

脂肪酸相变材料的研究进展及应用

包艳华,王庭慰

(南京工业大学材料科学与工程学院,江苏南京210009)

摘要:中长链脂肪酸及其混合物具有良好的热物性、热稳定性和化学稳定性,是非常廉价易得的一类有机相变材料。综述了脂肪酸固-液相变材料在潜热蓄热领域的发展现状,主要介绍了常用脂肪酸相变材料及其低共熔混合物的热物性和热稳定性特点,指出了其强化传热方式,总结了国内外脂肪酸复合相变材料的制备方法。

关键词:脂肪酸;复合相变材料;热物性;潜热;传热

中图分类号:TQ050.425;TQ050.43

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)02-0033-04

Research progress in fatty acids as phase change materials and their application

BAO Yan-hua, WANG Ting-wei

(Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Middle/Long chained fatty acids and their mixtures have superior properties such as good thermophysical property, thermal and chemical stability, they are a kind of cheap and easily obtainable organic phase change materials (PCMs). In this paper, the development status of fatty acids, their thermo-physical properties and thermal stability and their eutectic mixtures as PCMs for latent heat thermal storage (LHTS) are reviewed. The heat transfer enhancement of fatty acids and the preparation methods of composite phase change materials (CPCMs) containing fatty acids are also discussed.

Key words: fatty acids; CPCMs; thermophysical property; latent heat; heat transfer

固-液相变材料(PCMs)是目前应用较广泛的储能材料,常用的主要有有机石蜡类、脂肪酸类和无机水合盐类。无机水合盐类PCMs具有潜热高、密度及导热系数大和熔点固定的优点,但是存在过冷和相分离、稳定性差等缺点,并且多数有毒性和腐蚀性,从而限制了其应用。有机石蜡类PCMs因其热焓高、无过冷及析出现象、性能稳定、无毒无腐蚀性和价格低廉等优点而备受欢迎,并且选择不同碳原子数的石蜡烃可得到不同的相变温度,因而应用较为广泛。脂肪酸的性能和特点及应用方法均与石蜡相似,所以脂肪酸类PCMs的研究与应用也受到了国内外学者的重视^[1]。

脂肪酸作为非石蜡类有机化合物,比其他类型的PCMs具有更优越的性能,例如共熔和共结晶特点、高熔融焓、不燃性、固-液相变过程中体积膨胀率小、廉价易得(来源于动植物油脂)以及经过大量的加速冷热循环试验后仍具有良好的热稳定性和化学稳定性^[2-6]。

1 脂肪酸相变材料热性能

1.1 热物性

PCMs的热物性主要包括相变温度、相变潜热、

比热、导热系数等。在PCMs实际应用中,其筛选工作主要是参考各材料的热物性,尤其是PCMs的相变温度和相变焓,在此将常用脂肪酸类PCMs的热物性进行汇总,详见表1^[1]。

表1 常用脂肪酸相变材料的热物性参数

脂肪酸	羊蜡酸	月桂酸	肉豆蔻酸	棕榈酸	硬脂酸
分子式	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
熔点/°C	30.1	43.0	53.7	62.3	70.7
熔融焓/kJ·kg ⁻¹	152	177	187	186	203
比热/ kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	—	1.6	1.6	—	—
导热系数/ W·mK ⁻¹	0.149 (40°C)	0.147 (50°C)	—	0.165	0.172
固体密度/ kg·(dm ³) ⁻¹	1.004	1.007	0.990	0.989	0.965
液体密度/ kg·(dm ³) ⁻¹	0.878	0.862	0.861	0.85	0.848

在有机PCMs中,有一类材料称作分子合金相变材料(MAPCM),它由烷基类分子混合形成,其优点是可以调节熔点,即可以通过混合形成分子合金来改变相变温度。而选择合适的相变温度是优化

收稿日期:2009-09-24

作者简介:包艳华(1982-),女,硕士生,baoyanhua@gmail.com;王庭慰(1960-),男,硕士,教授,从事高分子材料研究,通讯联系人,tiwwang@njut.edu.cn。

使用被动式储能 PCMs 的最重要的标准,因此有时需要用二元或三元混合物来代替单一 PCM,从而调整 PCM 的熔点以满足具体的温度要求。例如,民用建筑和调温纺织品应用环境对温度的要求范围是 20.00~43.33℃,在该温度范围可供直接使用的纯脂肪酸种类较少,鉴于其较好的相混性以及碳原子数目不同的脂肪酸熔点也各不相同,将几种脂肪酸进行混熔处理,形成二元和多元低熔混合物,可得到各种不同熔点的 PCMs,从而扩展其应用范围^[4,7-8]。

李晓燕等^[9]研究了空调蓄冷 PCM 的特性要求,制备了凝固温度为 4.8~5.3℃、热焓高达 149 kJ/kg 的辛酸/月桂酸二元 PCM,该材料具有良好的可重复使用性和较高的潜热及显热量,是一种有应用前景的蓄冷材料。Keles 等^[7]研究了月桂酸/肉豆蔻酸低熔混合物作为低温 PCM 应用于竖直同轴套管蓄热系统的可行性,DSC 测得其具有适宜的熔点(34.28℃)和较高的热焓(166.8 J/g),证明其可用于低温蓄热体系。Sarl 等^[10-11]分别研究了月桂酸-硬脂酸、豆蔻酸-棕榈酸、棕榈酸-硬脂酸和月桂酸-豆蔻酸、月桂酸-棕榈酸、豆蔻酸-硬脂酸的低熔混合物作为 LHTS 材料的热物性,DSC 测其熔点分别为 37.00、42.60、52.30℃和 34.2、35.2、44.1℃,熔融焓分别为 182.7、169.7、181.7 J/g 和 166.8、166.3、182.4 J/g,这些热物性证明其可用于太阳能供暖系统。张东^[12]制得了一系列不同比例的癸酸/肉豆蔻酸分子合金,DSC 测得其融化温度范围为 19.75~27.34℃,融化热为 162.9 J/g,证明癸酸/肉豆蔻酸分子合金可作为室温 PCM,用于增加房屋的热惰性,降低房屋的温度波动。

1.2 热稳定性

限制 LHTS 大规模应用的最主要因素是 PCM-封装体系的使用寿命及其能够承受的冷热循环而无性能退化的次数。通常储能材料的长期稳定性不够好,这源于 2 个方面:热循环导致材料稳定性变差;PCM 和封装体系之间可能存在腐蚀性。由于 PCM 必须能够承受多次重复的冷热循环,因此封装容器的发展应致力于提高其物理稳定性和热稳定性^[7,13]。

为了确保 PCM 的长期使用性,在实际应用前有必要利用加速热循环实验测试它在经历多次融化/结晶循环后的热稳定性。田胜力等^[5]研究了癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸和棕榈酸在经历 56、112、200、400 次反复热循环后的热稳定性,DSC 分析表明融化温度和融化潜热随着热循环次数的增加其变化值很小且无规律可循,说明脂肪酸作为 LHTS 材料具有良好的热稳定性。文中建议更多次数的加速冷热循环实验,以确定其是否具有更长时间的使用寿命。Sarl 等^[2]研究了硬脂酸、棕榈酸、豆蔻酸和月桂酸作为 LHTS 材料在经历 560 次和 1 200 次冷热循环后的热稳定性。DSC 分析表明除硬脂酸外的其他脂肪酸均具有良好的热性能,可以应用于太阳能蓄热领域(硬脂酸熔点的大幅度变化和熔融焓变化的不规则性可能源于其较高的不纯度)。作者认为需要进一步分析脂肪酸在经历冷热循环前后的分子结构,以了解其热稳定性变化的种类以及如何防止。

Sarl 等^[10-11]通过熔点和熔融焓的变化分别考察了月桂酸-硬脂酸、豆蔻酸-棕榈酸、棕榈酸-硬脂酸和月桂酸-豆蔻酸、月桂酸-棕榈酸、豆蔻酸-硬脂酸低熔混合物在经历重复次数的冷热循环后的热稳定性。DSC 分析表明,月桂酸-硬脂酸、豆蔻酸-棕榈酸和棕榈酸-硬脂酸的低熔共混合物在长达 1 年使用期限后(即 360 次加速冷热循环)仍具有良好的热稳定性;而月桂酸-豆蔻酸、月桂酸-棕榈酸和豆蔻酸-硬脂酸的低熔混合物在长达 4 年使用期限后(即 1 460 次加速冷热循环)仍具有良好的热稳定性。以上结果证明所测脂肪酸二元低熔混合物作为相变蓄热材料均可应用于实际的太阳能供暖系统。张东^[12]利用 DSC 技术分析了热循环次数对癸酸/肉豆蔻酸分子合金 PCM 的相变温度和相变潜热的影响,结果表明该分子合金在经历多达 710 次融化/结晶循环后仍具有良好的热稳定性,适用于建筑物空调系统,可以有效缓解电力供应紧张问题。

2 强化传热

有机 PCM 的导热性能普遍较低,发生相变时

(上接第 32 页)

- [35] Potaraju R, Milind Vishnu J. Process for production of acetonitrile: EP, 0206632[P]. 1986-10-06.
- [36] 潘伟雄. 用于由乙醇与氨合成乙腈的催化剂: 中国, 1062303[P]. 1992-07-01.
- [37] Kurina L N, Golovko A K, Galanov S I, et al. Acetonitrile synthesis method: RU, 2214396[P]. 2003-10-20.

- [38] 侯雪梅, 闫丽, 张鑫, 等. 固体酸 $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化合成乙腈的研究[J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2009(2): 108-109.
- [39] 王立新. 提高乙腈收率的途径[J]. 兰化科技, 1996, 14(3): 351-651.
- [40] Olivé G, Olivé S. Process for preparing acetonitrile: US, 4058548[P]. 1977-11-15. ■

固-液界面从传热表面移开,此时由于熔化/固化层厚度增加使得热阻增加,从而导致表面热流降低。熔化过程中存在自然对流(如果熔融层厚到足以使自然对流发生的厚度),因而传热速率比固化过程稍快。

导热系数低是限制有机 PCM 应用于实际 LHTS 的一个主要缺陷。因此,有必要利用传热增强技术提高 PCM 的导热性,目前已出现了多种提高 LHTS 体系传热性能的方法。主要有以下几种方式:①在蓄热装置中使用高导热性的金属翅管、翅片等结构以改善设备的传热性能,需要考虑其放置高度、间距及朝向等问题;②向 PCM 中添加诸如金属管材、片材、球珠、粉末或纤维等高导热材料以强化 PCM 的传热性能,密度不一致是限制其实际应用的主要问题;③多种 PCM 组合使用或者 PCM 与高导热性基材结构复合形成定型 PCM,从而强化传热;④PCM 微胶囊化以增加传热面积,从而增强传热效果^[14-17]。利用这些方式强化传热的同时还要考虑 PCM 和导热材料之间的相容性问题。

Mazman 等^[18]分别以棕榈酸/月桂酸(质量比 80:20)和硬脂酸/肉豆蔻酸(质量比 80:20)混合物作为 PCM,研究了在 PCM 中添加不锈钢管、铜管和石墨基材中注入 PCM 对蓄热体系传热性能的增强效果。实验发现不锈钢管对传热性能无明显影响,而铜管和石墨块都可以显著提高传热速率。以铜管为传热增强材料时,传热流体流速对传热速率有一定影响;而对于 PCM-石墨复合材料,传热流体流速对传热速率无明显影响。以上结果表明,传热增强效果最佳的是 PCM-石墨复合材料。

3 脂酸类复合相变材料

3.1 微胶囊化技术

微胶囊化就是将固体微粒或液体(气体)微滴封装入惰性壳材、使其与外界环境隔离从而起到保护目的的过程。微胶囊化技术主要具有以下几点优势:增加传热表面积;控制固-液 PCM 相变时体积的变化;降低芯材在使用前与外界物质的反应性;改善加工性能;预防降解反应从而延长使用寿命;控制释放、持续释放或定时释放;改善有毒材料的操作安全性和便利性;掩盖难闻气味;靶向药物;液体可以变为固体形式来操作^[13,19]。脂肪酸类 PCM 在实际应用时存在泄漏、体积膨胀和传热差等问题,应用微胶囊化技术将其封装起来可有效解决这些问题,为与其他材料的复合使用提供了可能性。

微胶囊化技术从理论上可分为化学法、物理化学法和物理机械加工法 3 种方式。不同的制备方法得到的微胶囊性能有所不同,需要考虑芯材类型、粒径要求、壳材渗透性和微粒性能等多种因素以选择合适的制备方法^[19]。

Zonur 等^[20]利用单凝聚法制备了以脲醛树脂、蜜胺树脂和 β 萘酚-甲醛树脂为壳材、利用复凝聚法制备了以明胶-阿拉伯树胶为壳材的天然可可脂肪酸微胶囊。结果表明,明胶-阿拉伯树胶是最佳壳材,所得胶囊为粒径 1 mm 的圆形颗粒,具有良好的化学稳定性和热物性,可用于建筑物供暖和制冷,能有效减少建筑物能量需求和温室气体排放。而可可脂肪酸在尿素、三聚氰胺和 β 萘酚溶液中不能乳化,因此聚合反应不能如期进行,也就无法制备该类壳材的微胶囊。Pascu 等^[21]利用界面聚合法制备了癸二酸/环氧树脂微胶囊。结果表明,不加交联剂得到的线性聚合物微胶囊外表面平滑;而加入交联剂反应得到的交联聚合物微胶囊表面粗糙不平,这可能是交联剂所致。柴卉等^[22-23]采用低热固相化学反应一步法分别制备了表面包覆 SiO_2 的硬脂酸和棕榈酸相变储能纳米粒子。结果表明,PCM 表面成功包覆了 SiO_2 层,包覆后的颗粒呈球状,具有良好的蓄热能力,可用于太阳能供暖系统。

3.2 定形化技术

固-液 PCM 的传统应用方法是对其加以封装或使用专门容器盛放以防止其泄漏,但往往工艺复杂并增加了 PCM 的使用成本,从而限制其在 LHTS 中的大规模应用。近年来,出现了将有机 PCM 与高分子材料复合而成的定形 PCM。一般制备方法是 PCM(如石蜡、脂肪酸)与高分子材料(如高密度聚乙烯)按一定比例(3:1)在热炼机上进行加热共混,后者作为支撑材料使分散相的 PCM 在液态时也能保持固定形状且不发生泄漏,从而使得复合 PCM 结构稳定,可以作为定形 PCM。

Sari 和 Alkan^[24]利用溶铸成膜法以 Eudragit S(甲基丙烯酸甲酯与甲基丙烯酸的 2:1 共聚物)为支撑材料制备了一系列硬脂酸、棕榈酸和肉豆蔻酸定形 PCM。结果表明,分散相和支撑材料之间的相容性较好,脂肪酸质量分数达到 70% 时经历多次冷热循环仍未出现渗漏问题且热物性良好,可直接应用于 LHTS 体系。

Alkan 和 Sari 等^[25]采用溶铸成膜法以 PMMA 为支撑材料制备了一系列硬脂酸、棕榈酸、肉豆蔻酸和月桂酸定形 PCM。结果表明,脂肪酸和 PMMA 之间

相容性良好,且脂肪酸质量分数达到 80% 时加热到其熔点以上仍未出现 PCM 渗漏现象,并且所得定形 PCM 的热物性完全满足 LHTS 应用的要求,可直接用于建筑物地板供暖和太阳能蓄热领域,减少了 LHTS 系统的应用成本。此外,他们还用同种方式以苯乙烯-马来酸酐共聚物为支撑材料制得了一系列上述脂肪酸定形 PCM,结果表明脂肪酸质量分数可达到 85% 也不发生泄露并具有良好的热物性,通过在墙板、石膏板及地板中加入该定形 PCM,可以有效应用于 LHTS 体系如建筑物地板供暖和被动式太阳能供暖等领域^[26]。

Sari 等^[27]利用真空注入法以膨胀石墨为支撑材料制备了棕榈酸定形 PCM。结果表明,该定形 PCM 中棕榈酸质量分数可达到 80% 也不发生渗漏,并且在经历多达 3 000 次冷热循环后仍表现良好的热稳定性和化学稳定性,其导热性比纯棕榈酸提高了 2.5 倍,适用于太阳能 LHTS 领域。

邓安仲等^[28]采用溶胶-凝胶方法制备了以 SiO₂ 为载体的、相变温度为 27 ~ 30℃、相变焓约 77 J/g 的有机癸酸定形 PCM,并将其研磨成粉末状后按一定比例粘附于聚苯乙烯(EPS)泡沫板表面,制成轻质相变储热墙体材料。结果表明,癸酸定形 PCM 在经历多次冷热循环后仍保持固体颗粒状而无癸酸渗漏现象;将其与 EPS 复合所得墙体蓄热材料具有质轻、隔热性能好以及热焓较高等特点,具有明显的节能作用。

李忠等^[29-30]将有机改性蒙脱土分别与棕榈酸-硬脂酸和羊蜡酸-硬脂酸二元低共熔物按一定质量比共混加热制得复合储能材料。通过反复实验发现,温度和时间直接影响蒙脱土对 PCM 的封装效率,低共熔物的最大封装量分别为 71% 和 75%,否则会有 PCM 泄露发生。分析结果表明,PCM 能有效插入到并封装在蒙脱土层间,所得复合材料的储能性能分别适合于调温纺织品和民用建筑材料等方面。

定形固-液相变材料的优点是:无需容器盛装可直接加工成型,不仅降低了封装成本和难度,还减少了因封装容器引起的传热热阻问题;解决了材料泄露的问题,使用安全方便,可应用于直接接触型热交换体系^[7,13]。

4 结语和展望

脂肪酸类 PCM 的主要缺陷是导热系数低,可以尝试利用密度接近的硅粉类或相容性较好的石墨类高导热材料对脂肪酸的传热强化进行更深入的研究。

基于其固-液相变特点,实际应用时需要对其进行封装或定形化以防止泄露或流动。目前有关脂肪酸类 PCM 微胶囊化的研究较少,有待进一步研究,例如,利用化学方法制备脲醛树脂及蜜胺树脂类壳材的微胶囊。考虑到脂肪酸共混物可以形成多种不同熔点的 PCM,开发新型 CPCMs 并与涂料相结合以制备多功能保温涂料将具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张寅平,胡汉平,孔祥东,等.相变储能-理论和应用[M].合肥:中国科技大学出版社,1996.
- [2] Sarl A. Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44: 2277 - 2287.
- [3] Sarl A, Kaygusuz K. Some fatty acids used for latent heat storage: Thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28: 939 - 948.
- [4] Keles S, Kaygusuz K, Sarl A. Lauric and myristic acids eutectic mixture as phase change material for low-temperature heating applications[J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29: 857 - 870.
- [5] 田胜力,张东,肖德炎,等.脂肪酸相变储能材料热循环行为的试验研究[J]. *材料开发与应用*, 2006, 21(1): 9 - 12.
- [6] Sharma S D, Buddhi D, Sawhney R L. Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials[J]. *Solar Energy*, 1999, 66(4): 483 - 490.
- [7] Zalba B, Marln J M, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23: 251 - 283.
- [8] 李忠,姚同,井波.脂肪酸二元体系固液相变动力学研究[J]. *安徽理工大学学报:自然科学版*, 2007, 27(2): 45 - 48.
- [9] 李晓燕,周维,周辉.适用与蓄冷空调的二元相变蓄冷材料的测试与研究[J]. *哈尔滨商业大学学报:自然科学版*, 2001, 17(4): 108 - 110.
- [10] Sarl A, Sarl H, Onal A. Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 365 - 376.
- [11] Sarl A. Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 2100 - 2107.
- [12] 张东.脂肪酸分子合金相变材料的热稳定性[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(3): 283 - 287.
- [13] Farid M M, Khudhair A M, Razack S A K, et al. A review on phase change energy storage: Materials and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 1597 - 1615.
- [14] Zhang Y, Faghri A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using an external radial finned tube[J]. *Enhanced Heat Transfer*, 1996, 3(2): 119 - 127.
- [15] Cabeza L F, Mehling H, Hiebler S, et al. Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22: 1141 - 1151.

(下转第 38 页)

缓慢滴加 C₅ 轻馏分,一般在 1 h 内滴加完毕,滴加完毕后通入一定量的丙烯,继续反应 3 h 左右。反应结束后将聚合液进行碱洗和水洗,将油层进行常减压蒸馏,除去未反应 C₅ 残留馏分、溶剂和低聚物,便得到产品。

1.2 聚合物表征

石油树脂的结构复杂,此前只有过马来酸酐改性方面的结构研究^[6]。笔者采用傅里叶红外测定仪对其结构成分进行简单表征:2 960 cm⁻¹,甲基碳-氢单键的伸缩振动;1 456 cm⁻¹,变形振动;2 866 cm⁻¹,亚甲基碳-氢单键的伸缩振动;1 660 cm⁻¹,双键伸缩振动。

熔融黏度的测定参考化工标准 HG/T 3660—1999;酸值的测定依照国标 GB/T 264—1983;软化点用环球法测定,参见国标 GB/T 4507—1999;色度测定具体见国标 GB 12007.1—1989。分子质量分布的测定采用凝胶色谱法。

2 结果与讨论

2.1 热聚合条件对产物的影响

当 C₅ 馏分中环戊二烯的含量较高时,得到的石油树脂的颜色较深,这是因为环戊二烯易形成不溶性凝胶,使得树脂色度较高^[7]。根据环戊二烯容易发生热聚和热聚生成的双环戊二烯沸点较高的化学性质,故采用热聚方法来脱除原料中的环戊二烯,热

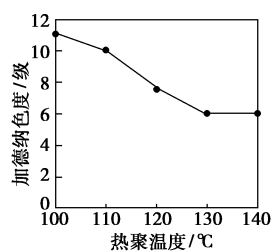
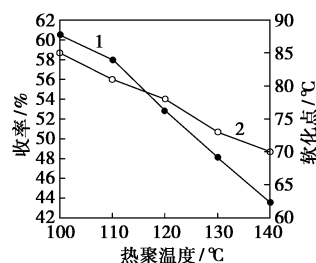


图2 热聚条件对产品色度的影响

聚过程无需加任何化学物质。从图 2 可以看出,热聚温度和压力对产品的色度有着很大的影响,随着热聚温度、压力的提高,树脂色度降低。原因是热聚温度的提高使得 C₅ 馏分中的环戊二烯含量越来越少,更多地转化成双环戊二烯。



1—收率;2—软化点

图3 热聚条件对产品收率及软化点的影响

图 3 表明产品的软化点和收率会随着热聚温度、压力的提高而降低。所以只有适当地控制热聚条件,才能使得树脂的色度较低而收率和软化点

(上接第 36 页)

- [16] Stritih U. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35: 1097 - 1104.
- [17] Ettouney H, Alatiqi I, Al-Sahali M, et al. Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and metal beads[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47: 211 - 228.
- [18] Mazman M, Cabeza L F, Mehling H, et al. Heat transfer enhancement of fatty acids when used as PCMs in thermal energy storage[J]. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32: 135 - 143.
- [19] Swapan Kumar Ghosh. Functional coatings by microencapsulation[M]. ISBN 3 - 527 - 31296 - X, 2006: 25 - 38.
- [20] Zonur Y Ö, Mazman M, Paksoy N Ö, et al. Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material [J]. *International Journal of Energy Research*, 2006, 30: 741 - 749.
- [21] Pascu O, Garcia-Valls R, Giamberini M. Interfacial polymerization of an epoxy resin and carboxylic acids for the synthesis of microcapsules[J]. *Polymer International*, 2008, 57: 995 - 1006.
- [22] 柴卉, 曾令可, 刘平安, 等. 包覆 SiO₂ 的硬脂酸相变储能材料的低热固相化学合成及其热性能[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(11): 1430 - 1433.
- [23] 柴卉, 曾令可, 王慧, 等. 低热固相化学法合成脂肪酸相变材料

及其表征[J]. *硅酸盐通报*, 2008, 27(1): 16 - 19.

- [24] Sari A, Alkan C, Kolemen U, et al. Eudragit S (methyl methacrylate methacrylic acid copolymer)/fatty acid blends as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage[J]. *Applied Polymer Science*, 2006, 101: 1402 - 1406.
- [25] Alkan C, Sari A. Fatty acid/poly (methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage[J]. *Solar Energy*, 2008, 82: 118 - 124.
- [26] Sarl A, Alkan C, Karaipekli A, et al. Preparation, characterization and thermal properties of styrene maleic anhydride copolymer (SMA)/fatty acid composites as form stable phase change materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 373 - 380.
- [27] Sarl A, Karaipekli A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of palmitic acid/expanded graphite composite as form-stable PCM for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93: 571 - 576.
- [28] 邓安仲, 李胜波, 庄春龙, 等. 轻质相变储热墙体材料研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(5): 541 - 544.
- [29] 李忠, 国培, 董灿君, 等. MA-SA/蒙脱土复合相变储能材料的制备[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(3): 274 - 277.
- [30] 李忠, 井波, 于少明. CA-SA/蒙脱土复合相变储能材料的制备、结构与性能[J]. *化工新型材料*, 2007, 35(3): 42 - 44. ■