

文章编号:1007-9629(2023)04-0361-08

聚乙二醇/水泥基复合相变材料的制备与表征

杜银飞¹, 王志杰¹, 全先凯¹, 马 聪^{2,*}, 金 娇³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院,
广东 深圳 518061; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要:基于水化-结晶法,以聚乙二醇为相变材料,硫铝酸盐水泥的水化产物为基体,利用聚乙二醇的水溶性和硫铝酸盐水泥的水硬性制备了一种高聚乙二醇含量的水泥基复合相变材料(CPCMs),研究了其微观结构、化学兼容性、晶体结构、相变特性、热稳定性及降温效果.结果表明:聚乙二醇能够均匀地分散在硫铝酸盐水泥水化产物构成的多孔网络结构中,负载情况良好;聚乙二醇与硫铝酸盐水泥水化产物的化学兼容性良好,二者没有发生化学反应;CPCMs在250℃以下具有良好的热稳定性,具备用于相变储热沥青路面的温度条件;当聚乙二醇质量分数为36.36%时,CPCMs的相变焓高达62.48 J/g,与对照组硫铝酸盐水泥相比,其表面温度降低了7.3℃.

关键词:路面降温;硫铝酸盐水泥;相变材料;聚乙二醇;降温性能

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.004

Preparation and Characterization of Polyethylene Glycol/ Cement-Based Composite Phase Change Materials

DU Yinfei¹, WANG Zhijie¹, QUAN Xiankai¹, MA Cong^{2,*}, JIN Jiao³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Hydration products of sulphoaluminate cement were used to produce the phase change material of polyethylene glycol. A kind of cement-based composite phase change materials(CPCMs) with high polyethylene glycol content was prepared by the steps of hydration and crystallization, taking advantage of the water solubility of polyethylene glycol and the hydraulic property of sulphoaluminate cement. The microstructure, chemical compatibility, crystal structure, phase change properties, thermal stability and cooling performance of CPCMs with different polyethylene glycol contents were systematically analyzed. The results show that polyethylene glycol is well distributed in the porous network structure of hydration products with high loading capacity. Polyethylene glycol and hydration products of sulphoaluminate cement have good chemical compatibility with no chemical reaction between them. CPCMs have good thermal stability under 250℃, indicating that the CPCMs can be used to construct phase change thermal storage asphalt pavement. The phase change enthalpy of CPCMs with polyethylene glycol mass fraction of 36.36% can reach up to 62.48 J/g, the surface temperature of which reduces by 7.3℃ compared with the control group sulphoaluminate cement.

Key words: pavement cooling; sulphoaluminate cement; phase change material; polyethylene glycol; cooling performance

收稿日期:2022-03-22; 修订日期:2022-04-18

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2601000);国家自然科学基金资助项目(51808562);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5723)

第一作者:杜银飞(1985—),男,山东临沂人,中南大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: yfdu_csu@csu.edu.cn

通讯作者:马 聪(1989—),男,山东菏泽人,深圳大学助理教授,硕士生导师,博士.E-mail: macong@szu.edu.cn

沥青路面在中国应用广泛,然而沥青材料的黑色特性导致其强烈吸收太阳辐射^[1],在夏季路表最高温度可达70℃^[2]。高温沥青路面会引发诸多问题,如车辙^[3]、释放有害成分^[4]及加剧城市热岛效应^[5]等,在降低沥青路面使用寿命的同时还影响行人的舒适度。因此,降低沥青路面的温度是改善上述问题的关键之一。

相变储热沥青路面在路面降温领域优势显著^[6]。有机相变材料因其相变焓高及热稳定性好等优点被广泛使用^[7]。针对其泄露问题,研究人员常采用微胶囊、宏封装和形状稳定封装这3种方式^[8-10]予以改善。其中,采用基体材料吸附相变材料(PCM)制备的形状稳定的复合相变材料(CPCMs)具有储放热效率高、热稳定性好和强度高优势^[11]。

近年来,水泥基材料作为用量最大的建筑材料,在相变储热领域的应用愈加广泛^[12-13]。Liu等^[14]利用回收膏体的多孔吸附特性,将石蜡与再生水泥浆混合制备复合相变材料。Suttaphakdee等^[15]将压碎的混凝土块通过浸渍法制备了石蜡/再生混凝土复合相变材料。以上研究表明,水泥作为吸附PCM的基体材料是可行的。然而,利用再生水泥基材料二次吸附PCM的工艺复杂,且吸附率低。硫铝酸盐水泥(SAC)作为一种高早强水泥^[16],强度发展快,以其吸附PCM是提高水泥基CPCMs相变组分含量的新思路^[17]。

鉴于此,本文基于水化-结晶法,结合聚乙二醇(PEG)良好的水溶性,以SAC水化产物为基体制备高PEG含量的CPCMs。通过微观试验表征CPCMs的微观组织、化学组成及晶体结构,采用热分析表征其相变特性及热稳定性,最后通过室内照射试验验证其在沥青路面降温领域应用的可行性,以期制备高相变焓CPCMs和降低沥青路面温度提供依据。

1 试验

1.1 原材料

SAC,比表面积为389 m²/kg,化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量等除特别说明外均为质量分数或质量比)如表1所示;PEG,平均分子量为2 000,吸热时相变峰值温度为58.73℃,相变焓为194.98 J/g。

表1 SAC的化学组成
Table 1 Chemical composition of SAC

w/%						
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	IL
6.51	41.02	1.03	37.95	8.79	1.03	0.16

1.2 CPCMs的制备

以1.2作为PEG与水的初始质量比,按照0.2的质量比梯度分别制备5种PEG水溶液,水灰比保持在0.4不变,将PEG溶液缓慢加入水泥中。首先将材料在水泥胶砂搅拌机中低速(140 r/min)搅拌120 s,然后停止搅拌15 s,再高速(280 r/min)搅拌120 s后倒入尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的模具中。在(20±1)℃、相对湿度为95%以上的水泥标准养护条件下养护28 d后,将CPCMs试样从模具中取出并粉碎,分别制得CPCMs碎块和粒径小于0.075 mm的粉体。

需要注意的是,在制备过程中,当PEG与水的质量比超过2.0时,由于PEG含量过高,析出的PEG大量附着在水泥颗粒表面,阻碍了水泥颗粒与自由水的接触,导致水化反应不完全,试样和易性差,无法成型,因此本研究制备的CPCMs中PEG与水质量比最高为2.0。将PEG与水的质量比分别为1.2、1.4、1.6、1.8和2.0的CPCMs分别命名为CPCM1、CPCM2、CPCM3、CPCM4和CPCM5。

1.3 CPCMs的表征和性能测试方法

1.3.1 微观性能测试

使用日本JEOL公司生产的JSM-IT500LV型扫描电子显微镜(SEM)观察SAC水化产物和CPCMs的形貌与微观结构;使用美国Thermo公司生产的Nicolet iS50型傅里叶变换红外吸收光谱仪(FTIR)来评价PEG和SAC的化学相容性;使用德国Bruker公司生产的D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)来表征CPCMs的晶体结构。

1.3.2 热性能测试

CPCMs的热性能包括相变特性和热稳定性。使用美国TA Instruments公司生产的Q10型差示扫描量热仪(DSC)对样品进行测试,升温速率为5℃/min,试验温度为20~80℃。使用美国TA Instruments公司生产的Q10型热重分析仪(TGA)测试其热稳定性,加热速率为10℃/min,测试温度为20~600℃。

1.3.3 室内照射试验

将尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的CPCMs试样标准养护28 d后从模具中取出,每个CPCMs试样用泡沫板包裹保温,将功率为500 W的碘钨灯放置在CPCMs试样上方以模拟太阳辐射,碘钨灯距试样表面高度80 cm,如图1所示。每5 min用美国菲力尔公司生产的FLIR E6红外热成像仪对试样的表面温度进行记录。为了减少由于辐照强度差异而产生的温度数据变异,试验分3组进行,每个试样测试2

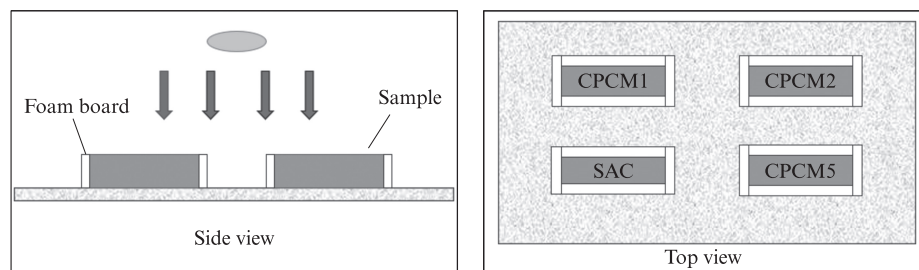


图1 室内照射试验示意图

Fig. 1 Diagram of indoor irradiation test

次表面温度,用Flir软件处理每个试样的温度数据,并取其平均值作为试样表面温度.试样的分组如表2所示.

表2 试样的分组
Table 2 Grouping of samples

Group No.	Sample			
1	CPCM1	CPCM2	CPCM5	SAC
2	CPCM3	CPCM4	CPCM5	SAC
3	CPCM1	CPCM2	CPCM3	CPCM4

2 结果与讨论

2.1 CPCMs的微观性能分析

2.1.1 CPCMs的微观形貌分析

图2为SAC和CPCMs的SEM图像.由图2可见:

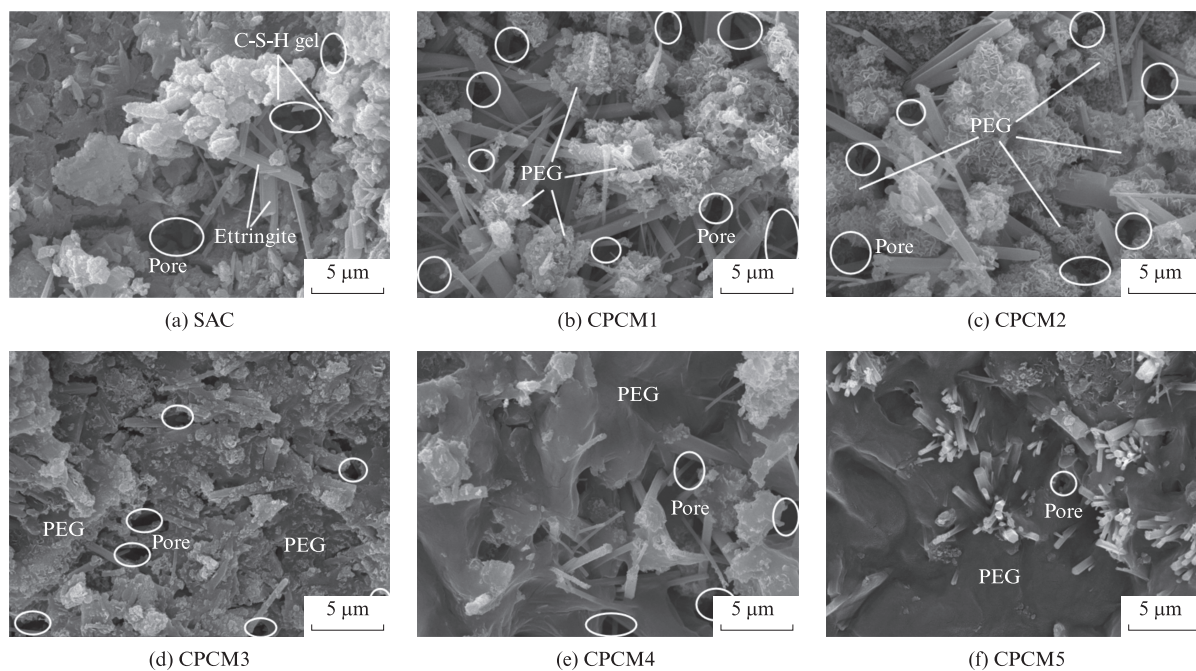


图2 SAC和CPCMs的SEM图像

Fig. 2 SEM images of SAC and CPCMs

2.1.2 CPCMs的化学兼容性分析

为了评估PEG和SAC水化产物之间可能存在的相互作用,研究二者之间的化学兼容性.对

(1)SAC中的簇状钙矾石(Aft)晶体和不规则的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶连接构成了三维网络结构.掺入PEG之后,其微观结构发生了变化,导致单位体积的水化产物含量降低,由此造成水泥水化产物的致密性下降,内部形成了更多的孔隙.微观结构致密性的下降主要是由于水化产物C-S-H凝胶的减少^[18].也就是说,PEG的掺入会降低水化产物的含量,一定程度上抑制了水泥的水化.

(2)随着PEG含量的增加,水化体系中的孔隙逐渐被PEG填充,内部孔隙减少.当PEG与水的质量比达到2.0(即CPCM5)时,水化产物之间的多孔网络结构大部分被PEG填充,形成了牢固的PEG封装体系,表明水泥具有丰富的孔结构,能够作为PEG的载体并且为其提供良好的封装性.

SAC和CPCMs样品进行了FTIR分析,结果如图3所示.表3为图3中PEG和SAC的主要特征吸收峰.

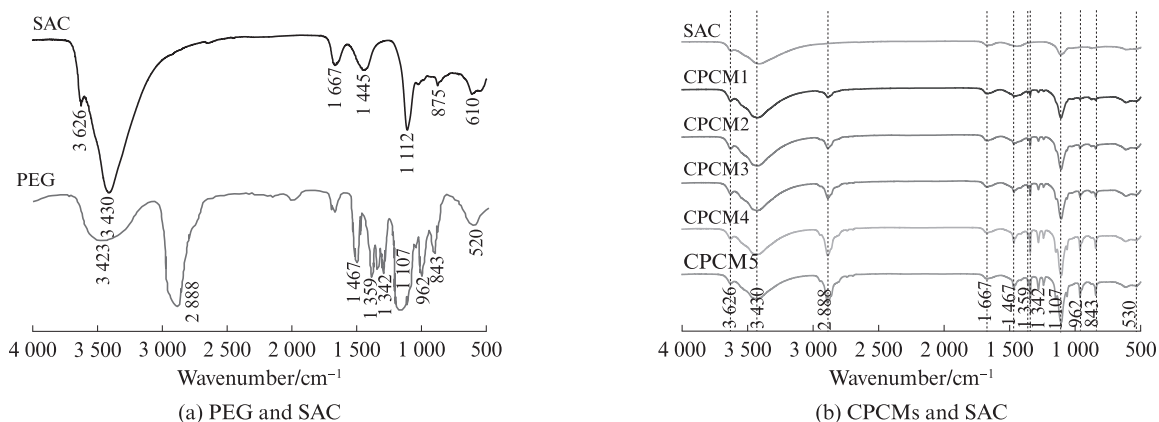


图3 PEG、SAC和CPCMs的FTIR图谱
Fig. 3 FTIR spectra of PEG, SAC and CPCMs

由图3可见:6种不同PEG含量水泥基样品的FTIR图谱在特征峰位置上具有高度的相似性;CPCMs的FTIR图谱中同时含有PEG和SAC的特

征峰且没有出现新的特征峰,说明PEG和SAC的水化产物只是简单的物理吸附,组分之间通过氢键或者范德华力相结合,没有发生化学变化。

表3 PEG和SAC的波数与红外吸收峰
Table 3 Wavenumbers and infrared absorption peaks of PEG and SAC

Material	Wavenumber/cm ⁻¹	Characteristic peak
PEG ^[19-20]	2 888	Stretching vibration absorption peak of C—H group
	1 467	Bending vibration absorption peak of C—H group
	1 359	Stretching vibration peak of CH ₂ group
	1 342	Stretching vibration peak of C—H group
	1 107	Stretching vibration peak of C—O group
	962	Crystallization characteristic peak of PEG
	843	Characteristic peak of CH ₂ group
SAC ^[21-22]	3 626/3 430	Stretching vibrational absorption peaks of -OH groups in ettringite and water molecules
	1 667	Bending peak of the -OH group in Al[(OH) ₆] ³⁻
	1 445	Vibrational peak of CO ₃ ²⁻ group
	1 112/875	Asymmetric stretching vibration peaks of SO ₄ ²⁻ group and SiO ₄ group

2.1.3 CPCMs的结晶特征分析

图4为PEG、SAC和CPCMs的XRD图谱.从图4中可以看出:

(1)PEG的XRD图谱中有2个强度很高的特征衍射峰,分别为19.16°和23.26°.

(2)CPCMs的成分除了外掺的PEG之外,主要包括AFt、硫酸钙(CaSO₄)、碳酸镁钙(CaMg(CO₃)₂)、碳酸钙(CaCO₃)、钙铝黄长石(C₂AS)等水化产物和部分未水化的硫铝酸钙(C₄A₁SO₁₆),不同PEG含量CPCMs的XRD图谱在对应的位置均显示了衍射峰.表明CPCMs的峰形和衍射角与PEG及SAC的水化产物相似,没有产生新的衍射峰,即PEG与水泥只是物理混合,不参与水泥的水化反应,与FTIR的分析结果一致.

(3)从特征峰强度来看,AFt的衍射峰峰位是9.08°、15.73°和34.91°.对比SAC和CPCMs的XRD

图谱发现,随着PEG含量的增加,AFt的衍射峰强度逐渐减小;C₄A₁SO₁₆的特征峰是23.75°,其强度随着PEG的掺入而增加.这是因为水化过程中析出的PEG晶体覆盖在水泥熟料颗粒的表面,降低了水泥的水化程度,从而导致CPCMs中水化产物AFt的减少以及含有较多未水化的C₄A₁SO₁₆.

2.2 CPCMs的热性能分析

2.2.1 CPCMs的储热性能分析

图5为PEG与CPCMs的DSC结果.表4为PEG和CPCMs的相变特性.其中,理论相变焓通过式(1)确定.

$$\Delta H_{\text{CPCMs}} = w \Delta H_{\text{PEG}} \quad (1)$$

式中: ΔH_{CPCMs} 为CPCMs的理论相变焓,J/g; w 为CPCMs中PEG的质量百分比,%; ΔH_{PEG} 为DSC测定的PEG相变焓,J/g.

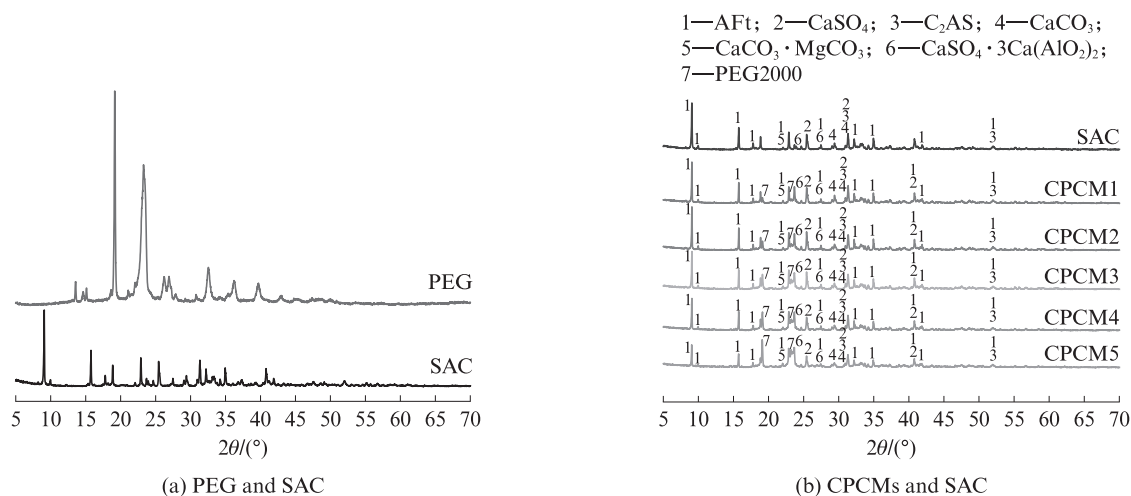


图4 PEG、SAC和CPCMs的XRD图谱
Fig. 4 XRD patterns of PEG, SAC and CPCMs

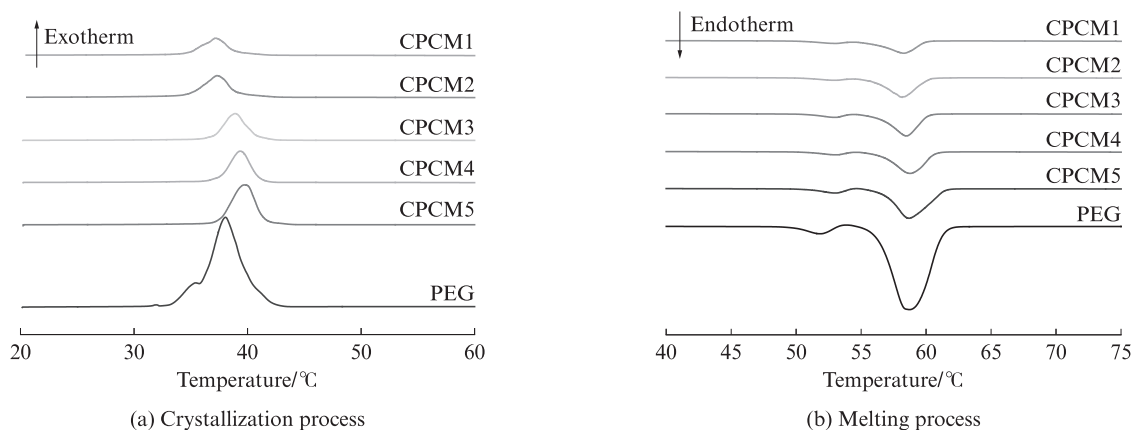


图5 PEG与CPCMs的DSC结果
Fig. 5 DSC results of PEG and CPCMs

表4 PEG和CPCMs的相变特性
Table 4 Phase change characteristics of PEG and CPCMs

Sample	$w(\text{PEG})/\%$	Tested enthalpy/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	Theoretical enthalpy/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	Latent heat loss ratio/%	Peak temperature of melting/ $^{\circ}\text{C}$	Peak temperature of crystallization/ $^{\circ}\text{C}$
PEG		194.98			58.73	38.06
CPCM1	25.53	40.04	49.78	19.57	58.45	37.19
CPCM2	28.57	46.14	55.71	17.18	58.30	37.32
CPCM3	31.37	54.36	61.16	11.11	58.49	38.92
CPCM4	33.96	57.81	66.21	12.69	58.80	39.37
CPCM5	36.36	62.48	70.89	11.86	58.67	39.74

由图5和表4可知,CPCMs的相变峰值温度与纯PEG接近.此外,CPCMs的储热性能取决于水泥中PEG的含量,其相变焓随着PEG质量分数的增加而增大,当PEG的质量分数达到36.36%(CPCM5)时,其吸热焓高达62.48 J/g.

对比表4中相变焓的试验值和理论值可知,CPCMs的实际相变焓与理论相变焓相差并不大,但其相变焓的试验值均比理论值低,并且相应潜热损

失率整体随着PEG质量分数的增加而减小.这是因为水泥水化后,水化产物之间的微孔隙结构在保证封装效果的同时,也限制了PEG相变时体积的自由膨胀,导致PEG链段的运动受到限制^[23],这种作用阻碍了PEG在吸热过程中的结晶,致使CPCMs中相变功能组分PEG未能发挥相应的相变储热能力,相变焓有不同程度的损失.随着PEG含量的增加,更多的PEG填充到CPCMs的孔隙结构中,水化产物

的微孔隙结构减少,相变熔的试验值更加接近理论值,因此潜热损失率逐渐减小。

2.2.2 CPCM的热稳定性分析

热稳定性是相变材料非常重要的一个性能,决定了相变材料在实际应用中的温度适用范围。图6为SAC和CPCMs的TG-DTG曲线。由图6可见:

(1)SAC的质量损失可以分为2个阶段:第1阶段是AFt在70~140℃范围内发生的热分解;第2阶段是C-S-H凝胶的脱水,在140~250℃范围内发

生^[24]。2个阶段分别对应于DTG曲线的2个峰值点。加入PEG之后,CPCMs的DTG曲线在300~400℃之间存在1个峰值点,代表着PEG的热分解^[25]。

(2)总的来说,CPCMs的TG和DTG曲线有同样的变化趋势,但相应的质量损失不同。在前2个阶段(70~250℃),质量损失与AFt、C-S-H凝胶含量有关,且随着PEG含量的增加逐渐减小,SAC和CPCMs的质量损失分别为18.16%、13.88%、10.57%、9.99%、8.72%和7.37%;在300~400℃,质

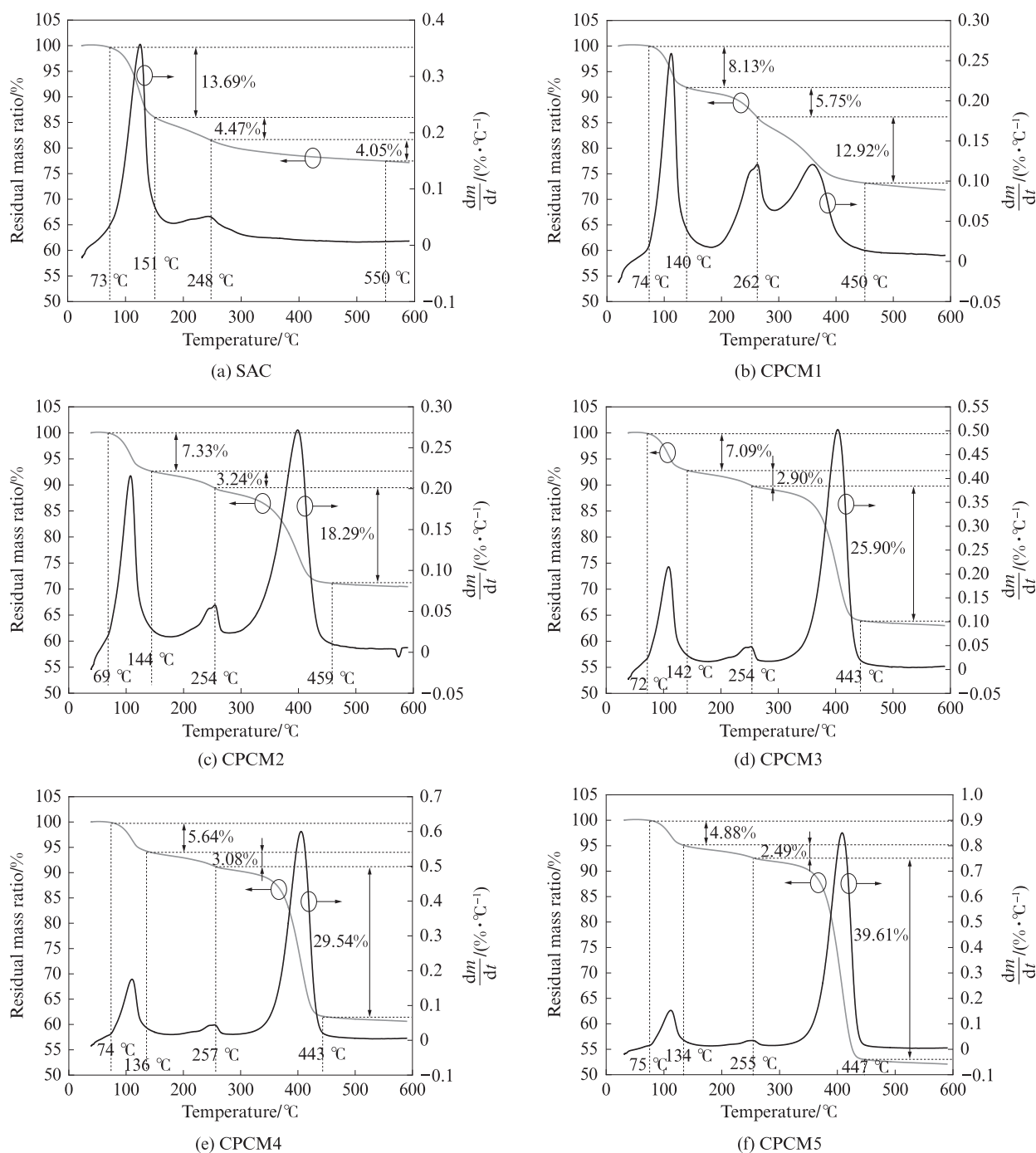


图6 SAC和CPCMs的TG-DTG曲线
Fig. 6 TG-DTG curves of SAC and CPCMs

量损失与PEG的含量有关,依次增加.这是因为随着PEG含量的增加,水化生成的AFt和C-S-H凝胶含量降低.结果表明,在温度低于250℃时,CPCMs的热稳定性高于SAC,且随着PEG含量的增加,CPCMs的热稳定性越来越好,CPCM5在250℃以下的质量损失仅有7.37%,而沥青混合料的正常工作温度不高于200℃.因此,CPCMs适用于相变储热沥青路面.

2.3 CPCMs的降温性能验证

为了评估CPCMs的降温能力,在20℃室温下对不同PEG掺量的水泥基样品进行照射试验,其表面温度分布如图7所示.由图7可见:6个不同PEG含量样品表面温度的变化趋势大致相同,在初始阶段样品温度未达到CPCMs的相变温度时,CPCMs的表面温度略低于SAC的表面温度;随着辐照时间的延长,6个样品的表面温度持续上升;当温度接近55℃时,PEG开始吸收大量热量直到完成固-液相转变,在相变时间段内辐照产生的热量被CPCMs中的PEG吸收并储存,SAC和CPCMs的温差进一步增大,并且PEG含量越高CPCMs的表面温度上升速率越慢,与DSC的测试结果相符;试验结束时,CPCMs的表面温度均低于SAC的表面温度,其中CPCM5的表面温度较对照组SAC下降了7.3℃,表明CPCM5具有良好的降温性能.

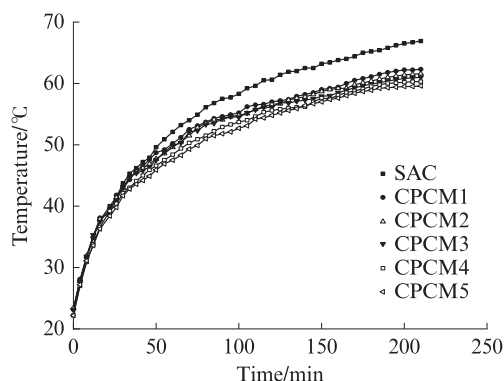


图7 SAC和CPCMs的表面温度分布
Fig. 7 Surface temperature profiles of SAC and CPCMs

3 结论

(1)聚乙二醇(PEG)在硫铝酸盐水泥(SAC)水化产物的孔隙结构中分散均匀,负载情况良好.PEG没有参与水泥的水化反应,二者只是物理相容,但PEG在一定程度上降低了水泥的水化程度.

(2)PEG的结晶受到限制,导致复合相变材料(CPCMs)的相变焓有不同程度的损失.随着PEG含量的增加,CPCMs的相变焓增大,其中CPCM5的相

变焓高达62.48 J/g.此外,CPCMs在250℃以下的热稳定性高于SAC,其质量损失在250℃以下与PEG的含量呈负相关,其中CPCM5的质量损失低至7.37%,因此CPCMs的工作温度应低于250℃.

(3)CPCMs的表面温度均低于SAC的表面温度,且随着PEG含量的增加,其表面温度越来越低,PEG含量最高的CPCM5的表面温度与对照组SAC相比下降了7.3℃,表明CPCMs具有良好的降温能力.

参考文献:

- [1] 张争奇,张世豪,郭大同,等.彩色反射式沥青路面涂层的路用性能[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(5):611-616. ZHANG Zhengqi, ZHANG Shihao, GUO Datong, et al. Road performance of color reflective asphalt pavement coating [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2018, 39(5): 611-616. (in Chinese)
- [2] CAO X J, TANG B M, LUO T Y, et al. Preparation of fluorinated acrylate coating with high albedo and its cooling effect on asphalt mixture[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(2):464-476.
- [3] 卢桂林,许新权,唐志赞,等.高模量改性剂的作用机理及应用研究[J].建筑材料学报,2021,24(2):355-361. LU Guilin, XU Xinquan, TANG Zhiyun, et al. Mechanism and application of high modulus agent [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):355-361. (in Chinese)
- [4] JIANG W, XIAO J J, YUAN D G, et al. Design and experiment of thermoelectric asphalt pavements with power-generation and temperature-reduction functions[J]. Energy and Buildings, 2018, 169:39-47.
- [5] MOHAJERANI A, BAKARIC J, JEFFREY-BAILEY T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197:522-538.
- [6] JIN J, XIAO T, ZHENG J L, et al. Preparation and thermal properties of encapsulated ceramsite-supported phase change materials used in asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:235-245.
- [7] 冯哲,虎东霞,赵龙,等.相变材料在道路工程中的研究现状综述[J].材料导报,2015,29(1):144-147. FENG Zhe, HU Dongxia, ZHAO Long, et al. Applications of phase change material to road engineering[J]. Materials Reports, 2015, 29(1):144-147. (in Chinese)
- [8] KONUKLU Y, OSTRY M, PAKSOY H O, et al. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications[J]. Energy and Buildings, 2015, 106: 134-155.
- [9] MOHSENI E, TANG W, WANG S. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM[J]. Construction and Building

- Materials, 2019, 225:182-195.
- [10] HUANG X B, CHEN X, LI A, et al. Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 641-661.
- [11] 王成君, 苏琼, 段志英, 等. 基于多孔支撑体的形状稳定复合相变储能材料的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3):1483-1494. WANG Chengjun, SU Qiong, DUAN Zhiying, et al. Research progress of shape-stable composite phase change energy storage materials based on porous supports[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3):1483-1494. (in Chinese)
- [12] SARI A, BICER A, KARAIPEKLI A, et al. Preparation, characterization and thermal regulation performance of cement based-composite phase change material [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 174:523-529.
- [13] 孙茹茹, 李化建, 黄法礼, 等. 相变材料在水泥基材料中的应用[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3):662-668, 676. SUN Ruru, LI Huajian, HUANG Fali, et al. Application of phase change materials in cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(3):662-668, 676. (in Chinese)
- [14] LIU Z Y, ZANG C Y, HU D, et al. Thermal conductivity and mechanical properties of a shape-stabilized paraffin/recycled cement paste phase change energy storage composite incorporated into inorganic cementitious materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99:165-174.
- [15] SUTTAPHAKDEE P, DULSANG N, LORWANNISHPAISARN N, et al. Optimizing mix proportion and properties of lightweight concrete incorporated phase change material paraffin/recycled concrete block composite[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127:475-483.
- [16] 廖国胜, 徐路, 廖宜顺. 硅灰对硫铝酸盐水泥水化行为的影响机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):840-845. LIAO Guosheng, XU Lu, LIAO Yishun. Influence of silica fume on the hydration behavior of calcium sulfoaluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):840-845. (in Chinese)
- [17] 桑国臣, 曹艳洲, 樊敏, 等. 硫铝酸盐水泥基复合相变储能砂浆的制备及其性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8):2124-2131. SANG Guochen, CAO Yanzhou, FAN Min, et al. Preparation and properties of sulfoaluminate cement-based composite phase change storage mortar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8):2124-2131. (in Chinese)
- [18] SINGH L P, BHATTACHARYYA S K, MISHRA G, et al. Reduction of calcium leaching in cement hydration process using nanomaterials[J]. Materials Technology, 2012, 27(3):233-238.
- [19] SHINZAWA H, UCHIMARU T, MIZUKADO J, et al. Non-equilibrium behavior of polyethylene glycol (PEG)/polypropylene glycol (PPG) mixture studied by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy [J]. Vibrational Spectroscopy, 2017, 88:49-55.
- [20] 何丽红, 王浩, 杨帆, 等. 聚乙二醇/SiO₂定形相变材料在沥青中的相变储热性能[J]. 化工进展, 2018, 37(3):1076-1083. HE Lihong, WANG Hao, YANG Fan, et al. Phase change heat storage properties of PEG/SiO₂ shape-stabilized phase change materials in asphalt [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(3):1076-1083. (in Chinese)
- [21] 白静静, 李海艳, 史才军, 等. 硫铝酸盐水泥用抗泥型聚羧酸减水剂的制备及性能[J]. 材料导报, 2018, 32(14):2384-2389. BAI Jingjing, LI Haiyan, SHI Caijun, et al. Preparation and properties of anti-clay type polycarboxylate superplasticizer for sulfoaluminate cement[J]. Materials Review, 2018, 32(14): 2384-2389. (in Chinese)
- [22] LI H Y, YANG K, GUAN X M. Properties of sulfoaluminate cement-based grouting materials modified with LiAl-layered double hydroxides in the presence of PCE superplasticizer[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226:399-405.
- [23] LIU Z L, TANG B T, ZHANG S F. Novel network structural PEG/PAA/SiO₂ composite phase change materials with strong shape stability for storing thermal energy [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 216:110678.
- [24] HU H H, ZUO X B, CUI D, et al. Experimental study on leaching-abrasion behavior of concrete in flowing solution with low velocity[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 762-772.
- [25] WANG F, ZHANG P, MOU Y R, et al. Synthesis of the polyethylene glycol solid-solid phase change materials with a functionalized graphene oxide for thermal energy storage [J]. Polymer Testing, 2017, 63:494-504.