

相变膨胀珍珠岩制备工艺及相变控温砂浆性能

何 燕^{1,2}, 张 雄^{1,2}, 张永娟^{1,2}

(1. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 根据低共熔相变点理论计算结果, 制备月桂酸-肉豆蔻酸二元低共熔脂肪酸相变材料, 以膨胀珍珠岩为无机载体, 采用高温真空浸渍法制备相变骨料, 并对其进行包裹, 确定最佳包裹材料及掺量。通过场发射扫描电镜观测相变骨料切割截面, 脂肪酸经吸附进入多孔颗粒内部, 并黏附于珍珠岩孔隙内壁, 经石蜡包裹后脂肪酸相变材料较稳定地处于石蜡与膨胀珍珠岩内壁包围的孔空间内。利用相变骨料制备相变控温砂浆, 测试其物理力学性能及热性能。结果表明: 相变珍珠岩砂浆板物理力学性能达到建筑保温砂浆标准要求, 且具有较好的控温效果, 随着脂肪酸掺量的增加, 有效热量值降低越多, 温度延时越长, 降温幅度越大。

关键词: 二元低共熔脂肪酸; 相变骨料; 石蜡包裹

中图分类号: TU55+1

文献标志码: A

as PCM was confined in the porous EP by a mass fraction of 200%, and it demonstrated that paraffin was effective to encapsulate the LA-MA/EP composite aggregates by a mass fraction of 60%, with less than 3% mass loss after the thermal cycle test, and just 4% mass loss after being soaked into the alkali solution. More PCMs can lead to a decrease of effective heat value, a longer temperature delay and a greater cooling extent. The physical and mechanical performances of the PCMs based mortar board can meet the requirements of the standards of building insulation mortar.

Key words: dual low communion fatty acids; phase change aggregate; encapsulation with paraffin

Preparation of Phase Change Expanded Perlite and Its Temperature Control Performance

HE Yan^{1,2}, ZHANG Xiong^{1,2}, ZHANG Yongjuan^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The aim of this paper is to prepare dual low communion fatty acids phase-change materials (PCM) with lauric acid (LA) and myristic acid (MA), according to the calculation results of low eutectic phase transition point theory. Using the vacuum absorption method, a eutectic mixture of lauric acid and myristic acid was incorporated with expanded perlite (EP), and the phase change aggregates were encapsulated with appropriate encapsulations. The cross section of phase change aggregate was observed using field emission scanning electron microscopy (SEM). It was discovered that the fatty acids were absorbed into the porous particle inside and adhered to the wall of perlite pore, and the fatty acids steadily existed in the space encircled by paraffin and expanded perlite inside wall. The LA-MA eutectic mixture

相变材料利用物质发生相变时需要吸收或放出大量热量的性质来贮存或放出热能, 进而调整、控制工作源或材料周围环境温度。相变储能具有储能密度高、体积小、温度控制恒定、节能效果显著、相变温度选择范围宽、易于控制等优点。将相变材料应用于建筑中, 可以改善建筑的保温隔热性, 有效降低能耗, 成为建筑节能技术的一个研究热点。近年来国内外研究人员在建筑节能相变材料的研发方面取得了一些进展, 但是该材料是一个复合体系, 牵涉到材料的力学性能、热物理性能、耐久性能和化学性能等多个方面, 同时还要考虑实际大规模产业化的可能性和生产成本问题, 因此, 研究具有相当的复杂性^[1]。

应用于建筑节能的相变材料应具备如下特点: 较大的相变潜热、适宜的相变温度^[2]、适宜的热传导系数^[3]和稳定的物理化学性质^[4-10]。张东等^[5]利用陶粒和页岩吸附硬脂酸丁酯, 制备了相变储能混凝土, 其相变峰在 10~30 °C 范围内, 相变焓在 70~80 J · g⁻¹ 范围内。Sari 等^[6]利用膨胀珍珠岩吸附 150% 的月桂酸, 制成的相变骨料具有优异的热稳定性。王小鹏等^[7]采用熔融插层法使石蜡吸附进有机膨润土

收稿日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51378391); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAE27B04)

第一作者: 何 燕(1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为建筑功能材料。E-mail: hey1019@sina.com

通讯作者: 张 雄(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑结构与功能材料。E-mail: zhangxiong@tongji.edu.cn

中,制备了蒙脱石基石蜡复合相变储能材料,解决了固-液相变材料高温渗漏问题.蒋达华等^[8]利用多孔海泡石原矿和硬脂酸制备了硬脂酸质量分数为35.5%的复合相变储能材料,研究表明硬脂酸与海泡石结合较好,其相变温度为52.2℃.Heim等^[9]对定形相变材料用于节能建筑物做了大量数学模拟和实物测试工作.研究表明:不同气候地区使用不同热学性能的相变材料才能有效降低室内温度波动.

本研究采用月桂酸与肉豆蔻酸配制二元低共融脂肪酸,采用膨胀珍珠岩真空吸附脂肪酸制备相变珍珠岩控温骨料,在此基础上,对相变珍珠岩进行包裹,确定包裹材料及其用量.通过冷热循环和碱性环境耐久性试验检测其温度敏感性和耐碱性,并采用场发射扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)对切割截面进行颗粒内部形貌分析.将相变珍珠岩骨料按照不同配比制成相变控温砂浆,分析其物理力学性能,并通过相变控温模拟实验,以降低的有效热量值、出现温度最高点的延时以及降温幅度作为热性能衡量指标,分析相变控温砂浆的热性能.

1 试验

1.1 原材料及试验设备

试验原材料包括:月桂酸,肉豆蔻酸,石蜡,无水乙醇,氢氧化钙,苯丙乳液,膨胀珍珠岩(堆积密度 $90\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粒径 $0.5\sim 2.5\text{ mm}$),PO 42.5水泥,高效减水剂(脂肪酸类),引气剂(主要成分为三萜皂甙),乳胶粉(主要成分为乙烯基共聚物).

试验设备包括:抽真空旋转仪,磁力搅拌器,热电偶,自制模具(规格 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 40\text{ mm}$).

1.2 相变骨料制备

1.2.1 高温真空浸渍法

将一定量脂肪酸固体倒入抽滤瓶,置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中,待脂肪酸融化后将膨胀珍珠岩倒入抽滤瓶中,抽真空,保持一段时间后打开空气阀门,原本黏附在珍珠岩表面的脂肪酸将被压入珍珠岩颗粒的孔隙中.

1.2.2 真空浸渍包裹法

采用真空吸附法,分别将相变珍珠岩吸附一定量水泥浆体、苯丙乳液、液态石蜡和水泥-乳液复合浆体.为保证水泥充分水化,同时防止表面水分蒸发,用水泥包裹的相变珍珠岩在包裹后第3 d再进行耐久性试验.

1.3 相变砂耐久性试验及内部结构观测

1.3.1 冷热循环耐久性试验

将所制备的相变骨料置于烧杯中,烧杯内壁用滤纸铺好并置于恒温 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中加热,每隔3 h取出并冷却至室温,再放入水浴中继续加热.当循环次数依次达到1,2,4,6,8,16,24,32,40时,得出其质量损失情况.

1.3.2 碱环境耐久性试验

相变骨料应用于建筑中,作为相变材料的脂肪酸会受到水泥浆体强碱性环境的腐蚀,因此,需检测碱性环境下的耐久性^[10].将相变骨料置于饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中浸泡7 d,之后取出用蒸馏水滤洗,滤洗完置于烘箱烘干后进行差示扫描量热仪(differential thermal scanners, DSC)分析其热焓损失.

1.3.3 内部结构观测

切割相变骨料,利用场发射扫描电镜对切割截面进行颗粒内部形貌分析.仪器参数:加速电压 $500\sim 3\,000\text{ V}$;观察分辨率 $<2\text{ nm}$;温度范围 $-25\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.4 相变珍珠岩基砂浆制备及砂浆板控温模拟试验

1.4.1 相变珍珠岩基砂浆制备

以相变珍珠岩等体积替代普通珍珠岩,以制备相变珍珠岩基砂浆.搅拌前,将相变珍珠岩与普通珍珠岩混合均匀后成型.试件在温度 $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(60\pm 5)\%$ 的条件下养护1 d脱模,之后在标准养护条件下养护至相应龄期.

根据《建筑保温砂浆》的标准:抗压强度 $>0.2\text{ MPa}$,稠度为 $80\sim 100\text{ mm}$,分层度 $<20\text{ mm}$,所选取的珍珠岩基砂浆配合比见表1.

表1 相变珍珠岩基砂浆配合比

Tab.1 Mixture ratio of phase change material based mortar

相变材料 质量浓度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	掺量/g								
	水泥	普通珍珠岩	相变骨料	水	甲醚	淀粉醚	乳胶粉	引气剂	减水剂
0	600	270	0	530	4.5	7.0	9	0.6	6
100	600	186	272	560	3.3	4.3	9	0.6	6
200	600	103	543	630	3.5	4.0	9	0.6	6

1.4.2 砂浆板控温模拟试验

制备 200 mm×200 mm×200 mm 的封闭空间, 其中一面采用 40 mm 厚的相变珍珠岩砂浆板, 其余五面采用 40 mm 厚的聚苯板绝热. 利用加热装置加热相变珍珠岩砂浆板, 加热过程模拟上海地区普通墙体表面升温变化^[10]. 分别在砂浆板的内表面及封闭空间的正中央安置电阻温度计, 以采集冷板温度及空气温度数据. 测试装置见图 1.

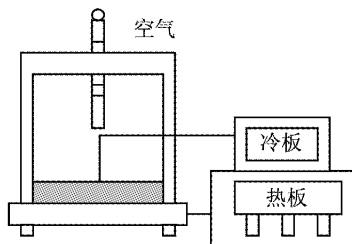


图 1 控温设备示意图

Fig.1 Schematic figure of temperature control equipment

2 结果与讨论

2.1 真空吸附法制备相变珍珠岩骨料

2.1.1 低共融相变点理论计算

运用施罗德公式, 可以从理论上计算二元低共融脂肪酸的相变温度和相变潜热焓, 公式如下:

$$\begin{cases} \ln x_A = \frac{\Delta_s^1 H_A}{R} \left(\frac{1}{T_{fA}} - \frac{1}{T} \right) \\ \ln x_B = \frac{\Delta_s^1 H_B}{R} \left(\frac{1}{T_{fB}} - \frac{1}{T} \right) \\ x_A + x_B = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_A, x_B 分别为混合物主要成分 A 和 B 的摩尔分数; $\Delta_s^1 H_A, \Delta_s^1 H_B$ 分别为纯化合物 A 和 B 的溶化潜热, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; T_{fA}, T_{fB} 分别为纯化合物 A 和 B 的溶化温度, K ; T 为低共融温度, K ; R 为气体常数, 取 $8.315 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$$H_m = T_m \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{x_i H_i}{T_i} + x_i (c_{p,l,i} - c_{p,s,i}) \ln \frac{T_m}{T_i} \right] \quad (2)$$

式中: H_m 为混合物的融解热; T_m 为混合物的熔点温度; x_i 为第 i 种组分的质量百分比; H_i 为第 i 种组分的融解热; T_i 为第 i 种组分的熔点温度; $c_{p,l,i}, c_{p,s,i}$ 为第 i 种组分液态和固态的比热容.

脂酸类有机物的分子式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2$. 相变温度在 20~90 °C, 相变潜热与石蜡接近. 应用于相变墙板中的脂酸类有机物碳原子数主要在 10~18 之间. 如癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸、软脂酸、硬脂酸等. 计算

过程中, 拟采用月桂酸和肉豆蔻酸低共融混合、月桂酸和棕榈酸低共融混合, 肉豆蔻酸和棕榈酸低共融混合, 计算结果如表 2. 从计算结果可以看出, 选择月桂酸和肉豆蔻酸进行二元低共融比较合适, 低共融温度比要求温度略低(南北墙外表面相变温度应控制在 33~37 °C, 东西墙外表面相变温度应控制在 38~42 °C), 相变潜热焓也没有明显的降低, 有利于使用在上海地区夏季南北外墙外表面进行相变隔热.

表 2 不同组合低共融脂肪酸相变点计算结果

Tab.2 Calculation results of phase transformation point with different constitutes

编号	低共融脂肪酸	摩尔比	低共融温度/°C	相变潜热/(J·g ⁻¹)
1	月桂酸 肉豆蔻酸	0.66 0.34	33.4	166.8
2	月桂酸 棕榈酸	0.69 0.31	35.2	166.3
3	肉豆蔻酸 棕榈酸	0.64 0.36	42.6	179.5

2.1.2 低共融脂肪酸热力学性能

根据低共融脂肪酸相变点理论计算结果, 按照比例混合制备月桂酸-肉豆蔻酸二元低共融脂肪酸, 并对所制备二元低共融脂肪酸进行差示扫描量热仪 DSC 测试分析, 结果见图 2. 比较 DSC 实际测试数据和理论计算结果发现, 低共融温度有一定偏差, 这是由于制备原料月桂酸和肉豆蔻酸的纯度影响所致.

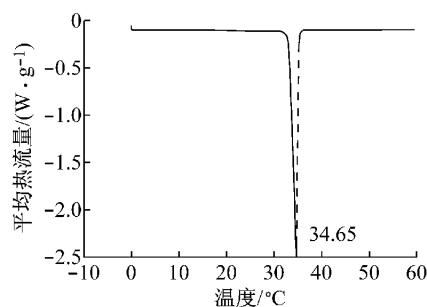


图 2 月桂酸-肉豆蔻酸二元低共融脂肪酸 DSC 分析图谱

Fig.2 DSC diagram of dual low communion fatty acids with lauric acid and myristic acid

2.1.3 相变骨料耐久性研究

膨胀珍珠岩表观密度小, 孔隙率大, 相变材料可以吸入其微孔内部. 当相变材料在微孔内发生固-液转变时, 由于毛细孔吸附力的作用, 可在一定程度上防止液态材料从微孔中溢出^[11]. 选取堆积密度为 90 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 粒径在 0.5~2.5 mm 之间的膨胀珍珠岩, 采用真空吸附法分别吸附 50%, 100%, 150% 和 200% 的二元低共融脂肪酸, 制备相变珍珠岩. 将相变珍珠岩进行冷热循环耐久性试验, 试验结果见图

3. 由图3可见,当二元低共融脂肪酸吸附量为150%或200%时,相变珍珠岩质量损失均大于200%,在实际工程应用中是不能允许的.当降低到100%及50%时,受热质量损失明显减小,尤其当吸附量为50%时,质量损失仅为5%.但脂肪酸吸附量过小,会导致相变材料的工作效率过低.

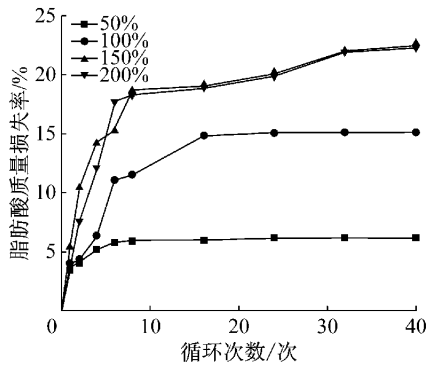


图3 脂肪酸吸附量对耐久性的影响

Fig. 3 Effect of fatty acid absorption capacity on durability

基于相变珍珠岩冷热循环耐久性较差,有必要对相变珍珠岩进行包裹.选定膨胀珍珠岩对二元低共融脂肪酸的吸附量为200%,分别采用水泥浆体(500%,水灰质量比为0.5)、苯丙乳液(200%)、石蜡(20%,40%,60%,80%)及水泥-乳液复合浆体(200%)包裹相变珍珠岩.对包裹后的相变珍珠岩进行冷热循环耐久性试验,实验结果见图4和图5.由图4和图5可见,经包裹后,相变珍珠岩受热损失均得到了一定程度的改善.比较各种包裹方法可得出,使用60%石蜡包裹的效果最佳,其冷热循环质量损失在3%以下.

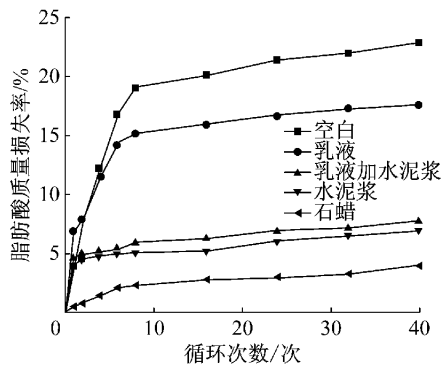


图4 不同包裹方法对耐久性的改善程度

Fig. 4 Improvement of durability by different encapsulations

将石蜡包裹的相变珍珠岩用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸泡7 d,进行碱性环境耐久性实验,实验结果见

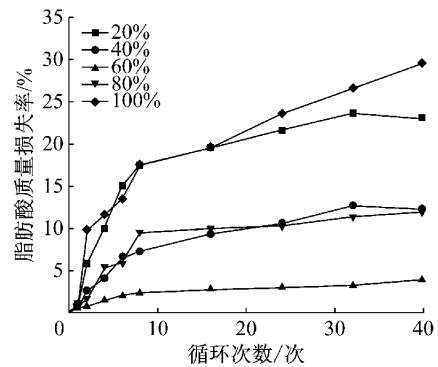


图5 石蜡掺量对相变骨料包裹效果的影响

Fig. 5 Effect of paraffin content on phase change aggregate encapsulations

图6和图7.由于石蜡也是一种相变材料,在二元共融脂肪酸相变峰后还存在石蜡的相变峰,由于石蜡和脂肪酸的共融效果,两者的相变温度都稍向低温方向波动.对比图6和图7,在碱溶液浸泡前后,包裹相变珍珠岩的相变点基本无变化,且吸热峰的相变焓从 $93.97 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 仅下降到 $90.21 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$,下降幅度仅为4.0%.这表明:石蜡良好的防水性,使包裹后的相变珍珠岩有效地阻隔了碱溶液的侵蚀.

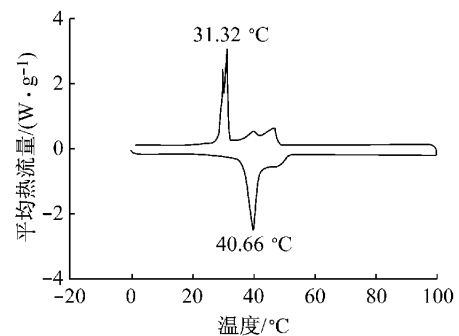


图6 碱液浸泡前包裹相变珍珠岩的DSC分析图

Fig. 6 DSC analysis diagram of encapsulated phase change perlite before being immersed in alkali solution

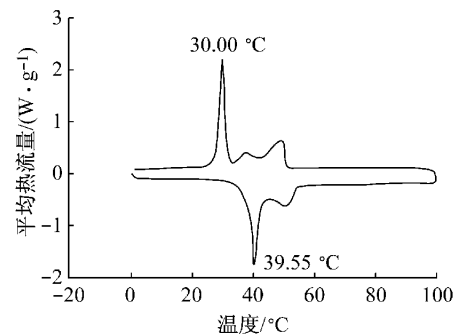
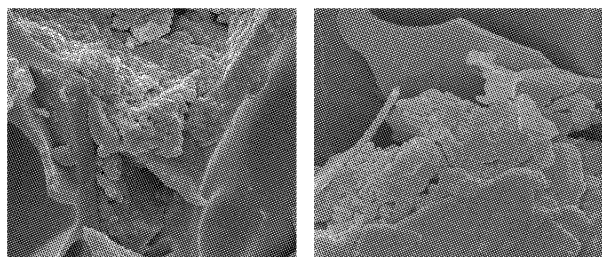


图7 碱液浸泡后包裹相变珍珠岩的DSC分析图

Fig. 7 DSC analysis diagram of encapsulated phase change perlite after being immersed in alkali solution

2.1.4 相变骨料内部结构

将吸附脂肪酸的膨胀珍珠岩进行切割,通过场发射扫描电镜观察切割截面,结果见图 8。从图 8 可明显看出,切片状为膨胀珍珠岩颗粒内部骨架,骨架之间填充了大量的脂肪酸,证明脂肪酸经吸附进入多孔颗粒内部,且可看出脂肪酸黏附于膨胀珍珠岩孔隙内壁;同时可以发现,脂肪酸只占据了膨胀珍珠岩内部部分空间,其余部分仍为空余空间。



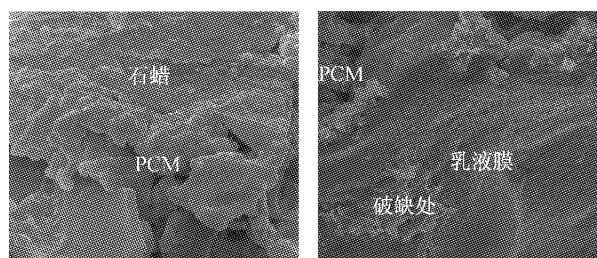
a 相变材料内壁

b 相变材料断面

图 8 未包裹相变珍珠岩截面 SEM 分析图

Fig. 8 SEM analysis diagram of phase change perlite cross section without encapsulation

图 9 为采用石蜡及乳液包裹的相变珍珠岩截面 SEM 分析图。从图 9 可见,经石蜡包裹后脂肪酸相变材料能够比较稳定地处于石蜡与膨胀珍珠岩骨料包围的孔空间内;而使用较少乳液包裹时,由于成膜不致密,包裹效果欠佳,在 SEM 分析图中可看到乳液膜有破缺,而增加乳液用量则会出现膨胀珍珠岩颗粒粘连,而且乳液干燥时间较长,成膜过程不耐高温,在高于 40 °C 时即发生软化,不适合相变骨料生产工艺。



a 石蜡包裹

b 乳液包裹

图 9 包裹相变珍珠岩截面 SEM 分析图

Fig. 9 SEM analysis diagram of encapsulated phase change perlite cross section

2.2 相变珍珠岩基砂浆板性能分析

2.2.1 砂浆板物理力学性能

将制得的相变珍珠岩骨料,按照表 1 的配比制备脂肪酸掺量分别为 0, 100, 200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的砂浆板,砂浆板的物理力学性能见表 3。从表 3 可知,相变控温砂浆的干密度随着相变骨料掺量的增加而降低。这是由于,相变骨料具有一定强度,在砂浆搅拌过程中,不易破碎。而膨胀珍珠岩骨料容易破碎,从而使得浆体密实,干密度随之增大。相变控温砂浆基本不吸水,吸水率为负值是相变砂浆浸泡在水中时质量损失导致的。相比空白膨胀珍珠岩砂浆吸水率高达 23.5%,可见相变控温骨料具有较好的憎水性,从而有效改善了控温砂浆由于吸水率大导致导热系数不稳定的缺点。相变控温砂浆的导热系数高于建筑保温砂浆标准值,由于相变材料的特殊性,其储能与释能过程,需要能量及时传递,因此导热系数不宜过低。另外,相变控温砂浆的导热系数低于空白膨胀

表 3 砂浆板的物理力学性能

Tab. 3 Physical and mechanical performances of mortar

性能指标	相变材料质量 浓度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	干密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	吸水率/%	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	28 d 抗压强度/ MPa	剪切强度/ kPa
保温砂浆标准值		240~400		≤ 0.085	≥ 0.20	≥ 50
基准砂浆	0	742.1	23.50	0.107	4.09	203
相变砂浆	100	676.7	-0.32	0.102	2.71	186
相变砂浆	200	655.5	-0.20	0.098	2.21	167

珍珠岩砂浆,这与干密度的结果相一致。相变控温砂浆的抗压强度超过保温砂浆标准值,且相变控温砂浆的抗压强度随着相变控温骨料掺量的增加而降低。相变控温砂浆的强度主要来自于无机胶凝材料,砂浆密度越大,强度越高。

2.2.2 砂浆板热性能

通过控温模拟试验,测定各砂浆板的冷板温度曲线和空气温度曲线,以降低的有效热量值、出现温度最高的延时、降温幅度作为热性能衡量指标,比较

相变材料掺量对砂浆热性能的影响。相变控温砂浆板与空白砂浆板的冷板温度(或空气温度)曲线相交的面积等同于热量量纲,通过 Origin 软件的积分分析可计算出降低的有效热量值 Q_1 (冷板)和 Q_2 (空气)。由于相变材料储能控温作用,相变砂浆板冷板温度及空气温度达到最高值的时间较空白砂浆板有所延迟。在升温过程中,相变砂浆板的冷板温度及空气温度都要低于空白砂浆板温度。表 4 给出了积分得到的掺量为 100, 200 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的相变砂浆板的

Q_1 和 Q_2 值,各砂浆板温度波峰延迟时间 Δt_1 (冷板) 和 Δt_2 (空气),以及各砂浆板的最大降温幅度 ΔT_1 (冷板)和 ΔT_2 (空气).由表4可知,随着相变材料掺量的增加,砂浆板降低的有效热量值越明显;随着相变材料掺量的增加,温度上升延缓效果越好;随着相变材料掺量的增加,相变砂浆板的降温幅度越大,降温效果越好.

表4 砂浆板的控温性能

Tab.4 Temperature control performances of mortar

相变材料 质量浓度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	降低的有效热量 值/($\text{K} \cdot \text{min}$)		最高温波峰 延时/min		降温幅度/ $^{\circ}\text{C}$	
	Q_1	Q_2	Δt_1	Δt_2	ΔT_1	ΔT_2
0	0	0	0	0	0	0
100	427.7	238.8	9	7	3.8	2.9
200	592.4	523.7	16	24	4.5	4.2

3 结论

(1) 根据低共融相变点理论计算结果,混合制备月桂酸-肉豆蔻酸二元低共融脂肪酸,月桂酸与肉豆蔻酸的摩尔比例为 0.66 : 0.34. 采用高温真空浸渍法可使膨胀珍珠岩吸附 200% 的脂肪酸,制备了相变珍珠岩骨料. 分别利用水泥浆体、苯丙乳液、石蜡及苯丙乳液复合水泥对相变骨料进行包裹. 其中,石蜡的包裹效果最佳. 当相变珍珠岩骨料被 60% 的石蜡包裹后,其冷热循环质量损失在 3% 以下,碱浸泡前后热焓损失仅为 4.0%. 通过场发射扫描电镜对相变骨料切割截面进行观测,脂肪酸经吸附进入多孔颗粒内部,并黏附于珍珠岩孔隙内壁,经石蜡包裹后脂肪酸相变材料能够比较稳定地处于石蜡与膨胀珍珠岩骨料包围的孔空间内.

(2) 利用相变珍珠岩制备相变控温砂浆,相对空白砂浆,有较好的控温作用,且物理力学性能达到建筑保温砂浆规范标准. 随着相变材料掺量的增加,砂浆板控温效果提升,表现为:有效热量值降低越多,温度延时越显著,降温幅度增大.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SHI Tao, SUN Wei. Review on application technology progress of phase change building materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(7):1031.
- [3] Peippo K, Kauranen P, Lund P D. A multi-component PCM wall optimized for passive solar heating [J]. Energy and Buildings, 1991, 17(4): 259.
- [4] Karaipekli A, Sari A, Kaygusuz K. Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbonfiber for energy storage applications [J]. Renewable Energy, 2007, 32(13): 2201.
- [5] Dimaano M N R, Watanabe T. The capric-lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(4): 365.
- [6] ZHANG Dong, LI Zongjin, ZHOU Jianmin, et al. Development of thermal energy storage concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004(34):927.
- [7] Sari A, Karaipekli A, Alkan C. Preparation, characterization and thermal properties of lauric acid/expanded perlite as novel form-stable composite phase change material [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3):899.
- [8] 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.
- [9] WANG Xiaopeng, ZHANG Yi, SHEN Zhenqiu, et al. Melting intercalation method to prepare montmorillonite based paraffin composite phase change energy storage material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(4):624.
- [10] 蒋达华, 周阳, 罗凯. 海泡石复合相变储能建筑材料的试验研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(4):4.
- [11] JIANG Dahua, ZHOU Yang, LUO Kai. Study on sepiolite composite phase-transformation building material for energy storage[J]. Non-Metallic Mines, 2008, 31(4):4.
- [12] Heim D, Clarke J A. Numerical modeling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r [J]. Energy and Buildings, 2004, 36:795.
- [13] 钱利姣, 张雄, 宋钦. 相变珍珠岩工艺研究和相变砂浆控温模拟[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 987.
- [14] QIAN Lijiao, ZHANG Xiong, SONG Qin. Process research of phase change perlite and simulation of phase change mortar's temperature control[J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2013, 41(7): 987.
- [15] 刘燕, 蒋晓曙, 陆雷. 癸酸/膨胀珍珠岩复合相变储能材料的制备和性能研究[J]. 材料导报, 2011(5): 315.
- [16] LIU Yan, JIANG Xiaoshu, LU Lei. Research on preparation and properties of capric acid/expanded perlite as phase change material[J]. Material Review, 2011(5): 315.