

外掺物掺量对全再生水稳碎石性能影响研究

王银行¹, 郑亮², 黄前龙^{3,4}, 路凯冀^{3,4}, 权磊³

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 温州交发大桥有限公司, 温州 325088;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 为改善全再生水泥稳定碎石路用性能, 提高再生集料在水泥稳定碎石基层中的利用率, 以粉煤灰和玄武岩纤维作为外掺物, 通过力学和抗裂性能试验分析了外掺物对全再生水泥稳定碎石的性能影响, 并结合微观试验分析了掺粉煤灰对全再生水泥稳定碎石的影响机理。结果表明: 掺入粉煤灰和玄武岩纤维均能在不同程度上提升其力学性能和抗裂性能, 由微观试验可知, 粉煤灰在发生火山灰反应时生成钙矾石等水化物, 填补试件内部孔隙, 试件密实度增强, 增强其路用性能, 为废旧混凝土再生集料的高值化利用提供技术依据。

关键词: 全再生; 水稳基层; 玄武岩纤维; 粉煤灰; 路用性能; 微观机理

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0056-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.010

Research on the Effect of Admixture Content on the Performance of Fully Recycled Cement-Stabilized Macadam

WANG Yinhang¹, ZHENG Liang², HUANG Qianlong^{3,4}, LU Kaiji^{3,4}, QUAN Lei³

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

2. Wenzhou Communications Develop Bridge Co., Ltd., Wenzhou 325088, China;

3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

4. Zhong Lu Gao Ke (Beijing) Road Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To improve the pavement performance of fully recycled cement stabilized macadam and enhance the utilization rate of recycled aggregate in cement stabilized macadam base layers, fly ash and basalt fiber were used as additives. The effects of these additives on the performance of fully recycled cement stabilized macadam were analyzed through mechanical and crack resistance tests, and the mechanism of fly ash on fully recycled cement stabilized macadam was investigated using microscopic tests. The results showed that the addition of fly ash and basalt fiber improved the mechanical properties and crack resistance of the material to varying degrees. Microscopic analysis revealed that the pozzolanic reaction of fly ash generated hydration products such as calcium silicate hydrate (C-S-H), which filled the internal pores of the specimens, increased compactness of the specimens, and enhanced the pavement performance of the specimens. This study provides technical support for the high-value utilization of

项目来源: 自然科学基金资助项目 (52178427)。

作者简介: 王银行 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 路面结构与材料。

通信作者: 路凯冀 (1975—), 男, 硕士研究生, 研究员, 研究方向: 路面结构与材料。

收稿日期: 2025-01-14

recycled aggregates from waste concrete.

Key words: fully recycled; cement stabilized macadam; basalt fiber; fly ash; pavement performance; microscopic mechanism

0 引言

为提升我国路网密度、对已有快速公路进行改扩建将成为交通行业中一个重要的发展趋势^[1]。公路、桥梁的拆除势必产生大量的垃圾,这些垃圾的存在不仅占用土地资源、造成土地资源浪费,还有可能会污染环境,增加工程建设成本^[2]。另一方面,在进行工程建设时需要大量消耗天然砂石资源,未来天然砂石紧缺将是制约工程建设的一大难题。提高废旧混凝土的利用率成为当下热门研究方向之一。

废旧混凝土经拆除破碎后产出不同粒径大小的再生集料,但其与天然骨料存在性质差异,主要物理性质表现在吸水率高、压碎值低、密度低等方面^[3]。遍历国内外研究现状,为提高再生集料利用率,部分学者从改善再生集料性质入手。大部分专家认为,再生集料表面所附着的砂浆层是造成其性质变化和差异性较大的主要原因之一^[4],故相关学者对再生集料的性质改善主要分为两方面,一是削弱砂浆层,具体方法包括:机械研磨、加热研磨、酸碱溶液浸泡等。刘安安^[5]通过对再生粗骨料进行高温-机械研磨发现:高温-机械研磨强化可以提高再生粗骨料沥青混合料的低温抗裂性、水稳定性及力学性能;张尔明^[6]通过在再生集料水泥稳定碎石中掺入不同碱激发剂发现:掺入碱激发剂后有效改善再生集料的各项物理力学指标。二是增强砂浆层,主要有微生物矿化、碳化处理、有机溶液浸泡强化等;俞珂琼^[7]通过在再生粗骨料中加入杆状巴氏芽孢杆菌,经微生物矿化后发现:微生物改性方法可以改善改性砂浆骨料和烧结黏土砖骨料的吸水率;陈炳阳等^[8]通过在再生混凝土集料中加入水性 EVA 与纳米二氧化硅($n\text{SiO}_2$)对再生混凝土集料进行复合改性发现:改性优化后的再生混凝土集料等体积代替 4.75~9.5 mm 玄武岩集料后制成沥青混合料的工作性能接近天然集料混合料。上述方法虽能提高再生集料的相关性能,但伴随而来的能源消耗、环境污染、经济成本高等问题使得相关研究大多停留在纸面上,难以在实际工程中大面积推广实施。粉

煤灰具有良好的火山灰活性且颗粒较小,将粉煤灰作为外掺物,不仅能改善结构孔隙特征,还能够达到以废治废的目的。马建平^[9]将粉煤灰以等体积原则替代天然河砂,通过室内试验发现替代率为 50% 时,混凝土的抗压强度、抗折强度提高最显著;牛茂威等^[10]研究了不同比表面积粉煤灰的工作性能发现,掺入适当比表面积的粉煤灰能在一定程度上降低混凝土的孔隙率,提高基体密实度,改善混凝土的长期力学及耐久性能;任亚伟等^[11]将粉煤灰作为外掺物在道路基层中使用,通过路用性能研究发现以粉煤灰、煤矸石、电石渣制备的混合料满足道路基层所要求的性能指标;Yang 等^[12]以粉煤灰、碱活化锂渣作为外掺物制备混合料进行工作性能研究,研究表明,混合料力学性能和抗裂性能得到不同程度的提高;谭威等^[13]在水泥土中加入玄武岩纤维进行力学性能和水稳定性试验,试验表明加入玄武岩纤维后 7、28 d 抗压强度分别提升 50.6%、49.6%,28 d 干湿残留强度比显著降低;程仁德等^[14]在不同评价指标下对比分析不同沥青混合料的抗裂性能,试验表明玄武岩纤维沥青混合料在不同评价指标下均表现出最优的抗裂性能;涂义亮等^[15]通过在水泥土中加入玄武岩纤维和粉煤灰以探究两者不同掺量对水泥土力学特性的影响,试验结果表明,二者加入能够显著提升水泥土抗剪性能。

综上,多数研究仅集中在改善再生集料性质或仅利用较大粒径的再生集料^[16],在水稳基层集料中全要素使用再生集料的研究却鲜有人为。为提高再生集料的利用率,在水稳基层中全部采用再生集料作为结构集料,通过加入粉煤灰、玄武岩纤维等外掺物改善全再生水泥稳定基层性能并结合微观试验探究粉煤灰对全再生水泥稳定碎石性能影响机理,以期废旧混凝土再生集料在实际工程中的应用提供参考依据。

1 原材料

原材料包括再生集料、水泥、粉煤灰、玄武岩纤维。再生集料为桥梁主体结构废旧混凝土经破碎

材料科学

后产生,废旧混凝土母体岩性为石灰岩,具体规格及基本物理性质见表1;采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,各项技术指标均在GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》的质量标准要求之内;采用试验室二级粉煤灰,细度为22.0%、密度为2.1 g/cm³、烧矢量为2.62% (灼烧差减法)、含水量为0.4%,其具体化学成分构成见表2;采用20 mm长玄武岩纤维,断裂强度为2 500 MPa、断裂伸长率为3%、弹性模量为87 GPa、含水量为0.12%、耐碱性为74%。水为饮用自来水。按JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中规定的C-B-3骨架密实型级配进行合成级配设计,级配曲线如图1所示。

表1 再生集料的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of recycled aggregates

颗粒直径 /mm	压碎值 /%	针片状含量 /%	表观密度 / (g/cm ³)	表干密度 / (g/cm ³)	吸水率 /%
(19, 26.5]	19.2	5.6	2.68	2.49	4.64
(9.5, 19]	19.2	7.6	2.69	2.49	5.13
(4.75, 9.5]	19.2	6.9	2.70	2.46	6.02
(0, 4.75]	19.2		2.74	2.33	11.09

表2 粉煤灰主要化学成分组成
Table 2 Main Chemical composition of fly ash /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	MgO
45.10	36.80	4.50	2.63	1.69	1.20	0.32

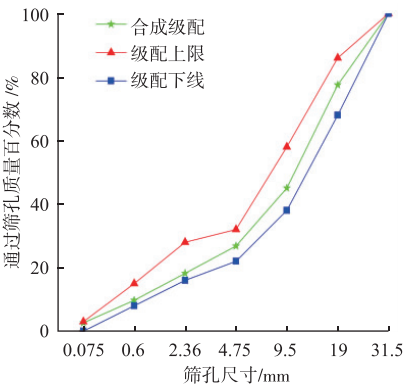


图1 级配设计曲线
Fig. 1 Gradation design curve

2 试验方案及方法

选用水泥掺量为3.5% (外掺法),不掺加和分别加入不同掺量的玄武岩纤维和粉煤灰后对全再生水稳碎石的路用性能进行试验研究,掺加的具体掺

量见表3。按照JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》对不同掺配方案进行击实试验确定最大干密度和最佳含水率。成型后的试件按JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中标准养生方法养生。圆柱形试件养生龄期为7、28、90 d,中梁养生龄期为7 d。对达到养生龄期后的试件进行试验性能测定,力学性能包括无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量,抗裂性能试验为干燥收缩试验,试件压实度均为98%,无侧限抗压强度试件、劈裂强度试件和抗压回弹模量试件采用150 mm×150 mm圆柱形试件,干燥收缩试验试件采用100 mm×100 mm×400 mm中梁试件。

表3 各试验组别外掺物掺量
Table 3 Amount of admixture added in each test group

外掺物种类	掺量		
玄武岩纤维	0.6‰	0.9‰	1.2‰
粉煤灰	5%	10%	15%

为探究粉煤灰对全再生水稳碎石性能变化规律的微观影响机理,对不掺加粉煤灰和粉煤灰掺量10%的混合料试件进行扫描电子显微镜和X射线衍射试验。试验试件采用7 d龄期圆柱形试件,破碎后取代表芯样,浸泡无水乙醇24 h,取出后放入恒温烘干箱以45℃恒温烘干终止水化后继续试验。

3 试验结果及分析

3.1 击实试验

对掺入不同掺量粉煤灰、玄武岩纤维的全再生水泥稳定碎石进行击实试验,因玄武岩纤维掺量较少且吸水率较低,对击实结果几乎无影响。

由图2可知,最大干密度和最佳含水率在全再生水泥稳定碎石中随粉煤灰掺量增加都呈先增加后减少的趋势。在较小掺量范围内,因粉煤灰颗粒较细,填充试件内部孔隙,结构整体趋于密实,最大干密度随之上升,粉煤灰比表面积较大,在毛细作用和表面张力作用影响下,粉煤灰含水量增加,表现为吸水率随粉煤灰掺量增加而上升,当粉煤灰掺量达到10%时,粉煤灰填充效应弱化,再生集料被过量粉煤灰代替,试件整体湿密度下降,含水量下降,最大干密度也随之下降。

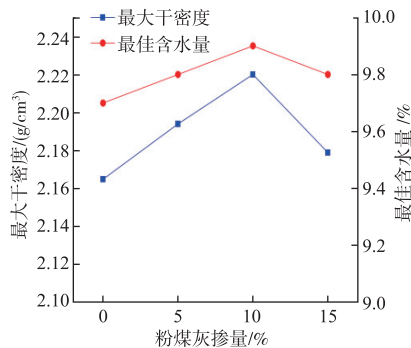


图2 不同粉煤灰掺量试件最大干密度和最佳含水量

Fig. 2 The maximum dry density and optimum moisture content of specimens with different fly ash contents

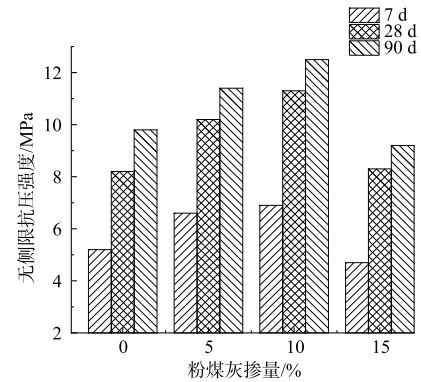
3.2 力学性能试验

3.2.1 无侧限抗压强度

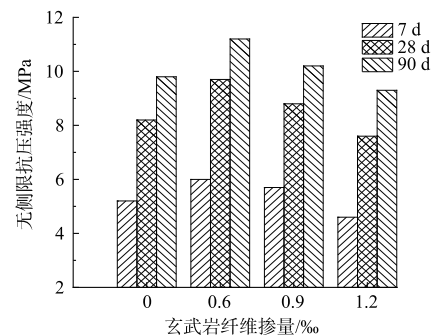
由图3(a)可知,全再生水稳碎石无侧限抗压强度随粉煤灰掺量呈先上升后下降趋势,其强度主要由颗粒间嵌挤作用和各颗粒分子间范德华力所提供。粉煤灰掺量较少时,具有微集料填充作用,能够增大试件密实度和试件各部分之间接触面积,试件整体受范德华力影响表现为强度上升;随着粉煤灰掺量达到峰值,过量粉煤灰在试件内部不能充分发生化学反应,造成强度下降。由图3(b)可知,无侧限抗压强度随纤维掺量增加表现为先增加后减少。这是因为适量纤维掺入能够在试件结构内部形成三维立体网状结构,起到结构加筋作用。在试件受压破坏时桥接结构各部分,纤维受拉提供补偿作用。过量玄武岩纤维掺入导致试件中玄武岩纤维受静电吸附作用黏聚成团,形成试件结构薄弱处,表现为试件强度下降。掺10%粉煤灰试验组较未掺试验组7、28、90 d无侧限抗压强度分别提升33%、38%、28%。掺0.6‰玄武岩纤维试验组较未掺试验组7、28、90 d无侧限抗压强度分别提升15%、18%、14%。由此可见,粉煤灰对全再生水稳碎石无侧限强度改善能力优于玄武岩纤维。

3.2.2 劈裂强度

由图4可知,劈裂强度随粉煤灰、玄武岩纤维掺量增加表现为先增大后减少。在7 d时,当粉煤灰掺量为10%时,其劈裂强度最高,相比于未掺组强度提高29%,而15%粉煤灰掺量组相较于未掺组强度下降19%。而在28、90 d,粉煤灰10%掺量组相



(a) 粉煤灰



(b) 玄武岩纤维

图3 无侧限抗压强度随外加物掺量变化曲线

Fig. 3 The Variation curve of unconfined compressive strength with the content of additives

于未掺组劈裂强度分别提升48%、44%,15%粉煤灰掺量组相较于未掺组下降6%、8%。由此可见,加入适量粉煤灰能提高试件整体密实度、降低试件孔隙率,提高试件各部分之间黏结力。但粉煤灰掺量过高时则会对劈裂强度产生不利影响。当玄武岩纤维掺量为0.9‰时,各龄期劈裂强度均为最高,相较于未掺组7、28、90 d劈裂强度分别提高23%、22%、24%。而在玄武岩纤维掺量为1.2‰时强度下降。这是因为玄武岩纤维在试件中形成三维网状结构,起到桥接作用,随着水泥水化,大量水化产物附着在玄武岩纤维表面,使玄武岩纤维自身锚固在试件结构中,试件机械咬合力增强,试件变形抵抗力也随之增强。较少掺量玄武岩纤维无法形成三维网状结构,玄武岩纤维过量则黏聚成团,形成应力集中现象,影响整体结构的受力均匀性,造成劈裂强度下降。综上,粉煤灰对劈裂强度性能改善能力优于玄武岩纤维。

材料科学

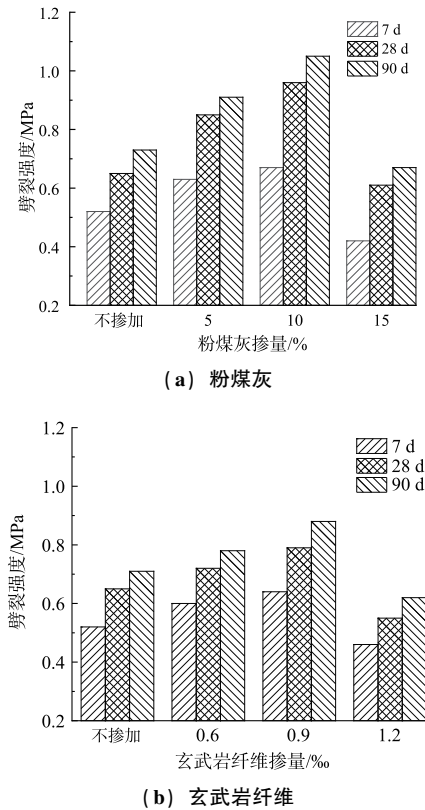


图4 劈裂强度随外加物掺量变化曲线

Fig. 4 The Variation curve of splitting tensile strength with the content of additives

3.2.3 抗压回弹模量

由图5可知,抗压回弹模量在不同龄期,整体趋势上为先增加后减少,在10%掺量粉煤灰达到峰值。这是因为少量粉煤灰在试件内部起到填充作用,改变集料间浆体孔隙结构,增大试件密实度,表现为试件抗压回弹模量上升,过量粉煤灰则会弱化水泥-粉煤灰浆体强度,造成抗压回弹模量下降。未掺粉煤灰试验组在7d时抗压回弹模量为921.21 MPa,28d时抗压回弹模量相比于7d提升了34.2%,达到90d时抗压回弹模量的86.3%,表明在28d时大部分粉煤灰已水化完成。掺入玄武岩纤维抗压回弹模量呈逐渐下降趋势,玄武岩纤维在试件内部交错纵横形成三维网状结构,能起到结构加筋作用,玄武岩纤维两端锚固在水泥浆体中,在试件受力时,玄武岩纤维承受部分拉力,试件整体韧性增强,抗压回弹模量降低。对比图5(a)和5(b)可以发现,粉煤灰组与玄武岩纤维组类似,28d时试件已完成大部分水化反应。综上,掺入粉煤灰和玄武岩纤维

对全再生水稳碎石抗压回弹模量具有相反作用,粉煤灰增强试件抗压回弹能力,使试件整体呈现出刚体受力特性,而玄武岩纤维试验组抗压回弹模量下降,韧性提升,试件整体向柔性结构转变。

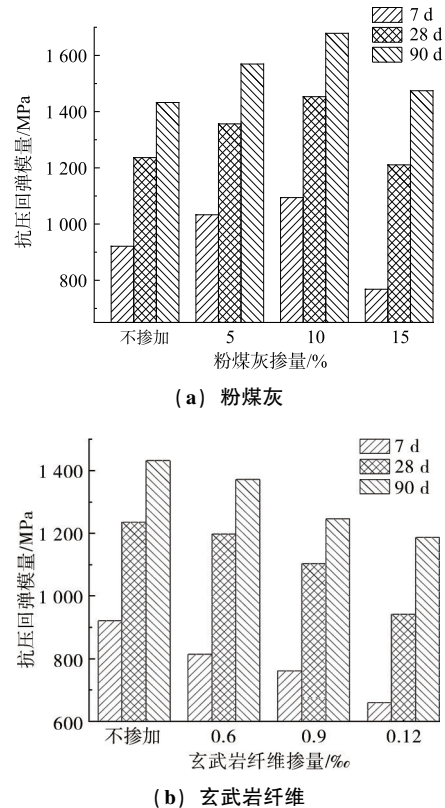


图5 抗压回弹模量随外加物掺量变化曲线

Fig. 5 The Variation curve of compressive resilient modulus with the content of additives

3.3 抗裂性能试验

由图6可知,外加物最佳掺量组较未掺组:掺粉煤灰组干缩系数下降约为19%,掺玄武岩纤维组干缩系数下降约为16%。粉煤灰组其失水率、干缩应变和干缩系数随粉煤灰掺量上升依次下降,这是因为,掺入粉煤灰后,粉煤灰颗粒在试件内部均匀分布且粉煤灰可作为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的成核点,大量结晶体附着在粉煤灰颗粒表面生长。当水泥水化反应进行时,粉煤灰中的 SiO_2 在碱性环境中与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成C-S-H凝胶,造成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 整体含量减少,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体排列方向受到制约,取向指数下降,试件结构趋于密实,试件内部水分子迁移受阻,试件失水率下降。干缩应变主要受毛细管张力作用、层间水作用等影响。粉煤灰填充作用,

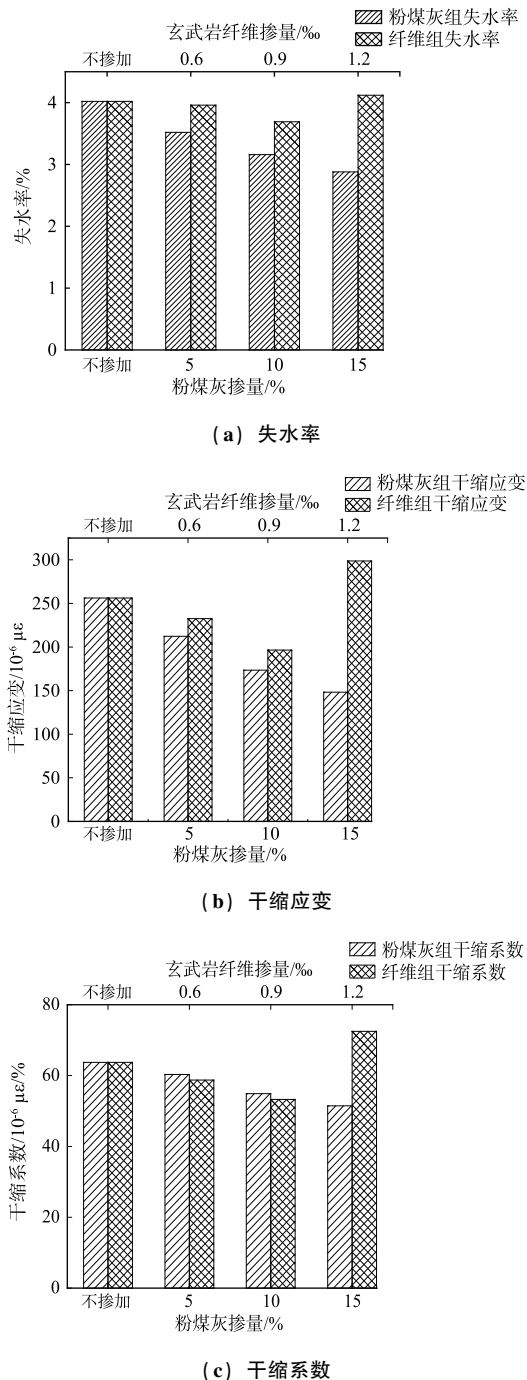


图 6 抗裂性能指标随外掺物掺量变化柱状图

Fig. 6 Bar chart of crack resistance performance index with varying amounts of external admixture

使再生集料与胶结材料之间接触面积增大, 试件各部分之间黏结力增大, 干缩应变降低。玄武岩纤维组失水率、干缩系数与干缩应变总体呈先下降后增加趋势。分析其原因, 适量玄武岩纤维在试件成型过程中形成网状结构, 起到加筋作用, 在试件体积

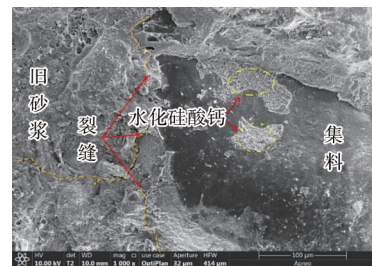
变化时提供拉结力; 玄武岩纤维直径细小, 在试件内部起到微弱的填充作用, 能够阻碍水分子迁移通道、改变水分子逃逸路径降低试件失水速度。过量玄武岩纤维则产生玄武岩纤维团聚、成束现象, 试件失水速度提升。此外, 玄武岩纤维成团后黏结力较弱, 对抵抗试件收缩变形具有不利影响。

4 微观机理分析

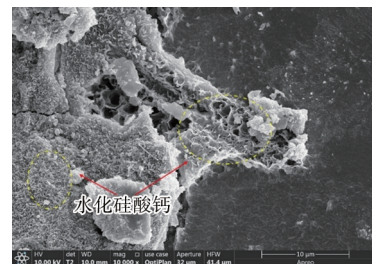
为进一步探究掺入粉煤灰对全再生水稳碎石基层的影响机理, 选取 7 d 养护龄期、以未掺粉煤灰和掺入 10% 粉煤灰的全再生水稳碎石试件进行微观结构观察分析。

4.1 扫描电子显微镜 (SEM)

由图 7 (a) 可知, 未掺粉煤灰组试样在界面过渡区及旧砂浆表面皆有裂缝出现, 集料表面附着有蜂窝状水化硅酸钙。放大至 10 000 倍, 砂浆与集料之间裂隙具有水化硅酸钙生成, 但结构疏松、孔洞较多。粉煤灰掺量为 10%、观察倍数为 500 倍时, 在试验试样表面发现仍存在未完全水化的粉煤灰颗粒, 旧砂浆内部孔洞有团簇状水化产物生成。将观察倍数设置为 10 000 倍时发现, 旧砂浆表面孔洞被大量交错生长的钙钒石 (AFt) 和水化硅酸钙



(a) 1 000X



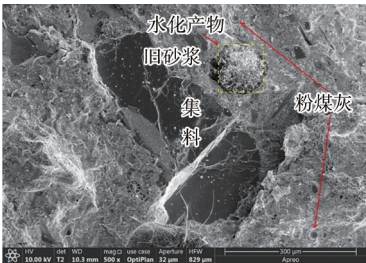
(b) 10 000X

图 7 未掺粉煤灰组不同放大倍数微观结构图

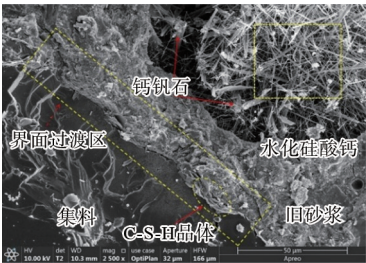
Fig. 7 Micro-structure of specimens without fly ash at different magnifications

材料科学

(C-S-H) 所填充, 钙钒石呈针状杂乱分布, 根植于砂浆内部, 针状水化硅酸钙大多附着于体积较大的钙钒石生长, 二者相互交叉生长, 整体形状近似球型。观察集料与旧砂浆之间界面过渡区, 旧砂浆与集料之间裂缝被箔片状水化硅酸钙填充, 两者之间产生可靠连接, 试件强度得到提升。



(a) 500X



(b) 2 500X

图 8 掺 10% 粉煤灰组不同放大倍数微观结构图
Fig. 8 Microstructure of specimens with 10% fly ash at different magnifications

4.2 X 射线衍射 (XRD)

图 9 为掺入 10% 和未掺入粉煤灰试验组 XRD 图谱, 通过对比、分析可知, 相较于未掺粉煤灰组, 掺入粉煤灰组有较为明显钙钒石 (AFt) 衍射峰出现, 这说明在全再生水稳碎石中加入粉煤灰有利于钙钒石形成, 再生集料表面裂隙与水稳碎石自身结构所形成的孔隙为钙钒石 (AFt) 生长提供了空间, 这与 SEM 试验观察到的现象保持一致。在未掺粉煤灰组 SiO_2 衍射峰强度远高于掺入粉煤灰组, 这可能是因为 SiO_2 与粉煤灰中存在的活性氧化铝与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等反应产物时被消耗有关, 掺粉煤灰组图谱中钙钒石、钙长石衍射峰强度高也与此有关。XRD 的试验结果说明, 粉煤灰发生火山灰反应能够消耗部分 SiO_2 , 在结构孔隙内与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成更多的水化产物, 使结构整体更加致密, 提升结构整体强度。

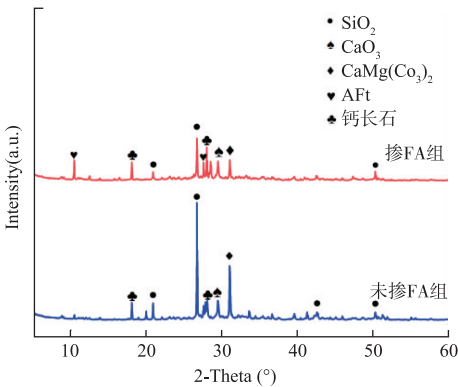


图 9 XRD 试验结果
Fig. 9 X-ray diffraction (XRD) test results

5 结论

基于全再生水泥稳定碎石体系, 结合粉煤灰与玄武岩纤维的外掺改性方法, 对结构的力学性能、抗裂性能及微观结构特征进行了分析, 得出以下结论:

- (1) 粉煤灰与玄武岩纤维的掺入均能改善全再生水稳碎石的工作性能, 粉煤灰掺量为 10%、玄武岩纤维掺量为 0.9‰ 时工作性能表现相对较好, 说明外掺物存在合理掺量区间, 适量掺入可对全再生水稳碎石结构状态产生积极影响。
 - (2) 不同外掺物对全再生水稳碎石的力学性能的作用机制存在差异。粉煤灰主要通过改善内部结构, 提高强度, 其无侧限抗压强度提升幅度约为 28%~38%; 玄武岩纤维则以结构加筋为主, 对结构整体受力连续性具有一定改善作用。
 - (3) 两类外掺物均可对全再生水稳碎石干缩变形产生一定抑制作用, 粉煤灰对其干缩系数的降低幅度约为 19%, 玄武岩纤维约为 16%; 但当纤维掺量偏高时, 易出现分散不均现象, 从而影响其抑制效果。
 - (4) 由微观分析可得, 粉煤灰参与火山灰反应生成水化硅酸钙及钙钒石等产物, 可填充全再生水稳碎石内部孔隙并改善界面过渡区结构, 使原有裂隙得到有效修复, 结构连续性与致密性显著提升, 从微观层面解释了宏观性能的改善机制。
- 基于研究结果, 从工程适用性的角度看, 通过合理掺入填充型或加筋型外掺材料均可改善全再生

水稳碎石的工作性能，为全再生集料在水稳碎石基层中的应用提供了可行路径。

参 考 文 献

- [1] 王健, 杜律律, 王胜辉, 等. 高速公路改扩建方式和交通组织发展研究总结 [J]. 城市道桥与防洪, 2024 (10): 11-16, 36, 361-362.
- [2] 魏晓倩, 姜建芳, 冯肖嘉文, 等. 城市建筑垃圾填埋区地下水水质对比和溯源 [J]. 中国环境科学, 2024, 44 (7): 3843-3857.
- [3] 单社, 郭海贞, 魏定邦, 等. 水泥稳定再生骨料混合料力学性能和抗冻性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (2): 774-780.
- [4] 刘邦胜, 刘家庆, 陈俊霖, 等. 聚合物乳液对混凝土再生集料性能影响研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2025, 49 (2): 403-408.
- [5] 刘安安. 基于再生粗骨料强化的沥青混合料性能试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [6] 张尔明. 掺碱激发再生集料的水泥稳定碎石力学性能分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47 (6): 34-37.
- [7] 俞珂琼. 基于微生物矿化技术的再生粗骨料改性方法研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (8): 94-99+116.
- [8] 陈炳阳, 吕大春, 李超, 等. 基于曲面响应法的 EVA/nSiO₂ 复合改性 RCA 性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2025, 47 (12): 56-62, 87.
- [9] 马建平. 粉煤灰渣细骨料混凝土强度及耐久性试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (1): 1-6.
- [10] 牛茂威, 白延平, 杨翔, 等. 磨细粉煤灰对混凝土长期性能的影响研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (8): 21-24.
- [11] 任亚伟, 蔡燕霞, 刘逢涛. 电石渣、粉煤灰稳定煤矸石基层混合料性能试验研究 [J]. 公路工程, 2023, 48 (1): 74-78, 97.
- [12] YANG W, JIN Z, YANG J, et al. Study on the performance of recycled cement-stabilized macadam mixture improved using alkali-activated lithium slag - fly ash composite [J]. Minerals, 2024, 14 (4): 418-434.
- [13] 谭威, 刘亚静. 玄武岩纤维水泥土力学特性及水稳定性研究 [J]. 西部交通科技, 2023, (12): 77-80.
- [14] 程仁德, 李磊, 袁卫军, 等. 基于多指标的玄武岩纤维沥青混合料抗裂性能 [J]. 公路, 2026, 71 (3): 39-45.
- [15] 涂义亮, 任思雨, 赵林, 等. 玄武岩纤维-粉煤灰提升水泥土抗剪性能试验研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (16): 133-140.
- [16] 兰雪江, 张翥, 王永宝, 等. 水泥稳定再生碎石物理力学性能研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (2): 69-80.

E-mail: fmhzhly@163.com