

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023040120240466

文章编号: 1674-599X(2024)02-0028-10

引用格式: 周志刚, 李振威, 陶正文, 等. 胶粉纤维改性水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 28-37.

Citation: ZHOU Zhigang, LI Zhenwei, TAO Zhengwen, et al. Study on the crack resistance of cement stabilized macadam modified by rubber powder fiber[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 28-37.

胶粉纤维改性水泥稳定碎石抗裂性能研究

周志刚¹, 李振威¹, 陶正文², 杨鹏杰¹, 陈功鸿¹

(1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 江西省高速公路投资集团有限公司, 江西 南昌 333200)

摘 要: 针对水泥稳定碎石基层易开裂问题, 在混合料中掺入适量胶粉及聚乙烯醇(PVA)纤维, 开展强度、抗压回弹模量、干缩性能和扫描电镜试验(SEM); 分别掺入橡胶粉、改性胶粉、PVA纤维、不同水泥剂量的胶粉纤维, 对比其对混合料抗裂性能的影响。发现掺入材料对水泥稳定碎石混合料性能具有明显影响。掺入胶粉、改性胶粉后会降低混合料强度和抗压回弹模量, 提升抗干缩性能; 掺入纤维能增强混合料强度、模量和抗干缩性能; 加入不同水泥剂量的胶粉纤维对混合料强度、抗压回弹模量提升效果明显, 但降低了抗干缩性能; 宏观力学指标试验和SEM试验结果显示改性胶粉纤维与水泥基具有良好的黏结性, 可以提升水泥稳定碎石混合料的抗裂能力。

关键词: 水泥稳定碎石; 改性胶粉; PVA纤维; 宏观力学试验; SEM

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Study on the crack resistance of cement stabilized macadam modified by rubber powder fiber

ZHOU Zhigang¹, LI Zhenwei¹, TAO Zhengwen², YANG Pengjie¹, CHEN Gonghong¹

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Communication Industry, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Jiangxi Province Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang 333200, China)

Abstract: To address the cracking issues prevalent in cement-stabilized macadam base layers, an appropriate blend of rubber powder and polyvinyl alcohol fibers was integrated into the mix. Comprehensive evaluations through strength, compressive rebound modulus, shrinkage performance, and scanning electron microscopy (SEM) tests were conducted. These assessments aimed to discern the effects of various admixtures, including rubber powder, modified rubber powder, fibers, and varied cement dosages, on the mixture's resistance to cracking. The empirical results indicate a pronounced influence of these admixtures on the properties of the cement-stabilized macadam mixture. Specifically, the addition of rubber powder and modified rubber powder resulted in a reduction in strength and compressive rebound modulus, while enhancing shrinkage resistance. Conversely, the integration of fibers enhanced the mixture's strength, modulus, and resistance to shrinkage. A higher cement dosage significantly improved the strength and compressive rebound modulus, but reduced the shrinkage

收稿日期: 2023-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878079); 江西省交通运输厅科技项目(2021C0001)

通信作者: 周志刚(1966—), 男, 教授, 主要从事道路工程方面的研究工作。E-mail: 250430381@qq.com

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

resistance. Macroscopic mechanical tests and SEM analysis further confirmed that modified rubber powder fibers exhibited robust adhesion with the cement matrix, substantially improving the mixture's crack resistance capabilities.

Key words: cement-stabilized macadam; modified rubber powder; polyvinyl alcohol fiber; macroscopic mechanical test; SEM

水泥稳定碎石基层具有强度高、抗变形能力强、承载力高等特点^[1]。我国道路中大多采用半刚性基层,但半刚性基层易产生因湿度、温度变化导致的干缩开裂、疲劳开裂等病害,从而降低道路的整体结构强度^[2-4]。这些病害的产生与水泥稳定类材料因内部初始缺陷导致的混合料整体强度降低有关^[3]。研究表明,针对水泥稳定碎石基层存在的收缩开裂、耐久性不足等缺点,加入适量的橡胶粉、PVA纤维能够有效地抑制裂缝扩展,改善基层的抗裂性能。

在单掺胶粉水泥稳定碎石材料研究方面,吕松涛等^[5]以橡胶颗粒替代细集料,制备持强增韧的胶粉水泥稳定碎石材料,结果显示,橡胶水泥稳定碎石的韧性显著高于普通水泥稳定碎石。SUN等^[6]研究了胶粉对水泥稳定碎石力学性能的影响,并通过SEM试验对其微观机理进行分析。王军龙^[7]研究了胶粉掺量对水泥稳定碎石混合料强度特性、抗疲劳性能的影响,并通过SEM图像揭示了胶粉水泥稳定碎石混合料的微观机理,发现胶粉会降低水泥稳定碎石的强度,提高疲劳性能。尹万杰^[8]研究了胶粉掺量对水泥稳定碎石力学性能及变形特性的影响,指出胶粉会降低混合料的力学性能,提高其变形协调能力。LI等^[9]通过在水泥稳定碎石中加入胶粉和缓凝剂来分析混合料的抗裂性,发现二者共同作用提高了混合料的抗裂强度。ZHANG等^[10]采用5% NaOH溶液和四氯化碳(CCl_4)溶液对胶粉进行改性,并通过SEM试验等微观分析方法研究改性后胶粉的微观形貌,得出改性后的胶粉表面积增大,黏结性能更好。在单掺纤维水泥稳定碎石材料研究方面,LIU^[11]对比分析了聚丙烯纤维与聚酯纤维对水泥稳定碎石抗收缩性能的增强作用,发现纤维的加入显著提高了水泥稳定碎石的抗收缩性能。ZHAO等^[12]研究了PVA纤维掺量和长度对水泥稳定碎石性能的影响,指出适当的掺量及长度能改善水泥稳定碎石的抗裂性能。ZHAO等^[13]研究了PVA纤

维水泥稳定碎石基层的抗裂性能和力学性能,指出纤维的加入能提高水泥稳定碎石的力学性能与抗收缩性能。YUAN等^[14]研究了PVA纤维分散程度对路面基层材料性能的影响,表明分布均匀的纤维能显著提高水泥稳定基层材料的抗裂性能。贺亚飞^[15]采用不同水泥剂量、不同PVA纤维掺量及长度分析PVA纤维水泥稳定碎石的抗裂性能,发现最佳掺量的PVA纤维能显著提高水泥稳定碎石的抗裂性能。曹源文等^[16]通过不同的拌合工艺将PVA纤维分散到水泥稳定碎石材料中,研究了PVA纤维分散的均匀性对材料性能的影响。王文彬^[17]研究了不同种类纤维对水泥稳定碎石材料力学性能的影响,发现纤维的加入显著改善了水泥稳定碎石的力学性能,提高了抗收缩性能。ZHANG等^[18]通过力学试验及SEM试验研究了聚氨酯聚合物含量对PVA纤维水泥砂浆力学性能和微观结构的影响,指出聚合物与PVA纤维结合后与水泥砂浆有较好的黏结性能。田小草等^[19]通过振动拌合技术、采用不同的水泥剂量、加入膨胀剂、加入玄武岩纤维4种措施来分析水泥稳定碎石混合料的抗裂性能,发现膨胀剂和玄武岩纤维能提高混合料的抗干缩性能,进而提高抗裂性能。这些研究表明,由于胶粉与水泥石黏结性较差,会导致水泥稳定碎石的强度降低,为此可对胶粉进行改性,提高其与水泥石的黏结性,并采用纤维进行增强。但目前关于单独掺入胶粉和纤维的水泥稳定碎石的研究较多,而关于胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石的研究很少^[20]。

基于此,本文在充分考虑胶粉抗渗、抗收缩性能、增韧作用以及纤维抗拉特性的前提下,通过力学指标试验和SEM试验,对胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石、单掺胶粉和纤维的水泥稳定碎石以及素水泥稳定碎石的抗裂性开展对比研究,研究成果对路面水泥稳定碎石基层材料设计、改善其抗裂性能具有参考价值。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

1) 水泥。

试验采用南方牌 P·O 42.5 复合硅酸盐水泥。依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020),对其常规指标进行测试,结果如表 1 所示。水泥剂量选用 3.5%、4.5%、5.5%。

表 1 水泥试验结果

Table 1 Cement test results

| 项目 | 水泥细度 / % | 标准稠度用水量 / % | 安定性 | 凝结时间 / min | | 抗折强度 / MPa | | 抗压强度 / MPa | |
|------|----------|-------------|-----|------------|-----|------------|------|------------|------|
| | | | | 初凝 | 终凝 | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| 试验结果 | 2.4 | 27.4 | 合格 | 175 | 255 | 5.6 | 7.4 | 18.1 | 43.3 |

2) 集料。

试验采用集料来源于婺源县上降石业有限公司,石料共分为 4 档,分别为:1#碎石(19~<31.5 mm)、2#碎石(9.5~<19 mm)、3#碎石(4.75~<9.5 mm)、4#石屑(0~<4.75 mm),各项指标都满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20—2015)要求。

3) PVA 纤维。

根据项目设计选用密度为 0.9 kg/m³、长度为 12 mm 的 PVA 纤维,经过人工分散后该纤维呈团状、单丝状。PVA 纤维的技术指标如表 2 所示,相关指标检测标准依据《高强高模聚乙烯醇超短纤维》(FZ/T 52023—2012)。

表 2 PVA 纤维技术指标

Table 2 Technical indexes of PVA fiber

| 线密度 / dtex | 断裂强度 / (cN·dtex ⁻¹) | 干断裂伸度 / % | 初始模量 / (cN·dtex ⁻¹) | 耐热水性能 / °C | 分散性 |
|------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|------------|-----|
| 2.12 | 18 | 7.3 | 306 | 108 | |
| 2.0±0.25 | ≥11 | 6.0~8.0 | ≥290 | ≥104 | 1~3 |

4) 胶粉。

根据项目设计选用掺量 0.5%、粒径为 60 目的胶粉代替部分细集料进行试验,材料来源于广西交科集团有限公司,其中粒径为 60 目的废橡胶粉的相

关技术指标如表 3 所示。

表 3 60 目废橡胶粉相关技术指标

Table 3 Related technical indexes of 60 mesh waste rubber powder

| 数据说明 | 灰分质量分数 / % | 炭黑质量分数 / % | 丙酮抽出物质量分数 / % | 密度 / (g·cm ⁻³) | 天然胶质量分数 / % |
|------|------------|------------|---------------|----------------------------|-------------|
| 实测指标 | 7 | 29 | 6 | 1.28 | 44.14 |
| 规范要求 | ≤8 | ≥28 | ≤22 | 1.10~1.30 | ≥25.00 |

5) 改性胶粉。

选取 2% 的硅烷偶联剂 KH-550,加入 70% 的乙醇溶液,二者按照质量比 1:40 的比例制作混合溶液,拌合后使用玻璃棒快速搅拌 10 min,静置 1 h 备用。静置完成后将胶粉倒入混合溶液中,快速搅拌 10 min,静置 1 h 后过滤。接着用自来水反复清洗,而后放入 100 °C 烘箱中烘干 6 h 至恒重,制得改性胶粉。

1.2 混合料配合比设计

胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石基层混合料级配采用《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20—2015)中推荐的级配 C-B-3,以级配中值法确定矿料级配,矿料合成级配设计如表 4 所示。

表 4 水泥稳定碎石矿料级配

Table 4 Aggregate gradation of cement-stabilized macadam

| 项目 | 通过下列筛孔(mm)矿料的质量分数 / % | | | | | | |
|------|-----------------------|------|------|------|------|------|-------|
| | 31.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| 级配上限 | 100.0 | 86.0 | 58.0 | 32.0 | 28.0 | 15.0 | 3.0 |
| 级配下限 | 100.0 | 68.0 | 38.0 | 22.0 | 16.0 | 8.0 | 0.0 |
| 级配中值 | 100.0 | 77.0 | 48.0 | 27.0 | 22.0 | 11.5 | 1.5 |
| 合成级配 | 100.0 | 72.8 | 41.0 | 25.8 | 16.1 | 8.1 | 2.9 |

1.3 最大干密度

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的相关要求,采用丙法进行击实试验,用于确定胶粉纤维复合改性水泥稳定碎

石的最大干密度和最佳含水率,其中预设含水率为4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%。为方便作图,将3.5%、4.5%、5.5%水泥剂量的胶粉纤维水泥稳定碎石混合料分别记为3.5%JX、4.5%JX、5.5%JX,4.5%水泥剂量的改性胶粉纤维水泥稳定碎石混合料、胶粉水泥稳定碎石混合料、纤维水泥稳定碎石混合料以及素水泥稳定碎石混合料分别记为4.5%改性JX、J、X、C。各类混合料的最大干密度和最佳含水率如表5所示。

表5 各类混合料的最大干密度与最佳含水率

Table 5 Maximum dry density and optimal moisture content of various mixtures

| 种类 | 最佳含水率/% | 最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) |
|-------------------|---------|---|
| 3.5%JX | 5.24 | 2.300 |
| 4.5%JX、4.5%改性JX、J | 5.39 | 2.348 |
| 5.5%JX | 5.47 | 2.340 |
| C、X | 4.81 | 2.340 |

2 试验方法

2.1 试件制备与养护

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)及设计级配与击实试验结果,采用压力机静压成型直径150 mm、长150 mm的圆柱形试件与100 mm×100 mm×400 mm的梁式试件,圆柱形试件用于抗压强度、劈裂强度及抗压回弹模量试验,梁式试件用于弯拉强度及干缩试验。试件成型后置于标准养护室(温度20℃,湿度98%)中养护至规定龄期(7、14、28、90 d),而后浸水24 h后进行试验。

2.2 试验方法

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)要求,采用压力机进行抗压强度及劈裂强度试验,试验加载速率为1 mm/min。通过MTS810材料试验机进行弯拉强度试验,采用四点弯曲方法进行试验,加载速率为50 mm/min。

采用顶面法测试抗压回弹模量,在试件顶面放置千分表来测量试件加载与卸载时的变形,运用MTS810材料试验机进行试验,试验前先进行预压,预压后再逐级施加荷载,试验加载速率控制在1~2 kN/min。

干缩试验采用100 mm×100 mm×400 mm的梁式试件,在标准养护室内养护6 d并浸水24 h后放入干缩养护箱中进行试验,试件两端粘贴玻璃片,在固定模具下放置两个玻璃棒,并在规定的龄期内进行读数(隔1~2 d记录一次试验数据),测定对应龄期的失水率,从而计算得出各龄期的干缩系数。

2.3 试验方案

1) 对7种混合料分别进行龄期7、14、28、90 d的无侧限抗压强度、劈裂强度、弯拉强度以及抗压回弹模量试验,以此综合评价混合料的力学性能。

2) 采用干缩试验评价7种水泥稳定碎石混合料的干缩变形性能,分析胶粉纤维复合水泥稳定碎石的抗干缩开裂优势。

3) 进行SEM试验,观察胶粉与改性胶粉的微观形貌、PVA纤维在水泥稳定碎石混合料内部分布形态,分析胶粉、纤维对水泥稳定碎石混合料抗裂性能的增强机理。

3 试验结果与分析

3.1 抗压强度及劈裂强度

7种水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度如图1所示。由图1可知:7种混合料的抗压强度均随龄期的增长而增长,7~14 d增长速度最快,14~28 d次之,28~90 d增长速度较慢,趋于平稳。水泥剂量越大,相同龄期条件下的抗压强度越高(胶粉水泥稳定碎石混合料除外)。在水泥剂量同为4.5%时,各类混合料在相同龄期条件下抗压强度从大到小的排序为:纤维水泥稳定碎石(X)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、素水泥稳定碎石(C)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)、胶粉水泥稳定碎石(J)。证明纤维有利于增强水泥稳定碎石的抗压强度,胶粉不利于提高其抗压强度。以28 d龄期为例,纤维水泥稳定碎石(X)的抗压强度较素水泥稳定碎石(C)的提高了6.9%,胶粉水泥稳定碎石(J)的抗压强度较素水泥稳定碎石(C)的降低了

13.4%。在所有水泥稳定碎石混合料中,在相同龄期条件下,胶粉纤维水泥稳定碎石(5.5%JX)的抗压强度最大,28 d时其与素水泥稳定碎石(C)相比提高了15.8%,胶粉水泥稳定碎石(J)的抗压强度最小。

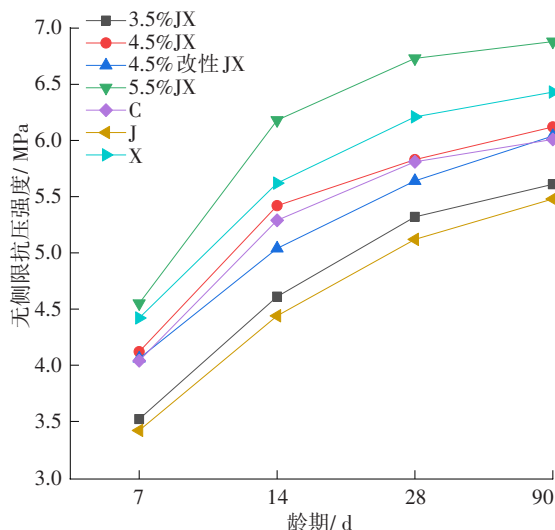


图1 无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 1 Relationship between unconfined compressive strength and age

图2为不同类型水泥稳定碎石混合料劈裂强度与龄期的关系。由图2可知:水泥稳定碎石混合料的劈裂强度均随龄期的增长而增长,7~14 d增长速度最快,其后逐渐趋于平稳。水泥剂量越大,相同龄期条件下的劈裂强度越高(胶粉水泥稳定碎石除外)。在水泥剂量同为4.5%时,各类混合料在相同龄期条件下劈裂强度从大到小的排序为:纤维水泥稳定碎石(X)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)、素水泥稳定碎石(C)、胶粉水泥稳定碎石(J)。其中,改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)和素水泥稳定碎石(C)的劈裂强度大小关系与无侧限抗压强度的结果有所不同。结果表明,纤维有利于增强水泥稳定碎石的劈裂强度,胶粉不利于提高其劈裂强度。以28 d为例,纤维水泥稳定碎石(X)的劈裂强度与素水泥稳定碎石(C)的相比提高了10.2%,胶粉水泥稳定碎石(J)的劈裂强度与素水泥稳定碎石(C)的相比降低了6.8%。在所有水泥稳定碎石混合料中,在相同龄期条件

下,胶粉纤维水泥稳定碎石(5.5%JX)的劈裂强度最大,28 d时其与素水泥稳定碎石(C)的相比提高了16.6%,胶粉水泥稳定碎石(J)的劈裂强度最小。

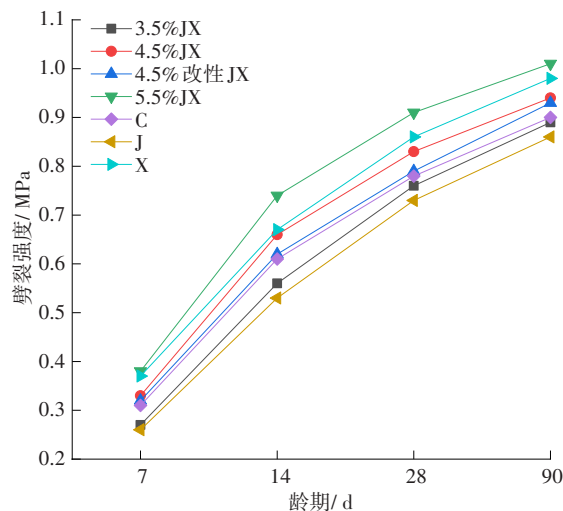


图2 劈裂强度与龄期的关系

Fig. 2 Relationship between splitting strength and age

3.2 弯拉强度

7种水泥稳定碎石混合料的弯拉强度如图3所示,由图3可知:不同类型的水泥稳定碎石混合料的弯拉强度均随龄期的增长而增长,初期增长明显,后期逐渐趋于平稳。如4.5%JX的弯拉强度由0.86 MPa(7 d)增长到1.78 MPa(14 d),增长幅度为107.0%;龄期从14 d到28 d,由1.78 MPa增长到2.07 MPa,增长幅度为16.3%;龄期从28 d到90 d,由2.07 MPa增长到2.15 MPa,增长幅度为3.9%。水泥剂量越大,相同龄期条件下的弯拉强度越高(胶粉水泥稳定碎石除外)。在水泥剂量同为4.5%时,各类混合料在相同龄期条件下的弯拉强度从大到小的排序为:纤维水泥稳定碎石(X)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)、素水泥稳定碎石(C)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、胶粉水泥稳定碎石(J)。表明纤维有利于增强水泥稳定碎石的弯拉强度,胶粉不利于提高其弯拉强度。以28 d为例,纤维水泥稳定碎石(X)的弯拉强度与素水泥稳定碎石(C)的相比提高了10.4%,胶粉水泥稳定碎石(J)的弯拉强度与素水泥稳定碎石(C)的相比降低了20.5%。在所有水泥稳定碎石混合料中,在相同龄期条件下,胶粉纤维水泥稳定碎石(5.5%JX)的弯拉强度最大(28 d时,其与素水泥稳定碎石相比提高了

12.7%),胶粉水泥稳定碎石(J)的抗压强度最小(除初期外)。

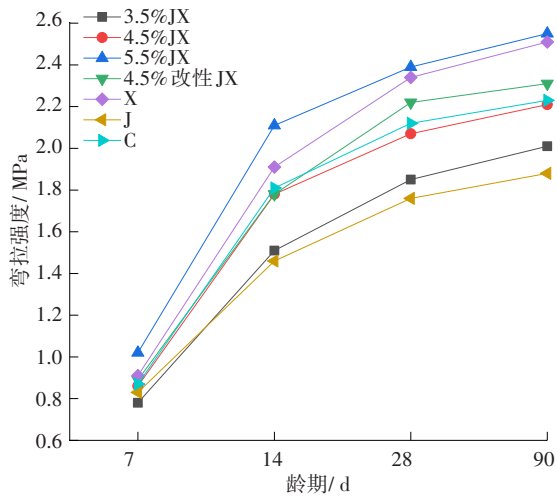


图3 弯拉强度与龄期的关系

Fig. 3 Relationship between flexural tensile strength and age

3.3 抗压回弹模量

图4为不同类型水泥稳定碎石混合料的抗压回弹模量与龄期的关系。由图4可知:水泥稳定碎石混合料的抗压回弹模量均随龄期的增长而增长,并逐渐趋于平稳。水泥剂量越大,相同龄期条件下的混合料抗压回弹模量越大(胶粉水泥稳定碎石除外)。在水泥剂量同为4.5%时,各类混合料在相同龄期条件下的抗压回弹模量从大到小的排序为:纤维水泥稳定碎石(X)、素水泥稳定碎石(C)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)、胶粉水泥稳定碎石(J)。表明

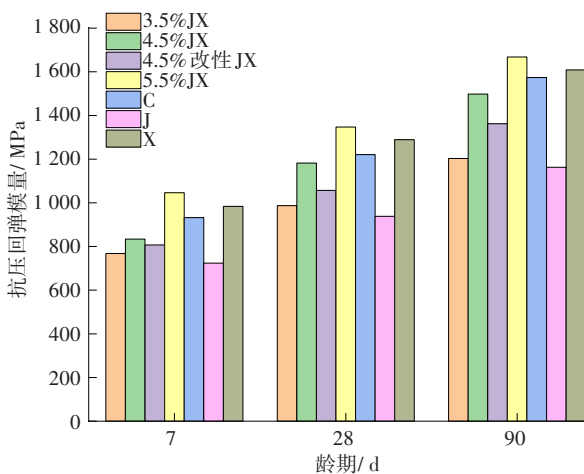


图4 抗压回弹模量与龄期的关系

Fig. 4 Relationship between the compressive rebound modulus and age

纤维有利于增强水泥稳定碎石的抗压回弹模量,胶粉不利于提高其抗压回弹模量。以28 d为例,纤维水泥稳定碎石(X)的抗压回弹模量与素水泥稳定碎石(C)的相比提高了5.6%,胶粉水泥稳定碎石(J)的与素水泥稳定碎石(C)的相比降低了30.2%。在所有水泥稳定碎石混合料中,在相同龄期条件下,胶粉纤维水泥稳定碎石(5.5%JX)的抗压回弹模量最大(28 d时,其与素水泥稳定碎石的相比提高了10.3%),胶粉水泥稳定碎石(J)的抗压回弹模量最小。

3.4 干缩系数

根据试验数据绘制出不同水泥稳定碎石混合料的平均干缩系数与龄期的关系,如图5所示。4.5%JX与C两种混合料的累积失水率与累积干缩应变的关系如图6所示。

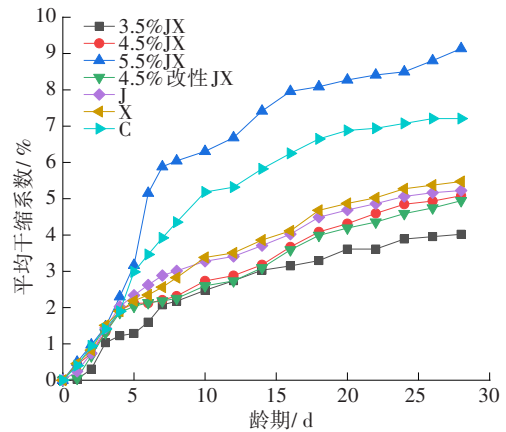


图5 平均干缩系数随龄期的变化

Fig. 5 Variation of average drying shrinkage coefficient with age

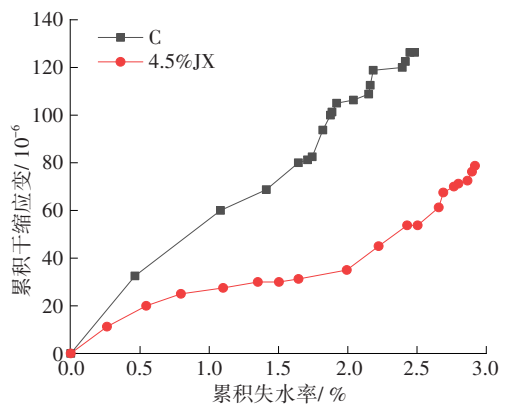


图6 累积失水率与累积干缩应变的关系

Fig. 6 Relationship between cumulative moisture loss rate and cumulative drying shrinkage strain

由图5可以看出:1) 7种水泥稳定碎石混合料

的平均干缩系数均随龄期的增长而增长,前期增长速度较快,后期增长速度相对较慢。2) 5.5%JX的平均干缩系数比4.5%JX的大,4.5%JX的平均干缩系数比3.5%JX的大,表明水泥剂量越大,混合料的平均干缩系数越大,其抗干缩性能越差。3) 在水泥剂量同为4.5%时,各类混合料在10 d前的相同龄期条件下平均干缩系数从大到小的排序为:素水泥稳定碎石(C)、纤维水泥稳定碎石(X)、胶粉水泥稳定碎石(J)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)。10 d后的相同龄期条件下平均干缩系数从大到小的排序为:素水泥稳定碎石(C)、胶粉水泥稳定碎石(J)、纤维水泥稳定碎石(X)、胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%JX)、改性胶粉纤维水泥稳定碎石(4.5%改性JX)。表明掺入胶粉、纤维有利于增强水泥稳定碎石混合料的抗干缩性能,纤维的增强效果比胶粉的强。4.5%改性JX的平均干缩系数比4.5%JX的小,这是由于胶粉改性后表面较粗糙,能与水泥水化产物较好地黏结,同时纤维起到网状固定作用,从而降低了混合料的平均干缩系数。改性胶粉有利于改善水泥稳定碎石的抗干缩性能。

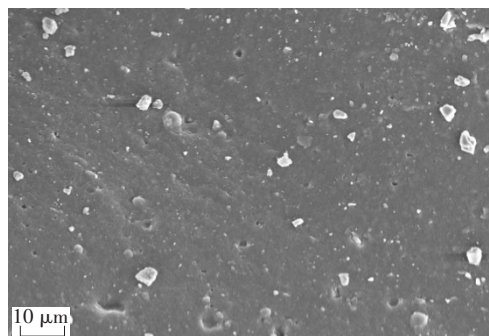
由图6可以看出,随着累积失水率的增加,4.5%JX与C的累积干缩应变不断增大,当累积失水率小于1.5%时,4.5%JX与C相比,累积干缩应变增长缓慢,当累积失水率高于1.5%时,4.5%JX与C的累积干缩应变快速增加。这是由于在收缩初始阶段,孔隙内水分的散失对整体收缩影响较小,随着相对湿度的减小,毛细水、吸附水、分子间作用和层间水作用使混合料加速收缩。失水率相同时,4.5%JX累积干缩应变明显比C的小,表明胶粉和纤维的加入有效改善了水泥稳定碎石材料的抗干缩开裂性能。水泥基材料为脆性材料,受力后易产生裂缝,PVA纤维能有效约束裂纹的产生和扩展,同时弹性材料胶粉的加入,能起到增韧抗裂的作用。因此,胶粉纤维水泥稳定碎石具有较好的抗干缩开裂性能。

4 机理分析

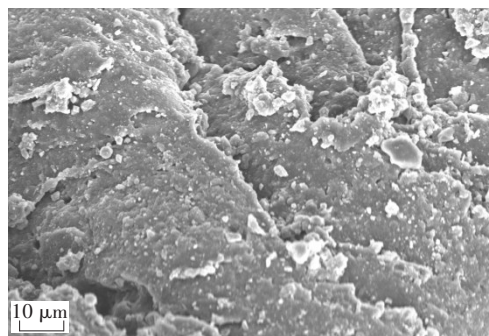
4.1 胶粉与改性胶粉SEM试验分析

胶粉改性前后均进行SEM试验。如图7(a)为胶粉改性前的SEM图像,图7(b)为胶粉改性后的

SEM图像。由图7可知,胶粉改性前后表面形貌有显著变化,表明硅烷偶联剂KH-550与胶粉颗粒之间发生了化学反应。改性前胶粉表面呈不规则的平板状,表面光滑连续,比表面积相对较小,不利于胶粉在水泥基材料中均匀分散,二者相容性较差。经过KH-550处理后的胶粉颗粒表面呈连续絮状结构、蓬松且凹凸、比表面积大,改性胶粉能够在水泥基材料中均匀分散,相容性好。胶粉改性后,颗粒表面形态层次显著,与水泥砂浆的接触面积增加,提高了二者界面结合强度,增加了混合料的韧性及抗干缩性能。由弯拉强度和干缩试验结果可知,改性后的胶粉纤维水泥稳定碎石的弯拉强度和抗干缩性能明显比未改性的胶粉纤维水泥稳定碎石的好。



(a) 改性前胶粉表面



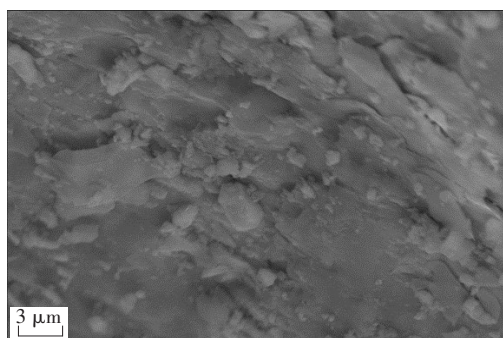
(b) 改性后胶粉表面

图7 胶粉与改性胶粉SEM图像

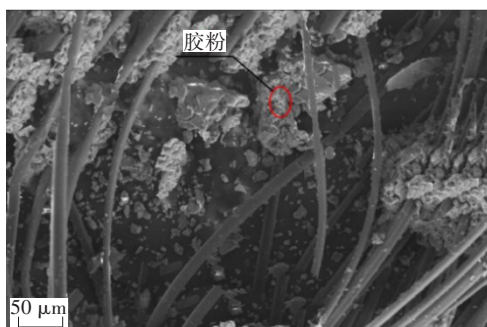
Fig. 7 SEM images of rubber powder and modified rubber powder

4.2 混合料机理分析

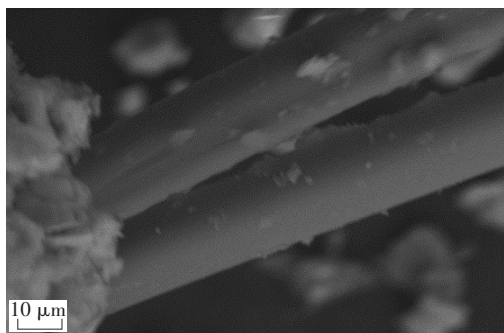
图8为普通水泥稳定碎石及添加胶粉、纤维、改性胶粉后的SEM图像。由图8可知,PVA纤维表面裹覆大量的胶凝材料,这是因为PVA纤维表面存在大量的羧基,使PVA纤维与水泥胶砂之间具有较好的黏附性,同时PVA纤维的界面增强和吸附稳定作用,使二者之间具有较好的结合力及亲和力。在荷



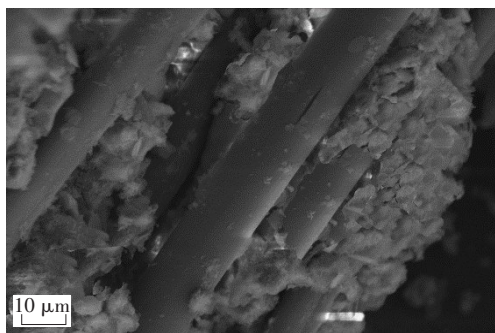
(a) 普通水泥稳定碎石状况



(b) 胶粉及纤维束分布状况



(c) PVA纤维与水泥胶凝材料黏附状况



(d) 改性胶粉与纤维分布状况

图8 SEM图像

Fig. 8 SEM images

载作用下,PVA纤维与水泥稳定材料能够协同受力,弥补水泥砂浆内部界面黏附缺陷,起到传递荷载的作用。图8(c)和图8(d)中PVA纤维一部分被裹覆在水泥砂浆内部,一部分裸露。当存在外力作

用时,多根纤维将共同受力,抵抗外力对水泥稳定碎石的作用。均匀分散的PVA纤维在水泥稳定碎石内部具有桥联作用,在混合料内部形成空间网状结构,与加筋作用异曲同工,使网孔内的水泥砂浆材料被“箍锁”,并隔离损坏区域。PVA纤维能有效地控制裂纹继续扩大,避免其向不利方向发展,这在一定程度上减小了应力集中,延缓裂纹发展。

根据本文试验结果,结合相关文献,在水泥稳定碎石中掺入胶粉和纤维,其作用机理为:

1) 对于普通水泥稳定碎石材料,水泥胶浆与水泥石之间存在微小裂纹,这是界面过渡区由 AF_1 和片状CH层叠构成骨架,C-S-H凝胶分散在其中导致的。水泥石中的C-S-H凝胶多, AF_1 与CH在水泥石中含量少,C-S-H是水泥石强度形成的关键因素。界面过渡区孔隙率大,是水泥砂浆内部的薄弱区域。

2) 对于掺入胶粉纤维的水泥稳定碎石材料,胶粉与水泥石界面处存在显著裂缝,可能是由于界面处水泥胶砂少,并存在CH晶体和 AF_1 针状晶体,导致此处孔隙多。与图8(a)相比,图8(b)中水泥基较为蓬松,空隙率大,可能会导致胶粉与水泥石之间密实度及黏附性差,这是胶粉水泥稳定碎石材料的力学性能降低的重要因素,而PVA纤维的桥联作用弥补了这一缺陷。

3) 对于改性胶粉纤维水泥稳定碎石材料,由图7(b)与图8(d)可以看出,改性胶粉自身表面粗糙,与水泥石结合后形成块状整体,其与胶粉纤维水泥稳定碎石相比更具整体性,且改性后的胶粉与水泥基界面结合强度更高,不易出现裂缝。改性胶粉周围水泥水化产物主要由针棒状 AF_1 晶体构成,片状CH晶体含量较少。改性后的胶粉表面存在水泥水化胶结物,表明其与水泥砂浆界面结合好。硅烷偶联剂KH-550中存在乙氧基与氨丙基,前者水解形成硅醇能,与水泥胶浆表面羧基形成Si—O键,后者为有机官能团,能与胶粉表面形成化学键。此时KH-550一端连接水泥石界面,一端连接胶粉,使化学键能远大于分子间作用力,因此水泥石与改性胶粉能够较好地黏结在一起,从而提高胶粉纤维水泥稳定碎石材料的抗裂性能。

5 结论

1) 根据力学试验可知,水泥剂量越高,不同种

类水泥稳定碎石混合料的强度、抗压回弹模量越大。PVA纤维能提高水泥稳定碎石的强度与抗压回弹模量,而胶粉对水泥稳定碎石的强度与抗压回弹模量具有负面作用,胶粉纤维水泥稳定碎石的强度和模量与素水泥稳定碎石的相差不大,加入纤维弥补了胶粉给素水泥稳定碎石抗破坏能力和抗变形能力带来的不足。

2) 胶粉和纤维有助于提高水泥稳定碎石的抗干缩性能,胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石的抗干缩性能比其他种类混合料的好,同时胶粉和纤维能保证强度与抗压回弹模量。

3) SEM结果显示,改性胶粉纤维与水泥基材料之间具有较好的黏结性能,能够提升混合料的抗裂性能。

参考文献(References):

- [1] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008(1): 1-5. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.01.001.
SHA Aimin. Material characteristics of semi-rigid base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008(1): 1-5. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.01.001.
- [2] 兰伟伟. 高速公路半刚性基层沥青路面的耐久性影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(9): 131-133.
LAN Weiwei. Analysis on durability of semi-rigid base asphalt pavement on highways [J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(9): 131-133.
- [3] 赵晓康, 董侨, 陈雪琴, 等. 考虑初始缺陷的水泥基复合材料细观开裂研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 230-239. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.017.
ZHAO Xiaokang, DONG Qiao, CHEN Xueqin, et al. Mesoscale cracking of cement-treated composites with initial defects [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 230-239. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.017.
- [4] 李燕军. 添加PVA纤维的水泥稳定碎石混合料抗裂与耐久性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 180-188, 219. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.030.
LI Yanjun. Study on crack resistance and durability of cement stabilized macadam mixture with PVA fiber [J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 180-188, 219. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.030.
- [5] 吕松涛, 王双双, 王盘盘, 等. 橡胶-水泥稳定碎石持强增韧特性研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 139-147. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.012.
LYU Songtao, WANG Shuangshuang, WANG Panpan, et al. Strength and toughness of rubber-cement stabilized macadam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 139-147. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.012.
- [6] SUN X Y, WU S Y, YANG J, et al. Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam [J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119708.
- [7] 王军龙. 掺橡胶粉的水泥稳定碎石混合料技术性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(2): 46-51.
WANG Junlong. Research on technical characteristics of cement-stabilized macadam mixture mixed with rubber powder [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(2): 46-51.
- [8] 尹万杰. 橡胶粉对水泥稳定级配碎石力学性能与变形特性的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(6): 1163-1168.
YIN Wanjie. Effect of rubber powder on mechanical properties and deformation characteristics of cement stabilized gradation crushed stone [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2021, 45(6): 1163-1168.
- [9] LI Z X, GUO T T, CHEN Y Z, et al. Study on performance of retarded composite semi-rigid base mixed with rubber powder[J]. Materials, 2022, 15(13): 4683.
- [10] ZHANG R, WANG H X, JI J, et al. Influences of different modification methods on surface activation of waste tire rubber powder applied in cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125191.
- [11] LIU Z J. Experimental research on the engineering characteristics of polyester fiber-reinforced cement-stabilized macadam [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 04015004. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001251.
- [12] ZHAO C H, LIANG N X, ZHU X L, et al. Fiber-reinforced cement-stabilized macadam with various polyvinyl alcohol fiber contents and lengths [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(11): 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.030.

- 04020312.
- [13] ZHAO Y, YANG X, ZHANG Q Y, et al. Crack resistance and mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cement-stabilized macadam base [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, (1): 1-15.
- [14] YUAN L Q, LIANG N X, ZHAO C H. Analysis on influence of the dispersion degree of PVA fibers on pavement performance of cement-stabilized macadam [J]. Advances in Civil Engineering, 2019(4): 1-11.
- [15] 贺亚飞. 掺聚乙烯醇(PVA)纤维水泥稳定碎石的力学及抗裂性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
- HE Yafei. Study on mechanical properties and cracking resistance of the cement-stabilized macadam mixed with polyvinyl alcohol (PVA) fiber [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [16] 曹源文, 赵毅, 王棋, 等. PVA纤维水泥稳定碎石拌和均匀性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 29-33.
- CAO Yuanwen, ZHAO Yi, WANG Qi, et al. Mixing uniformity of cement stabilized macadam with PVA fiber [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2018, 37(5): 29-33.
- [17] 王文彬. 不同纤维增强水泥稳定碎石混合料路用性能与耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(3): 57-62.
- WANG Wenbin. Study on pavement performance and durability of different fiber reinforced cement stabilized crushed stone mixture [J]. New Building Materials, 2021, 48(3): 57-62.
- [18] ZHANG X J, FANG H Y, DU M R, et al. Experimental study on the mechanical properties of the fiber cement mortar containing polyurethane [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021: 9956897.
- [19] 田小草, 于水, 李光耀, 等. 不同措施对水泥稳定碎石混合料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7): 2235-2243. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.07.030.
- TIAN Xiaoge, YU Shui, LI Guangyao, et al. Effects of different measures on performance of cement stabilized macadam mixture [J]. Bulletin of the Chinese Ceramics, 2022, 41(7): 2235-2243. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.07.030.
- [20] HUANG Z Y, DU S L, WANG F, et al. Dynamic compressive behavior of a novel ultra-lightweight cement composite incorporated with rubber powder [J]. Composite Structures, 2020, 244(1): 112300.
- (责任编辑: 薛仪; 英文编辑: 王佳)