市场中（例如因分时定价机制或时间敏感的电网收费导致的成本变化），蓄热储能也可与热泵结合使用以转移需求并为工业现场节省成本。

水合盐也为“将太阳能整合到低温工业工艺中”提供了一种替代方法。该技术的主要优点是蓄热容量高，并且可以长时间蓄热而几乎没有热能损失。目前，

水合盐已进行整合到废热工艺中的工业测试，例如废热回收或热转化和再整合等。固态技术在整个能源系统中也正在成为以低成本方式储存大量能源的一种方法。在中温应用情况下，已经提出了工业应用中的高温复合相变材料，例如废热回收以及与太阳能系统的耦合。与显热储热技术相比，复合相变材料的能量密度更高，因此可以提供更紧凑的系统，有助于解决空间不足的问题。该系统可以储存太阳能以满足未来工业企业的热能需求。水泥生产和非金属材料制造等行业可能成为该技术的终端用户。在需要高温（高于 400℃）热能的制造业中，化学循环具备提高可再生能源比例的潜力。热化学系统通常需要较高温度以启动储能，但同时在释放能量时也会提供较高温度。目前这些系统仍处于开发的基础研究阶段。中国台湾已尝试采用高效钙循环技术形式的化学循环作为水泥行业的一种碳捕获方。但是，目前专门将可再生能源更好地整合到工业中的化学循环技术还未出现。

7.1.3 区域供冷和供热

区域供热和供冷系统使用隔热管网将热量或冷气从集中的生产源输送到多个建筑物，而不是在每个建筑物中安装单独的锅炉或供冷机。最终用户往往是有空间供热/供冷和/或水供热/供冷需求的家庭或商业场所，但某些区域的能源设施还可以满足工业能源需求。这种能源生产和分配方式通过提高效率来降低排放和成本，并为可再生能源大规模整合到城市中心提供了空间。

各种供热/供冷技术已开始作为集中供热/供冷厂进行部署，包括热电联产厂、传统锅炉、垃圾焚烧炉、工业源的管道余热、太阳能热电厂、热泵和地热能。如上所述，区域供热/供冷方式可以提高效率，进而促进部门脱碳。在理想的情况下，这些方案还能推动可再生能源发电设施的使用。

蓄热储能技术可以提高区域供热和供冷的效率，时间范围从短（小时）到长（季度），灵活性很强，能够更好地匹配冷热供应与需求，并利用可再生的低谷时期电力。采用蓄热储能的区域供热/供冷工厂经设计可使其规模满足平均负荷，而无需具备满足尖峰时段需求的能力，进而降低其资本成本。

2018 年，《国家发展改革委关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》发布，要求完善峰谷电价形成机制，进一步扩大销售侧峰谷电价执行范围，合理确定并动态调整峰谷时段，扩大高峰、低谷电价价差和浮动幅度，引导用户错峰

用电。这一政策意味着储能在民用领域面临重大利好【94】。

从波动性风能和太阳能光伏发电中获取能源的区域供热项目已经在国内试行。这些项目测试了利用可再生电力满足热能需求的各种方法，例如利用热泵或电阻对水进行加热。通过提高发电机利用率，蓄热储能在帮助提高这些计划的可行性上大有可为。

与区域供热类似，供冷负荷也会随着季节的不同而变化，而蓄热储能有助于提高发电源的利用率。蓄热储能可实现恒定供冷，同时有助于满足各种负荷的要求。在区域供冷中使用电气供冷机的情况下，蓄热储能还可以将生产转移到总需求较低的时候，进而有助于降低电网的尖峰用电负荷。这有助于通过削减尖峰负荷来避免昂贵的网络加固或扩建。将区域供冷系统在与冷藏结合使用，可将供冷能力降低 15-50%，同时减少了对辅助部件的需求，并可通过更有效地利用压缩机来改善整体系统性能【95】。

蓄热技术在供热制冷方面利用的发展趋势为：短期内改进对罐式蓄热储能的整合和管理，可以大幅降低费用，扩大部署机会。高温复合相变材料在国内成功示范后得以开发，材料和系统的改进提高了竞争力。中期内开展用于冷却的相变材料的研究和示范有望促进更为广泛的部署。长期内相变材料和热化学系统具有更高的成本效益和效率，预计将增加可再生能源在区域供热和供冷中的应用机会，特别是在供冷和电力联合应用中。部门整合和智能控制技术将增强这方面的机会，特别是有利于从其他部门和应用收集（和储存）废热/冷气。

地下蓄热储能技术可与热网一起部署，以对低边际成本的热源进行整合（例如地热和太阳热能），以实现季节性储能。热能可在最高 100°C 的温度下储存，并且升级后可供热泵使用。对于区域供冷来说，地下蓄热储能技术通常在温差 6°C 左右的情况下使用。

在未来，以盐和水的共晶混合物为基础的相变材料，熔化温度约为 7-8°C，可以用来代替冷水或冰储能。较高的充能温度更使其充能效率高于冰储能，而且所需的罐体积明显小于那些含有冰水的水罐。

高温相变材料可成功地用于区域供热应用。与显热技术相比，该系统具有更高的储能密度和热导率，因此能够在较小的储存空间中储存大量能量。在与太阳

能热能和风能等可再生能源系统（例如太阳能和风能）结合使用后，这种储能技术可用于短期或长期区域供热。同类第一家 6 兆瓦/36 兆瓦时高温复合相变材料示范工厂已于 2016 年 9 月在中国北部投入运营。

通过加大水罐的尺寸并提高系统的标准化程度，罐式蓄热储能将会带来巨大的收益。系统效率将有所提高。通过新方法 to 增加和维持热分层将减少运行成本。热分层会导致工作时间变长，进而大幅提高了太阳能收集器的利用率，减少了辅助能源的使用和成本。最近的研究提出了各种增加热分层的新方法，例如最大限度地减少将进入热分层蓄热罐的水的混合和湍流降低，这些改进会明显提高储能效率，其他改进措施也在探索之中，例如优化内部换热器和水罐内部自由对流，以及通过尽可能减少管道内寄生热对流造成的热损失。

7.1.3 建筑

建筑主要包括公共建筑和住宅建筑。能源在建筑物中用于空间加热、空间冷却、热水和烹饪。预计在不久的将来，全球建筑面积每年将增长 3%，该部门的总能耗预计将有所上升。因此，未来将需要加大脱碳工作的力度，预计建筑物规模的可再生能源发电应用也将有所增加。在建筑物中进一步部署可再生能源的主要挑战，集中于管理潜在的电力需求尖峰，并确保能源供应（包括供热/供冷）与变化的需求能够有效匹配。推动能源效率的不断提高应成为管理需求的优先事项。需要进一步扩大热泵的部署范围，同时将使用可再生能源所供电力的区域供热系统的热量翻倍。

在寒冷的气候条件下，蓄热储能热泵的部署增加需求侧的灵活性，减少潜在的尖峰和网络提升的需求，以及提高低谷期可再生能源的利用，在温暖的气候条件下，通过转移空调负荷并降低系统压力，蓄热储能可帮助减少与鸭子曲线有关的问题。在电网薄弱或不可靠的地区，分散式的热能/冷能储存还可以减少对电网的依赖性，提高建筑物的能源供应安全性。

目前，水罐蓄热广泛用于建筑物蓄热。相变蓄热、固态热电池和替代空调装置冰储能技术已经很成熟，但部署规模相对较小。地下蓄热储能已在各种情况下使用，较小规模（单个建筑物）设备的实用性也正在研究之中。

蓄热储能建筑利用的发展趋势为：短期内与能源管理系统结合使用的相变蓄

热正处于试验阶段。试验可以证明这种电池可以利用低谷期的能量来实现热能的低碳化并为消费者节省开支。通过材料开发，改善罐式蓄热储能固态蓄热储能技术中材料的热性能和耐腐蚀性能，进而提高效率。此外，加强整合和控制系统的创新将会提高成本效益。中期内新一代高温和低温相变材料和复合相变材料的成本降低和技术改进有助于增加建筑物中潜热储能的部署。长期内注重于实现热化学蓄热储能技术中材料和系统改善的研发活动，争取早日进入示范阶段。

空间供冷是建筑物中增长最快的能源使用方式，这一趋势在经济快速增长且在中国这样的气温较热的发展中国家尤为明显。随着这一趋势不断发展，越来越多的市民将有机会使用供冷设备，能源使用量预计也会成比例增长。2016年，建筑物能源使用总量中有6%用于空间供冷，其中绝大部分依靠电力完成。蓄热在建筑物中可以发挥重要作用，有助于可再生能源的整合。蓄热储能可通过热能电气化来实现部门耦合，并有助于满足日益增长的供冷需求。

传统民用和商用水罐的容量一般在100升至1000升之间。水罐蓄热是基于在用电需求低谷或太阳能集热器的多余电力期间对水进行加热或供冷。热能可以随后在需求高峰期供应并分配到设备。自20世纪中叶以来，住宅蓄热器中的热能一直储存在陶瓷砖中，温度高达70°C。这种家用电器的现代版本，即智能电蓄热(SETS)加热器，使用低成本的陶瓷砖储能介质，通过电阻加热储能介质，温度最高可达到700°C。同时，新近开发的供居民使用的冰储能技术可以减少“鸭子曲线”的问题。使用冰储能的设备主要设想用于商业建筑。其他低温相变材料也可以在建筑物中得到了应用。在大多数情况下，冰和零下温度的相变材料封装在模块中，由载热流体将冷能从模块提供给负荷。这些系统可用于支持或替换供冷系统，或在住宅或商业建筑中进行空气调节。家用相变储能设备主要用于供热，封装的相变材料可以通过电加热或载热流体（例如来自太阳热能的热水和来自空调的冷气）交换的热量进行充能【16】。

7.2 中国蓄热储能机遇

低碳绿色转型要求我国减少对传统高耗能能源、化石能源的使用。这一方面需要通过技术创新实现各种生产流程的数字智能化，另一方面也需要以水电、核

电、风能、太阳能等清洁能源进行调峰。然而可再生能源受制于风、光等自然条件，具有不稳定性，国内许多地区弃风、弃光现象严重，储能设备对于最大限度利用新能源发电容量和潜力具有重大作用。而电力市场的峰谷电价改革、降低新能源市场准入门槛、开展碳排放权的交易等等也会催生出更多的市场商机。

当前传统建筑领域趋于饱和，随着技术的逐步迭代与渗透，节能建筑、低碳建筑开始显现出来。尚普咨询集团的数据显示，2022年，我国锅炉制造行业的市场规模达到了约2200亿元，同比增长8.9%，占全球锅炉制造市场的28.6%，位居世界第一。2022年，我国锅炉制造行业的能源消耗总量为1.23亿吨标准煤，同比增长6.3%。其中，燃煤锅炉的能源消耗占比最高，达到了54.6%，其次是燃气锅炉，占比为25.4%，再次是燃油锅炉，占比为12.7%，其余的分别为生物质锅炉（4.8%）、电锅炉（1.8%）和余热锅炉（0.7%）。2022年，我国锅炉制造行业的二氧化碳排放总量为3.06亿吨，同比增长6.5%。其中，燃煤锅炉的二氧化碳排放占比最高，达到了75.4%，其次是燃气锅炉，占比为16.8%，再次是燃油锅炉，占比为6.5%，其余的分别为生物质锅炉（0.9%）、电锅炉（0.3%）和余热锅炉（0.1%）。

根据上述调查结果，建筑供热领域的转型期才刚刚到来，并且随着后续国家政策的出台，建筑领域中一些大型公建以及具备特殊功能的新基建项目望成为相变材料以及蓄能系统的极大用武之地。这一领域的市场体量将超过万亿。

近年来，国家加大了新型储能规模化应用的力度，重点推动多时间尺度储能规模化应用、多类型储能协同运行，在缓解新能源发电特性与负荷特性不匹配导致的短时、长时平衡调节能力和提升电力系统的调整能力等方面做了大量的工作，主要解决了新能源发电与常规电力系统动态平衡等问题。据悉，新型储能在电力系统的应用场景分为三大部分：一是电源侧，主要应用于风力、光伏等绿色电站以及火电、核电的储能；二是电网侧，主要应用于调峰、调频、顶峰、备用的储能；三是负荷侧，主要应用于分布式光伏、风电以及工商业用户的电力储能和应急备用电源等。当前，随着全国各省市分时电价政策的落实和峰谷电价差拉大等因素的影响，用户侧储能需求明显增多，主要表现在储冷、储热等方面。工商业用户利用夜间谷电时段低电价制冷、制热，以相变材料为介质储存冷热量，峰电

时释放，可有效降低能源使用成本和实现电力的错峰运行，缓解电力系统顶峰用电。同时，储冷、储热逐渐在风力、光伏中发挥重要的储能作用。基于电力部门鼓励用户自发自用、余电上网的经营策略，风、光电力可直接转换为冷、热并以相变材料为介质进行储存，提高了能源利用效率和新能源消纳的能力。

新型储能在推动能源领域“碳达峰碳中和”过程中发挥着显著作用。国家发展和改革委员会、国家能源局印发的《关于加快推动新型储能发展的指导意见》中强调，要明确新型储能市场主体地位、健全新型储能价格机制、健全“新能源+储能”项目激励机制。由此可见，新型储能已经确立了时间表、路线图和任务目标【97】。

2021年6月，国家发展和改革委员会在《关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知》中明确鼓励各地出台针对性扶持政策，支持光热发电等新能源产业持续健康发展【95】。2023年4月，国家能源局发布《关于推动光热发电规模化发展有关事项的通知》，要求积极开展光热规模化发展研究工作，力争“十四五”期间，全国光热发电每年新增开工规模达到3吉瓦左右。伴随储能利好政策密集释放，熔盐储能市场有望迎来发展机遇期，助力构建清洁低碳、安全高效的能源体系【16】。

储能蓄热技术具有储能容量大、储存周期长、成本低等优点，据相关专家测算，储热成本大概可以做到储电成本的1/10甚至更低，相比其它储能技术，储热更适合大规模储能的需求。

国际可再生能源署的报告显示，到2030年，储热装机的容量大概将增长到800吉瓦时以上，中国的储热装机规模目前已达到1吉瓦时。全球热能储存产业市场规模将快速发展，在双碳目标下，相变储热技术有望在清洁供热、火电调峰、清洁能源消纳等方面迎来较大的发展空间和机遇。天津融万低碳物流园使用的高效新型相变蓄冷组件，在谷电时间内储存制冷，在峰电时间内释放冷量。根据实际电价，每日降低运行费用约1522.35元，全年累计降低运行费用555657.24元，项目的投资回收期约3.24年。20年累计减少1111.31万运行费用。

数据中心具有很大谷电蓄冷制冷和余热利用的空间。预计2025年数据中心机柜数量将达1000万架，数据中心制冷费用占到整体运行费用的50%以上，若

其中 200 万个机架选择谷电相变蓄冷技术进行节能改造,则将形成 160 亿元的产值。

在中国每年消耗的约 40 亿吨标煤的能源中,超过 50%被浪费掉了,其中大部分是以余热的形式排放到环境中,支撑中国经济发展的部分能源需求可以通过采用节能技术提高能源利用效率来解决,储能特别是储热技术在未来节能增效方面的作用不可小视。

7.3 中国蓄热储能挑战

7.3.1 固体蓄热储能面临的挑战

对于固体储热而言,材料受到抗腐蚀性、热导率、循环寿命,储热密度等因素的制约。储热模块制备需要满足良好一致性、更高的机械强度和更强的表面抗氧化能力,蓄热体换热通道需要更高的换热系数、更低的压损和应力。系统大容量集成需克服高温高压下材料性能的下降甚至失效,需加强监测与防护并具有级联可扩展能力。系统运行需适应新能源、气候变化、用户负荷的随机性及波动性。

熔盐蓄热具有温区广、比热容高、换热好等优点,可以通过换热器等设备将存储的热能提供给热发电的设备使用,目前已在太阳能热发电厂中实现应用。从蒸汽生产流程来看,熔盐热储能适用于高温高压蒸汽的蓄热储能,可以在汽轮机高压旁路或者再热器出口设置熔盐储热系统。但熔盐蓄热技术在选择与热量存储和输送关的设备材料及工质等方面存在困难,该技术仍处在示范应用阶段,主要技术难点包括导热油和熔盐之间的换热器设计、熔盐泵的制作、整个电站保温系统、预热系统以及故障监控的设计。传热介质在不同时刻的流态、传热和与蓄热系统的配合、整个电站的匹配和控制等。实际上,无论是高温高压的主蒸汽还是过热度很大的再热蒸汽,载热密度都比较低,且蒸汽高温潜热需要维持高压,熔盐换热需要采用换热面积较大的高压厚壁换热器,这导致换热效率低下,技术经济可行低。2016 年到 2020 年,我国各地零星建成了一些熔盐储热供热示范项目。但整体来看,熔盐储热技术在供暖领域大规模的商业化项目寥寥可数,主要是熔盐储热低温供暖的成本与传统能源技术相比仍相对较高。

7.3.2 相变蓄热储能面临的挑战

相变材料作为相变储热系统的核心部件，在相变过程中能够以固定温度储存和释放热量。然而，尽管相变材料在可扩展应用中具有许多优势，但仍然存在许多缺点需要解决。三个长期存在的瓶颈包括相对较低的存储密度、较短的存储时间以及在一个存储/释放周期内的热降解【96】。相变材料可分为无机相变材料、有机相变材料和共晶相变材料，每一类相变材料都有其优缺点。例如，盐水合物作为无机相变材料的代表，具有体积储能密度高、不易燃、无腐蚀性、无毒、价格低等优点，适用于工业和家庭应用。然而，为了提高储热工艺的效率，需要克服其相变过程中的相分离和过冷问题。这意味着材料的不同组分可能会分离，导致热量储存和释放能力下降。需要通过添加适当的添加剂或调整相变材料的组分比例来实现相分离的抑制。无机相变材料还可能存在过冷现象，即熔点 T_m 与结晶点 T_c 之间的差异，过冷程度从几°C到几十°C不等，导致热量释放的后一阶段出现不可避免的热力学能量衰减，这将导致材料不能正常储存和释放热量。可以通过添加催化剂或使用特殊的凝固控制技术来防止相变材料的过冷。相比之下，石蜡和聚乙二醇等有机相变材料受相位分离和过冷问题的影响较小，但面临着体积变化大的挑战以及由此产生的泄漏问题。液体泄漏是相变材料的一个主要问题。由于相变材料通常是以液体形式存在，因此在长时间使用过程中存在泄漏的风险。这不仅会导致能量损失，还可能对环境造成污染。因此，需要寻找新的材料或改进现有材料的结构，以减少液体泄漏的发生。此外，还需要增强相变材料的导热性，以提高储能速度和效率。相变材料的导热系数相对较低，这会限制其在一些高热量传输要求的应用中的使用。为了提高相变材料的导热性能，需要研究增加材料的导热填料或改变其微观结构。传统潜热储能面临的一个基本挑战是相变材料使用温度的可调性有限。例如，如果目标温度为 25°C，而环境温度在 25°C 上下波动，则需要两种不同的相变材料，这大大降低了每个系统的利用率，导致成本增加。为了实现高效可靠的储热应用，人们尝试探索许多含有功能成分的复合相变材料，以解决相变材料的上述弱点【97】。

7.3.3 化学蓄热储能面临的挑战

化学储热技术储热密度高，有利于能量的长期储存，可供选择的储热材料或者可逆化学反应较多，适用温区广，因此在工业余热/废热的利用、太阳能热储存

以及化学热泵等方面具有极大的应用价值。但由于需要将相应的化学物质隔离，有些原料还对容器有十分严苛的要求，因而系统复杂、体积大，投资较高，整体效率仍较低。另外，反应过程复杂，有些反应的动力学特性尚不完全清楚，而且些许反应需要催化剂，有些反应特性及现象无法解释。再者，有一定的安全性要求。化学储热体系涉及到多个学科的知识交叉，并且有许多实际应用中的限制，目前仍处于小规模的研究和尝试阶段。

CCMSA清洁能源应用系列报告010-58934233

8. 中国蓄热储能发展建议

针对储能项目的政府补贴政策应涵盖多种形式，包括资金支持、税收减免、电价补贴等。这些政策应根据不同类型的储能技术和应用场景进行差异化设计，以促进关键领域和关键项目中储能技术的发展。例如：在电网调度、可再生能源消纳、微电网建设等方面给予优先支持和政策激励，以增加储能技术的市场需求和商业化机会。其次，政府应制定明确的补贴标准，包括补贴金额、补贴期限和补贴对象等方面的具体规定。这将为储能项目提供明确的补贴依据，减少不确定性，并提高吸引力和可行性。为确保补贴政策的稳定性和可持续性，政府应制定长期有效的补贴政策，并明确补贴周期和补贴规则。这将有助于吸引更多投资，并提供持续的激励，推动储能项目的稳定运营和发展。此外，各省市应尽量统一储能站的商业模式和政策标准，减少区域间的差异性。这样可以为储能电站提供更稳定和可预测的运营环境，降低经营风险。最后，在制定产业政策时，需要确保激励机制的合理性，避免过度补贴或补贴不足，以促进储能行业的可持续发展。政府应加强政策监测和评估，及时调整政策措施，以适应储能技术发展的变化和市场需求的演变。

健全“新能源+储能”项目激励机制。对于配套建设项目，动态评估其系统价值和技术水平，可在竞争性配置、项目核准（备案）、并网时序、系统调度运行安排电力辅助服务补偿考核等方面给予适当倾斜。

应该高度重视热储能技术研究，推进技术攻关和应用。研制宽负荷多级离心压缩机、高负荷多级组合式透平膨胀机、高效紧凑式超临界空气蓄冷换热器和蓄热换热器等关键部件样机以及控制系统，部署“宽液体温域高温熔盐储热技术”科研项目。支持电力企业开展高效电转热、相变蓄热站优化运行与协同控制、电网-热网耦合的市政供暖、电采暖负荷参与电网互动响应等技术与示范应用，助力可再生能源消纳。继续加强包括热储能在内的新型储能技术研究，凝聚各方合力，集中解决制约储能技术应用与发展的瓶颈问题，深化热储能电能智慧供热综合能源服务系统建设。

建议在电力资源充足地区，积极发展电供暖与蓄热相结合供暖模式，建设具备蓄热功能的电供暖设施，促进风电和光伏发电等可再生能源电力消纳。不断完善支持政策，为推进热储能电能智慧化供热营造良好环境，助力实现“碳达峰、碳中和”目标。

通过建设热储能电能智慧供热实验室和大数据中心，可以有效开展热储能电能智慧供热技术研究和应用，减少供热消耗，提高供热效率。应高度重视热储能研发，推动实验室和大数据中心建设工作，建设可再生能源并网等全国重点实验室，开展规模化储能系统集成方法、可再生能源并网等研究，为储能领域科技创新发展提供重要支撑。支持电力企业建立电能替代技术联合实验室，开展多种能源系统耦合仿真、综合能源系统优化利用、数据中心余热回收利用和精准供冷等技术研究，提升综合用能水平。

重视市场化建设，减少过度行政干预，深化储热市场化改革。储能行业属于自然垄断行业，具有高度集中和规模经济的特点。政府可以与相关部门和企业代表共同研究制定市场规则，确保储热项目能够公平竞争和参与市场交易。

制定与蓄热储能相关的新政策、新标准。对滞后的政策标准及时修订，使标准能够更好地指导蓄热储能技术发展和商业应用。

参考文献:

- 【1】 Dincer and M. Rosen, "Thermal Energy Storage," 2nd ed: Wiley, 2011
- 【2】 Uhlir J. Chemistry and technology of Molten Salt Reactors—history and perspectives[J]. Journal of nuclear materials, 2007, 360(1): 6-11.
- 【3】 程祖虞. 蓄热器技术发展史概况[J]. 动力工程, 1984(01): 13-20, 62.
- 【4】 陈世意, 石文卿, 孙泽权. 余热供热蓄热器双波动工况下的计算[J]. 能源研究与利用, 1990(03): 10-11, 14.
- 【5】 赵应昱. 太阳能跨季节蓄热供暖技术研究现状与发展前景[J]. 中小企业管理与科技, 2018(05): 135-137.
- 【6】 辛易. 太阳能蓄热池[J]. 化工新型材料, 1984(07): 35-36.
- 【7】 汤金华. 太阳能系统的蓄热技术综述[J]. 有色冶金设计与研究, 2023, 44(06): 26-29.
- 【8】 徐伟, 张时聪. 中国地源热泵技术现状及发展趋势[J]. 太阳能, 2007(03): 11-14.
- 【9】 方贵银等. 蓄冷空调技术的现状以及发展趋势[J]. 制冷与空调, 2006, 6(1): 1-5.
- 【10】 Thermal Energy Storage. Brussels, September 2023. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2023/09/2023.09.26-Thermal-Energy-Storage_for-distribution.pdf
- 【11】 能源研究院《世界能源统计年鉴》(2023年版)
- 【12】 D. Lakshmi, C. N. Ravib, R. Zahira, Sivaraman Palanisamy, Sharmeela Chenniappan. Chapter 1 - Introduction to renewable energy sources and bulk power systems. Power Systems Operation with 100% Renewable Energy Sources[J]. 2024, Pages 1-13.
- 【13】 刘冠卓. 2023年中国熔融盐蓄热行业研究: 应用场景概述. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202307111592185383_1.pdf?1689107296000.pdf
- 【14】 Sun, M., Liu, T., Wang, X. et al. Roles of thermal energy storage technology for carbon neutrality. CarbNeutrality, 12(2023).
- 【15】 <https://www.bvp.com/atlas/how-thermal-storage-can-help-with-the-climate-crisis>
- 【16】 创新前景: 热能储存 <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage-ZH>
- 【17】 <https://bere.berkeley.edu/news/thermal-storage-solutions-decarbonize-industrial-heat>
- 【18】 https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2023/09/2023.09.26-Thermal-Energy-Storage_for-distribution.pdf
- 【19】 HASNAIN, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. Energy conversion and management, 1998, 39.11: 1127-1138.
- 【20】 Hasnain, S. M. and Smiai, M., Journal of Science and Technology, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), 1995, 34, 34.
- 【21】 Lodhi, M. A. K., Energy Convers. Mgmt., 1996, 37(12), 1677.
- 【22】 Bauer, T.; Pflieger, N.; Breidenbach, N.; Eck, M.; Laing, D.; Kaesche, S. Material aspects of solar salt for sensible heat storage. Appl. Energy 2013, 111, 1114–1119.
- 【23】 Raade, J. W.; Padowitz, D. Development of Molten Salt Heat Transfer Fluid with Low Melting Point and High Thermal Stability. J. Sol. Energy Eng. 2011, 133, 031013.
- 【24】 Bradshaw, R.; Meeker, D. High-temperature stability of ternary nitrate molten salts for solar thermal energy systems. Sol. Energy

- Mater.1990,21,51–60.
- 【25】 <https://news.bjx.com.cn/html/20220909/1254232.shtml>
- 【26】 RowsellJL,YaghiOM.Metaleorganicframeworks:anewclassofporousmaterials.MicroporousandMesoporousMaterials2004;73:3e14.
- 【27】 CaraballoA,Galán-CasadoS,CaballeroÁ,etal.Moltensaltsforsensiblethermalenergystorage:areviewandanenergyperformanceanalysis[J].Energies,2021,14(4):1197.
- 【28】 SadeghiG.Energystorageondemand:Thermalenergystoragedevelopment,materials,design,andintegrationchallenges[J].EnergyStorageMaterials,2022,46:192-222.
- 【29】 樊金鹏,田艳丰,邢作霞,等.氧化镁耐火材料的蓄热应用[C]//中国金属学会耐火材料分会,中钢集团洛阳耐火材料研究院,耐火材料杂志社,辽宁省人民政府工业特种资源保护办公室,先进耐火材料国家重点实验室.第十六届全国耐火材料青年学术报告会论文集.2018:5.
- 【30】 Y.H.Yau,BehzadRismanchi,Areviewoncoolthermalstorage technologiesandoperatingstrategies[J].RenewableandSustainableEnergyReviews,2012,16:787-797.
- 【31】 李海建.住房和城乡建设部课题验收报告.绿色低碳建筑材料研究(2022).
- 【32】 刘瑞丽;高琼旻;马静;王薇;定形相变板材制备及相变墙体热工性能研究.郑州大学学报(工学版),2021(04vo42):105-110.
- 【33】 朱丽;杨洋;陈萨如拉;孙勇.热激活相变复合墙体动态热特性与节能潜力.重庆大学学报,2018(11vo41):42-52.
- 【34】 PintaldiS,PerfumoC,SethuvenkatramanS,etal.Areviewofthermalenergystoragetechnologiesandcontrolapproachesforsolarcooling[J].RenewableandSustainableEnergyReviews,2015,41:975-995.
- 【35】 González-RoubaudE,Pérez-OsorioD,PrietoC.Reviewofcommercialthermalenergystorageinconcentratedsolarpowerplants:Steamvs.moltensalts[J].Renewableandsustainableenergyreviews,2017,80:133-148.
- 【36】 FumeyB,WeberR,GantenbeinP,Daguenet-FrickX,WilliamsonT,DorerV.DevelopmentofaClosedSorptionHeatStoragePrototype.EnergyProcedia2014;46:134-41.
- 【37】 GirolamaAiròFarulla,MaurizioCellura,FrancescoGuarino,MarcoFerraro.AReviewofThermochemicalEnergyStorageSystemsforPowerGridSupport.Appl.Sci.2020,10,3142.
- 【38】 YuN,WangRZ,WangLW.Sorptionthermalstorageforsolarenergy[J].ProgressinEnergyandCombustionScience,2013,39(5):489-514.
- 【39】 ZondagHA,KikkertBWJ,SmedingSF,BakkerM.Thermochemicalseasonalsolarheatstorage withMgCl₂·6H₂O:firstupscalingofthereactor.In:ProceedingsofInternationalconferenceforsustainableenergystorage.Belfast,Ulster;2011.
- 【40】 RdBoer,HaijeWG,VeldhuisJBJ.Determinationofstructural,thermodynamicandphasepropertiesintheNa₂S/H₂Osystemforapplicationinacheemicalheatpump.ThermochimicaActa2003;395:3e19.
- 【41】 MauranS,LahmidiH,GoetzV.Solarheatingandcoolingbyathermochemicalprocess.firstexperimentsofaprototypestoring60kWhbyasolid/gasreaction.SolarEnergy2008;82:623e36.
- 【42】 PosernK,KapsC.Calorimetricstudiesofthermochemicalheatstorage materialsbasedonmixt

- ures of MgSO₄ and MgCl₂. *Thermochemica Acta* 2010; 502: 73e6.
- 【43】 Zhu D, Wu H, Wang S. Experimental study on composite silicagel supported CaCl₂ sorbent for low grade heat storage. *International Journal of Thermal Sciences* 2006; 45: 804e13.
- 【44】 Sapienza A, Glaznev I S, Santamaria S, Freni A, Aristov Y I. Adsorption chilling driven by low temperature heat: new adsorbent and cycle optimization. *Applied Thermal Engineering* 2012; 32: 141e6.
- 【45】 Girolama Airò Farulla, Maurizio Cellura, Francesco Guarino and Marco Ferraro. Review of Thermochemical Energy Storage Systems for Power Grid Support. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3142.
- 【46】 邢闯, 刘立强, 闫绍华, 李杨, 丁聪, 张硕, 孙涛. 化学储热研究进展. *材料科学*, 2021, 11(2), 88-97.
- 【47】 Suresh C, Saini R P. An experimental study on the performance evaluation of a combined sensible - latent heat thermal energy storage [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(4): 5730-5746.
- 【48】 Zanganeh G, Khanna R, Walser C, et al. Experimental and numerical investigation of combined sensible-latent heat for thermal energy storage at 575 C and above [J]. *Solar Energy*, 2015, 114: 77-90.
- 【49】 国家能源局. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见 国家能源局 .https://www.nea.gov.cn/201710/11/c_136672015.htm?eqid=c89cf2970001051c000000026433b273.
- 【50】 中国政府网. 关于印发《贯彻落实<关于促进储能技术与产业发展的指导意见>2019-2020 年行动计划》的通知_国务院部门文件.
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-07/01/content_5457986.htm.
- 【51】 中国政府网. 发展改革委能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见_2021 年第 25 号国务院公报.https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5636148.htm.
- 【52】 国家能源局. 国家能源局关于印发《新型储能项目管理规范（暂行）》的通知 国能发科技规〔2021〕47 号.
http://zfxgk.nea.gov.cn/202109/24/c_1310215100.htm?eqid=b8d3d0280028b55300000004643763b4.
- 【53】 国家发展和改革委员会. 关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知.https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220607_1326855.html.
- 【54】 国家能源局电力可靠性管理和工程质量监督中心. 2017 年能源工作指导意见.<http://prpq.nea.gov.cn/zcfgx/3706.html>.
- 【55】 IEA - International Energy Agency//IEA.<https://www.iea.org>.
- 【56】 BONTEM, STUYFZANDP, HULSMANNA, 等. Underground Thermal Energy Storage: Environmental Risks and Policy Developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*, 2011, 16(1).<https://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art22/main.html>.
- 【57】 Energy Storage Technologies: Policy and Regulatory Landscape//Future Bridge.<https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/energy-storage-technologies-policy-and-regulatory-landscape/>.
- 【58】 TOMITAT. Policies and Regulations for Electricity Storage in Japan.

- 【59】 TheAmericanSocietyofMechanicalEngineers-ASME.<https://www.asme.org/>.
- 【60】 ANSI/ASHRAEStandard94.3-2010-Methodof蓄热储能
tingActiveSensibleThermalEnergyDevicesBasedonThermalPerformance.
<https://webstore.ansi.org/standards/ashrae/ansiashraestandard942010-1358716>.
- 【61】 IGCC—PoweredbyStandard189.1.
<https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-189-1>.
- 【62】 AHRI900(I-
P)and901(SI):PerformanceRatingofThermalStorageEquipmentUsedforCooling(Reaffirm
edSeptember2020)|AHRI.<https://www.ahrinet.org/search-standards/ahri-900-i-p-and-901-si-performance-rating-thermal-storage-equipment-used-cooling-reaffirmed>.
- 【63】 ThermalEnergyStorage(蓄热储能)Technologies.
https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a74b9b8ed915d502d6ca7c6/DELTA_EE_DECC_蓄热储能_Final_1_.pdf.
- 【64】 ThermalEnergyStorageMarketSize,Growth,Report2023-
2032<https://www.precedenceresearch.com/thermal-energy-storage-market>.
- 【65】 <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermal-energy-storage-market>
热能存储市场规模|《2027 年全球报告》(grandviewresearch.com).
- 【66】 GlobalThermalEnergyStorageMarketByGeography,2022-2030,2023-2030
<https://www.skyquestt.com/report/thermal-energy-storage-marke>.
- 【67】 Net-
zeroheat:LongDurationEnergyStorageetoaccelerateenergysystemdecarbonization[https://w
ww.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-heat-long-duration-
energy-storage-to-accelerate-energy-system-decarbonization](https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-heat-long-duration-energy-storage-to-accelerate-energy-system-decarbonization)
- 【68】 InternationalDistrictEnergyAssociationIHERMALENERGYSTORAGEstrategiesforPea
kShiftingandCarbonReduction.
- 【69】 Decourt,B.andR.Debarre(2013),“Electricitystorage”,Factbook,SchlumbergerBusinessCo
nsultingEnergyInstitute,Paris,FranceandPaksoy,H.(2013),“ThermalEnergyStorageToday
”presentedattheIEAEnergyStorageTechnologyRoadmapStakeholderEngagementWorksh
op,Paris,France,14February.
- 【70】 马美秀,章康,陈梦东,等.固体电蓄热技术的研究现状与展望
[J].ZhejiangElectricPower,2023,42(10).
- 【71】 姜竹,邹博杨,丛琳,等.储热技术研究进展与展望[J].储能科学与技术,2022,11(9):2746.
- 【72】 新世纪跨季节显热储热项目发展现状与分析 [https://www.desn.com.cn/news/show-
1647745.html](https://www.desn.com.cn/news/show-1647745.html)
- 【73】 国家统计局-2023 中国统计年鉴 <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm>
- 【74】 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献,关键技术与挑战
[J].工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
- 【75】 HeierJ,BalesC,MartinV.Combiningthermalenergystoragewithbuildings–
areview[J].RenewableandSustainableEnergyReviews,2015,42:1305-1325.
- 【76】 OstermanE,DelPeroC,ZavrleE,etal.Phase-
ChangeMaterialThermalEnergyStoragefortheSmartRetrofittingofExistingBuildings[J].E
nergies,2023,16(17):6127.

- 【77】 固体蓄热与水蓄热、熔盐蓄热的对比分析
<http://www.cnste.org/html/jishu/2021/0914/8247.html>
- 【78】 <https://www.zhihu.com/question/375412778>
- 【79】 2016 太阳能工农业热利用研究报告 <https://www.copperalliance.asia/news-and-reports>
- 【80】 我国工业余热利用现状分析 <https://www.cnste.org/html/jishu/2020/0817/6803.html>
- 【81】 中国环境网 - 全国生态环境信息平台
<https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1086452>
- 【82】 <http://www.zhongyineng.com/case/55.html>
- 【83】 <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>
- 【84】 丁文进,ThomasBauer. 下一代太阳能光热电站中熔融氯盐技术研发进展[J].Engineering,2021,7(03):137-167.
- 【85】 董海鹰,房磊,丁坤,等.基于热电联产运行模式的光热发电调峰策略[J].太阳能学报,2019,40(10):2763-2772.DOI:10.19912/j.0254-0096.2019.10.009.
- 【86】 <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/P020220321550104020921.pdf>
- 【87】 <https://www.chplaza.net/article-8459-1.html>
- 【88】 叶锋,曲江兰,仲俊瑜,等.相变储热材料研究进展[J].过程工程学报,2010,10(06):1231-1241.
- 【89】 <https://www.yotoes.cn/index.php/Home/Product/index.html>
- 【90】 <https://www.chplaza.net/article-8459-1.html>
- 【91】 李昭,李宝让,陈豪志,等.相变储热技术研究进展[J].化工进展,2020,39(12):5066-5085.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0376.
- 【92】 谢伟,皇甫昊.蓄热式电锅炉供暖工程设计[J].洁净与空调技术,2020(01):64-66.
- 【93】 ALVAG,LIUL,HUANGX,
等. Thermalenergystoragematerialsandsystemsforsolarenergyapplications.Renewableand SustainableEnergyReviews,2017,68:693-706.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>.
- 【94】 国家发改委.国家发展改革委关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见.国家发展改革委关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见_部门政务_中国政府网(www.gov.cn).
- 【95】 A.DiCecca,F.Benassis,P.Poeuf.EnergyStorage:TheParisianDistrictCoolingSystem.EnergyStorage:TheParisianDistrictCoolingSystem-TheRenewableEnergyInstitute(renewableinstitute.org).
- 【96】 关于加快推动新型储能发展的指导意见(发改能源规(2021)1051号).https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202107/t20210723_1291321.html.
- 【97】 国家发展和改革委员会.关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知.https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202106/t20210611_1283089.html.

图表清单：

表 1-1: 蓄热储能服务和价值概述【10】	8
表 1-2: 蓄热储能项目以及减排成效	15
表 2-1: 几种重要的相变材料	20
表 2-2: 常见结晶水合盐相变材料热物性	21
表 2-3: 几种合金相变材料	22
表 2-4: 液体工作对性质【38】	29
表 2-5: 水合盐反应特性【38】	30
表 2-6: 盐水合物的反应【45】	31
表 2-7: 脱氨反应【45】	32
表 2-8: 金属氧化物反应【45】	32
表 2-9: 金属氢氧化物的脱水【45】	32
表 2-10: 金属碳酸盐脱碳反应【45】	33
表 3-1: 中国储热行业相关政策梳理	36
表 3-2: 中国各地储能法规	37
表 3-3: 美国联邦储能相关政策	39
表 3-4: 欧洲各国储能相关激励措施与政策【57】	42
表 3-5: 日本关于储能的相关法规【58】	43
表 3-6: 中国蓄热储能技术标准	44
表 3-7: 其它国家蓄热储能技术标准	45
表 4-1: 三种主要蓄热储能对比分析【16】	51
表 4-2: 所选蓄热储能技术的适用规模、工作时间和相关能量矢量【16】	51
表 4-3: 所选蓄热储能技术的关键技术属性【16】	53
表 4-4: 多种储能技术的分析对比【68】	54
表 5-1: 世界各国跨季节储热项目及相关参数	62
表 5-2: 建筑或区域蓄热储能供热供冷典型案例	71
表 5-3: 工业领域用热情况【79】	91
表 5-4: 各工业行业余热占该行业能耗量的比例【80】	92
表 6-1: 相变材料技术参数【88】	110
表 6-2: 相变储能微胶囊型号及参数【88】	111
表 6-3: 中小型相变储热装置（单元）型号及参数【88】	112
表 6-4: 大型相变储热装置型号及参数【88】	112
表 6-5: 谷电通相变蓄热/蓄冷装置型号及参数	114
表 6-6: 大型相变储热装置型号及参数	115
表 6-7: 服务区热负荷统计表【91】	118
表 6-8: 蓄热式电锅炉设备参数【91】	121
图 1-1: 故宫博物馆的冰窖（现在已经改造为餐厅）	5
图 1-2: 太阳能蓄热池【7】	6
图 1-3: 发展历程示意图	7

图 1-4: 我国“太阳能供热+蓄热储能技术”分布图 (不完全统计)	10
图 1-5: 2017-2021 年中国可回收余热资源均值【13】	11
图 2-1: 蓄热储能分类	16
图 2-2: 卧式蓄冷罐 (图片来源: 北京环渤高科能源科技有限责任公司)	17
图 2-3: 蓄热罐种类【30】	18
图 2-4: 地下蓄热【16】	19
图 2-5: 石蜡相变蓄热【31】	23
图 2-6: 相变复合颗粒【31】	24
图 2-7: 相变微胶囊示意图	24
图 2-8: 德国 kraftBoxx 各种形态相变定形材料示意图	24
图 2-9: 零碳未来 (重庆) 能源发展有限公司各种形态相变材料封装应用示意图	25
图 2-10: 外部融化管冰盘【34】	26
图 2-11: 外部融冰储存系统的充放电程序【34】	26
图 2-12: 内部盘管冰存储系统的充放电程序【34】	26
图 2-13: 主动式直接蒸汽热能存储系统的蒸汽塔装置的工艺流程示意图【35】	27
图 2-14: 蒸汽蓄热器示意图 (图片来源: 网络)	28
图 2-15: 大容量蓄热系统中的 PCM 封装 (HTF 意味着传热流体【17】)	28
图 2-16: 热化学蓄热分类	29
图 2-17: 配备分离器反应器的吸收式系统配置【16】	31
图 2-18: 水合盐蓄热储能技术【16】	33
图 2-19: CaCl 循环过程【16】	34
图 2-20: 建筑供暖开放式吸附储热系统: (a) 供热充电模式; (b) 供热放电模式【38】	35
图 2-21: 闭式吸附蓄热储能循环: 充电和放电阶段【48】	35
图 4-1: 全球 2022 年-2032 年的市场规模以及市场规模预测 (单位: 十亿美元)【64】	47
图 4-2: 2022 年全球各个地区蓄热市场收入占比【64】	48
图 4-3: 2022 年蓄热技术市场规模占比【64】	48
图 4-4: 2022 年以终端用户为基准的蓄热技术市场占比【64】	49
图 4-5: 全球蓄热市场发展最快和最大的地点【66】	50
图 4-6: 多种储能技术的成熟度、资本要求和技术风险示意图对比【69】	55
图 5-1: 全球各行业能源消费占比【67】	56
图 5-2: 全球年度蓄热储能项目建成数量及储热量统计【67】	57
图 5-3: 热储能技术在各部门的主要应用【16】	57
图 5-4: 谷电蓄热技术原理示意图	59
图 5-5: 德国赛尔夫坎特养老公寓	59
图 5-6: 储热罐示意图	60
图 5-7: 德国施克伦生物质发电厂	60
图 5-8: 德国施克伦生物质发电厂热电联产项目储能罐示意图	61
图 5-9: 谷电蓄热供暖系统现场	61
图 5-10: 跨季节储热技术原理示意图【72】	64
图 5-11: 丹麦哥本哈根跨季节储热水池项目图纸与实景图	65
图 5-12: 张家口涿鹿县太阳能塔式跨季节水体储热供热示范项目实景图	66
图 5-13: 项目实景图	67

图 5-14: 西藏浪卡子大型太阳能集中供热项目实景图.....	68
图 5-15: 西藏仲巴县大型太阳能集中供热项实景图.....	68
图 5-16: 全球建筑热能能耗占比示意图【67】	69
图 5-17: 建筑蓄热储能技术细分【75】	70
图 5-18: 北京黄村镇政府大楼相变蓄热储能项目	72
图 5-19: 德国未来馆	73
图 5-20: 储罐示意图	73
图 5-21: 辽宁邮电智慧相变储热系统实景图.....	74
图 5-22: 华润生命科学园相变储热供暖项目实景图.....	75
图 5-23: 项目实景图	76
图 5-24: 项目相变蓄冷机组实景图	77
图 5-25: 固体蓄热装置工作流程示意图【77】	77
图 5-26: 新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目及居民家中“煤改电”采暖设备实景图.....	78
图 5-27: 项目实景图	79
图 5-28: 项目固体电蓄热设备	79
图 5-29: 项目固体蓄热机组	80
图 5-30: 项目实景图	81
图 5-31: 熔盐储热技术流程图	82
图 5-32: 项目实景图	82
图 5-33: 项目熔盐蓄热单罐供暖系统	83
图 5-34: 冰蓄冷技术原理流程图【78】	84
图 5-35: 项目水蓄冷罐实景图	84
图 5-36: 项目实景图	86
图 5-37: 泮西新城地热清洁供热项目工艺流程图.....	87
图 5-38: 项目施工现场及地热供热机房实景图.....	87
图 5-39: 项目实景图	88
图 5-40: 2019 年全球各工业能源消耗与各温区应用占比【67】	89
图 5-41: 全球工业能耗以用热温区划分后的供热热源占比【67】	90
图 5-42: 中国余热资源结构图（2020 年）	92
图 5-43: 习水县小糊涂仙酒厂固体蓄热式能源示范项目现场图片.....	93
图 5-44: 中国纺织服装行业细分行业排放量【81】	94
图 5-45: 该针织厂内蒸汽储热罐、现场调试及生产用热过程实景图.....	95
图 5-46: 项目蒸汽负压余热回收装置和蓄热机组实景图.....	96
图 5-47: 内蒙古“工业余热+太阳能”集中式跨季节蓄热供暖示范项目示意图.....	98
图 5-48: 中如集团敦煌种业玻璃温室电蓄热供暖项目实景图.....	99
图 5-49: 红山花卉市场谷电固体蓄热供暖机组实景图.....	100
图 5-50: 各种储能技术及其在电力系统中的作用【17】	100
图 5-51: 配备熔融硝酸盐直接储热系统的商业化塔式电站【84】	101
图 5-52: 混合太阳能发电项目整体鸟瞰图和项目使用的双罐熔盐储热系统.....	102
图 5-53: 项目实景图	102
图 5-54: 中电建青海共和塔式熔盐储热光热项目整体鸟瞰图和项目双罐熔盐储热系统实景图	103

图 5-55: 热电厂蓄热改造原理图	103
图 5-56: 项目水储热罐实景图	104
图 5-57: 项目实景图	105
图 5-58: 该热电厂实景图及高压固体蓄热锅炉设备图.....	106
图 6-1: 中国蓄热储能产业链图谱	108
图 6-2: 相变储热材料的分类【87】	109
图 6-3: 相变储能微胶囊(微单元)结构示意图【90】	111
图 6-4: 中小型相变储热装置示意图【85】	112
图 6-5: 大型相变储热装置示意图【88】	113
图 6-6: 谷电通相变蓄热/蓄冷装置型号及参数	113
图 6-7: 大型相变储热装置示意图	114
图 6-8: 电锅炉+水蓄能产业链图示	115
图 6-9: 固体蓄热电锅炉产业链图示	116
图 6-10: 熔融盐蓄热系统产业链示意图	117
图 6-11: 各时段采暖热负荷汇总【91】	119
图 6-12: 锅炉房设备平面图【88】	120

CCMSA 清洁能源应用系列报告 010-58934233

致谢

感谢以下单位对本报告的大力支持！（排名不分先后）

内蒙古梅捷新能源科技有限公司、杭州华源前线能源设备有限公司、北京安
兴高科新能源发展有限公司、远能（苏州）环境科技有限公司、北京恒鼎义和节
能科技有限公司、北京宇田相变储能科有限公司、杭州轻巧科技有限公司、江西
零碳未来能源发展有限公司、零碳未来（重庆）能源发展有限公司、上海中如智
慧能源集团有限公司、中化学赛鼎科创产业发展有限公司、江苏双良锅炉有限公
司、大连群智科技有限公司。

附表：本报告中案例使用说明

报告中项目采用情况	项目名称	所属企业
被采用	德国赛尔夫坎特养老公寓热电联产示范项目	kraftBoxx
	德国施克伦生物质发电厂热电联产项目	kraftBoxx
	辽宁省太阳能PVT热泵土壤跨季储能热电冷近零碳能源示范项目	大连群智科技有限公司
	华润生命科学园相变储能供暖项目	北京安兴高科新能源发展有限公司
	蒙古国乌兰巴托某幼儿园供暖项目	kraftBoxx
	深圳某大厦中央空调相变蓄冷项目	零碳未来（重庆）能源发展有限公司
	新疆阿勒泰市阿苇滩镇供暖项目	沈阳兰昊新能源科技有限公司
	张家口凯博风尚南城电热式固体储能供热项目	河北泽瑞节能新能源有限公司
	内蒙古赤峰市德润排水有限公司供暖运维项目	沈阳兰昊新能源科技有限公司
	山西省大同市灵丘县40万千瓦风电供暖示范项目	大连传森科技有限公司
	赤峰市党政综合楼供暖项目	内蒙古梅捷新能源科技有限公司
	辽宁省韩家店镇人民政府供暖系统改造项目	百吉瑞（天津）新能源有限公司
	中益能投建包头钢铁合同能源管理项目	中益能（北京）供热技术有限公司
	中如集团敦煌种业玻璃温室电蓄热供暖项目	上海中如智慧能源集团有限公司
	赤峰市红山花卉市场温室大棚供热项目	内蒙古梅捷新能源科技有限公司
	华电昌吉热电厂辅助调峰服务项目	烟台卓越新能源科技股份有限公司
	北京市大兴区黄村镇人民政府供暖项目	北京安兴高科新能源发展有限公司
	未被采用	蜀之源蒸汽储能项目
太阳能PVT热泵热电联供示范项目		大连群智科技有限公司
昌吉州档案馆全谷电储能供暖		江苏昂彼特堡能源集团有限公司
北京京丰制药集团有限公司蓄能能源站		北京恒鼎义和节能科技有限公司
天津津湾广场谷电相变蓄热供暖系统		北京宇田相变储能科有限公司
晋能长治热电厂工业余热相变储能回收系统		
深圳水务集团多热源相变蓄热污泥干化系统		
国能宁夏灵武发电有限公司新建银川供热应急热源及调峰项目		杭州华源前线能源设备有限公司
西藏某部多能耦合清洁供热项目		江西零碳未来能源发展有限公司
格尔木某部项目		
招商局某大厦“谷电+相变蓄冷”空调系统示范项目		
某药业“谷电+相变蓄冷”空调系统示范项目		零碳未来（重庆）能源发展有限公司
江西零碳未来能源有限公司谷电通储能芯生产基地空调系统		
固体储热清洁供热示范项目（青海）		
昌吉国家农业科技园区核心区清洁能源供暖工程（一期）项目热源厂工程		上海中如智慧能源集团有限公司
谷电+相变蓄冷空调示范项目（深圳）	中国科学院过程工程研究所王会博士	

