

研究论文

跨季节储热技术研究进展及发展趋势

张杰^{1,2}, 牛晨¹

摘要 储热作为一种新型储能技术被广泛地应用在清洁供暖、火电灵活性改造、综合能源服务等多个能源细分领域,论述了跨季节储热技术的分类、工作原理,并对主要技术进行对比分析。跨季节储热技术主要可分为显热、潜热和热化学储热,其中显热储热又可分为水箱储热、地下含水层储热、地埋管储热和砾石-水储热。“十四五”规划明确了大力发展新型储热技术的重要地位,自“双碳”目标提出以后,国家和地方出台了多个政策推动能源转型、促进绿色发展,其中许多内容涉及储热储冷,协调能源利用方面技术推广。综述了跨季节储热技术知识产权发展情况,跨季节储热技术可以有效协调能源供需在时间、空间上的不匹配,利用太阳能、空气能等清洁能源或工业废热、建筑空调废热作为热源来实现能源的夏储冬用,为建筑冬季采暖、煤改清洁能源、区域能源供给提供新的技术路线。最后对跨季节储热技术未来发展进行了展望。

关键词 跨季节储热;余热利用;集中供热;夏储冬用

尊重自然、顺应自然、保护自然是全面建设社会主义现代化国家的内在要求^[1]。大力发展太阳能、地热能、风能、潮汐能等清洁能源是建设绿色中国和实现“双碳”目标的必由之路。根据《中国建筑节能年度发展研究报告 2022》统计,2020 年建筑运行的总商品能耗为 10.6 亿 t 标准煤,约占全国能源消费总量的 21%,建筑商品能耗和生物质能共计 11.1 亿 t 标准煤(其中生物质能耗约 0.9 亿 t 标准煤)^[2]。2022 年 11 月,全球长时储能委员会与研究机构麦肯锡公司发布了《净零碳热能:长时储能加速能源系统脱碳》调查报告,指出实现净零排放的核心是供热系统脱碳,热储能技术对于脱碳至关重要。储热技术在电力的“移峰填谷”、工业废热的再利用和余热的回收、建筑采暖

和空调的节能等领域具有广阔的应用前景。

大规模跨季节储热在经济性、低碳化等各方面已具有可行性,其将全年余热收集起来,变废为宝、实现零碳,可有效解决可再生能源供热系统在时间、空间和强度上的不匹配特性,扩大可再生能源热能利用的深度与广度^[3]。另外,跨季节储热与储氢、储电、储水发电、储高压气等新型储能方式相比成本更低。地下跨季节储热因其技术成熟度高、应用广泛,具有高储存效率和高储存容量等优点,使其成为当前跨季节储热研究与应用的主要方向^[4-5]。中国首个跨季节储热方面的标准《长周期显热储热系统设计规范》于 2023 年 1 月 11 日发布。目前针对跨季节储热相关研究相对较少,为此本文综述了跨季节储热技术的发展现状,对主要跨季节储热技术进行分析对比,梳理了该技术领域专利发展情况,以期推动跨季节储热技术发展。

1. 西南石油大学机电工程学院,成都 610500

2. 石油天然气装备技术四川省科技资源共享服务平台,成都 610500

收稿日期:2023-04-22;修回日期:2025-10-21

基金项目:四川省科技教育联合基金重点项目(2025NSFSC2013)

作者简介:张杰,教授,研究方向为清洁能源安全高效利用装备、管道与压力容器服役安全,电子信箱:Longmenshao@163.com

引用格式:张杰,牛晨.跨季节储热技术研究进展及发展趋势[J].科技导报,2025,43(24):82-91;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.04.00522

1 储热相关政策

储热作为一种新型储能技术被广泛地应用在清洁供暖、火电灵活性改造、综合能源服务等多个能源细分领域,其发展离不开政策的引导与支持。“十四

五”规划明确了大力发展新型储热技术的重要地位,自“双碳”目标提出以来,国家和地方出台了多个政策推动能源转型、促进绿色发展,其中许多内容涉及储热储冷,协调能源利用方面技术推广。[表 1](#)和[表 2](#)为近几年国家和地方层面发布储热相关政策及主要内容。

表 1 国家层面相关储热政策

单位	政策名称	时间	主要内容
国家能源局、农业农村部、国家乡村振兴局	《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》	2021年12月	在大气污染防治重点地区的农村,整县域开展“风光+蓄热电锅炉”等集中供暖。在青海、西藏、内蒙古等农牧区,采用离网型光伏发电+蓄电池供电,利用户用蓄热电暖气供暖
国家发展改革委员会、国家能源局、工业和信息化部等10部门	《关于进一步推进电能替代的指导意见》	2022年3月	加快推进建筑领域电气化,持续推进清洁取暖,在现有集中供热管网难以覆盖的区域,推广电驱动热泵、蓄热式电锅炉、分散式电暖器等电采暖,鼓励有条件的地区推广冷热联供技术,采用电气化方式取暖和制冷
国家发展改革委员会、国家能源局	《“十四五”现代能源体系规划》	2022年3月	开展科技创新示范工程,发展安全高效储能,电化学储能、梯级电站储能、飞轮储能、压缩空气储能和蓄热蓄冷等技术攻关及规模化示范应用,新型储能安全防范技术攻关及示范应用
国家发展改革委员会、国家能源局	《“十四五”新型储能发展实施方案》	2022年3月	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,到2030年,新型储能全面市场化发展
住房和城乡建设部、国家发展改革委员会	《城乡建设领域碳达峰实施方案》	2022年7月	推动智能微电网、“光储直柔”、蓄冷蓄热、负荷灵活调节、虚拟电厂等技术应用,优先消纳可再生能源电力,主动参与电力需求侧响应
工业和信息化部、国家发展改革委员会、生态环境部	《工业领域碳达峰实施方案》	2022年8月	开展高温热泵、大功率电热储能锅炉等电能替代,扩大电气化终端用能设备使用比例
工业和信息化部、国家发展改革委员会、住房和城乡建设部、水利部	《关于深入推进黄河流域工业绿色发展的指导意见》	2022年12月	鼓励青海、宁夏等省区发展储热熔盐 and 超级电容技术,培育新型电力储能装备
国家能源局	《新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)》	2023年1月	充分发挥储电、储热、储气、储冷、储氢优势,实现多种类储能的有机结合和优化运行,促进电力系统实时平衡机理和平衡手段取得重大突破

表 2 地方层面相关储热政策

地区	政策名称	时间	主要内容
北京市	《市管企业碳达峰行动方案》	2022年12月	有序开展地热、再生水及余热资源供暖制冷。因地制宜推广地热及热泵应用,深入研究余热、蓄能以及热泵技术的耦合应用
天津市	《天津市供热专项规划(2021—2035年)》	2022年11月	大力发展热泵、蓄热及中低温余热利用技术,进一步提升余热利用效率和范围
广东省	《广东省能源发展“十四五”规划》	2022年3月	加快先进储能产业集聚发展,积极布局大容量储热(冷)、物理储能等其他创新储能产业
内蒙古自治区	《内蒙古自治区支持新型储能发展的若干政策(2022—2025年)》	2022年12月	适时调整峰谷电价价差至3:1以上,为新型储能发展创造盈利空间
四川省	《四川省能源领域碳达峰实施方案》	2023年1月	加强大容量电化学、压缩气体等新型储能技术攻关、示范和产业化应用,研发熔盐储能供热和发电、飞轮储能、高温相变材料储热等关键技术

表 2 地方层面相关储热政策 (续)

地区	政策名称	时间	主要内容
山东省	《山东省新型储能工程发展行动方案》	2022年12月	以“冷热双蓄+火电”为重点,试点城市区域传统电源向综合能源供应站转变;推广熔盐储热、固体蓄热等热储能技术,探索提升传统火电调节性能
云南省	《云南省城乡建设领域碳达峰实施方案》	2022年10月	推动智能微电网、“光储直柔”、蓄冷蓄热、负荷灵活调节、虚拟电厂等技术应用
重庆市	《重庆市工业领域碳达峰实施方案》	2022年10月	加快分布式光伏发电、分散式风电、天然气分布式能源、多元储能、生物质发电、高效热泵、余热余压利用、智慧能源管控等一体化系统开发运行,构建多能互补的高效能源体系
黑龙江省	《黑龙江省城乡建设领域碳达峰实施方案》	2022年10月	推动智能微电网、“光储直柔”、蓄冷蓄热、负荷灵活调节、虚拟电厂等技术应用,优先消纳可再生能源电力,主动参与电力需求侧响应
甘肃省	《甘肃省“十四五”能源发展规划的通知》	2021年12月	加强风电、光伏发电、光热发电、熔盐储热材料、智能电网、储能、制氢等关键技术研发与示范

2 跨季节储热技术类型

跨季节储热技术是通过太阳能、工业余热等热能资源实现供热的一种新型储能技术,具有储热容量大、设备简单、运行稳定可靠等特点,在大型供热项目中具有广泛应用前景。其主要可分为显热、潜热和热化学储热,其中显热储热又可分为水箱储热、地下含水层储热、地埋管储热和砾石-水储热^[6]。图 1 为跨季节储热系统流程图,非供热季将太阳能、工业废热、建筑空调废热等多余热量存储在储热体中,供热季通过热泵将温度升高并配合热电联产对城镇进行供暖,热泵运行所需的电力可由潮汐能、风能等清洁能源配合热电联产进行持续供应,多余电力又可供给用户端。

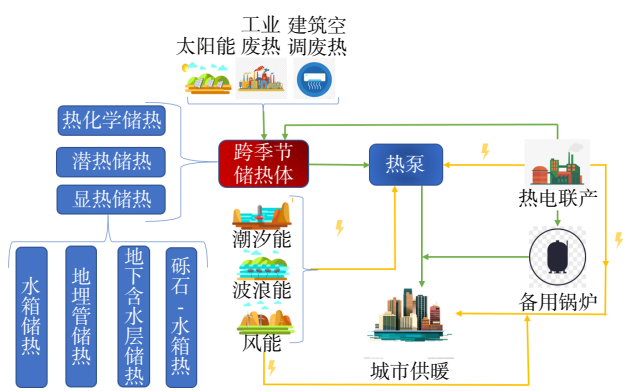


图 1 跨季节储热系统流程

2.1 显热储热技术

与其他仍在研发和小规模应用储热技术相比,显

热储热(SHS)是利用某些介质温度升高或降低过程进行热量存储,凭借运行方式简单、成本低廉等优点已大规模商用。其主要可分为水箱储热、地下含水层储热、地埋管储热、人工含水层储热。

1) 水箱储热。水箱跨季节储热技术是一种利用水箱储存热能,实现季节性能源储备的技术,因具有单位体积热容量大、流动性好、存取热量快捷等优点被应用于大规模季节储热示范项目中,如图 2 所示。系统中热水储热装置可设计为形体系数小以减小热损失的圆柱形,水箱温度分层和外层保温材料是目前水箱储热研究的重点。但该储热技术建设成本较高,需进行较大规模设备安装和管道布置,同时水箱维护和管理也需要较高技术水平和人力成本。以 ARCON 跨季节性储热项目为例,该工程位于丹麦奥尔堡的 Dronninglund(多宁隆德),是 ARCON 为当地一所热厂建设的太阳能供暖+热水工程,是目前全球最大的跨季节性储热项目之一,其总集热面积 37000 m²,储热水池为 60000 m³,可供应 1000 户居民冬季供暖和全

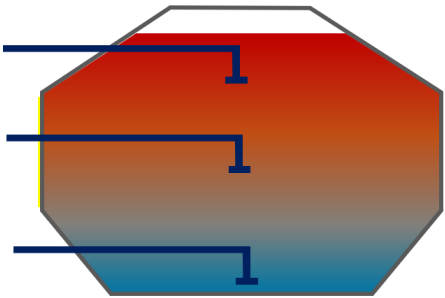


图 2 地下水箱储热示意

年的生活热水,集热采用换热方式,集热循环使用防冻液。

2) 地下含水层储热。地下含水层跨季节储热技术主要利用地下含水层作为热储存介质,将夏季余热储存到地下含水层,冬季再利用地下含水层热能进行供暖,其主要包括热源井、热泵、换热器等设备,如图3所示。该储热系统造价较低,但对地质条件要求较高。根据含水层所处深度,可分为浅层含水层储热(含水层深度500 m以内,储热水温低于50℃)和深层含水层储热(含水层深度在500 m以深,储热水温50℃~150℃)。浅层含水层储热成本低,但工作温度也低、规模小,有污染地下饮用水风险;深层含水层储热系统储热量高、储热密度大、系统效率高和对地下水影响小等优点,但其也有更苛刻的地质条件要求。地下含水层储热技术具有储存容量大、储能效率高等优点,能够满足大规模供暖需求,但该技术建设成本较高,需进行大规模设备安装和管道布置。同时地下含水层的开采和利用需严格遵守环境保护要求。

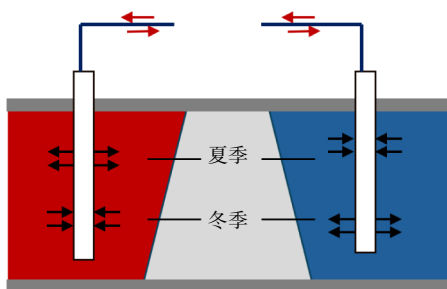


图3 地下含水层储热示意

3) 地埋管储热。地埋管储热主要利用单U、双U或螺旋形管与地下土壤进行换热,埋管深度大概在地下30~100 m,在非供暖季将热源能量通过水等介质储存在地下土壤和岩石中,供暖季又将热量交换出来供给用户端,如图4所示。因具有稳定性好、寿命长等优点已被广泛应用于建筑物采暖、制冷等领域。由于土壤储热密度较低,地埋管储热系统土壤体积约为水箱储热的3~5倍。该技术对地质要求较高,岩石和饱和水土壤地质类型较为适宜,目前已经成功应用于国内外区域供热的项目中^[7-8]。

4) 砾石-水储热。砾石-水储热也称为人工含水层储热,储热介质由砾石和水组成,该技术通过在地下挖掘一个深度为数十米的圆形坑穴,在坑穴中铺设

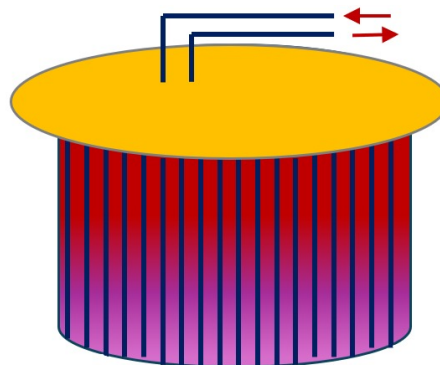


图4 地埋管储热示意

一层砾石,再将水泵入坑穴中,使砾石和水体形成热储库,如图5所示。夏季将热量转移到水中,然后将水泵入坑穴中进行储存;冬季通过热泵等设备将储存在坑穴中的热能提取供暖。该技术具有储存效率高、使用寿命长、环保节能等优点,可有效降低建筑物能耗和碳排放,因不需要建设承重结构,造价相对于热水储热装置要低。

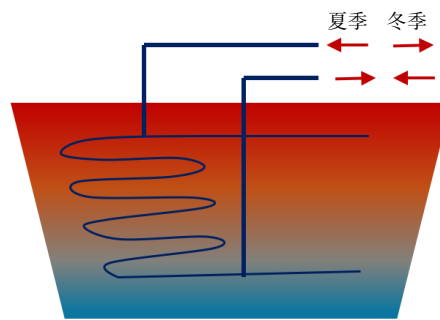


图5 砾石-水储热示意

2.2 潜热储热技术

潜热储热技术是以相变材料为储能介质的一种热能储存技术,主要利用相变材料的相变温度与相变潜热之间差异,将其应用于热能储存,如图6所示。对于跨季节大规模储热,可利用换热流体将热源热量储存于相变储热系统。潜热储热应用领域十分广泛,

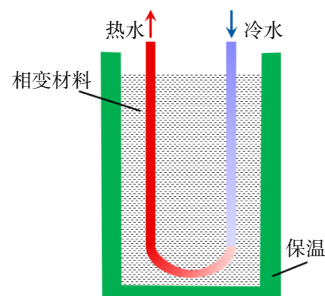


图6 相变储热示意

如现代农业温室、电子元件散热、工业余热回收以及寒天热防护系统等。单一材料往往难以满足性能要求,故制备复合相变材料成为潜热储热的研究重点。复合相变材料可主要分3类,凝胶型、胶囊型和定型复合相变材料,其配制方法包括凝胶或增稠、物理共混法、多孔吸附法和微囊封装技术等。该技术主要目标为降低材料生产成本、增加产能、提高材料使用年限和可靠性^[9]。

2.3 热化学储热技术

热化学储热材料的储能密度通常是显热材料的8~10倍,是潜热材料的2倍以上,并且长期储存热损失小,因此被认为是未来最有前景的储热方式之一。该技术通过夏季将太阳能或其他可再生能源转化为化学能并储存在化学反应物中,冬季通过逆向反应释放出储存热能(图7)。常见热化学跨季节储热技术包括氨合成、硅酸盐合成、碳酸盐合成等。其中氨合成是应用最广泛的一种技术,它将氢气和氮气在高温高压下反应生成氨并释放出大量热能,冬季通过逆向反应将储存的氨分解成氢气和氮气并释放出储存热能。热化学跨季节储热主要处于研究阶段,目前针对吸附/吸收热化学跨季节储热系统,国内外研究学者已经展开了广泛的研究。

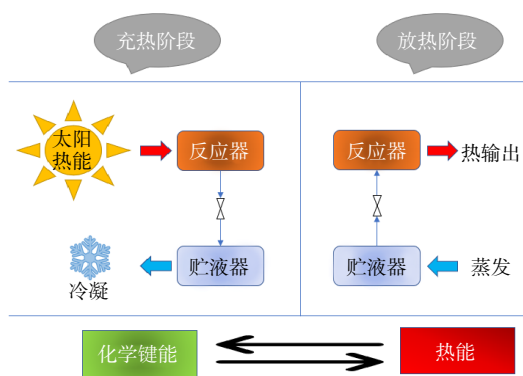


图7 热化学储热示意

3 国内外研究现状

3.1 国外研究现状

丹麦、德国、美国、加拿大等国家对跨季节储热技术展开了深入研究并进行工程实践^[10-13]。Penrod在20世纪60年代提出了将太阳能集热器与地理管换热器组合设想。欧洲部分国家在20世纪70年代

开始研究跨季节储热技术,应用于供暖系统领域并获得巨大成果,国际能源署(International Energy Agency, IEA)1981年启动跨季节储热太阳能集中供热系统研究,欧洲最早在20世纪90年代便开始此方面研究,并在技术应用水平上保持领先地位。

以丹麦和加拿大为代表的国家已建立了诸多跨季节储热供暖实验平台和示范工程,其供暖量占总热需求量的40%以上。丹麦科技大学在1983年建立了世界首例500 m³大型储热水体,丹麦政府提出规划,到2035年全部利用可再生能源作为电能和供热来源。2050年完全替代化石能源。2016年底,世界范围内规模最大的相变储热区域供暖系统已在丹麦建成,规模达131.8万m³,总面积922 MWth,拥有110座太阳能相变储热电厂。此外,规划的太阳能相变储热区域供热集热器面积达269.2万m²,目前丹麦已有成熟的大型相变储热区域供热技术^[14]。CanmetENERGY是加拿大在清洁能源领域领先的研究组织,其太阳能保证率的跨季节区域供热系统研究、开发和示范方面经验得到世界范围内认可,其案例位于Alberta省Okotoks的Drake地面太阳能供热系统,该项目根据不同时间段太阳能不同,分别设置临时太阳能储箱及跨季节太阳能储存箱,以提高太阳能利用率。其中,跨季节太阳能储存箱效率可达50%以上,小区太阳能家用热水系统可满足60%居民热水供应需求,而太阳能采暖系统则可满足90%采暖要求;建成后每栋住宅可减少CO₂排放5 t/a,整个小区可减排260 t/a^[15]。表3为国外跨季节储热领域技术领先厂商及主营业务。

3.2 国内研究现状

中国的跨季储热技术发展相对滞后,通常与地源热泵结合进行应用,既能提高供热效率又能最大限度地利用土地资源。例如,冯国会等^[16]研究发现太阳能跨季节储热地源热泵耦合系统可提高系统性能系数,并有效解决严寒地区土壤冷堆积问题。显热储热领域,中国在20世纪60年代便开始利用浅层地下含水层储热技术,至今已建成6处浅层地下含水层储热系统,而深层地下含水层储热技术由于理论研究不成熟,在中国还没有得到应用,其技术瓶颈主要在于克服腐蚀和结垢问题和建立一套行之有效的水处理技术^[17]。地下储热结构设计上将地理管和水箱结合起来的布置形式引起了研究者关注,王莲莲等^[18]指出储热

表 3 国外部分跨季节储热技术厂商

企业	国家	成立时间	主营业务
PlanEnergi	丹麦	1983年	太阳能、区域供暖、风能、沼气和跨季节蓄热等
HoCoSto	荷兰	2015年	跨季节储热等
If Technology	荷兰	1989年	浅层和深层地热能、储水、油井工程等
Polar Night Energy	芬兰	2018年	住宅、工业跨季节储热技术方案等
Ecovat	荷兰	2008年	储热、储能、可再生能源、智能电网等
Mott MacDonald	英国	1888年	工程管理、开发、咨询等(地下跨季节储热技术世界领先)
Heliostorage	芬兰	2016年	太阳能、储热、可再生能源等
ICAX	英国	1999年	可再生能源供热与制冷、跨季节储热、太阳热能、区域供热、地源热泵、地源供热等

方式最合理的是相变储热与埋管储热结合,既避免了储热水箱体积过大又保证了冬季热负荷需求;王子逸等^[19]提出了由埋管储热和水箱储热相耦合新型复合储热系统;徐德厚等^[20-21]将水箱储热和埋管储热相结合,发现复合储热模式热量损失主要来自上边界。

研究者在理论模型和数值模拟方面展开研究,以期进一步优化设计和精确预测多年运行性能。姚乐恒等^[22]将基于商业软件 FLUENT 和用户自定义程序,构造埋管内壁面第 3 类边界条件,构建了太阳能跨季节土壤储热简化计算方法并验证了其优越性;左春帅等^[23]结合试验和 TRNSYS 软件对张家口市某严寒地区办公楼进行了集热(储热)启/停控制条件、供热性能和地温变化的研究;王春林等^[24]以储热效率最高为优化目标,利用 Hooke-Jeeves 算法获得太阳能集热面积与储热体积、短周期蓄热水箱体积和循环流量的匹配关系;李晓霞等^[25]基于实际跨季节储热供热系统中的塔式聚光吸热子系统,建立非均匀能流密度下聚光吸热器一维非稳态仿真模型,对模型进行全动态实验验证。

利用太阳能、空气能等多种清洁能源与工厂废热结合储热模式也受关注^[26-27],王建辉等^[28]验证了能源塔-埋管复合热泵系统跨季节储热在寒冷地区应用具有可行性;李永等^[29]设计了跨季节空气-土壤储热式热泵系统;张姝等^[30-31]提出了一种适合跨季节应用的空气源蓄热式土壤热泵系统,选取夏季高温空气替代太阳能作为辅助热源,利用室外空气换热器,将夏季室外高温空气中的热量输送并存储至地下岩土中,冬季再由热泵从地下岩土中取热为建筑供暖;张俊月等^[32]研究发现工业余热跨季节储热适合长周期、大规模蓄热。工程案例如内蒙古赤峰“工业余

热+太阳能”储热供暖示范项目,该项目建于内蒙古赤峰市金剑铜厂,于 2016 年 9 月启动至 2017 年 11 月竣工,采用太阳热能和工业余热作为主要热源的跨季节供暖系统,项目区域年储热量为 1.5 万 GJ,通过(火积)理论系统优化及分区控制技术,大大降低了储热系统热损失,后续优化系统综合储热效率将达到 85% 以上,储热体品位可以直接加热热网回水。

潜热储热技术在实际应用中存在相变材料成本较高、储热介质温度范围较窄 2 大问题^[33-35],研究者进行大量研究,杨孟军等^[36]研究发现选择冷凝温度较高冷却介质有利于相变材料放热;汪翔等^[37]研究发现 60% 浓度的醋酸钠水溶液适合作为跨季节储热相变材料;朱茂川等^[38]研究发现具备相变温度适宜、储热密度较大等优点的 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{Na} \cdot 3(\text{H}_2\text{O})$ 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 是跨季节蓄热材料研究重点;栾敬德等^[39]通过原位聚合方法成功制备出 PA@SiO_2 相变材料,并探究了多种表面活性剂对储热微囊结构和热性能影响;药晨华等^[40]提出兰炭灰作为骨架材料制备复合相变储热材料具有较好可行性,为工业固废兰炭灰资源化利用提供了新途径;何起帆等^[41]采用烯烃嵌段共聚物作为封装结构制备复合定型相变材料,通过实验证明该材料在建筑节能方面具有应用潜力。潜热储热技术越来越多开始应用在发电侧和用户端,如中广核阿勒泰市风电清洁供暖示范项目(采用固体相变蓄热材料技术)、内蒙古丰泰热电厂相变储热供暖调峰项目(采用复合二元盐相变材料)、北软双新科创园储能供暖项目(采用北京华厚能源相变储能材料)等。

热化学储热技术目前还处于实验阶段,实际应用中还存在系统复杂、价格昂贵等问题,工程应用案例

较少。未来热化学储热技术主要发展方向:一是制备具有较高储热密度和循环稳定性的热化学储热材料,如因具有廉价易得、安全无毒、储能密度高等优点而受到广泛关注的 $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 体系^[42];二是优化反应器设计,提高传热传质效率、系统性能;三是设计合理的开式或闭式系统。

近年来,引进、整合国外先进技术也成为技术发展重要技术路线之一^[43]。一些企业也开始投入跨季节储热研发,日出东方公司的产品服务于全球 100 多个国家和地区,旗下品牌四季沐歌建立了河北经贸大学、西藏拉日铁路、四季沐歌洛阳基地等多个采暖示范工程项目。亚洲最大的太阳能跨季节储热采暖工程——河北经贸大学项目,其总储热量达 2 万 t,可满足 3 万名师生冬季采暖和全年生活热水需要,该工程已被视为中国太阳能供暖的标志性创新示范工程;四季沐歌协同德国 DEG 公司、斯图加特大学共同开发洛阳基地太阳能采暖项已获得德国政府补贴,其技术也已经达到国际先进水平。

4 跨季节储热技术对比

与潜热和热化学技术相比,显热储热因其运行方式简单、成本低廉、技术成熟等优点成为最商用技术,但其储热量受限。显热储能利用水或熔融盐等物质作为介质储能,应用领域包含工业窑炉和电采暖、居民采暖、光热发电等领域。目前显热技术规模化应用主要集中在光热电站,截至 2019 年底,熔融盐储热累计运行装机规模 420 MW,同比增长 91.4%。表 4 为 4 种显热储热技术比较,潜热储热根据相变温度可分为低温和高温 2 部分。低温潜热储热主要用于废热回收、太阳能储存及供暖和空调系统。高温潜热储热可用于热机、太阳能电站、磁流体发电以及人造卫星等方面。低温相变材料主要有冰、石蜡等,高温相变材料主要为高温熔化盐类、混合盐类和金属及合金等^[44-45]。热化学储热涉及某种与热化学材料的可逆放热/吸热化学反应,该技术尚处于实验室研究阶段,实际工程应用中存在诸多技术问题,故此类项目案例较少。

表 4 显热储热技术对比

技术类型	储热介质	储热密度/ (kW·h/m ³)	热容量/ (MJ/m ³)	与 1 m ³ 水 热容量体 积相同/m ³	地质要求	系统造价/ (元/kW·h)	优点	缺点
水箱储热	水	60~80	208~290	2	结构平稳,无地下水;深度5~15 m	5~6	水单位体积热容量大,储热体积小,蓄热、取热速度快	水池建造花费更多
地埋管储热	沙石/水	15~30	106~142	3~4	钻井便捷、导热性好、热容量大、深度30~100 m最佳	0.4~1.6	就地取材,造价不高	应使用专用冷水井与热水井,对地质提出非常高要求
砾石-水储热	砾石/鹅卵石	30~40	110~182	1.5~2.2	较稳定的土壤情况,最好无地下水流,深度5~15 m	3.5~5	不需要单独设计其他承重结构,可保护地下水	储热体积较大
地下含水层储热	土壤/岩石	30~40	56~110	4~6	要求含水层水流动性较好,同时地下水位相对不高或不存在地下水;砾石层厚度控制在 20~50 m为宜	0.5~2	储热时间长、温度高、减少热损失	埋管占地问题,对地质提出更高要求

相比其他 2 种技术,热化学储热因其具有能量密度高、长期储存热损失小等特点被认为是潜力最大,如果技术瓶颈突破,投资成本降低后,将被大规模应用。短期内显热储热技术仍将在跨季节储热市场占主导地位,如水箱和土壤储热,其成本较低,可靠性强且易于控制^[46]。表 5 为 3 种跨季节储热技

术对比。
近年来,中国跨季节储热技术发展迅猛,专利申请数量已连续多年超过欧美等发达国家。跨季节储热技术领域专利逐年统计如图 8 所示,近 10 年该领域专利量总体呈上升趋势,尤其是 2015 年后该领域创新热度大幅提升。

表 5 3 种跨季节储热技术对比

技术类型	显热储热	潜热储热	热化学储热
储热密度/(GJ/m ³)	<0.2	0.3~0.5	0.5~3.0
储能规模/MW	0.001~10	0.001~1	0.001~1
效率/%	75~97	65~85	45~75
储热介质	水、岩石、土壤等	无机、有机相变材料	碳酸钙体系、氢氧化钙体系等
使用寿命	长	受相变材料限制	受反应物限制
传输距离	短距离	短距离	理论无限远
成本/元·(kW·h) ⁻¹	10~150	200~500	500~1000
技术难度	简单	中试	复杂
成熟度	工业应用	中试	实验室研究
优点	无污染、成本低、简单可靠、易于控	较高的储热密度，可以提供恒定的输出温度	储热密度、热损失小，系统紧凑、可长距离运输
缺点	储热密度低、热损失大、基建费用高	热稳定性差，结晶、腐蚀、相变材料价格较高	材料传热传质性能差、系统复杂、初投资大
发展现状	大部分商业成熟	部分商业成熟	实验研发阶段

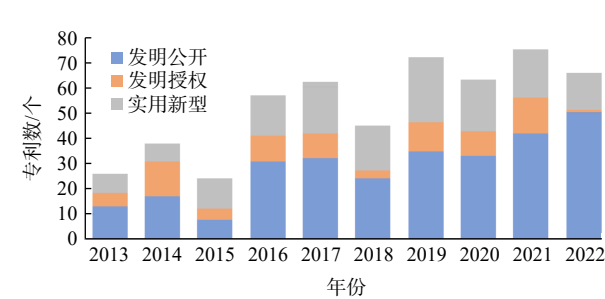


图 8 跨季节储热技术领域专利逐年统计

5 结论

跨季节储热技术不仅是一种低碳技术,更是未来城市能源系统主要调节手段,不仅可以满足城市采暖需求,也可调节热需求与余热源之间在空间与时间上不同步。跨季节储热技术研究和应用已经进入实际落地阶段,未来具有较大发展空间和潜力。随着物联网、云计算等技术发展,跨季节储热技术也逐渐通过智能控制系统实现更加高效的热能储存和使用;因地制宜选择热源及储热方式,中国国土面积广袤,各地区气候、地理、人口规模等因素差距较大,利用跨季节储热技术时应充分考虑地区环境因素影响,选择合适储热形式以及清洁能源实现能源最大化储存和利用;跨季节储热在国外发展时间较早,发展速度较快,而国内该技术工程应用较少,在学习国外先进技术同时应开展关键技术攻关,提升中国自主研发能力。

参考文献(References)

[1] 丁怡婷, 张璁, 黄超, 等. 促进人与自然和谐共生[N]. 人民日报, 2023-01-10(2).

[2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告-2022-公共建筑专题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[3] 孟锋, 安青松, 郭孝峰, 等. 蓄热过程强化技术的应用研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(5): 1273-1282.

[4] Li G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 897-923.

[5] Caliskan H, Dincer I, Hepbasli A. Thermodynamic analyses and assessments of various thermal energy storage systems for buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 62: 109-122.

[6] 张杰, 唐瑾容, 牛晨, 等. 潜热储热技术研究现状与发展趋势[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(1): 16-26.

[7] Guo F, Yang X D, Xu L Y, et al. A central solar-industrial waste heat heating system with large scale borehole thermal storage[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1584-1591.

[8] 张杰, 牛晨, 祝效华. 制冷-储热-供热综合热能系统地理管群全年热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(9): 3048-3056.

[9] 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): 2746-2771.

[10] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, et al. German central solar heating plants with seasonal heat storage[J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 612-623.

- [11] Terziotti L T, Sweet M L, McLeskey J T. Modeling seasonal solar thermal energy storage in a large urban residential building using TRNSYS 16[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 45: 28–31.
- [12] McDaniel B, Kosanovic D. Modeling of combined heat and power plant performance with seasonal thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2016, 7: 13–23.
- [13] Sibbitt B, McClenahan D, Djebbar R, et al. The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system—five years of operation[J]. *Energy Procedia*, 2012, 30: 856–865.
- [14] 樊建华. 以三个工程案例浅析跨季节蓄热太阳能区域供热技术[R]. 北京: 国家光热联盟, 2018.
- [15] 严永红, 张兴国, 李金畅. 加拿大卡尔加里市Okotoks小镇太阳能小区建设[J]. *新建筑*, 2005(6): 26–28.
- [16] 冯国会, 张磊, 常莎莎, 等. 严寒地区太阳能跨季节蓄热—地源热泵耦合系统性能研究[J]. *暖通空调*, 2021, 51(S1): 202–206.
- [17] 黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 17–24.
- [18] 王莲莲. 基于跨季节蓄热的太阳能供暖系统的优化[C]//2018供热工程建设与高效运行研讨会论文集. 杭州: 中国市政工程华北设计总院, 2018: 63–67.
- [19] 王子逸, 徐玉杰, 周学志, 等. 跨季节复合储热系统储/释热特性[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1837–1846.
- [20] 徐德厚, 周学志, 徐玉杰, 等. 新型地下跨季节复合储热系统热量损失机理研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(17): 5983–5991.
- [21] 徐德厚, 周学志, 徐玉杰, 等. 新型地下跨季节复合储热系统性能规律[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1768–1776.
- [22] 姚乐恒, 卢星宇, 孙东亮, 等. 太阳能跨季节土壤蓄热简化快速计算方法构建及性能分析[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(6): 1617–1624.
- [23] 左春帅, 樊海鹰, 王恩宇. 太阳能跨季节储热供热系统性能研究[J]. *华电技术*, 2020, 42(11): 44–50.
- [24] 王春林, 郭放, 朱永利, 等. 大规模太阳能跨季节土壤储热系统设计优化[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 320–327.
- [25] 李晓霞, 王志峰, 李金平, 等. 跨季节储热供热系统中聚光吸热器的动态仿真研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 54–58.
- [26] 桂树强, 臧中海, 胡纯清, 等. 利用工业废热进行岩土跨季节储热供热技术研究[C]//第十三届中国钢铁年会论文集 9. 能源、环保与资源利用. 重庆: 中国金属学会, 2022: 74–81.
- [27] 贺明飞, 王志峰, 原郭丰, 等. 水体型太阳能跨季节储热技术简介[J]. *建筑节能(中英文)*, 2021, 49(10): 66–70.
- [28] 王建辉, 王彦博, 孙振锋, 等. 能源塔—地理管复合源热泵系统跨季节蓄热实验研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(8): 1045–1050.
- [29] 李永, 崔军艳, 鲍玲玲. 跨季节空气—土壤蓄热式热泵系统运行特性分析[J]. *制冷与空调*, 2022, 22(10): 61–69.
- [30] 张姝, 郑茂余, 王潇, 等. 严寒地区跨季节空气—U形地理管土壤蓄热特性模拟与实验验证[J]. *暖通空调*, 2012, 42(3): 97–102.
- [31] 张姝, 郑茂余. 空气源蓄热式土壤源热泵系统模拟研究[J]. *流体机械*, 2012, 40(8): 69–74.
- [32] 张俊月, 郭放, 黄海龙, 等. 工业余热跨季节储热系统优化及经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(1): 47–53.
- [33] 郭放. 大规模太阳能跨季节储热的关键技术研究及技术经济性分析[R]. 包头: 中国科学院电工研究所, 2020.
- [34] 郅慧, 高立营, 苏伟光. 热化学储热技术与研究现状[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2022, 36(5): 24–31.
- [35] 王智辉, 湟田光宏, 杨希贤, 等. 热化学蓄热系统研究进展[J]. *新能源进展*, 2015, 3(4): 289–298.
- [36] 杨孟军, 周志华, 袁建娟, 等. 太阳能跨季节蓄热相变材料的凝固实验研究[J]. *煤气与热力*, 2015, 35(11): 16–20.
- [37] 汪翔, 章学来, 袁维焯, 等. 基于跨季节储热的相变材料的制备及研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(10): 74–78.
- [38] 朱茂川, 周国兵, 杨霏, 等. 过冷水合盐相变材料跨季节储存太阳能研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(6): 2256–2268.
- [39] 栾敬德, 陶佳璐, 烟征, 等. 表面活性剂对石蜡@SiO₂复合相变储热材料形貌和热性能的影响[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 68–72.
- [40] 药晨华, 熊亚选, 任静, 等. 硝酸钠/兰炭灰复合相变储热材料的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 300–309.
- [41] 何起帆, 吴闽强, 李廷贤, 等. 正十八烷/OBC/EG复合定型相变材料制备及热物性[J]. *化工学报*, 2021, 72(S1): 539–545.
- [42] Uchino T, Fushimi C. Fluidized bed reactor for thermochemical heat storage using Ca(OH)₂/CaO to absorb the fluctuations of electric power supplied by variable renewable energy sources: A dynamic model[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 419: 129571.
- [43] 王戎, 陈祉叶, 曾嘉伟, 等. “双碳”目标下中国能源转型的战略思考[J]. *科技导报*, 2024, 42(19): 10–19.
- [44] 李壮壮. 基于显热储能技术的太阳能空气集热采暖系统研究[D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2012.
- [45] 樊栓狮, 梁德青, 杨向阳, 等. 储能材料与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [46] 赵璇, 赵彦杰, 王景刚, 等. 太阳能跨季节储热技术研究进展[J]. *新能源进展*, 2017, 5(1): 73–80.

Research progress and development trend of cross season heat storage technology

ZHANG Jie^{1,2}, NIU Chen¹

1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Oil and Gas Equipment Technology Sichuan Province Science and Technology Resource Sharing Service Platform, Chengdu 610500, China

Abstract Cross-seasonal heat storage technology can effectively coordinate the mismatch between energy supply and demand in time and space, and use solar energy, air energy and other energy clean energy or industrial waste heat and building air conditioning waste heat as heat sources to realize the summer storage and winter use of energy, and provide a new technical route for building winter heating, coal to clean energy, and regional energy supply. This paper summarizes the classification and system working principle of cross-seasonal heat storage technology, compares the main technologies, lists relevant policies at the national and local levels, reviews the research status of cross-seasonal heat storage technology at home and abroad, and the patent development of this technology, and looks forward to the future development of cross-seasonal heat storage technology.

Keywords cross-seasonal heat storage; waste heat utilization; central heating; stored in summer and used in winter ●



(责任编辑 徐丽娇)