

相变石膏板制备及其在建筑墙体中应用的研究进展

刘凤利^{1,2}, 朱教群¹, 马保国¹, 周卫兵¹, 李元元¹

(1. 武汉理工大学, 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070; 2. 河南大学材料与结构研究所, 河南 开封 475004)

摘 要: 相变储能已成为太阳能利用领域的研究热点, 将相变储能材料应用于建筑围护结构对建筑节能具有重要意义。介绍了适用于建筑节能领域的相变材料的主要性能要求, 评述了相变材料选择、改性复配和封装的国内外研究现状, 阐述了相变材料与石膏基材的 3 种复合方法, 讨论了相变石膏板在建筑墙体中的主要应用方式。探讨了当前研究中存在的主要问题, 并指出了今后研究发展的方向。

关键词: 相变材料; 石膏; 相变墙板; 围护结构; 建筑节能

中图分类号: TU599 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2016)08-1178-14

网络出版时间: 2016-07-22 09:02:04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20160722.2102.015.html>

Research Progress on Preparation and Application of Gypsum Phase Change Wallboard in Building Wall

LIU Fengli^{1,2}, ZHU Jiaoqun¹, MA Baoguo¹, ZHOU Weibing¹, LI Yuanyuan¹

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Material and Structure, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Phase change energy storage has become the most promising aspect in the application of solar energy, and the application of phase change materials (PCMs) in building envelope for building energy-saving has attracted much attention. The performance of PCMs suitable for construction energy conservation field was discussed. The development on the choice, modification, compounding and encapsulation of PCMs was reviewed. Three methods of compounding PCMs and gypsum matrix were introduced. The major applications of gypsum phase change wallboard in building envelope were summarized. In addition, the existing problems and the further development orientation were also proposed.

Keywords: phase change material; gypsum; phase change wallboard; building envelope; building energy-saving

近几十年, 我国经济高速发展, 能源消耗量巨大, 同时带来了严重的环境问题。节能减排、遵循环保、走可持续性发展路线是当务之急。建筑业具有“量大面广”、耗材量大和耗能高的特点。我国建筑能耗占社会总能耗的 1/3 以上, 且节能水平远低于发达国家。建筑节能对现阶段“十三五”规划的顺利实施具有重要作用。而建筑节能的关键是做好围护结构的设计和相应节能材料的研发。

石油、天然气等不可再生能源危机, 使发展太

阳能、风能等清洁能源成为研究热点。由于太阳能等新能源具有能量大、间歇性强等特点, 发展储能技术和开发储能材料成为新能源合理利用的关键。储能技术可有效改变能源在时间、空间上的分配, 从而达到节能的目的。能量储存通常包括显热、潜热和化学反应储能, 其中潜热储能(又称相变储能)广受关注且应用前景广阔。相变储能是指相变材料(PCM)在不同环境温度下通过吸热或放热发生相变, 从而进行能量的储存或释放。相变材料是一种

收稿日期: 2016-03-09。 修订日期: 2016-05-07。

基金项目: 国家自然科学基金(No.51206125); 湖北省科技支撑计划(2014BAA134, 2015BAA107)。

第一作者: 刘凤利(1978—), 女, 博士研究生, 副教授。

通信作者: 朱教群(1964—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2016-03-09. Revised date: 2016-05-07.

First author: LIU Fengli (1978-), female, Doctor candidate, Associate Professor.

E-mail: lfl@whut.edu.cn

Correspondent author: ZHU Jiaoqun (1964-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhujiaoq@whut.edu.cn

高效的储能物质, 具有储能密度大、效率高、相变完成前温度基本不变等优点, 其单位体积蓄热量是显热蓄热材料如水、岩石等的 5~14 倍^[1]。与显热材料相比, 储存相同能量时, 相变材料自身温度变化范围小, 单位质量材料储存 300 kJ 能量温度上升值 (0 °C 时测定): 正十八烷 30 °C, 水 72 °C, 混凝土 300 °C^[2]。另外, 在相变过程中, 相变材料在储存或者释放能量的同时, 自身温度在相变完成前基本保持恒定, 即形成较宽的温度平台^[3], 在热量的传输过程中将能量进行储存, 兼具热阻和热容(储能)的能效^[4], 并延长能量传输的时间。将相变材料与建筑材料复合, 制成可应用于建筑围护结构的相变储能建筑材料^[5], 能够将太阳能、室内供热或制冷能量以相变潜热的形式进行储存, 实现能量在不同时间的转换和利用, 同时达到提高建筑围护结构的蓄热能力和热惰性、降低室内温度波动、提高居住舒适度和节能降耗的目的, 已成为近年来国内外研究的热点。

另外, 石膏是人类应用最早的胶凝材料之一。石膏及其制品的微孔结构和加热脱水性, 使之具有优良的隔音、隔热、调湿和防火性能, 属于绿色环保型建材, 广泛应用于制备各类建筑板材。我国石膏矿产储量居世界首位, 总量约 5.7×10^{10} t, 且分布广泛。石膏可作为良好的基体与相变材料进行复合, 得到石膏基相变复合材料, 即一种兼具环保和节能的新型建筑功能材料。国内外学者已对此进行了广泛的研究, 本文对相变石膏板的制备及其在建筑墙体中应用的研究现状进行了总结分析, 对存在的热点问题进行了探讨, 并提出了今后的研究发展方向。

1 相变材料选择及改性

影响相变材料选择与应用的主要因素包括相变温度、相变潜热、热导率、比热容、密度和价格等。相变潜热、比热容越大, 材料储存潜热、显热的能力越强, 储热密度越大。导热系数越大, 储、放热速度越快, 效率越高。当两种材料的相变潜热和比热容均相当时, 密度较大者, 其单位体积储热量较高。

应用于建筑墙体时, 相变材料选择应根据应用条件及工况的不同, 遵循以下原则: 相变温度合适, 相变潜热大, 导热性能良好, 相变可逆性好, 体积变化小, 热稳定性好, 无毒、无腐蚀作用, 对环境友好, 来源广泛, 价格便宜等。美国 Dow 公司对近两万种相变材料进行了测试, 发现具有适宜相变温

度和相变潜热的水合盐、以及一些有机相变材料具有进一步研究利用的价值^[3]。相变复合建筑构件主要可有以下 3 种应用: 1) 寒冷、严寒地区冬季蓄热、储能、调温; 2) 炎热地区夏季蓄冷、储能、调温。二者皆主要节约利用主动能源; 3) 与上述两种情况不同, 采用开放系统设计, 主要利用太阳能, 对全年温差较小地区建筑室内环境, 进行调节改善。适用于围护结构的相变温度选择原则: 工程所在地区昼夜温差宜覆盖相变温度范围, 且高于夏季城市最低温度 2 °C 左右。若结合夏季夜间通风降温时, 相变材料作为蓄冷介质, 其相变温度不能低于夜间室外空气的最低温度^[6]。有研究表明, 外界环境温度与相变材料的相变温度差值在 3~5 °C 为宜^[7]。由上可知, 对于不同地区和不同应用条件, 所要求的相变温度不同。因此, 相变材料的选择应根据地区和应用条件进行调整。为扩大相变墙的温度调节范围, 或者设计冬夏适用的相变建筑构件, 可以采用分级相变方案, 将不同相变温度的两种或多种相变材料复合到同一建筑构件中。

对于实际工程, 相变材料遴选通常根据其不同分类方式进行, 并根据具体设计要求进行改性。以下对不同种类相变材料的优劣进行分析, 给出应用建议。

根据相变温度的不同, 可分为低温、中温和高温相变材料, 低温相变材料的相变温度 ≤ 100 °C。我国《室内空气质量标准》对室内温度标准值有明确规定: 夏季空调房为 22~28 °C, 冬季采暖房为 16~24 °C, 达到上述标准时人体感觉舒适^[8]。Cabeza 等^[9]对应用于主、被动建筑储能系统时, 相变材料的相变温度区间进行了划分: 1) 21 °C 以下, 用于建筑蓄冷; 2) 22~28 °C, 用于建筑蓄热, 以调节建筑热舒适性; 3) 29~60 °C, 用于主动式储热系统中热水供应等。因此, 适用于建筑围护结构的相变材料均属于低温相变材料。常用的有石蜡、脂肪酸、多元醇等, 其中 C10~C18 双碳饱和脂肪酸(包括癸酸 CA、月桂酸 LA、肉豆蔻酸 MA、棕榈酸 PA 和硬脂酸 SA), 由于其相变点稳定、多数可从植物中提取(具有环保、可再生性)等, 成为研究热点。杨致远等^[10]制备了癸酸/月桂酸二元复合酸, 其相变温度为 19.0 °C, 相变潜热为 130.1 kJ/kg, 经过 4 000 次循环后, 相变温度下降了 0.8 °C, 相变潜热降低为初始值的 92.08%, 热稳定性良好, 认为适合应用于建筑节能领域。黄友林^[11]研究表明: 癸酸含量为 40%~60% 的癸酸/月桂酸复合相变材料的体积膨胀

率在 7.5% 左右, 相变温度在 20~30 °C 之间, 且相变潜热较高, 可用作建筑节能复合相变储能材料。

相变反应按照相变转变方式分为: 固-液、固-固、固-气和液-气相变。由于后两种相变方式在相变过程中产生大量气体, 体积变化大, 难以控制, 研究较少。对于固-固相变材料, 在不同温度条件下, 晶体发生有序-无序的可逆结构转变, 从而进行能量的存储和释放, 例如多元醇类。这类材料相变过程中无液相产生, 体积变化小, 无过冷和相分离现象, 无腐蚀, 可直接加工成型, 但其相变温度较高, 在蓄热地板中应用较多。固-液相变材料, 具有相变潜热大、体积变化小等特点, 是目前研究的热点。但存在以下 2 个问题: 1) 易泄漏, 相变过程中有液相产生, 造成长期储能性能衰减等问题。2) 导热系数低, 通常固-液相变材料的热导率较低, 储、放热速度慢。因此, 对固-液相变材料的封装、复合定型以及提高导热性能等方面的研究较多, 并取得了一定的研究成果, 为固-液相变材料在建筑材料中的应用奠定了基础。吴晟等^[12]研究了固-液相变材料与无机多孔材料的定型复合方法, 以及定型相变材料的

包覆方法, 其利用真空吸附法, 将相变温度在 25 °C 左右的 25 号石蜡与膨胀珍珠岩复合, 得到了相变温度和相变潜热分别为 25.05 °C 和 128.93 kJ/kg 的定型相变材料, 通过苯丙乳液包覆后其稳定性良好。闫全英等^[13]通过对不同种类和特性的相变材料进行分析, 认为石蜡和多元醇分别是适用于建筑围护结构中的固-液和固-固相变材料。

根据化学成分的不同, 相变材料可分为无机、有机和共晶混合物。无机相变材料, 如水合盐, 优点是蓄热密度大、相变温度接近室温、价格低以及导热性能稍高。但是其在相变过程中存在过冷、相分离等问题, 在若干次溶解-固化循环后蓄热密度衰减率高。此外, 无机相变材料与建筑材料基体的相容性较差, 如硫酸盐对混凝土具有较强的侵蚀性, 故应用受到了限制。有机相变材料具有相变温度适中、相变潜热较大、腐蚀性较小、性能比较稳定、密度小、成本低等特点^[14], 在建筑节能领域广受关注。石蜡、脂肪酸等是研究较多的适用于建筑围护结构的有机相变材料。表 1 列出了适用于相变墙体的部分有机相变材料的热性能。

表 1 适用于相变墙体的有机相变材料的热性能
Table 1 Thermal properties of organic PCMs suitable for PCW

PCMs	Melting temperature/°C	Heat of fusion/(kJ·kg ⁻¹)	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Density/(kg·m ⁻³)	References
n-Heptadecane	19	240	0.21		[15]
n-Octadecane	28	179	0.2	750(liquid),870(solid)	[16]
Paraffin(RT-18)	15-19	134	0.2	756	[17]
Paraffin(RT-20)	22	172	0.2		[18]
Paraffin(RT-27)	28	179	0.2	800	[19]
Capric acid	30.2	142.7	0.2(liquid),0.12(solid)	815(liquid),752(solid)	[20]

建筑围护结构材料宜无毒、不易燃, 符合安全、环保的要求, 但多数有机材料易燃, 并在燃烧过程中释放有毒烟雾, 解决方案可以考虑使用燃点高的封装材料对相变材料进行封装, 或掺阻燃剂等等。另外, 有机相变材料的主要不足在于导热系数偏低, 常用相变材料的热导率一般为 0.2~0.6 W/(m·K)^[21], 如, 石蜡的导热系数只有 0.21 W/(m·K), 故增强相变材料导热性的相关研究较多。罗宇飞^[22]研究了癸酸/月桂酸二元相变材料的导热性能, 结果表明: 导热系数随温度的升高而有所升高, 但当温度升高到一定阶段后, 材料进入稳定状态, 导热系数保持稳定。添加一定比例的硅藻土可有效改善其热导率, 最佳掺量为 20%, 并认为该复合相变材料适用于建筑节能领域。

已有文献表明, 固-液相变材料和有机相变材料

适用于建筑节能领域, 针对其应用过程中存在的问题, 相变材料的封装定型和导热增强技术是制约相变材料选择和应用的关键因素。其中, 目前常用的提高相变材料传热性的方法有两种: 1) 在储能构件中采用金属翅片结构或蜂窝结构来扩大换热面积^[23], 此种方法改变了传统建筑构件的内部构造, 加大了施工工艺的复杂程度, 应用受到限制。2) 在相变材料中掺加高导热材料, 如微米尺度的金属粉末、石墨和碳纤维等^[24], 纳米尺度的碳纳米管、氮化钛、氮化硼、碳化硅、氧化硅、氮化铝、氧化铝和银等多种金属/氧化物/氮化物纳米颗粒等^[25-32]。这种通过材料复配进行复合相变建筑材料导热增强的方法, 广受青睐, 研究应用空间较大。周卫兵等^[33]采用真空吸附法制备了膨胀石墨(EG)/硬脂酸(SA)复合相变储热材料, 导热性能测试结果显示, EG

含量为 8% 的 EG/SA 复合材料热导率由纯 SA 的 $0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到 $2.52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。丁晴等^[34]以石蜡和十四醇为复合相变材料, 分别添加碳纳米管加银纳米颗粒、碳纳米管加氧化铝纳米颗粒的两种混合纳米填料, 探讨了不同混合纳米填料对复合相变材料导热系数的影响规律。表 2 列出了不同种类石墨, 在不同掺量情况下对石蜡导热系数和密度的影响。

表 2 相变材料的导热增强^[35]Table 2 Thermal conductivity enhancement of PCMs^[35]

Material	Mass ratio/%	Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Composite density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
Paraffin/synthetic graphite	95:5	0.316	0.967
Paraffin/synthetic graphite	90:10	0.409	1.034
Paraffin/synthetic graphite	85:15	0.569	1.101
Paraffin/synthetic graphite	80:20	0.906	1.168
Paraffin/industrial graphite	95:5	0.289	0.952
Paraffin/industrial graphite	90:10	0.342	1.003
Paraffin/industrial graphite	85:15	0.383	1.055
Paraffin/industrial graphite	80:20	0.428	1.107

2 相变材料的复配

由于单一相变材料在应用中存在以下问题: 不能满足所要求的相变温度; 相变潜热低, 导致节能效率低; 导热系数低, 影响传热性。故在实际应用中通常考虑进行相变材料的复配, 以改善相变材料性能并提高其稳定性。

当单一相变材料不能满足热工性、经济性等要求时, 可将两种或多种不同相变材料按不同比例掺

配, 得到二元或多元复合相变材料, 使其主要热物性参数, 以满足具体的应用要求。主要复配方式有两种^[36]: 将两种或两种以上多元醇混合复配, 得到相变温度和相变焓满足要求的“共融合金”; 配制“低共熔混合物”, 即混合物的相变温度低于任一未掺混前相变材料的相变温度, 例如, 将两种脂肪酸按一定比例混合, 可得到具有较低相变温度的二元复合酸。根据最低共熔原理, 为得到较高的相变焓和适用于建筑墙体的最低共熔温度, 癸酸成为最佳复配原料之一, 以下文献利用癸酸与月桂酸, 制备了适用于被动式建筑储能的二元复合酸。Shilei 等^[37]将摩尔分数为 65.12% 的癸酸(相变温度: $31.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 相变潜热: 130.0 kJ/kg)和 34.88% 的月桂酸(相变温度: $43.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 相变潜热: 145.5 kJ/kg)混合, 得到了相变温度和相变潜热分别为 $19.67 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 126.562 kJ/kg 的二元复合酸。杜开明^[38]制备了相变温度在 $25\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间的癸酸/月桂酸二元复合酸。刘靛佩^[39]研究表明, 当癸酸/月桂酸摩尔分数分别取 65% 和 35% 时, 二元相变材料的相变温度和相变潜热分别为 $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 128.6 kJ/kg ; 当分别取 40% 和 60% 时, 其相变温度和相变潜热分别为 $26.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 132.7 kJ/kg 。表 3 列出了部分相变材料二元复配的例子。此外, 为使室内温度保持恒定, 美国于 1999 年开发了一种固液共晶相变材料, 其固液共晶温度是 $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当温度高于 $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 相变材料从环境吸热, 晶相熔化, 储存热量; 当环境温度低于 $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 相变材料释放热量, 结晶固化^[40]。综上所述, 多元相变材料将成为今后研究开发的热点。

表 3 二元相变材料性能

Table 3 Performance of binary PCMs

Binary PCMs	Mass ratio	Melting temperature/ $^\circ\text{C}$	Heat of fusion/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	References
C16/C18	34:66	19.5–22.5			[41]
CA/MA	(78±2):(20±2)	20.5±1.5	153±15	0.20±0.02 (solid), 0.23±0.03 (liquid)	[42]
CA/LA	20:80	21.4	177		[43]
CA/PA	30:70	21.6	202		[43]
CA/SA	30:70	23.8	213		[43]
CA/LA	61.5:38.5	16.4	117.1		[44–45]
CA/PA		26.2	177.0	0.2	[46]
CA/1-dodecanol		26.5	126.9	0.2 (liquid), 0.12(solid)	[47]
CA/1-dodecanol		27.0	126.9		[48]

Note: CA, LA, MA, PA and SA are the abbreviation of capric acid, lauric acid, myristic acid, palmitic acid and stearic acid respectively.

3 相变材料的封装

相变材料与石膏基体直接复合, 存在相变材料渗漏、储热性能衰退和耐久性不良等问题。解决上

述问题的有效方法是进行相变材料的封装, 得到复合相变材料或相变材料制品。封装方法可分为两种: 1) 微观封装, 是指通过制备相变微胶囊、定型相变材料等, 将相变材料包裹在较小的容腔、微孔隙等

内部, 得到复合相变材料。复合相变材料通常包括相变材料(工作介质)和支撑材料(封装定型介质)两部分。常见的支撑载体有微胶囊、多孔材料、网状结构或层状结构材料; 2) 宏观封装, 是将相变材料装入大体积的容器中, 得到相变材料制品。

3.1 相变微胶囊

利用天然或合成的聚合物将相变材料包覆起来, 形成具有核-壳结构的胶囊化材料, 其粒径一般在 2~1 000 μm 。相变材料被封装在微胶囊内腔内, 具有相变反应稳定、相变材料不易泄露等优点, 可有效解决相变材料使用过程中的泄露、腐蚀等缺点, 提高了相变材料的使用效率, 但要求胶囊壁材满足一定的强度和韧性要求。常用制备方法包括: 界面聚合法、原位聚合法、溶液聚合法、乳液聚合法、相分离法、溶剂蒸发法、喷雾干燥法等^[49-56]。

文献[57]采用界面聚合法, 得到了适用于建筑墙体的石蜡/聚脲(聚氨酯)相变微胶囊。罗武生等^[58]

以质量比为 3:7 的固体石蜡与液体石蜡为芯材, 通过界面聚合法制备成石蜡/聚脲相变微胶囊, 研究表明: 核壳质量比为 2:1 时, 石蜡/聚脲相变微胶囊的熔点为 28.1 $^{\circ}\text{C}$, 相变焓为 58.41 kJ/kg, 包覆效率为 87.5%, 粒径约为 4.32 μm , 粒径分布均匀。文献[59]通过原位聚合法制备了石蜡(芯)/二氧化硅(壁)相变微胶囊, 并研究了其相变特性。文献[60]用 SiO_2 型乳液, 通过乳液聚合法制备相变微胶囊, 并分析了其形成机制。Ahmet 等^[61]以质量比 2:1 的正十八烷-正二十四烷的低共熔混合物为芯材, 以聚苯乙烯为壁材, 制备了 C18-C24/PS 相变微胶囊, 粒形为非规则球状, 粒径范围 0.01~115 μm , 平均粒径 4.20 μm , 相变温度 25.96 $^{\circ}\text{C}$, 相变潜热 156.39 kJ/kg, 导热系数 0.19 W/(m·K), 可经受 5 000 次热循环, 具有良好的热稳定性、耐久性和相变可逆性。表 4 对部分文献中研究的相变微胶囊的性能进行了总结。

表 4 相变微胶囊性能
Table 4 Performance of microencapsulated PCMs

Material	Encapsulation ratio/%	Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	Heat of fusion/(kJ·kg ⁻¹)	Average diameter/ μm	Microencapsulation method	References
n-Heptadecane/PMMA	38.0	18.2	81.5	0.26	Emulsion polymerization	[62]
n-Octadecane/PMMA	75.3	23.2	156.4		Suspension-like polymerization	[63]
Paraffin/PMMA		26.2	84.0	0.20	Sol-gel	[64]
n-Dodecanol/PMMA	82.2	18.2	98.8	0.15	Miniemulsion polymerization	[65]

Note: PMMA represents polymethyl methacrylate.

以上文献通过将相变材料胶囊化, 很好地解决了其在液相时的泄漏问题, 但同时带来储热能力和热传导率的降低。为改善热导率, Sangphil 等^[66]通过界面聚合法, 将磁性 Fe_2O_3 纳米颗粒埋置到石蜡/聚脲相变微胶囊的外壳内, 制备了磁性相变纳米胶囊, 提高热导率的同时, 降低了石蜡的过冷度。

相变微胶囊法存在制备工艺复杂、成本高、拌合时胶囊壁材易破碎, 以及聚合物壁材与无机建筑材料基体粘结性差、劣化复合材料力学性能等问题。能否简化制备工艺、降低生产成本、提高包覆率、改善壁材的力学性能和耐久性, 以及提高其与建筑材料基体的相容性, 是制约相变微胶囊大规模应用的关键问题。

3.2 定型相变材料

定型相变材料是 Inaba 等^[67]在 1997 年提出的, 由支撑材料和相变材料复合而成, 宏观上表现为固-固相变。常用的支撑材料有多孔材料、层状材料和高分子材料等。

3.2.1 多孔材料基定型相变材料 利用多孔材料基体的物理吸附作用, 包括多孔结构形成的压力差、分子间力和氢键等, 将液态相变材料嵌入多孔材料内, 以避免固-液相变时, 液体相变材料的渗漏, 提高热循环稳定性的同时, 避免了工作介质的损耗以及对建筑材料基体的腐蚀、劣化等问题。常见的多孔材料有膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、陶粒和硅藻土等。温虹等^[68]以聚乙二醇(PEG)为原料, 复配得到 PEG600/PEG1 000 二元共融复合相变材料, 采用膨胀珍珠岩为载体, 制备了聚乙二醇/膨胀珍珠岩复合相变材料, 并进行了性能研究。为提高支撑材料的吸附能力、定型相变材料的热性能和稳定性等, 研究者开展了以下研究: 1) 对多孔支撑材料的改性。王佼等^[69]以二元相变材料(硬脂酸丁酯/硬脂酸甲酯)为工作介质, 硅藻土为支撑材料, 研究了硅藻土的不同前处理工艺参数对复合相变材料性能的影响, 给出了硅藻土的优化改性方法。2) 相变材料最佳容留量和定型相变材料防渗漏包覆。文献[12]制备了

膨胀珍珠岩/石蜡定型相变材料, 其优化参数, 石蜡与膨胀珍珠岩的质量比为 2:1, 以苯丙乳液为包覆材料, 浓度取 20%。另外, Sayanthan 等^[70]分别制备了石蜡/EPW(膨胀珍珠岩)、石蜡/EPO(疏水性处理后的膨胀珍珠岩)定型相变材料, 结果发现, 石蜡质量分数为 35%时, 石蜡/EPW 与建筑材料基体复合时出现明显渗漏; 而对于石蜡/EPO, 石蜡质量分数达到 50%时仍无渗漏。3) 制备工艺优化。赵婧等^[71]以月桂酸和石蜡为相变材料, 以页岩陶粒为吸附基体, 采用逐步加热吸附法制备了页岩陶粒复合相变储能骨料。

3.2.2 层状材料基定型相变材料 是指利用层状材料为支撑材料, 吸附固定相变材料。常用的层状材料有膨胀石墨、膨润土和蒙脱土等。例如, 蒙脱土具有层状结构(由 Si—O 四面体和 Al—O 八面体组成硅酸盐晶体), 其平均晶片厚度小于 25 nm, 呈

亲水性, 遇水易分散膨胀。由于层间阳离子的水合作用以及外部水分子进入层内的渗透膨胀作用, 导致层间距不断增大, 在高速剪切搅拌下可使结合片层剥离, 形成散落的纳米级厚度的单体蒙脱土片层^[72]。根据蒙脱土的层状结构特点, 可以将其与相变材料复合, 制备性能良好的插层相变储能材料^[73], 也可以将蒙脱土进行片层剥离, 再与有机材料共混, 以实现有机材料的包覆或者性能的改进^[74]。高安旗等^[75]以三水乙酸钠/尿素共熔物、纳米蒙脱土为原料, 采用熔融插层法制备低温水合盐复合相变储能材料, 结果表明, 纳米蒙脱土片层呈剥离形态, 并相互搭接, 形成腔体包裹复合盐; 同时纳米蒙脱土可作为成核剂, 使复合盐过冷度降低, 并避免了相变分层。方晓明等^[76]制备了硬脂酸/膨润土纳米复合相变材料, 其传热性能优于纯硬脂酸。表 5 对部分无机支撑材料类定型相变材料的性能进行了总结。

表 5 定型相变材料性能(无机支撑材料)
Table 5 Performance of shape-stabilized PCMs (inorganic supporting materials)

PCMs	Supporting material	Mass ratio	Melting point/°C	Heat of fusion/(kJ·kg ⁻¹)	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	References
CA-LA	Expanded vermiculite	40:60	19.10	61.00		[77]
CA-PA	Expanded vermiculite	40:60	23.50	72.00		[78]
CA-PA	Expanded vermiculite		23.50	72.10		[79]
CA-SA	Expanded vermiculite		25.60	71.50		[79]
Octadecane	Expanded vermiculite		26.10	142.00		[80]
Paraffin	Expanded vermiculite		27.00±0.10	77.60±4.30		[81]
ETP	Diatomite	57:43	19.60	111.00		[82]
CA-LA	Diatomite		16.70	66.80		[44-45]
ETP	Expanded perlite	62:38	19.80	119.00		[82]
n-Octadecane	Molecular sieve	33:66	28.33	101.14		[83]
Dodecanol	Kaolin	24:76	19.14	48.08		[84]
Dodecanol	Cement	9:91	21.06	18.39		[85]
Dodecanol	GGBS	11:89	21.16	22.51		[86]
XPP	Gypsum	22:78	20.25	43.44	0.21	[87]
XPP	Cement	17:83	20.51	27.55	0.22	[87]
XPP	Perlite	67:33	20.62	106.60	0.11	[87]
XPP	Diatomite	48:52	20.61	77.43	0.10	[87]
XPP	Vermiculite	42:58	20.45	59.56	0.11	[87]

Note: 1: ETP represents eutectic mixture of tetradecanol and palmitic acid; 2: GGBS represents ground granulated blast furnace slag; 3: XPP represents xylitol penta palmitate.

3.2.3 高分子基定型相变材料 将相变材料与高分子材料在一定温度下熔融共混, 利用二者之间的熔点差, 使高分子材料先于相变材料凝固并形成三维空间网络结构, 将相变材料封装于其三维网络结构中, 而形成的一种定型相变材料。当温度达到相变材料相变点时, 低熔点的相变材料发生相变, 而

高熔点的支撑材料仍保持稳定, 其三维网络结构可防止液态相变材料发生泄露。常用的高分子材料有低密度聚乙烯、高密度聚乙烯、聚亚安酯等。Trigui 等^[88]以低密度聚乙烯为支撑材料, 制备了石蜡/低密度聚乙烯定型相变材料, 研究了其热工性能及在被动式太阳能房墙体装置中的应用, 但由于相变材料

和支撑材料均为有机材料，导热系数低，降低了换热效率，单独应用潜力不大。鉴于此，不少学者进行了高分子基定型相变材料的导热增强研究，其中石墨由于其优良的导热性(导热性超过钢、铁、铅等金属材料)而成为最佳导热增强载体之一。杨懿政^[89]通过高温熔融共混法制备了月桂酸/低密度聚乙烯(LA/LDPE)定型相变材料，并通过添加膨胀石墨增强了其导热性能。刘娜^[90]以正十八烷为相变材料、聚乙烯为支撑材料、膨胀石墨为导热填料制备了高导热定型相变材料。刘菁伟等^[91]采用熔融共混法

制备高密度聚乙烯(HDPE)/膨胀石墨(EG)/石蜡导热定型相变材料，所得复合相变材料渗漏率低、导热率高。EG 含量为 15%时，渗漏率小于 0.6%，导热率为 1.265 W/(m·K)，且 EG 掺量对 PCM 的相变焓影响不大。Cheng 等^[92]同样利用石墨、石蜡复合材料和高密度聚乙烯制备了导热定型相变材料。结果表明：石墨掺量为 16%时，导热系数提高了 67.74%；膨胀石墨掺量为 1%时，导热系数提高了 87.1%。膨胀石墨表现出较好的导热增强作用。表 6 列出了部分高分子基定型相变材料的性能。

表 6 定型相变材料性能(有机支撑材料)^[93-94]
Table 6 Performance of shape-stabilized PCMs (organic supporting materials)^[93-94]

Material	Mass ratio	Total heat(sensible and latent heat)/ (kJ·kg ⁻¹)	Specific heat capacity/ (J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Density/ (g·cm ⁻³)
LLDPE/Paraffin wax/ EG	55:40:5	98.0	2.7	0.502	0.933
LLDPE/Paraffin wax/ EG	50:40:10	94.0	2.8	0.988	0.961
LLDPE/Paraffin wax/ EG	45:40:15	91.0	2.7	1.329	0.989
LLDPE/Paraffin wax/ EG	45:50:5	113.0	2.8	0.483	0.926
LLDPE/Paraffin wax/ EG	40:50:10	119.0	3.1	0.974	0.965
LLDPE/Paraffin wax/ EG	35:50:15	103.0	2.7	1.278	0.987
LDPE/Paraffin wax	90:10	104.0	2.8	0.211	0.834
LDPE/Paraffin wax	80:20	105.9	1.5	0.204	0.883
LDPE/Paraffin wax	70:30	118.5	2.9	0.198	0.874
LDPE/Paraffin wax	60:40	127.0	3.7	0.189	0.849
LDPE/Paraffin wax	50:50	152.7	3.6	0.180	0.667
LDPE/Paraffin wax	40:60	159.0	4.1	0.176	0.626

Note: 1: LLDPE represents linear low density of polyethylene; 2: EG represents expanded graphite; 3: LDPE represents low density of polyethylene.

3.3 宏观封装

宏观封装是指将相变材料封装在宏观尺度的管、袋子等容器中。其原理简单，但需单独加工或直接购买成品。表 7 列出了部分宏观封装相变材料的性能。

另外，还可将相变材料灌注到砌块等传统建筑

材料的凹槽或空腔内，然后以浆体材料封堵，起到封装的作用。张源^[96]研发了一种填充石膏基相变材料的复合砌块，通过合理选择孔型结构，在保证复合砌块的力学性能的基础上，提高了其储热性能。解决了相变材料泄露，以及传统空心砌块墙体热容较低的问题。

表 7 宏观封装相变材料性能^[99]
Table 7 Performance of macro-encapsulation PCMs^[99]

PCMs	Capsulation container	Thermal conductivity of solid PCM/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Stored energy/kJ
Commercial organic	aluminum panels	0.16	24 395
Commercial inorganic	aluminum pouches	0.70	31 584

由目前研究现状可知，通过复配、封装等方法制备复合相变材料是主要的研究和发展方向。多种天然无机多孔载体材料和新型定型相变材料的开发利用，以及新型分散剂、表面活性剂、增强剂等外加剂的迅速发展为相变材料应用于建筑构件奠定了基础。

4 相变材料与石膏基体的复合方法

相变材料与石膏基体的复合方法，通常有直接浸渍法、直接混合法和宏观封装嵌入法。

4.1 直接浸渍法

直接浸渍法即将石膏墙板直接浸泡在液态相变

材料中, 利用石膏墙板的高孔隙率, 通过石膏板内微孔的毛细作用力, 将液态的相变材料吸附固定到微孔内。其特点如下: 1) 相对直接混合法, 制备的相变石膏板具有更高的储能密度, 郑立辉等^[97]研究证实, 直接浸渍相变石膏板的相变潜热近似等于石蜡的相变潜热与其在石膏板中的容留量(质量百分比)之乘积。2) 该方法工艺简单、便于对成品建筑材料进行储能复合处理, 缺点是相变材料在石膏板中沿板厚分布不均匀^[98], 通常表面含量高、芯部含量低, 降低了储热性能。3) 多次循环后易渗漏、劣化建筑构件的力学性能, 长期循环后导致储热性能的衰减和耐久性的降低, 限制了其应用。为此, 不少学者对此种相变石膏板的微结构、可匹配相变材料、热性能和长期性能开展了研究。文献^[99]用癸酸/棕榈酸二元复合酸浸泡纸面石膏板, 制备了不同复合酸含量的相变石膏板, 并对比了不同相变石膏板的传热特性。闫全英等^[100]分别选取浸泡癸酸/硬脂酸、固体石蜡/液体石蜡复合相变材料的石膏板, 制备了两种相变储能墙体, 研究了相变墙体在传热周期内表面温度和热流的变化规律。张建武等^[101]用常压物理浸渍法制备了相变储能石膏板, 并研究了其微孔形貌、热性能、储热调温性能和相变循环耐久性。

4.2 直接混合法

将相变材料或微封装相变材料直接与石膏混合制备石膏板, 此种方法的优点是便于控制相变材料的掺入量, 工艺简单, 相变材料在基体中分布均匀, 性质均匀, 蓄热效果好, 适用于制作不同规格形状和尺寸的建筑储能构件等。国外, 随着美国、欧洲高层建筑中对围护墙体轻质、保温、节能等复合性能要求的不断提升, 研究者们对在建筑构件制备过程中, 将微封装相变材料与石膏复合制备轻质节能复合板材, 进行了广泛的研究^[102-108]。国内, 王岐东等^[109]分别以石蜡和硬脂酸丁酯为相变材料, 聚乙烯醇为分散剂, 通过直接混合法分别制备了适用于夏季和冬季的相变储能石膏板, 得出结论, 当相变材料含量为 22%(质量分数)时, 相变储能石膏板的蓄热性能显著提高(为普通石膏板的 10 倍), 耐久性较好, 吸水量大大降低(是普通石膏板的 1/3), 可应用于潮湿环境。曾令可等^[110]制备了十酸-十二酸/二氧化硅定型相变材料, 然后采用直接混合法制备了相变储能石膏板, 并对其性能进行了研究。李悦等^[111]将相变储能材料与石膏直接混合, 掺加钢纤维提高导热系数, 并对相变石膏板的物理、力学及热

工性能进行了研究。新型封装定型技术的不断开发, 将大大推动这一工艺的应用。

4.3 宏观封装嵌入法

赵之贵等^[112]采用直径为 2.5 mm 和 3.5 mm, 长度为(147±2)mm 的聚乙烯毛细管封装十水硫酸钠, 嵌入尺寸为 150 mm×150 mm×9 mm 的石膏板中, 制备了相变储能石膏板, 研究了其储热性能。徐龙等^[113]将相变材料封装于铝复合隔膜中, 形成尺寸为: 175 mm×45 mm×(20-25) mm 的“TCM 管”, 并将其定向排列复合于石膏板内, 作为轻质围护结构的内壁材料, 研究了其对室内热环境的调节作用。宏观封装后嵌入法的不足是, 相变材料在相变传热时与环境接触面积较小, 降低了能量传递效率。

综上所述, 随着高分子、微胶囊技术的发展和新型定型相变材料的研发, 复合相变材料在宏观上表现为固-固相变, 具备潜热大、体积变化小, 物理化学性能和热性能稳定、热导率高、与传统建筑材料复合工艺简单等特点, 直接混合法将成为主要的研究和发展方向。但相变材料与建筑基材的相容性, 二者复合后性能的稳定性和耐久性还有待深入研究与优化。

5 相变石膏板的应用

20 世纪 80 年代, 美国开始将相变材料应用于建筑围护墙体。在建筑围护结构中使用相变墙可达到以下效果: 1) 增大建筑外围护构件的储能容量, 节能降耗, 实现空调和采暖负荷的削峰、移峰, 减小空调负荷与供暖能耗。2) 提高室内舒适度: 降低夏季、冬季室内峰值温度, 减小室内温度的波动范围, 满足人体舒适度要求。3) 达到同等保温节能效果时, 可大大减小墙体厚度、降低墙体自重和增大建筑使用面积。即相对普通围护墙体, 相变墙具有很好的储能、调温和控温性能^[114]。而且相变层位置对相变墙的性能有显著影响, 合理的位置可提升其热性能^[115]。肖伟等研究认为相变墙板可起到很好的隔热作用, 在夏季选择相变温度为 32~33 °C 的相变石膏板效果最佳^[116]; 在冬季相变温度选择为 20 °C 时保温性能最佳^[117]。文献^[118]在脱硫石膏粉中添加 20% 的相变微胶囊, 得到的相变石膏板储能性能显著提升(是普通石膏板的 8 倍)。文献^[119]通过对含相变材料建筑外墙的数值模拟分析, 得出结论: 不同季节、外墙不同朝向以及将相变材料置于外墙不同位置都对相变墙体的传热有影响, 而且不同外界条件对应的相变材料最佳相变温度也不同。常见的

应用方式有以下几种。

5.1 建筑外墙内壁材料

相变石膏板由于强度低、耐候性差,将其用作建筑外墙内壁材料的研究较多,主要有以下3种:

1) 通过搜集不同地区气候数据、材料的热物性测试以及不同建筑参数的选择,利用软件进行相变石膏板用作外墙内壁材料对蓄热调温和节能效果的模拟研究。Ascione等^[120]通过改变相变温度(26~29℃)、墙板厚度和相变材料层位置等参数,模拟研究了在外墙内侧设置相变石膏板储能调温层,对节能和室内舒适度的影响。研究表明,相变温度29℃时效果最佳,最大节能效果为7.2%(土耳其安卡拉),使用过程中的热舒适时间延长率分别为15.5%(西班牙塞维利亚),22.9%(意大利那不勒斯),19.8%(法国马赛),15.8%(希腊雅典)以及20.6%(土耳其安卡拉)。

2) 通过搭建小尺寸模拟房进行研究。文献[113]在楼顶搭建了尺寸为1000mm×800mm×1300mm的箱体房,采用8mm相变复合石膏板作为外墙内壁板,分别对夏冬温度条件下,相变石膏墙板的调温和节能效果进行了研究,得出结论:炎热条件下,相变石膏板可有效控制轻质围护结构建筑室内空气温度波动及上升;最高可降低室内温度8.5℃;低温条件下,最高可提高室内温度4℃;采用相变材料可使空调最大节能率达到65.34%;供暖最大节能率达到77.27%。

3) 实际工况示范研究。Kuznik等^[121]对法国里昂的工程改造项目进行了1年的监测,并与未设置相变石膏板的房屋进行了对比,研究表明:增加相变层可明显改善居住热舒适度,但在一年中有几个气温极端的时间段相变潜热不能被利用,并存在夜间不能完全放热的问题。Becker^[122]对夏季工况下,地中海气候区的轻质建筑、传统实体建筑外墙内侧分别黏贴相变石膏板进行了对比研究,结果显示:相变石膏板在轻质建筑中应用效果更好,节能率可达57%,认为其应用应考虑建筑类型并结合夜间通风。

5.2 建筑外墙蓄热保温材料

相变复合构件中的相变层兼有蓄热(热容)和保温(热阻)的作用,可有效提高建筑构件的热惰性。张维维^[123]在混凝土砌块孔洞中填入相变石膏板,得到复合相变混凝土砌块,并将其运用到建筑外墙中。保证砌块的力学性能的同时,提高了其蓄热性能,解决了空心砌块热容低、热惰性差的问题。另外,随着高层建筑的发展,围护结构的轻质化成为必然选择,如何解决轻质外墙由于热惰性小、保温隔热

性差,导致的能耗增加、室内舒适度降低等问题?部分学者开展了相关研究。张正松等^[124]以相变石膏板作为轻质外墙的储能层兼外保温层,通过数值模拟对相变石膏板和传统聚苯板的保温隔热性进行了对比,得出结论:夏季,相变石膏板布置在外墙外表面可有效提高外墙的隔热性能,当相变温度为28℃时效果最佳。为获得更宽的调温范围、延长室内舒适温度持续时间。柴国荣等^[125]设计了一种递变型外贴式相变墙体,采用多种相变温度递减的相变材料依次贴在墙体外侧,提高了相变墙体外表面温度,增大了墙体外表面的辐射散热量和与大气的对流换热量,在同样情况下比采用单一相变材料的墙体传到室内的热量更少,获得了更好的节能效果。

5.3 建筑内墙

建筑内墙在围护体系中所占比例更大,将相变石膏板同时设置在内墙上,可大大提高储能量和室温调节幅度。Athienitis等^[126]将相变石膏板安装在内墙上,结合实验与数值模拟对其吸、放热过程进行研究,结果表明,实测数据与理论计算结果具有较好的一致性。这种复合墙体可使室内最高温度降低4℃,并可降低室内温度波动。丁理峰^[127]分别对在5个热工分区的建筑中使用相变材料进行了研究,结果表明,内墙中使用相变材料在明显提升室内舒适性的同时,起到了节能降耗的作用,并进行了经济效益分析,给出了不同地区的使用回收期。

此外,Helmut等^[128]制备了相变石蜡石膏板(板厚15mm,石蜡质量分数为20%、相变温度25℃),并将其应用于相变墙体,结合夜间通风蓄冷,研究了相变墙对室内温度调控和墙体传热性能等的影响。关于相变板材与建筑基体复合的方式,李丽莎等^[129]研究认为:相变材料层分层插入比一层插入制成的相变墙体有更好的热惰性。总之,相变石膏板应用于建筑围护墙体,有益于提高墙体的蓄热能力和热惰性,节能环保,其意义是不言而喻的,具有广阔的应用前景。

6 结束语

近年来,相变材料的遴选、复配和改性,相变材料与石膏板的复合技术,相变储能石膏板性能及其在建筑墙体中应用等研究的广泛开展,为相变材料在建筑节能中的应用奠定了很好的基础,但存在研究分散、取材差异大、重复性研究较多,不足以指导大规模工程应用等问题,距离工程推广应用,还有许多技术难题需要攻克。

1) 目前材料成本偏高,限制了其在建筑工程中的大规模应用,适用于建筑围护结构的低价有机相变材料及其封装材料和封装工艺尚待进一步开发利用。低价的导热增强材料及高效的导热增强技术有待进一步研发。

2) 关于相变材料在其服役生命周期内可承受的最大热循环次数,已有文献研究分散且偏保守,对不同种类相变材料耐热循环检测方法、用于相变墙时需满足的性能要求(包括长期使用过程中其物理化学性能、力学性能、防火性能、热工性能及其稳定性等)、极限耐热循环次数等指标,尚待通过系统实验建立相应规范或标准。

3) 关于适用于不同热工分区和工况的相变温度的选择,及其对节能效率的影响,以及节能效率的评价指标的建立,需要通过系统实验建立相应规范。

4) 关于相变复合石膏板的原材料配比、结构构造、成型工艺等的优化设计,尚待进一步进行理论和实验研究,以实现制备工艺简单、结构合理、性能优化的同时,节约材料、降低成本、节能环保。此外,相变复合石膏板的工业化生产技术尚待开发。

5) 相变石膏板与围护结构基体的优化复合研究,复合墙传热、换热机理的研究尚待深入开展。

6) 复合墙动态保温性能、模拟房的节能效率及其影响因素、工程应用模拟研究及示范等有待加强。

综上所述,相变石膏板用于建筑围护墙体,有利于增大围护墙体的热惰性和蓄热能力、提高室内热舒适性,兼具节能、智能和环保的作用。当前建筑节能和建筑绿色化在经济和社会发展中占有举足轻重的地位,也是目前亟需解决的问题,石膏基相变储能墙应用于被动式建筑储能系统前景广阔。

参考文献:

- [1] ZHANG Y P, ZHOU G B, LIN K P, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook [J]. *Build Environ*, 2007, 42: 2197-2209.
- [2] STEPHEN D Z. Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope [D]. Kentucky: the University of Louisville, 2012.
- [3] 顾晓滨, 秦善, 牛菁菁. 相变储能矿物材料研究现状及展望[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(6): 932-940.
GU Xiaobin, QIN Shan, NIU Jingjing. *Bull Miner, Petr Geochem (in Chinese)*, 2014, 33(6): 932-940.
- [4] 郝先成, 马保国, 李廷芥, 等. 建筑围护结构中相变材料的功效分析[J]. *节能技术*, 2007, 25(2): 137-140.
HAO Xiancheng, MA Baoguo, LI Tingjie, et al. *Energy Conserv Technol (in Chinese)*, 2007, 25(2): 137-140.
- [5] 施韬, 孙伟. 相变储能建筑材料的应用技术进展[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(7): 1031-1036.
SHI Tao, SUN Wei. *J Chin Ceram Soc*, 2008, 36(7): 1031-1036.
- [6] 李峥嵘. 相变墙体在空调降温中的应用[J]. *暖通空调*, 2001, 31(2): 41.
LI Zhengrong. *Heat Vent Air Cond (in Chinese)*, 2001, 31(2): 41.
- [7] STRITHIH U. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings [J]. *Energy Build*, 2003, 35(1): 1097-1104.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局, 卫生部, 国家环境保护总局, GB/T 18883-2002. 室内空气质量标准[S]. 北京, 中国标准出版社, 2002.
- [9] CABEZA L F, CASTELL A, BARRENECHE C, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15: 1675-1695.
- [10] 杨致远, 董建楷, 姜益强, 等. 癸酸-月桂酸二元复合相变储能材料循环热稳定性[J]. *建筑科学*, 2015, 31(2): 60-65.
YANG Zhiyuan, DONG Jiankai, JIANG Yiqiang, et al. *Build Sci (in Chinese)*, 2015, 31(2): 60-65.
- [11] 黄友林. 建筑复合相变材料的储热配方与热物性研究[J]. *广东建材*, 2015(8): 28-29.
HUANG Youlin. *J Guangdong Build Mater (in Chinese)*, 2015(8): 28-29.
- [12] 吴晟, 李娟, 吴永超, 等. 定形相变材料的制备及其稳定性性能的研究[J]. *广东化工*, 2015, 42(3): 52-54.
WU Sheng, LI Juan, WU Yongchao, et al. *J Guangdong Chem (in Chinese)*, 2015, 42(3): 52-54.
- [13] 闫全英, 王威, 于丹. 相变储能材料应用于建筑围护结构中的研究[J]. *材料导报*, 2005, 19(8): 102-105.
YAN Quanying, WANG Wei, YU Dan. *Mater Rev (in Chinese)*, 2005, 19(8): 102-105.
- [14] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 109-130.
- [15] KOSCHENZ M, LEHMANN B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings [J]. *Energy Build*, 2014, 36: 567-578.
- [16] JIN X, MEDINA M A, ZHANG X S. On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction [J]. *Energy*, 2014, 73: 780-786.
- [17] VICENTE R, SILVA T. Brick masonry walls with PCM macro-capsules: an experimental approach [J]. *Appl Therm Eng*, 2014, 67: 24-34.
- [18] MOSAFFA AH, FERREIRA CAI, TALATI F, et al. Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling [J]. *Energy Convers Manage*, 2013, 67: 1-7.
- [19] CASTELL A, MARTORELL I, MEDRANO M, et al. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling [J]. *Energy Build*, 2010, 42: 534-540.
- [20] KONG X F, LU S L, HUANG J Y, et al. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage [J]. *Energy Build*, 2013, 62: 597-604.
- [21] ZALBA B, MARIN J M, CABEZA L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Appl Therm Eng*, 2003, 23: 251-283.
- [22] 罗宇飞. 月桂酸-癸酸相变材料的导热性研究[J]. *中国高新技术企业*, 2013, 249(6): 7-9.
LUO Yufei. *J Chin High-tech Enterprises (in Chinese)*, 2013, 249(6): 7-9.
- [23] FAN L, KHODADADI J M. Thermal conductivity enhancement of

- phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15(1): 24–46.
- [24] KHODADADI J M, FAN L, BABAEI H. Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: a review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013, 24: 418–444.
- [25] JIANG L Q, GAO L. Densified multiwalled carbon nanotubes-titanium nitride composites with enhanced thermal properties [J]. *Ceram Int*, 2008, 34(1):231–235.
- [26] TENG C, MA C M, CHIOU K C, et al. Synergetic effect of hybrid boron nitride and multi-walled carbon nanotubes on the thermal conductivity of epoxy composites [J]. *Mater Chem Phys*, 2011, 126(3): 722–728.
- [27] YANG K, GU M Y. Enhanced thermal conductivity of epoxy nano-composites filled with hybrid filler system of triethylenetetramine-functionalized multi-walled carbon nanotube/silane-modified nano-sized silicon carbide [J]. *Composites: Part A*, 2010, 41(2): 215–221.
- [28] MOHAMMADALI B, ALIMORAD R, DAVOOD R, et al. Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids [J]. *Thermochim Acta*, 2012, 54(9): 87–94.
- [29] MA A, CHEN W X, HOU Y G. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites with MWCNTs/ALN hybrid filler [J]. *Polym-Plast Technol Eng*, 2012, 51(15): 1578–1582.
- [30] IM H, KIM J. The effect of Al₂O₃ doped multi-walled carbon nanotubes on the thermal conductivity of Al₂O₃/epoxy terminated poly (dimethylsiloxane) composites [J]. *Carbon*, 2011, 49(11): 3501–3503.
- [31] CHEN L F, YU W, XIE H Q. Enhanced thermal conductivity of nano fluids containing Ag/MWNT composites [J]. *Powder Technol*, 2012, 23(1): 18–20.
- [32] 王瑞杰, 金兆国, 丁汀. 基于正十四烷微胶囊和微封装技术的相变材料技术研究[J]. *载人航天*, 2015, 21(3): 249–258.
WANG Ruijie, JIN Zhaoguo, DING Ting. Manned Spaceflight (in Chinese), 2015, 21(3): 249–258.
- [33] ZHOU W B, ZHANG L, ZHU J Q, et al. Kinetics study of phase change stearic acid/expanded graphite composite as heat storage material [J]. *J Wuhan Univ Technol*, 2012, 34 (7): 9–13.
- [34] 丁晴, 方昕, 范利武,等. 混合纳米填料对复合相变材料导热系数的影响[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2015, 49(2): 330–336.
DING Qing, FANG Xin, FAN Liwu, et al. *J Zhejiang Univ: Eng Sci (in Chinese)*, 2015, 49(2): 330–336.
- [35] LACHHEB M, KARKRI M, ALBOUCHI F, et al. Thermophysical properties estimation of paraffin/graphite composite phase change material using an inverse method [J]. *Energy Convers Manage*, 2014, 82: 229–237.
- [36] 马保国, 王信刚, 张志峰, 等. 相变蓄能围护结构材料的研究现状与进展[J]. *建筑节能*, 2005(9): 35–40.
MA Baoguo, WANG Xingang, ZHANG Zhifeng, et al. *Energy Conserv Build (in Chinese)*, 2005(9): 35–40.
- [37] SHILEI L, NENG Z, GOUHUI F. Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage [J]. *Energy Build*, 2006, 38(6): 708–711.
- [38] 杜开明, 彭家惠, 李美, 等. 癸酸-月桂酸二元复合相变材料的相变特性研究[J]. *广州化工*, 2009(4): 100–103.
DU Kaiming, PENG Jiahui, LI Mei, et al. *J Guangzhou Chem (in Chinese)*, 2009(4): 100–103.
- [39] 刘靛佩. 定型相变材料回填的 U 型埋管换热器性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
LIU Liangkan. Research on the performance of U-tube heat exchanger with shape-stabilized PCM (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of technology, 2015.
- [40] 涂逢祥. 建筑节能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 134–144.
- [41] BAETENS R, JELLE BP, GUSTAVSEN A. Phase change materials for building applications: a state of the art review [J]. *Energy Build*, 2010, 42: 1361–1368.
- [42] ALIZADEH M, SADRAMELI S M. Development of free cooling based ventilation technology for buildings: Thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations-a review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 58: 619–654.
- [43] YAN Q. The thermal properties of shape-stabilized fatty acid mixtures used for wallboard [J]. *Int J Sustain Energy*, 2011, 30(1): 47–54.
- [44] LI M, KAO H T, WU Z S, et al. Study on preparation and thermal property of binary fatty acid and the binary fatty acids/diatomite composite phase change materials [J]. *Appl Energy*, 2011, 88: 1606–1612.
- [45] LI M, WU Z S, KAO H T. Study on preparation and thermal properties of binary fatty acid/diatomite shape-stabilized phase change materials [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2011, 95: 2412–2416.
- [46] SAYYAR M, WEERASIRI R R, SOROUSHIAN P, et al. Experimental and numerical study of shape-stable phase-change nanocomposite toward energy-efficient building constructions [J]. *Energy Build*, 2014, 75: 249–255.
- [47] KONG X F, LU S L, HUANG J Y, et al. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage [J]. *Energy Build*, 2013, 62: 597–604.
- [48] KONG X F, LU S L, LI Y R, et al. Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application [J]. *Energy Build*, 2014, 81: 404–415.
- [49] 胡敏, 王立久, 白媛丽. 界面聚合法制备石蜡微胶囊相变材料[J]. *低温建筑技术*, 2015(1): 34–37.
HU Min, WANG Lijiu, BAI Yuanli. *Low Temp Archit Tech (in Chinese)*, 2015(1): 34–37.
- [50] LONE S, LEE H M, KIM G M, et al. Facile and highly efficient microencapsulation of a phase change material using tubular microfluidics [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2013, 422: 61–67.
- [51] QIU X L, SONG G L, CHU X D, et al. Microencapsulated n-alkane with p (n-butyl methacrylate-comethacrylic acid) shell as phase change materials for thermal energy storage [J]. *Sol Energy*, 2013, 91: 212–220.
- [52] BORREGUERO A M, RODRIGUEZ J F, VALVERDE J L, et al. Characterization of rigid polyurethane foams containing microencapsulated phase change materials: microcapsules type effect [J]. *J Appl Polym Sci*, 2013, 128: 582–590.
- [53] WITOLD F, STANISLAW S, JULIAN C, et al. Synthesis of a paraffin phase change material microencapsulated in a siloxane polymer [J]. *Colloid Polym Sci*, 2013, 291: 725–733.
- [54] DANIELA P, UTA H, RUTH H, et al. Microencapsulation of alkaline salt hydrate melts for phase change applications by surface thiol-michael addition polymerization [J]. *Macromol Mater Eng*, 2013, 29(8): 67–77.

- [55] HUANG J, WANG T Y, ZHU P P, et al. Preparation, characterization, and thermal properties of the microencapsulation of a hydrated salt as phase change energy storage materials [J]. *Thermochim Acta*, 2013, 557: 1–6.
- [56] GONG X C, LYU Y C, XIANG S Y, et al. Preparation of microcapsules with silicone oil as continuous phase using a solvent evaporation method [J]. *Acta Polymerica Sin*, 2007(8): 775–779.
- [57] 尚建丽, 王争军, 李乔明, 等. 界面聚合法制备微胶囊相变材料的试验研究[J]. *材料导报*, 2010, 24(6): 92–94.
SHANG Jianli, WANG Zhengjun, LI Qiaoming, et al. *Mater Rev (in Chinese)*, 2010, 24(6): 92–94.
- [58] 罗武生, 喻胜飞. 核壳质量比对石蜡-聚脲相变微胶囊性能的影响[J]. *中国粉体技术*, 2015, 21(3): 55–60.
LUO Wusheng, YU Shengfei. *China Powder Sci Technol (in Chinese)*, 2015, 21(3): 55–60.
- [59] LI B X, LIU T X, HU L Y, et al. Fabrication and properties of microencapsulated paraffin/SiO₂ phase change composite for thermal energy storage [J]. *ACS Sustain Chem Energy*, 2013(1): 374–380.
- [60] WANG L Y, TSAI P S, YANG Y M. Preparation of silica microspheres encapsulating phase-change material by sol-gel method in O/W emulsion [J]. *J Microencapsulation*, 2006, 23 (1): 3–14.
- [61] SARI A, ALKAN C, DOGUSCU D K, et al. Micro/nano encapsulated n-tetracosane and n-octadecane eutectic mixture with polystyrene shell for low-temperature latent heat thermal energy storage applications [J]. *Sol Energy*, 2015, 115: 195–203.
- [62] SARI A, ALKAN C, KARAIPEKLI A. Preparation, characterization and thermal properties of PMMA/n-heptadecane microcapsules as novel solid-liquid micro-PCM for thermal energy storage [J]. *Appl Energy*, 2010, 87: 1529–1534.
- [63] QIU X L, LI W, SONG G L, et al. Fabrication and characterization of microencapsulated n-octadecane with different crosslinked methylmethacrylate-based polymer shells [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2012, 98: 283–293.
- [64] WU X L, WANG Y H, ZHU P L, et al. Using UV-vis spectrum to investigate the phase transition process of PMMA-SiO₂@ paraffin micro-capsules with copper-chelating as the ion probe [J]. *Mater Lett*, 2011, 65: 705–707.
- [65] CHEN Z H, YU F, ZENG X R, et al. Preparation, characterization and thermal properties of nanocapsules containing phase change material n-dodecanol by miniemulsion polymerization with polymerizable emulsifier [J]. *Appl Energy*, 2012, 91: 7–12.
- [66] PARK S, LEE Y, KIM Y S, et al. Magnetic nanoparticle-embedded PCM nanocapsules based on paraffin core and polyurea shell [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2014, 450: 46–51.
- [67] INABA H, TU P. Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material [J]. *Heat Mass Transf*, 1997, 32(4): 307–313.
- [68] 温虹, 魏婷, 郑柏存, 等. 聚乙二醇膨胀珍珠岩复合相变材料的制备与性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42(6): 72–77.
WEN Hong, WEI Ting, ZHENG Baicun, et al. *New Build Mater (in Chinese)*, 2015, 42(6): 72–77.
- [69] 王佼, 郑水林. 硅藻土负载复合相变储能材料的制备工艺研究[J]. *非金属材料*, 2012, 35(3): 55–57.
WANG Jiao, ZHENG Shuilin. *Non-Met Mines (in Chinese)*, 2012, 35(3): 55–57.
- [70] RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J, WANG X M, et al. A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites [J]. *Appl Energy*, 2015, 157: 85–94.
- [71] 赵婧, 高鹏举. 复合相变储能骨料的制备研究[J]. *城市建设理论研究: 电子版*, 2015, 23(5): 8–8.
ZHAO Jing, GAO Pengju. *J Cheng Shi Jian She Li Lun Yan Jiu: Electron Ed (in Chinese)*, 2015, 23(5): 8–8.
- [72] 王小鹏, 张毅, 沈振球, 等. 熔融插层法制备蒙脱石基石蜡复合相变储能材料[J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(4): 624–627.
WANG Xiaopeng, ZHANG Yi, SHEN Zhenqiu, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2011, 39(4): 624–627.
- [73] 李忠, 于少明, 杭国培, 等. 插层复合法制备纳米复合相变储能材料[J]. *化学世界*, 2006, 46(11): 641–644.
LI Zhong, YU Shaoming, HANG Guopei, et al. *J Chem World (in Chinese)*, 2006, 46(11): 641–644.
- [74] 周盾白, 周子鸽, 贾德民. 石蜡/蒙脱土纳米复合相变材料的制备及分析[J]. *化工新型材料*, 2009, 39(7): 108–114.
ZHOU Dunbai, ZHOU Zihu, JIA Demin. *New Chem Mater (in Chinese)*, 2009, 39(7): 108–114.
- [75] 高安旗, 李玲, 董颖慧. 纳米蒙脱土/混盐复合相变储能材料结构及性能研究[J]. *材料导报*, 2015, 29(4): 52–57.
GAO Anqi, LI Ling, DONG Yinghui. *Mater Rev (in Chinese)*, 2015, 29(4): 52–57.
- [76] 方晓明, 张正国, 文磊, 等. 硬脂酸/膨润土纳米复合相变储热材料的制备、结构与性能[J]. *化工学报*, 2004, 55(4): 679–682.
FANG Xiaoming, ZHANG Zhengguo, WEN Lei, et al. *J Chem Ind Eng (in Chinese)*, 2004, 55(4): 679–682.
- [77] SONG S, DONG L, CHEN S. Stearic-capric acid eutectic/activated attapulgite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Energy Convers Manage*, 2014, 81: 306–311.
- [78] SARI A, KARAIPEKLI A. Fatty acid esters-based composite phase change materials for thermal energy storage in buildings [J]. *Appl Therm Eng*, 2012, 37: 208–216.
- [79] KARAIPEKLI A, SARI A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of fatty acids/expanded vermiculite as novel form-stable composites for energy storage [J]. *J Ind Eng Chem*, 2010, 16: 767–773.
- [80] CHUNG O, JEONG S, KIM S. Preparation of energy efficient paraffinic PCMs/expanded vermiculite and perlite composites for energy saving in buildings [J]. *Sol Energy Mater Sol C*, 2015, 137: 107–112.
- [81] XU Biwan, MA Hongyan, LU Zeyu, et al. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites [J]. *Appl Energy*, 2015, 160: 358–367.
- [82] HUANG J, LU S, KONG X, et al. Form-stable phase change materials based on eutectic mixture of tetradecanol and fatty acids for building energy storage: preparation and performance analysis [J]. *Materials*, 2013, 6(10): 4758–4775.
- [83] CHEN Z, SHAN F, CAO L, et al. Preparation and thermal properties of n-octadecane/molecular sieve composites as form-stable thermal energy storage materials for buildings [J]. *Energy Build*, 2012, 49: 423–428.
- [84] MEMON S A, LO Y T, SHI X, et al. Preparation, characterization and thermal properties of lauryl alcohol/kaolin as novel form-stable composite phase change material for thermal energy storage in buildings [J]. *Appl Therm Eng*, 2013, 59: 336–347.

- [85] MEMON S A, LO Y T, CUI H Z, et al. Preparation, characterization and thermal properties of dodecanol/cement as novel form-stable composite phase change material [J]. *Energy Build*, 2013, 66: 697–705.
- [86] MEMON S A, LO Y T, BARBHUIYA S A, et al. Development of form-stable composite phase change material by incorporation of dodecyl alcohol into ground granulated blast furnace slag [J]. *Energy Build*, 2013, 62: 360–367.
- [87] SARI A, BICER A. Preparation and thermal energy storage properties of building material-based composites as novel form-stable PCMs [J]. *Energy Build*, 2012, 51: 73–83.
- [88] TRIGUI A, KARKRI M, KRUPA I. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage properties of LDPE/wax as a shape-stabilized composite phase change material [J]. *Energy Convers Manage*, 2014, 77: 586–596.
- [89] 杨懿政. LA/LDPE 基定型相变材料的制备及表征[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
YANG Yizheng. Preparation and characterization of form-stable phase change materials of LA/LDPE (in Chinese, dissertation). Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [90] 刘娜. 随机近似热模拟修正方法及相变热控关键问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
LIU Na. Study on stochastic approximation thermal model correction method and phase change thermal control (in Chinese, dissertation). Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [91] 刘菁伟, 杨文彬, 谢长琼, 等. HDPE/EG/石蜡导热定形相变材料的制备及性能[J]. *材料工程*, 2015, 43(4): 42–46.
LIU Jingwei, YANG Wenbin, XIE Changqiong, et al. *J Mater Eng (in Chinese)*, 2015, 43(4): 42–46.
- [92] CHENG W, ZHANG R, XIE K, et al. Heat conduction enhanced shape stabilized paraffin/HDPE composite PCMs by graphite addition: preparation and thermal properties [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2010, 94(10): 1636–1642.
- [93] SOBOLCIAK P, KARKRI M, AL-MAADEED M, et al. Thermal characterization of phase change materials based on linear low-density polyethylene, paraffin wax and expanded graphite [J]. *Renew Energy*, 2016, 88: 372–382.
- [94] TRIGUI A, KARKRI M, KRUPA I. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage properties of LDPE/wax as a shape-stabilized composite phase change material [J]. *Energy Convers Manage*, 2014, 77: 586–596.
- [95] ALIZADEH M, SADRAMELI S M. Development of free cooling based ventilation technology for buildings: thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations—a review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 58: 619–654.
- [96] 张源. 一种填充石膏基相变材料的复合砌块[P]. CN Patent: 104453065, 2015–03–25.
ZHANG Yuan. A new compound block filled with phase change materials (in Chinese). CN Patent, 104453065, 2015–03–25.
- [97] 郑立辉, 宋光森, 韦一良, 等. 石膏载体定形相变材料的制备及其热特性[J]. *新型建筑材料*, 2006(1): 49–50.
ZHENG Lihui, SONG Guangshen, WEI Yiliang, et al. *N Build Mater (in Chinese)*, 2006(1): 49–50.
- [98] FELDMAN D, BANU D, HAWES D. Low chmn esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1995, 36(3): 311–322.
- [99] 白力, 袁艳平, 曹晓玲, 等. 癸酸/棕榈酸相变石膏板传热特性的实验研究[J]. *材料导报*, 2012, 26(11): 118–121.
BAI Li, YUAN Yanping, CHAO Xiaolign, et al. *Mater Rev (in Chinese)*, 2012, 26(11): 118–121.
- [100] 闫全英, 王立娟, 岳立航. 浸泡法制备的相变墙体传热性能的研究[J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(8): 15–19.
YAN Quanying, WANG Lijuan, YUE Lihang. *New Build Mater (in Chinese)*, 2014, 41(8): 15–19.
- [101] 张建树, 朱建平, 管学茂, 等. 相变储能石膏板的制备及储热性能分析[J]. *化工新型材料*, 2015, 43(5): 197–199.
ZHANG Jianwu, ZHU Jianping, GUAN Xuemao, et al. *New Chem Mater (in Chinese)*, 2015, 43(5): 197–199.
- [102] ZHANG H, XU Q, ZHAO Z, et al. Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with micro-encapsulated phase change materials for thermal regulation [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2012, 102: 93–102.
- [103] BORREGUERO A M, CARMONA M, SANCHEZ M L, et al. Improvement of the thermal behavior of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio [J]. *Appl Therm Eng*, 2010, 30 (10): 1164–1169.
- [104] BORREGUERO A M, LUZSANCHEZ M, VALVERDE J L, et al. Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content [J]. *Appl Energy*, 2011, 88(3): 930–937.
- [105] YAN Q, LI L, LIANG C. Thermal performance of shape-stabilized phase change paraffin wallboard [J]. *Int J Sustain Energy*, 2010, 29(4): 185–190.
- [106] EDDHAHAK-OUNI A, COLIN J, BRUNEAU D. On an experimental innovative setup for the macro-scale thermal analysis of materials: application to the phase change material (PCM) wallboards [J]. *Energy Build*, 2013, 64: 231–238.
- [107] EVERS A C, MEDINA M A, FANG Y. Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator [J]. *Build Environ*, 2010, 45(8): 1755–1761.
- [108] CASTELLON C, MEDRANO M, ROCA J, et al. Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels [J]. *Renew Energy*, 2010, 35(10): 2370–2374.
- [109] 王岐东, 董黎明, 代一心, 等. 两种相变材料储能石膏板的研究[J]. *北京工商大学学报: 自然科学版*, 2005, 23(5): 4–7.
WANG Qidong, DONG Liming, DAI Yixin, et al. *J Beijing Technol Business Univ: Nat Sci Ed (in Chinese)*, 2005, 23(5): 4–7.
- [110] 曾令可, 王慧, 程小苏, 等. 相变储能石膏板制备和性能的研究[J]. *新型建筑材料*, 2012, 39(12): 27–29.
ZENG Lingke, WANG Hui, CHENG Xiaosu, et al. *New Build Mater (in Chinese)*, 2012, 39(12): 27–29.
- [111] 李悦, 鲍振洲, 谢静超, 等. 含相变储能材料石膏板的物理力学及热工性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(9): 88–63.
LI Yue, BAO Zhenzhou, XIE Jingchao, et al. *J Haerbin Inst Technol (in Chinese)*, 2013, 45(9): 88–63.
- [112] 赵之贵, 孙志高, 焦丽君, 等. 新型相变储能试板的制备与性能实验研究[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42(8): 27–30.
ZHAO Zhigui, SUN Zhigao, JIAO Lijun, et al. *New Build Mater (in Chinese)*, 2015, 42(8): 27–30.
- [113] 徐龙, 王海, 高艳娜, 等. 复合相变材料对轻质围护结构建筑室内

- 热环境调节性能研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(12): 45-51.
- XU Long, WANG Hai, GAO Yanna, et al. Build Sci (in Chinese), 2013, 29(12): 45-51.
- [114]SCHOSSIG P, HENING H M, GSCHWANDER S, et al. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2005, 89: 29-36.
- [115]JIN X, ZHANG S L, XU X D, et al. Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls [J]. Build Environ, 2014, 81: 334-339.
- [116]肖伟, 王馨, 张寅平. 定形相变墙板改善轻质墙体夏季隔热性能研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1561-1563.
- XIAO Wei, WANG Xin, ZHANG Yinping. J Eng Thermophys (in Chinese), 2009, 30(9): 1561-1563.
- [117]肖伟, 王馨, 张寅平. 轻质建筑中定型相变内隔墙板冬季应用效果研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 123-125.
- XIAO Wei, WANG Xin, ZHANG Yinping. J Eng Thermophys (in Chinese), 2011, 32(1): 123-125.
- [118]王永生, 丁秋霞. 利用脱硫石膏生产相变石膏板的研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(8): 1-3.
- WANG Yongsheng, DING Qiuxia. New Build Mater (in Chinese), 2010, 37(8): 1-3.
- [119]IZQUIERDO-BARRIENTOS M A, BELMONTE J F. A numerical study of external building walls containing phase change materials [J]. Appl Therm Eng, 2012, 47: 73-85.
- [120]ASCIONE F, BIANCO N, DE MASI R F, et al. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: energy savings and indoor comfort in the cooling season [J]. Appl Energy, 2014, 113: 990-1007.
- [121]KUZNIK F, VIRGONE J, JOHANNES K. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard [J]. Renew Energy, 2011, 36: 1458-1462.
- [122]BECKER R. Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials [J]. J Build Phys, 2014, 37: 296-324.
- [123]张维维, 程建杰, 张源. 南京地区夏季复合相变混凝土砌块运用效果研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(6): 79-82.
- ZHANG Weiwei, CHENG Jianjie, ZHANG Yuan. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2015(6): 79-82.
- [124]张正松, 何嘉鹏, 张博. 相变石膏板应用于外墙表面夏季隔热的相变温度分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(6): 102-109.
- ZHANG Zhensong, HE Jiapeng, ZHANG Bo. Build Sci (in Chinese), 2012, 28(6): 102-109.
- [125]柴国荣, 王伟红, 王晓欧, 等. 递变型外贴式相变墙体[J]. 砖瓦, 2015(9): 48-52.
- CAI Guorong, WANG Weihong, WANG Xiaou, et al. Brick Tile (in Chinese), 2015(9): 48-52.
- [126]ATHIENITIS A K, LIU C, HAWES D, et al. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage [J]. Build Environ, 1997, 32(5): 405-410.
- [127]丁理峰, 叶宏. 相变材料和隔热材料在不同地区建筑中应用效果之比较分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(4): 508-516.
- DING Lifeng, YE Hong. Acta Energ Sol Sin (in Chinese), 2011, 32(4): 508-516.
- [128]HELMUT E F, CORINA S. Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report. Berkeley: University of California, 1997.
- [129]李丽莎, 闫全英, 金丽丽, 等. 定型相变墙体的制备方法及其传热性能的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2135-2139.
- LI Lisha, YAN Quanying, JIN Lili, et al. Acta Energ Sol Sin (in Chinese), 2012, 33(12): 2135-2139.