

高寒环境下橡胶粉掺入对水泥砂浆的抗冻性能影响

张静¹, 张新宇¹, 李婷婷^{1,2}, 朱楠³

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津, 300300; 2. 中国航空器拥有者及驾驶员协会, 北京, 100020;
3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津, 300202)

摘要 研究掺入橡胶粉的水泥砂浆作为高寒地区破损道面修复材料时,其抗冻性能是否适配我国高寒地区机场对破损道面修补材料的要求。通过冻融循环试验研究橡胶粉水泥砂浆中橡胶粉目数和掺量对抗冻性能以及力学性能的影响,采用两因素方差分析和极差分析确定其影响效果,通过SEM和XRD从微观角度揭示橡胶粉在水泥砂浆水化过程中对其微观结构及产物的影响。结果表明,橡胶粉水泥砂浆中目数和掺量均对抗冻性能及抗压强度有显著性影响,两者之间的交互影响不显著;确定当橡胶粉目数为30目,掺量为50%时其抗冻性能最优;SEM形貌像显示橡胶粉掺入可阻断微裂缝发展,XRD结果显示30目橡胶粉更能保证橡胶粉水泥砂浆的水化反应高效进行。

关键词 高寒环境;橡胶粉水泥砂浆;抗冻性能;力学特性;微观结构

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.014

中图分类号 TQ172 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0111-08

The Effect of Rubber Powder Addition on the Anti-Freeze Performance of Cement Mortar in High Cold Environment

ZHANG Jing¹, ZHANG Xinyu¹, LI Tingting^{1,2}, ZHU Nan³

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Aircraft Owners and Pilots Association of China, Beijing 100020, China; 3. China Communications Tianjin Port Engineering Research Institute, Tianjin 300202, China)

Abstract Cement mortar mixed with rubber powder being used as repair material for damaged pavement, its performance of cold-resistance should be able to meet the requirements of airports in high cold area. The effects of mesh number and content of rubber powder in cement mortar on frost resistance and mechanical properties are studied through freeze-thaw cycle tests. The effects are determined by adopting two-factor analysis of variance and range analysis. The effects of rubber powder on the microstructure and products during hydration of cement mortar are revealed by SEM and XRD. The results show that the mesh number and content of rubber powder cement mortar have significant effects on the frost resistance and compressive strength, but the interaction between them is not significant. When the mesh number of rubber powder is 30 mesh and the dosage is 50%, the antifreeze performance is the best. SEM images show that the addition of rubber powder can block the development for micro-cracks, and the XRD results

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122018C019);天津市教委科研计划项目(2023KJ236)

作者简介: 张静(1988—),女,河北冀县人,博士,研究方向为机场道面材料与结构、机场规划设计等。E-mail: 13920530692@126.com

引用格式: 张静, 张新宇, 李婷婷, 等. 高寒环境下橡胶粉掺入对水泥砂浆的抗冻性能影响[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 111-118.
ZHANG Jing, ZHANG Xinyu, LI Tingting, et al. The Effect of Rubber Powder Addition on the Anti-Freeze Performance of Cement Mortar in High Cold Environment[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 111-118.

show that 30-mesh rubber powder can enable the hydration reaction between rubber powder and cement mortar to continue efficiently.

Key words alpine environment; rubber powder cement mortar; freezing resistance; mechanical property; microscope property

高寒机场受地形、气候等因素的影响,机场道面容易出现因温度变化引起的裂缝,尤其在冬季冻融循环作用下,裂缝受到冰雪融化后的积水侵蚀,导致道面产生坑洼和凹陷,是造成机场混凝土道面早期损坏的重要原因之一。因此,用于修复高寒地区机场毁伤道面的材料,需要有较高的抗冻性能。目前用于寒冷地区机场毁伤道面修补的材料主要有沥青类、水泥类及聚合物类,考虑成本及强度,水泥类材料仍然是最主要的修复材料。橡胶粉这一材料主要来源于废旧轮胎,具有较高的生态价值和经济价值。使用橡胶粉可以增加水泥砂浆的延展性,改善水泥砂浆的冻融特性。在寒区道面修补中,橡胶水泥砂浆放热低,可在低温下施工,橡胶粉为憎水性材料,养护阶段应用塑料膜覆盖表面,保证湿度的同时也保持温度相对稳定。由于橡胶粉在水泥砂浆中起到引气作用,提高孔隙率来改善材料的抗冻性能,因此研究当使用掺入橡胶粉的水泥砂浆作为高寒机场毁伤道面修补材料时,其抗冻性能与普通水泥砂浆相比有何差异化表现,并且从微观结构与成分组成分析低温下橡胶水泥砂浆的强度增强机理。

近年来,国内外将橡胶粉水泥砂浆的技术应用于实际工程中,并取得了一定的应用效果。许金余等^[1]证明当冻融循环次数相同时,掺入橡胶粉的粒径越小,橡胶混凝土的质量损失率也越小。徐金花^[2]在混凝土中掺入 5%~15% 橡胶粉进行快速冻融实验,试样强度下降不超过 17%,且其抗渗及抗盐蚀性能均得到提高。Wang 等^[3]在水泥固化土中加入橡胶粉进行冻融循环试验,橡胶水泥固化土的抗压强度在第 6~9 次冻融循环之间达到峰值。Li 等^[4]将废轮胎橡胶作为集料掺入水泥混凝土中,该混凝土的抗冻融损伤能力随着橡胶粉掺量的增加而增强。薛刚等^[5]发现在混凝土中掺入 5% 和 10% 的橡胶粉,有利于冻融循环后钢筋与混凝土间的锚固性能;何智海等^[6]的研究解释了掺入橡胶粉的混凝土能够提升抗冻性的作用机理。Mohajerani 等^[7]表明在 40 MPa 混凝土拌合物和 0.6% 橡胶粉掺量下,橡胶混凝土拌合物的冻融耐久性得到改善。张银超等^[8]对橡胶粉砂浆的抗压性能及干缩性能进行研究,证明橡胶粉掺量增加和目数变大都会减小砂浆抗压强度。Rashad 等^[9]研究表明掺入了橡胶粉的水泥砂浆在冻融循环试验中抗冻性能表现良好;

龚建清等^[10]研究稻壳灰与橡胶粉掺入水泥砂浆,表明随着橡胶粉掺量的不断增加,抗冻性得到了较明显的提高。Pham 等^[11]用未处理的橡胶和有聚合物涂层的橡胶替代砂制作水泥试件,冻融循环后未处理组水泥质量损失率更低,并且仍保持较高的强度。Gesoglu 等^[12]使用不同程度处理的废弃轮胎橡胶替代水泥粗骨料,其中 10% 橡胶含量试件质量损失率较低,且深度加工而成的橡胶颗粒组的力学性能更好。Huang^[13]等研究表明橡胶粒径在 3~5 mm 含量为 10% 的水泥混凝土抗盐冻性能最佳。Maddalena^[14]使用不同粒径橡胶纤维及颗粒来替代 20% 水泥骨料,其中直径低于 0.5 mm 的颗粒组抗冻性最好。

上述研究成果在很大程度上推动了橡胶粉水泥砂浆在实际工程中的应用,但多因素同时作用于材料时的影响效果、交互关系及作用机理的研究结果尚不清晰。因此本文基于冻融循环试验研究使用橡胶粉水泥砂浆作为修复高寒地区机场毁伤道面材料,讨论橡胶粉目数和掺量两因素分别对强度损失率及质量损失率有何影响,二者之间交互作用如何,橡胶粉水泥砂浆与普通水泥砂浆相比在抗冻性能方面有何差异化表现;使用 SEM 观察橡胶粉水泥砂浆微观结构,使用 XRD 分析橡胶粉对于水化过程的影响,从而揭示橡胶粉增强水泥砂浆抗冻性的作用机理。为橡胶粉水泥砂浆修复机场毁伤道面的实际运用提供理论指导。

1 橡胶粉增强水泥砂浆抗冻性原理

水泥砂浆在冻融循环下的损伤主要源于基体水分形态的变化,当前主要理论有静水压理论、渗透压理论、冰晶生长理论^[15]等,这些理论是根据水泥砂浆基体中自由水或孔隙水在冻融环境中的不同表现而表征出的不同损伤理论。橡胶混凝土中,橡胶粉憎水性较强,比表面积较大,因此表面吸附的水膜更多,冻融循环下水膜状态改变进而增加橡胶硬度,并且橡胶作为高弹性材料,在冻融循环过程中,可以反复压缩和回弹,缓解水泥砂浆部分内部应力,并且限制基体中因水结冰造成的裂缝发展,过程如图 1。同时橡胶粉起到引气作用,提高试件含气量,平衡内部的孔隙结构。



图 1 橡胶水泥砂浆抗冻性机理

Fig. 1 Frost resistance mechanism of rubber cement mortar

2 橡胶粉水泥砂浆抗冻性试验

2.1 实验原材料与集料级配

采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,其基本化学成分及力学基本性能详见表 1 和表 2。

表 1 普通硅酸盐水泥化学成分

Tab. 1 Chemical composition of ordinary portland cement

项目	氧化钙	氧化硅	氧化铝	氧化镁	氧化铁	氧化钾	氧化磷	氧化钠	氧化钛	三氧化硫
实测值/%	64.37	19.28	4.20	3.90	3.78	0.74	0.12	0.30	0.26	2.56

表 2 普通硅酸盐水泥物理力学基本性能

Tab. 2 Basic physical and mechanical properties of ordinary Portland cement

项目	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		比表面积/ cm ²	稳定性
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
实测值	164	363	18.5	48.9	7.6	11	473	合格

试验采用河砂,要求孔径为能够通过 0.6 mm 筛,天然砂的细度模数为 1.82,测得表观密度为 1 568 g/cm³,14 d 标准条件养护下试件膨胀率小于 0.1%。试验用砂粒径见表 3,累积筛分平衡指在筛分过程中,通过不同筛子的颗粒分布达到稳定状态。

表 3 天然砂的粒径

Tab. 3 Particle size of natural sand

筛孔尺寸/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
累积筛分平衡	0	0	0	0	83	96

水为洁净的饮用水。2 种橡胶粉除目数外保证 60 目(0.250 mm)橡胶粉的主要性能指标及其检测报告见表 4。

表 4 橡胶粉主要性能指标

Tab. 4 Main performance indicators of rubber powder

检测项目	加热减量/ %	水灰比/ %	丙酮提取/ %	橡胶含量/ %	炭黑含量/ %	铁含量/ %	纤维含量/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)
结果	0.31	6.2	5.4	67	32.6	0.05	0.02	1.05

2.2 橡胶水泥砂浆试验样品制备

根据《JTG 3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》进行冻融循环试验,水泥砂浆试件尺寸 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱试件,成型后 4~5 h 脱模,平行试样个数为 3 个,将脱模后的试件用塑料薄膜覆盖,放入标准养护室内进行养护。

微观实验样品制备:取测试样品试件,压碎并且选取块状样品,使用无水乙醇浸泡 4 h,倒出无水乙醇,添加新的无水乙醇浸泡 24 h,使其停止水化,随后取出样品放入恒温箱 60 ℃烘干 6 h,最后取出样品用研钵研磨通过 60 μm 方孔筛,制样流程见图 2。

扫描电镜(SEM)型号是由 HITACHI 厂家生产的 S-4800 型,对橡胶水泥界面处放大 10 000 倍进行观察。XRD 仪器为德国布鲁克公司生产的 D8 ADVANCE X 射线衍射仪,扫描速度为 3°/min,扫描角度 5°~90°。

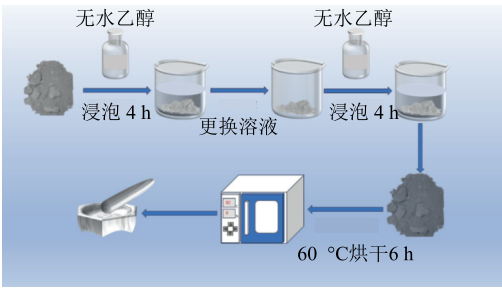


图 2 制样流程

Fig. 2 Sample preparation process

2.3 橡胶水泥砂浆抗冻性试验方法

冻融循环次数通过前期实验确定为 80~210 次,依据对水泥砂浆冻融循环次数的研究,在冻融循环 210 次以上和 80 次以下,冻融循环对水泥砂浆试件的强度影响基本稳定,因此自然冻融循环次数取 80~210 次,对应使用冻融循环机的循环次数为 10~26 次。橡胶粉掺量为橡胶粉等体积替换基准水泥砂浆中砂的体积分数。因此,研究橡胶粉掺量对水泥砂浆抗冻性能的影响时,分别在掺入目数为

30 目及 60 目的条件下,掺入 10%、30%、50%、70% 的橡胶粉,分别冻融为 10 次、20 次、26 次,并设置不掺入橡胶粉的对照组,方案及编号见表 5。

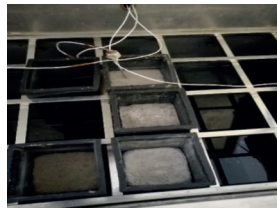
表 5 试验方案
Tab. 5 Test scheme

目数	30			60		
冻融次数	10	20	26	10	20	26
0%掺入量对应 试件编号	L-0-1	L-0-2	L-0-3	L-0-1	L-0-2	L-0-3
10%掺入量对应 试件编号	L-1-1	L-1-5	L-1-9	L-2-1	L-2-5	L-2-9
30%掺入量对应 试件编号	L-1-2	L-1-6	L-1-10	L-2-2	L-2-6	L-2-10
50%掺入量对应 试件编号	L-1-3	L-1-7	L-1-11	L-2-3	L-2-7	L-2-11
70%掺入量对应 试件编号	L-1-4	L-1-8	L-1-12	L-2-4	L-2-8	L-2-12

按照试验方案,开始冻融循环试验,并设置未掺入橡胶粉试件作为对照。取冻融的一组试件放置在冻融循环试验机中,如图 3 所示,按照规范要求进行试验。记录各组数据的质量损失量和强度损失量,并测量记录试块的抗压强度。



(a) 冻融循环试验机

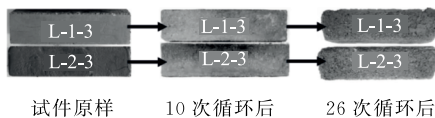


(b) 冻融循环实验

图 3 冻融循环试验设备及环境

Fig. 3 Freeze-thaw cycle test equipment and environment

试件在冻融循环试验的条件下外观发生变化,如图 4,未经过冻融循环试验的试件表面平整,轮廓清晰;10 次冻融循环后,试件外观出现颗粒状凹陷,轮廓较为清晰;26 次冻融循环后,试件表面出现明显颗粒状凹陷,且凹陷较深,已无最初的轮廓,局部出现裂痕。



试件原样 10 次循环后 26 次循环后

图 4 冻融循环试验试件

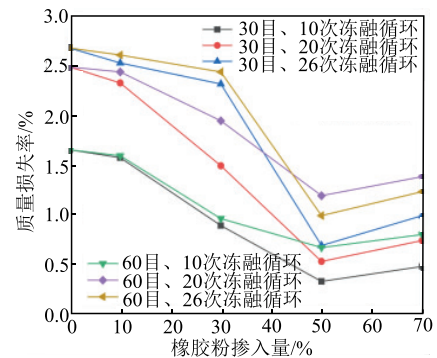
Fig. 4 Cycle of freezing and thawing test piece

3 橡胶粉水泥砂浆抗冻性能

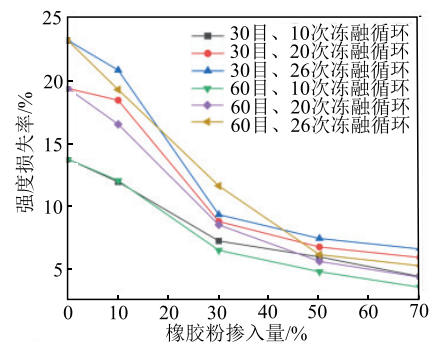
3.1 橡胶粉水泥砂浆抗冻性能试验分析

测试组与对照组试验结果如图 5 所示,由试验结果可知掺入橡胶粉后的水泥砂浆在质量损失率与

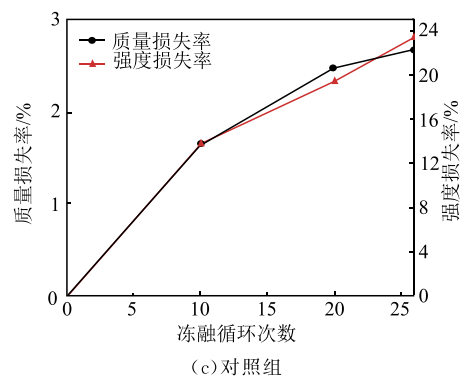
强度损失率都有较大的影响。没有掺入橡胶粉的水泥砂浆的质量损失率与强度损失率都随冻融次数的增加而增长,而掺入橡胶粉的水泥砂浆随着冻融次数的增加其质量损失率与强度损失率都有不同程度的降低。在橡胶粉掺量的角度看,图 5(a)可见一个明显的拐点,即在橡胶粉掺量为 50% 的情况下其质量损失率降到最低,由图 5(b)可见强度损失率随着橡胶粉掺量的增加而降低;在橡胶粉目数的角度看,掺入 30 目橡胶粉的水泥砂浆在相同的冻融条件下质量损失率表现较 60 目更佳,掺入 60 目橡胶粉的水泥砂浆在相同的冻融条件下强度损失率表现并无明显规律。



(a) 实验组质量损失率



(b) 实验组强度损失率



(c) 对照组

图 5 冻融循环试验质量损失率与强度损失率结果

Fig. 5 Quality loss rate and strength loss rate cycle of freezing and thawing

3.2 橡胶粉掺量及目数影响分析

本试验设计为检验橡胶粉目数、掺量以及目数掺量的交互效应对橡胶粉水泥砂浆的抗冻性能的影响。

响的研究。首先基于 SPSS 对橡胶粉目数及掺量进行双因素方差分析,验证掺量、目数及二者交互效应的影响关系;其次基于双因素方差分析进行效应量分析,确定各因素影响差异幅度情况。

3.2.1 双因素方差分析

橡胶粉水泥砂浆冻融循环试验结果的方差分析见表 6。其中, R^2 值表示自变量解释的响应变量总变异的比例。“*”表示结果在 0.05 的显著性水平上为显著,“**”表示结果在 0.01 的显著性水平上为显著,“×”表示双因素交互作用。 F 值用于检验 2 个或多个样本均值是否存在显著性差异。 F 值越大,因素对响应变量的影响越显著。 p 值用于检验单因素的主效应、多因素的交互效应对于显著水平(如 0.05 或 0.01)是否显著。

表 6 质量损失率方差分析

Tab. 6 Quality loss rate ANOVA

源	平方和	自由度	均方	F	p
常数项	75.515	1	75.515	197.067	0.000**
目数	2.990	2	1.495	3.902	0.034*
掺入量/%	15.601	4	3.900	10.178	0.000**
目数×掺入量	6.698	8	0.837	2.185	0.065
残差	9.580	25	0.383		

注: $R^2=0.571$; $p^*<0.05$; $p^{**}<0.01$

利用双因素方差分析研究橡胶粉目数和掺量对于质量损失率的影响关系,见表 7。从双因素方差分析结果可以看出:橡胶粉目数呈现出显著性($F=3.902, p=0.034<0.05$),说明主效应存在,橡胶粉目数会对质量损失率产生差异关系;掺量呈现出显著性($F=10.178, p=0.000<0.05$),说明主效应存在,掺量会对质量损失率产生差异关系;橡胶粉目数和掺量之间没有呈现出显著性($F=2.185, p=0.065>0.05$),说明二者之间不存在二阶效应,即二者之间无交互影响。

表 7 强度损失率方差分析

Tab. 7 Strength loss rate ANOVA

源	平方和	自由度	均方	F	p
常数项	4 094.307	1	4 094.307	202.314	0.000**
目数	82.261	2	41.131	2.032	0.152
掺入量/%	1 208.798	4	302.200	14.933	0.000**
目数×掺入量	368.351	8	46.044	2.275	0.056
残差	505.934	25	20.237		

注: $R^2=0.669$; $p^{**}<0.01$

利用双因素方差分析研究橡胶粉目数和掺量对于强度损失率的影响关系,见表 8。从双因素方差分析结果可以看出:橡胶粉目数没有呈现出显著性($F=2.032, p=0.152>0.05$),说明橡胶粉目数并不会对强度损失率产生差异关系;掺量呈现出显著性($F=14.933, p=0.000<0.05$),说明主效应存在,掺量会对强度损失率产生差异关系;橡胶粉目数和掺量之间没有呈现出显著性($F=2.275, p=0.056>0.05$),说明二者之间不存在二阶效应,即二者之间无交互影响。

3.2.2 差异幅度分析

由双因素方差分析可知,橡胶粉目数及掺量对橡胶粉水泥砂浆的质量损失率都有显著影响,且橡胶粉的掺量也对橡胶粉水泥砂浆的强度损失率有显著影响,因此,通过计算 Partial η^2 及 Cohen's f 值表示效应量的大小,见表 8,通过效应量来研究两因素的差异幅度情况。

表 8 效应量指标

Tab. 8 Effect size measure

分析项目	SSB	SST	Partial η^2	Cohen's f
掺入量-强度损失率	981.036	1 529.434	0.641	1.338
目数-强度损失率	93.799	1 529.434	0.061	0.256
掺入量-质量损失率	11.612	22.331	0.520	1.041
目数-质量损失率	0.783	22.331	0.035	0.191

由表 8 可知,橡胶粉掺量对强度损失率的影响效应量水平为大(Partial $\eta^2=0.641$, Cohen's $f=1.388$),对质量损失率的影响效应量水平也为大(Partial $\eta^2=0.520$, Cohen's $f=1.041$);橡胶粉目数对强度损失率的影响效应量水平为中(Partial $\eta^2=0.061$, Cohen's $f=0.256$),对质量损失率的影响效应量水平为小(Partial $\eta^2=0.035$, Cohen's $f=0.191$),即橡胶粉掺量对橡胶粉水泥砂浆的抗冻性能影响大于目数的影响。

3.3 橡胶粉水泥砂浆抗冻性能研究

通过方差分析,橡胶粉目数及掺量之间的交互影响可忽略不计,以下采用单因素分析法研究目数和掺量对橡胶粉水泥砂浆抗冻性能及抗压强度的影响。

对掺量分别为 10%、30%、50%、70%,目数为 30 目的橡胶粉水泥砂浆进行相同条件下的冻融循环试验,图 6 为 30 目橡胶粉水泥砂浆质量损失率折线图,由图可见,橡胶粉水泥砂浆的质量变化率随着冻融次数的增加呈现增长的趋势,掺量为 50%的橡胶粉水泥砂浆质量损失率最低。同理,以相同的实

验方法对橡胶粉目数为 60 目的橡胶粉水泥砂浆进行冻融循环试验,得到相同的实验结果,如图 7 所示,即掺量为 50% 的橡胶粉水泥砂浆质量损失率同水平最低。

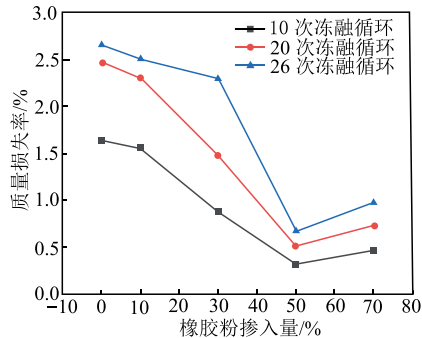


图 6 30 目橡胶粉水泥砂浆质量损失率

Fig. 6 Mass loss rate of 30-mesh rubber powder cement mortar

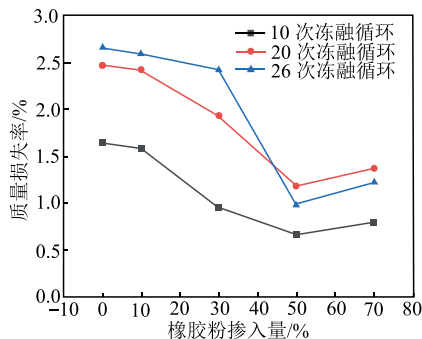


图 7 60 目橡胶粉水泥砂浆质量损失率

Fig. 7 Mass loss rate of 60-mesh rubber powder cement mortar

对掺量分别为 10%、30%、50%、70%, 目数为 30 目的橡胶粉水泥砂浆进行相同条件下的冻融循环试验,图 8 为 30 目橡胶粉强度损失率折线图,由图可见,强度变化率随着冻融次数的增加而增长,同时在相同冻融条件下,随着橡胶粉掺量的增加,橡胶粉水泥砂浆的强度损失率呈下降趋势。同理,对橡胶粉目数为 60 目的橡胶粉水泥砂浆进行冻融循环试验,得到的结果一致,如图 9 所示,即橡胶粉水泥砂浆随着橡胶粉掺量的增加其抗压强度降低。

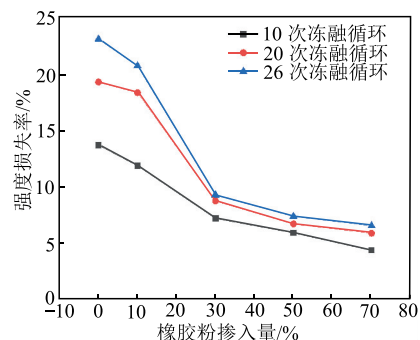


图 8 30 目橡胶粉水泥砂浆强度损失率

Fig. 8 Strength loss rate of 30-mesh rubber powder cement mortar

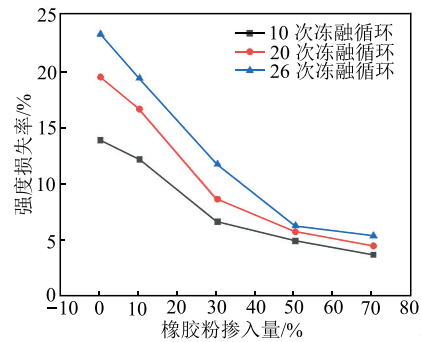


图 9 60 目橡胶粉水泥砂浆强度损失率

Fig. 9 Strength loss rate of 60-mesh rubber powder cement mortar

橡胶粉与砂浆之间的结合是通过物化学作用实现的。由于橡胶粉的微粒子大小和表面活性较高,与水泥砂浆中的颗粒物质产生机械锁定和物理吸附作用从而填充砂浆孔隙,使橡胶粉与砂浆之间形成一定的结合力^[16]。同时橡胶粉表面含有极性官能团,可以与水泥砂浆中的水化产物反应,形成化学键,从而增强橡胶粉与砂浆之间的结合力^[17]。在冻融情况下,水泥砂浆中的水分在结冰时会膨胀,从而导致水泥砂浆的体积发生变化,产生的应力破坏砂浆的结构。而橡胶粉具有较好的弹性和韧性,可以吸收一部分应力,砂浆的应变增大,柔韧性增加^[16],从而减少水泥砂浆的破坏。此外,橡胶粉还可以在冻融循环中起到填充和支撑作用^[3],防止水泥砂浆的裂缝扩大,从而提高水泥砂浆的抗冻性。

橡胶粉水泥砂浆的抗冻性能与抗压性能均受到橡胶粉目数与掺量的影响,橡胶粉掺量对橡胶粉水泥砂浆抗压强度的影响程度远大于橡胶粉水泥砂浆中橡胶粉目数,同时橡胶粉的掺量对橡胶粉水泥砂浆抗冻性能的影响程度也远大于橡胶粉水泥砂浆中橡胶粉目数。但在方差分析中可以看出,橡胶粉目数与掺量不存在二阶效应,即不论是对抗压强度还是抗冻性能都不存在交互影响。故可以寻找强度下降少且抗冻性能提升的一个平衡值,因此,取橡胶粉目数为 30 目掺量为 50% 以方便施工,同时保障有良好的抗冻性能。

3.4 橡胶水泥砂浆微观结构与成分分析

使用 SEM 观察水泥砂浆中橡胶粉周边区域形貌,并结合 XRD 技术分析其中的产物类型。

橡胶水泥砂浆的扫描电镜如图 10,根据图片显示,在水泥基体与橡胶颗粒的接触区域附近,水泥基出现微裂痕,但裂痕宽度随着靠近界面过渡区而减小,并且裂痕的走向也发生变化,如图 10(a)所示。说明在冻融条件下,当橡胶水泥砂浆试件受力破坏时,橡胶颗粒作为高弹性材料,充当“缓冲垫”吸收一定的力与能量,降低裂缝的破坏程度。同时形变后

产生的弹力沿橡胶表面向四周发散。如图 10(b)所示弹力对裂缝作用,各方向力变小,因此裂痕变小且方向改变,有效降低水泥砂浆内部微裂缝的产生和扩大,提高了水泥砂浆在冻融下的韧性。

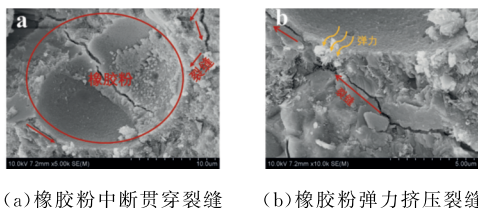


图 10 橡胶粉水泥界面

Fig. 10 Rubber-cement interface

运用 XRD 观察橡胶的引入对水泥水化反应的影响,根据图 11 图谱所示,橡胶粉水泥砂浆早期的主要产物有 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石等,说明橡胶粉的掺入并未改变水泥水化的产物种类。在试验过程中使用 2 种直径的橡胶颗粒等体积替换砂,30 目组中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石波峰值与 60 目组差距并不明显,但 30 目中 CaCO_3 波峰值远高于 60 目组,这是由于水泥水化过程中的产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中 CO_2 反应生成,表明添加 30 目橡胶粉水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 更多,水化反应更充分。

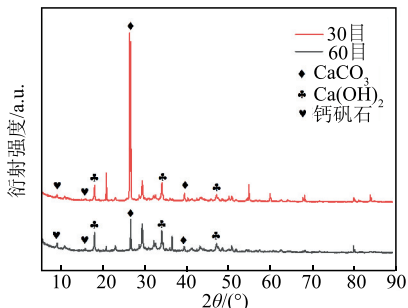


图 11 橡胶水泥 XRD 图谱

Fig. 11 XRD pattern of rubber cement

4 结论

1) 橡胶粉水泥砂浆的强度损失率受到橡胶粉掺量的影响程度是显著的 ($F=14.933, p=0.000<0.05$), 受到橡胶粉目数的影响程度是不显著的 ($F=2.032, p=0.152>0.05$), 掺量与目数之间不存在交互影响 ($F=2.275, p=0.056>0.05$); 橡胶粉水泥砂浆的质量损失率受到橡胶粉目数 ($F=3.902, p=0.034<0.05$)、橡胶粉掺量 ($F=10.178, p=0.000<0.05$) 的影响程度都是显著的, 两因素之间不存在交互影响 ($F=2.185, p=0.065>0.05$)。

2) 橡胶粉掺量对强度损失率影响效应量水平 (Partial $\eta^2=0.641$, Cohen's $f=1.388$) 和质量损

失率的影响效应量水平 (Partial $\eta^2=0.520$, Cohen's $f=1.041$) 均为大, 橡胶粉目数对强度损失率的影响效应量水平为中 (Partial $\eta^2=0.061$, Cohen's $f=0.256$), 对质量损失率的影响效应量水平为小 (Partial $\eta^2=0.035$, Cohen's $f=0.191$), 即橡胶粉掺量对橡胶粉水泥砂浆的抗冻性能影响大于目数的影响。

3) 通过冻融循环条件下橡胶粉水泥砂浆质量损失率及强度损失率的影响研究, 以及不同粒径橡胶粉含量下水泥砂浆水化产物和微观结构确定当橡胶粉目数为 30 目, 掺量为 50% 时其抗冻性能最优。

4) SEM 形貌像显示橡胶粉掺入可阻断微裂缝发展, XRD 结果显示 30 目橡胶粉更能保证橡胶粉水泥砂浆的水化反应高效进行。

参考文献

- [1] 许金余, 李赞成, 罗鑫. 橡胶混凝土抗冻性的对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 800-805.
XU J Y, LI Z C, LUO X. Comparative Study on the Frost-Resisting Properties of Rubber Powder Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(4): 800-805. (in Chinese)
- [2] 徐金花. 考虑环境作用的橡胶集料混凝土力学性能及耐久性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
XU J H. Study on Mechanical Properties and Durability of Rubber Aggregate Concrete Considering Environmental Action [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016. (in Chinese)
- [3] WANG F C, PING X W, ZHOU J H, et al. Effects of Crumb Rubber on the Frost Resistance of Cement-Soil [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 120-132.
- [4] LI Y, ZHANG S, WANG R J, et al. Potential Use of Waste Tire Rubber as Aggregate in Cement Concrete—a Comprehensive Review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 1183-1201.
- [5] 薛刚, 孙立所, 邵建文, 等. 高掺量橡胶集料水泥砂浆收缩性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3252-3259.
XUE G, SUN L S, SHAO J W, et al. Shrinkage Performance of Cement Mortar with High Content of Rubber Aggregate [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3252-3259. (in Chinese)
- [6] 何智海, 李增, 詹培敏, 等. 橡胶粉对水泥基材料性能影响的研究进展 [J]. 混凝土, 2020(6): 73-78.
HE Z H, LI Z, ZHAN P M, et al. Research Progress of Effect of Rubber Powder on the Properties of Cement-Based Materials [J]. Concrete, 2020(6): 73-78. (in Chinese)

- [7] MOHAJERANI A, BURNETT L, SMITH J V, et al. Recycling Waste Rubber Tyres in Construction Materials and Associated Environmental Considerations: a Review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 104679.
- [8] 张银超, 李艳春, 刘大维. 橡胶粉对砂浆抗压强度和干缩性能的影响研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 270-273.
- ZHANG Y C, LI Y C, LIU D W. Study on Influence of Rubber Powder on Compressive Strength and Dry Shrinkage of Mortar[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 270-273. (in Chinese)
- [9] RASHAD A M, SADEK D M. Behavior of Alkali-Activated Slag Pastes Blended with Waste Rubber Powder under the Effect of Freeze/Thaw Cycles and Severe Sulfate Attack[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120716.
- [10] 龚建清, 包文进. 复掺稻壳灰/硅灰以及橡胶粉对水泥砂浆性能的影响[J]. 混凝土, 2020(6): 137-142.
- GONG J Q, BAO W J. Properties of Cement Mortar Containing Rice Husk Ash/Silica Fume and Rubber Powder[J]. Concrete, 2020(6): 137-142. (in Chinese)
- [11] PHAM N P, TOUMI A, TURATSINZE A. Effect of an Enhanced Rubber-Cement Matrix Interface on Freeze-Thaw Resistance of the Cement-Based Composite[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 528-534.
- [12] GESOĞLU M, GÜNEYİSİ E, KHOSHNAW G, et al. Abrasion and Freezing-Thawing Resistance of Permeable Concretes Containing Waste Rubbers[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 19-24.
- [13] HUANG X, WANG T Y, PANG J Y, et al. Experimental Study on the Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Apparent and Mechanical Properties of Rubber Concrete under Chloride Environment[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(4): 4133-4153.
- [14] MADDALENA R. Freeze/Thaw Resistance of Mortar with Recycled Tyre Waste at Varying Particle Sizes[J]. Materials, 2023, 16(3): 1301.
- [15] 李琦, 徐飞, 郑贺民, 等. 冻融循环作用下橡胶混凝土蠕变特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3261-3268.
- LI Q, XU F, ZHENG H M, et al. Experimental Study on Creep Characteristics of Rubber Concrete under Freeze-Thaw Cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3261-3268. (in Chinese)
- [16] 牛文, 唐德密. 橡胶粉掺量与粒径对水泥砂浆抗裂性和耐磨性的影响研究[J]. 施工技术, 2017, 46(17): 73-77.
- NIU W, TANG D M. Study on Effect of Rubber Powder Mixing Amount and Particle Size on Crack Resistance and Wear Resistance of Cement Mortar[J]. Construction Technology, 2017, 46(17): 73-77. (in Chinese)
- [17] 李龙梓, 马建军, 张承志, 等. 废旧轮胎橡胶粉对水泥砂浆力学性能影响机理研究[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 天津: 中国环境科学学会, 2021: 420-435.
- LI L Z, MA J J, ZHANG C Z, et al. The Mechanism of Influence of Waste Tire Rubber Powder On mechanical Properties of Cement Mortar[C]//Chinese Society for Environmental Sciences Annual Science and Technology Conference 2021—Environmental Engineering Technology Innovation and Application(III). Tianjin: Chinese Society for Environmental Sciences, 2021: 430-435. (in Chinese)

(编辑: 韩茜)