

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023010524041998

文章编号:1674-599X(2024)02-0008-09

引用格式:程作栋,张家玮,余阳,等.PEG/漂珠复合相变材料的表征及性能研究[J].交通科学与工程,2024,40(2):8-16,27.

Citation: CHEN Zuodong, ZHANG Jiawei, YU Yang, et al. Characterization and performance study of polyethylene glycol/cenospheres composite phase change materials[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 8-16, 27.

PEG/漂珠复合相变材料的表征及性能研究

程作栋,张家玮,余阳,王向阳,刘生玮,郭月霞

(兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:为了研发适用于高温环境下沥青路面的复合相变材料,本研究以PEG2000作为相变材料,漂珠作为载体,利用PEG2000优良的相变特性及漂珠的高强度特性,制备出一种高强度且耐高温的复合相变材料(composite phase change materials, CPCMs)。制备的CPCMs在相变储热性能上表现较好,同时具有优良的化学稳定性、兼容性及热稳定性。当CPCMs的掺量达到60%时,测温试件之间的最高温差仅为2.8℃,峰值温度出现的时间延迟了2.1 min,对路用性能也产生了不利影响。因此,适量CPCMs能够有效调控沥青混合料温度。该研究结果为沥青路面的降温调控提供了参考。

关键词:沥青路面;复合相变材料;PEG;漂珠;路用性能;降温调控

中图分类号:U414

文献标志码:A

Characterization and performance study of polyethylene glycol/ cenospheres composite phase change materials

CHEN Zuodong, ZHANG Jiawei, YU Yang, WANG Xiangyang, LIU Shengwei, GUO Yuexia

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to develop composite phase change materials (CPCMs) suitable for asphalt pavements under high-temperature environments, PEG2000 was employed as the phase change material, with bleaching beads serving as the carrier. This approach leveraged the superior phase change properties of PEG2000 and the robust strength of bleaching beads to engineer CPCMs that are both high-strength and temperature-resistant. The CPCMs demonstrated promising phase change heat storage capabilities, alongside significant chemical stability, compatibility, and thermal stability. However, when the incorporation of CPCMs reached 60%, the maximum temperature variance among the test specimens was a mere 2.8 °C, with the peak temperature occurrence delayed by 2.1 minutes, negatively impacting road performance. As a result, an optimal concentration of CPCMs can effectively moderate the temperature of asphalt mixtures, offering valuable insights for the research into cooling and temperature regulation of asphalt pavements.

Key words: asphalt pavement; composite phase change material; polyethylene glycol; cenosphere; road performance; cooling regulation

收稿日期:2023-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52068043)

通信作者:程作栋(1998—),男,硕士生,主要从事沥青路面中相变材料应用方面的研究工作。E-mail:czd054534@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

目前大部分高速公路都采用沥青路面。其优点为交通噪声低、表面光滑、安全性高,且易于铺装和维护^[1]。据统计,在中国已建成的高等级公路中,已超过80%的路面为沥青路面^[2],而沥青易吸收太阳辐射,导致在夏季期间路面温度过高^[3],会产生车辙、坑槽等难以克服的病害^[4]。其中,车辙病害是沥青路面最主要的病害,而路面温度对其变形的影响最为显著^[5]。因此,有效控制沥青路面的温度尤为重要。

掺加纤维^[6]、改性沥青^[7]、调整矿料级配^[8]等传统方法,虽在一定程度上缓解了高温病害,但并不能有效控制路面温度。目前,相变材料在沥青路面降温方面的研究较为成熟,特别是有机固-液型相变材料,因其良好的相变特性和热稳定性而广泛应用^[9-10]。由于固-液型相变材料在相变过程中会产生液体,容易造成相变材料的流失,因此需要对其进行定型处理^[11-12]。其中,采用载体吸附相变材料,制备复合相变材料(composite phase change materials, CPCMs),具有诸多优势。聚乙二醇类相变材料具有良好的热稳定性和相变循环稳定性,以及满足沥青路面施工及使用期间温度条件的优点。WANG^[13]以聚乙二醇作为相变材料,二氧化硅作为支撑材料,制备复合相变材料,并对其性能进行了研究。KARAMAN^[14]采用真空浸渍法,在硅藻土缝隙中加入聚乙二醇,制备复合相变材料。这些研究证明采用载体吸附聚乙二醇制备复合相变材料是可行的。当相变材料含量过高时,有可能从载体中泄露,限制载体的吸附能力。但部分载体在力学强度上有所不足,并满足沥青混合料高温拌合环境。本研究拟开发一种新型复合相变材料,其具有高力学性能、耐高温以及化学性质稳定的特点,并满足沥青路面建设期和使用期的要求。

漂珠的主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,具有高强度、耐高温等优点。国内外对漂珠的应用进行了很多研究,LIU^[15]以漂珠作为载体加载相变材料,制备出相变微胶囊。由于其在机械性能、化学稳定性、热性能等方面具有诸多优势,将其应用于沥青路面是具有研究价值的。本研究选择自带小孔漂珠作为载体,聚乙二醇2000(PEG2000)作为相变材料,采用真空吸附的方式制备高强耐高温复合相变材料。通过研究其微观结构、化学成分、相变

特性和热稳定性,探讨其对沥青混合料的路用性能及降温效果的影响,为复合相变材料在沥青路面中的应用提供参考依据。

1 材料和试验方法

1.1 材料

材料方面,主要包括制备CPCMs的原材料及沥青混合料的原材料。试验中,所用的聚乙二醇2000(PEG2000)是由天津市化学试剂厂生产的,漂珠来自巩义市博润耐火材料有限公司。沥青方面,选用了克拉玛依道路石油沥青70#A级。粗、细集料与矿粉来自甘肃省公路养护技术研究院,其指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)。

1.2 CPCMs的制备

1) 在漂珠原料中,筛选出自带小孔漂珠。通过水选方法,发现破碎漂珠在重力作用下会沉到底部,完整漂珠和自带小孔漂珠则因水的浮力而悬浮在上层。利用外界大气压将水加载到自带小孔漂珠内部,分离出完整漂珠和自带小孔漂珠。

2) PEG2000的加载。将真空釜中的空气抽走,使得自带小孔漂珠内腔与外界形成压强差,利用外界大气压将PEG2000加载到自带小孔漂珠内部。加载装置如图1所示。最终制备出0.6~1.0 mm粒径的CPCMs,其粒径均匀、外形完整。

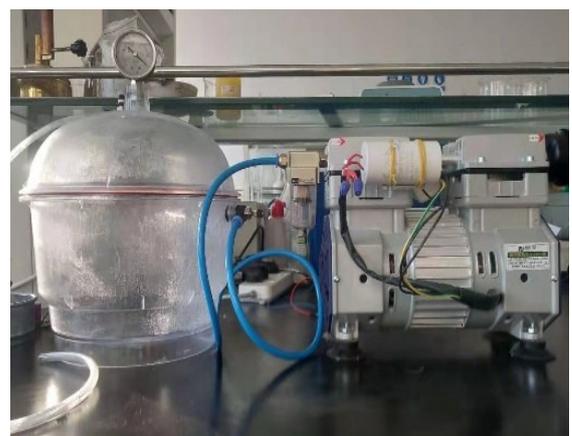


图1 真空加载装置

Fig. 1 Vacuum loading device

1.3 沥青混合料测温试件的制备

本研究采用AC-13级配作为热拌型相变沥青混合料级配。依据《公路沥青路面施工技术规范》

(JTG F40—2004)的相关规定,计算得到油石比为4.61%。混合料配合比见表1。

表1 AC-13沥青混合料配合比

Table 1 Mixture ratios for AC-13 asphalt

各粒径集料的质量占比/ %				矿粉/ %	油石比
10 ~ 15 mm	5 ~ <10 mm	3 ~ <5 mm	0 ~ <3 mm		
42.0	16.0	10.0	29.0	3.0	4.61

采用CPCMs颗粒等体积替代细集料的方式,将CPCMs掺量设置为细集料的0%、20%、40%、60%。如图3所示,将称取好的CPCMs与细集料充分拌和均匀,再与其他各档集料混合均匀,并按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)(简称试验规程)制备马歇尔试件。

表2 马歇尔试件配合比

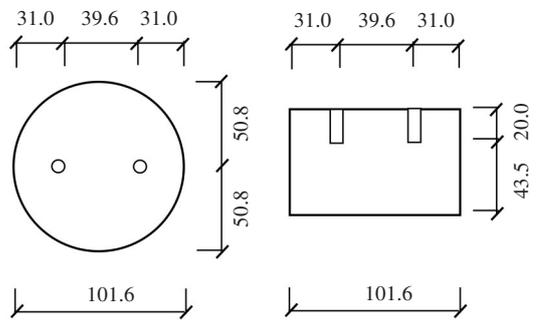
Table 2 Mixture ratios for Marshall specimens

类别	分计质量/ g			
	掺量0%	掺量20%	掺量40%	掺量60%
10 ~ 15 mm	491.4	491.4	491.4	491.4
5 ~ 10 mm	187.2	187.2	187.2	187.2
3 ~ 5 mm	117.0	117.0	117.0	117.0
0 ~ 3 mm	339.3	271.4	203.6	135.7
矿粉	35.1	35.1	35.1	35.1
CPCMs	0.0	10.9	21.8	32.7

如图2(a)所示,在成型的马歇尔试件使用冲击钻凿出两个2 cm深的通道,并分别埋入PT100型温度传感器,其具体位置如图2(b)所示。然后,使用沥青将其黏结牢固,得到沥青混合料测温试件,每组试件制备2个。



(a) 测温试件



(b) 温度传感器平面图 (c) 温度传感器立面图

图2 测温试件和温度传感器位置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Temperature measurement specimen and temperature sensor location diagram (unit:mm)

1.4 CPCMs的表征和性能测试

1.4.1 微观机理分析

采用KYKY-2800B型扫描电子显微镜,观察漂珠及CPCMs的微观形貌。采用X射线衍射仪(X-ray powder diffractometer, XRD),探究PEG2000及CPCMs的化学特性,试验过程中,衍射角 2θ 的范围设定为 $10^\circ \sim 80^\circ$,步宽为 0.02° 。在Nicolet IS 50光谱仪上,记录CPCMs样品的傅里叶红外光谱,波数范围为 $500 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.4.2 热性能分析

热性能分析包括相变焓值、相变温度范围及热稳定性的评估。采用德国NETZSCH公司生产的DSC200F3型差示扫描量热分析仪对CPCMs进行DSC测试,升温速度 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。采用德国NETZSCH公司生产的TG449F1型热重分析仪器测试CPCMs的热稳定性,试验温度为室温至 800°C ,升温速度为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

1.5 CPCM_s应用于沥青混合料路用性能研究

根据试验规程的要求,通过车辙试验、弯曲试验、冻融劈裂试验,评估含有CPCM_s的沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性。其中,车辙试件尺寸大小为300.0 mm×300.0 mm×50.0 mm,小梁试件尺寸大小为250.0 mm×30.0 mm×35.0 mm,马歇尔试件直径为101.6 mm,高为63.5 mm,所有试验的测试方法均符合试验规范要求,确保结果的准确性和可靠性。

1.6 CPCM_s应用于沥青混合料降温效果研究

将不含及含有不同掺量CPCM_s的测温试件放入预先设定好的控温箱中,并实时记录试件随时间变化的温度。

具体的测试步骤如下:

1) 将试件的温度传感器与温度巡检仪连接,打开温度巡检仪,记录温度变化值。

2) 将控温箱温度设定为60℃,待温度稳定达到60℃后,将试件全部放入控温箱。

3) 观察温度巡检仪,当空白组测温试件(CPCM_s掺量为0%)温度达到60℃后,立刻将控温箱调整为室温。

4) 当空白组试件温度完全恢复到室温后,结束此次试验,导出记录的温度数据,绘制温度变化曲线,并进行结果分析。

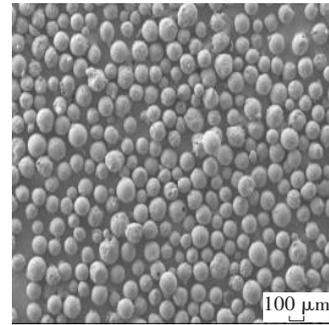
2 试验结果与讨论

2.1 CPCM_s表征

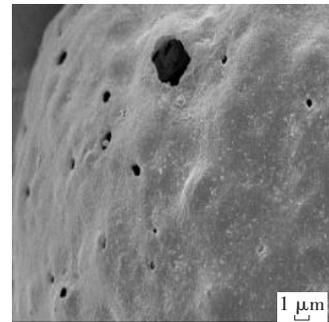
2.1.1 微观形貌分析

漂珠是一种具有天然空心结构的工业废渣,外观呈深灰色,其壁薄且质量很轻,粒径大约为100~1 000 μm,如图3(a)所示。在图3(b)中,自带小孔漂珠的表面遍布1~10 μm左右的孔洞,PEG2000通过这类天然的孔洞加载到漂珠内部。在表面张力的作用下,PEG2000可以稳定于漂珠内部。在图3(c)中,可以观察到人工破碎漂珠的内腔相对体积较大,具有壁薄且体积大的特点。当自带小孔漂珠经过加载装置加载PEG2000后,得到CPCM_s,从图3(d)~3(f)可以看出,PEG2000已经加载到漂珠内部,并在自带小孔漂珠内部的PEG2000分布相对均匀。从图3(d)~3(f)可以看出,微观形貌各不同,这

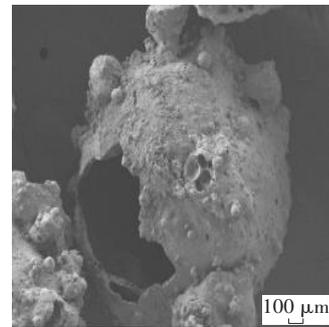
是漂珠表面孔洞大小不均匀导致的。



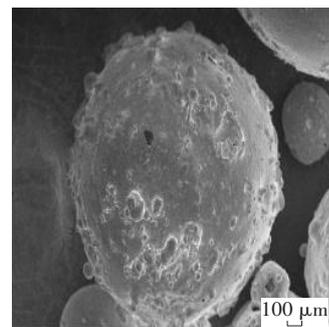
(a) 漂珠原料



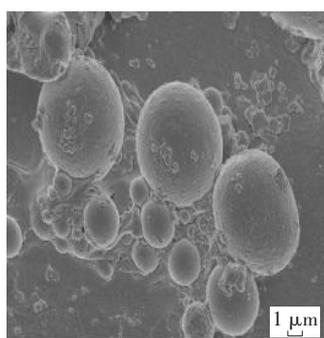
(b) 自带小孔漂珠



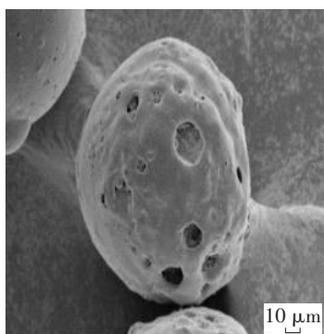
(c) 人工破碎漂珠



(d) CPCM_s 1



(e) CPCM2



(f) CPCM3

图3 漂珠及CPCMs的SEM结果

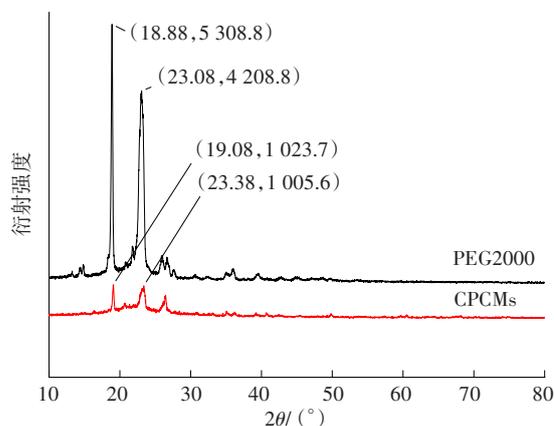
Fig. 3 SEM results of cenospheres and CPCMs

2.1.2 化学稳定性分析

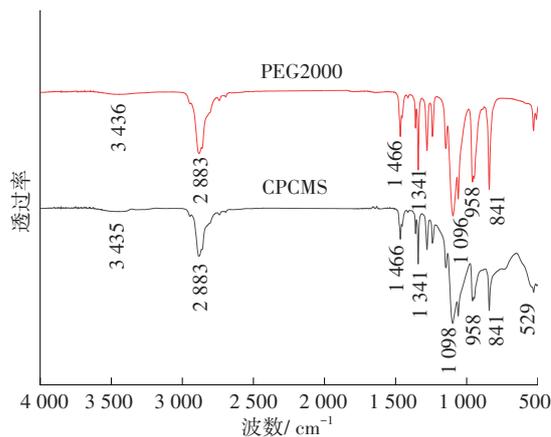
PEG2000和CPCMs的衍射图如图4(a)所示。PEG2000的特征峰对应的衍射角 2θ 分别为 18.88° 和 23.08° ,而CPCMs特征峰的衍射角 2θ 为 19.08° 和 23.38° 。PEG2000和CenoPCM的衍射峰位置相似,说明二者具有相似的规则晶体结构。这表明,漂珠的存在并不影响PEG2000的晶体结构^[16]。然而,与PEG2000相比,CenoPCM的峰值强度明显降低。这主要是因为受主链极性的影响,支链PEG2000被局限在漂珠内部,导致其分子链的运动能力受到限制,进一步影响了PEG2000的结晶性能^[17]。

从图4(b)可以看出,PEG2000的C—H键对应的特征峰出现在 2883 、 1466 、 1341 、 959 和 841 cm^{-1} ,其中 1096 cm^{-1} 处的强峰对应于C—O—C的对称振动。 3436 cm^{-1} 处的弱宽峰为O—H拉伸振动。在CPCMs的图谱中,并没有出现新的特征峰。这表明,在真空加载过程中,PEG2000和自带小孔漂珠之间并没有发生化学作用。综合XRD和FT-IR图谱的分析结果,发现没有形成新的特征峰,也没有旧

的特征峰消失。这表明,PEG2000在漂珠中化学性质稳定,与漂珠具有良好的化学兼容性,二者之间为物理共存^[18]。根据相分析、红外分析以及扫描电镜结果,PEG2000已成功加载到自带小孔漂珠中。



(a) XRD图谱



(b) FT-IR图谱

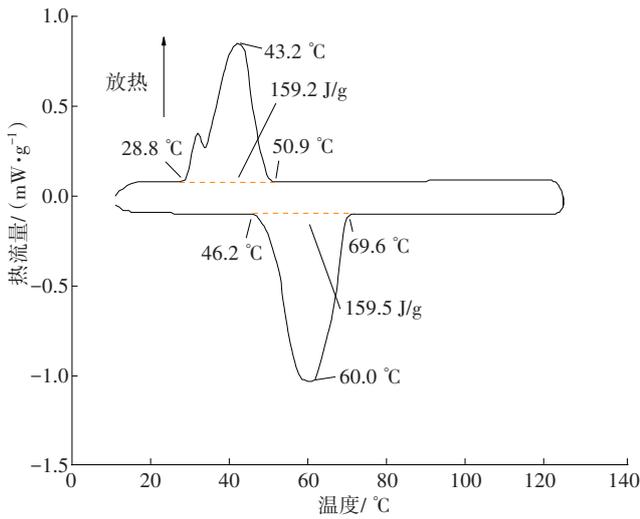
图4 XRD和FT-IR测试结果

Fig. 4 Test results of XRD and FT-IR

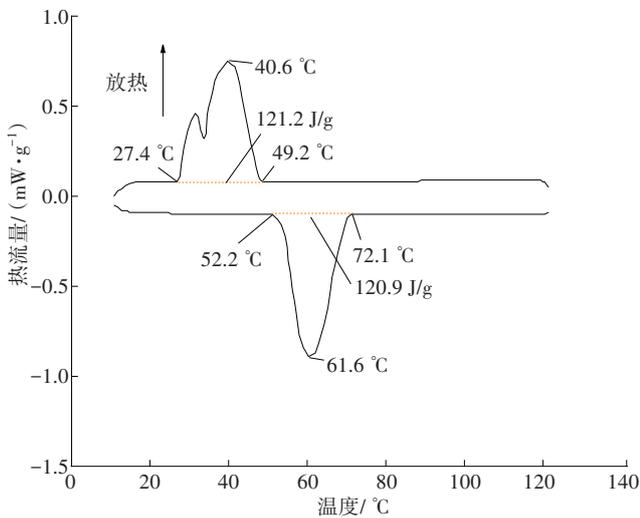
2.1.3 储热能力分析

PEG2000和CPCMs的差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测试结果如图5所示。从图5可以看出,CPCMs的吸收峰和放热峰与PEG2000的相似。其中,PEG2000在升温 and 结晶过程中的相变起始温度、相变潜热焓值分别为 46.2°C 、 159.5 J/g 和 50.9°C 、 159.2 J/g 。CPCMs在升温 and 结晶过程中的相变起始温度、相变潜热焓值分别为 52.2°C 、 120.9 J/g 和 49.2°C 、 121.2 J/g 。与PEG2000相比,CPCMs在升温阶段的相变起始温度有所延迟,且相变潜热焓值有所降低。这是因为自

带小孔漂珠作为载体被引入后,其微孔结构与内部空间对PEG分子链的有序排列产生了一定阻碍作用^[16],使CPCMs在升温过程中的相变起始温度相对延迟,相变焓值也相应降低。尽管CPCMs的相变焓值有所降低,与其他报道的聚乙二醇类CPCMs的相变焓值差距不大^[19-20]。这表明,自带小孔漂珠作为载体,对PEG2000的负载是十分有利且高效的。



(a) PEG2000



(b) CPCMs

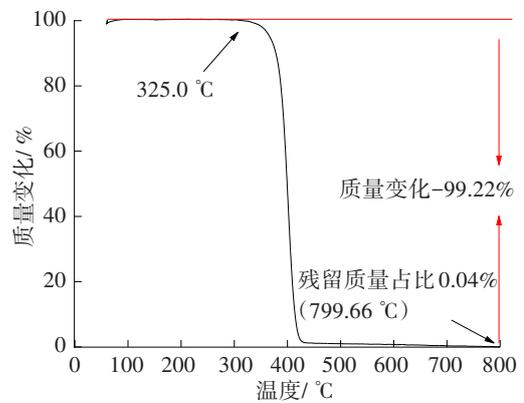
图5 DSC测试结果

Fig. 5 Test results of DSC

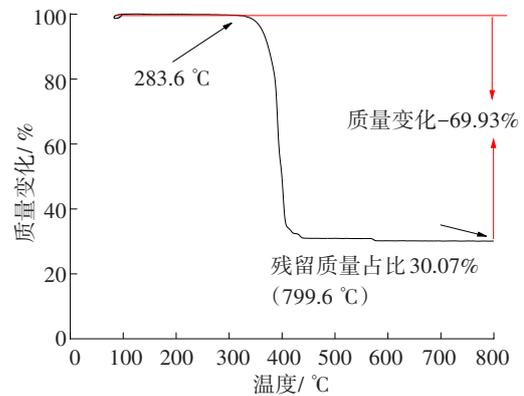
2.1.4 热稳定性分析

PEG2000和CPCMs的热重曲线如图6所示。从图6(a)看出,PEG2000的TG曲线在约325 °C时表现出明显的失重现象,这主要归因于PEG2000分子链的热降解。当测试温度达到400 °C以上,PEG2000

才发生明显的失重现象,其失重率为99.22%。显然,这些分解温度高于热拌沥青混合料温度(140~220 °C),从热稳定性的角度来看,这证实了PEG2000调节沥青路面热环境的可行性^[21]。从图6(b)可以看出,CPCMs的TG曲线在温度超过283.6 °C后,开始发生明显的失重现象。这是因为随着温度的升高,PEG与自带小孔漂珠之间的作用力逐渐减弱,导致CPCMs发生热分解。然而,在测试温度超过400 °C后,CPCMs才发生明显的失重现象,其失重率为69.00%。这表明,制备的CPCMs具有良好的热稳定性,能够满足沥青路面施工和使用要求。



(a) PEG2000



(b) CPCMs

图6 热重测试结果

Fig. 6 Test results of TG

2.2 路用性能测试结果与分析

2.2.1 高温稳定性

含有不同掺量CPCMs的车辙板试件的测试结果如图7所示。从图7可以看出,当掺量为0%、20%、40%、60%时,车辙试件的动稳定度分别为1 853、1 745、1 167、237次/mm。随着CPCMs掺量的

增加,动稳定度呈急剧下降趋势,当掺量为60%时,动稳定度不再满足试验规程要求。这是因为CPCMs虽可以起到填充作用^[22],但随着替代的细集料越来越多,原有的骨架结构发生了较大改变,抵抗外部荷载的能力减弱,所以车辙试件的动稳定度急剧下降。因此,合理限制CPCMs的掺量,可满足试验规程对车辙试验的要求。

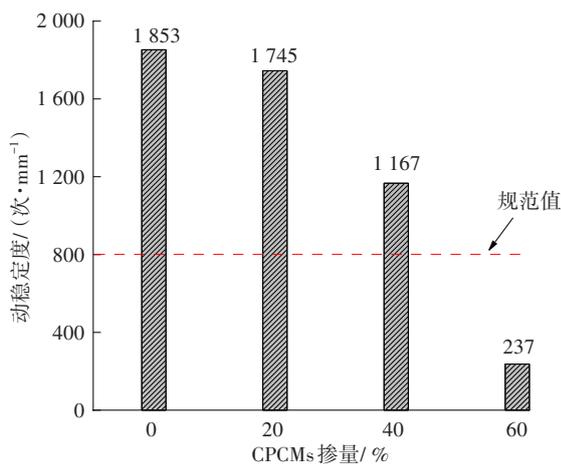


图7 车辙试验结果

Fig. 7 Rutting test results

2.2.2 低温稳定性

试件破坏时最大弯拉应变 ϵ_B 的计算式如下:

$$\epsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \quad (1)$$

式中: L 、 h 、 d 分别为试件的跨径、宽、高。

弯曲试验的最大弯拉应变结果如图8所示。从图8可以看出,当掺量为0%、20%、40%、60%时,最大弯拉应变值分别为 $3\ 326 \times 10^{-6}$ 、 $3\ 291 \times 10^{-6}$ 、 $3\ 009 \times 10^{-6}$ 、 $2\ 876 \times 10^{-6}$,所有试件的最大弯拉应变值均超过了试验规程要求的目标值。随着CPCMs掺量的增加,AC-13沥青混合料的最大弯拉应变整体呈缓慢减小趋势。

随着CPCMs掺量的增加,沥青混合料的最大弯拉应变逐渐降低。这是因为CPCMs颗粒吸收了游离沥青,降低了骨料之间的黏附性,也降低了沥青混合料的低温抗裂性能。掺入CPCMs,虽不利于沥青混合料的低温抗裂性能,但仍能满足最大弯拉应变的标准限值($\geq 2\ 000 \times 10^{-6}$)。这表明,在不同CPCMs掺量下,沥青混合料的低温性能均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的要求。

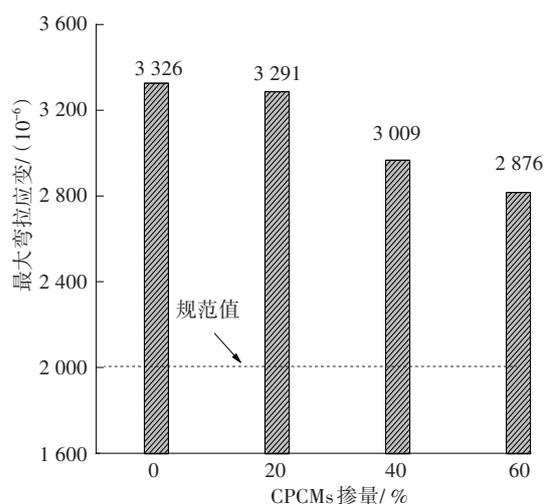


图8 弯曲试验结果

Fig. 8 Bending test results

2.2.3 水稳定性

冻融劈裂试验强度比 R_{TSR} 的计算式如下:

$$R_{TSR} = \frac{R_{t,1}}{R_{t,2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{TSR} 为冻融劈裂试验强度比; $R_{t,1}$ 、 $R_{t,2}$ 分别为冻融循环后和未冻融循环有效试件劈裂抗拉强度平均值。

不同掺量CPCMs的标准马歇尔试件的冻融劈裂测试结果如图9所示。从图9可以看出,随着CPCMs掺量的增加,沥青混合料的冻融劈裂强度逐渐减低。当CPCMs掺量分别为0%、20%、40%、60%时,对应的 R_{TSR} 的值分别为87.1%、81.4%、78.7%、71.9%。当CPCMs掺量达到60%时, R_{TSR} 的值仅为71.9%,不能满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)要求。

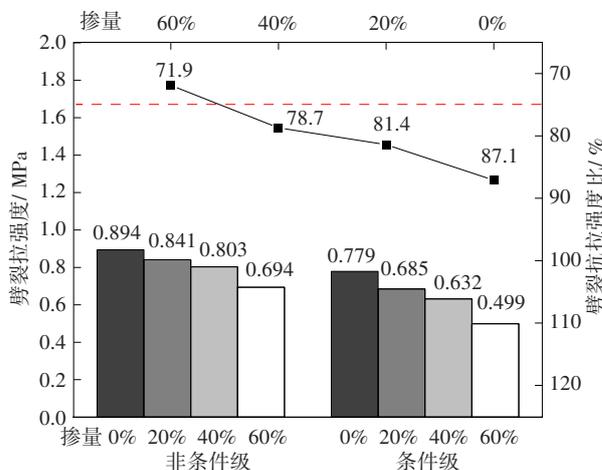


图9 冻融劈裂试验结果

Fig. 9 Freeze-thaw splitting test results

随着CPCMs掺量的增加,沥青混合料的冻融劈裂强度逐渐降低,这是因为漂珠的吸水性高于细集料的,同时PEG2000也具有一定的水溶性。因此,当CPCMs掺量越大,试件内部吸收的水分也越多,对沥青混合料性能的不利影响愈明显。

2.3 降温效果测试结果与分析

不同掺量的CPCMs试件随时间变化的温度曲线如图10所示。从图10可以看出,随着CPCMs掺量增大,各试件均呈一致的趋势。在升温过程中,与空白组测温试件相比,当CPCMs掺量为20%、40%、60%时,含有CPCMs的各试件分别产生了2.0、2.5、2.8℃的最高温差。这表明,高剂量的CPCMs具有更强的吸热能力,降温效果更好。但随着掺量的提高,降温效果的边际收益逐渐降低。较空白组测温试件,当CPCMs掺量为60%时,测温试件最高温差为2.8℃,最高温度峰值点推迟了2.1 min。这是因为CPCMs在相变过程中吸收了大量的潜热,有效减缓了试件温度的上升速率^[23]。

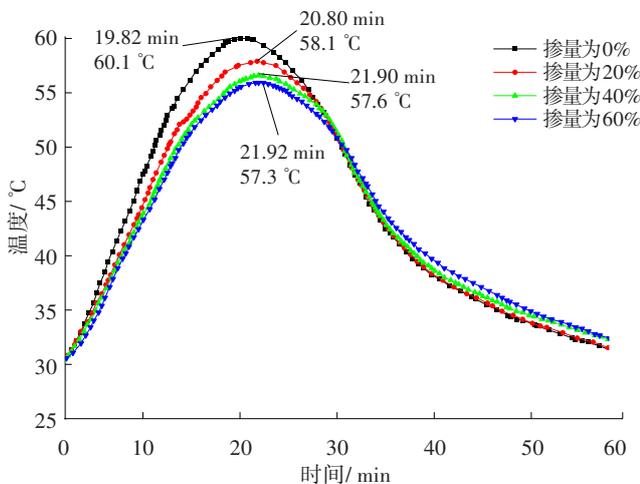


图10 测温试件的温度时间变化曲线图

Fig. 10 Temperature-time variation curve diagram of temperature measurement specimen

在环境温度降低的过程中,CPCMs的放热会提高测温试件的温度,减缓沥青路面的收缩应力变化率。在掺量为40%时,含有CPCMs沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性均满足试验规程要求,沥青混合料的降温效果为2.5℃。在此掺量下,CPCMs满足路用性能要求,有效控制了沥青路面温度,并在相变沥青路面领域中具有实际应用

价值。

3 结论

为了减缓沥青路面高温车辙病害,以PEG2000作为相变材料,以漂珠作为载体,制备一种高强度耐高温的CPCMs,并对其进行分析,并研究了不同CPCMs掺量对沥青混合料的路用性能和降温效果的影响,得出以下结论:

1) 通过XRD、FT-IR和SEM图像的综合分析,证实PEG2000已成功加载到自带小孔漂珠中,且PEG2000在自带小孔漂珠内部分布均匀,二者之间未发生化学反应。CPCMs的相变焓达到120.9 J/g,温度超过283.6℃后才出现明显质量损失,这表明其能够适应沥青路面的高温拌和及使用环境。

2) 随着CPCMs掺量的增加,沥青混合料的高温稳定性、低温抗开裂性和水稳定性均有不同程度的下降。当掺量超过40%时,这种不利影响更加明显。因此,合理控制CPCMs的掺量,可保证沥青混合料的各项路用性能指标符合规范要求。

3) 对比空白组测温试件,当掺量达到细集料的60%时,沥青混合料的测温试件最高温差可达2.8℃,且峰值温度点的出现时间延迟了2.1 min。这表明,CPCMs在沥青混合料中具有良好的降温效果。

4) CPCMs掺量为40%~60%时的沥青混合料,不仅能够保证路用性能符合要求,还能发挥良好的降温效果。

参考文献(References):

- [1] SANTERO N J, HORVATH A. Global warming potential of pavements [J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(3): 034011. DOI: 10.1088/1748-9326/4/3/034011.
 - [2] 孔祥杰, 张金喜, 袁晓斌, 等. 沥青路面抗车辙性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 43-48. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.03.009.
- KONG Xiangjie, ZHANG Jinxi, YUAN Xiaobin, et al. Study on influencing factors of rutting resistance of asphalt pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 43-48. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.03.009.

- [3] ZHANG D, CHEN M Z, WU S P, et al. Effect of expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM) on thermal and pavement performance of asphalt mixture [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277: 122270. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122270.
- [4] 韩建博, 朱福, 陈文怡. 石墨烯对沥青混合料改性机理研究综述[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(1): 40-47. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220519005.
- HAN Jianbo, ZHU Fu, CHEN Wenyi. A review on the modification mechanism of graphene to asphalt mixture [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(1): 40-47. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220519005.
- [5] 段丹军. 沥青路面车辙预估模型验证研究[J]. *公路工程*, 2013, 38(3): 11-14, 25. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2007.11.007.
- DUAN Danjun. Analysis of permanent deformation prediction model for asphalt pavements [J]. *Highway Engineering*, 2013, 38(3): 11-14, 25. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2007.11.007.
- [6] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 377-387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.126.
- [7] 姚文霞. 废胶粉与废塑料复合改性沥青混合料性能研究[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- YAO Wenxia. Performance study of waste tire rubber and waste plastic composite modified asphalt [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- [8] CAI X, WU K H, HUANG W K, et al. Study on the correlation between aggregate skeleton characteristics and rutting performance of asphalt mixture [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 294-301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.153.
- [9] MA B, ADHIKARI S, CHANG Y J, et al. Preparation of composite shape-stabilized phase change materials for highway pavements [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 42: 114-121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.027.
- [10] FANG Y T, WEI H, LIANG X H, et al. Preparation and thermal performance of silica/*n*-tetradecane microencapsulated phase change material for cold energy storage[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(11): 9652-9657. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b01799.
- [11] ALVA G, LIN Y X, LIU L K, et al. Synthesis, characterization and applications of microencapsulated phase change materials in thermal energy storage: a review[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 144: 276-294. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.063.
- [12] MOHSENI E, TANG W, WANG S Y. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 182-195. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.136.
- [13] WANG W L, YANG X X, FANG Y T, et al. Preparation and performance of form-stable polyethylene glycol/silicon dioxide composites as solid-liquid phase change materials[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(2): 170-174. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.12.003.
- [14] KARAMAN S, KARAIPEKLI A, SARı A, et al. Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(7): 1647-1653. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.01.022.
- [15] LIU F J, WANG J L, QIAN X. Integrating phase change materials into concrete through microencapsulation using cenospheres [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 80: 317-325. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.04.001.
- [16] FENG L L, SONG P, YAN S C, et al. The shape-stabilized phase change materials composed of polyethylene glycol and graphitic carbon nitride matrices [J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 612: 19-24. DOI: 10.1016/j.tca.2015.05.001.
- [17] 齐善威. 基于聚丙烯腈的接枝型相变材料的构效关系研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
- QI Shanwei. The structure-activity relationship of graft phase change copolymer of polyacrylonitrile [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.

(下转第27页)

- 7372.2020.10.007.
- CHENG Huailei, LI Bin, LIU Liping, et al. Evaluation of master curve of response-based modulus for asphalt pavement layer under vehicular loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 125-134. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.007.
- [17] VESTENA P M, SCHUSTER S L, DE ALMEIDA P O B J, et al. Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: error analysis in different models and field scenarios [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124343.
- [18] 赵延庆, 唐积民, 白龙. 利用沥青混合料复数模量确定松弛模量研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 498-502. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.012.
- ZHAO Yanqing, TANG Jimin, BAI Long. Determination of relaxation modulus using complex modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 498-502. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.04.012.
- (责任编辑:罗容;英文编辑:焦登武)
-
- (上接第16页)
- [18] DAI J S, MA F, FU Z, et al. Applicability assessment of stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material in cooling pavement [J]. Renewable Energy, 2021, 175: 748-759. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.063.
- [19] TANG B T, WU C, QIU M G, et al. PEG/SiO₂ - Al₂O₃ hybrid form-stable phase change materials with enhanced thermal conductivity [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 144 (1/2): 162-167. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.12.036.
- [20] QIAN T T, LI J H, MA H W, et al. The preparation of a green shape-stabilized composite phase change material of polyethylene glycol/SiO₂ with enhanced thermal performance based on oil shale ash via temperature-assisted sol-gel method [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 132: 29-39. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.08.017.
- [21] JIA M, SHA A M, JIANG W, et al. Laboratory evaluation of poly (ethylene glycol) for cooling of asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121774. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121774.
- [22] WANG H R, WANG Y M, QI M L, et al. PEG/diatomite modified asphalt mixture with self-regulating temperature property [J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00585. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00585.
- [23] JIN J, LIU L, LIU R H, et al. Preparation and thermal performance of binary fatty acid with diatomite as form-stable composite phase change material for cooling asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 616-624. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.305.
- (责任编辑:罗容;英文编辑:王佳)