

聚丙烯纤维加筋增强钢渣混合土性能的研究

闫旭¹, 周梦辉^{1,2}, 张丽¹, 黄伟¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽马鞍山 243032; 2. 苏州市建设工程质量检测中心有限公司鉴定中心, 江苏苏州 215100)

摘要: 为进一步改善钢渣混合土的综合性能, 在钢渣混合土中掺入韧性良好的聚丙烯纤维, 制备纤维加筋钢渣混合土, 研究纤维长度、掺量对钢渣混合土无侧限抗压强度、干缩、抗冻等性能的影响, 并采用扫描电镜表征分析加筋对受冻试件微观形貌的影响, 探讨加筋纤维增强钢渣混合土综合性能的机理。结果表明: 纤维加筋能有效改善钢渣混合土的抗压、干缩及抗冻性能, 加筋纤维长度 12 mm、掺量 0.25% 时综合性能相对最优, 加筋试件延性变好, 抗压强度提升达 16.74%; 失水量有所增大, 但干缩系数减小达 37.51%; 受冻后质量损失率下降、残余强度比提升达 6.33%。此时的试件微观形貌相对完整, 故表现出更好的抗干缩和抗冻性能, 聚丙烯纤维与基体间有效黏结提供的界面摩擦力及其在基体内形成的立体网状结构是钢渣混合土性能增强的重要基础。

关键词: 钢渣混合土; 聚丙烯纤维; 抗压性能; 干缩性能; 抗冻性能

中图分类号: TU 521 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23177



A Study of the Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Steel Slag Mixed Soil

YAN Xu¹, ZHOU Menghui^{1,2}, ZHANG Li¹, HUANG Wei¹

(1. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China;

2. Identification Center, Suzhou Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd, Suzhou 215100, China)

Abstract: To further improve the comprehensive performance of steel slag mixed soil, polypropylene fibers with good toughness were incorporated into the mix to prepare fiber-reinforced steel slag soil. The effects of fiber length and dosage on the unconfined compressive strength, dry shrinkage, freeze-thaw resistance and other properties of the steel slag mixed soil were studied. Scanning electron microscope was used to characterize and analyze the effect of reinforcement on the microstructure of frozen specimen, and the mechanism of fiber reinforcement on the comprehensive performance of steel slag mixed soil was investigate. The results show that fiber reinforcement can effectively improve the compressive, dry shrinkage and frost resistance of steel slag mixed soil. The optimal comprehensive performance is achieved with fiber length of 12 mm and a dosage of 0.25%. The ductility of the reinforced specimen improves, with compressive strength increasing by up to 16.74%. While the water loss increases, the dry shrinkage coefficient decreases by up to 37.51%. After freezing, the mass loss rate decreases, and the residual strength ratio increases by up to 6.33%. At this stage, the microstructure of the specimens is relatively intact, thus exhibiting better dry shrinkage and freeze-thaw resistance. The effective bonding between polypropylene fibers and

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 安徽省高校自然科学基金重大项目(KJ2018ZD006); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2018YF-007)

作者简介: 闫旭(1998—), 男, 安徽亳州人, 硕士生, 主要研究方向为道路基层材料。

通信作者: 黄伟(1963—), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 主要研究方向为土木工程材料。

引文格式: 闫旭, 周梦辉, 张丽, 等. 聚丙烯纤维加筋增强钢渣混合土性能的研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(6):636-645.

the matrix provides interfacial friction and formation of a three-dimensional network structure within the matrix is a critical basis for the enhanced performance of the steel slag mixed soil.

Keywords: steel slag mixed soil; polypropylene fiber; crush resistance; dry shrink performance; frost resistance

钢渣混合土是结合土体固化技术,利用钢渣、矿渣微粉在碱性环境下的水化反应特点,将钢渣、矿渣微粉、水泥、场地弃土、离子型固化剂等混拌制备而成的1种新型半刚性道路基层材料。钢渣混合土具有良好的力学性能和体积安定性,7 d无侧限抗压强度达7.19 MPa,10 d浸水膨胀率仅0.25%^[1-2],相关力学性能指标达到甚至略优于传统的水泥稳定碎石基层。推广钢渣混合土道路基层的工程应用,可有效解决钢渣、场地弃土堆存所致的土地占用、环境污染等问题,有利于实现冶金、建筑固废资源大宗化应用;同时可缓解天然砂石料开采受限导致的水泥稳定碎石价格高的难题,符合当前国家环境保护、节能减排的政策导向。钢渣混合土基层与水泥稳定无机结合料的半刚性基层相似,具有刚度大、脆性强的特点,干燥时失水收缩会产生开裂,低温环境下亦会发生冻胀开裂,从而导致基层板块的整体性和承载性能下降^[3-5]。因此,开展钢渣混合土基层抗干缩、抗裂研究,对高性能基层材料的开发和冶金固废的高价值利用具有重要意义。

在水泥稳定无机结合料的半刚性基层中适量加入不同种类的纤维,利用纤维与基层材料间的拉结作用,可有效改善基层延性,约束裂缝的持续发展,确保道路正常服役^[6]。其中聚丙烯纤维具有强度高、韧性好、耐酸碱、施工性优的特点,是目前道路半刚性基层增韧改性研究中应用相对广泛的材料之一。Tang等^[7]探究聚丙烯纤维对水泥稳定黏土力学性能的影响,结果表明聚丙烯纤维可提升材料的延性,使其破坏特征由脆性转变为延性;刘纪等^[8]将聚丙烯纤维掺入水泥稳定冷再生混合料,发现纤维的加入不仅能提高材料的抗压性能与抗冻性能,在减少水泥用量的情况下材料的力学性能亦能满足规范要求;Saberian等^[9]研究了聚丙烯纤维对再生混凝土骨料基层材料力学特性的影响,结果表明材料在受荷载作用时,骨料与纤维间会产生滑动,纤维通过吸收滑动摩擦力增强材料的拉伸强度,减小材料的永久变形,并通过桥架作用约束裂缝的发展;宋金华等^[10]研究表明,聚丙烯纤维能够限制水泥稳定碎石材料间裂缝的发展,从而改善试件的整体性,提高材料的抗压性能与抗收缩性能;雷蕾等^[11]研究表明,聚丙烯纤维能够增强水泥稳定碎石类基层材料的内部黏

结,从而提高试件的抗收缩性能;Sengul等^[12]发现聚丙烯纤维可提升黏土的抗剪强度,补偿黏土受冻融循环造成的强度损失,从而改善黏土用作道路基层的耐久性;Zhang等^[13]探究了纤维对水泥稳定碎石材料抗裂机理的影响,结果表明纤维的掺入能够减少材料间微裂缝与孔洞的形成,改善裂缝处受应力集中而持续发展的不利状况;Dhaka等^[14]试验研究表明,聚丙烯纤维的掺入可提高水泥稳定黏土的力学性能,改善其耐久特性。钢渣混合土含有一定比例的素土,相较传统水泥稳定碎石基层,其失水干缩量更大,更易开裂^[15]。因此,借鉴水泥稳定无机结合料基层增韧改性的研究思路,在钢渣混合土中掺入聚丙烯纤维,试验研究聚丙烯纤维加筋对钢渣混合土抗压、干缩及抗冻性能的影响,以期为促进钢渣混合土基层的工程应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

试验所用原材料为素土、钢渣、矿渣微粉、聚丙烯纤维、土壤固化剂和水泥。素土为黄色黏性土,取自马鞍山市某建筑工地回填土,依据JTG 3430—2020《土工试验规程》中界限含水率试验测得土样液限 w_L 为43.6%、塑限 w_p 为22.6%、塑性指数 I_p 为21,属于低液限黏土,干燥破碎后取过4.75 mm标准筛的筛下料。钢渣为转炉热闷渣,由马鞍山钢铁股份有限公司提供,取过4.75 mm标准筛的筛下料,化学成分见表1。矿渣微粉为S95级,由马钢嘉华新型建材有限公司生产,表观密度2 900 kg/m³、比表面积400 m²/kg,化学成分见表2。加筋纤维为聚丙烯纤维,白色单丝状,由长沙柠祥建材有限公司生产,物理性能指标见表3。土壤固化剂为易孚森离子型固化剂,由北京中科盛联有限公司生产,凝结时间影响系数比为109.1%、无侧限抗压强度比为147.8%、水稳定系数比为114.3%,试验前需以质量比1:200加水稀释。水泥为海螺牌P·O 42.5,性能指标检测结果见表4。

表1 钢渣化学成分

w/%

Tab. 1 Chemical composition of steel slag

w/%

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	其他
57.93	18.31	13.02	4.18	1.93	1.37	1.01	0.42	1.83

表2 矿渣微粉化学成分

w/%

Tab. 2 Chemical composition of slag powder

w/%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	其他
40.39	33.16	12.48	9.32	1.99	0.89	0.52	1.25

表3 聚丙烯纤维物理性能

Tab. 3 Physical properties of polypropylene fiber

直径/ μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	断裂伸长率/%
25	565	3.9	0.91	17.2

表4 水泥技术性能检测结果

Tab. 4 Test results of cement technical performance

项目	初凝时间/min	终凝时间/min	细度(80 μm 筛)/%	28 d 抗拉强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa	安定性
标准值	≥ 45	≤ 600	≤ 10.0	≥ 32.5	≥ 5.5	合格
实测值	151	241	4.4	34.3	6.1	合格

1.2 试验过程

1.2.1 试件制备

根据本课题组^[1]前期研究成果确定钢渣混合土配合比,按质量计,主料钢渣与素土各50%,外掺占主料质量的20%矿渣微粉、5%水泥、0.02%固化剂;选择道路工程中常用且价格较低、性能优越的3种纤维,以抗压强度、劈裂强度、干缩系数3项性能指标综合最优为选取标准,通过开展纤维类型、长度、掺量的优选试验和SPSS分析,确定长度12 mm、掺量0.25%(体积分数,下文同)的聚丙烯纤维为适宜加筋材料。基于此,设计10组不同纤维长度、掺量配合比(如表5),探讨聚丙烯纤维加筋对钢渣混合土强度、干缩、抗冻等性能的影响。表中含水率和干密度分别为纤维的最佳含水率和最大干密度。

表5 配合比设计

Tab. 5 Mix ratio design

编号	长度/mm	掺量/%	含水率/%	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1 [#]	0	0	12.0	2.145
2 [#]	6	0.25	12.1	2.126
3 [#]	9	0.25	12.1	2.127
4 [#]	12	0.25	12.2	2.130
5 [#]	15	0.25	12.4	2.132
6 [#]	19	0.25	12.5	2.133
7 [#]	12	0.15	12.2	2.134
8 [#]	12	0.20	12.3	2.132
9 [#]	12	0.30	12.2	2.125
10 [#]	12	0.35	12.1	2.123

按试验用量称取素土、钢渣、矿渣微粉、聚丙烯纤维、土壤固化剂、水泥及水,量取部分水按比例

稀释土壤固化剂,剩余水为预留水;将称取的素土、钢渣、矿渣微粉、聚丙烯纤维置于砂浆搅拌机,低速搅拌1 min;倒入预留水,低速搅拌2 min;加入稀释后的土壤固化剂,低速搅拌1 min;拌合均匀后置于密封袋中闷料8 h,闷料结束,取出密封袋中的材料,连同水泥将其置于搅拌机,搅拌1 min完成配制。将配制的原料装入钢制模具,依靠反力框架静压成型。

1.2.2 性能测试

依据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[16]开展无侧限抗压强度试验、干缩试验与冻融循环试验。

制备尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆柱体试件用于无侧限抗压强度试验,将试件分别标准养护至6, 13, 27, 59, 89 d,再浸水养护1 d,取出擦干,选用STLQ-3数显路面材料强度试验仪进行加载,加载速率1 mm/min,记录破坏时的最大压力 P 。试件的无侧限抗压强度 $R=P/A$, A 为试件的截面积。

制备尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的梁式试件用于干缩试验,将试件标准养护6 d,再浸水养护1 d,擦干试件后在其两端粘结玻璃片并固定千分仪,底部放置玻璃棒,再将其置于干缩室进行干缩试验。14 d内每天测量1次,14 d后每两天测量1次,采用失水率、干缩应变与干缩系数评价试件的干缩性能,计算公式如下:

$$w_i = (m_i - m_{i+1})/m_p \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \delta_i/l \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum w_i} \quad (3)$$

其中: w_i 为第 i 次失水率; m_i 为第 i 次标准试件称重质量; m_p 为标准试件烘干后质量; ε_i 为第 i 次干缩应变; δ_i 为第 i 次干缩量; l 为标准试件长度; α_i 为第 i 次试件总干缩系数。

制备尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的圆柱体试件用于冻融循环试验,设置冻融循环组与非冻融循环组。冻融循环组标准养护27 d,再浸水养护1 d,擦干称重后放入冻融试验箱 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冷冻16 h,取出放入 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 温水保温8 h,重新冷冻,如此循环2, 4, 6, 8, 10次后进行无侧限抗压强度试验;非冻融循环组分别养护27 d及 $(27+n)\text{ d}$ (n 对应冻融组循环次数),浸水养护1 d后进行无侧限抗压强度试验。采用冻融循环残余强度比与冻融循环后质量损失率评价试件的抗冻性能,计算公式如下:

$$r_n = \frac{R_n}{R} \times 100\% \quad (4)$$

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

其中: r_n 为 n 次冻融循环后试件的残余强度比; W_n 为 n 次冻融循环后试件的质量损失率; R_n 为 n 次冻融循环后试件的无侧限抗压强度; R 为对照组试件的无侧限抗压强度; m_0 为冻融循环前试件的质量; m_n 为 n 次冻融循环后试件的质量。

1.2.3 性能表征

采用日本电子株式会社生产的型号为 JSM-6510LV 的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测试件的微观形貌, 钨灯丝照明, 点分辨率为 3 nm, 加速电压为 0.5~30.0 kV, 放大倍数可达 5~300 000 倍。试件均为横断面截取的片状材料, 尺寸约 5 mm×5 mm, 扫描前依照要求进行真空镀金。

采用德国 Bruker 公司 D8 ADVANCE X 射线衍射仪 (X ray diffractometer, XRD) 分析试件的物质组分, 射线发生器为 Cu 靶, 功率 ≥2.2 kW, 2θ 扫描角度范围在 110°~168°, 扫描速率 0.01 °/s, 试验过程中选取 2θ 扫描范围为 10°~80°。

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压性能

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同龄期加筋试件的无侧限抗压强度如图 1。由图 1 可看出: 短龄期 (7, 14 d) 不同纤维掺量与长度试件的抗压强度相差不大, 随养护龄期的延长, 同龄期不同加筋试件的抗压强度出现差异, 且龄期越长差异越大。纤维掺量为 0.25% 时, 长龄期 (60, 90 d) 各试件抗压强度随纤维长度增加呈先升后降的态势, 12 mm 时达到峰值, 较未加筋试件平均提高了 16.74%; 纤维长度 12 mm 时, 长龄期 (60, 90 d) 各试件抗压强度随纤维掺量增加亦呈先升后降的态势, 60 d 龄期 0.25% 掺量试件达到峰值, 90 d 龄期 0.30% 掺量试件达到峰值, 且略高于 0.25% 掺量试件, 这 2 种掺量加筋试件抗压强度分别较未加筋试件平均提高了 16.74%, 16.43%。分析认为, 养护初期材料内部的水化反应尚未充分进行, 生成的水化硅酸钙 (C—S—H) 无法有效包裹纤维, 纤维与基体间的化学胶结力较弱, 不能有效协同基体受力, 因此加筋试件与未加筋试件强度相差不大^[17]; 随着水化反应逐渐充分, 生成的大量 C—S—H 凝胶充斥于纤维与基体间, 纤维加筋效果开始显现, 加筋试件较未加筋试件抗压强度增加逐渐明显。比较不同纤维长度、不同纤维掺量的加筋试件, 发现纤维

过短或过少均不利于基体内桥架效应形成, 纤维过长单位体积内阻裂成效降低, 纤维过多容易结团影响基体密实度。60, 90 d 下 2 种掺量加筋对试件抗压性能的提升幅度各有高低, 故选取平均提升幅度较高的纤维掺量, 0.25%。

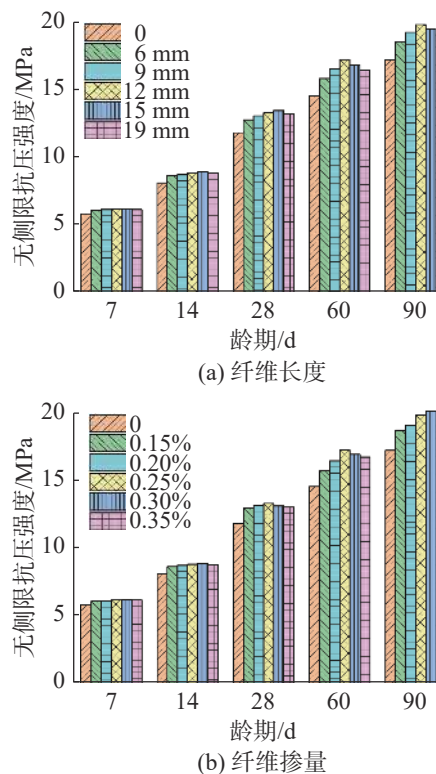


图1 纤维对试件无侧限抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of fiber on unconfined compressive strength of specimens

取纤维长度 12 mm 时, 不同掺量加筋试件的 28 d 无侧限抗压破坏试件, 进一步分析纤维掺量对试件破坏特征的影响, 试件破坏形态如图 2。由图 2 可看出: 未加筋试件最终破坏形态为竖向劈裂状, 表面裂缝宽且少, 极限荷载较小; 随纤维掺量的增加, 加筋试件破坏时的极限荷载增大, 表面裂缝数逐渐增多, 裂缝间距逐渐减小, 裂缝分布逐渐由竖向转变至倾斜状, 破坏后仍能承受一定荷载和维持相对完整形态, 破坏形态由脆性骤然崩坏逐渐过渡为塑性开裂失载, 破坏过程中的块体散落减少, 完整度趋强^[9]。分析认为, 纤维加筋试件受载初期处于弹性阶段, 纤维与基体间的摩擦阻力逐渐增大, 整体结构趋于密实; 随着荷载的增大, 加筋试件进入塑性阶段, 纤维与基体间产生摩擦阻力重分布, 纤维网状结构共同受力; 荷载继续增大, 纤维与基体间开始出现相对滑动或者被拉断, 直至试件无法继续承载, 达到破坏状态^[18,19]。当纤维掺量超过 0.25% 时, 纤维在基体中的分散性变差, 容易团聚, 不利于材料和胶凝产物的

有效充填、包裹,加筋试件内部形成薄弱区,受压时薄弱区产生应力集中,导致内部裂隙产生并横向发展至表面;达到极限荷载时,试件外观呈鼓状近似完好状态,几乎无碎裂物脱落,极限荷载有所降低。上述结果表明适宜掺量的纤维加筋能一定程度提高钢渣混凝土的强度,明显改善钢渣混凝土的延性。

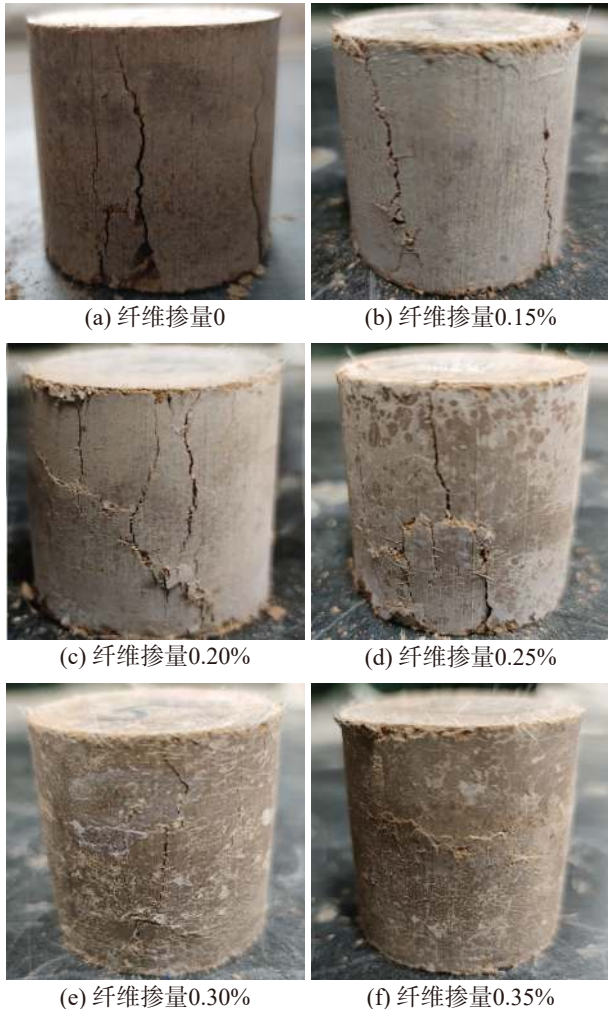


图2 试件 28 d 无侧限抗压强度试验后的破坏形态

Fig. 2 Failure morphology of specimens after 28 d unconfined compressive strength test

2.2 干缩性能

2.2.1 失水率与干缩应变

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同龄期加筋试件的失水率如图 3。从图 3 可看出:随龄期延长,各组试件失水趋势特征相近,失水率均为初期增速较快、后逐渐趋缓,养护至 14 d 后失水率变化很小。这是由于水化反应的不断消耗以及 C—S—H 凝胶层间吸附水的蒸发,两者共同作用导致试件失水率不断上升^[15]。这种现象随着龄期的延长,试件内部水化反应不断

进行而逐渐减缓,最终与周围环境相适应。由图 3 还可看出:同龄期加筋试件较未加筋试件失水率高,这是由于加筋试件较未加筋试件密实度略低,试件饱水时能吸收更多的水量,脱水时纤维会促进试件中的自由水从内部向表面迁移^[20];不同纤维长度、掺量试件间的失水率无明显规律。

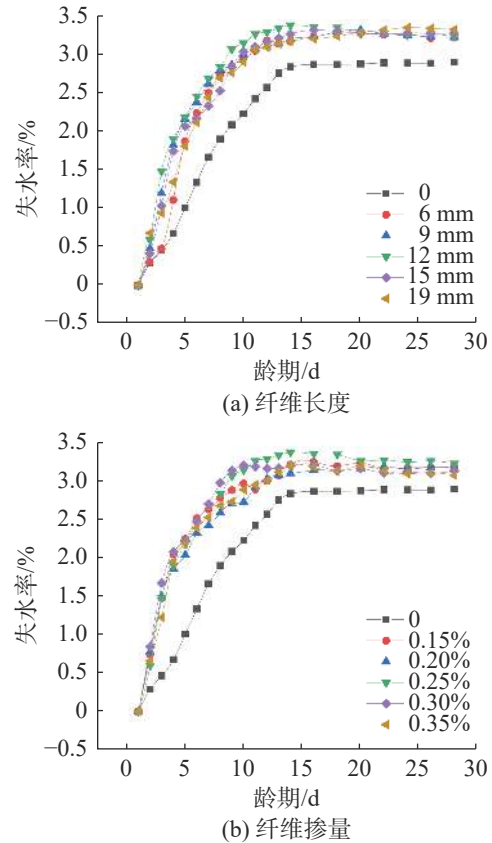
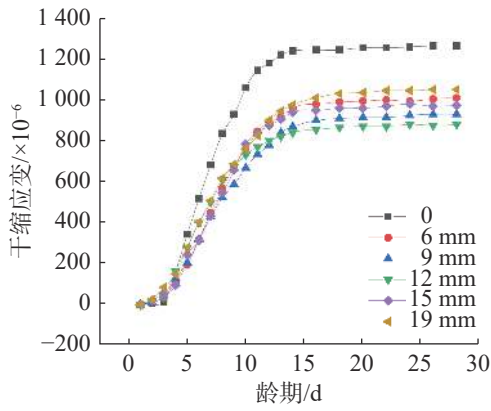


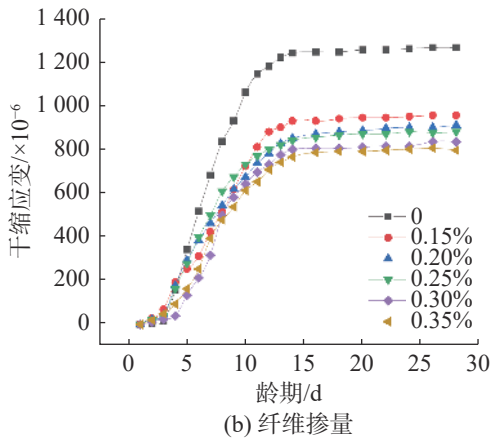
图3 纤维对试件失水率的影响

Fig. 3 Effect of fiber on water loss rate of specimens

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同龄期加筋试件的干缩应变如图 4。结合图 3, 4 可看出:试验前期,各试件失水较少,干缩应变增长缓慢,未加筋试件与加筋试件干缩应变变化相差不大;随着龄期的延长,试件失水量累加,各试件干缩应变增速加快,至 5~8 d 时,各试件干缩应变影响曲线陆续出现拐点,增速逐渐放缓,其中受纤维对基体约束的影响,加筋试件应变增速较未加筋试件更早趋缓;至 12~15 d 时,各试件干缩应变曲线趋平,加筋试件应变增幅较未加筋试件明显降低;28 d 后各试件干缩应变几乎不再增加。由此表明:随着龄期的延长,试件内部不断生成的水化产物有效包裹纤维并与基体形成整体;在试件脱水的环境下,纤维能够有效约束试件干缩应变的发展,使加筋试件的干缩应变增加持续低于未加筋试件。



(a) 纤维长度

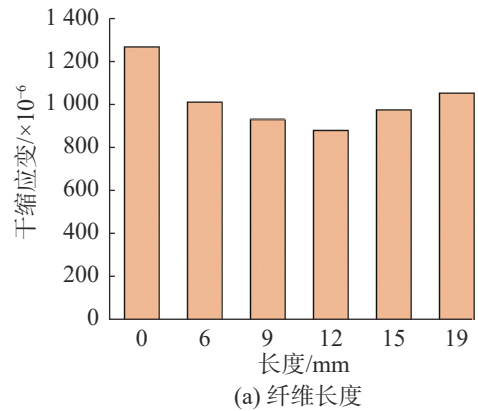


(b) 纤维掺量

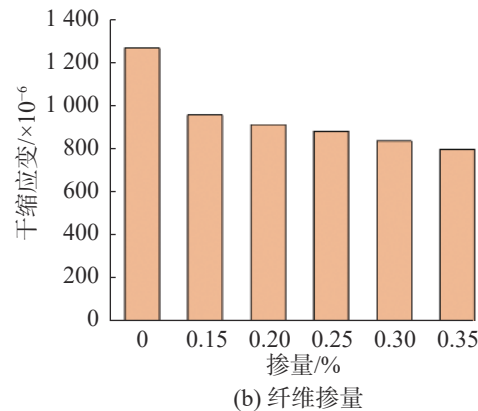
图 4 纤维对试件干缩应变的影响

Fig. 4 Effect of fiber on dry shrinkage strain of specimens

相较于 14 d 龄期, 28 d 龄期下各试件干缩应变基本趋于稳定, 此时纤维加筋的影响规律较为明显, 提升幅度更加显著。纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下加筋试件 28 d 干缩应变如图 5。由图 5(a) 可看出: 纤维掺量 0.25% 时, 随纤维长度的增加, 加筋试件 28 d 干缩应变先降低后增加, 在纤维长度增至 12 mm 时达到谷值, 说明纤维不宜过短和过长, 过短易造成纤维与基材之间的锚固不足, 桥架效应因纤维拉脱而失效, 干缩应变增大; 过长降低了纤维在基体内乱向分布的均匀性及纤维横跨裂隙产生桥架效应的几率, 干缩应变亦会增大。由图 5(b) 可看出: 纤维长度 12 mm 时, 各纤维掺量加筋试件 28 d 干缩应变明显低于未加筋试件, 且随纤维掺量的增加不断降低, 但降幅较小。这是因为随纤维掺量的增加, 试件中乱向分布的纤维间距更小, 网状结构效应愈强, 能更好地约束材料的相对滑移^[21]; 纤维与骨料之间的热膨胀系数差异较大, 纤维具有“导管”作用, 能够消散试件内部由于失水产生的干缩应力^[22]。纤维长度 12 mm、掺量为 0.25% 和 0.35% 时, 28 d 加筋试件干缩应变与未加筋试件的比值分别为 0.69, 0.63, 两者比值相差不大。



(a) 纤维长度



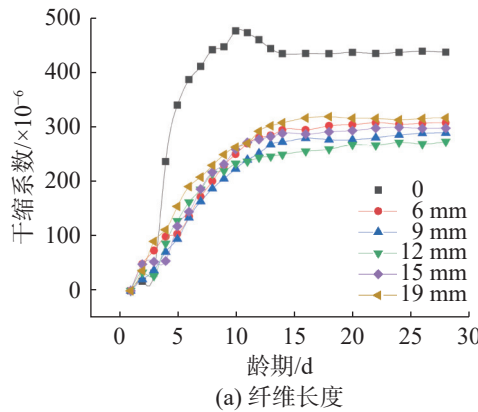
(b) 纤维掺量

图 5 加筋试件的 28 d 干缩应变

Fig. 5 Dry shrinkage strain of reinforced specimens at 28 d

2.2.2 干缩系数

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同龄期加筋试件的干缩系数如图 6。由图 6 可看出: 未加筋试件干缩系数影响曲线与未加筋试件明显不同, 且不同龄期的干缩系数均远高于加筋试件; 未加筋试件初期干缩系数快速增长, 至 10 d 达到峰值后略有下降, 13 d 后几乎保持不变, 主要原因是试件初期干缩应变增长较缓, 但失水率增加较快; 加筋试件干缩系数随时间的延长, 增幅较缓, 曲线几乎未有峰值, 至 13 d 后基本不再增加, 充分说明加筋纤维对基体干缩过程具有约束作用。



(a) 纤维长度

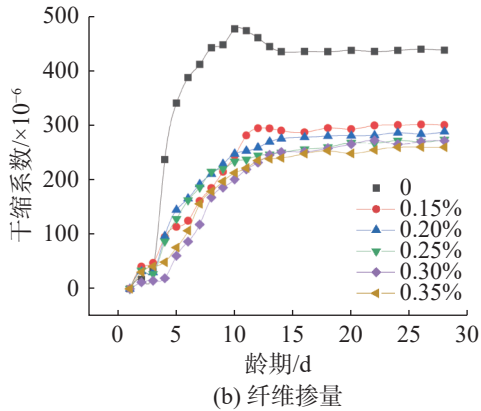


图6 纤维对试件干缩系数的影响

Fig. 6 Effect of fiber on dry shrinkage coefficient of specimens

纤维掺量 0.25%, 纤维长度对加筋试件 28 d 干缩系数的影响曲线如图 7(a)。由图 7(a) 可看出: 纤维掺量 0.25% 时, 长度为 6, 9, 12, 15, 19 mm 的加筋试件干缩系数较未加筋试件分别减小了 29.63%, 33.84%, 37.51%, 31.86%, 27.58%, 加筋试件的干缩系数明显低于未加筋试件, 且随纤维长度增加呈先降后升, 12 mm 时最好。纤维长度 12 mm 时, 纤维掺量对加筋试件 28 d 干缩系数影响曲线如图 7(b)。

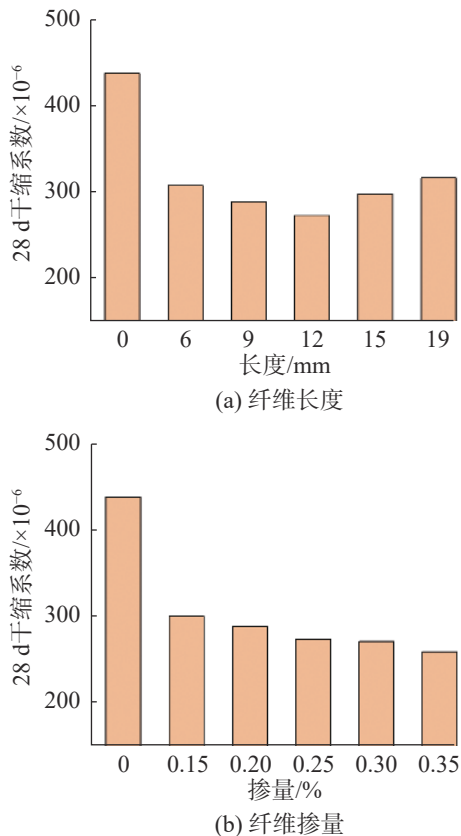


图7 加筋试件的 28 d 干缩系数

Fig. 7 Dry shrinkage coefficient of reinforced specimens at 28 d

由图 7(b) 可看出: 纤维长度 12 mm 时, 掺量 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 加筋试件的干缩系数较未加筋试件分别减小了 31.43%, 34.19%, 37.51%, 37.99%, 40.71%, 加筋试件的干缩系数较未加筋试件明显降低, 且随纤维掺量增加呈小幅下降。纤维长度 12 mm、掺量分别为 0.25% 和 0.35% 时, 加筋试件 28 d 干缩系数较未加筋试件的比值分别为 0.62, 0.59, 两者比值相差不大, 但后者抗压性能略低。

2.3 抗冻性能

2.3.1 质量损失率

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同冻融次数加筋试件的质量损失率如图 8。

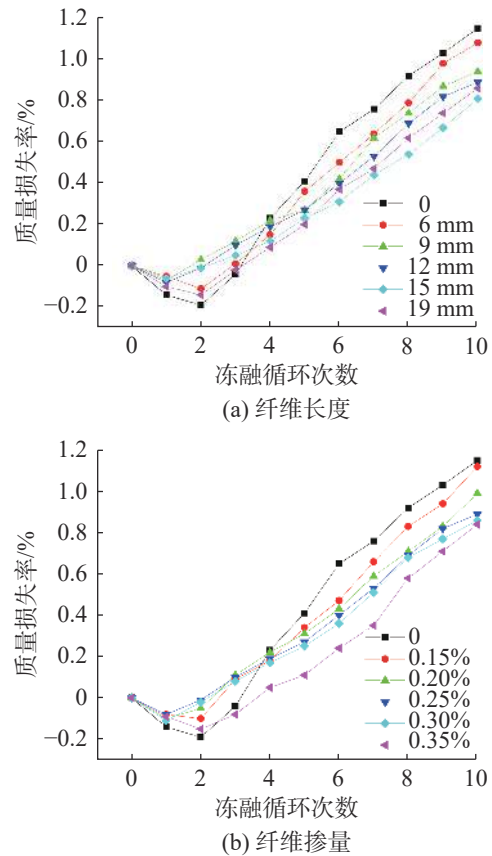


图8 纤维对试件质量损失率的影响

Fig. 8 Influence of fiber on the quality loss rate of specimens

由图 8 可看出: 未加筋与加筋试件的质量损失率变化特征一致, 均随冻融次数增加先负值减少后正值增加。这是因为试验初期, 试件受冻时, 试件内部孔隙中自由水冻结导致体积膨胀, 对试件基体形成冻胀应力, 造成试件内部出现新的微裂缝; 试件解冻时, 内部冻胀应力消减与外部静水压力共同作用使试件吸收水分的质量大于冻融过程中材料析出或剥落的质量, 试件质量整体呈增加态势^[23]。但随着

冻融的次数增加,试件内部微裂缝不断萌生、发展,材料析出或剥落的质量亦随之增大并超过试件吸收水分的质量,试件整体质量由增加转为下降,质量损失率近似线性增加。与未加筋试件相比,加筋试件纤维的桥架效应约束了试件内部微裂缝的萌生及发展,有助于减小试件冻融过程中的质量损失,使其质量损失率变化幅度均小于前者。加筋试件纤维掺量不变,冻融循环后加筋试件质量损失率均有所降低;加筋试件纤维长度不变,随纤维掺量的增加,作为连接剥落物与基体间的“桥梁”愈多,冻融循环后试件质量损失量减小^[24]。

2.3.2 残余强度比

纤维掺量 0.25% 时长度 0, 6, 9, 12, 15, 19 mm 以及纤维长度 12 mm 时掺量 0, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%, 0.35% 条件下不同冻融次数加筋试件的残余强度比如图 9。

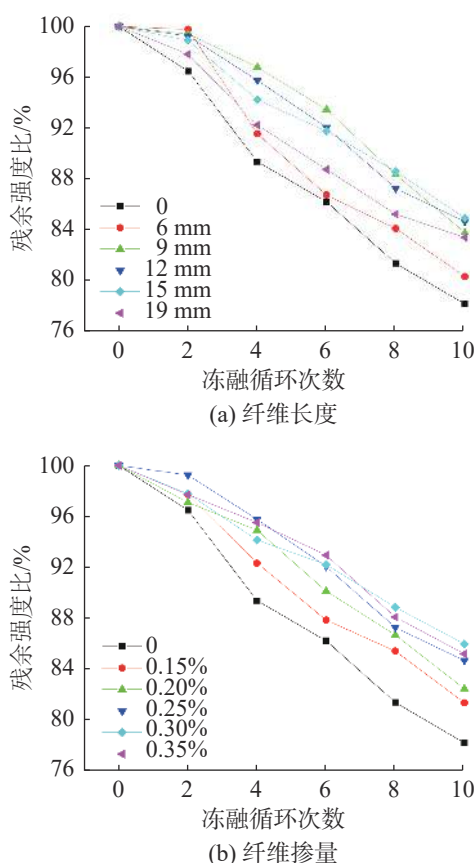


图9 纤维对试件残余强度比的影响

Fig. 9 Effect of fiber on residual strength ratio of specimens

由图 9 可看出:各试件残余强度比均随冻融次数增加而下降,表明试件受冻时,内部孔隙水冻结形成的冻胀微裂缝会降低试件的密实性,并随着冻融次数增加,微裂缝的不断萌生、发展,试件的结构逐渐疏松,承载能力不断下降;相同冻融次数的加筋试件残余强度比均高于未加筋试件,说明纤维的桥架

作用有效限制了试件内部微裂缝的萌生、发展,减小了试件密实度的降低幅度;纤维掺量不变时,9, 12, 15 mm 长度纤维加筋试件平均残余强度比较高,各轮次冻融的平均值分别为 91.39%, 90.83%, 90.72%, 较未加筋试件分别提升 6.99%, 6.33%, 6.21%, 表明选取合适的纤维长度有利于增强加筋试件的抗冻性;纤维长度不变时,受纤维掺量对试件强度和质量损失率的影响,0.25%, 0.30%, 0.35% 掺量加筋试件的平均残余强度比较高,各轮次冻融的平均值分别为 90.83%, 90.82%, 90.86%, 但是 0.25% 掺量加筋试件残余强度比与最高掺量 (0.35%) 加筋试件相差很小。

3 讨论

3.1 微观形貌

综上可看出,抗压、干缩、抗冻性 3 个性能指标综合最优的加筋试件纤维长度 12 mm、体积掺量 0.25%。该条件下的加筋试件及未加筋试件的微观形貌如图 10。由图 10 可看出:未冻融时,未加筋试件、加筋试件内部结构形貌相近,均比较密实,整体性良好;6 次冻融后,试件内部基体受冻胀应力的作用均出现微裂缝,且未加筋试件内部微裂缝数量更多、相对更明显;10 次冻融后,伴随着试件内部材料颗粒的不断脱落、析出,微裂缝变多、变宽,未加筋试件内部微裂缝形成网状,结构明显较加筋试件疏松。两者微观形貌的变化规律和冻融后残余强度比的变化特征一致。

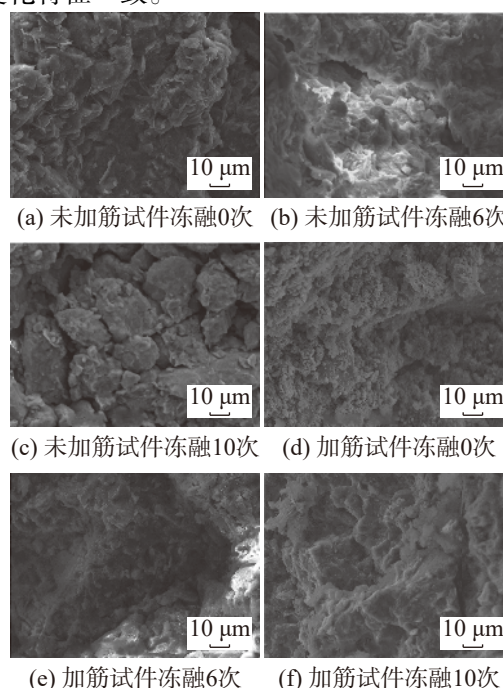


图10 试件冻融前后的微观形貌

Fig. 10 Microstructure of specimens before and after freeze-thaw cycles

3.2 加筋纤维增强性能机理

加筋试件(纤维长度 12 mm、纤维体积掺量 0.25%)材料的 XRD 图谱如图 11。由图 11 可看出:龄期 0 d 时,加筋试件结构中出现明显的 f—CaO 特征峰,并随龄期的延长衍射峰值不断降低,主要因为试件在强度建立过程中,钢渣中游离的 f—CaO 水化形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,能够与矿渣微粉中的活性 SiO_2 发生火山灰反应,形成 C—S—H 凝胶^[25]。伴随着水化反应的持续发生,C—S—H 凝胶会不断依附在纤维表面,填充基体孔隙,且以牢固的化学胶结力将纤维与基体连为一体;而加筋纤维在基体中通常呈乱向弯曲状分布、彼此搭接,形成立体网状结构。两者共同作用大大提升了加筋试件材料的整体性,当部分纤维受到应力作用时,会通过桥架作用牵连周围交错的纤维共同受力,将应力作用传递给立体网状结构,从而实现纤维与基体间共同受力^[26]。

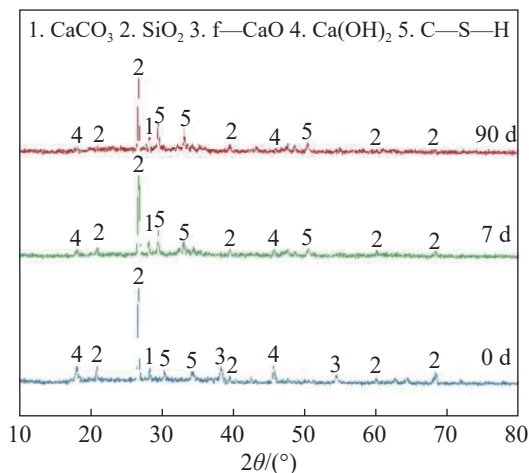


图 11 不同龄期纤维加筋 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of fiber reinforcement at different ages

为进一步分析纤维在基体内部的作用机制,绘制单根纤维受力示意如图 12。

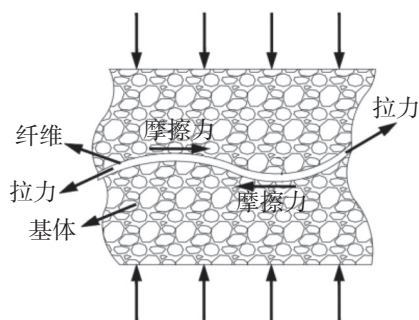


图 12 纤维加筋受力示意图

Fig. 12 Schematic diagram of fiber reinforcement stress distribution

在外力或冻胀力作用下,弯曲状纤维与基体的黏结发生破坏后会产生滑动,纤维因受拉而产生界

面抵抗应力,即平行于接触面的摩擦力,这种摩擦力能够抵消部分外力,从而起到提高试件承载力和限制侧向变形的作用,增强其力学性能^[7,27-28]。

综上所述:纤维长度和掺量均对试件的力学性能均有影响,纤维过短,试件内部纤维网状结构包裹性较弱,纤维与基体间的锚固性较差,增强效果不明显;纤维过长,纤维更易交织和弯曲,搭接缠绕形成团状结构,拌合时分散性较差,且团状结构内部的纤维亦不能被凝胶充分填充,影响试件的密实性和基体共同受力,削弱了加筋效果。纤维掺量少,桥架效应小,增强效果不好;纤维掺量多,易造成内部结构密实度下降,同样影响材料性能。

4 结论

采用聚丙烯纤维加筋增强钢渣混合土基层,研究纤维掺量、长度对钢渣混合土无侧限抗压性能、干缩性能、抗冻性能的影响及其影响机理,得出如下主要结论:

1) 在钢渣混合土基层掺入聚丙烯纤维能一定幅度提高材料的抗压、干缩及抗冻性能,纤维长度、纤维掺量对抗压、干缩及抗冻性能的影响有所差异,综合聚丙烯纤维加筋钢渣混合土抗压、干缩、抗冻 3 个性能指标,长度 12 mm、掺量 0.25% 的聚丙烯纤维相对更优。

2) 掺入聚丙烯纤维能提高钢渣混合土的抗压性能,长度 12 mm、掺量 0.25% 的加筋钢渣混合土 60, 90 d 龄期抗压强度平均提高 16.74%;同时钢渣混合土的延性得到改善,破坏特征由脆性骤然崩坏过渡为塑性开裂失载。

3) 掺加聚丙烯纤维能有效减小钢渣混合土的干缩应变,改善钢渣混合土的抗干缩性能。纤维掺量 0.25% 时,纤维过长或过短均不利于纤维约束作用的有效发挥,长度 12 mm 时性能最优,加筋钢渣混合土 28 d 干缩系数较未加筋降低 37.51%;纤维长度 12 mm 时,各纤维加筋钢渣混合土 28 d 干缩系数明显低于未加筋钢渣混合土,且随纤维掺量的增加其不断降低,但降幅较小。

4) 纤维加筋能减少钢渣混合土多次冻融的质量损失率,与对比未加筋钢渣混合土相比,提高残余强度比可达 6.33%;纤维加筋钢渣混合土微观形貌相对完整,故其表现出更好的抗冻性能。

参考文献:

[1] 黄伟,邱鹏,赵鲁卿.等.钢渣-土混拌基层材料试验研

- 究及微观机理分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4):44-52.
- [2] 张明朗,贺雄飞,洪侨亨,等. 矿渣微粉-粉煤灰-硅灰基惰性同步注浆材料的制备及其性能优化[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(10):50-57.
- [3] 龙小勇,岑国平,蔡宛彤,等. 砂砾土地基道面结构不均匀冻胀防治[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1):97-103.
- [4] CHEN H, LI X, XIONG H, et al. A model of segregation frost heave for saturated soil freezing under overburden pressure[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 214:103935.
- [5] LIU J, TSAYBEL S, LIU X, et al. Experimental study on mechanical and frost heave behaviors of silty clay improved by polyvinyl alcohol and polypropylene fiber[J]. *Research in Cold and Arid Regions*, 2023, 15(2):57-65.
- [6] 刘宝生,唐朝生,李建,等. 纤维加筋土工程性质研究进展[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4):540-547.
- [7] TANG C, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(3):194-202.
- [8] 刘纪,黄丽平,李秀君,等. 聚丙烯纤维对高寒地区水稳基层冷再生混合料性能的影响[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(5):460-467.
- [9] SABERIAN M, TAJADDINI A, LI J, et al. Mechanical properties of polypropylene fibre reinforced recycled concrete aggregate for sustainable road base and subbase applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 405:133352.
- [10] 宋金华,徐传良. 纤维增强水泥稳定不同骨料性能试验研究[J]. 公路, 2022, 67(2):237-241.
- [11] 雷蕾,姜慧,顾万,等. 外掺剂改良再生水泥稳定碎石基层材料试验研究[J]. 公路, 2022, 67(2):31-37.
- [12] SENGUL T, AKRAY N, VITOSOGLU Y. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400:132590.
- [13] ZHANG X, PANG S, GENG J, et al. Study on shear resistance and crack resistance and toughening mechanism of fiber reinforced cement stabilized aeolian sand[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123:103700.
- [14] DHAKAL S, KOLAY P, PURI V. Durability of clayey soil stabilized with calcium sulfoaluminate cement and polypropylene fiber under extreme environment[J]. *Transportation Geotechnics*, 2024, 44:101164.
- [15] 徐瑞,黄伟,张丽,等. 钢渣混合土基层材料干缩及抗冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(7):2479-2487.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [17] 姜屏,杨建冬,李娜,等. 纤维改性水泥稳定铁尾矿砂的无侧限抗压性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(8):73-79.
- [18] LI J, HUANG J, NIU J, et al. Mesoscopic study on axial compressive damage of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196:14-25.
- [19] XIE H, WEI P, LIU N, et al. Study on failure characteristics of basalt fiber reactive powder concrete under uniaxial loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 404:133246.
- [20] 钟世云. 纤维对聚合物改性砂浆表面水分蒸发的影响[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(6):728-732.
- [21] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等. 玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(5):114-120.
- [22] 宋金华,缪一飞. 聚丙烯纤维对水泥冷再生材料力学及收缩性能影响研究[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(1):84-90.
- [23] DUAN M, QIN Y, LI Y, et al. Durability and damage model of polyacrylonitrile fiber reinforced concrete under freeze-thaw and erosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394:132238.
- [24] REN J, LAI Y. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 188:103301.
- [25] 孙睿,王栋民,房中华,等. 钢渣-脱硫灰基固废胶凝材料及其砂浆界面过渡区的研究[J]. 金属矿山, 2022(1):41-52.
- [26] LIU J, HOU T, LUO Y, et al. Experimental study on unconsolidated undrained shear strength characteristics of synthetic cotton fiber reinforced soil[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(2):1773-1783.
- [27] CHAO S T, BIN S, WEI G, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiber reinforcement length for fiber reinforced soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8):2225-2230.
- [28] DIAMBRA A, IBRAIM E. Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale[J]. *Géotechnique*, 2015, 65(4):296-308.