

# 含相变储能材料石膏板的物理力学及热工性能

李悦<sup>1</sup>, 鲍振洲<sup>1</sup>, 谢静超<sup>1</sup>, 秦宪明<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 100124 北京;

2. 厦门市宏业工程建设技术有限公司, 361012 福建 厦门)

**摘要:** 为优化掺加相变储能材料(CPCM)的石膏板性能,针对实际应用环境条件,通过正交试验研究了温度、湿度等外界条件的变化对掺加CPCM石膏板的物理力学性能及热工性能的影响.结果表明,试件的抗压强度和抗折强度随着CPCM掺量的增大而降低;随钢纤维掺量或含水率的增大而增加.在不同的温度条件下,各影响因素的变化对导热系数变化的影响主次顺序不同.石膏板内部相对湿度及钢纤维掺量的增加有利于提高其导热系数,而CPCM掺量的增加会降低其导热系数.石膏板的导热系数随着板体初始温度的变化而改变,在CPCM相变温度区间的石膏板导热系数最大.

**关键词:** 石膏基复合相变材料;物理力学性能;导热系数;正交试验;防护热板法

中图分类号: TU55

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)09-0088-06

## Mechanical properties and thermal performance of gypsum wallboards incorporated with composite phase change materials

LI Yue<sup>1</sup>, BAO Zhenzhou<sup>1</sup>, XIE Jingchao<sup>1</sup>, Qin Xianming<sup>2</sup>

(1. The Key Lab of Urban Security & Disaster Engineering, Beijing University of Technology, 100124 Beijing, China;

2 Xiamen Hongye Construction Technology Co., Ltd., 361012 Xiamen, Fujian, China)

**Abstract:** To optimize the properties of gypsum wallboards incorporated with Composite Phase Change Material (CPCM), orthogonal test was used, and according to the practical conditions, the mechanical properties and thermal performance of gypsum wallboards incorporated with CPCM were studied. The results show that, the compression and flexural strength of gypsum board decreases with the increase of CPCM content, and increases with the increase of steel fiber content or moisture content. Under different temperature conditions, the influence of various factors on the thermal conductivity is in a different order. Increasing internal relative humidity and steel fiber dosage, leads to increase in the thermal conductivity, but increasing the CPCM content leads to decrease the thermal conductivity. The thermal conductivity of gypsum board is dependent on the initial board temperature. The maximum thermal conductivity appears in the phase transition temperature interval of CPCM.

**Key words:** gypsum board incorporated with CPCM; mechanical properties; thermal conductivity; orthogonal test; protection hot plate method

相对于普通保温隔热材料,复合相变材料(Composite Phase Change Materials, CPCM)在相变温度区间的蓄放热量大而温度变化很小,复合相变材料与石膏结合制作的石膏基相变储能构件能

够在温度较高时吸收热量,在温度较低时释放热量,从而很好地维持室内温度的平衡,减小其受室外温度波动的影响,提高室内环境的舒适性<sup>[1-4]</sup>. 导热系数是影响含相变储能材料的构件吸放热时间和维持室内舒适温度时间的重要因素.由于复合相变材料的导热系数很小,影响了其在吸热和放热时的速率<sup>[5]</sup>,因此,为了提高石膏基相变储能构件的蓄放热速度,很多研究者<sup>[6-9]</sup>采用在复合相变

收稿日期: 2012-12-23.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAE14B06-07);  
厦门市科学技术局科技计划资助项目(3502Z200).

作者简介: 李悦(1972—),男,教授.

通信作者: 鲍振洲, bzzrui@163.com.

材料中掺加石墨纤维的方法等提高材料的导热系数.例如,F. Frusteri 等<sup>[8]</sup>用热线法测试了质量组成为  $w(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 37.5\%$  和质量组成为  $58\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 41\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  的共晶混合物的 PCM 与直径  $6.0 \mu\text{m}$ , 长度  $0.2 \sim 6.0 \text{mm}$  的石墨纤维的混合物的导热系数,建立了混合物导热系数和石墨纤维掺量之间的线性关系,发现当石墨纤维长度为  $0.2 \text{mm}$ , 体积分数为  $7\%$  时,混合物的导热系数最大.T. Oya 等<sup>[9]</sup>用赤藓糖醇与石墨颗粒和镍颗粒制作了 CPCPM,通过激光法测试了其导热系数.结果表明,石墨颗粒和镍颗粒的掺入有效地提高了 CPCPM 的导热系数,当膨胀石墨的体积分数为  $15\%$  时,导热系数最大,达到了  $4.72 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

在 CPCPM 研究基础上,一些学者研究了掺加 CPCPM 的石膏构件的导热系数.例如,陈则韶等<sup>[10]</sup>根据最小热阻力法则和比等效导热系数相等法则,提出了用求复合材料的等效热阻及其限区来确定该复合材料的等效导热系数的方法,计算结果通过与已知实验结果比较,吻合良好.Y. P. ZhANG 等<sup>[11]</sup>提出了数值单元法,用来计算固体复合物的稳态导热系数,结果经试验证明精确度较高;肖伟等<sup>[12]</sup>制备了相变储能石膏板,通过假设相变材料颗粒均匀分布在石膏板中,从相变温度、相变材料质量分数和相变石膏板厚度 3 个方面对相变蓄能石膏板的使用进行了优化.但是,现阶段对导热系数的研究集中在材料本身,对构件所处的实际环境条件的影响考虑较少.针对影响导热系数大小的因素如 CPCPM 掺量、环境湿度和环境温度等,本文通过正交试验探究了各个影响因素对导热系数的影响程度以及各影响因素之间的关系,并对不同掺量 CPCPM 的石膏板物理力学性能进行了比较.

## 1 试验

### 1.1 原材料

石膏,福建厦门产特级熟石膏,其  $\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{0.5}$  质量分数为  $65.1\%$ ,标准稠度用水量为  $0.51$ ,初凝时间  $8 \text{min}$ ,终凝时间  $15 \text{min}$ ;CPCPM,石蜡复合相变材料,相变温度区间为  $15 \sim 23 \text{℃}$ ,相变潜热为  $109.9 \text{J/g}$ ;减水剂:高性能聚羧酸液态减水剂,固含量  $33\%$ ,减水率  $31\%$ ;钢纤维:上海真强纤维有限公司生产镀铜钢纤维,直径  $0.08 \sim 0.13 \text{mm}$ ,长度  $10 \text{mm}$ .

### 1.2 试件的配合比及制作工艺

采用不同掺量的钢纤维来提高导热系数,掺

入石膏体积分数为  $0.5\%$  的聚羧酸减水剂以保证料浆浇筑成型所需的流动性.CPCM 掺量为其在固体拌合物(石膏、CPCM 及钢纤维)中质量比,钢纤维掺量为其体积与试模的体积比.试件的制备采用直接掺入法,试件成型后在  $20 \text{℃}$  室内环境中(相对湿度  $60\%$ )养护  $24 \text{h}$  后烘干,烘干温度为  $70 \text{℃}$ ,然后在环境湿度分别为  $0\%$ 、 $45\%$ 、 $65\%$ 、 $85\%$  条件下养护  $3 \text{d}$  后开始测试.

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 拌合物及石膏板物理力学性能测试方法

石膏的标准稠度用水量和凝结时间按照 GB/T17669.4-1999《建筑石膏净浆物理性能的测定》所提供的方法进行测试.抗压、抗折强度按 GB/T 17669.3-1999《建筑石膏力学性能的测定》进行,测试条件为试件成型  $7 \text{d}$  后的烘干强度.

#### 1.3.2 导热系数的测试

导热系数的测试方法采用《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定——防护热板法》(GB10294-2008),测试仪器采用沈阳紫微机电设备有限公司生产的 CD-DR3030 型导热系数测定仪,待测试件尺寸为  $300 \text{mm}$ (长)  $\times$   $300 \text{mm}$ (宽)  $\times$   $30 \text{mm}$ (厚).

测试过程为:将在不同环境湿度下养护  $3 \text{d}$  的试件密封并冷却,分别恒温至相变温度区间以下 ( $11.5 \text{℃}$ )、相变温度区间之内 ( $17.5$ 、 $20.0$ 、 $22.5 \text{℃}$ ) 以及相变温度区间以上 ( $25$ 、 $30 \text{℃}$ ),迅速移至导热系数测定仪中,该仪器的防护箱中加热板和冷却板的温度差保持恒定为  $5 \text{℃}$ ,加热板和冷却板平均温度与待测试件保持一致.如:当试件温度为  $11.5 \text{℃}$  时,加热板温度为  $14 \text{℃}$ ,冷却板温度为  $9 \text{℃}$ ,如表 1 所示.待导热系数测定值稳定后,取 4 次测试数据平均值作为试件在此温度情况下的导热系数.

表 1 试件温度及测试板温度  $\text{℃}$

待测石膏板的 初始温度	与相变温度 区间关系	加热板温度	冷却板温度
11.5	以下	14.0	9.0
17.5	以内	20.0	15.0
20.0	以内	22.5	17.5
22.5	以内	25.0	20.0
25.0	以上	27.5	22.5
30.0	以上	32.5	27.5

正交实验采用  $L_{16}(4^3)$  的正交实验表,实验因素水平如表 2 所示.

表2 因素水平表

编号	CPCM 质量分数	养护环境湿度	钢纤维体积分数
1	33.3	0	0
2	25.0	45	0.5
3	16.7	65	1.0
4	0	85	2.0

## 2 结果与分析

### 2.1 材料组成对物理力学性能的影响

在检验人员不变、试样质量均匀、检验仪器设备相同的情况下,石膏板强度的检验值服从正态分布,同时组与组的方差相等,且数据相互独立,取每组试样测试的平均值作为实验结果.不同钢纤维体积分数时,抗压强度、抗折强度与CPCM质量分数的关系如图1、图2所示.图3、图4表示不同CPCM掺量下,抗压强度、抗折强度与钢纤维体积分数的关系.

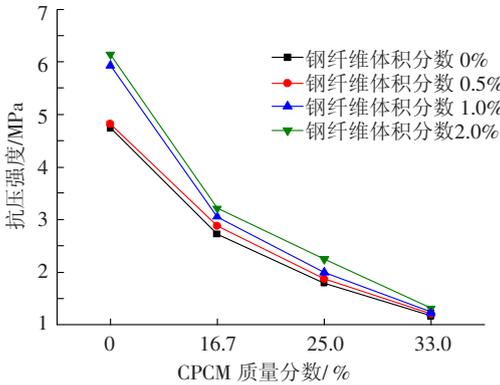


图1 抗压强度与CPCM质量分数间的关系

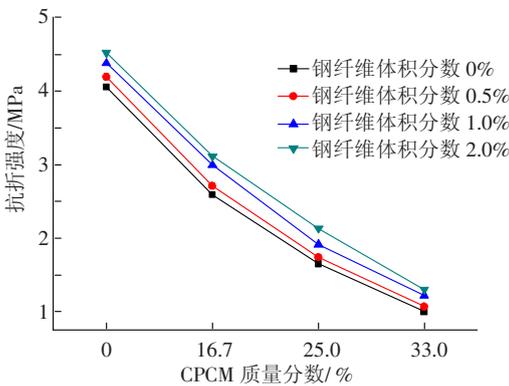


图2 抗折强度与CPCM质量分数间的关系

由图1、2可知,CPCM掺量越大,试件的抗压强度和抗折强度越低,这是由于:CPCM本身强度很低且不能与石膏基材料发生胶凝反应,其在试件中的质量分数越大,则试件中起胶凝作用的石膏体积分数就越少,故试件的强度也就越低.由图3、4可知,构件的抗压和抗折强度随钢纤维掺量的增大

而增加,这是因为:钢纤维均匀地分散于基体石膏中,能够减小因荷载在基体石膏引起的细裂缝端部的应力集中,从而控制石膏裂缝的扩展,并在试件的受力破坏过程中吸收了部分能量,从而提高了试件的抗压强度和抗折强度<sup>[13]</sup>;同时,钢纤维对石膏基材料抗弯强度提高效果不如水泥基材料,其原因是石膏界面粘接强度大大低于水泥基材料,二者协同工作效应不显著.由数据可知,CPCM质量分数每增大1%,则抗压强度降低约10%,抗折强度降低约9.5%.

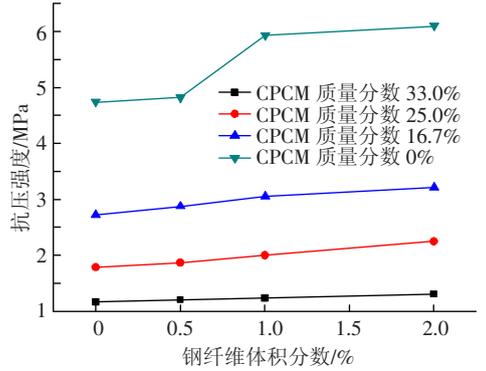


图3 抗压强度与钢纤维体积分数间的关系

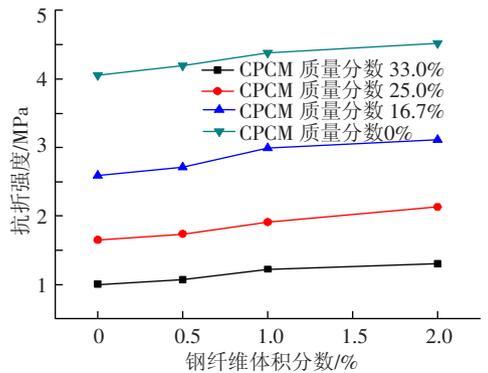


图4 抗折强度与钢纤维体积分数间的关系

### 2.2 各因素对导热系数的影响

在检验人员不变,试样成型均匀,检验仪器设备及检测环境相同的情况下,对各试样的导热系数进行测试,导热系数值取3次测试的平均值,测试、分析结果如表3、4所示.

从表4的分析结果可知,对于不同初始温度的石膏板,影响其导热系数的因素是不同的,此外考察了各单独因素对构件导热系数的影响规律并进行了分析.

### 2.3 CPCM掺量对石膏基复合材料导热系数的影响分析

取一组钢纤维体积分数0%,养护湿度为45%的构件测试其导热系数,图5为CPCM掺量与构件导热系数的关系.

表3 正交试验结果

编号	CPCM 质量分数/%	环境湿度/%	钢纤维体积分数/%	不同初始温度下的导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )		
				11.5 °C	17.5 °C	25.0 °C
1	33.3	0	0	0.286	0.285	0.294
2	33.3	45	0.5	0.300	0.298	0.310
3	33.3	65	1.0	0.320	0.314	0.330
4	33.3	85	2.0	0.350	0.346	0.355
5	25.0	0	0.5	0.298	0.287	0.306
6	25.0	45	0	0.294	0.289	0.303
7	25.0	65	2.0	0.310	0.308	0.321
8	25.0	85	1.0	0.306	0.309	0.318
9	16.7	0	1.0	0.275	0.276	0.282
10	16.7	45	2.0	0.300	0.289	0.311
11	16.7	65	0	0.294	0.293	0.304
12	16.7	85	0.5	0.307	0.310	0.322
13	0	0	2.0	0.313	0.304	0.316
14	0	45	1.0	0.308	0.306	0.318
15	0	65	0.5	0.310	0.299	0.320
16	0	85	0	0.301	0.309	0.321

表4 正交试验结果分析

分析内容	指标	CPCM 质量分数/%	环境湿度/%	钢纤维体积分数/%	不同初始温度下的导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )		
					11.5 °C	17.5 °C	25.0 °C
板初始温度低于相变温度区间导热系数分析	K <sub>1</sub> K <sub>2</sub> K <sub>3</sub> K <sub>4</sub> R	1.256 1.208 1.176 1.232 0.080	1.172 1.200 1.232 1.264 0.092	1.176 1.216 1.208 1.272 0.096	K <sub>j</sub> 为第j列因素4个水平所对应的试验指标和; R <sub>j</sub> 为第j列因素的极差, R 的大小表示各因素对指标影响程度的大小. 根据 R 可以看出: 钢纤维体积分数的影响最大, 环境湿度次之, CPCM 掺量的影响最小.		
板初始温度在相变温度区间以内导热系数分析	K <sub>1</sub> K <sub>2</sub> K <sub>3</sub> K <sub>4</sub> R	1.244 1.192 1.168 1.216 0.076	1.152 1.180 1.212 1.276 0.124	1.176 1.192 1.204 1.248 0.072	根据 R 可以看出: 环境湿度的影响最大, CPCM 掺量和钢纤维掺量的影响相似且均较小.		
板初始温度高于相变温度区间导热系数分析	K <sub>1</sub> K <sub>2</sub> K <sub>3</sub> K <sub>4</sub> R	1.288 1.248 1.220 1.276 0.068	1.196 1.240 1.276 1.316 0.120	1.220 1.260 1.248 1.304 0.084	根据 R 可以看出: 环境湿度的影响最大, 钢纤维掺量影响次之, CPCM 掺量影响较小.		

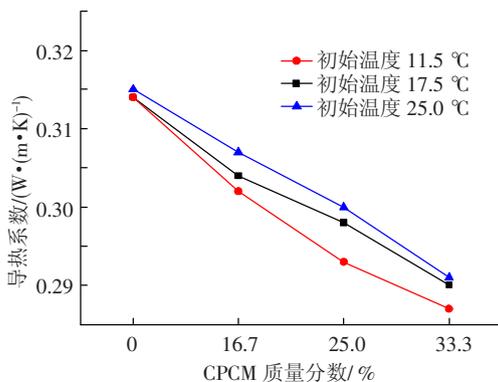


图5 CPCM 掺量对导热系数的影响

由图5可知,随着CPCM掺量的增加,不同初始温度构件的导热系数均降低.其原因分析如下:假定构件中的固体混合均匀,CPCM在石膏构件

中是均匀分布的非连续相,多成立方体状态,而石膏基体是连续相,由数值单元法得到的复合材料的等效导热系数λ计算方法为

$$\frac{\lambda}{\lambda_2} = 0.5 \left[ \frac{1}{\left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) \left( \frac{w_1}{\rho_1^*} \right)^{1/3} + 1} - 1 \right] \left( \frac{w_1}{\rho_1} \right)^{2/3} + 0.5 + \frac{0.5}{\left[ 1 - \left( w_1 / \rho_1^* \right) \right]^{1/3} + \frac{\left( w_1 / \rho_1^* \right)^{1/3}}{\left[ \left( \lambda_2 / \lambda_1 \right) - 1 \right] \left( w_1 / \rho_1^* \right)^{2/3} + 1}}$$

$$\rho_1^* = \rho_1 / \rho.$$

式中:λ<sub>1</sub>、λ<sub>2</sub>分别为CPCM和石膏的导热系数;w<sub>1</sub>为CPCM的质量分数,%;ρ<sub>1</sub>、ρ分别为CPCM和试件的密度,ρ<sub>1</sub> = 660 kg/m<sup>3</sup>.

表5列出了石膏板初始温度为11.5 °C时的

导热系数计算结果和实测值.可以看出,导热系数的计算结果随着CPCM掺量的增大而减小.比较导热系数的计算值与实测值可以发现,二者相差最大值不超过8.2%,说明上述等效导热系数的

计算方法适用于分析掺加相变储能材料的导热系数.此外,其他两个初始温度(17.5、25.0℃)的石膏板导热系数计算结果规律与表5中11.5℃的试件规律相似.

表5 石膏板初始温度为11.5℃时的导热系数值

编号	$w_1/$ %	$\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\rho_1/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\lambda_1/$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\lambda_2/$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	$\lambda/$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	实测 $\lambda/$ ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )
1	0	1 300	0.508	0.265	0.325	0.325	0.313
2	0.167	1 193	0.553	0.265	0.325	0.280	0.292
3	0.250	1 140	0.579	0.265	0.325	0.270	0.283
4	0.330	1 067	0.619	0.265	0.325	0.256	0.277

### 3 钢纤维和水体积分数对石膏基复合材料导热系数的影响分析

图6表示一组CPCM质量分数为16.7%、养护湿度为45%的构件在不同钢纤维掺量下的导热系数变化;图7表示一组为CPCM质量分数为16.7%、钢纤维体积分数为0.5%的构件在含水率不同的情况下的导热系数.

材料的等效导热系数为

$$\lambda = \lambda_1 \psi_1 + \lambda_2 \psi_2. \quad (1)$$

式中: $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 分别为钢纤维(或水的)、石膏的体积分数; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为钢纤维(或水的)、石膏的导热系数.由于钢纤维的导热系数远大于石膏和CPCM;另外,随着环境相对湿度的增大,构件的含水率增大,水的导热系数也远高于石膏和CPCM.因此根据式(1)可知,随着钢纤维掺量和构件含水率的增大,构件的导热系数将增大.

#### 3.1 温度与导热系数的关系

按照表1方案用稳态方法测试构件在不同温度下的导热系数.测试计算为

$$\lambda = \frac{Qd}{2A(T_1 - T_2)}. \quad (2)$$

通过测试一组构件的含水量0%、钢纤维体积分数0.5%、CPCM质量分数分别为0、16.7%、25.0%、33.0%的相变储能石膏板,来研究各组构件的导热系数随不同初始温度的变化规律,结果如图8所示.首先,各构件在相变温度范围以内的导热系数要高于相变范围以外的导热系数,究其原因,根据式(2)可知该测试方法不能从加热功率中区分潜热与显热耗热量,当温度处于相变温度区间时,包含CPCM的石膏基复合相变材料的吸热量大,为维持热平衡,则加热功率 $Q$ 增大,当温差 $(T_1 - T_2)$ 、板厚度 $d$ 和传热面积 $A$ 不变时,加热功率 $Q$ 越大,导热系数 $\lambda$ 则越大.另外,存在着适宜的CPCM掺量,在测试的各组相变构件中,相变范围内PCM为25%的相变构件导热系数最大.还有,测试同一构件时,初始温度低于相变温度范围的导热系数要比初始温度高于相变温度范围的导热系数小,这是因为高于相变温度时,CPCM已经转为液态,相对于低于相变温度区间的固态CPCM,呈熔融状态的PCM分子运动激烈,吸热量大,因此导热系数比低于相变温度区间

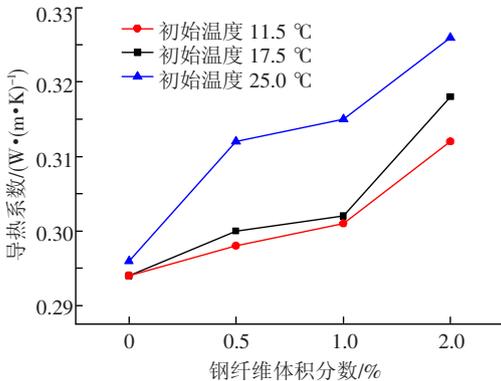


图6 钢纤维体积掺量对导热系数的影响

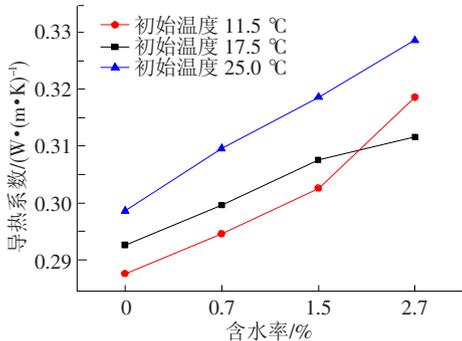


图7 含水率对导热系数的影响

从图6可知,随着钢纤维掺量的增加,不同初始温度的石膏板导热系数增加.由图7可知,随着构件含水率的增大,不同初始温度的石膏板导热系数增大.由Torquato层状复合材料热传导模型<sup>[14]</sup>可知,在相变储能石膏板的传热方向,复合

的导热系数大。

在建筑储能构件中潜热的吸收与释放过程频繁,本研究把蓄放热中潜热的热量作为导热系数的参数来计算,可以更加便捷地评价相变构件的储能应用效果。

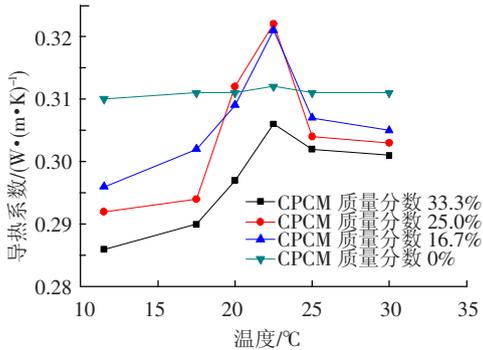


图8 不同温度区间导热系数的变化

## 4 结 论

1) 试件的抗压强度和抗折强度随着 CPCM 掺量的增大而降低;随钢纤维掺量的增大而增加。

2) 当初始温度在 CPCM 相变温度区间以下时,钢纤维掺量对构件导热系数的影响最大,CPCM 掺量的影响最小;当初始温度在 CPCM 相变温度区间内时,环境湿度对构件的导热系数的影响最大,CPCM 掺量和钢纤维掺量的影响相似且均较小;当初始温度在 CPCM 相变温度区间以上时,环境湿度对构件导热系数的影响最大,钢纤维掺量影响次之,CPCM 掺量影响较小。

3) 钢纤维掺量和养护湿度恒定时,随着 CPCM 掺量的增加,不同初始温度构件的导热系数均降低,数值单元法方法适用于分析参加相变储能材料的导热系数;CPCM 掺量和养护湿度不变时,随着钢纤维掺量的增加,不同初始温度的石膏板导热系数增加;CPCM 掺量和钢纤维掺量不变时,随着构件含水率的增大,不同初始温度的石膏板导热系数增大。

4) 基于稳态测试的防护热板法,各构件在 CPCM 相变温度区间的导热系数要比相变温度区间以外的导热系数大;对于同一构件,石膏板初始温度低于相变区间的导热系数比初始温度高于相变区间的导热系数小;存在着适宜的 CPCM 掺量,当构件的初始温度处于相变温度区间时,导热系数最大。

## 参考文献

[1] CHAN A L S. Energy and environmental performance of building facades integrated with phase change material in subtropical Hong Kong [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(10): 2947 - 2955.

[2] KUZNIK F, VIRGONE J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(10): 2038 - 2046.

[3] NEEPER D A. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage [J]. *Solar Energy*, 2000, 68(5): 393 - 403.

[4] ZHANG Chengbin, CHEN Yongping, WU Liangyu, *et al.* Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12): 3524 - 3520.

[5] MESALHY O, LAFDI K, ELGAFY A, *et al.* Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(6): 847 - 867.

[6] FUKAI J, KANOU M, KODAMA Y, *et al.* Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(14): 1543 - 1556.

[7] FUKAI J, HAMADA Y, MOROZUMI Y, *et al.* Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfer in phase change materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(24): 4781 - 4792.

[8] FRUSTERI F, LEONARDI V, VASTA S, *et al.* Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(11/12): 1623 - 1633.

[9] OYA T, NOMURA T, TSUBOTA M, *et al.* Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles [J]. *Applied Thermal Engineering* (2012), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.05.033.

[10] 陈则韶, 钱军, 叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算 [J]. *中国科学技术大学学报*, 1992, 4(22): 416 - 424.

[11] ZHANG Yinping, LIANG Xingang. Numerical analysis of elective thermal conductivity of mixed solid materials [J]. *Material and Design*, 1995, 16(2): 91 - 95.

[12] 肖伟, 王馨, 张寅平, 等. 轻质建筑中相变蓄能石膏板热性能研究 [J]. *建设科技*, 2008, (10): 84 - 88.

[13] 陈爱玖, 王静, 杨粉. 钢纤维再生混凝土抗压强度试验研究 [J]. *混凝土*, 2012, (4): 64 - 66.

[14] TORQUATO S. *Random heterogeneous materials* [M]. New York: Springer, 2002: 134 - 136.

[15] JIANG Feng, WANG Xin, ZHANG Yinping. A new method to estimate optimal phase change material characteristics in a passive solar room [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(6): 2437 - 2441.