

水基高分子聚合物稳定碎石路用性能研究

Research on Mechanical Properties of High Polymer Macromolecule Stabilized Aggregates

刘彦¹, 曹东伟^{1,3}, 夏磊^{2,3}, 钟勇⁴, 李彦苍¹, 魏红梅⁴

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064;
3. 中路高科交通检测检验认证有限公司 北京 100088; 4. 新疆交通投资(集团)有限责任公司
运营分公司, 乌鲁木齐 830099)

摘要: 为研究高分子聚合物稳定碎石的抗裂性能, 通过加州承载比 (CBR)、无侧限抗压强度、单轴贯入、干缩、温缩、车辙、冻融循环等试验与傅里叶变换红外光谱对其进行研究。结果表明: 随着压实度的提高与聚合物掺量的增加, CBR 值逐渐增大, 为水泥稳定碎石的 2~3 倍; 无侧限抗压强度值偏低, 在聚合物稳定碎石中加入少量水泥可显著提高其早期强度; 聚合物掺量为 0.5% 便可达到普通沥青混合料的单轴贯入强度值; 干缩、温缩系数分别为水泥稳定碎石的 1/4 和 1/3, 有效减少裂缝的产生; 高温稳定性良好但抗冻性能和抗水损害能力较弱。

关键词: 道路工程; 水基高分子聚合物; 柔性基层; 抗裂性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 05-0001-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.001

LIU Yan¹, CAO Dongwei^{1,3}, XIA Lei^{2,3}, ZHONG Yong⁴, LI Yancang¹, WEI Hongmei⁴

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. China-Road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China;

4. Xinjiang Communications Investment (Group) Co., Ltd., Operation Branch, Urumqi 830099, China)

Abstract: This paper investigated the cracking resistance of high polymer macromolecule stabilized aggregates by examining a range of physical and mechanical properties, including the California bearing ratio (CBR), unconfined compressive strength, uniaxial penetration, dry and heat shrinkage deformation, wheel tracking, Freeze-thaw splitting test, and Fourier transform infrared spectroscopy. The findings indicate that as the degree of compaction and the quantity of polymer increase, the CBR value rises gradually, reaching a value that is two to three times that of cement stabilized macadam. Additionally, the unconfined compressive strength is relatively low, yet the incorporation of a modest quantity of cement into the high polymer macromolecule stabilized aggregates can enhance its early strength. The polymer dosage of 0.5% can achieve the uniaxial penetration strength value of an ordinary asphalt mixture. Furthermore, the dry and heat shrinkage deformation are 1/4 and 1/3

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (236Z1218G); 新疆交通投资(集团)有限责任公司科技项目 (202301005)。

作者简介: 刘彦 (1998—), 女, 本科, 研究生, 研究方向: 道路工程新材料。

通信作者: 曹东伟 (1974—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 道路工程新材料、新结构。

收稿日期: 2024-06-07

材料科学

of those of cement stabilized macadam, respectively, which can effectively reduce the cracking of pavement. However, while the high temperature stability is good, the freezing resistance and water damage resistance are weak.

Key words: highway engineering; high polymer macromolecule; flexible base; crack resistance

0 引言

半刚性基层因其强度高、造价低、抗永久变形能力强等优点,成为我国公路路面主要采用的基层结构类型。然而,受其材料属性影响,半刚性基层在水泥水化或温度变化较大时容易产生干缩和温缩裂缝,进而在沥青层产生反射裂缝,导致路面整体结构的破坏^[1]。半刚性基层在20世纪50年代,一度成为美国沥青路面的主要结构类型,但自从20世纪60年代后,在美国的使用越来越少,逐渐被全厚式路面和柔性基层所取代,与常规半刚性基层沥青路面相比,这类路面能够有效减少裂缝的产生^[2-4]。为了增加高速公路路面柔性基层的强度,需要研发使用新型道路材料。水基高分子聚合物(High Polymer Macromolecule)HPM是一种由多种压力敏感性树脂、高强抗老化树脂聚合而成的聚合物乳液。铺筑该新型混合料后,HPM乳液与级配碎石拌和时在集料表面形成有机胶结膜,通过锁链式结构将碎石颗粒固结为整体,最终形成具有柔性特征的高分子聚合物稳定基层结构^[5-7]。

水基高分子聚合物稳定碎石属于高韧性的基层结构,对沥青路面层传导荷载只起扩散作用,基层结构本身并不受拉应力影响,且自身不产生水化反应,干缩系数和温缩系数值较小^[8-11],故表现出不同于半刚性基层易开裂的特点。且由此材料形成的基层高温稳定性能较好,可以达到沥青稳定碎石ATB的3倍以上,增强了抗永久变形能力^[12-14]。研究表明,HPM稳定碎石的抗裂性能显著优于水泥稳定碎石,有效减少了路面裂缝、车辙、坑槽等病害产生,大大提高了路面使用寿命及行车舒适度。高分子聚合物可以完全代替水泥用于道路建设中,形成长寿命路面的效果。

但聚合物稳定碎石材料目前在国内仍处于研究和验证的前期阶段,其相关机理和性能还需进一步研究和分析。因此,通过对不同压实度及不同聚合物掺量的HPM稳定碎石的加州承载比(CBR)、单

轴贯入强度;不同龄期的无侧限抗压强度、收缩性能;及高温稳定性、低温抗冻性,进行其路用性能及抗裂性能的研究与评价,为HPM稳定碎石在抗裂基层材料方面的应用与推广提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 聚合物溶液

聚合物溶液为HPM Soilfix VR4,常温状态下为棕褐色液体,其相关技术指标及检测结果见表1。粗细集料技术指标见表2。

表1 HPM溶液相关技术指标
Table 1 Technical indicators of HPM solution

检测项目	酸碱度	固含量 /%	粘稠度 /cps	沸点 /℃	易燃性	水溶性
技术指标	8~9	28.5~38.0	50~100	100	不可燃	完全可溶
实测结果	9	38	85	98	不可燃	完全可溶

表2 粗细集料主要技术指标
Table 2 Main technical indexes of the crude aggregate

粒径/mm	表观相对密度 /(g/cm ³)	表观密度 /(g/cm ³)	毛体积相对密度 /(g/cm ³)	吸水率 /%
(20, 30]	2.718	2.712	2.694	0.33
(15, 20]	2.708	2.701	2.678	0.4
(10, 15]	2.709	2.702	2.679	0.46
(5, 10]	2.715	2.708	2.671	0.61
(3, 5]	2.719	2.712	2.646	1.02
(0, 3]	2.692	2.684		

1.1.2 合成级配曲线

依据JTG/TF20-2015《公路路面基层施工技术细则》^[15]确定HPM稳定碎石的粗细集料级配范围,HPM稳定碎石的级配曲线如图1所示。

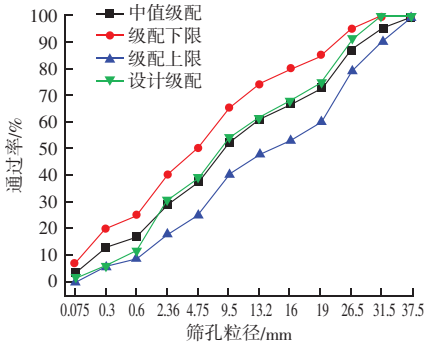


图1 HPM稳定碎石级配曲线
Fig. 1 The curves of HPM stable gravel

1.1.3 重型击实试验

为确定 HPM 稳定碎石的最大干密度和最佳含水率,依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》^[16]对 HPM 稳定碎石进行重型击实试验,击实曲线如图 2 所示,HPM 稳定碎石的最佳含水量为 4.5%,最大干密度为 2.179 g/cm^3 。

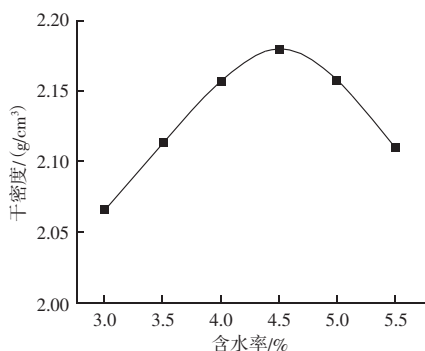


图 2 击实试验结果
Fig. 2 The compaction test curve

1.2 试验方法

1.2.1 CBR 试验

根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行 CBR 试验。采用重型击实试验制备 100% 压实度和 98% 压实度下不同聚合物掺量的试件、相同聚合物掺量下压实度分别为 96%、98%、100% 的三组试件。试件尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,试件制备完成后放入 60°C 烘箱内养生 48 h,室内 60°C 养生条件下能够加速聚合物稳定碎石中的水分及轻组物质挥发^[17]。养生结束后,在常温水中浸泡 96 h,进行 CBR 试验。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度 (UCS) 是道路材料的基本力学性能指标,试验根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[18]进行,试件尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,采用静压法成型,压实度为 100%,试件制备完成后放入 60°C 烘箱干燥养生 48 h,养生结束后,在常温水中浸泡 24 h,进行抗压强度试验。

1.2.3 单轴贯入试验

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[19]中提出,沥青混合料的设计参数单轴贯入强度作为聚合物稳定碎石材料的评价指标,采用旋转压实仪成型试件,试件成型后在常温下放置 48 h 后放入 60°C 烘箱中保温 6 h,然后进行单轴贯入试验。

1.2.4 干缩、温缩试验

干缩、温缩试验依据 JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行,成型 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的中梁试件,在标准养生期记录试件的失水率及干缩量。同时,按照相同的试件尺寸制备温缩试件,放入 60°C 烘箱中养生 6 d,在常温水中浸泡 24 h,将试件擦干水分后放入 105°C 烘箱烘干至没有自由水存在,从 $-20 \sim 30^\circ\text{C}$ 设定了 5 个温度等级,每次降温 10°C 恒温 3 h,降温速率为 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

1.2.5 车辙试验

采用轮碾法成型 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的板块状试件, 60°C 烘箱养护 6 d,试验压力为 0.7 MPa ,轮距为 230 mm ,碾压速度为 $42 \text{ 次}/\text{min}$ 。

1.2.6 冻融循环试验

冻融循环试验根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行,试件尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,采用静压法成型,压实度为 100%,将成型后的试件放入 60°C 烘箱养护,最后一天浸水,试件饱水后置于 -18°C 冰箱内 16 h,取出后置于 20°C 的恒温水浴中 8 h,再次放入冰箱内进行第 2 次冻融,反复循环 5 次。冻融次数用 m 表示,每次冻融循环后试件的抗压强度 ($R_{DC,m}$),与未经冻融循环试件的抗压强度 (R_C) 作对比,冻融循环试验后抗压强度损失为 $[1 - (R_{DC,m}/R_C \times 100\%)]$ 。

1.2.7 傅里叶变换红外光谱

红外光谱采用沥青智能快检仪检测,将 FT-IR 仪器进行调试,以保证仪器的精确度和灵敏度,调试好仪器后,将聚合物溶液放置在样品检测区,干涉光通过样品后将含有样品信息到达检测器,通过傅里叶变换对信号进行处理,以 4 cm^{-1} 分辨率进行扫描后,红外光谱在 $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 的中间区域被收集,随即可得到样品的红外吸收光谱图。

2 试验结果及分析

2.1 CBR 试验结果分析

2.1.1 不同聚合物掺量的 CBR 值

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中要求,HPM 稳定碎石的压实度必须 $\geq 98\%$,在 100% 和 98% 压实度下,逐渐增加聚合物原液掺量,HPM 掺量为 0.25%、0.50%、1.00% 每种掺量做三组试

材料科学

验。不同压实度下不同聚合物掺量 CBR 值由图 3 所示。

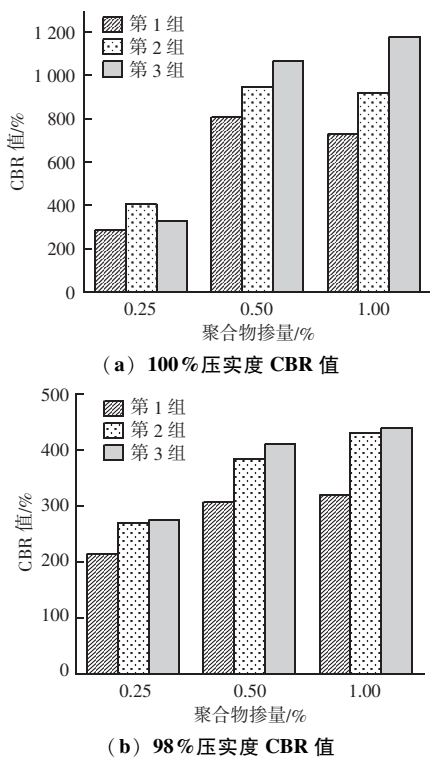


图3 不同压实度下不同聚合物掺量 CBR 值
Fig.3 CBR values of different polymer incorporation at different compaction degrees

相同压实度下, 聚合物掺量越高, 其相应的 CBR 值越大。压实度为 100% 时, HPM 掺量为 0.5% 比 0.25% CBR 值增加了 231%~323%; 压实度为 98% 时, CBR 值增加了 142%~149%。HPM 掺量由 0.25% 增加到 0.50%, 聚合物乳液更充分均匀的分布在集料之间, 在干燥过程中聚合物乳液中的水分及轻组物质挥发, 在碎石表面形成高强度结合膜, 将不同集料有力的胶结在一起, 整体承载强度 CBR 值幅度提升最大。但聚合物掺量由 0.50% 提升到 1.00% 时, 承载比并没有大幅度提升, 其原因可能是由于高分子聚合物在拌和及击实过程中有少量损失, 部分聚合物未能充分分散到集料表面。同时聚合物溶液中相应的含水率也增加, 乳液中的水与空气之间的接触面积变小, 失水速率降低, 导致聚合物与集料之间形成的有机黏膜有限。此外, 从聚合物稳定碎石材料的经济造价角度考虑, HPM 掺量为 0.50% 时较为经济。

2.1.2 不同压实度的 CBR 值

由图 4 可以看出, 压实度越高, 相应的 CBR 值越大。随着压实度的提高, CBR 值并不是同步等比

增长, 由 96% 压实度到 98% 压实度时, HPM 稳定碎石的 CBR 值增长较为缓慢, 由 98% 压实度提高到 100% 压实度时 CBR 值突增。JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中要求高速公路 HPM 稳定碎石压实度须 $\geq 98\%$ 时, CBR 值 $\geq 250\%$, 均符合规范要求。

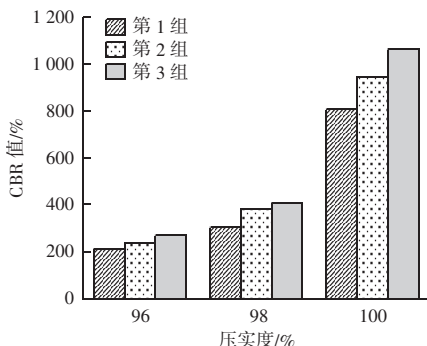


图4 不同压实度下 CBR 值
Fig.4 CBR values for different compaction degrees

2.1.3 不同材料稳定碎石类型 CBR 值

由图 5 可以看出, HPM 稳定碎石的 CBR 值比碎石中加入聚合物与水泥、水泥稳定碎石的 CBR 值均要高。HPM 稳定碎石比水泥稳定碎石的 CBR 值提高 200%~300% 之间, 为水泥稳定碎石 CBR 值的 2~3 倍。因为 HPM 是一种水基聚合物, 溶于水后以水为载体, 充分流动后均匀分散到集料表面, 经过重型击实仪有效击实, 待干燥养生水分蒸发后, 聚合物与集料之间形成有机黏膜将碎石集料胶结包裹成整体, 加州承载比大幅度提升。

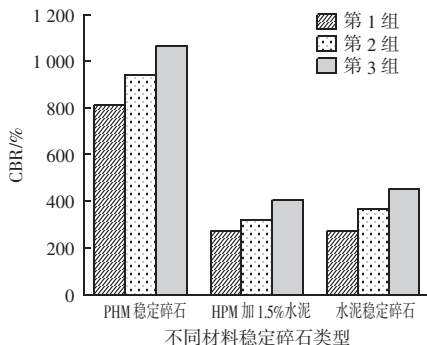


图5 不同材料稳定碎石 CBR 值
Fig.5 CBR values of stable gravel of different materials

2.2 无侧限抗压强度试验结果分析

2.2.1 HPM 稳定碎石无侧限抗压强度

由图 6 可知, 与水泥稳定碎石相比, HPM 稳定碎石 UCS 值偏低, 因为 HPM 稳定碎石属于柔性基

层, 半刚性基层材料指标并不适用。其强度来源主要靠聚合物溶液与级配碎石之间的胶结与嵌挤力形成整体, 内部具有较多的孔隙, 整体密实度不强。随着龄期的增加, 干燥养护后聚合物稳定碎石混合料中水分蒸发, 固体表面形成的有机黏膜有效提升不同集料之间的黏结作用, 集料之间嵌挤更为密实, 整体胶结性增强, UCS 值有所增加, 但整体强度增幅缓慢。

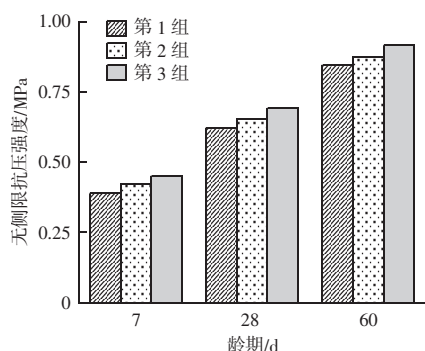


图6 不同龄期下 HPM 稳定碎石无侧限抗压强度
Fig. 6 Unconfined compressive strength of HPM stabilized gravel at different ages

2.2.2 HPM 加 1.5% 水泥稳定碎石无侧限抗压强度

如图 7 所示, 在 HPM 稳定碎石中加入 1.5% 水泥, UCS 值显著提升, 强度约为 HPM 稳定碎石的 4 倍。这是因为水泥的加入填补了 HPM 稳定碎石中的部分孔隙, 不同集料之间更强的凝固在一起, 使 HPM 稳定碎石整体更加凝固与密实。整体强度不仅源于聚合物溶液与集料之间的胶结与嵌挤作用, 还有水泥水化过程中产生水化硅酸钙凝胶 (C-S-H), 随着龄期延长, C-S-H 颗粒逐渐变小, 分布更加均匀, 颗粒密度也逐渐增加, 颗粒之间较为紧密的堆积方式也决定了其具有更高的力学性能^[20]。

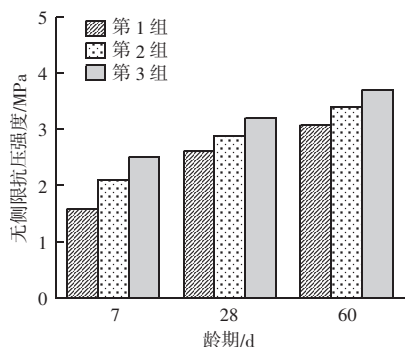


图7 不同龄期下 HPM 加水泥无侧限抗压强度
Fig. 7 Compressive strength value of HPM and cement at different ages

2.3 单轴贯入试验结果分析

由图 8 可知, 随着 HPM 掺量的增加, 单轴贯入强度提升明显。但 HPM 掺量超过 0.8% 后, 贯入强度略有下降, 这是因为聚合物掺量为 0.8% 时混合料内的含水率比 1% 小, 聚合物颗粒间的孔隙减小, HPM 稳定碎石随着内部水分及部分有机物的挥发, 其结构内部形成的黏结强度增加, 黏结强度已经达到理想状态。由贯入强度结果可以看出, HPM 掺量超过 0.5% 时便可达到普通沥青混合料的贯入强度要求。

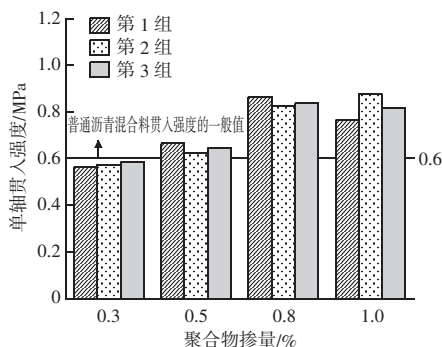


图8 不同聚合物掺量单轴贯入强度
Fig. 8 Uniaxial penetration intensity values for different polymer incorporation

2.4 干缩、温缩试验结果分析

2.4.1 干缩试验结果分析

如图 9 所示, HPM 稳定碎石的干缩量随龄期的增加逐渐减小, 7 d 后趋于稳定; 干缩系数随龄期增加先增大后减小, 在初始 7 d 内上升至最大值 12.94×10^{-5} , 7 d 后快速下降, 逐渐保持稳定, 30 d 之后干缩系数基本不变。水泥稳定碎石材料的干缩系数一般为 $19.1 \times 10^{-5} \sim 64.9 \times 10^{-5}$ ^[21], 与之相比, HPM 稳定碎石的干缩系数约为水泥稳定碎石材料的 1/4, 表明 HPM 稳定碎石抗失水收缩能力较强, 且

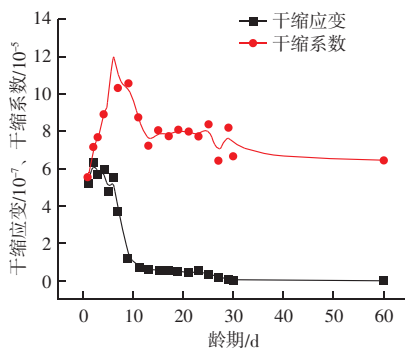


图9 干缩应变与干缩系数
Fig. 9 Dry shrinkage strain and dry shrinkage coefficient

材料科学

在很长时间内收缩变形几乎保持不变, 具有优越的抗裂性能。

2.4.2 温缩试验结果分析

由图 10 所示, $-10 \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 HPM 稳定碎石温缩应变斜率最大, 说明在这个区间内 HPM 稳定碎石受温度影响收缩变形最大, $-10 \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 次之。相比常温而言, HPM 稳定碎石对于较低温度的变化收缩变形较为敏感。其温缩系数大概为 $2.49 \times 10^{-6} \sim 4.73 \times 10^{-6}$, 而水泥稳定碎石基层的温缩系数一般为 $8 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$, 与之相比, HPM 稳定碎石的温缩系数平均为水泥稳定碎石材料的 $1/3$, 具有良好的抗低温收缩开裂性能。

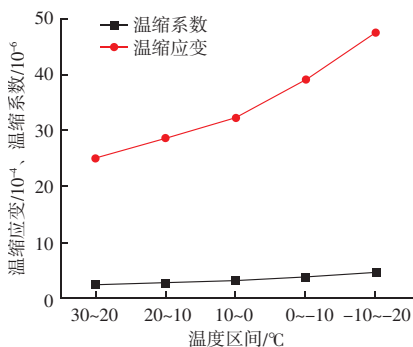


图 10 温缩应变与温缩系数

Fig. 10 Temperature shrinkage strain and temperature shrinkage coefficient

2.5 车辙试验结果分析

HPM 稳定碎石动稳定度, 结果见表 3。不同聚合物掺量下, HPM 稳定碎石的 DS 均在 30000 次/mm 以上, 几乎不发生变形。HPM 的主要成分是一 $[\text{CH}_2\text{CCH}_2-\text{COOCH}_2\text{CH}_3]_n$ (聚甲基丙烯酸乙酯), 该物质熔点为 $245\text{ }^{\circ}\text{C}$, 闪点为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有良好的耐高温性能。因此采用 HPM 稳定碎石可以有效地减小和预防沥青路面车辙病害的产生。

表 3 HPM 稳定碎石高温稳定性试验结果
Table 3 Results of high-temperature stability test of HPM stabilized gravel

HPM 掺量/%	0.25	0.50	1.00
动稳定度/(次/mm)	31 925	35 634	42 379

2.6 冻融试验结果分析

冻融循环 1 次后, 聚合物材料与碎石黏结层在短时间内胀缩, 导致有机黏膜与碎石部分分离, 因此试件的抗压强度急剧下降。经过 1 次冻融循环, HPM 稳定碎石主体的胶结作用已经被破坏, 其抗压

强度继续降低主要是由于材料反复胀缩造成内部结构发生破坏, 固体颗粒间的嵌挤作用降低所致; 如图 11 所示, 循环 5 次后, HPM 稳定碎石几乎没有任何强度, 碎石集料完全坍落, 强度损失达到 87.7%。通过上述分析可知, HPM 稳定碎石抗冻性能和抗水损害能力较弱。

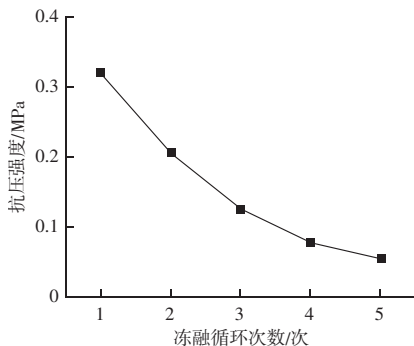


图 11 冻融循环抗压强度

Fig. 11 Compressive strength of the freeze-thaw cycle

2.7 傅里叶变换红外光谱分析

如图 12 所示, 在红外光谱中可以观察到聚合物中与振动有关的吸收峰, 其中, O-H 键占主导地位, 这是基于水和羟基的存在引起的吸收峰, 在 3368 cm^{-1} 左右出现的与水分子的弯曲振动相关的吸收峰, 表明水基聚合物中存在大量的分子水。C=O 键与 N-H 键波峰较为连续, 说明聚合物内部存在大分子量的非晶体有机化合物, 除上述吸收峰外, 在分析的光谱中出现了 1161.74 cm^{-1} 左右的吸收峰, 第一个在相对较低的波数值处表明聚合物可能与硅氧结构中 Si-O 不对称伸缩振动有关。聚合物结构由大量有机化合物组成, 晶体链条相互缠绕形成塑体, 由于塑体的结构为非晶态, 具有较好的抗冲击强度和韧性, HPM 用水作为传递手段包裹不同粒径的粒料, 在机械压实作用下, 聚合物链条交织在一起, 压实度与黏结性有效提高。

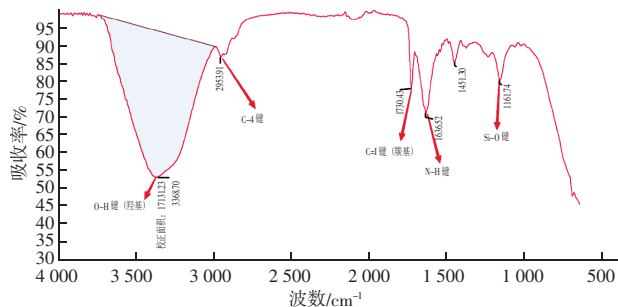


图 12 水基高分子聚合物红外光谱图

Fig. 12 Infrared spectra of water-based high polymer

3 结论

通过聚合物稳定碎石的加州承载比、无侧限抗压强度、单轴贯入、干缩、温缩、车辙、冻融循环、傅里叶红外光谱等试验,主要得到以下结论:

(1) HPM 稳定碎石的 CBR 值随着聚合物掺量的增加与压实度的提高而增加,约为水泥稳定碎石的 2~3 倍;无侧限抗压强度偏低,在 HPM 稳定碎石中加入少量水泥可提高其早期强度;单轴贯入强度较高,HPM 掺量为 0.5% 时便可达到普通沥青混合料的贯入强度。

(2) HPM 稳定碎石的干缩系数和温缩系数值分别约为水泥稳定碎石的 1/4 和 1/3,具有良好的抗失水收缩性能和抗低温开裂性能,且很长时间内收缩变形保持不变,具有优越的抗裂性能。

(3) HPM 稳定碎石的高温稳定性较好,不同聚合物掺量的动稳定度均达到 30 000 次/min 以上,抗永久变形性能好,不易产生车辙等病害;经过 5 次冻融循环后,聚合物与集料间的胶结和嵌挤作用完全失效,HPM 稳定碎石的抗冻性能和抗水损害能力较弱。

参 考 文 献

[1] 张生学. 高速公路不同类型的裂缝成因及防治技术要点 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48 (1): 115-116.

[2] 沈卫国, 郑小平, 李洪震, 等. 路面基层材料的分类及其服役状况综述 [J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43 (9): 1-5.

[3] 吕松涛, 赵需, 鲁巍巍, 等. 面向长寿命的既有高速公路沥青路面延寿设计综述 [J/OL]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (2): 20-49.

[4] THOMPSON M R, CARPENTER S H. Considering hot mix asphalt fatigue endurance in full depth mechanistic pavement design [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (6): 871-877.

[5] 水基路用聚合物稳定碎石基层技术规程: T/CECS G: D31-03-2024 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.

[6] 何磊, 低碳环保型水基-有机聚合物路用稳定材料应用技术. 云南省, 云南省交通科学研究院有限公司, 2022-04-16.

[7] 张平, 张宏江, 邓荣升. 水基聚合物 SRX 级配碎石的性能评价 [J]. 中外公路, 2023, 43 (5): 236-241.

[8] 姚鑫航. 基于聚合物稳定碎石基层路面抗反射裂缝技术研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.

[9] 杜洪新. SOILFIX 高分子聚合物稳定柔性基层试验研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.

[10] 罗升. 水基聚合物稳定碎石基层材料与典型路面结构研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.

[11] 查睿, 赵延庆, 付国志, 等. 水基聚合物稳定碎石路用性能研究 [J]. 中外公路, 2021, 41 (3): 338-342.

[12] 朱真景. SRX 聚合物稳定级配碎石基层的性能与应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[13] 赵伟, 蒋应军, 陈浙江, 等. 水基聚合物 SRX 稳定碎石路用性能 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (4): 598-603.

[14] IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K, et al. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25 (4): 472-483.

[15] 公路路面基层施工技术细则: JTG TF20-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

[16] 公路土工试验规程: JTG E40-2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[17] 罗升, 张新天, 王清晏, 等. 基于贯入强度的水基聚合物稳定碎石材料组成设计 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (4): 61-67.

[18] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51-2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[19] 公路沥青路面设计规范: JTG D50-2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.

[20] 刘新, 冯攀, 沈叙言, 等. 水泥水化产物——水化硅酸钙 (C-S-H) 的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35 (9): 9157-9167.

[21] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.