

镍渣改性橡胶水泥砂浆性能试验研究

Experimental Study on the Performance of Nickel Slag Modified Rubber Cement Mortar

周 敏^{1,2}, 徐国宾^{1,2}, 张 蔚^{1,2}, 牛冬瑜³, 陈 锋⁴, 李永进⁴, 李广慧⁵

(1. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福州 350025; 2. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福州 350025;
3. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710061; 4. 福建江夏学院 工程学院, 福州 350025;
5. 福建理工大学 材料科学与工程学院, 福州 350025)

摘 要: 利用人工加速老化、纳米压痕、RCM 等测试方法, 研究掺镍渣对橡胶水泥砂浆力学性能、耐久性能及微观性能的影响。结果表明: 镍渣掺入及加速老化均能提高橡胶水泥砂浆的抗压强度、抗折强度、压折比及动弹性模量, 且加速老化对高橡胶掺量水泥砂浆动弹性模量影响大; 镍渣能改善橡胶水泥砂浆的耐磨性, 当镍渣体积率为 5%、橡胶体积率为 15% 时, 磨坑长度最小; 镍渣改善了橡胶水泥砂浆微界面区域弹性模量和硬度, 使界面区的微观力学性能得到了提高; 镍渣对橡胶水泥砂浆早期干燥收缩具有较好约束作用, 同时有助于改善水泥砂浆抗氯离子渗透性能, 当镍渣体积率为 15%、橡胶颗粒体积率为 5% 时, 水泥砂浆氯离子扩散系数最小。

关键词: 镍渣; 改性; 橡胶水泥砂浆; 纳米压痕; 人工加速老化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0037-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.007

ZHOU Min^{1,2}, XU Guobin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, NIU Dongyu³, CHEN Feng³, LI Yongjin⁴, LI Guanghui⁵

(1. Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350025, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350025, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 4. Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350025, China; 5. Fujian University of Science and Technology, Fuzhou 350025, China)

Abstract: The effects of nickel slag on the mechanical properties, durability, and microscopic properties of rubber particle cement mortar was studied by artificial accelerated aging, nano-indentation, RCM and other testing methods. The results showed that the addition of nickel slag and accelerated aging can improve the compressive strength, flexural strength, compression bending ratio, and dynamic elastic modulus of rubber cement mortar, and accelerated aging has a significant impact on the dynamic elastic modulus of high rubber content cement mortar; Nickel slag can improve the wear resistance of rubber cement mortar. When the volume fraction of nickel slag is 5% and the volume fraction of rubber is 15%, the length of the grinding pit is minimized; Nickel slag improves the elastic modulus and hardness of the micro interface area of rubber cement mortar, enhancing the micro mechanical properties of the interface area; Nickel slag has a good restraining effect on the early

基金项目: 2025 年福建省环保科技计划项目 (2025R018)。

作者简介: 周 敏 (1978—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 固废资源化及新型材料研发。

收稿日期: 2024-06-17

材料科学

drying shrinkage of rubber cement mortar, and also helps to improve the resistance of cement mortar to chloride ion penetration. When the volume fraction of nickel slag is 15% and the volume fraction of rubber particles is 5%, the chloride ion diffusion coefficient of cement mortar is the smallest.

Key words: nickel slag; modification; rubber cement mortar; nano-indentation; artificial accelerated aging

0 引言

镍渣是电炉工艺生产镍合金时产生的固废，其主要成分为 SiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 等，综合利用率不高。目前，国内镍渣主要被用于填充材料、建筑装饰材料等非金属资源的处理以及有价金属的回收再利用。李克庆等^[1]研究利用镍渣制备充填胶结料，并用于井下填充；张涛等^[2]利用镍渣与尾矿砂进行复掺混合制成骨料，并通过配方优化制备矿山充填材料；樊佳磊等^[3]在镍渣作为生产水泥原料方面进行了研究；周琦等^[4]通过对镍渣中微晶玻璃的制备及铁的回收利用进行了研究，以含铁镍渣和粉煤灰混合作为主要原料，适当的调整成分，制 $\text{R}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系微晶玻璃；孙志高等^[5]以水玻璃作为激发剂，研究活化处理后的富镁镍渣作为胶凝材料的工程性能和水化产物；黄芳等^[6]以镍渣、铝厂污泥和高岭土尾矿为原料，通过不同原料比例、烧成温度及保温时间的研究合成出莫来石；王宁等^[7]研究出从镍渣中回收硫酸镍、硫酸铜、硫酸钴的工艺，有价金属的回收方面主要是利用湿法浸出等回收镍钴铜等有价金属，但在回收过程中会产生大量的废酸等，废酸的处理与排放会产生新的问题。废旧橡胶在自然条件下难降解，如不能有效处理和资源化利用，废橡胶将成为黑色污染，影响环境^[8-9]。王旭等^[10]研究发现掺入橡胶对水泥基材料强度、耐磨性等有不利影响；谢李等^[11]利用改性橡胶制备透水混凝土，同时引入威布尔分布，通过构建改性橡胶透水混凝土修正 Coffin-Manson 老化寿命模型，对改性橡胶透水混凝土进行寿命预测；杨友志等^[12]研究聚乙烯醇改性废弃橡胶对水泥基复合材料耐久性能的影响，表明聚乙烯醇改性废弃橡胶在改善水泥基复合材料的毛细吸水性、抗氯离子渗透性、抗冻融能力以及抗碳化性能方面具有一定的效果；张金松等^[13]通过单轴抗压试验与抗冲击试验分析不同微硅粉掺量、橡胶粒径和养护龄期试件的峰值应力、应变、弹性模量、抗冲击强度等，研究微硅

粉-橡胶/水泥砂浆的力学性能。

目前对橡胶水泥基材料研究多集中于橡胶在力学性能方面的影响，但对其综合性能研究较少，尤其是复合骨料对微观力学方面的研究尚未发现。因此，采用不同比例镍渣与橡胶复合骨料制备水泥砂浆，结合人工加速老化、纳米压痕、抗压强度、RCM 等测试方法，研究镍渣对橡胶水泥砂浆工作性、力学性能、微观结构及耐久性的影响，以期对镍渣和废弃橡胶高值化、资源化利用提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 原材料

选用 P·O 42.5R 水泥和 S95 级粒化高炉矿渣粉，主要性能见表 1。骨料选用石英砂、镍渣及废旧橡胶颗粒，其中石英砂由 0.63~1.18、0.2~0.63 和 0.1~0.2 mm 三个粒径按 7:2:1 比例均匀混合而成，其堆积密度为 1 550 kg/m³。镍渣和废旧橡胶颗粒均由粒径为 0.2~0.63 和 0.63~1.18 mm 按质量比例 6:4 混合而成，镍渣堆积密度为 1 600 kg/m³；橡胶颗粒堆积密度为 450 kg/m³，体积吸水率 11%。改性组分由 HPWR-S 粉状减水剂、可再分散乳胶粉及 10 万黏度 HPMC 按 20:15:1 混合而成。

表 1 水泥和矿渣粉物理性能							
Table 1 Physical properties of cement and slag powder							
比表 面积/ (m ² /kg)	水泥					矿渣粉	
	凝结时间/min		28 d 抗压 强度 /MPa		28 d 抗折 强度 /MPa	比表面积/ (m ² /kg)	28 d 活性 指数 /%
	初凝	终凝					
365	135	225	48.1		7.2	450	103

1.2 试验方法

假定砂浆干料总体积 1 m³，其中胶凝材料总体积按 33% 计算，水泥与矿渣粉质量比为 4:1，骨料占砂浆干料总体积 67%，初始配比中骨料由石英砂和橡胶颗粒组成（其体积比为 7:3），固定石英砂体积率 47%，镍渣按不同体积比例取代橡胶颗粒，用水量为胶凝材料总质量的 45%，具体配比见表 2。

表 2 配合比
Table 2 The mix ratio

序号	水泥 / (kg/m ³)	矿渣粉 / (kg/m ³)	石英砂 /%	橡胶颗粒 /%	镍渣 /%	改性组分 /%
1#	800	200	47	20		3
2#	800	200	47	15	5	3
3#	800	200	47	10	10	3
4#	800	200	47	5	15	3
5#	800	200	47		20	3

1.2.1 人工加速老化试验

按表 2 制备不同配比的 40 mm × 40 mm × 160 mm 胶砂试件各 4 组和 100 mm × 100 mm × 400 mm 动弹性模量试件各 2 组，标准养护条件下养护至 28 d 后，取各不同配比制备的 40 mm × 40 mm × 160 mm 胶砂试件 2 组和 100 mm × 100 mm × 400 mm 动弹性模量试件 1 组进行人工加速老化试验，参考 GB/T 1865—2009《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》进行测试，以氙灯为光源模拟和强化光、热、空气、温度、湿度和降雨等主要因素，试样表面受波长 300 ~ 890 nm 光照，其辐射强度为 (1000 ± 200) W/m²，黑板温度 (55 ± 3) °C，相对湿度控制在 60% ~ 70%，降雨周期为降雨 18 min，间隔干燥 102 min，加速老化时间为 500 h，对比样则在标准养护条件（环境温度：(23 ± 2) °C，相对湿度：50% ± 5%）持续养护时间为 49 d。人工加速老化后进行力学性能试验（分别测试抗压强度、抗折强度、动弹性模量），与标准养护至相同龄期试件测试结果进行比较分析。

1.2.2 纳米压痕试验

试验采用 Hysitron Ti Premer 纳米压痕测试仪，选择老化前后具有代表性的样品，利用环氧树脂对样品进行固化，然后采用不同粒度的砂纸对其进行逐级打磨抛光处理，其制备样品如图 1 所示。采用矩

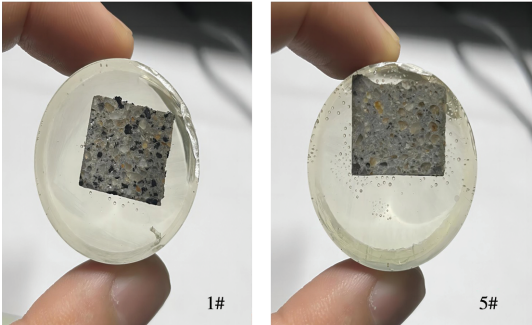


图 1 纳米压痕样品
Fig. 1 Nanoindentation samples

阵打点的方式，对橡胶颗粒或镍渣与水泥砂浆界面区进行扫描，压痕为 21 × 11 的长方形点阵，每两个点的间距为 10 μm，如图 2 所示。



图 2 压痕点阵示意图
Fig. 2 Schematic of indentation patterns

1.2.3 其他性能试验

流动度及力学性能（抗压强度和抗折强度）试验依据 JC/T 985—2017《地面用水泥基自流平砂浆》相关规定执行；干燥收缩值试验依据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》相关规定执行；耐磨性试验依据 GB/T 12988—2009《无机地面材料耐磨性能试验方法》相关规定执行，每个配比成型 5 块，试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 50 mm；抗氯离子渗透及动弹性模量试验依据 GB/T 50082—2024《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》相关规定执行。

2 试验结果与分析

2.1 流动度

如图 3 所示，随镍渣替代橡胶比例增加，流动度增加。由图 4 可知，橡胶颗粒外形粗糙，边缘不规则，存在较多长条状，增大了混合料流动阻力，同时橡胶颗粒存在一定的孔隙，具有吸水性，进一步降低了橡胶水泥砂浆的流动度，结果显示 1# 试样流

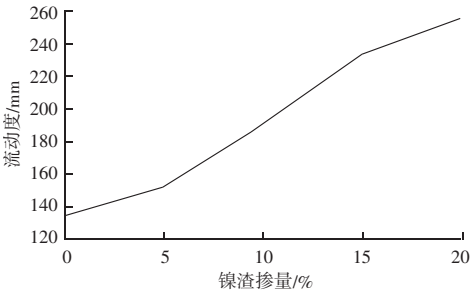


图 3 镍渣掺量对流动度影响
Fig. 3 The effect of nickel slag on fluid dynamics

材料科学

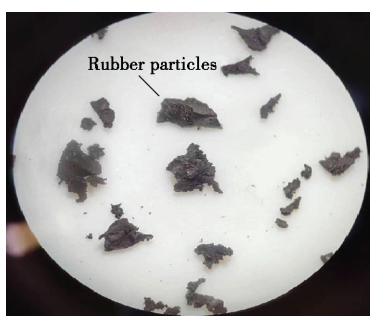


图4 橡胶颗粒微观图(40倍)

Fig.4 Microscopic diagram of rubber particle (40X)

动度仅为 135 mm，镍渣表面光滑，部分呈现玻璃形态，整体粒型圆润规整，能较好地改善拌合物工作性，但掺量过大时影响其保水性。镍渣掺量达到 20%，即完全替代橡胶颗粒时，砂浆出现轻微泌水。

2.2 力学性能

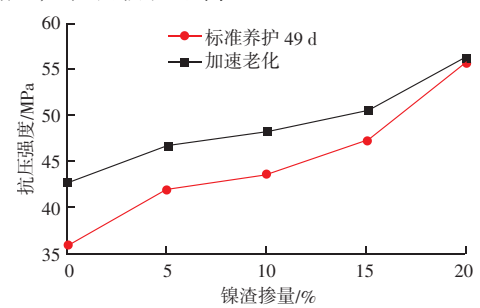
2.2.1 宏观力学性能

2.2.1.1 抗压强度和抗折强度

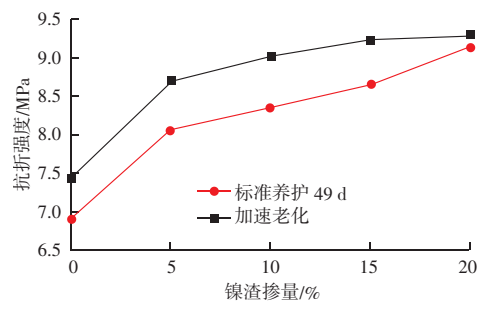
图5 为人工加速老化前后试样抗压强度和抗折强度结果对比。人工加速老化前后强度变化趋势基本一致，橡胶颗粒掺量越高，强度越低，20% 体积率橡胶颗粒水泥砂浆（1# 试件，未掺入镍渣）抗压强度最低，仅为 35.9 MPa，抗折强度为 6.85 MPa；随镍渣掺量增加，强度随之提高，当镍渣完全替代橡胶颗粒时，抗压强度和抗折强度最大，分别为 56.3 和 9.14 MPa。这主要是由于高掺量橡胶颗粒自身憎水特性，与水泥浆料结合能力弱，易形成界面过渡区，同时高弹性橡胶颗粒在压力下易变形，加速界面过渡区裂缝破坏，而高硬度镍渣替代软弱橡胶颗粒，则可提高砂浆整体骨架强度，减少薄弱区域，增加水泥砂浆抗压强度和抗折强度。由图5 (c) 可知，压折比随着镍渣掺量增加而增加，其值从 5.21 升高到 6.09，表明镍渣增加，砂浆体系韧性下降，表明过量的镍渣不利于橡胶水泥砂浆的韧性，因此从改善韧性角度出发，宜控制镍渣与橡胶体积复掺比例在 1:3 和 3:1 之间。

随着橡胶颗粒掺量增加，加速老化后强度增加较为明显，5% 橡胶颗粒替代率时标养试样抗压强度为 47.2 MPa，加速老化后抗压强度为 50.5 MPa，增加了 3.3 MPa；20% 橡胶颗粒替代率时 49 d 标养试样抗压强度为 35.9 MPa，加速老化抗压强度为 42.7 MPa；增加了将近 7 MPa，老化前后抗折强度

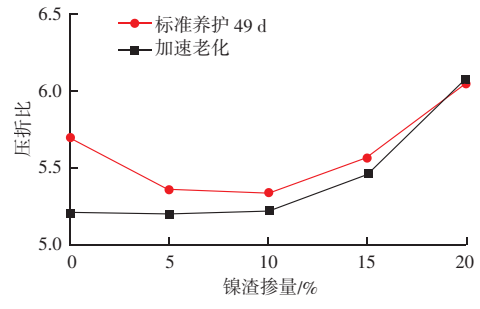
也有类似趋势。这可能是氙灯加速老化导致橡胶分子链发生断裂降解，自由基发生交联反应，交联密度增大，橡胶刚度和硬度均增加，从而增强砂浆骨料支撑体系，因此强度有所提高。但其压折比也略有增加，表明韧性下降。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度



(c) 压折比

图5 人工加速老化前后力学性能变化
Fig.5 Changes in mechanical properties before and after artificial accelerated aging

2.2.1.2 动弹性模量

图6 显示橡胶比例越多，动弹性模量越小。这一方面是由于橡胶颗粒弹性模量较小。吸收了部分撞击能量；另一方面橡胶颗粒自身的孔隙，以及橡胶颗粒与浆体之间形成的孔隙，使应力波在传递过程中被进一步消耗掉。人工加速老化对橡胶大掺量试件的动弹性模量影响较大，这是由于橡胶弹性模量基本上随老化温度和时间的延长而上升，依据复合材料弹性模量公式

$$E = K(E_1 \cdot E_2) / (E_1 \cdot V_2 + E_2 \cdot V_1) \quad (1)$$

式中： E 为总弹性模量； E_1 、 E_2 分别为胶凝材料和骨料弹性模量； V_1 、 V_2 分别为胶凝材料和骨料体积。当 E_2 升高时， E 也随之增大，因此表现为整体弹性模量的增加。随镍渣替代率提高，橡胶掺量减少，老化对砂浆动弹性模量影响不大。

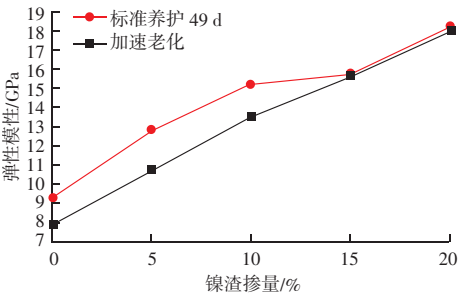


图 6 人工加速老化前后动弹性模量变化

Fig. 6 Changes in dynamic elastic modulus before and after artificial accelerated aging

2.2.1.3 耐磨性能

以磨坑长度来表征橡胶水泥砂浆耐磨性，结果如图 7 所示。1#橡胶水泥砂浆试件（20% 橡胶体积率）磨坑长度为 54.6 mm；当镍渣体积率上升为 5%、橡胶体积率下降为 15% 时，磨坑长度最小，为 50.8 mm；然后又开始缓慢增加，镍渣体积率 20% 时，磨坑长度为 52.8 mm，但仍小于 1#试样。结果表明，镍渣掺入能有效改善橡胶水泥砂浆的耐磨性，比例适当的镍渣与橡胶颗粒复合骨料又优于单一镍渣骨料。这是由于橡胶密度较小，易浮于表面，同时与水泥基黏结力较差，受到冲磨作用时，增加试件磨损长度，随着镍渣替代部分橡胶颗粒，减少了薄弱表层；同时部分橡胶又能发挥其增韧效应，当与磨头接触时，橡胶颗粒先产生一定量的变形，降低了试件与磨头之间的摩擦力面积，一定时间内减少了试件的磨损量，当这部分橡胶颗粒被冲击剥离后，镍渣继续在基体中发挥耐磨作用，从而提高整体耐磨性能。

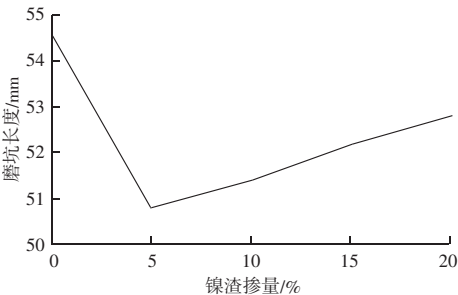


图 7 磨坑长度结果

Fig. 7 Mill pit length results

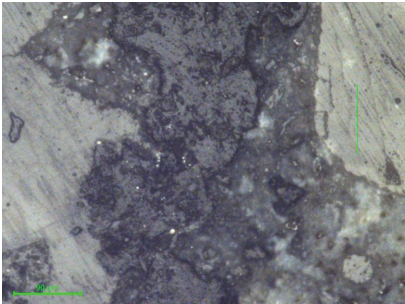
2.2.2 微观力学性能

采用纳米压痕技术对比分析橡胶颗粒及镍渣与水泥砂浆的微界面力学性能，图 8、图 9 分别为 1# 和 5# 样品的压痕模量和硬度。1# 试件弹性模量在 10.0 ~ 20.0 GPa 范围，硬度在 1.5 ~ 3.0 GPa 范围；5# 试件弹性模量在 17.5 ~ 35.0 GPa 范围，硬度在 2.0 ~ 4.0 GPa 范围。由表 3 可知，5# 样品界面处各点弹性模量和硬度平均值均远高于 1# 样品，这表明水泥浆体与镍渣界面区密实度优于水泥浆体与橡胶

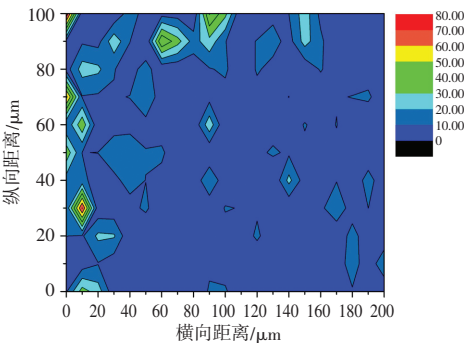
表 3 界面处弹性模量和硬度

Table 3 Indentation modulus and hardness of the micro-interface zone

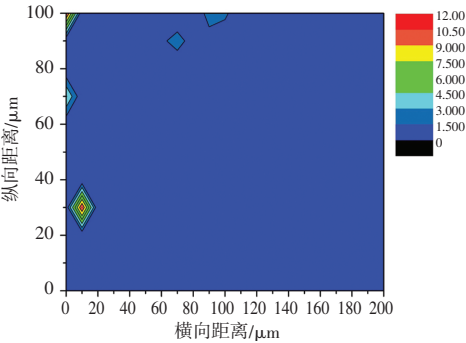
试件	弹性模量/GPa	硬度/GPa
1#	8.92	0.32
5#	39.45	4.17



(a) 微观图



(b) 弹性模量等高图



(c) 硬度等高图

图 8 1# 样品纳米压痕试验结果

Fig. 8 Nano-indentation test results of 1 # sample

材料科学

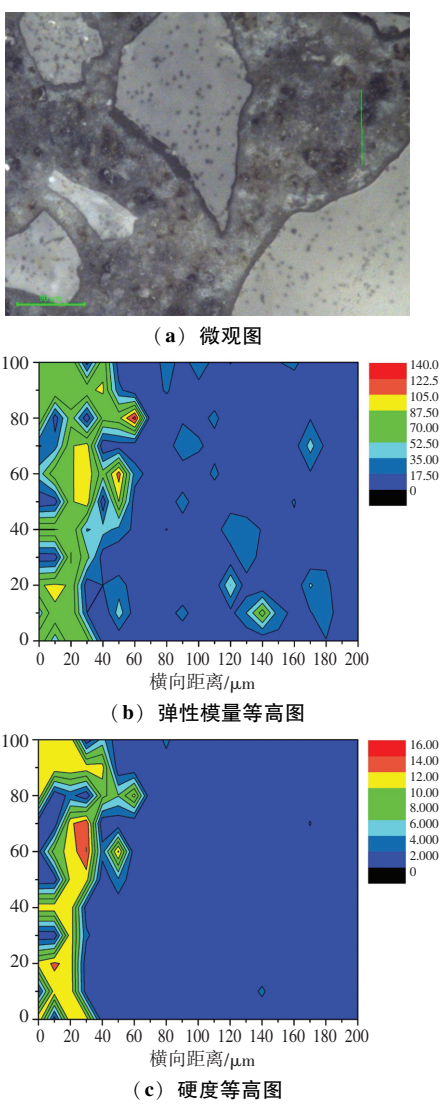


图9 5#样品纳米压痕试验结果

Fig.9 Nano-indentation test results of 5 # sample

颗粒界面区密实度,使界面区的微观力学性能得到了提高。这主要是因为橡胶颗粒疏水性导致多余水分聚集在其与水泥基界面处,相应提高了界面处水胶比,形成界面缺陷区,而镍渣与水泥浆体的黏结能力更强,掺入并替代橡胶颗粒有利于提高水泥砂浆微界面区域的弹性模量和硬度,从而提高其抗压强度和抗折强度,这与宏观力学性能规律相一致。

2.3 耐久性

2.3.1 干燥收缩性能

图10为不同龄期镍渣掺量对干燥收缩值的影响。由图可知,镍渣替代率增加,干燥收缩值总体呈下降趋势,尤其在初期和中期,对于干燥收缩限制更明显,7、14和21 d龄期,镍渣替代率20%时的干燥

收缩值相对无替代率时分别减少26.6%、29.5%和22.5%;28 d干燥收缩值变化略有波动,可能与测试误差有关;而56 d龄期时收缩值仅下降7.4%,表明镍渣掺入对于改善橡胶水泥砂浆早期干燥收缩效果较好。这主要是因为橡胶颗粒的毛细孔会增大砂浆体系的毛细管应力 Δp ,随着毛细管中水分干燥,毛细管应力增大,使水泥基材料处于压缩状态,导致体积收缩;同时橡胶颗粒具有高弹低强易形变特点,抵抗胶凝基体收缩能力相对镍渣更弱。而镍渣吸水性低,又具有较高硬度和弹性模量,减少橡胶颗粒导致的毛细孔数量,同时对收缩具有更好的约束作用,因此随镍渣替代橡胶颗粒比例增加,镍渣水泥砂浆干燥收缩值减小。但随着龄期延长,最终的干燥收缩值基本趋于相同。

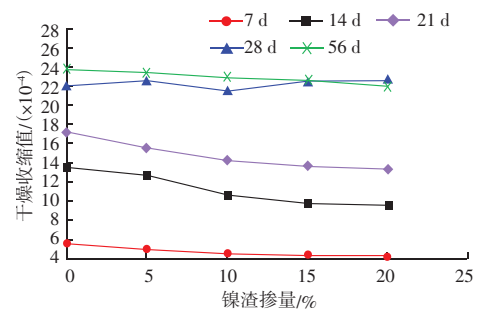


图10 镍渣对橡胶水泥砂浆干燥收缩性能的影响

Fig.10 Effect of nickel slag on the drying shrinkage performance of vitrified bead mortar

2.3.2 抗氯离子渗透性能

合理的镍渣与橡胶颗粒复掺比例可改善水泥砂浆抗氯离子渗透性能。如图11所示,随着镍渣替代橡胶颗粒比例增加,氯离子扩散系数随镍渣掺量增加逐渐下降。当镍渣体积率为15%、橡胶颗粒体积率为5%时,水泥砂浆氯离子扩散系数最小,为 $3.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。这是由于镍渣减少了橡胶颗粒引

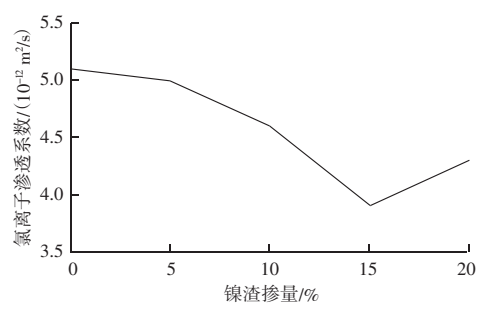


图11 镍渣掺量对抗氯离子渗透性能的影响

Fig.11 The effect of nickel slag content on the permeability of chloride ions

起的界面缺陷,使整体密实性增加,适量具有疏水性的橡胶,在搅拌时易引入空气,可细化并分散毛细管,延长渗透通道,阻碍氯离子的扩散。

3 结论

利用镍渣掺入改性橡胶水泥砂浆,通过人工加速老化、纳米压痕、RCM 等测试方法,分析镍渣对橡胶水泥砂浆力学性能、耐久性能及微观性能的影响,得出以下结论:

(1) 镍渣掺入及加速老化均能提高橡胶水泥砂浆的抗压强度、抗折强度、压折比及动弹性模量,加速老化对高橡胶掺量水泥砂浆动弹性模量影响大,对高镍渣掺量试件影响不大;镍渣与橡胶复掺骨料对橡胶水泥砂浆的耐磨性改善效果优于单掺镍渣或橡胶骨料;水泥浆体与镍渣界面区的密实度优于水泥浆体与橡胶颗粒界面区,镍渣改善了橡胶水泥砂浆微界面区域弹性模量和硬度,使界面区的微观力学性能得到了提高。

(2) 掺镍渣对橡胶水泥砂浆早期干燥收缩具有更好约束作用;合理的镍渣与橡胶颗粒复掺比例有助于改善水泥砂浆抗氯离子渗透性能,当镍渣体积率为 15%、橡胶颗粒体积率为 5% 时,水泥砂浆氯离子扩散系数最小,为 $3.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

参 考 文 献

[1] 李克庆,冯琳,高术杰. 镍渣基矿井充填用胶凝材料的制备[J]. 工程科学学报,2015 (1): 3-8.

- [2] 张涛,李德贤,张鹏强,等. 镍渣-全尾矿砂混合骨料配比试验研究[J]. 黄金科学技术,2024,32 (3): 437-444.
- [3] 樊佳磊,李海宁. 使用镍钛渣配料生产优质水泥熟料[J]. 水泥,2004 (5): 24-26.
- [4] 周琦,南雪丽,易育强,等. 镍渣微晶玻璃制备及铁的回收利用[J]. 兰州理工大学学报,2010,36 (5): 14-18.
- [5] 孙志高,吴渊,杨兴春,等. 富镁镍渣-粉煤灰地质聚合物的制备及性能[J]. 无机盐工业,2023,55 (11): 139-146.
- [6] 黄芳,周敏,张蔚,等. 铝厂污泥、尾矿与镍渣合成莫来石的试验研究[J]. 非金属矿,2023,55 (11): 139-146.
- [7] 王宁,陆军,施捍东. 有色金属工业冶炼废渣-镍渣的综合利用[J]. 环境工程,1994,12 (1): 58-59.
- [8] 纪奎江. 我国废旧橡胶循环利用行业的现状与发展[J]. 橡胶工业,2023,70 (9): 755-761.
- [9] 楚晓辉. 蒙脱石/丁苯橡胶复合改性沥青混合料路用性能[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38 (4): 134-137.
- [10] 王旭,张政,霍志强,等. 基于 RSM 的新型亲水性橡胶复合水泥混凝土目标优化研究[J]. 粉煤灰综合利用,2023,37 (3): 72-76.
- [11] 谢李,颜超群. 改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测模型构建[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38 (2): 11-16.
- [12] 杨友志,戚颖楠,李志鹏,等. 聚乙烯醇改性橡胶水泥基复合材料耐久性研究[J]. 深圳大学学报,2023,40 (6): 723-731.
- [13] 张金松,唐雨轮,占佳佳,等. 动静加载下微硅粉-橡胶/水泥砂浆的力学性能[J]. 复合材料学报,2024,41 (8): 4287-4298.
- [14] 陈国权. 镍渣制备水泥基耐磨地坪砂浆的试验研究[J]. 江西建材,2023,7: 5-8.
- [15] 周敏,祖卓红,张蔚,等. 镍渣替代机制砂制备混凝土的应用研究[J]. 新型建筑材料,2020,47 (11): 122-125.