

相变水泥-乳化沥青隧道注浆料热力学性能研究

周凤印^{1,3}, 王晓睿^{1,2}, 曾长女⁴, 侯大钊^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 地球与科学工程学院, 河南 郑州 450046;

2. 城市地下交通工程防灾减灾河南省交通运输行业技术创新中心, 河南 郑州 450046;

3. 郑州交通发展投资集团有限公司, 河南 郑州 450000;

4. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了提升隧道在高温环境中自调温能力, 采取改性水泥乳化沥青注浆料的方法。首先运用熔融共混法, 将石蜡、白油、高密度聚乙烯与膨胀石墨均匀混合, 制备出定形相变材料; 随后把定形相变材料掺入沥青基材料中, 制备相变水泥乳化沥青胶浆; 最后通过传热性能测试、力学强度测试及相变循环测试, 分析其热力学性能。结果表明: 所制备的相变水泥乳化沥青胶浆相变温度为 36.71℃, 该温度适用于隧道通风降温场景, 且材料具有一定可塑性及强度。相较于未掺定形相变材料的试块, 在底部同步加热时, 相变水泥乳化沥青胶浆试块上表面温度最大可降低 4.2℃。该材料经过多次融化凝固循环后仍能保持较好的热稳定性。相变水泥乳化沥青胶浆可作为高温隧道一种新型注浆材料进行应用。

关键词: 定形相变材料; 相变水泥乳化沥青胶浆; 蓄热性能; 力学性能

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)04-0010-09

Thermodynamic Properties of Phase Change Cement-emulsified Asphalt Grouting Material for Tunnels

ZHOU Fengyin^{1,3}, WANG Xiaorui^{1,2}, ZENG Changnv⁴, HOU Dazhao^{1,2}

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Disaster Prevention and Mitigation for Urban Underground Transportation Engineering Henan

Provincial Transportation Industry Technology Innovation Center, Zhengzhou, Henan 450046, China;

3. Zhengzhou Transportation Development Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China;

4. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: In tunnel engineering construction, high-temperature environments have adverse effects on the safety of tunnel structures and operational comfort. It is of great significance to develop grouting materials with self-regulating temperature functions. This work aims to enhance the self-regulating temperature capacity of tunnels through modified cement emulsified asphalt grouting materials. Firstly, by using the melt blending method, paraffin, white oil, high-density polyethylene and expanded graphite were uniformly mixed to prepare the shaped phase change material (SSPCM); Subsequently, SSPCM was incorporated into the asphalt-based material to prepare the phase change cement emulsified asphalt mortar. Finally, its thermodynamic performance was comprehensively analyzed through heat transfer performance tests, mechanical strength tests and phase change cycle tests. The results show that the phase change temperature of the prepared phase change cement emulsified asphalt mortar is 36.71℃. This temperature is suitable for the tunnel ventilation and cooling scenario, and the material has certain plasticity and strength. Compared with the test blocks without SSPCM, when the bottom is heated synchronously, the upper surface temperature of the phase change cement emulsified asphalt mortar test blocks can be reduced by up to 4.2℃ at most. In addition, this material can still main-

收稿日期: 2025-01-16

修稿日期: 2025-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277165); 河南省科技攻关项目 (222102320135)

作者简介: 周凤印 (1984—), 男, 正高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程方面的工作。E-mail: 1225562087@qq.com

通讯作者: 曾长女 (1978—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事低碳材料与可持续能源岩土工程方面的工作。E-mail: zengcnv@126.com

tain good thermal stability after multiple melting and solidification cycles. In conclusion, phase change cement emulsified asphalt mortar can provide a new type of grouting material for high-temperature tunnels.

Keywords: shape-stabilized phase change material; phase change cement emulsified asphalt slurry mastics; heat storage property; mechanical property

我国各地区地形地貌差异大,工程建设常常涉及隧道工程,尤其西南地区深埋隧道较多,地热资源丰富^[1],易引起高温的隧道环境,使隧道内施工作业环境高于 28℃^[2],属于隧道建设中难以避免的地质灾害之一^[3]。高温环境不仅加剧了隧道结构材料老化、机电设施故障风险,还可能危害施工人员生命安全、降低施工效率和工程质量^[4]。为降低隧道高温的不利影响,学者针对不同工况提出了不同的解决方案,当地温低于 36℃ 时,常规通风降温措施能有效降低隧道内部温度^[5];当地温高于 36℃ 时,需采用人工制冷措施降温,如喷雾洒水^[6]、冰块降温^[7]等;对于较长的高温隧道段,上述制冷方法成本高且降温效果受限^[8],专用制冷设备虽可有效实现隧道降温,但因需较大安装空间、高昂建设和运维成本,以及产生温室气体排放等问题,其应用受到限制^[9]。

相变材料(PCM)因其具有被动式吸收和释放潜热的特性被应用于隧道降温工程调节隧道温度^[10-11],符合现代隧道工程对环保与经济效益并重的需求^[12]。于连广等^[13]在隧道内建造了相变吊顶,经过试验模拟对比预测,相变吊顶可以吸收列车散发的热量达到 56.9%。Xu 等^[14]提出使用冰封装的相变材料板来降温地下避难硐室,通过试验和模拟的方法展示了非电制冷技术的潜力。Zeng 等^[15]在地源热泵系统中引入相变储能结构,并证实其在地下工程降温中的可行性,但其设备会占用过大的隧道空间。Cao 等^[16-17]提出将相变材料板与隧道衬砌换热器相连,通过数值模拟得出,导热性、相变温度和围岩温度均对相变板储能效率产生影响,然而隧道衬砌换热器长度的增加对相变板储能效率的提升作用较为有限。以上各方案均展示了相变材料在降温方面的潜力和经济性,然而由于相变材料未直接与高温热源接触,因此仍存在换热效率低或占用空间较大等实际问题。

目前,已有学者提出将相变材料与水泥等材料混合制成注浆料用于隧道加固^[18],提高隧道自调温能力,减少高温环境对大型散热设备的依赖^[19]。水泥材料的耐久性相对较低^[20],尤其在动态环境如持续振动、温度变化大的情况下,易出现开裂、疏松等

现象。水泥乳化沥青胶浆是一种包含水泥与乳化沥青两种结合料的复合型胶凝材料^[21],耐久性较高^[22],两种结合料在搅拌过程中相互吸附,水泥水化产物的生成和乳化沥青的破乳相互交织,逐渐形成强度^[23]。水泥乳化沥青胶浆施工便捷、粘结性强且具备良好的防水性能,能够有效填充隧道裂缝和孔隙,形成坚固的密封层,以防止地下水渗入隧道^[24]。此外,水泥乳化沥青胶浆具有较好的耐腐蚀性,凝固后形成的坚硬固体可对隧道内结构起到保护与强化作用^[25]。因此本研究选用水泥乳化沥青胶浆为注浆料,并对其进行改性以提升其蓄热性能,用于隧道降温。

本研究通过熔融共混法将石蜡、白油、高密度聚乙烯和膨胀石墨进行混合以制备定形相变材料,将其掺入水泥乳化沥青胶浆中制备具有蓄热性能的相变水泥乳化沥青胶浆。通过相变水泥乳化沥青胶浆试块的传热性能、力学强度及相变循环测试,研究其热力学性能,为该材料在高温隧道工程中的应用提供理论依据。

1 试样制备

1.1 原材料

定形相变材料(SSPCM)制备原材料:包括 58# 石蜡、3#白油、高密度聚乙烯(HDPE)和膨胀石墨(EG)。58#石蜡的相变温度为 54.5℃,相变潜热为 202.43 J/g,导热系数为 0.2 W/(m·K)。3#白油倾点为-5℃,导热系数为 0.1 W/(m·K)。高密度聚乙烯的熔点为 130℃。膨胀石墨的膨胀倍数为 80 目。水泥乳化沥青胶浆制备原材料:包括阳离子乳化沥青、水泥和水。其中水泥的牌号为海螺牌,标号为 P·O42.5。乳化沥青的成分如表 1 所示,定形相变材料各项原材料的基本物理性质见表 2。

表 1 乳化沥青成分表

成分	质量百分比/%
沥青	40 ~ 65
水	35 ~ 60
乳化剂	0.1 ~ 2.5
稳定剂/缓冲剂	0.1 ~ 1.0
添加剂	≤1.0

表 2 定形相变材料原材料基本物理性质

材料名称	比热容 /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	相变潜热 /($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	相变温度 / $^{\circ}\text{C}$	固态密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
58#石蜡	2.52	0.15	186	58	790
3#白油	1~3	0.10~0.15	—	—	780
高密度聚乙烯	2.3~2.5	0.35~0.45	—	120~135	941~960
膨胀石墨	2.0~2.4	0.25~0.35	188~197	-11.5~-13.0	111~126

1.2 定形相变材料制备

定形相变材料由复合相变材料(CPCM)、支撑材料与导热增强剂制成,其相变温度的选取受环境温度和使用需求的影响。当隧道温度低于 36℃ 时通风降温效果较佳^[5],定形相变材料的相变温度控制在高于环境温度 2℃ 左右^[26],本研究确定目标相变温度为 36℃~39℃。定型相变材料制备的流程如图 1 所示,选用高密度聚乙烯作为支撑材料以保持材料的形态稳定,同时加入膨胀石墨作为导热增强剂提升定形相变材料导热性,在 60℃ 油浴环境下将 58#石蜡与 3#白油按配合比(质量比)7:3 进行熔融共混制备复合相变材料^[18],相变温度和相变潜热分

别为 37.13℃ 和 105.44 J/g。复合相变材料与高密度聚乙烯配合比为 7:3,膨胀石墨占复合相变材料和高密度聚乙烯总质量的 2.5%。对复合相变材料、高密度聚乙烯、膨胀石墨进行称量,将油浴温度调至 160℃ 后加入复合相变材料与高密度聚乙烯,待搅拌混合均匀后加入膨胀石墨,再次混合均匀后注入模具成型,制得定形相变材料试块,测得其导热系数为 0.5531 W/(m·K)。图 2 为定形相变材料的 DSC 曲线,其相变温度为 36.71℃,与复合相变材料相变温度基本一致,定形相变材料的相变潜热因高密度聚乙烯与膨胀石墨的掺入有所降低,为 64.73 J/g。

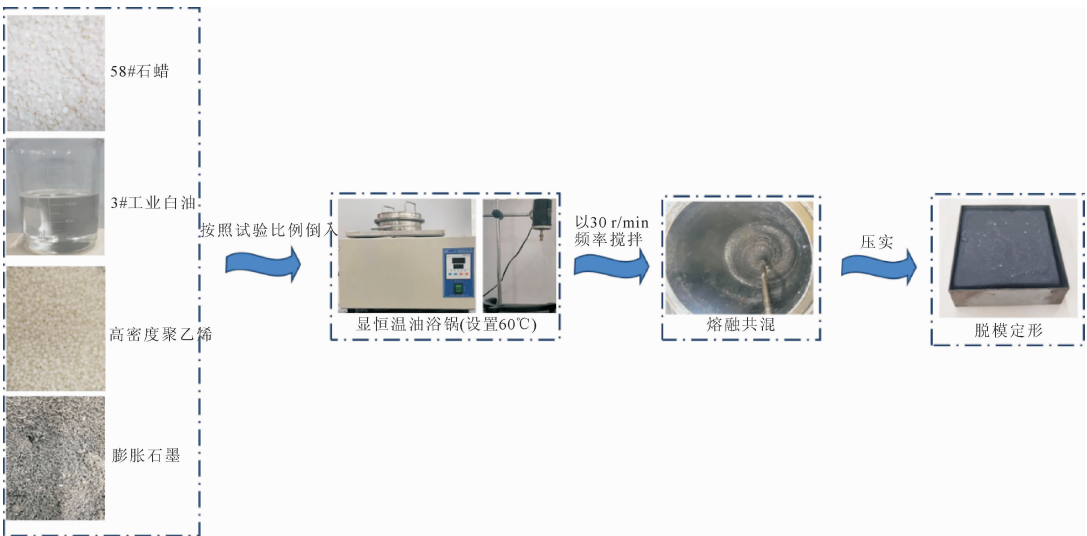


图 1 定形相变材料制备流程图

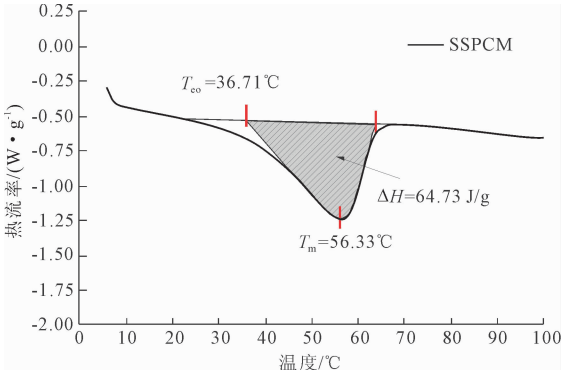


图 2 定形相变材料的 DSC 曲线

定形相变材料由复合相变材料、高密度聚乙烯、膨胀石墨熔融共混制成,复合相变材料与骨架材料之间的化学相容性是评价复合相变储热材料耐久性的关键指标^[27]。对复合相变材料、高密度聚乙烯、膨胀石墨和定形相变材料进行 X 射线衍射分析,各组分的 XRD 图谱如图 3 所示。膨胀石墨的 XRD 图谱在 26.28°和 54.62°有对应的衍射峰,其中 26.28°处的衍射峰更显著;高密度聚乙烯的衍射峰分别出现在 21.36°和 23.82°;复合相变材料的 XRD 图谱在 21.54°和 23.92°呈现出明显的衍射峰。定形相变材

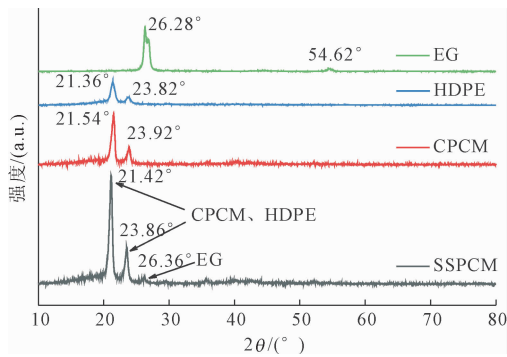


图3 膨胀石墨、高密度聚乙烯、复合相变材料和定形相变材料的 XRD 图谱

料的 XRD 图谱对应的衍射峰分别出现在21.42°、23.86°和26.36°,其中21.42°和23.86°处衍射峰向较大角度偏移,该衍射峰的产生主要由复合相变材料和高密度聚乙烯的衍射峰产生。由于膨胀石墨的掺入,26.36°对应的衍射峰得到体现,但膨胀石墨衍射能谱中54.62°处的衍射峰并未在定形相变材料中

呈现,主要由于定形相变材料中的膨胀石墨含量较少,导致此处的衍射峰强度未得到体现。定形相变材料的 XRD 能谱图中未发现新的衍射峰,说明在熔融混合制备过程中,各个物质之间并没有发生化学反应,具有良好的化学相容性,故定形相变材料的潜热仅受到复合相变材料含量的影响。

1.3 相变水泥乳化沥青胶浆

根据预试验结果,选用水灰比为0.45、沥青比为0.5的水泥乳化沥青胶浆。使用破碎机将定形相变材料进行破碎至0.5 mm以下,利用外掺法将破碎后的定形相变材料材料掺入沥青系材料中制备2%、4%、6%、8%定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆,配料称量可参照表3相变水泥乳化沥青胶浆配比表,称量后将其倒入搅拌机中,待搅拌均匀后混合,将搅拌好的相变水泥乳化沥青胶浆装模,经24 h后脱模,脱模后在温度20℃±2℃、相对湿度95%以上的环境下养护至规定龄期,用于测试其热力学性能。

表3 相变水泥乳化沥青胶浆配比

试样名称	水泥 /(kg·m ⁻³)	水 /(kg·m ⁻³)	乳化沥青 /(kg·m ⁻³)	定形相变材料 /(kg·m ⁻³)	水灰比	沥青比	定形相变材料掺量/%
SSPCM-0	827.59	198.62	413.79	0.00	0.45	0.5	0
SSPCM-2	789.77	189.55	394.89	15.80	0.45	0.5	2
SSPCM-4	747.19	179.33	373.60	29.89	0.45	0.5	4
SSPCM-6	705.56	169.33	352.78	42.33	0.45	0.5	6
SSPCM-8	664.84	159.56	332.42	53.19	0.45	0.5	8

2 相变水泥乳化沥青胶浆热力学性能

2.1 微观结构

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观测 500 倍和 2000 倍下的定形相变材料和相变水泥乳化沥青胶浆。图 4 (a) 中,高密度聚乙烯形成的网状骨架有效封装并支撑复合相变材料,防止其在相变过程中渗出;膨胀石墨则呈现出片状结构,可使吸附的熔融复合相变材料分布更均匀,有利于该定形相变材料储能功能的发挥。从图 4 (b) 可以看出,随着水泥、乳化沥青等胶凝材料掺入后,乳化沥青和水泥水化产物形成的致密结构包裹了定形相变材料,该结构较图 4 (a) 更紧密,具有更好的稳定性。

2.2 热学性能

2.2.1 相变温度

本研究制备的定形相变材料相变温度为36.71℃,将其与水泥乳化沥青材料混合,制备相变

水泥乳化沥青胶浆。此外,相变水泥乳化沥青胶浆的相变潜热由定形相变材料提供,这一特性使得相变水泥乳化沥青胶浆具有良好的蓄热性能,为高温隧道环境的温度控制提供了一种新的思路。

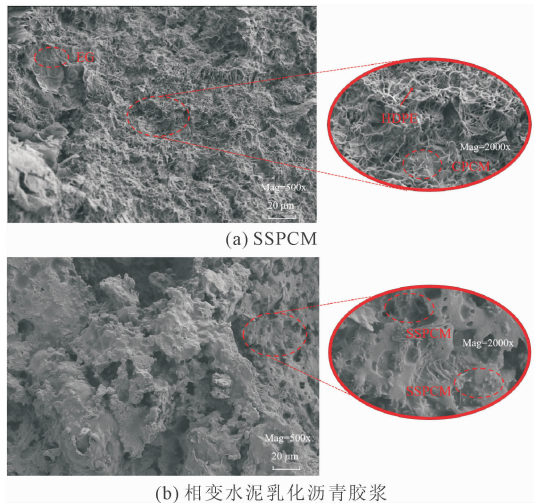


图4 定形相变材料和相变水泥乳化沥青胶浆的 SEM

2.2.2 导热性能

相变水泥乳化沥青胶浆的导热性能会影响其潜热利用率。通过试验测得了不同定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆的导热系数,其中,SSPCM-0、SSPCM-2、SSPCM-4、SSPCM-6 和 SSPCM-8 相变水泥乳化沥青胶浆的导热系数分别为 $0.734 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.693 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.618 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $0.605 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.491 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,相对于石蜡和白油均具有更高的导热性能,有助于相变水泥乳化沥青胶浆储能性能发挥,更好地进行自调温控制。由于乳化沥青水泥浆液的导热性高于定形相变材料,使得相变水泥乳化沥青胶浆的导热性随定形相变材料掺量增加而降低,最多降低约 35%。因此,定形相变材料的掺量需根据实际工程需求进行选择。

2.2.3 蓄热性能

相变材料的蓄热性能是衡量相变水泥乳化沥青自调温能力的关键指标之一。为评估这一性能指标,对胶浆试块进行蓄热性能试验测试,如图 5 所示。试块加热区由直流电源连通加热片作为外部热源,测试用胶浆试块置于加热片上部,对试块下表面 75°C 恒温加热。试块上表面按对角线法布置 K 型热电偶的测试端,测试点取对角线上对称三点,上表面温度取三点测试温度平均值,同时采用保温棉对试块周围进行包裹,防止热量流失。试验在室温条件下开始,试块上表面温度达到 50°C 时停止测试,此时相变水泥乳化沥青胶浆试块相变结束。通过热电偶每隔 1 s 记录相变水泥乳化沥青试块上表面温度并绘制其升温曲线,据此分析定形相变材料掺量对相变水泥乳化沥青胶浆蓄热性能的影响。

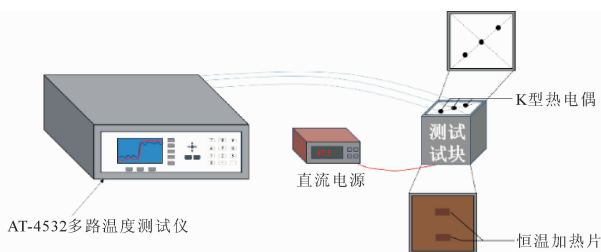


图 5 蓄热性能试验

图 6 为不同定形相变材料掺量相变水泥乳化沥青胶浆试块的蓄热试验结果。试验开始时,不同定形相变材料掺量相变水泥乳化沥青胶浆的上表面温度均为室温。在 $0 \sim 0.7 \text{ h}$ 时段内,不同定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆温度差异不大,主

要受初始温度影响; $0.7 \text{ h} \sim 1.4 \text{ h}$ 时,升温曲线开始出现差异,但温度仍未达到本研究制备的定形相变材料相变温度,此时,石蜡白油混合物处于固态,并未发生相变融化,为显热放热。导热系数差异造成温度差异,导热系数越大则热量传递至上表面的速率越快,温度上升越快。当加热 1.4 h 后,定形相变材料掺量 2%、4%、6%、8% 的相变水泥乳化沥青胶浆上表面升温速率开始变缓,各温度曲线之间的差值不断增加,主要原因是砂浆中的定形相变材料开始发生固-液相变吸收热量。因此,相变掺量较高的相变水泥乳化沥青胶浆升温曲线会趋于平缓。升温至 50°C 时,定形相变材料掺量 0%、2%、4%、6%、8% 的相变水泥乳化沥青胶浆加热时间分别为 3.5 h 、 3.8 h 、 4.5 h 、 4.8 h 、 5.5 h 。当加热至相同温度时,SSPCM-8 试块升温时间较 SSPCM-0 试块延长了 57%,当加热片提供相同的温升值时,SSPCM-8 试块比 SSPCM-0 试块上表面温度低 4.2°C ,试块每增加 2% 定形相变材料掺量,试块上表面温度降低 1°C 。

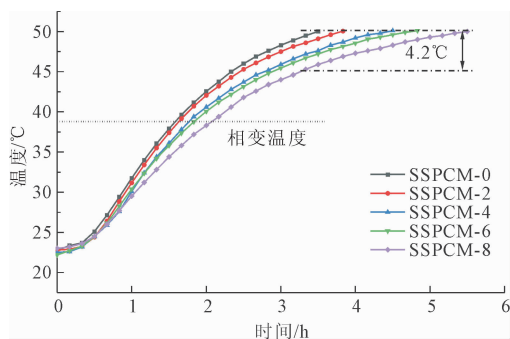


图 6 不同定形相变材料 (SSPCM) 掺量的相变水泥乳化沥青胶浆上表面升温曲线

综上,在本试验条件下定形相变材料的掺量越大,相变水泥乳化沥青胶浆潜热越大,且在相同时间段内吸收并储存的热量越多,进而导致相变乳化沥青上表面的温度越低。相变水泥乳化沥青胶浆的蓄热性能随着定形相变材料掺量的增加而增加。该现象与导热性能和定形相变材料掺量之间的关系一致。定形相变材料的掺入有效干预了沥青试块结构内部的升温过程,降低了结构内部的温度敏感性。然而,不同之处在于导热系数对试块温度上升过程中的影响表现在整个升温过程中。由于不同的导热系数,测试块在从室温加热至相变温度的过程中,不同定形相变材料掺量相变水泥乳化沥青胶浆的升温速率仍然存在快慢之分。

2.3 流动度

流动度常用于评价材料在施工过程中的可塑性和流动性,参照《水泥胶砂流动度测定方法》^[28](GB/T 2419—2005),对定形相变材料不同掺量下相变水泥乳化沥青胶浆进行流动度测试,测试结果显示SSPCM-0、SSPCM-2、SSPCM-4、SSPCM-6和SSPCM-8相变水泥乳化沥青胶浆的流动度分别为240 mm、223 mm、202 mm、189 mm、181 mm。各掺量下的相变水泥乳化沥青胶浆流动度均满足注浆要求,但随着定形相变材料掺量的增大,其流动度逐渐减小,SSPCM-8的胶浆流动度较SSPCM-0的胶浆降低25%,其主要原因为定形相变材料不与其他成分反应,掺入相变水泥乳化沥青胶浆使水泥的占比降低。因此,在实际工程中,需控制定形相变材料的掺量,以保证胶浆既具备良好蓄热性能又保持适宜的施工可塑性和流动性。

2.4 力学性能

根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[29](JGJ/T 70—2009),对养护龄期为3 d、7 d、28 d的不同定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆进行抗压强度测试,如图7所示。结果表明:①所有试块中3 d抗压强度最低为1.15 MPa、28 d抗压强度最低为3.55 MPa,满足规范中3 d抗压强度大于0.5 MPa、28 d抗压强度大于2.5 MPa的要求。②随着养护龄期的增加,抗压强度呈现增长趋势,在同一养护龄期下,相变水泥乳化沥青胶浆的抗压强度随着定形相变材料掺入量的增加而降低。③当龄期为3 d时,SSPCM-0抗压强度为5.9 MPa,SSPCM-8抗压强度为1.15 MPa,强度降低约80%,当龄期为28 d时,SSPCM-0抗压强度为7.8 MPa,SSPCM-8抗压强度为3.55 MPa,强度降低约50%。相变水泥乳化沥青胶浆的抗压强度随定形相变材料掺入量增加而下降。

与水泥乳化沥青材料相比,定形相变材料为弱相,其强度较低^[30];定形相变材料本身不参与水化反应,其内部存在类似孔隙结构,会减弱其支撑作用^[31];此外,因膨胀石墨具有疏水性也导致定形相变材料与水泥乳化沥青结合力弱,最终导致相变水泥乳化沥青胶浆试块整体强度下降。故在外力作用下,相变水泥乳化沥青胶浆材料相较于普通材料更易出现强度破坏,因此,在实际工程应用中须控制定形相变材料的掺入比例以减小对水泥乳化沥青胶浆强度的影响。

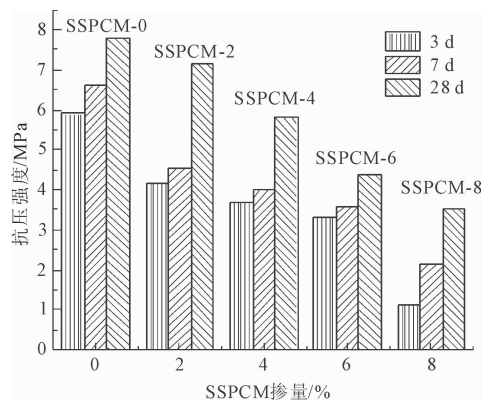


图7 不同定形相变材料(SSPCM)掺量的相变水泥乳化沥青胶浆抗压强度

3 相变水泥乳化沥青胶浆的相变循环稳定性

相变循环稳定性是指材料经过多次融化-凝固循环而不致破坏的能力,用于衡量材料能否满足长周期工况。在实际工程中,相变水泥乳化沥青胶浆需要具备良好的长期工作性能,会经历多次的相变循环,即从一种状态(如固态)转变到另一种状态(如液态),然后再转变回原来的状态。这种反复的相变过程可能会影响相变材料的蓄热性能和导热性能。为了分析试验制备的相变水泥乳化沥青胶浆材料的热稳定性,将相变水泥乳化沥青胶浆从室温升至75℃,再降至室温,进行10次、50次、100次后的反复融化与凝固。每个阶段结束后对相变水泥乳化沥青胶浆试块逐一进行导热系数测试、蓄热性能测试以及力学性能测试,深入分析相变循环对相变水泥乳化沥青热稳定性的影响。

3.1 相变循环次数对蓄热性能的影响

图8展示了不同定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆经过10次、50次、100次相变循环后的导热系数变化。随着相变循环次数的增加,导热系数逐渐降低并趋于稳定。在经历相变循环10次时,导热系数降低幅度较大,表明该材料在使用初期传热性能变化较大,存在传热性能适应阶段。经过50次相变循环后,导热系数基本趋于稳定,降低约20%。

导热系数的降低是由于随着相变循环次数的增加,复合相变材料不断填充骨架材料内部的空隙,导致在相变过程中会出现一定程度的团聚现象,使得骨架内部形成更加紧实的矩阵结构,拥有更大的传

热截面,而定形相变材料导热系数比乳化沥青水泥胶浆试块低,最终致使相变水泥乳化沥青经历融化-凝固循环后的导热系数降低^[32]。

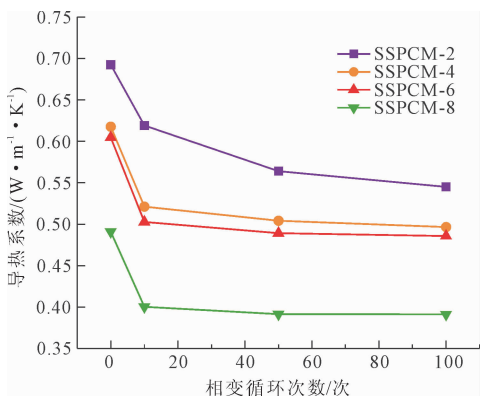


图 8 不同 SSPCM 掺量循环后导热系数变化

图 9 展示了不同定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆经过 10 次、50 次、100 次相变循环后

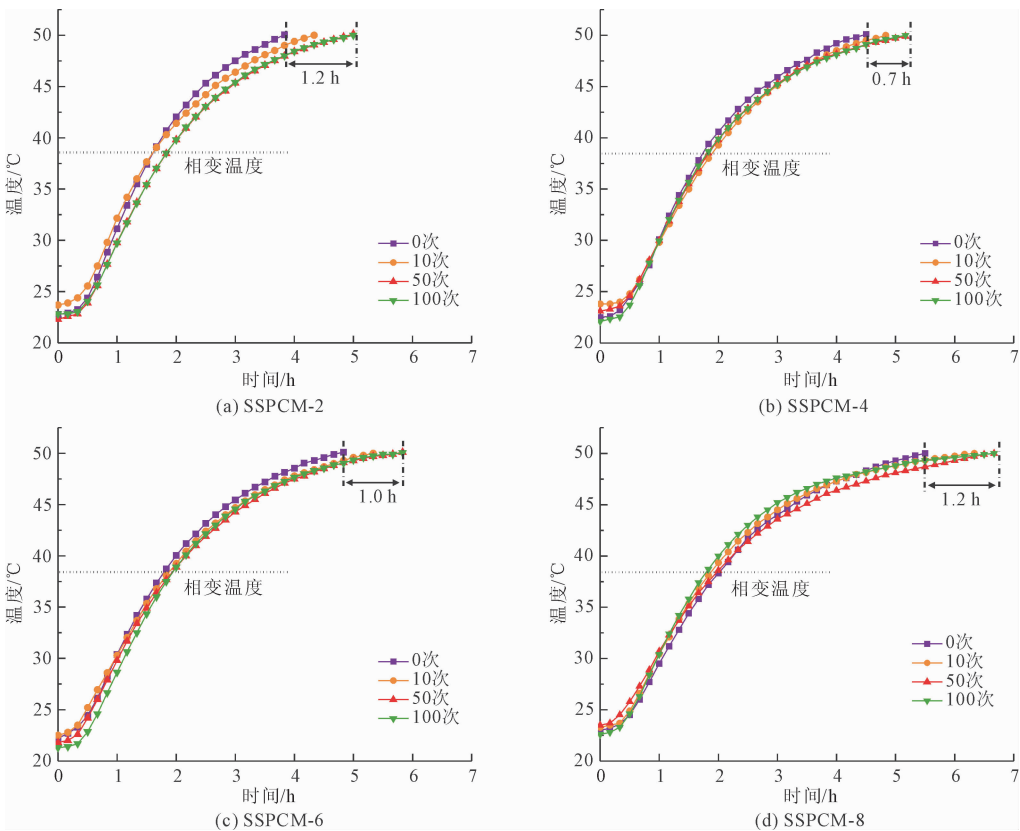


图 9 不同 SSPCM 掺量循环后蓄热效果变化

3.2 相变循环次数对力学性能的影响

图 10 为相变水泥乳化沥青胶浆多次融化-凝固循环后测试的抗压强度。经过 10 次循环后, SSPCM-2 和 SSPCM-4 试块的抗压强度提升了约 5%,在第 50 次、100 次循环时候抗压强度提升不足

的蓄热性能。结果表明,经过相变循环后,各定形相变材料掺量的相变水泥乳化沥青胶浆试块在恒温加热至 50℃ 所需时间较循环前均延长。具体来说,经过 100 次循环后,定形相变材料掺量为 2%、4%、6% 和 8% 的相变水泥乳化沥青胶浆试块加热时间分别延长了 1.2 h、0.7 h、1.0 h 和 1.2 h。这是由于循环后导热系数降低,导致传热性能下降,但在一定程度上提升了保温性能。相变循环 50 次和 100 次的试块升至 50℃ 时所需的加热时间基本保持不变,说明相变水泥乳化沥青胶浆试块的保温性能在 50 次相变循环后逐渐趋于稳定,与导热系数变化规律一致,进一步证明加热时间的延长主要由导热系数降低引起的,反映循环次数对相变水泥乳化沥青胶浆的蓄热性能无明显影响,该材料具有较好的热稳定性。

3%。SSPCM-6 和 SSPCM-8 试块在经过 10 次循环后抗压强度分别提升了 11% 和 15%,再经过 50 次、100 次循环后的强度依旧有 5% 的提升。研究结果显示,相变循环不会削弱试块的初始强度,反而可以增加其强度。另外,随着定形相变材料掺量的增加,

经过相变循环后的试块强度提高得越多。然而,随着相变循环次数的增加,试块抗压强度提升幅度逐渐减小。随着相变循环次数的增加,骨架材料的内孔隙被复合相变材料不断填充,使骨架颗粒内部结构更加紧实;同时,相变循环经历时间较长,相变水泥乳化沥青胶浆试块水化程度比 28 d 更彻底,使其强度增加。

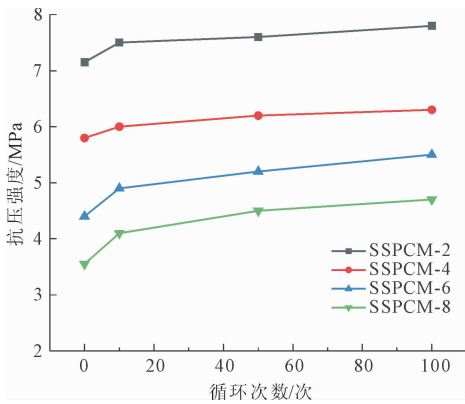


图 10 循环后抗压强度变化

4 结 论

为制备具有蓄热性能的注浆材料、降低高温环境对隧道结构的影响,本研究在水泥基沥青注浆材料中引入不同掺量的定形相变材料,制备出一种新型相变水泥乳化沥青胶浆材料,并对其热力学特性、流动特性以及强度特性进行了系统分析,通过试验研究,该新型材料展现出良好的蓄热与温控特性,主要得出以下结论:

(1) 基于 58#石蜡、3#白油、高密度聚乙烯和膨胀石墨制备的定形相变材料,其相变温度为 36.71℃,相变潜热为 64.73 J/g,将其掺入水泥乳化沥青浆液中制得具有较好蓄热性能的新型相变水泥乳化沥青胶浆材料,适用于高温环境下的隧道通风降温。定形相变材料掺量的增加显著提升了该材料的蓄热效能,具有在高温条件下延缓温度上升的潜力。

(2) 随着定形相变材料掺量从 0% 增加到 8%,导热系数、流动性和抗压强度均呈现下降趋势,其中导热系数最高降低 33.1%,流动性最高降低 25%,抗压强度最高降低 54.5%。相变材料在提高蓄热性能的同时对材料的机械性能有所影响。因此,在实际工程中需要控制定形相变材料的掺入比例以减小对水泥乳化沥青胶浆的流动度和强度的影响。

(3) 相变水泥乳化沥青胶浆材料在经过 50 次相变循环后,试块的导热系数降低约 20%,随着循环次数增加至 100 次其导热系数、蓄热性能和抗压强度逐渐趋于稳定。新型相变水泥乳化沥青胶浆材料在多次相变循环后依然保持较为稳定的热力学性能,具备长期使用的可靠性。

参考文献:

- [1] 胡 政,田茂中,郭维祥,等. 隧道高地温的地质成因研究[J]. 西南交通大学学报,2022,57(5):1077-1085,1112.
- [2] 铁路隧道设计规范:TB 10003—2005[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [3] 郭平业,卜墨华,张 鹏,等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(7):1561-1581.
- [4] 刘星辰,黄 锋,周 洋,等. 高温隧道隔热层厚度优化及衬砌热力耦合响应分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(5):108-117.
- [5] 闫沁太,刘 炜,李建斌,等. 基于风冷式冷水机的长大隧道局部降温技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(12):2093-2097.
- [6] 覃宇含,孟祥林,苏留锋,等. 吸收式制冷系统应用于高温热害隧道降温的理论分析研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(11):1887-1895.
- [7] 李建高,刘亚飞. 高黎贡山隧道 1#高地温斜井降温处理技术研究及比选[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(10):1498-1505.
- [8] 吴根强,王志杰. 高地温铁路隧道隔热层方案研究[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(8):1715-1726.
- [9] Zhang Guozhu, Cao Ziming, Xiao Sunguang, et al. A promising technology of cold energy storage using phase change materials to cool tunnels with geothermal hazards[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 163:112509.
- [10] Zeng Changnv, Hu Chaoxin, Li Wanwan. Thermal regulation performance of shape-stabilized-phase-change-material-based prefabricated wall for green grain storage[J]. Materials, 2023,16(3):964.
- [11] 刘 江,杨 柳,刘 衍,等. 西安办公建筑相变蓄热通风技术的季节适宜性研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):150-159.
- [12] 吴智敏,陈 智,秦孟昊. 复合相变调湿材料的制备与热湿性能[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(4):13-19.
- [13] 于连广,吴喜平,张君瑛. 相变吊顶与隧道空气耦合传热模拟分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),

- 2011,39(2):236-241.
- [14] Xu Xin, You Shijun, Zheng Xuejing, et al. Cooling performance of encapsulated ice plates used for the underground refuge chamber[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017,112:259-272.
- [15] Zeng Chao, Yuan Yanping, Haghighat F, et al. Thermo-economic analysis of geothermal heat pump system integrated with multi-modular water-phase change material tanks for underground space cooling applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022,45:103726.
- [16] Cao Ziming, Zhang Guozhu, Wu Yuanhao, et al. Energy storage potential analysis of phase change material (PCM) energy storage units based on tunnel lining ground heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023,235:121403.
- [17] Cao Ziming, Zhang Guozhu, Shi Yehui, et al. Thermal behavior of phase change plates using tunnel lining GH-Es for cool storage: Effect of pipe design parameters and PCM latent heat[J]. *Energy and Buildings*, 2023,301:113737.
- [18] 朱颖,赵金兴,曲晶莹,等. 新型相变水泥砂浆热力学性能研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022,42(9):1570-1577.
- [19] Wang Mei, Shang Shiyue, Liu Lang, et al. Thermal resistance capacity model for the cold release characteristics of cemented paste backfill with phase change materials[J]. *Renewable Energy*, 2024,222:119913.
- [20] Wang Aiguo, Zheng Yi, Zhang Zuhua, et al. The durability of alkali-activated materials in comparison with ordinary portland cements and concretes: A Review[J]. *Engineering*, 2020,6(6):695-706.
- [21] 郭豪彦,王振军,张海宝,等. 多因素作用下水泥乳化沥青胶浆性能特征及机理[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023,53(1):25-31.
- [22] Dhandapani B P, Mullapudi R S. Design and performance characteristics of cement grouted bituminous mixtures - a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023,369:130586.
- [23] 王振军,张含笑,梁晴隄,等. 乳化沥青胶浆对 RAP 裹覆程度的量化评价[J]. *中国公路学报*, 2021,34(10):111-124.
- [24] Umar H, Zeng Xiaohui, Lan Xuli, et al. A review on cement asphalt emulsion mortar composites, structural development, and performance[J]. *Materials*, 2021,14(12):3422.
- [25] Najjar S, Mohammadzadeh Moghaddam A, Sahaf A, et al. Mixed mode (I&III) fracture behavior of cement emulsified asphalt mortar under freeze and thaw cycles[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023,126:103952.
- [26] 亓文超,刘志强,俞佳明,等. 双层定型相变墙体结构在中国三种典型气候区的温度与能耗模拟研究[J]. *建筑节能*, 2020,48(7):90-95.
- [27] 杨洋,熊亚选,任静,等. 碳捕捉对电石渣-钢渣复合相变储热材料性能的影响[J]. *储能科学与技术*, 2023,12(12):3690-3698.
- [28] 水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [29] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [30] 于本田,陈延飞,李双洋,等. 正十四烷/石墨低温相变水泥基材料的制备及冻融损伤演化[J]. *复合材料学报*, 2022,39(6):2864-2874.
- [31] Lecompte T, Le Bideau P, Glouannec P, et al. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2015,94:52-60.
- [32] 王云蕾,王宁. 固废细颗粒对发泡保温材料的硬化性能影响研究[J]. *信息记录材料*, 2023,24(12):26-28.