

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-225-06

相变建筑围护结构材料对室内供暖设计的影响

崔盛帅

(中国轻工业广州工程有限公司 广州 511447)

【摘要】 建筑围护结构相变材料有效提高室内保温性能, 研究其最佳制备方式及对供暖的影响可为工程人员提供理论依据。优选了建筑围护结构材料的配比、载体吸附工艺、封装方式, 分析了材料调温性能及隔热性能对室内供暖设计的影响。结果表明, 月桂酸、硬脂酸和棕榈酸的质量配比为 65.9:10.5:23.6。随着吸附温度和吸附时间的升高, 可膨胀石墨的容留率先升高后降低, 最佳吸附温度为 55°C, 最佳吸附时间为 50min, 推荐真石漆乳液-水泥粉胶粘封装。相比普通水泥砂浆, 相变水泥砂浆在受热后中心最高温度明显降低, 相变水泥砂浆墙体内侧温度明显更低, 达到最高温度所需的时间延长, 良好的调温能力和隔热性能有效改善了建筑围护结构的蓄热量和传热量, 供暖系统补充供热量降低。

【关键词】 建筑围护结构; 相变材料; 蓄热性能; 供暖

中图分类号 TE973+.1 文献标志码 A

The Influence of Phase Change Building Envelope Materials on Indoor Heating Design

Cui Shengshuai

(China GDE Engineering Co., Ltd, Guangzhou, 511447)

【Abstract】 Phase change materials for building envelope structures effectively improve indoor insulation performance, and studying their optimal preparation method and its impact on heating can provide theoretical basis for engineering personnel. The proportion of building maintenance structural materials, carrier adsorption process, and packaging method were optimized, and the impact of material temperature regulation and insulation performance on indoor heating design was analyzed. The results showed that the mass ratio of lauric acid, stearic acid, and palmitic acid was 65.9:10.5:23.6. With the increase of adsorption temperature and time, the tolerance of expandable graphite increases first and then decreases. The optimal adsorption temperature is 55°C, and the optimal adsorption time is 50min. It is recommended that the lotion cement powder adhesive packaging of stone like paint be used. Compared to ordinary cement mortar, the maximum central temperature of phase change cement mortar significantly decreases after being heated, and the temperature inside the wall of phase change cement mortar is significantly lower. The time required to reach the maximum temperature is extended, and the good temperature regulation ability and insulation performance effectively improve the heat storage and transfer capacity of the building enclosure structure. The supplementary heating capacity of the heating system is reduced.

【Keywords】 Building envelope structure; Phase change materials; Thermal storage performance; heating

0 引言

随着科技的快速发展和人们对环保、节能的日

益关注, 建筑结构材料的创新与改进成为了人们关注的焦点之一^[1-4]。建筑相变材料具有优异的储能

项目基金: 广东省教育厅 2022 年度科研特色创新项目 (2022KTSZ116)

作者 (通讯作者) 简介: 崔盛帅 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: css201020@126.com

收稿日期: 2024-01-04

能力和温度调节能力,其物理特性随着相变过程的发生而改变。相变过程释放和吸收大量的热量有助于保持建筑结构内部的温度稳定,从而减少室内供暖系统的耗能量^[5-7]。与传统的建筑隔热材料相比,建筑相变材料可以更好地保持室内舒适度,减少室内温度的波动,在建筑节能、环保与智能化等方面具有广泛的应用前景,成为当前建筑节能领域的研究热点^[8-12]。蒋达华^[13]等人以十八醇和正癸酸为原料利用熔融共混法制备得到复合相变材料,通过步冷曲线和理论计算确定两者的最佳质量比为15:85,研究结果表明复合相变材料未出现热失重情况,耐热性能良好,适用于24℃至30℃的室内温度环境。王甲春^[14]等人采用石蜡作为相变材料、酚醛树脂作为封装材料制备石蜡-酚醛复合微胶囊,将其掺入砂浆后得到改性相变砂浆。相变砂浆的相变温度为20℃至29℃,相变潜热为 $9.29\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$,相变砂浆的劈裂抗拉强度、粘结拉伸强度和抗压强度随着微胶囊掺量增加而降低。文颖^[15]等人采用二氧化硅、石蜡与水泥制备了相变微胶囊改性砂浆,研究了微胶囊掺量对改性砂浆传热特性的影响,发现随着微胶囊掺量的增大,改性砂浆的导热系数降低,保温性能增强。采用相变材料可有效提高建筑围护结构的调温能力,不同的组分构成、制备方式、工艺参数、封装方式直接影响相变材料的蓄/放热性能。国内外相关研究主要集中在相变材料组分配比及传热特性方面,对于制备工艺参数与封装方式的研究较少,研究内容不够全面,无法形成相变材料的整体工艺设计。脂肪酸具有相变温度范围广、热稳定性较强、成本较低的优势,同时长链、取代基等结构使其具有更强的调控性,因此,选用脂肪酸作为基础相变材料。微胶囊制备方式虽然具有良好的封装性能,但其热量传导效率有限,中心相变材料利用率低。而多孔吸附制备方式具有较大的相变储能密度、良好的热导性、可调的相变温度等优势,因此选用多孔吸附制备方式。本文采用月桂酸、硬脂酸和棕榈酸为相变材料,以可膨胀石墨为吸附载体,研究优选相变材料的配比、载体吸附工艺、封装方式,分析相变材料的调温性能及隔热性能对室内供暖设计的影响,可为建筑工程设计提供理论依据。

1 相变材料制备及性能试验



(a) 月桂酸



(b) 硬脂酸



(c) 棕榈酸

图1 相变材料实物图

Fig.1 Physical image of phase change materials

采用月桂酸、硬脂酸和棕榈酸为相变材料,月桂酸由穗欣化工有限公司生产,酸值为280.59,皂化值为281.6,相变温度为 44.07℃ ,相变潜热为 175.2J/g ;硬脂酸由杭州赞宇油脂科技有限公司生产,酸值为210,皂化值为211.1,相变温度为 68.53℃ ,相变潜热为 211.6J/g ;棕榈酸由国药集团化学试剂有限公司生产,相变温度为 62.59℃ ,相变潜热为 209.7J/g ,如图1所示。采用可膨胀石墨为吸附载体,粒径为50目,含碳量99%,膨胀倍数为300倍,由广州金属冶金有限公司生产。水泥

采用海螺牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 由上海海螺水泥有限责任公司生产, 砂子采用黄河河砂, 聚羧酸高性能减水剂由四川东润百盛新材料有限公司生产。封装材料设置三种, 乙烯-醋酸乙烯共聚物乳液 (EVA 乳液) 由大连化学工业股份有限公司生产; 真石漆乳液由北京东方辰诺化工科技有限公司生产; 环氧树脂乳液由廊坊浩胜环保科技有限公司生产。

称量一定重量的月桂酸、硬脂酸和棕榈酸, 将各组份倒入 100mL 的水中, 保持水温恒定在 80℃, 在转速 300r/min 下搅拌 10min, 待全部溶解后自然冷却至室温得到月桂酸-硬脂酸和棕榈酸的三元复合体系, 向其溶液内加入可膨胀石墨, 根据试验温度和时间要求进行搅拌吸附, 自然冷却后得到月桂酸-硬脂酸-棕榈酸/可膨胀石墨复合体系, 采用称重法按照公式 (1) 测试体系容留率, 式中, c 是指体系容留率, %; w_1 是指可膨胀石墨质量, g; w_2 是指复合体系质量, g。

$$c = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100\% \quad (1)$$

采用 EVA 乳液、真石漆乳液、环氧树脂乳液混合水泥粉对月桂酸-硬脂酸-棕榈酸/可膨胀石墨复合体系进行胶粘封装, 对封装后的混合物恒温 80℃ 烘干 30min, 冷却 30min, 在烘干、冷却反复循环过程中称量计算其质量损失率, 从而评价封装材料的封装性能。将黄河河砂和月桂酸-硬脂酸-棕榈酸/可膨胀石墨复合体系混合作为水泥砂浆的细骨料, 按照质量配比 120:40:24:1 混合细骨料、普通硅酸盐水泥、水和减水剂制备水泥砂浆。将制备完成的水泥砂浆倒入 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的模具内进行浇筑, 恒温养护 28d 得到调温测试样品试块。在试块内预埋温度传感器, 放置于冷却至 10℃ 的空气浴内, 待试块温度稳定后将其放置于 60℃ 的空气浴内加热 30min, 加热完成后再次将其放置于 10℃ 的空气浴内冷却, 每 5min 记录试块中心温度变化以评价相变砂浆的调温能力。将制备完成的水泥砂浆倒入 150mm×150mm×30mm 的模具内进行浇筑, 恒温养护 28d 得到隔热测试样品试块。采用功率为 150W 的红外灯作为热源照射试块单侧 45min, 然后将试块静置自然冷却, 每 5min 记录试块另一侧的温度变化以评价相变砂浆的隔热能力。

2 建筑围护结构相变材料制备方式优选

2.1 相变材料配比优选

相变材料属于多组份物质构成的低共熔混合物, 脂肪酸低共熔混合物的熔解热与熔点是确定的, 相变性能和单一脂肪酸相同, 张寅平根据相平衡和热力学第二定律得到低共熔物熔点和热物性计算方法^[16]。对于二元复合体系, 可采用式 (2) 计算混合物的低共熔点^[17]。

$$T_m = \left[1/T_i - (R \ln X_i) / H_i \right]^{-1} \quad (2)$$

式中, T_m 为二元复合体系的熔点, K; R 为气体常数, 8.315J/(mol·K); X_i 为第 i 种组份的摩尔分数; T_i 为第 i 种组份的熔点, K; H_i 为第 i 种组份的熔化潜热, J/mol。对于多元复合体系, 可将二元复合体系看做新的单一组份, 与第三组份重新按照式 (2) 进行多元复合体系低共熔点计算, 多元复合体系的相变潜热按照式 (3) 计算^[17]。

$$H_m = T_m \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i H_i}{T_i} + X_i (C_{PLi} - C_{PSi}) \ln \frac{T_m}{T_i} \right] \quad (3)$$

式中, H_m 为多元复合体系的熔化潜热, J/mol; C_{PLi} 为第 i 种组份液态的定压比热; C_{PSi} 为第 i 种组份固态的定压比热。当复合体系的成分分子量较大时, 可将式 (3) 简化为式 (4)。

$$H_m = T_m \sum_{i=1}^n \frac{T_m}{T_i} \quad (4)$$

根据式 (2) 及式 (4) 计算得到月桂酸、硬脂酸和棕榈酸的质量配比为 65.9:10.5:23.6。为得到复合体系准确的相变温度和相变潜热, 根据质量配比计算结果配制月桂酸、硬脂酸和棕榈酸的三元复合体系, 采用差示扫描量热仪对其进行测试, 得到三元复合体系 DSC 曲线图, 如图 2 所示, 混合物相变温度为 34.15℃, 相变潜热为 153.43J/g。

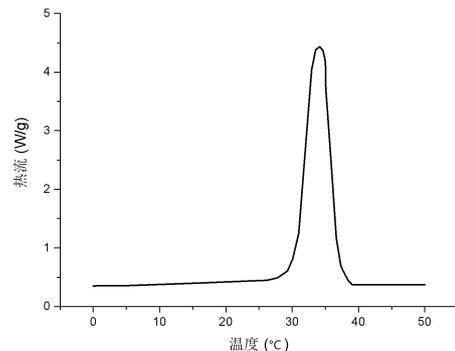


图 2 三元复合体系 DSC 曲线

Fig.2 DSC curve of ternary composite system

2.2 多孔载体吸附温度优选

控制吸附时间为 60min，吸附温度变化范围为 20℃至 70℃，变化梯度为 5℃，得到不同吸附温度下可膨胀石墨对月桂酸-硬脂酸-棕榈酸三元复合体系的容留率变化，如图 3 所示。

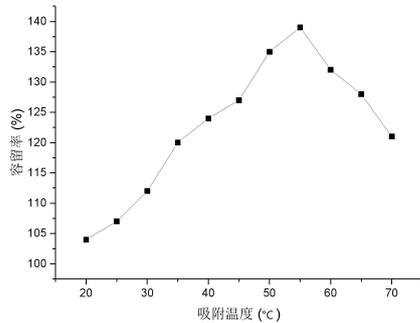


图 3 吸附温度对可膨胀石墨容留率的影响

Fig.3 Effect of adsorption temperature on the tolerance of expandable graphite

由图 3 可知，随着吸附温度的升高，可膨胀石墨的容留率先升高后降低，吸附温度为 55℃时，可膨胀石墨的容留率最大，对月桂酸-硬脂酸-棕榈酸三元复合体系的吸附保持能力最强。当吸附温度由 20℃升高至 55℃时，可膨胀石墨容留率由 104%增加至 139%，升高幅度为 34%；当吸附温度继续升高至 70℃时，可膨胀石墨容留率反而下降至 121%，降低幅度为 13%。其主要原因是，吸附温度升高促使月桂酸-硬脂酸-棕榈酸三元复合体系活跃度变大，分子动能升高，同时温度升高促使三元复合体系的粘度降低，流动性能增强，更加容易可膨胀石墨内的孔隙，可膨胀石墨对三元复合体系的吸附量和容留率增大。当吸附温度过高时，三元复合体系的粘度过低，对可膨胀石墨的孔隙壁粘滞力下降，更容易从孔隙内流失，可膨胀石墨对三元复合体系的容留率下降。综合分析，多孔载体最佳吸附温度为 55℃。

2.3 多孔载体吸附时间优选

控制吸附温度为 55℃，吸附时间变化范围为 10min 至 100min，变化梯度为 10min，得到不同吸附时间下可膨胀石墨对月桂酸-硬脂酸-棕榈酸三元复合体系的容留率变化，如图 4 所示。

由图 4 可知，随着吸附时间的升高，可膨胀石墨的容留率先升高后略有降低，当吸附时间为 50 min 时，可膨胀石墨容留率达到最大。当吸附时间由 10min 升高至 50min 时，可膨胀石墨容留率由

120%升高至 148%，升高幅度为 23%；当吸附时间继续增加至 100min 后，可膨胀石墨容留率降低至 138%。其主要原因是，当吸附时间过短时，部分三元复合体系未能进入可膨胀石墨的孔隙内，可膨胀石墨的容留率较低。随着吸附时间的增加，更多的三元复合体系进入可膨胀石墨孔隙内，可膨胀石墨容留率升高。当吸附时间继续增加时，三元复合体系充满可膨胀石墨的孔隙空间，可膨胀石墨的容留率达到最大值且变化趋于平缓。随着吸附时间的进一步增加，由于粘滞力不足，部分三元复合体系向外流失，可膨胀石墨的容留率略有降低。综合分析，多孔载体最佳吸附时间为 50min。

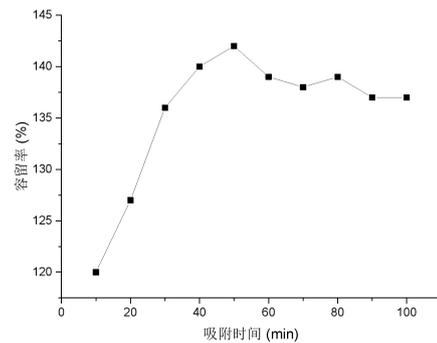


图 4 吸附时间对可膨胀石墨容留率的影响

Fig.4 Effect of adsorption time on the tolerance of expandable graphite

2.4 相变材料封装方式优选

采用 EVA 乳液、真石漆乳液、环氧树脂乳液混合水泥粉胶粘封装复合体系，升温冷却循环次数为 80 次，每循环 5 次记录复合体系的质量损失率，得到不同封装材料下复合体系的质量损失率变化，如图 5 所示。

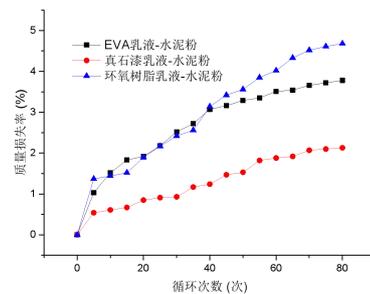


图 5 不同封装材料下复合体系的质量损失率变化

Fig.5 Changes in mass loss rate of composite systems under different packaging materials

由图 5 可知，随着冷热循环次数的增加，不同封装方式下复合体系的质量损失率先快速升高后

缓慢增大。其主要原因是，当温度升高时，相变材料变为液态从封装材料的缝隙处流出，造成复合体系质量损失。随着冷热循环次数的增加，封装材料的包裹性和粘结性降低，更多的相变材料向外部流失，复合体系的质量损失加剧。当冷热循环次数达到 80 次时，真石漆乳液-水泥粉封装复合体系的质量损失率为 2.13%，EVA 乳液-水泥粉封装复合体系的质量损失率为 3.78%，环氧树脂乳液-水泥粉封装复合体系的质量损失率为 4.68%。真石漆乳液-水泥粉的封装性能最强，循环次数较低时，EVA 乳液-水泥粉和环氧树脂乳液-水泥粉的封装性能相差不大，循环次数高于 40 次时，环氧树脂乳液-水泥粉封装性能最差，EVA 乳液-水泥粉封装性能适中。由此可见，封装方式推荐真石漆乳液-水泥粉胶粘封装。为保持长期持久的稳定性，在封装过程中可采用吸湿剂降低湿气进入复合体系内，在相变砂浆浇筑过程中合理设计内部结构控制温度分布，从而降低质量损失率。

2.5 相变材料调温对室内供暖的影响

控制相变砂浆掺入量变化范围为 0% 至 30%，变化梯度为 10%，根据试验方法得到不同时间下试块中心温度变化，如图 6 所示。

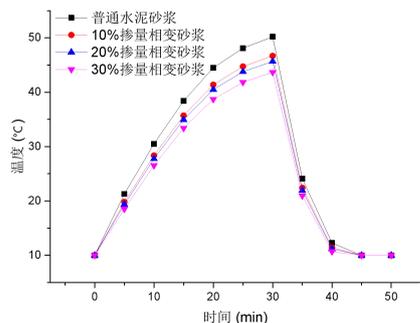


图 6 砂浆试块中心温度变化曲线

Fig.6 Temperature change curve of mortar test block center

由图 6 可知，相比普通水泥砂浆，相变水泥砂浆在受热后中心最高温度明显降低，具有良好的调温能力，相变过程可吸收部分热量，避免夏天室内温度过热。相变水泥砂浆中心温度更低，说明其蓄热能力更强，在冬季供暖期间，当室内温度较低时，相变材料会吸收周围环境的热量，引起自身的相变，吸收了热量的相变材料会使室内温度上升，降低供暖系统需要补充的供热量。随着相变砂浆掺入量的增加，砂浆试块中心最高温度随之下降。在受

热 30min 后，普通水泥砂浆试块中心最高温度升高至 50.2°C；10% 掺量相变水泥砂浆试块中心最高温度为 46.7°C；20% 掺量相变水泥砂浆试块中心最高温度为 43.6°C，相比普通水泥砂浆试块中心最高温度降低了 6.6°C。在供暖系统热负荷计算过程中，相变材料调温性能主要影响建筑围护结构蓄热量，供暖热量和阳光辐射热量有效储存在地面和墙体中，提高了房间的保温性能，供暖系统补充供热量降低。

2.6 相变材料隔热对室内供暖的影响

控制相变砂浆掺入量变化范围为 0% 至 30%，变化梯度为 10%，根据试验方法得到不同时间下试块侧面温度变化，如图 7 所示。

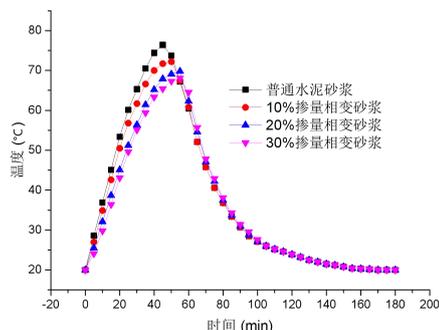


图 7 砂浆试块侧面温度变化曲线

Fig.7 Temperature change curve on the side of mortar test blocks

由图 7 可知，作为墙体受到外部阳光辐射时，相比普通水泥砂浆，相变水泥砂浆墙体内侧温度明显更低，达到最高温度所需的时间延长，其主要原因是相变材料掺入量增多，吸热放热过程所需时间增加，达到最高温度所需的时间延长，说明相变水泥砂浆具有良好的隔热性能。随着相变材料掺入量的增加，相变水泥砂浆墙体内侧温度明显降低，有效延缓室内达到高温的速度。普通水泥砂浆墙体内侧达到最高温度 76.4°C 所需时间为 45min；相变砂浆掺量 10% 墙体内侧最高温度 72.2°C 所需时间为 50min；相变砂浆掺量 20% 墙体内侧最高温度 69.8°C 所需时间为 55min；相变砂浆掺量 30% 墙体内侧最高温度 68.1°C 所需时间为 55min，相比普通水泥砂浆延迟了 10min 达到高温状态，最高温度降低了 8.3°C，降低幅度为 10.9%。在供暖系统热负荷计算过程中，相变材料隔热性能主要影响墙体围护结构的传热量，相变材料传热系数相对较低，墙

体传热量随之下降,供暖系统补充供热量降低。

3 结论

(1) 月桂酸、硬脂酸和棕榈酸的最佳质量配比为 65.9:10.5:23.6,混合物相变温度为 34.15℃,相变潜热为 153.43J/g。

(2) 随着吸附温度和吸附时间的升高,可膨胀石墨的容留率先升高后降低,最佳吸附温度为 55℃,最佳吸附时间为 50min。

(3) 真石漆乳液-水泥粉的封装性能最强,环氧树脂乳液-水泥粉封装性能最差,EVA 乳液-水泥粉封装性能适中,推荐真石漆乳液-水泥粉胶粘封装。

(4) 相比普通水泥砂浆,相变水泥砂浆在受热后中心最高温度明显降低,良好的调温能力有效提高了建筑围护结构的蓄热量,供暖系统补充供热量降低。

(5) 相比普通水泥砂浆,相变水泥砂浆墙体内侧温度明显更低,达到最高温度所需的时间延长,良好的隔热性能促使墙体围护结构传热量下降,供暖系统补充供热量降低。

参考文献:

- [1] 马玉林,李皖皖,年永乐.高潜热相变砂浆与相变板墙体性能对比研究[J].热科学与技术,2022,21(4):337-346.
- [2] 杨籍,孟多,王安琪,等.相变控温砂浆用于改善建筑围护结构保温性能的研究[J].新型建筑材料,2020,47(1):104-107.
- [3] 黄贵花,杨文博,贾红娟.纳米聚硅材料降压效果实验研究[J].非常规油气,2022,9(2):79-84.
- [4] 刘钊.新型相变储能砂浆的制备和建筑力学性能研究[J].储能科学与技术,2023,12(8):2697-2698.
- [5] 靳小云.新型储能材料在建筑工程设计中的应用[J].储能科学与技术,2023,12(6):2036-2037.
- [6] 赵衍彬.强敏感性稠油油藏高温热变定量表征[J].非常规油气,2022,9(5):79-84.
- [7] 赵运超,时雨,樊智轩,等.夏热冬冷地区相变屋面隔热技术研究进展[J].化工新型材料,2023,51(6):250-255.
- [8] 王瑞,杨晨曦,茹瀚昱,等.页岩和煤在容量法等温吸附实验中的误差对比[J].非常规油气,2021,(3):43-48.
- [9] 文颖,汤胜,孙赛玲,等.相变微胶囊改性砂浆界面传热机理研究[J].新型建筑材料,2023,50(2):141-146.
- [10] 张宸,宋爱莉,陈庆栋,等.酸基压裂液体系在低温碳酸盐岩储层的研究与应用[J].非常规油气,2021,(4):106-111.
- [11] 赵卫卫,李富康,单长安,等.延安地区延长组长 7 段陆相泥页岩孔隙类型及其吸附特征研究[J].非常规油气,2023,10(1):32-43.
- [12] 张喜明,王俊廷,陶进.近零能耗建筑中新型相变供暖方式研究[J].吉林建筑大学学报,2022,39(5):45-50.
- [13] 蒋达华,杨昊天,刘景滔,等.正癸酸/十八醇二元相变材料的热性能研究[J].中国材料进展,2023,42(2):168-173.
- [14] 王甲春,李焕煌,林志祥,等.石蜡-酚醛-水泥相变砂浆的制备及性能分析[J].厦门理工学院学报,2020,28(1):62-65.
- [15] 文颖,汤胜,孙赛玲,等.相变微胶囊改性砂浆界面传热机理研究[J].新型建筑材料,2023,50(2):141-146.
- [16] 张寅平,苏跃红,葛新石.(准)共晶系相变材料熔点及融解热的理论预测[J].中国科学技术大学学报,1995,(4):474-478.
- [17] 刘程,袁艳平,张楠,等.脂肪酸三元低共熔混合物相变温度和潜热的理论预测[J].材料导报,2014,28(2):165-168.