

相变材料在热储能技术中的应用

刘春轩^{1*}, 张东尧², 李传常², 邱敬文³

¹湖南金天铝业高科技股份有限公司, 湖南 芦溪

²长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙

³湖南科技大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2022年7月1日; 录用日期: 2022年7月21日; 发布日期: 2022年7月29日

摘要

相变材料具有储能密度高、相变温度近似恒定以及相变温度宽泛等优点, 成为热储能技术研究的热点之一。热储能技术在构建清洁高效能源体系中发挥着重要作用, 是国家大力推进研究的重要新型储能技术。本文综述了热储能材料的分类并重点介绍了研究和应用较广泛的几种主要的固-液相变材料及其热物性特性; 并针对固-液相变材料制备与封装方法进行了阐述。最后介绍了相变材料在热储能技术领域中的应用, 并指出今后研究的重点是简化生产工艺, 降低成本, 从而实现规模化生产。

关键词

热储能技术, 相变材料, 有机相变材料

Application of Phase Change Materials in Thermal Energy Storage Technology

Chunxuan Liu^{1*}, Dongyao Zhang², Chuanchang Li², Jingwen Qiu³

¹Hunan Goldsky Aluminum High-Tech Co., Ltd., Luxi Hunan

²School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

³College of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Jul. 1st, 2022; accepted: Jul. 21st, 2022; published: Jul. 29th, 2022

Abstract

Phase change materials have the advantages of high energy storage density, approximately constant phase transition temperature, and wide phase transition temperature, and have become one of the hotspots in thermal energy storage technology research. Thermal energy storage technolo-

*通讯作者。

gy plays an important role in building a clean and efficient energy system, and is an important new energy storage technology that the state vigorously promotes research. This paper reviews the classification of thermal energy storage materials, and focuses on several main solid-liquid phase change materials that are widely studied and used and their thermophysical properties. The preparation and packaging methods of solid-liquid phase change materials are described. Finally, the application of phase change materials in different fields of thermal energy storage technology is introduced, and it is pointed out that the focus of future research is to simplify the production process and reduce the cost, so as to achieve large-scale production.

Keywords

Thermal Energy Storage Technology, Phase Change Material, Organic Phase Change Material

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类社会的进步与发展伴随着能源利用的进步与革命。化石能源的过度开采与使用，造成的能源危机和环境污染问题日益严重，高效开发和利用可再生清洁能源成为解决这一问题的重要举措之一。然而可再生能源在实际使用过程中，存在能源转化率低、利用率低、能源供需间歇性和不稳定等缺陷，如风力发电受气候影响而不可控，进而无法实现稳定供电，增加了风力发电的应用难度。储能技术的提出和发展，有效地解决了能源供需在时间和空间上的矛盾问题，大幅提升了能源的利用率。

热储能技术是储能技术的一种，热储能技术具有储能密度高、占地面积小以及能源转换效率高等优点，是实现双碳目标的重要支撑之一，热储能技术是国家大力推进研究的重要新型储能技术。相变材料是热储能技术的核心，其本身具有储热密度高、相变温度近似恒定、相变温度宽泛等优点，已在热储能技术领域中受到广泛的关注和研究。本文简要介绍了热储能技术及相变材料在热储能技术领域中的应用。

2. 热储能概述

2.1. 热储能技术

热储能技术以储热材料为媒介，存储太阳热能、工业余热等热量，在需要使用时将存储的热量释放，有效地解决了可再生能源在实际应用时存在的时间和空间上热能供给需求不匹配的问题，提升了能源的利用率。热储能技术不仅能够实现热能的高效存储及合理应用，还能够解决化石能源过度使用造成的能源危机和环境污染等问题。热储能技术绿色节能，顺应全球能源改革的潮流、契合国家能源发展政策的战略性举措，对于改善能源结构、确保国家能源安全具有深远意义。

2.2. 热储能材料的分类

热储能材料依据储热介质的不同，可以分为三大类：显热储能、潜热储能和化学储能[1]。潜热储能通过物质在加热和冷却过程中的相态转变存储热量，也称为相变储能。潜热储能材料依据相变过程中相态转变的不同，分为固-固相变材料、固-液相变材料、固-气相变材料和气-液相变材料四大类[2]。其中，固-气相变和气-液相变材料在相态转变的过程中具有较高的相变膨胀性，使其在工程应用中受

到了一定的局限性。目前, 研究和应用较多的热储能材料是固-固相变材料和固-液相变材料[3]。固-液相变材料依据化学成分的不同, 又可分为无机相变材料、有机相变材料和低共熔物三类(图 1)。

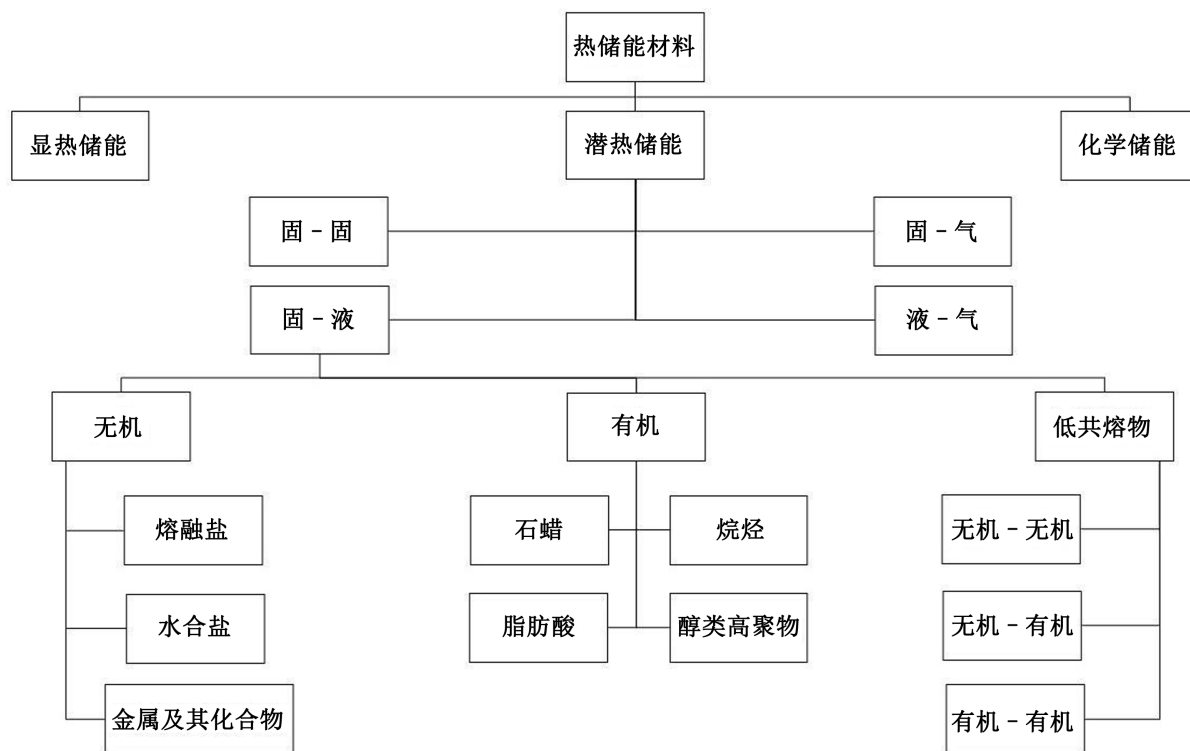


Figure 1. Classification of thermal energy storage materials

图 1. 热储能材料的分类

1) 无机相变材料

无机相变材料主要有熔融盐、水合盐和金属及其化合物三类[4]。熔融盐是盐类融化后形成的熔融体, 具有较高的相变温度和相变潜热值, 表 1 列出了部分无机相变材料的热物性参数。

Table 1. Thermophysical parameters of some inorganic phase change materials

表 1. 部分无机相变材料的热物性参数

相变材料	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)	文献
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251	[5]
CH ₃ COONa·3H ₂ O	46	280	[6]
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	43.7	251.5	[7]
CaCl ₂ ·6H ₂ O	28.4	152.4	[8]
LiClO ₃ ·3H ₂ O	8	155~253	[9]

2) 有机相变材料

有机相变材料主要分为石蜡、烷烃、脂肪酸和醇类高聚物四类[10]。石蜡是由碳原子数为 14~34 的直链烷烃组成。石蜡的熔点温度和潜热值随碳原子数的增加而变化, 表 2 列出了部分石蜡的热物性参数。石蜡具有较宽的相变温度区间, 在应用时, 应根据所需要的相变温度选择合适的石蜡相变材料。

Table 2. Thermophysical parameters of paraffin [11]**表 2.** 石蜡的热物性参数[11]

碳原子数	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)	碳原子数	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)
14	5.5	228	25	49.4	238
15	10	205	26	56.3	256
16	16.7	237.1	27	58.8	236
17	21.7	213	28	61.6	253
18	28	244	29	63.4	240
19	32	222	30	65.4	251
20	36.7	246	31	68	242
21	40.2	200	32	69.5	170
22	44	249	33	73.9	268
23	47.5	232	34	75.9	269
24	50.6	255			

脂肪酸相变潜热值高、没有过冷及相分离现象，并具有低共熔效应。单一脂肪酸的相变温度可能与应用所需温度不完美匹配，可以混合不同类型的脂肪酸，制备二元或多元混合脂肪酸，利用脂肪酸低共熔效应，降低混合脂肪酸的相变温度，拓宽脂肪酸类相变材料的相变温度区间，为脂肪酸的应用提供了便利条件。Li 等[12]人将月桂酸和硬脂酸按照 7:3 的质量比混合，制得月桂酸-硬脂酸二元共晶相变材料，成功将二元共晶混合相变材料的相变温度调控至 31.5℃，使其在建筑节能领域具有良好的应用潜力。有机相变材料没有过冷及相分离现象，性能稳定，但其导热性能普遍偏低，对其工程应用造成了一定的限制[13][14]。因此，克服有机相变材料导热系数较低的缺点，是研究的关键突破点[15]。表 3 列出了部分非石蜡类有机相变材料的热物性参数。

Table 3. Thermophysical parameters of some non paraffin organic phase change materials [11]**表 3.** 部分非石蜡类有机相变材料的热物性参数[11]

材料	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)	材料	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)
甲酸	7.8	247	辛酸	16.3	149
甘油	17.9	198.7	棕榈酸甲酯	29	205
石碳酸	41	120	十六醇	49.3	141
乙酸	16.7	184	月桂酸	49	178
乙酰胺	81	241	豆蔻酸	58	199
硬脂酸	69.4	199	癸酸	36	152
苯乙酸	76.7	102	丙烯酸	68	115

3) 低共熔物

低共熔物是由两种或两种以上材料混合而成的共熔混合物。可以是有机与有机相变材料的共熔混合物、无机与无机相变材料的共熔互混以及有机与无机相变材料的共熔混合物[16]。表 4 列出了部分文献中研究的低共熔物。

Table 4. Thermophysical parameters of some eutectic materials [17]**表 4.** 部分低共熔物的热物性参数[17]

材料	熔点温度(°C)	潜热值(J·g ⁻¹)	导热系数(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	质量比(%)
LiNO ₃ -KNO ₃	133	150	0.52	34/66
KNO ₃ -NaNO ₃	222	110	0.51	55/45
CaCl ₂ -NaCl	777	328	0.51	52.1/47.9
LiCl-NaCl	827	439	0.68	72/28
LiNO ₃ -NaNO ₃ -KNO ₃	123	140	0.53	30/18/52
Li ₂ CO ₃ -Na ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃	405	166	1.33	32.2/33.3/34.5

2.3. 热储能材料的制备

相变材料,尤其是固-液相变材料在相变过程中存在相变泄漏的问题,严重制约了相变材料的实际应用[18][19]。针对这一缺陷,学者们提出采用微胶囊法、溶胶凝胶法和多孔基质吸附法等技术,制备复合相变储热材料,实现相变材料的封装,有效解决相变材料相变过程泄漏的问题,改善热储能材料的应用效果,为其在更多领域的应用创造条件[20][21][22]。

1) 微胶囊法

微胶囊法是一种利用天然或合成高分子材料作为微胶囊壁材,连续包覆相变材料,形成微胶囊核壳结构的技术[23]。连续紧凑的薄膜结构可以防止外部环境对相变材料的干扰,如相变材料氧化、挥发等问题,并达到封装相变材料的效果,解决相变材料固-液相变泄漏的问题。微胶囊的制备方法分为物理法、化学法和物理化学法。物理法是指利用机械或其他物理作用形成微胶囊,主要包括喷雾、干燥和离心等方式制备微胶囊,所制备出的微胶囊粒径一般小于 100 μm。化学法是指利用化学反应生成壁材,将相变材料包裹在壁材内部,主要包括界面聚合法、原位聚合法、锐孔凝固浴法和层层自组装技术法。物理化学法的原理是通过相分离使壁材凝聚,之后对相变材料进行包裹,制得相变微胶囊。其中应用较多的是化学法中的原位聚合法和界面聚合法[24]。

2) 溶胶凝胶法

溶胶凝胶法以无机化合物或有机金属化合物为前驱体,水解和缩合反应后,在溶液中形成稳定的溶胶体系[25]。在凝胶和固化过程之后,通过干燥和焙烧获得所需材料。溶胶凝胶法广泛应用于纳米纤维、涂层和薄膜、纳米粉末和复合材料等领域[26][27][28]。

3) 多孔基质吸附法

多孔基质吸附法以多孔介质作为支撑基体,相变材料浸渍进多孔介质的孔隙结构中,在毛细管作用力和表面张力等相互作用力下将相变材料限制在多孔介质的孔隙结构中,有效解决相变材料相变过程易泄漏的问题[29][30][31]。采用多孔基质吸附制备的复合相变储热材料具有良好的结构稳定性能。多孔介质按照其成因,可分为两类:天然多孔介质和人造多孔介质。在制备复合相变储热材料时,为了获得更好的浸渍效果,通常加入真空系统,借助真空泵将多孔介质孔隙结构中的空气抽出,使多孔介质吸附更多的相变材料。

3. 相变材料在热储能技术中的应用

研究者们通过制备复合相变储热材料改善单一使用相变材料存在的缺陷,充分发挥不同材料的优点。复合相变储热材料已在太阳能光热发电、相变织物、工业余热回收和建筑节能等领域得到了广泛的应用

[32] [33] [34]。

3.1. 太阳能光热发电

太阳能光热发电(Concentrating Solar Power, CSP)是热储能技术的重要应用领域之一(图 2)。太阳能具有诸多的优点,但太阳能的间歇不稳定性造成太阳能应用效率低下。因此,借助合适且高效的储能系统,实现充分发挥太阳能价值的目的。在太阳能光热发电系统中引入相变储热装置,实现太阳能热能的高效存储和释放。即便是在日落后,相变储热装置存储的热能,仍可以用于加热水生成水蒸气,驱动汽轮机工作发电,延长了太阳能光热发电的运行时长,最大化的提高了能源效率。太阳能光热发电集热系统主要有四种类型:槽式集热系统、塔式集热系统、碟式集热系统以及线性菲涅尔式集热系统(图 3)。

3.2. 相变织物

相变材料发生近似恒温的相变过程,并同时进行储热或放热,利用相变材料这一属性,将相变材料与纤维和纺织品结合,制备具有温度调控作用的相变织物(图 4) [23]。

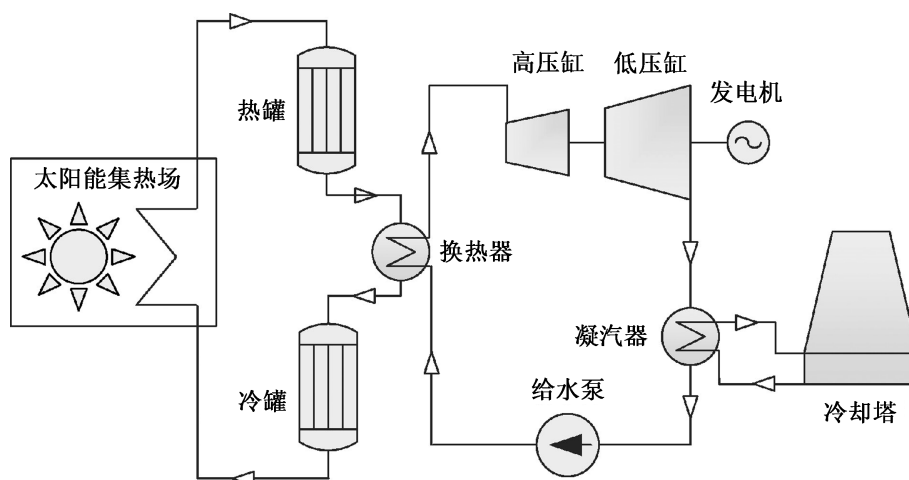
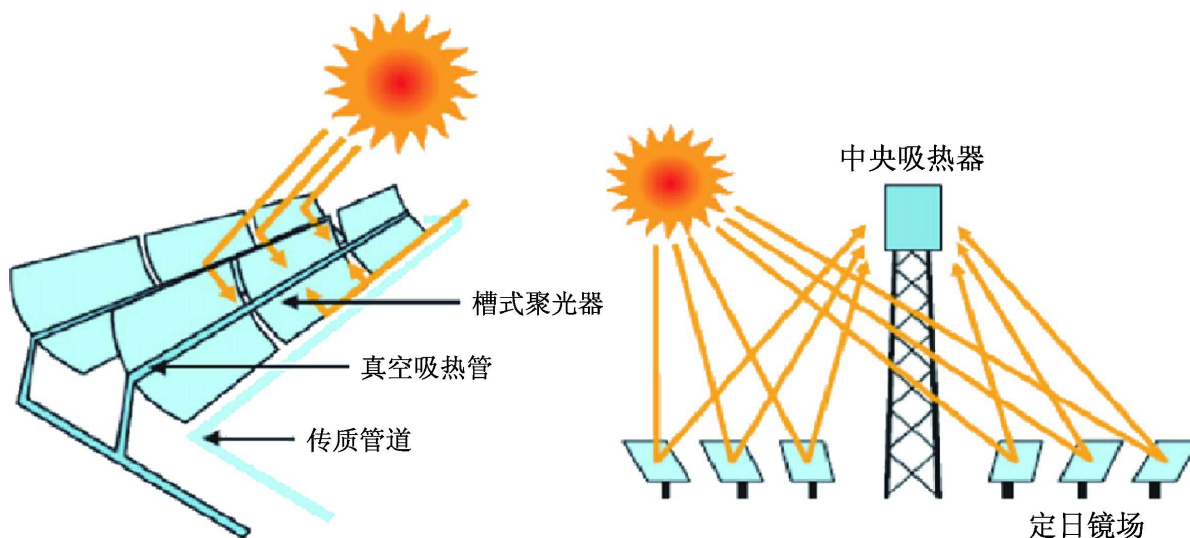


Figure 2. Working principle of solar thermal power generation system [35]

图 2. 太阳能光热发电系统的工作原理[35]



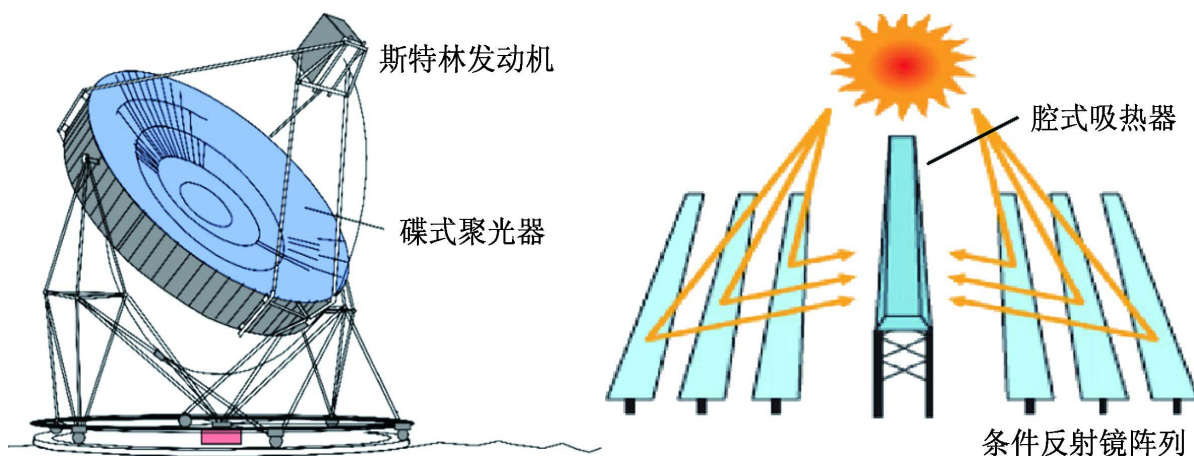


Figure 3. Four solar photothermal power generation and heat collection systems [35]

图 3. 四种太阳能光热发电集热系统[35]

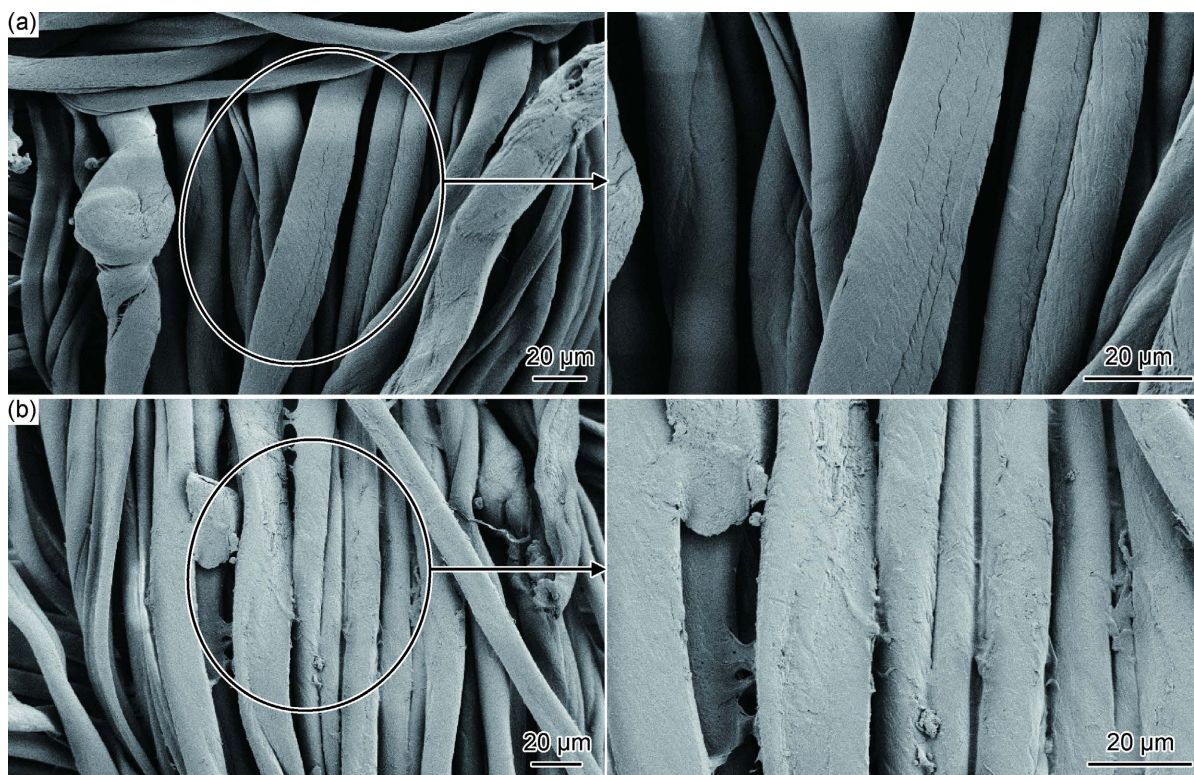


Figure 4. SEM of raw cotton fabric (a) and energy storage and temperature regulation cotton fabric (b) [36]

图 4. 原棉织物(a)和储能调温棉织物(b)的 SEM 图[36]

相变材料首先经过微胶囊法处理形成大小为 $1\sim 300\ \mu\text{m}$ 的颗粒,微胶囊的外壳在相变过程中始终保持固态,有效弥补了相变材料由固态转变成液态时易泄漏的缺陷。相变微胶囊与织物结合的方法主要有涂层法和纺丝法[37]。相变织物具有对外界温度变化主动响应的特性,已应用于航天航空纺织品、医用纺织品、运动服装等领域(图 5)。

3.3. 工业余热回收

工业余热是指多余、废弃的热源,包括电厂、钢铁、水泥、玻璃、化工、造纸、煤气发生炉等行业、

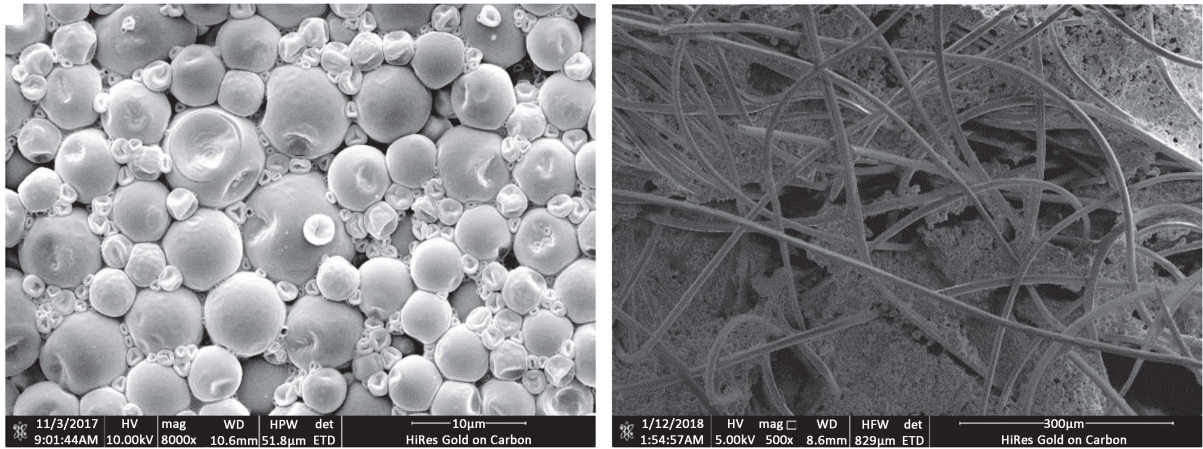


Figure 5. Surface morphology of microcapsules and finished fabrics [38]

图 5. 微胶囊及整理织物的表面形貌[38]

炉窑排掉的低温、低压废热蒸汽，工业窑炉和锅炉排出的废热烟气，工业炉冷却水产生的余热，工业炉产生的化学热，高温产品及炉渣产生的余热(红焦炭、热烧结矿、高炉红热铁水渣、高温度的硫酸)等[39]。我国余热资源丰富，但余热回收利用率低下，大型钢铁工厂的余热回收利用率仅 30%~50%。热储能技术能够实现工业余热的高效存储和利用，回收的工业余热借助换热设备将热能传递给工艺中的耗能步骤，减少一次能源的损失量，实现能源利用的最大化，提升能源的使用率(图 6)。Merlin 等[40]人采用膨胀石墨作为支撑基质，浸渍相变材料石蜡，并将制备的复合相变储热材料置于储能罐中，开展食品加工行业的余热回收利用研究。结果表明，储热装置能够提供大于 100 kW 的热功率，每小时能够节约 6 kW，有效提升了能源的利用率。

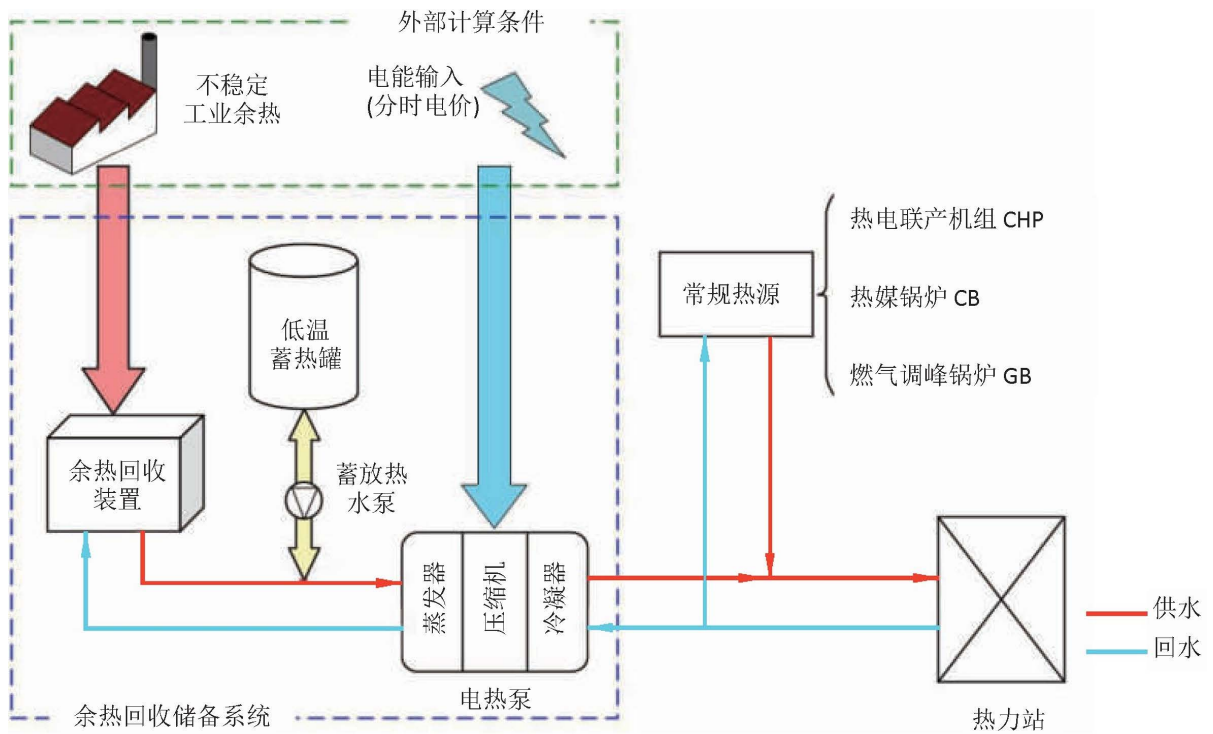


Figure 6. Configuration structure of conventional district heating system after industrial waste heat recovery and storage transformation [41]

图 6. 常规区域供热系统进行工业余热回收储备改造后的配置结构[41]

3.4. 建筑节能

中国建筑节能协会最新公布的《中国建筑能耗研究报告 2020》中指出 2018 年全国建筑碳排放总量为 49.3 亿吨二氧化碳, 占据全国能源排放总量的 51.2%; 全国建筑全寿命周期能耗总量为 21.47 亿 tce (吨标准煤当量), 占全国能源消费总量的 46.5% [42]。一次能源转化为建筑设备终端能源的效率低下是造成建筑能耗巨大的主要问题之一。因此, 开发利用新能源, 充分利用不同品位热能, 减少能源转换过程中的损失, 实现能源利用最大化。将相变材料与建筑建材结合制备具有储热和放热功能的新型建筑建材成为研究的热点之一[43] [44]。门窗在建筑中起着采光、通风和围护的作用。然而, 由于门窗材料的导热系数普遍较高, 在计算建筑的冷、热负荷时, 门窗是能量损失较大的部位。在现代建筑中, 为了追求美观性, 门窗所占的建筑面积不断增加, 甚至出现了全玻璃幕墙建筑, 对建筑能耗需求也越来越大。因此,

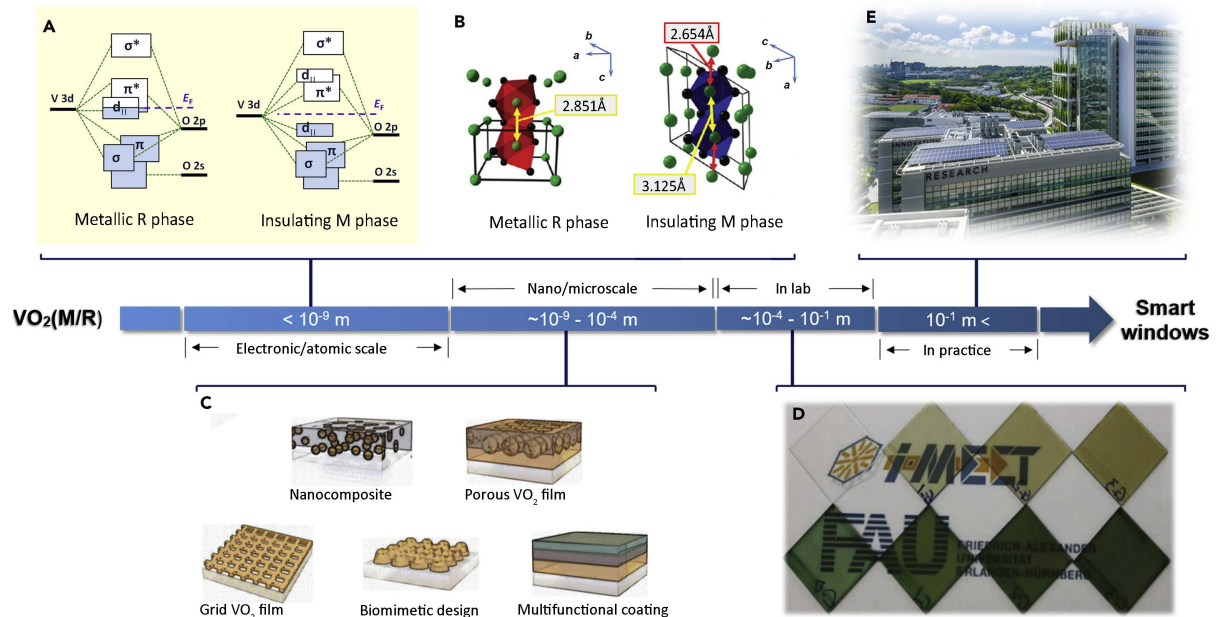


Figure 7. Overview of VO_2 smart window applications from electronic/atomic scale to nano/micro scale [46]

图 7. VO_2 智能视窗从电子/原子尺度到纳米/微尺度应用概述[46]

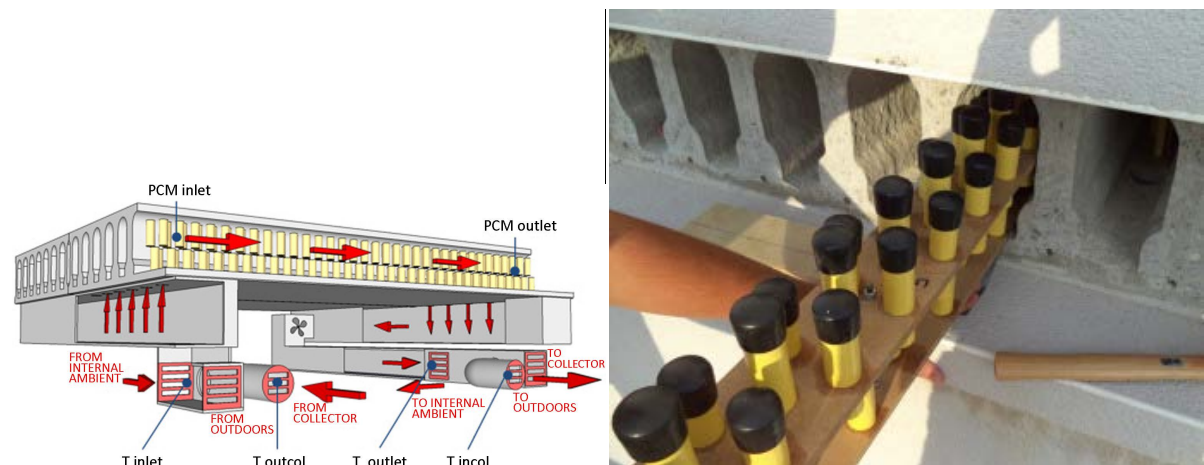


Figure 8. Application of phase change materials in reactive hollow concrete slabs [47]

图 8. 相变材料应用于活性空心混凝土板[47]

通过改善门窗部位的保温隔热能力,是实现绿色建筑达到良好建筑节能效果的重要方法之一[45]。Long等[46]人将 VO₂ 引入玻璃中制备了高效节能的热变色智能窗户,通过窗户颜色的变化自动调节玻璃的太阳透射率,营造舒适的室内环境,从而减少了电力能源的消耗,实现建筑节能(图 7)。相变材料与水泥结合,制备相变储能混凝土,相变储能混凝土通过自身储热和放热,能够有效缓解室内温度波动,减少建筑终端设能的能源消耗,实现建筑节能。Cabeza 等[47]人在活性空心混凝土板中引入相变微胶囊,制备了具有储放热功能的相变储能混凝土板(图 8)。通过存储一天中额外的能量,在供暖不足时释放存储的热量,延长了供暖周期,提升了能源的利用率。

4. 结语与展望

相变材料作为热储能技术的核心,已在诸多领域得到了研究应用。但是目前制备复合相变储热材料的方法存在成本高、制备工艺较为复杂以及不宜实现工业化生产等问题,制约了相变材料在工业中的应用和发展。因此,在确保相变材料性能的同时,降低制备工艺成本,提升制备方法实现工业化量产,是有待解决的重要问题。未来相变材料储能发展将在以下几个方面展开研究和应用:1) 筛选复合环保的廉价有机相变储能材料;2) 开发新型复合相变材料进一步提高其应用性能;3) 针对不同的应用场景,开发多种复合技术,研究多系列的复合相变材料。

基金项目

本项目受到湖南省重点研发项目资助(2022GK2041); 湖湘青年英才资助项目(2019RS2067); 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2019GK4048); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30262)资助。

参考文献

- [1] Li, B.M., Shu, D., Wang, R.F., *et al.* (2020) Polyethylene Glycol/Silica (PEG@SiO₂) Composite Inspired by the Synthesis of Mesoporous Materials as Shape-Stabilized Phase Change Material for Energy Storage. *Renewable Energy*, **145**, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.118>
- [2] 谢宝珊, 李传常, 张波, 等. 硅酸盐矿物储热特征及其复合相变材料[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(1): 143-152.
- [3] 周四丽, 张正国, 方晓明. 固-固相变储热材料的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1371-1383.
- [4] Li, Y.X., Li, C.C., Lin, N.Z., *et al.* (2021) Review on Tailored Phase Change Behavior of Hydrated Salt as Phase Change Materials for Energy Storage. *Materials Today Energy*, **22**, Article ID: 100866. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100866>
- [5] Karthick, A., Athikesavan, M.M., Pasupathi, M.K., *et al.* (2020) Investigation of Inorganic Phase Change Material for a Semi-Transparent Photovoltaic (STPV) Module. *Energies*, **13**, Article No. 3582. <https://doi.org/10.3390/en13143582>
- [6] Ling, Z.Y., Li, S.M., Cai, C.Y., *et al.* (2021) Battery Thermal Management Based on Multiscale Encapsulated Inorganic Phase Change Material of High Stability. *Applied Thermal Engineering*, **193**, Article ID: 117002. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117002>
- [7] Liu, Z.F., Chen, Z.H. and Yu, F. (2019) Preparation and Characterization of Microencapsulated Phase Change Materials Containing Inorganic Hydrated Salt with Silica Shell for Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **200**, Article ID: 110004. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110004>
- [8] Ye, R.D., Lin, W.Z., Yuan, K.J., *et al.* (2017) Experimental and Numerical Investigations on the Thermal Performance of Building Plane Containing CaCl₂·6H₂O/Expanded Graphite Composite Phase Change Material. *Applied Energy*, **193**, 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.049>
- [9] 李亚溪, 林酿志, 李传常. 高吸水性树脂基相变储冷材料及其在冷链运输中的应用[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(2): 55-64.
- [10] Li, C.C., Xie, B.S., Chen, J., *et al.* (2019) Emerging Mineral-Coupled Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, **183**, 633-644. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.021>
- [11] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen C.R. and Buddhi, D. (2009) Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 318-345.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- [12] Li, C.C., Wang, M.F., Xie, B.S., *et al.* (2020) Enhanced Properties of Diatomite-Based Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, **147**, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.001>
- [13] Zheng, H.P., Wang, C.H., Liu, Q.M., *et al.* (2018) Thermal Performance of Copper Foam/Paraffin Composite Phase Change Material. *Energy Conversion and Management*, **157**, 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.023>
- [14] Zhang, L., Zhou, K.C., Wei, Q.P., *et al.* (2019) Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials with 3D Porous Diamond Foam for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **233-234**, 208-219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.036>
- [15] Wu, S.F., Yan, T., Kuai, Z.H., *et al.* (2020) Thermal Conductivity Enhancement on Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: A Review. *Energy Storage Materials*, **25**, 251-295. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.10.010>
- [16] 吕培召, 徐一钧, 沈仕轩, 等. 多元低共熔材料热物性及电池热管理性能研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(6): 1507-1515.
- [17] 赵新波, 李传常, 谢宝珊, 等. 熔融盐/金属复合相变储热材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(12): 1177-1185.
- [18] 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.
- [19] Huang, X.B., Chen, X., Li, A., *et al.* (2019) Shape-Stabilized Phase Change Materials Based on Porous Supports for Thermal Energy Storage Applications. *Chemical Engineering Journal*, **356**, 641-661. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.013>
- [20] Lyu, J., Liu, Z.W., Wu, X.H., *et al.* (2019) Nanofibrous Kevlar Aerogel Films and Their Phase-Change Composites for Highly Efficient Infrared Stealth. *ACS Nano*, **13**, 2236-2245. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b08913>
- [21] Aftab, W., Huang, X.Y., Wu, W.H., *et al.* (2018) Nanoconfined Phase Change Materials for Thermal Energy Applications. *Energy & Environmental Science*, **11**, 1392-1424. <https://doi.org/10.1039/C7EE03587J>
- [22] Leng, G.H., Qiao, G., Jiang, Z., *et al.* (2018) Micro Encapsulated & Form-Stable Phase Change Materials for High Temperature Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **217**, 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.064>
- [23] 朱雯, 苏云, 陈若颖, 等. 相变微胶囊涂层织物在热防护服中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 180-185.
- [24] 刘国金, 石峰, 陈新祥, 等. 聚氨酯/相变蜡蓄热调温功能整理剂的制备及其在棉织物上的应用[J]. 纺织学报, 2020, 41(7): 129-134.
- [25] 刘威, 曹春娥, 陈云霞, 等. 溶胶凝胶法制备 $BaM_{2-x}Ni_xSi_2O_7$ ($M = Zn, Mg$) 红紫色料及 $Ba_{1-x}Sr_xZn_{1.6}Ni_{0.4}Si_2O_7$ 蓝紫色料[J]. 中国陶瓷, 2021, 57(12): 83-92.
- [26] 陈俊英, 周航宇, 白净, 等. 复合 TiO_2-SiO_2 光催化剂的制备及性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 113-119.
- [27] 范世龙, 姚伯龙, 王露, 等. 溶胶凝胶燃烧法制备 $CoCuMnO_x$ 太阳能吸收涂层[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(12): 954-959.
- [28] 周亚丽. 氧化石墨烯改性硅-铝复合溶胶凝胶涂层的制备与性能研究[J]. 中国涂料, 2021, 36(4): 59-63.
- [29] Ji, R., Wei, S., Xia, Y.P., *et al.* (2020) Enhanced Thermal Performance of Form-Stable Composite Phase-Change Materials Supported by Novel Porous Carbon Spheres for Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, **27**, Article ID: 101134. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101134>
- [30] Sari, A., Bicer, A., Al-Sulaiman, F.A., *et al.* (2018) Diatomite/CNTs/PEG Composite PCMs with Shape-Stabilized and Improved Thermal Conductivity: Preparation and Thermal Energy Storage Properties. *Energy and Buildings*, **164**, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.009>
- [31] 王凯, 闫霆, 蒯子函, 等. 硬脂醇/ Co_3O_4 /膨胀石墨复合相变材料的制备及性能[J]. 精细化工, 2021, 38(9): 1808-1812+1818.
- [32] Zhang, Y., Wang, J.S., Qiu, J.J., *et al.* (2019) Ag-Graphene/PEG Composite Phase Change Materials for Enhancing Solar-Thermal Energy Conversion and Storage Capacity. *Applied Energy*, **237**, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.075>
- [33] Lu, Y., Xiao, X.D., Fu, J., *et al.* (2019) Novel Smart Textile with Phase Change Materials Encapsulated Core-Sheath Structure Fabricated by Coaxial Electrospinning. *Chemical Engineering Journal*, **355**, 532-539. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.189>
- [34] Hossain, M.S., Pandey, A.K., Selvaraj, J., *et al.* (2019) Two Side Serpentine Flow Based Photovoltaic-Thermal-Phase Change Materials (PVT-PCM) System: Energy, Exergy and Economic Analysis. *Renewable Energy*, **136**, 1320-1336. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.097>
- [35] 胡叶广, 张成, 周超英, 等. 太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9):

3421-3427.

- [36] 刘国金, 石峰, 张国庆, 等. 相变蜡@聚乙烯醇储能调温整理液的制备及其在棉织物上的应用[J]. 材料工程, 2020, 48(12): 97-102.
- [37] 张东尧, 白开皓, 李传常. 复合相变织物的制备及应用[J]. 材料导报, 2022, 36(8): 170-175.
- [38] 陆少锋, 辛成, 胡欢鸟, 等. 聚脲微胶囊相变材料的制备及在棉织物上的应用[J]. 印染, 2018, 44(12): 12-16.
- [39] 孙素英, 臧镇. 余热发电在工业余热回收中应用的探讨[J]. 现代冶金, 2016, 44(5): 41-43.
- [40] Merlin, K., Soto, J., Delaunay, D. and Traonvouez, L. (2016) Industrial Waste Heat Recovery Using an Enhanced Conductivity Latent Heat Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **183**, 491-503. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.007>
- [41] 王晋达, 周志刚, 刘京, 等. 工业余热回收储备系统的经济优化配置[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 14-20+42.
- [42] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020 [J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(2): 1-6.
- [43] Liu, J., Liu, Y., Yang, L., *et al.* (2020) Climatic and Seasonal Suitability of Phase Change Materials Coupled with Night Ventilation for Office Buildings in Western China. *Renewable Energy*, **147**, 356-373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>
- [44] Yang, H.Y., Wang, Y.Z., Yu, Q.Q., *et al.* (2018) Composite Phase Change Materials with Good Reversible Thermochromic Ability in Delignified Wood Substrate for Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **212**, 455-464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.006>
- [45] Zhou, Y., Wang, S.C., Peng, J.Q., *et al.* (2020) Liquid Thermo-Responsive Smart Window Derived from Hydrogel. *Joule*, **4**, 2458-2474. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.09.001>
- [46] Cui, Y.Y., Ke, Y.J., Liu, C., *et al.* (2018) Thermochromic VO₂ for Energy-Efficient Smart Windows. *Joule*, **2**, 1707-1746. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.06.018>
- [47] Navarro, L., De Gracia, A., Castell, A., *et al.* (2015) PCM Incorporation in a Concrete Core Slab as a Thermal Storage and Supply System: Proof of Concept. *Energy and Buildings*, **103**, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.028>