

## 《新能源与储能·新型储能技术》专栏

[编者按]实现碳达峰、碳中和是党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策。国家“双碳”战略为新能源发展带来了前所未有的机遇。储能作为推动和支撑新能源跨越式发展的关键技术,已成为实现“双碳”目标的迫切需求和国家战略性新兴产业。从本期开始,本刊推出《新能源与储能》专栏。

国家“十四五”新型储能发展实施方案指出,要“以稳中求进的思路推动新型储能高质量、规模化发展,为加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供有力支撑”。为此,本期《新能源与储能》专栏推出 4 篇文章,分别从“热储能技术”“氢能制储技术”“全钒液流电池储能技术”等方面研究了热能、电能、氢能的存储利用新技术。

### 本期专栏负责人简介:

1) 李传常,长沙理工大学能源与动力工程学院教授,主要从事新能源与储能领域的教学与科研工作。在 *Energy Conversion and Management*、*Energy*、*Renewable Energy*、*Journal of Energy Storage* 等主流期刊上发表论文 50 多篇,授权发明专利 10 余项,出版教材 4 部、专著 1 部,主持国家自然科学基金、湖南省重点研发计划等项目 10 余项,获省部级科技奖励 4 项。

2) 任延杰,长沙理工大学能源与动力工程学院教授,主要从事燃料电池关键材料与技术、动力设备的腐蚀与防护等领域的教学与科研工作。在 *Journal of Power Sources*、*Corrosion Science* 等国内外刊物上发表论文 40 余篇,授权发明专利 8 项,主编及参编专著各 1 部,主持国家自然科学基金、湖南省自然科学基金等项目 10 余项,获省部级科技奖励 3 项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.001

文章编号:1672-9331(2022)03-0001-19

引用格式:李亚溪,李传常,白开皓,等.热储能技术及其工程应用[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):1-19.

Citation:LI Yaxi,LI Chuanchang,BAI Kaihao,et al. Thermal energy storage technologies and its engineering applications[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022,19(3):1-19.

# 热储能技术及其工程应用

李亚溪,李传常,白开皓,王欢

(长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**对热储能技术目前的发展现状及前景分别做了较全面的总结和分析。概述了热储能技术的原理、基本要求和特点;总结了热储能的关键技术,包括热储能材料物性优化技术、热储能传热强化技术、热储能材料制备技术以及热储能系统控制与优化技术;分析了热储能技术在电源侧、电网侧和用户侧的需求,并对其技术可行性和经济性进行了评估;最后,根据热储能技术应用场景的不同,总结了中高温热储能技术和低温热储能技术的工程应用,包括太阳能光热电站、电力调峰、工业余热回收、太阳能跨季节利用、冷链运输、储冷空调、冰箱冷藏以及人体/建筑智能调温。本文可为本领域后续研究工作的开展提供一定的参考。

**关键词:**热储能技术;热储能材料;系统优化;储热;储冷;工程应用

中图分类号:TK114

文献标志码:A

收稿日期:2022-06-14;修回日期:2022-08-10;接受日期:2022-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874047、51504041);湖南省重点研发计划(2022GK2048);湖南省湖湘青年英才支持计划(2020RC3038);长沙市杰出创新青年培养计划(kq1802007)

通信作者:李传常(1983-)(ORCID:0000-0001-5915-1119),男,教授,主要从事新能源与储能技术方面的研究。

E-mail:chuanchangli@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

## 0 引言

我国力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,而新型储能是实现碳达峰与碳中和目标的重要支撑,也是催生国内能源新业态、抢占国际战略新高地的重要领域<sup>[1-4]</sup>。热储能(thermal energy storage, TES)作为一种重要的新型储能技术,具有调控电能品质、移峰填谷、提高电能利用率的优点,对建设以绿色能源为主的新型能源结构以及实现“双碳”目标具有重要作用<sup>[5-7]</sup>。本文将从热储能技术的原理、特点、关键技术、需求分析、可行性、经济性以及其工程应用等方面进行总结,为本领域后续研究工作提供参考。

## 1 热储能技术概述

### 1.1 热储能技术的原理、基本要求及特点

#### 1.1.1 热储能技术的原理

热储能技术是指利用介质或储能装置将热(冷)能存储起来,并在有需求时将其释放出来。由于冷能是低于环境温度下的热能,所以后文统称这两种能为热能。热储能技术包括显热储热技术、潜热储热技术(又称相变储热技术)以及热化学储热技术。显热储热技术通过提高介质的温度但不发生相变来存储热能,其计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$Q = m \int_{T_L}^{T_H} c_p dT = mc_p (T_H - T_L) \quad (1)$$

式中:  $m$  为储热介质的质量, kg, 最常见的有水, 岩石等;  $c_p$  为储热介质的恒压比热容, J/(kg · K);  $T_H$  和  $T_L$  分别为使用过程中的最高温和最低温, K。该技术是目前热储能技术中最成熟的一种, 已有大规模工程实际应用。潜热储热技术利用介质在固体、液体或气体状态之间转换来吸收或放出热量, 其原理如图1所示, 计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$Q = m \int_{T_L}^{T_m} c_{ps} dT + m \Delta H_m + m \int_{T_m}^{T_H} c_{pl} dT \quad (2)$$

式中:  $T_m$  为储热介质的相变温度, K;  $c_{ps}$  和  $c_{pl}$  分别为储热介质固体和液体时的恒压比热容, J/(kg · K);  $\Delta H_m$  为储热介质的相变潜热, J/g。

热化学储热技术利用可逆化学反应过程来吸收或释放热能, 具体计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$Q = m\alpha\Delta H_r, \alpha < 1 \quad (3)$$

式中:  $m$  为储热介质的质量, kg;  $\alpha$  为转换率;  $\Delta H_r$  为反应热, J/g。

热化学储热技术的储热密度最大, 但是由于成本较高、安全性较低, 目前工程应用较少。

#### 1.1.2 热储能技术的基本要求

热储能技术主要包括以下几个基本要求: 在要求的温度范围内有相应的储热介质; 为了盛装储热介质, 必须有合适的容器; 具有高效的换热器, 该换热器能够实现热量在热源、储热介质和热用户之间的传递; 具有高储热密度, 使系统体积和质量保持最小; 要保证系统有足够高的安全性和稳定性; 热储能系统的装置要紧凑, 尽可能使系统的热损失保持最小<sup>[9-10]</sup>。

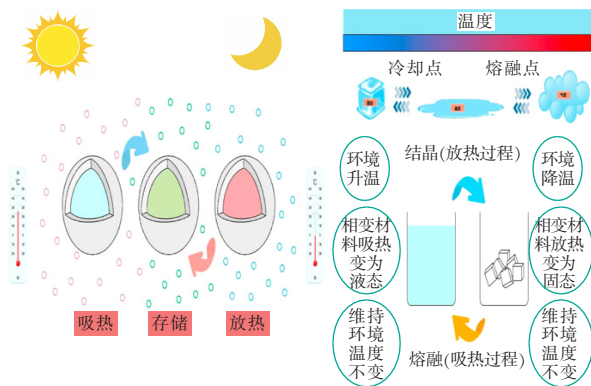


图1 潜热储热技术原理示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of latent heat storage technology<sup>[11]</sup>

#### 1.1.3 热储能技术的特点和优势<sup>[12]</sup>

- 1) 储能容量大、配置灵活、无特殊环境要求。
- 2) 具有规模化建设及运营成本的优势, 规模效应明显。
- 3) 可以实现多种能源品位冷、热、电、汽联供, 满足用户多类型用能需求。
- 4) 可对区域电网实现削峰填谷、双向调节、消纳间歇性新能源装机出力。
- 5) 循环稳定性好、寿命长, 且储能电站的双向调节功能不会因长时间储热循环而导致效率降低。
- 6) 技术参数及过程可控, 系统安全性高。

## 1.2 鼓励热储能发展的相关政策

随着国家支持储能发展的政策陆续出台, 热储能技术得到了快速的发展。《“十四五”新型储能发展实施方案》中明确要求“十四五”开展热(冷)储能等关键核心技术、装备和集成优化设计。

此外,国家发改委提出加大峰谷电价差的重要决策,各个省级部门也做出积极响应,陆续出台了强制配储政策和储能补贴政策<sup>[13-14]</sup>。

此外,全球用户终端需求中,热能占总能耗的一半,全球能源预算中 90% 的能源也是围绕热能的转换、传输和存储进行的,热能是重要的中间产物和副产物,大量的热能可以被二次利用。因此,热储能技术与我国的经济发展和居民生活息息相关,在当前全球进行能源革命的大背景下扮演着不可或缺的重要角色<sup>[15-17]</sup>。

1.3 热储能关键技术

在热储能技术中,相变储热技术相较于显热储热技术,在储热密度、储热容量等方面具备十分显著的优势;由于不涉及化学反应,在安全性方面也显著优于热化学储热技术,除此之外,相变储热技术在热能储存和释放过程中,能够维持恒定的温度。因此,相变储热技术已经成为诸多储能领域科研工作者的重点研究对象之一,其中,关于其物性优化技术是当下研究的重点,本节将着重介绍相变储热材料的物性优化技术。此外,相关学者对热储能系统传热强化技术、热储能材料制备技术以及热储能系统控制与优化技术等关键技术也开展了大量研究并取得了一定的成果。

1.3.1 热储能材料物性优化技术

相变温度是热储能材料最基本的性能参数,它的高低决定其应用场景,即高温、中温及低温应用领域。利用低共熔原理将不同熔点的相变材料(phase change material, PCM)在一定温度下熔融共混,冷却结晶后得到的共晶物具有比二者更低的相变温度,共晶温度计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$T_m = 1 / (\frac{1}{T_{mi}} - \frac{R \ln X_i}{H_{mi}})$$
 (4)

式中:  $T_m$  为多元共晶物的理论共晶温度, K;  $T_{mi}$  为多元共晶物中任意一种组分  $i$  的相变温度, K;  $R$  为气体常数,为 8.314 J/(mol · K);  $H_{mi}$  为多元共晶物中任意一种组分  $i$  的相变潜热, J/g;  $X_i$  为多元共晶物中任意一种组分  $i$  的摩尔分数。

李妍<sup>[18]</sup>对一系列有机物进行两两复配,相变温度最低可以降低至 1.62 °C 且保持较高的相变潜热。王俊霞<sup>[19]</sup>将十六醇和十八醇熔融共混得到了相变温度为 47.89 °C 的十六醇—十八醇共晶物,相比于纯十六醇和十八醇,其相变温度出现了大幅度的下降,可用于不同温度需求的保温包装中。此外,加入一些无机盐到体系中,通过改变分子间内部结构也能实现相变温度的调控。图 2 所示为盐类对水合盐相变温度的调控机理。LIN 等<sup>[20]</sup>通过加入氯化铵、氯化钾来降低十水硫酸钠的相变温度,最终将其相变温度从 35 °C 左右降至了 2~8 °C。CHEN 等<sup>[5]</sup>探讨了硝酸钾和硝酸钠对三水合硝酸锂相变温度的影响,在二者的影响下其相变温度降低了 8 °C 左右。

相变潜热是热储能材料的另一个重要性能,封装相变材料、添加微量纳米粒子和有机—无机复合等技术均可以提高热储能体系的相变潜热。WU 等<sup>[21]</sup>研究了三种不同孔径的二氧化硅吸附相同比例的水合盐时的潜热变化,如图 3 (a) 所示,发现增大载体孔隙尺寸会提升水合盐的相变潜热。HUANG 等<sup>[22]</sup>发现氧化石墨烯(graphene oxide, GO)表面富含羧基和羟基,其能够与结晶水形成氢键,而通过氢键的作用可以减少结晶水的损失。试验结果表明,0.3% 的 GO 使体系的潜热从 167 J/g 增加到了 229 J/g。LI 等<sup>[23]</sup>采用六水合硝酸镁(magnesium nitrate hexahydrate, MNH)和戊二

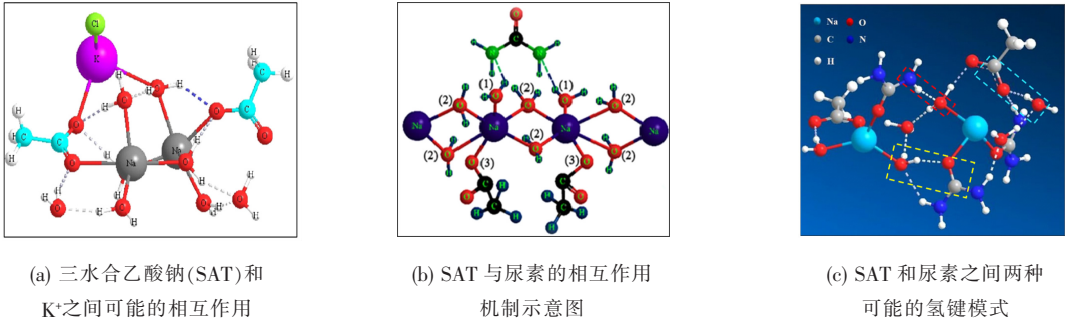


图 2 无机盐对水合盐相变温度的调控原理图<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the regulation of inorganic salts on the phase transition temperature of hydrated salts<sup>[2]</sup>



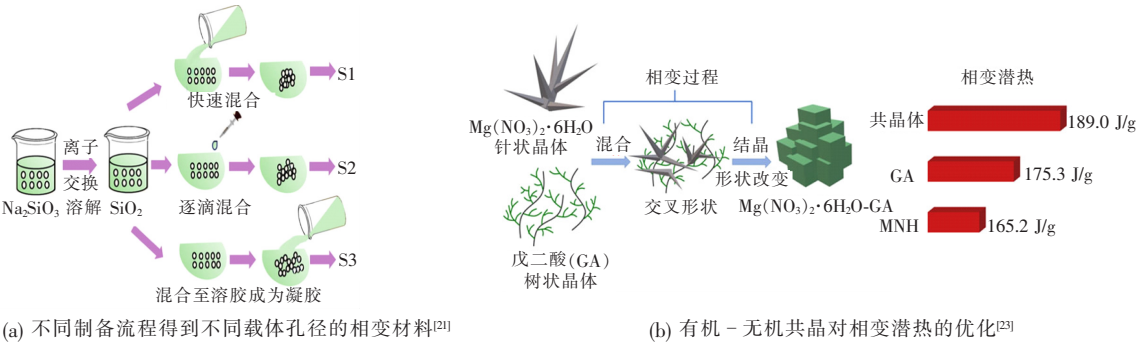


图 3 增大载体孔径和改变有机-无机共晶的方式提升水合盐相变潜热的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of enhancing the latent heat of hydrated salt phase transition by increasing the pore size of the carrier and changing the organic-inorganic eutectic mode

酸(glutaric acid,GA)制备有机-无机共晶体系,如图 3(b)所示,这两种成分的晶体相互点缀,与 GA(175.3 J/g)和 MNH(165.2 J/g)相比,共晶混合物的潜热增加到了 189.0 J/g。

过冷和相分离现象是无机类热储能材料最常见的问题,会恶化材料的循环稳定性。图 4(a)汇总了几种解决过冷现象的技术。目前,外加成核剂诱发非均匀成核是抑制过冷现象最常用且有效的方法。解决相分离最有效的方法为添加增稠剂,利用其三维网络空间结构锚定相变材料,如图 4(b)所示。

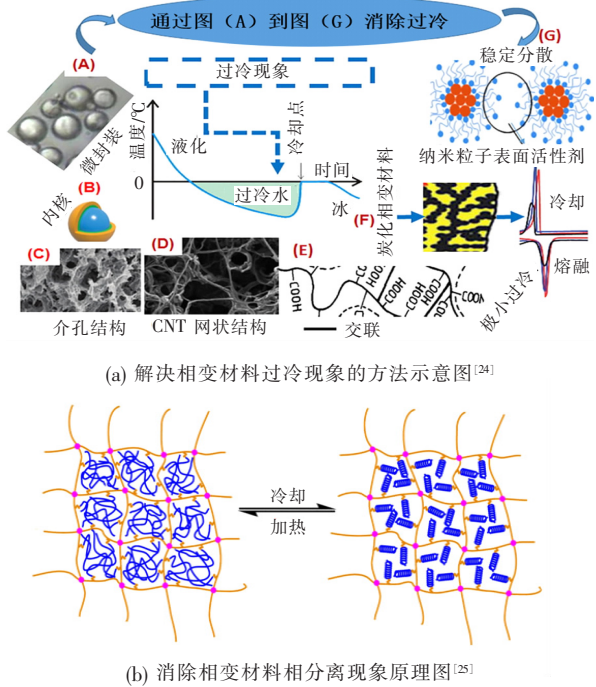


图 4 改善相变材料过冷和相分离现象的技术原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the technical principle of improving the supercooling and phase separation phenomenon of phase change materials

XIE 等<sup>[26]</sup>开发了一种新型三元共晶盐,添加质量分数为 1%的硼砂将共晶盐溶液过冷度降低至 1.84 ℃。LIU 等<sup>[27]</sup>制备了一种纳米管改性水合盐/聚丙烯酸钠的定型复合相变材料,当聚丙烯酸钠在整个复合体系中的质量分数为 7%时,该复合相变材料在相变过程中未发生相分离现象,同时,过冷现象在纳米管的作用下得以改善。LIN 等<sup>[28]</sup>分别加入质量分数为 3%的硼砂和质量分数为 3%的羧甲基纤维素钠来改善十水硫酸钠的过冷和相分离现象,结果表明,最终制备的相变储冷材料过冷度几乎为零,而且相分离现象也完全消失。

1.3.2 热储能传热强化技术

传热强化一般从相变材料本身和系统两个角度出发,具体包括:添加高导热材料以提高其热导率;在相变换热器内设置翅片、热管等以增大相变材料和传热流体(heat transfer fluid,HTF)的换热面积;配置梯级相变储热体系以增大相变材料与传热流体的传热温差等方法<sup>[29-30]</sup>。常见的高导热材料有膨胀石墨、石墨烯纳米片、碳纳米管、金属纳米粒子等。图 5 为用两种高导热材料提升相变材料导热性能的示意图。蒯子函等<sup>[31]</sup>以膨胀石墨为高导热多孔基质,当添加质量分数为 28%的膨胀石墨时,样品的水平热导率提高了 74 倍。徐新<sup>[32]</sup>通过高频超声共混法制备聚乙二醇/白炭黑复合相变储热材料,白炭黑的加入能够增大其导热系数,该储热材料具有显著的储热调温作用,可作为一种绿色高效材料应用到建筑节能领域。

增大 HTF 与相变材料间的换热温差可以显

著提高相变材料的储/放热效率。为了提高二者之间的换热温差,梯级相变技术被成功地应用到了该换热体系。梯级相变技术将不同相变温区和相变潜热的相变材料按照一定的梯度排列,最终形成一种梯级复合相变材料。这种技术的优势是相变材料和传热流体之间的传热温差能基本保持恒定,提高系统整体的换热效率。最后,增大相变材料与换热器结构的换热面积也可以强化传热,常用的方法有:换热器内部加装翅片、应用三管换热器、换热器内部加装热管等,如图 6 所示。

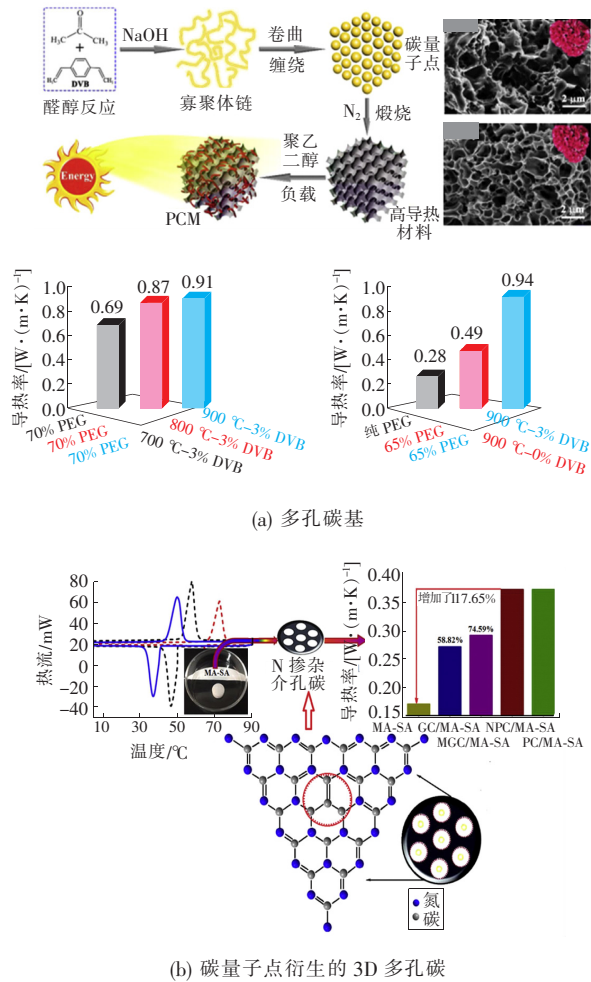


图 5 用两种高导热材料提升相变材料导热性能的示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 5 Schematic illustration of using two high thermal conductivity materials to enhance the thermal conductivity of a phase change material<sup>[33]</sup>

1.3.3 热储能材料制备技术

图 7 所示为目前最常见的三种热储能材料制备技术,即凝胶化、微胶囊化和多孔载体复合化。

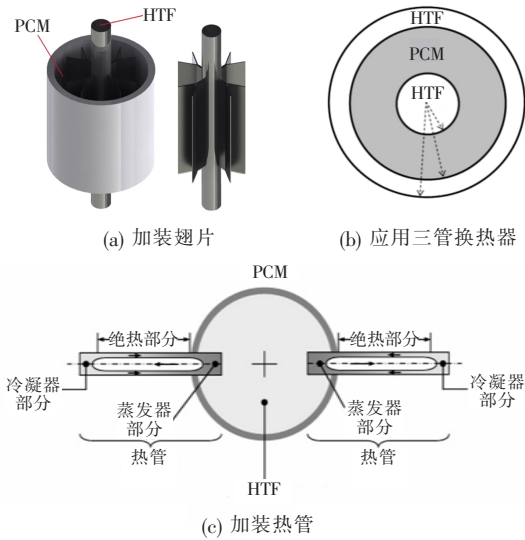


图 6 强化热储能系统传热的方法<sup>[34-36]</sup>

Fig. 6 Methods to enhance heat transfer in thermal energy storage systems<sup>[34-36]</sup>

其中,微胶囊化热储能材料制备流程复杂、成本高,在短期内难以实现商业化,而多孔载体复合化热储能材料储能密度普遍偏低。目前最具发展潜力的一种新型热储能材料为相变凝胶,它具有形状可塑性和灵活性、相变时不会发生泄漏的优点以及具有良好的循环稳定性,已经引起了相关研究者的密切关注。

单少飞等<sup>[37]</sup>制备了一种高效相变凝胶,并研究了海藻酸钠和羧甲基纤维素对甘露醇相变行为的影响,发现成核剂在体系中具有均匀分布性,因而促进了成核剂的诱导成核作用。郑涛杰等<sup>[38]</sup>发现加入质量分数为 1% 的海藻酸钠后,Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O 体系被凝胶化,而且保持着较大的相变潜热,在 20 次热循环后相变潜热维持在 208 J/g。LIU 等<sup>[39]</sup>将共晶水合盐分别浸入膨胀石墨和氧化膨胀石墨中,制备了两种形态稳定的复合相变材料,结果表明,添加氧化膨胀石墨的复合材料包含丰富的含氧基团,其表面存在缺陷,具有高导热系数和较低的过冷度。FU 等<sup>[40]</sup>开发了一种用于调控地板温度的三醋酸钠—尿素复合相变材料,并加入二氧化硅进一步提升其形状稳定性、热可靠性和导热性。FU 等<sup>[41]</sup>在水乳化体系中通过界面聚合成功合成了一种以五水硫代硫酸钠为核心、高分子聚合物为壳体的新型微胶囊相变材料。壳

体材料的保护作用提高了微胶囊的热稳定性。FANG 等<sup>[42]</sup>采用单罐法合成了含二氧化硅涂层的

的  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  新型微胶囊相变材料,其表现出了较低的过冷度和良好的热稳定性。

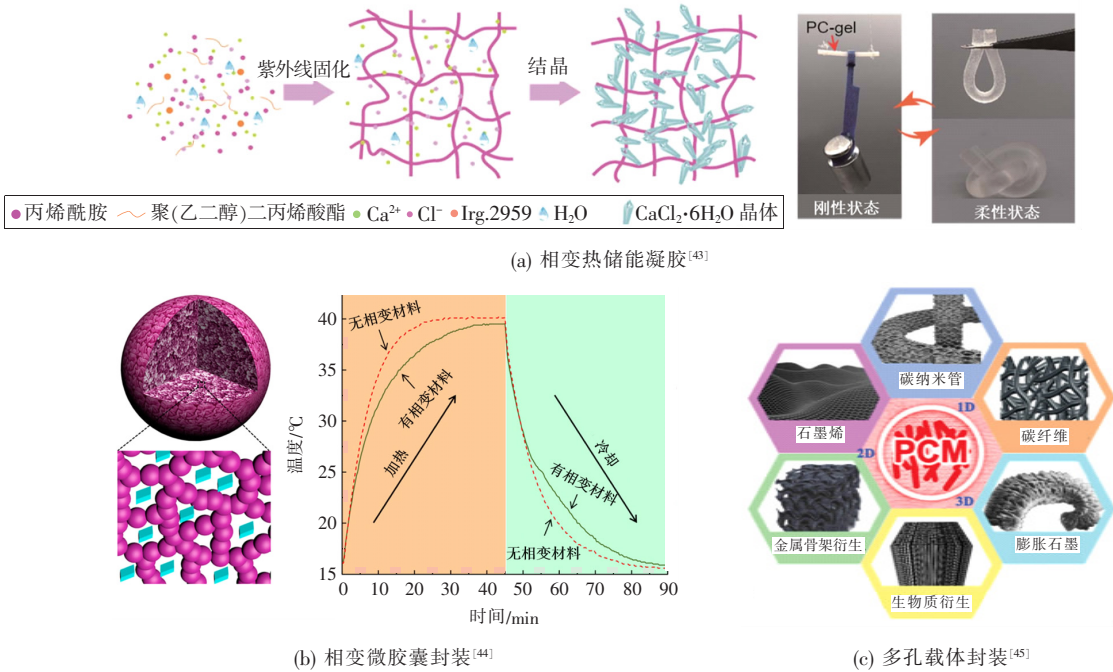


图 7 三种最常见的热储能材料制备技术

Fig. 7 Three of the most common thermal energy storage material preparation technologies

1.3.4 热储能系统控制与优化技术

在系统控制与优化方面,研究人员开展了热储能技术应用于太阳能热发电、火电调峰、风电消纳、分布式能源系统等领域的能源系统设计、参数优化和运行调控策略等方面的研究<sup>[46]</sup>。李定一<sup>[47]</sup>利用系统仿真模型对太阳能发电系统进行了控制策略以及能量管理的研究,发现添加减温器可以提高系统的储热能力。时铭序<sup>[48]</sup>针对蓄热模式高温熔融盐罐中的熔融盐温度控制环节,设计了两种控制策略,其中,自适应模糊控制策略具有较明显的优势,可以有效控制罐中熔融盐的温度。刘纯<sup>[49]</sup>分析比较了集中集热储热系统与集中集热分户储热系统两种集中式太阳能系统的优势和劣势,着重阐述了集中集热分户热储能系统的选型设计及其储热水罐的设置与控制。张涵等<sup>[50]</sup>探究了热泵储电系统循环稳定状态下的瞬态行为,提出了热泵储电、卡诺电池等热能—电能和冷能—电能的新型储能系统。贺明飞等<sup>[51]</sup>在保障太阳能集热场效率的前提下,研究了大容量、长周期、跨季节储热以及斜温层控制等技术。

2 热储能技术需求及可行性与经济性分析

2.1 热储能技术需求分析

热储能技术对能源结构转型具有重要意义,支持热储能产业的发展有利于我国构建健康的能源产出与消费体系。目前,热储能技术在能源使用的各个环节都有着广泛的应用需求,在电源侧、电网侧以及用户侧都得到了广泛的应用<sup>[52]</sup>。

2.1.1 热储能技术在电源侧需求分析

随着全球能源结构的大幅转型,未来的风电、光伏产业在电力系统中将会迎来爆发式的增长。大规模新型能源在发电并网时,其不稳定性导致电网无法完全消纳新型能源,从而造成能源利用效率低下。热储能技术在电源侧的应用可以解决如下问题:

- 1) 利用大规模热储能“移峰填谷”,实现能源与负荷在时间和空间上的转移。
- 2) 将剩余的低品位热量储存起来用于预热介质或系统,实现能量的多级利用。
- 3) 与发电系统中的高温设备耦合,可以防止设



备超温运行,提高其发电效率,延长其使用寿命。

### 2.1.2 热储能技术在电网侧需求分析

随着我国工业发展及居民生活水平的提高,庞大的用电量使得电网负荷复杂化,进而引发了电网的电能品质下降以及电能传输受阻等问题。热储能技术在电网侧的应用可以达到以下效果:

1) 缓解升级输电网线路带来的高额投资,提高关键输电网的输送容量。

2) 为电网提供调频、调峰和电能质量治理等辅助服务。

### 2.1.3 热储能技术在用户侧需求分析

热储能技术在用户侧主要用于峰谷电价差套利、保证用户供电可靠性和稳定性、提高分布式能源就地消纳、居民区集中供热等方面。具体如下:

1) 在分时电价的电力市场背景下,对居民用电进行分时电价管理,降低整体用电成本。

2) 用电高峰期极易发生电网超负荷运行,热储能技术的应用可以提高居民区供电的稳定性。

3) 提高分布式能源的就地消纳能力,低品位的热量可以被居民区充分利用。

## 2.2 热储能技术可行性分析

热储能技术的可行性具体表现为以下几个方面:

1) 热储能材料多元且来源广泛,成本低廉,足以实现热储能技术的持续发展。

2) 系统兼容性强,生产设备投入少,工艺流程简单,成本容易控制。

3) 热储能技术的引进能够实现热量的多级利用,废热可以被充分利用。

4) 热储能技术可以与多种系统进行耦合,能够进一步降低运营成本。

### 2.3 热储能技术经济性分析

热储能技术能否市场化取决于很多因素,其中经济性是一个必要的考虑因素。对于显热储热技术,其投资成本主要来自系统装置和维护费用等,并且单位投资成本会随着储热容量的增大而显著下降。相变储热和热化学储热相比于显热储热,其成本显著提高。相变储热技术目前处于商业化初期,当前在中国的初始投资成本约为 350~400 元/(kW·h)。而热化学储热技术目前仍处于研究阶段,设备造价和维护成本高。与初始投资

成本相比,所有热储能技术的运营成本都相对较低,相关专家评估了多种跨季节储热项目,认为这些项目的运行成本约为总投资成本的 0.25%,维护成本则约为 1%<sup>[17]</sup>。因此,热储能系统虽然初始投资成本较高,但是其运营和维护成本很低,整体的经济性非常好。

## 3 热储能技术工程应用

### 3.1 中高温热储能技术工程应用

#### 3.1.1 太阳能光热电站

太阳能光热发电技术的基本原理:通过聚光装置产生高热密度的太阳能来加热流体,再由热流体把热能输送到发电系统发电,从而实现“光—热—电”的能量转化过程<sup>[53]</sup>,其聚光装置主要分为菲涅尔式、塔式、蝶式和槽式四类,如图 8 所示。

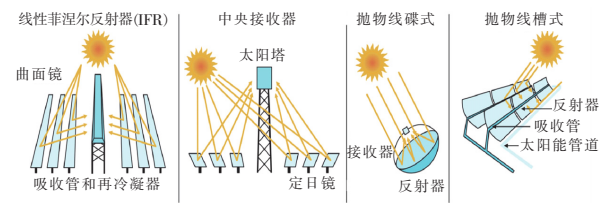


图 8 太阳能光热电站技术<sup>[54]</sup>

Fig. 8 Solar thermal power plant technology<sup>[54]</sup>

FERNANDEZ 等<sup>[55]</sup>研究了太阳能光热电站聚光技术的发展趋势,并分析了太阳能聚光技术的成本。HE 等<sup>[56]</sup>分析了当前太阳能光热技术的现状和趋势,并提出了高温( $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )光热发电所面临的问题以及相应的解决方案。GOYAL 等<sup>[57]</sup>总结了全球太阳能光热电站所使用的技术,研究了目前主流的聚光技术以及未来发展趋势。太阳能光热电站共有三代技术,第一代太阳能光热电站没有集成储热系统,缺乏与传统电站和其他可再生能源电站的竞争力;第二代太阳能光热电站在第一代的基础上集成了储热系统,是目前最先进、最具代表性的技术。图 9 (a)和图 9 (b)为常见的第二代太阳能光热电站布局图,其中抛物线槽式为最成熟的技术<sup>[57]</sup>,而塔式太阳能光热电站最高运行温度为  $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比槽式太阳能电站的高(最高温度  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),因而具有更高的动力循环热电转化效率<sup>[54]</sup>。第三代太阳能光热技术着眼于突破受

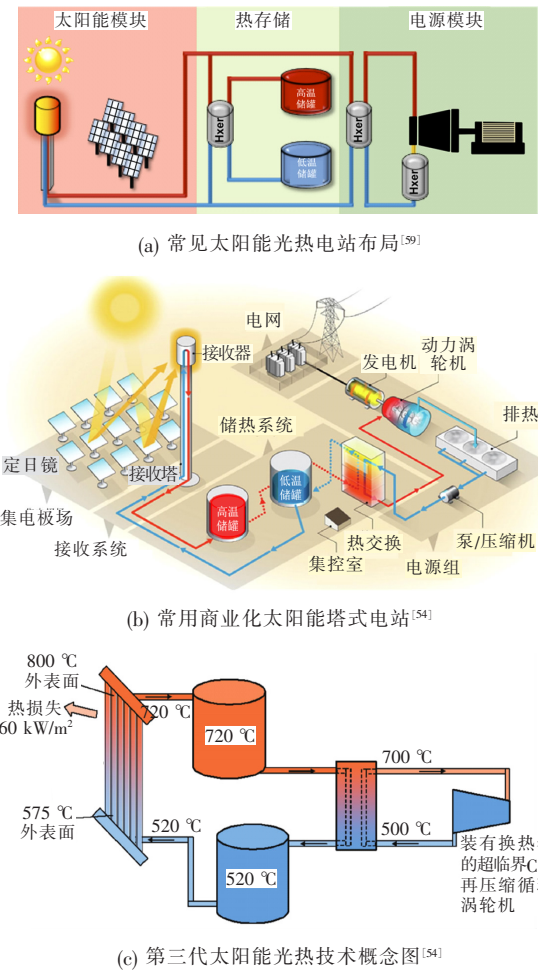


图 9 太阳能光热电站布局图

Fig. 9 Layout of common solar thermal power plants

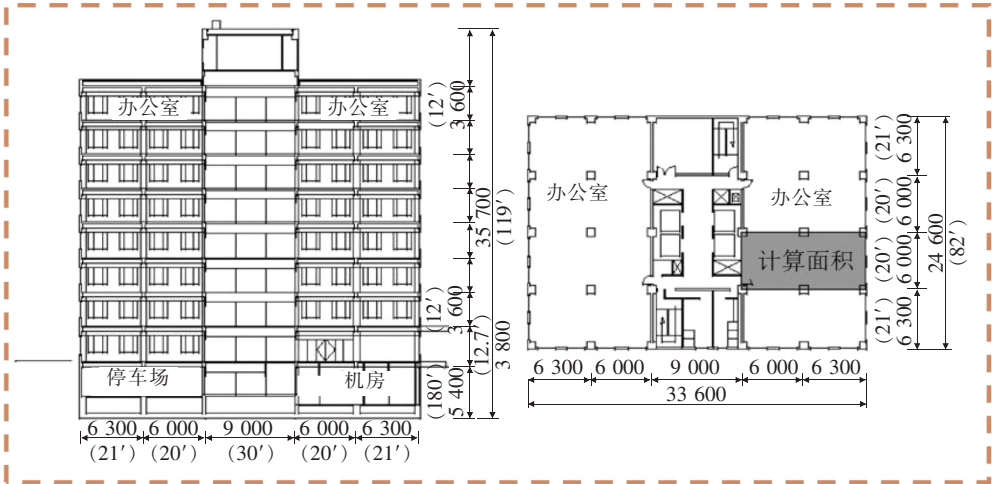
限温度,实现高温运行太阳能光热技术,并且提高效率 and 降低成本,目前主要研究方向为无机盐的相变储热技术<sup>[58]</sup>和固体颗粒技术<sup>[59]</sup>等。图9(c)

为 NREL 提出的基于新型熔盐储热材料的第三代太阳能光热技术概念图,该技术将熔盐储热/导热系统(运行温度为 520~720 ℃)与超临界二氧化碳布雷顿动力循环(运行温度为 500~700 ℃)相结合,拥有超过 50% 的热电转换效率和更低的成本<sup>[54]</sup>。

3.1.2 电力调峰

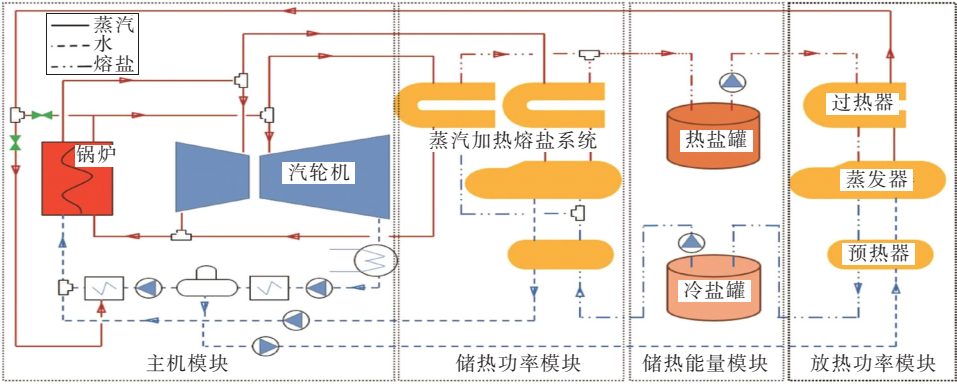
热储能技术可以将机组变负荷运行时出现的过剩蒸汽热量存储起来,当需要时将热能释放来增加机组灵活性,从而实现电力调峰<sup>[60]</sup>。在火电厂中,当电力负荷处于低谷时,减小锅炉负荷和汽轮机出力,满足机组低负荷调峰要求,供热不足的部分由储热设备补充;当电力负荷处于高峰时,增加锅炉负荷,减少汽轮机对外供热,增强机组的顶负荷能力,供热不足的部分由储热设备补充,热储能相当于将固定的供热需求转化为可变的供热需求,拓展了热电厂调峰运行范围。

YAMAHA 等<sup>[61]</sup>提出将石蜡作为储冷介质安装于暖通空调的空气回路中,进行建筑制冷并模拟运行,实现在炎热午后电力的调峰作用,如图 10(a)所示。李峻等<sup>[62]</sup>提出了将高温熔盐储热技术引入火电厂的改造技术方案,提高火电厂深度调峰能力,如图 10(b)所示。热储能技术在调峰工程上已有初步应用,如天津 SM 城市广场清洁供暖项目,该项目使用相变储热罐与电锅炉耦合的技术,日均供热量可达 150.48 MW·h,储热系统效率可达 92.82%,在实现当地电网负荷“移峰填谷”方面有着重要作用。



(a) 建筑制冷调峰模拟试验图<sup>[61]</sup>





(b) 将高温熔盐储热技术引入火电厂的灵活改造方案<sup>[62]</sup>

图 10 热储能技术的电力调峰

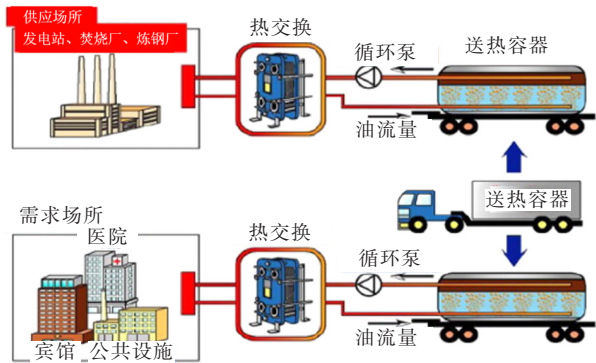
Fig. 10 The thermal energy storage technology for power peak regulation

3.1.3 工业余热回收

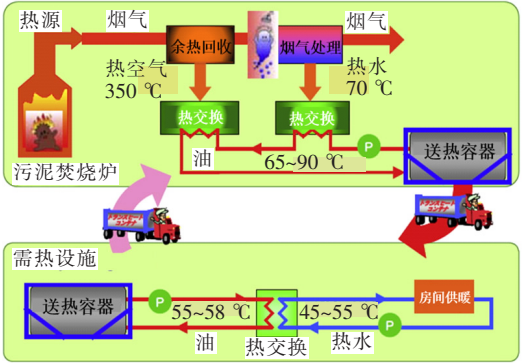
工业余热是继煤、石油、天然气、水力之后的第五大常规能源<sup>[63]</sup>。在实际应用中,工业和热需求地点可能位于同一区域,此时会考虑就地部署热储能系统;当出现地域不匹配时,会使用移动热储能技术将工业余热供往异地,以实现余热的消纳,如图 11 (a)所示。

MA 等<sup>[64]</sup>总结了远距离热储能技术发展现状,讨论了热储能技术在工业余热回收利用中的

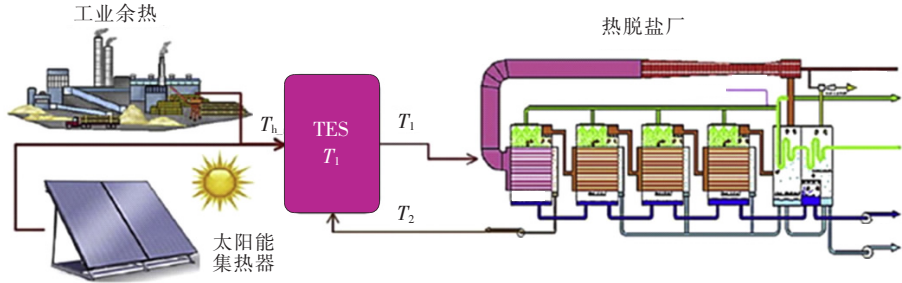
价值。MIRÓ<sup>[65]</sup>等研究了 2~50 km 的移动式热储能工业余热回收技术。GUO 等<sup>[66]</sup>总结了移动式热储能系统在工业余热回收中使用的材料和容器等,对其进行了经济评估,并分析了当前商业化所面临的问题和未来的发展趋势。日本东京都政府污水局开发了一种基于移动热储能技术的余热回收利用系统,该系统从污泥焚烧炉中回收余热供给异地的体育馆,能有效减少 71%~93% 的 CO<sub>2</sub> 排放量,如图 11 (b)所示。



(a) 工业余热回收系统:远距离热储能<sup>[64]</sup>



(b) 工业余热回收热储能系统:移动式热储能<sup>[65]</sup>



(c) 太阳能集热与工业余热供电的海水淡化系统<sup>[67]</sup>

图 11 热储能技术应用于工业余热回收的原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the application of thermal energy storage technology to industrial waste heat recovery

除此之外,利用热储能技术还可以将余热回收后用于其他工业项目,例如图 11 (c)所示的海水淡化也是热储能技术利用工业余热的方式之一。

3.1.4 太阳能跨季节利用

储存夏季充沛的太阳能来填补冬季供热的不足即为太阳能跨季节利用,但季节性热储能由于储存时间长,热损失会更加明显,在技术上更具挑战性<sup>[68]</sup>。目前主要包括水箱<sup>[69]</sup>、岩床<sup>[70]</sup>等存储方式。图 12(a)所示为德国第一个季节性热储能供热厂,通过 1 000 m<sup>2</sup> 的太阳能集热器为 108 套公寓提供生活热水和建筑供暖<sup>[71]</sup>。BENLI<sup>[72]</sup> 研制了带有地源热泵的相变储热装置为 30 m<sup>2</sup> 玻璃温室加热,验证了储热系统在温室热量合理分布中的重要作用,如图 12(b)所示。LI 等<sup>[73]</sup> 提出了如图 12(c)所示的

双模式热化学吸附储能系统,该系统在夏季充电,并将电能以化学键形式存储,在冬季高温和低温时进行两种模式的放电,具有非常可观的应用价值。

3.2 低温热储能工程应用

3.2.1 冷链运输

冷链运输是指为了保持产品的品质,从生产到消费的过程中,始终使其处于恒定低温状态的供应链体系,其完整的流程体系如图 13(a)所示。在运输过程中,产品的品质和质量是冷链物流关注的重点,这是因为生鲜产品在储存、运输、销售等环节由于冷库数量不足以及入库等待时间过长易出现“断链”现象<sup>[74]</sup>。对于冷链运输的研究,将低温热储能技术应用于冷藏车上将是一个发展趋势,图 13(b)所示为一种具有储冷功能的冷藏车。

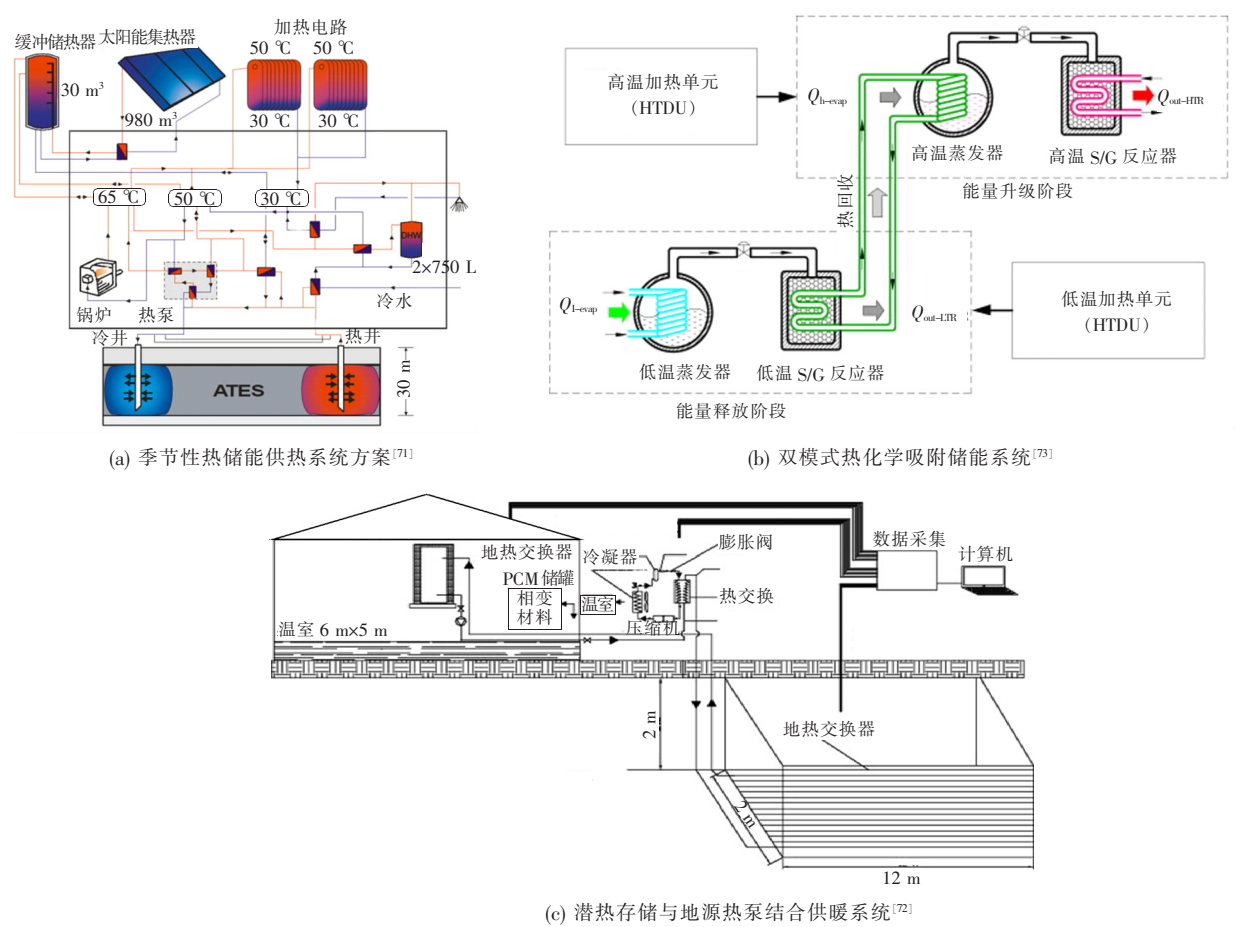


图 12 利用热储能技术实现太阳能跨季节利用的示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the use of thermal energy storage technology to realize the utilization of solar energy across seasons

李晓燕等<sup>[75]</sup>研发了一种新型相变储冷材料,并将其应用在冷链运输上,有效避免了制冷机组

在运输过程中的不稳定因素。李靖等<sup>[76]</sup>研制出了一种无毒低温相变材料,显著降低了冷链运输后

期的运营成本。杨颖等<sup>[77]</sup>验证了自主研发的储冷材料的热循环稳定性,为其市场化的推进奠定了基础。朱志强等<sup>[78]</sup>指出纳米材料能够提升介质的储/释冷特性和热物理特性,其完全符合冷链运输过程中的特性需求。目前,冷链运输正在朝着 5G

智能信息化方向发展,如图 13(c)所示。从生产者到消费者的整个冷链运输系统,产品的详细信息都被全程实时监控,进一步减少了产品的损失率,提高了冷链运输的整体效率。

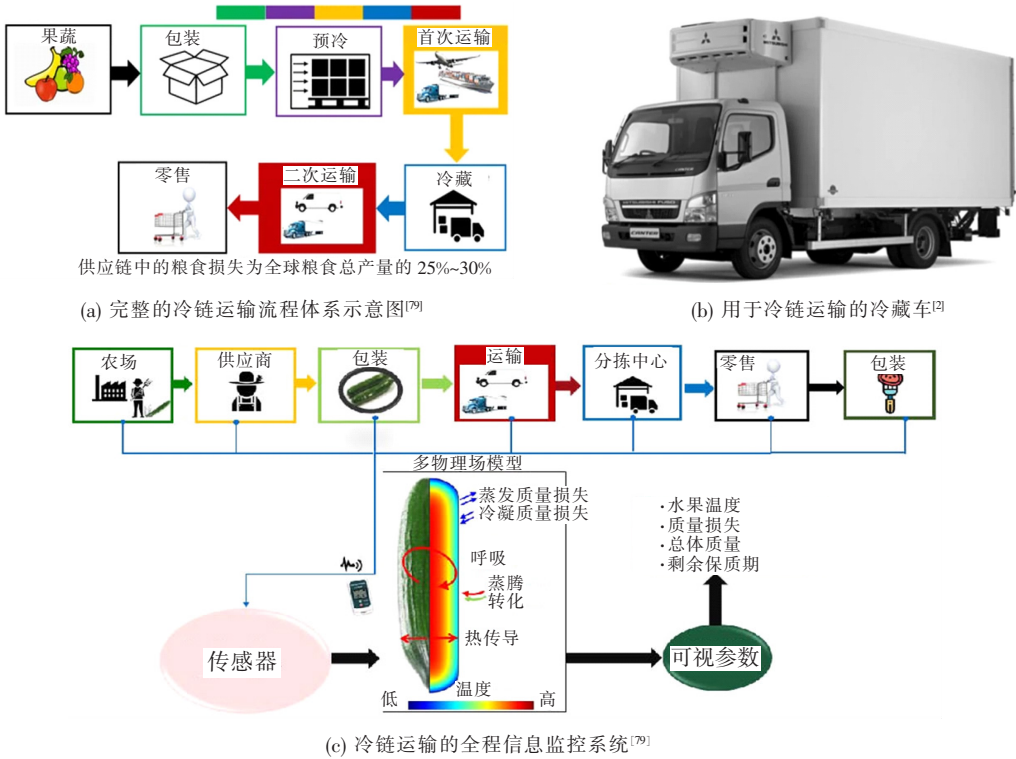


图 13 冷链运输流程体系以及智慧冷链的示意图

Fig. 13 Schematic diagram of cold chain transportation process system and smart cold chain

3.2.2 储冷空调

图 14 所示为几种常见的用于空调的储冷装置,该装置通常与蒸发器和换热器并联连接。采用热储能技术具有以下优点:起到峰值负荷转移的作用;降低制冷设备和配电的容量;降低运行成本和延长系统寿命。

SHE 等<sup>[80]</sup>总结了低温热储能技术的两种常用方法:水储冷和冰储冷。在冷冻水储冷系统中,使用恒定的水源来储存对应的冷量。冰储存是另一种储冷形式,冰在非高峰时段产生,并在高峰时段融化以提供冷能量。通过这种方法,冉彤<sup>[81]</sup>分析了某机场冰储冷空调系统的性能。研究发现,冰储冷降低了机场 14.02% 的运行成本以及 8.11% 的能耗成本。SANAYE 等<sup>[82]</sup>发现储冷系统运行模式下空调的用电量最高下降了 11.83%,电费最高节约了 32.65%。对于水储冷,史杰

等<sup>[83]</sup>对浦东机场 1 号能源中心的水储冷系统的运行控制进行分析,结果显示采用水储冷系统降低了 51.3% 的电费成本。

3.2.3 冰箱冷藏

冷藏技术根据导热介质与相变材料之间是否存在接触,可分为直接接触型和间接接触型。图 15 所示为间接接触型冷藏技术,该技术在管道内部填充了储冷球,有利于冷量的均匀扩散,优化了冷量的传递过程,低温热储能技术的引进可以提高冰箱的利用效率和节约用电成本<sup>[85]</sup>。

刘杰<sup>[86]</sup>对纳米复合储能材料与冰箱结合利用的可行性进行了分析,结果显示两者的结合缓解了传统冷藏冰箱的压缩机制冷功率过剩和能源浪费的情况。夏全刚<sup>[87]</sup>将一定配比的复合相变储冷材料与箱体结合制作了高效的储冷箱体,该方法有效地延长了低温冷藏时间。汤黎明等<sup>[88]</sup>采用半导体



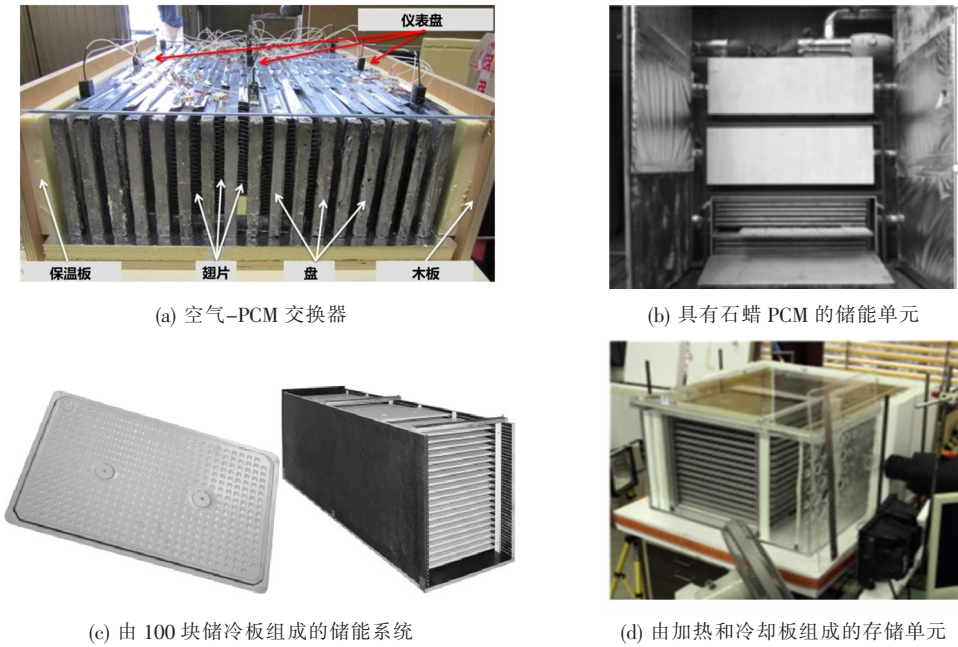


图 14 几种常见的用于空调的储冷装置<sup>[84]</sup>

Fig. 14 Several common cold storage devices for air conditioners<sup>[84]</sup>

制冷器件和低温热储能材料分别作为制冷和储冷手段,延长了冷藏箱的保温时间,进而提高了医药冷链运输的冷藏效果。AZZOUZ 等<sup>[89]</sup>提出了一个动态模型并用其验证储冷冰箱的特性,此外将储冷材料涂敷到冰箱冷却管的外表面,也能提高冰箱的冷却效率。

储冷系统和具有高级控制单元的机械通风系统完成。ARKAR 等<sup>[92]</sup>认为通过集成在机械通风系统中的相变储冷单元对建筑物进行自然冷却,可实现适当的热舒适性。ZALBA 等<sup>[93]</sup>提出了一种板式相变储冷自然冷却系统,该系统可以满足 75% 的冷却要求,消耗成本不到传统空调制冷成本的一半。

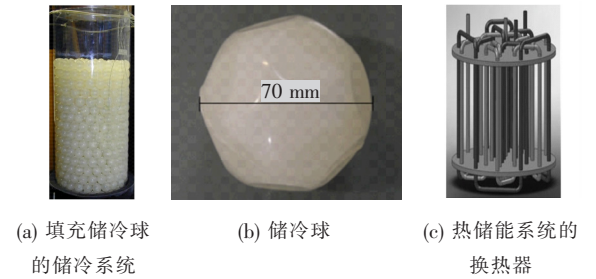


图 15 用于冰箱的间接接触型冷藏技术<sup>[90-91]</sup>

Fig. 15 Indirect contact refrigeration technology for refrigerators<sup>[90-91]</sup>

3.2.4 人体/建筑智能调温

低温热储能材料制成的亲肤性凝胶可以与人体肌肤直接接触以达到降低体温的目的,也可以与纺织物复合起来,用于调控酷暑环境下工作人员的体温。此外,低温热储能系统将夜间储存的自然冷量在需要的时候释放出来加以利用,实现了建筑室内温度的智能调控,如图 16 所示。

MEDVED 等<sup>[91]</sup>研究了一种机械通风系统,有了该系统后,建筑物的自然冷却由集成式相变

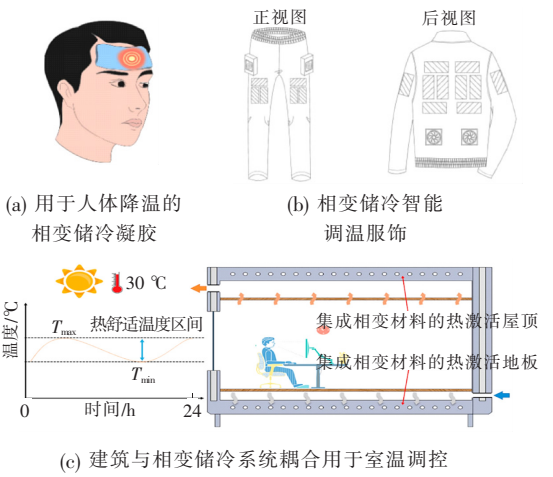


图 16 相变储冷技术在人体和建筑调温中的应用示意图<sup>[2, 94]</sup>

Fig. 16 Schematic diagram of the application of phase change cold storage technology in human body and building temperature regulation<sup>[2, 94]</sup>

4 结论与展望

热储能作为新型储能技术,是实现碳达峰和

碳中和目标的重要支撑之一。但是目前该技术尚存在一些技术瓶颈,如储热材料稳定性差、使用寿命短,有机相变材料成本高、安全性低,系统设备初始造价高、成本回收期长等,此外,热储能系统热量释放时机的不可控也是限制其发展的主要因素。这些因素在很大程度上阻碍了热储能技术的广泛推广。

因此,热储能系统要尽量以来源广和成本低的材料为储热主体,并在此基础上开发能够优化其循环稳定性的技术。对于以有机相变材料为储热主体的热储能系统,还要充分考虑其易燃性等因素。在保证热储能系统安全性的前提下尽可能降低设备投资成本,并且开发相应的能量管理系统以实现热量的合理分配。

若这些问题得以解决,热储能技术将会在更多的领域推广,进而实现技术的商业化和市场化,并且在构建清洁低碳、安全高效的能源体系、开发以新能源为主体的新型电力系统、保障电力系统安全稳定运行等方面发挥重要作用。

### [参考文献]

- [1] BAI K H, LI C C, XIE B S, et al. Emerging PEG/VO<sub>2</sub> dual phase change materials for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 239: 111686. DOI: 10. 1016/j. solmat. 2022. 111686.
- [2] LI Y X, LI C C, LIN N Z, et al. Review on tailored phase change behavior of hydrated salt as phase change materials for energy storage[J]. *Materials Today Energy*, 2021, 22: 100866. DOI: 10. 1016/j. mtener. 2021. 100866.
- [3] WU J Y, HSIAO H I. Food quality and safety risk diagnosis in the food cold chain through failure mode and effect analysis[J]. *Food Control*, 2021, 120: 107501. DOI: 10. 1016/j. foodcont. 2020. 107501.
- [4] ZHANG G Q, LUO D M, DENG C H, et al. Simultaneous extraction of vanadium and titanium from vanadium slag using ammonium sulfate roasting-leaching process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 742: 504-511. DOI: 10. 1016/j. jallcom. 2018. 01. 300.
- [5] CHEN W C, LIANG X H, WANG S F, et al. SiO<sub>2</sub> hydrophilic modification of expanded graphite to fabricate form-stable ternary nitrate composite room temperature phase change material for thermal energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 413: 127549. DOI: 10. 1016/j. cej. 2020. 127549.
- [6] REJI KR, SAMYKANO M, PANDEY A K, et al. A comparative study on thermophysical properties of functionalized and non-functionalized multi-walled carbon nano tubes (MWCNTs) enhanced salt hydrate phase change material[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 240: 111697. DOI: 10. 1016/j. solmat. 2022. 111697.
- [7] YU K Y, LIU Y S, YANG Y Z. Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: preparation, characterization and effect on the thermophysical properties[J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116845. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2021. 116845.
- [8] 李传常. 矿物基复合储热材料的制备与性能调控[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
LI Chuanchang. Preparation and property control of mineral-based composite thermal storage materials[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [9] ZHANG H L, BAEYENS J, CÁCERES G, et al. Thermal energy storage: recent developments and practical aspects[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 53: 1-40. DOI: 10. 1016/j. pecs. 2015. 10. 003.
- [10] KOUSKSOU T, BRUEL P, JAMIL A, et al. Energy storage: applications and challenges[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 59-80. DOI: 10. 1016/j. solmat. 2013. 08. 015.
- [11] YANG L, JIN X, ZHANG Y, et al. Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287: 124432. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2020. 124432.
- [12] 何雅玲. 热储能技术在能源革命中的重要作用[J]. *科技导报*, 2022, 40(4): 1-2.  
HE Yaling. The important role of thermal energy storage technology in the energy revolution[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(4): 1-2.
- [13] 何可欣, 马速良, 马壮, 等. 储能技术发展态势及政策环境分析[J]. *分布式能源*, 2021, 6(6): 45-52. DOI: 10. 16513/j. 2096-2185. DE. 2106602.  
HE Kexin, MA Suliang, MA Zhuang, et al. Energy storage technology development trend and policy environment analysis[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(6): 45-52. DOI: 10. 16513/j. 2096-2185. DE.

- 2106602.
- [14] 魏子敬. 熔盐储热技术在供热领域的应用[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(2): 186-188. DOI: 10. 19981/j. CN23-1581/G3. 2022. 02. 053.
- WEI Zijong. Application of molten salt heat storage technology in heating field[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(2): 186-188. DOI: 10. 19981/j. CN23-1581/G3. 2022. 02. 053.
- [15] BEEMER R D, SHAUGHNESSY E, EWERT K R, et al. The use of sodium pyrophosphate to improve a translucent clay simulate[C]//Geo-Chicago 2016. Chicago: American Society of Civil Engineers, 2016: 83-93.
- [16] ZHOU Y C, WU S Q, MA Y, et al. Recent advances in organic/composite phase change materials for energy storage[J]. ES Energy & Environment, 2020, 9: 28-40. DOI: 10. 30919/eseec150.
- [17] 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. DOI: 10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2021. 0538.
- JIANG Zhu, ZOU Boyang, CONG Lin, et al. Research progress and prospect of heat storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2746-2771. DOI: 10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2021. 0538.
- [18] 李妍. 应用于冷链的有机相变蓄冷剂的制备及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- LI Yan. Preparation and performance study of organic phase change coolant used in cold chain[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [19] 王俊霞. 二元有机复合相变蓄热材料的制备及导热性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- WANG Junxia. Preparation and thermal conductivity research of binary organic composite phase change heat storage materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [20] LIN N Z, LI C C, ZHANG D Y, et al. Enhanced cold storage performance of  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ /expanded graphite composite phase change materials[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48: 101596. DOI: 10. 1016/j. seta. 2021. 101596.
- [21] WU Y P, WANG T. The dependence of phase change enthalpy on the pore structure and interfacial groups in hydrated salts/silica composites via sol-gel[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 448: 100-105. DOI: 10. 1016/j. jcis. 2015. 02. 020.
- [22] HUANG K Y, LI J H, LUAN X Z, et al. Effect of graphene oxide on phase change materials based on disodium hydrogen phosphate dodecahydrate for thermal storage[J]. ACS Omega, 2020, 5(25): 15210-15217. DOI: 10. 1021/acsomega. 0c01184.
- [23] LI S M, LIN S, LING Z Y, et al. Growth of the phase change enthalpy induced by the crystal transformation of an inorganic-organic eutectic mixture of magnesium nitrate hexahydrate-glutaric acid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(14): 6751-6760. DOI: 10. 1021/acs. iecr. 0c01029.
- [24] ZAHIR M H, MOHAMED S A, SAIDUR R, et al. Supercooling of phase-change materials and the techniques used to mitigate the phenomenon[J]. Applied Energy, 2019, 240: 793-817. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2019. 02. 045.
- [25] LIAN Q S, LI K, SAYYED A A S, et al. Study on a reliable epoxy-based phase change material: facile preparation, tunable properties, and phase/microparticle separation behavior[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(28): 14562-14574. DOI: 10. 1039/C7TA02816D.
- [26] XIE N, LI Z P, GAO X N, et al. Preparation and performance of modified expanded graphite/eutectic salt composite phase change cold storage material[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 110: 178-186. DOI: 10. 1016/j. ijrefrig. 2019. 10. 008.
- [27] LIU Y S, YU K Y, GAO X J, et al. Enhanced thermal properties of hydrate salt/poly (acrylate sodium) copolymer hydrogel as form-stable phase change material via incorporation of hydroxyl carbon nanotubes[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 208: 110387. DOI: 10. 1016/j. solmat. 2019. 110387.
- [28] LIN N Z, LI C C, ZHANG D Y, et al. Emerging phase change cold storage materials derived from sodium sulfate decahydrate[J]. Energy, 2022, 245: 123294. DOI: 10. 1016/j. energy. 2022. 123294.
- [29] 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.
- LI Zhao, LI Baorang, CHEN Haozhi, et al. State of the art review on phase change thermal energy storage technology[J]. Chemical Industry and Engineer-



- ing Progress, 2020, 39 (12): 5066-5085. DOI: 10.16085/j. issn. 1000-6613. 2020-0376.
- [30] 林文珠, 凌子夜, 方晓明, 等. 相变储热的传热强化技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40 (9): 5166-5179. DOI:10.16085/j. issn. 1000-6613. 2021-0460. LIN Wenzhu, LING Ziyue, FANG Xiaoming, et al. Research progress on heat transfer of phase change material heat storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40 (9): 5166-5179. DOI:10.16085/j. issn. 1000-6613. 2021-0460.
- [31] 蒯子函, 闫霆, 吴韶飞, 等. 硬脂醇/膨胀石墨复合相变材料的制备及储热性能[J]. 化工进展, 2021, 40 (S1): 301-310. DOI: 10.16085/j. issn. 1000-6613. 2020-0750. KUAI Zihan, YAN Ting, WU Shaofei, et al. Fabrication and heat storage properties of stearyl alcohol/expanded graphite composite phase change materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40 (S1): 301-310. DOI: 10.16085/j. issn. 1000-6613. 2020-0750.
- [32] 徐新. 聚乙二醇/白炭黑复合相变储热水泥板的性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(9): 253-257. XU Xin. Study on the property of cement board based on PEG/WCB-PCM[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(9): 253-257.
- [33] WU S F, YAN T, KUAI Z H, et al. Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. Energy Storage Materials, 2020, 25: 251-295. DOI: 10.1016/j. ensm. 2019. 10. 010.
- [34] SCIACOVELLI A, GAGLIARDI F, VERDA V. Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins[J]. Applied Energy, 2015, 137: 707-715. DOI:10.1016/j. apenergy. 2014. 07. 015.
- [35] MAT S, AL-ABIDI A A, SOPIAN K, et al. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 223-236. DOI: 10.1016/j. enconman. 2013. 05. 003.
- [36] SHABGARD H, BERGMAN T L, SHARIFI N, et al. High temperature latent heat thermal energy storage using heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(15-16): 2979-2988. DOI:10.1016/j. ijheatmasstransfer. 2010. 03. 035.
- [37] 单少飞, 莫松平, 贾莉斯, 等. 成核剂与增稠剂对甘露醇相变特性的影响[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1097-1103, 1111. SHAN Shaofei, MO Songping, JIA Lisi, et al. Effects of nucleating agents and thickening agents on phase change characteristics of D-mannitol[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(1): 1097-1103, 1111.
- [38] 郑涛杰, 陈志莉, 刘强, 等. 水合盐相变储能材料的增稠剂优选研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1781-1787. ZHENG Taojie, CHEN Zhili, LIU Qiang, et al. Study on optimum agent of thickener for salt hydrate phase change energy storage material[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1781-1787.
- [39] LIU Y S, YANG Y Z. Form-stable phase change material based on  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  eutectic hydrated salt/expanded graphite oxide composite: the influence of chemical structures of expanded graphite oxide[J]. Renewable Energy, 2018, 115: 734-740. DOI: 10.1016/j. renene. 2017. 08. 097.
- [40] FU W W, ZOU T, LIANG X H, et al. Preparation and properties of phase change temperature-tuned composite phase change material based on sodium acetate trihydrate-urea/fumed silica for radiant floor heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114253. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2019. 114253.
- [41] FU W W, ZOU T, LIANG X H, et al. Characterization and thermal performance of microencapsulated sodium thiosulfate pentahydrate as phase change material for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 193: 149-156. DOI:10.1016/j. solmat. 2019. 01. 007.
- [42] FANG Y T, HUANG L H, LIANG X H, et al. Facilitated synthesis and thermal performances of novel  $\text{SiO}_2$  coating  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  microcapsule as phase change material for thermal energy storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 206: 110257. DOI:10.1016/j. solmat. 2019. 110257.
- [43] JING H C, XU L, WANG X Q, et al. A phase-change gel based pressure sensor with tunable sensitivity for artificial tactile feedback systems [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9 (35): 19914-19921.
- [44] LI M, WANG W, ZHANG Z G, et al. Monodisperse

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}@\text{SiO}_2$  microparticles against supercooling and phase separation during phase change for efficient energy storage[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56 (12): 3297-3308. DOI:10.1021/acs.iecr.7b00231.

[45] CHEN X, CHENG P, TANG Z D, et al. Carbon-based composite phase change materials for thermal energy storage, transfer, and conversion[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(9): 2001274. DOI:10.1002/advs.202001274.

[46] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11 (3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.

CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11 (3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.

[47] 李定一. 槽式光热发电系统建模与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021. DOI:10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000517.

LI Dingyi. Research on modeling and simulation of trough CSP system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. DOI: 10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000517

[48] 时铭序. 太阳能光热电站间接双罐储热系统温度控制策略[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2020.000737.

SHI Mingxu. Temperature control strategy of indirect double-tank heat storage system in solar thermal power station[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2020.000737

[49] 刘纯. 集中太阳能系统在居住建筑中的应用[J]. *山西建筑*, 2017, 43 (9): 184-185. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.09.101.

LIU Chun. The application of concentrated solar energy system in residential buildings[J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43 (9): 184-185. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.09.101.

[50] 张涵, 王亮, 林曦鹏, 等. 基于逆/正布雷顿循环的热泵储电系统性能[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10 (5): 1796-1805. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0330.

ZHANG Han, WANG Liang, LIN Xipeng, et al. Performance of pumped thermal electricity storage system based on reverse/forward Brayton cycle[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10 (5): 1796-1805. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0330.

[51] 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.

HE Mingfei, WANG Zhifeng, YUAN Guofeng, et al. A technical introduction of water pit for long-term seasonal solar thermal energy storage [J]. *Journal of BEE*, 2021, 49 (10): 66-70.

[52] 李建林, 张则栋, 谭宇良, 等. 碳中和目标下储能发展前景综述[J]. *电气时代*, 2022 (1): 61-65.

LI Jianlin, ZHANG Zedong, TAN Yuliang, et al. Review on the development prospect of energy storage under the carbon neutral target [J]. *Electric Age*, 2022 (1): 61-65.

[53] 李石栋, 张仁元, 李风, 等. 储热材料在聚光太阳能热发电中的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, 24 (21): 51-55.

LI Shidong, ZHANG Renyuan, LI Feng, et al. Research progress in thermal storage materials applied in concentrating solar power[J]. *Materials Review*, 2010, 24 (21): 51-55.

[54] DING W J, BAUER T. Progress in research and development of molten chloride salt technology for next generation concentrated solar power plants[J]. *Engineering*, 2021, 7 (3): 334-347. DOI: 10.1016/j.eng.2020.06.027.

[55] FERNANDEZ A I, MARTÍNEZ M, SEGARRA M, et al. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94 (10): 1723-1729. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.05.035.

[56] HE Y L, QIU Y, WANG K, et al. Perspective of concentrating solar power [J]. *Energy*, 2020, 198. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117373.

[57] GOYAL N, AGGARWAL A, KUMAR A. Concentrated solar power plants; a critical review of regional dynamics and operational parameters[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 83: 102331. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102331.

[58] SARVGHAD M, STEINBERG T A, WILL G. Corrosion of steel alloys in eutectic  $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  at 700 °C and  $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$  at 450 °C for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 170: 48-59. DOI: 10.1016/

- j. solmat. 2017. 05. 063.
- [59] LIU M, STEVEN TAY N H, BELL S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1411-1432. DOI: 10. 1016/j. rser. 2015. 09. 026.
- [60] 况军. 相变储能材料在电力调峰中的应用[J]. *电气开关*, 2011, 49(1): 69-71.  
KUANG Jun. Application of phase change materials in peak load regulation of power system[J]. *Electric Switchgear*, 2011, 49(1): 69-71.
- [61] YAMAHA M, MISAKI S. The evaluation of peak shaving by a thermal storage system using phase-change materials in air distribution systems[J]. *HVAC & R Research*, 2006, 12: 861-869. DOI: 10. 1080/10789669. 2006. 10391213.
- [62] 李峻, 祝培旺, 王辉, 等. 基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 63-70. DOI: 10. 16516/j. ge-di. issn2095-8676. 2021. 03. 009.  
LI Jun, ZHU Peiwang, WANG Hui, et al. Flexible modification technology and application prospect of thermal power unit based on high temperature molten salt heat storage[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 63-70. DOI: 10. 16516/j. ge-di. issn2095-8676. 2021. 03. 009.
- [63] 赵杰, 唐炳涛, 张淑芬, 等. 相变储能材料在工业余热回收中的应用[J]. *化工进展*, 2009, 28(S1): 63-65.  
ZHAO Jie, TANG Bingtao, ZHANG Shufen, et al. Application of phase change materials in industrial waste heat recovery[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 28(S1): 63-65.
- [64] MA Q, LUO L, WANG R Z, et al. A review on transportation of heat energy over long distance: exploratory development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6-7): 1532-1540. DOI: 10. 1016/j. rser. 2008. 10. 004.
- [65] MIRÓ L, GASIA J, CABEZA L F. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: a review[J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 284-301. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2016. 06. 147.
- [66] GUO S P, LIU Q B, ZHAO J, et al. Mobilized thermal energy storage: materials, containers and economic evaluation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 177: 315-329. DOI: 10. 1016/j. enconman. 2018. 09. 070.
- [67] GUDE V G. Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources[J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 877-898. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2014. 06. 061.
- [68] GE T S, WANG R Z, XU Z Y, et al. Solar heating and cooling: present and future development[J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 1126-1140. DOI: 10. 1016/j. renene. 2017. 06. 081.
- [69] NOVO A V, BAYON J R, CASTRO-FRESNO D, et al. Review of seasonal heat storage in large basins: water tanks and gravel-water pits[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(2): 390-397. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2009. 06. 033.
- [70] ZHAO D L, LI Y, DAI Y J, et al. Optimal study of a solar air heating system with pebble bed energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(6): 2392-2400. DOI: 10. 1016/j. enconman. 2010. 12. 041.
- [71] XU J, WANG R Z, LI Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage[J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 610-638. DOI: 10. 1016/j. solener. 2013. 06. 006.
- [72] BENLI H. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 581-589. DOI: 10. 1016/j. enconman. 2010. 07. 033.
- [73] LI T X, WANG R Z, KIPLAGAT J K, et al. Performance analysis of an integrated energy storage and energy upgrade thermochemical solid-gas sorption system for seasonal storage of solar thermal energy[J]. *Energy*, 2013, 50: 454-467. DOI: 10. 1016/j. energy. 2012. 11. 043.
- [74] 张新宪, 焦旋, 冯志宏, 等. 山西省苹果冷链物流现状 & 对策研究[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(10): 1777-1780.  
ZHANG Xinxian, JIAO Xuan, FENG Zhihong, et al. Study on the present situation and countermeasures of apple cold chain logistics in Shanxi[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 1777-1780.
- [75] 李晓燕, 高宇航, 杨舒婷. 冷藏车用新型相变蓄冷材料的研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(1): 96-98, 102. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0946. 2010. 01. 026.  
LI Xiaoyan, GAO Yuhang, YANG Shuting. Study on new cool storage materials for refrigerated vehi-



- cle[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2010, 26(1): 96-98, 102. DOI:10.3969/j.issn.1672-0946.2010.01.026.
- [76] 李靖,谢如鹤,刘广海,等.冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J].制冷学报,2018,39(4):32-37.
- LI Jing, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Development of new low-temperature phase change material and equipment used in refrigerated transportation [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 32-37.
- [77] 杨颖,张伟,董昭,等.冷藏车用新型复合相变蓄冷材料的制备及热性能研究[J].化工新型材料, 2013, 41(11): 41-43.
- YANG Ying, ZHANG Wei, DONG Zhao, et al. Preparation and thermal performance of new composite phase change thermal storage materials for refrigerator car[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(11): 41-43.
- [78] 朱志强,张小栓,于晋泽.我国鲜活农产品冷链物流与纳米蓄冷材料的应用[J].中国果菜,2014,34(6): 14-18. DOI:10.3969/j.issn.1008-1038.2014.06.009.
- ZHU Zhiqiang, ZHANG Xiaoshuan, YU Jinze. Nano cool-storage material and cold-chain logistics of fresh agriculture products[J]. China Fruit Vegetable, 2014, 34(6): 14-18. DOI:10.3969/j.issn.1008-1038.2014.06.009.
- [79] ONWUDE D I, CHEN G N, EKE-EMEZIE N, et al. Recent advances in reducing food losses in the supply chain of fresh agricultural produce [J]. Processes, 2020, 8(11): 1431. DOI: 10.3390/pr8111431.
- [80] SHE X H, CONG L, NIE B J, et al. Energy-efficient and economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: a comprehensive review [J]. Applied Energy, 2018, 232: 157-186. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.09.067.
- [81] 冉彤.某机场能源站冰蓄冷空调系统负荷预测与节能优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- RAN Tong. Research on load prediction and energy saving optimization of ice storage air conditioning system in airport energy station[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2021.000627.
- [82] SANAYE S, HEKMATIAN M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 66: 181-197. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014.
- [83] 史杰,郭恒超,常晟,等.浦东机场能源中心水蓄冷系统设计与性能分析[J].流体机械,2020,48(9): 71-76.
- SHI Jie, GUO Hengchao, CHANG Sheng, et al. Design and performance analysis of the water cold storage system in the energy center of Pudong international airport [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(9): 71-76.
- [84] LI S F, LIU Z H, WANG X J. A comprehensive review on positive cold energy storage technologies and applications in air conditioning with phase change materials [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113667. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113667.
- [85] 任猛,左秋杰.热带水果在冰箱中保鲜方法的应用现状[J].家用电器,2019(10):31-33.
- REN Meng, ZUO Qiujie. Application status of preservation methods of tropical fruits in refrigerators [J]. Electrical Appliances, 2019(10): 31-33.
- [86] 刘杰.纳米复合储能材料在冰箱上应用的可行性研究[J].家电科技,2011(12):70-71.
- LIU Jie. Feasibility study on application of nanocomposite energy storage material in refrigerator [J]. China Appliance Technology, 2011(12): 70-71.
- [87] 夏全刚.相变材料应用于冷藏保鲜箱的试验研究[D].上海:上海理工大学,2015.
- XIA Quangang. Research on the phase change materials used in cold storage containers [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2015.
- [88] 汤黎明,刘铁兵,朱兴喜.医用冷藏运输箱的设计与制作[J].中国医疗器械杂志,2010,34(2):109-111. DOI:10.3969/j.issn.1671-7104.2010.02.010.
- TANG Liming, LIU Tiebing, ZHU Xingxi. Design and manufacture of medical refrigerated shipping refrigerated box [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2010, 34(2): 109-111. DOI:10.3969/j.issn.1671-7104.2010.02.010.
- [89] AZZOUZ K, LEDUCQ D, GOBIN D. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(5): 892-901. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2007.09.007.
- [90] ZHAO Y, ZHANG X L, XU X F, et al. Research progress of phase change cold storage materials used in cold chain transportation and their different cold storage packaging structures [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114360. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114360.
- [91] MEDVED S, ARKAR C. Correlation between the

- local climate and the free-cooling potential of latent heat storage[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(4): 429-437. DOI:10.1016/j.enbuild.2007.03.011.
- [92] ARKAR C, MEDVED S. Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(9): 1078-1087. DOI:10.1016/j.solener.2007.01.010.
- [93] ZALBA B, MARÍN J M, CABEZA L F, et al. Free-cooling of buildings with phase change materials[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27(8): 839-849. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2004.03.015.
- [94] NIE B J, PALACIOS A, ZOU B Y, et al. Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110340. DOI:10.1016/j.rser.2020.110340.

## Thermal energy storage technologies and its engineering applications

LI Yaxi, LI Chuanchang, BAI Kaihao, WANG Huan

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** This paper summarizes the principle, basic requirements, and characteristics of thermal energy storage technology, and illustrates the key technologies of thermal energy storage, including the physical property optimization technology of thermal energy storage material, heat transfer enhancement technology of thermal energy storage, thermal energy storage material preparation technology and system control and optimization technology of thermal energy storage. Besides, the demands of thermal energy storage technology on the power supply side, grid side, and user side are analyzed, and its technical feasibility and economy are evaluated. Finally, according to the different application environments of thermal energy storage technology, the engineering applications of medium and high-temperature thermal energy storage technology and low-temperature thermal energy storage technology are expounded, including the solar thermal power station, power peak shaving, industrial waste heat recovery, solar cross-season utilization, cold chain transportation, air conditioning energy saving, refrigerator refrigeration and human body/building intelligent temperature regulation. This paper makes a comprehensive summary and analysis of the current development status and prospects of thermal energy storage technology, which can provide a certain reference for the follow-up research work in this field.

**Key words:** thermal energy storage technology; thermal energy storage material; system optimization; thermal storage; cold storage; engineering application

**Manuscript received:** 2022-06-14; **revised:** 2022-08-10; **accepted:** 2022-08-14

**Foundation item:** Projects (51874047, 51504041) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022GK2048) supported by the Key Research and Development Program of Hunan Province; Project (2020RC3038) supported by the Special Fund for the Construction of Innovative Province in Hunan Province; Project (kq1802007) supported by the Changsha City Fund for Distinguished and Innovative Young Scholars

**Corresponding author:** LI Chuanchang (1983—) (ORCID: 0000-0001-5915-1119), male, professor, research interest: new energy and energy storage technology. E-mail: chuanchangli@126.com

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:彭卓寅)