

铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土耐酸侵蚀性能研究

张延年¹, 刘安稳¹, 汪青杰², 于洋¹, 刘文亮¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学理学部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 在混凝土中掺入铁尾矿、钢渣、锂渣, 分析混凝土的耐酸侵蚀性能, 实现铁尾矿、钢渣、锂渣高效资源化利用。方法 将铁尾矿、钢渣、锂渣作为掺合料替代部分水泥, 铁尾矿碎石和铁尾矿砂作为粗、细骨料制备混凝土; 对制备的混凝土标准养护 28 d 后进行为期 60 d 的酸侵蚀试验; 通过改变水胶比和水泥替代率分析其质量损失率、抗压强度损失率及侵蚀深度, 利用 MIP、SEM 探究铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土耐酸侵蚀的机理。结果 掺入铁尾矿、钢渣、锂渣可以降低混凝土的质量损失率、抗压强度损失率和侵蚀深度; 其中掺量为 30% 时, 质量损失率为 0.12%、抗压强度损失率为 7.8%、侵蚀深度为 0.6 mm, 均达到最低值; 混凝土的质量损失率、抗压强度损失率和侵蚀深度随着水胶比的增大而升高。结论 铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土中铁尾矿、钢渣、锂渣发挥的填充作用与水泥发生的二次水化反应使混凝土体系更加致密, 很大程度上阻碍了酸的侵入; 同时, 二次水化消耗了易与酸反应的 CH, 生成了更稳定的 C-S-H 凝胶, 表现出更好的耐酸侵蚀性能。

关键词 铁尾矿; 钢渣; 锂渣; 混凝土; 酸侵蚀

中图分类号 TU528

文献标志码 A

引用格式: 张延年, 刘安稳, 汪青杰, 等. 铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土耐酸侵蚀性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 536-544. (ZHANG Yannian, LIU Anwen, WANG Qingjie, et al. Study on acid erosion resistance of iron tailing-steel slag-lithium slag concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 536-544.)

Study on Acid Erosion Resistance of Iron Tailing-Steel Slag-Lithium Slag Concrete

ZHANG Yannian¹, LIU Anwen¹, WANG Qingjie², YU Yang¹, LIU Wenliang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Science, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper was proposed to analyze the acid erosion resistance of concrete and realize

收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52234004); 辽宁省重大科技专项项目(2020JH1/10300005)

作者简介: 张延年(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土、固废资源化等方面研究。

the efficient resource utilization by mixing iron tailings, steel slag and lithium slag in concrete. Iron tailings, steel slag and lithium slag were used as admixtures to replace part of the cement, and iron tailings crushed stone and iron tailings sand were used as coarse and fine aggregates to prepare concrete; The prepared concrete was subjected to standard curing for 28 days followed by acid erosion test for a period of 60 days; The mass loss rate, compressive strength loss rate and erosion depth were analyzed by changing the water-cement ratio and cement substitution rate, and the mechanism of acid erosion resistance of iron tailings-steel slag-lithium slag concrete was explored using MIP and SEM. The results showed that the incorporation of iron tailings, steel slag and lithium slag can reduce the mass loss rate, compressive strength loss rate and erosion depth of concrete; The lowest values of 0.12% mass loss, -7.8% compressive strength loss, and 0.6 mm erosion depth were achieved at a doping level of 30%; The rate of mass loss, rate of compressive strength loss and depth of erosion of concrete increased with the increase in water-cement ratio. Iron tailings-steel slag-lithium slag concrete in the iron tailings, steel slag, lithium slag to play the role of filling and secondary hydration reaction with the cement to make the concrete system more dense, to a large extent, to prevent the intrusion of acid; At the same time, the secondary hydration reaction consumed the CH, which is easily reacted with acid, and generated a more stable C-S-H gel, which showed better resistance to acid erosion.

Key words: iron tailings; steel slag; lithium slag; concrete; acid erosion

酸侵蚀会使混凝土耐久性能降低^[1]。当混凝土接触到酸时,酸会和混凝土中的氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)发生反应生成可溶性盐,将混凝土浸在溶液中,使混凝土变得更加多孔,溶解速度增加,混凝土可能最终解体^[2]。

相关研究得出^[3-6],在混凝土中加入矿物掺合料,利用矿物掺合料的填充作用和火山灰反应,可以提高混凝土的耐酸侵蚀性能。铁尾矿具有良好的微集料效应^[7-8],且其含有大量 SiO_2 ^[9],经机械活化后可以提高其活性,因此机械活化后的铁尾矿可以作为掺合料应用于混凝土中^[10]。钢渣中含有硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)及铁铝酸盐等矿物相,因此钢渣具有作为掺合料的潜力^[11-13]。锂渣中含有能发生火山灰反应的无定形 SiO_2 和 Al_2O_3 ^[14]。锂渣作为掺合料制备混凝土,可以降低基体中 CH 晶体形成的趋势,提高水泥的水化度和混凝土的微观结构致密性,降低 C-S-H 凝胶的钙硅比,从而增强了混凝土抵抗酸雨腐蚀的能力^[15]。

综上所述,笔者利用铁尾矿、钢渣、锂渣各自性能优势,将铁尾矿、钢渣、锂渣以质量比 1:2:2 的复合料作为掺合料替代部分水

泥,铁尾矿碎石和铁尾矿砂分别作为粗细骨料,制备混凝土。通过改变水泥替代率和水胶比,研究铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土耐酸侵蚀性能。结果表明:混凝土中掺入铁尾矿、钢渣、锂渣可以降低混凝土的质量损失率、抗压强度损失率和侵蚀深度;且混凝土中的铁尾矿、钢渣、锂渣与水泥发生的二次水化反应生成了更多的 C-S-H 凝胶,协同自身发挥的填充效应,填充了孔隙,加强了组织间的联结,孔隙更少且更细小,体系更致密,阻碍了酸的侵入,表现出更好的耐酸侵蚀性能。

1 试验

1.1 试验原料

水泥为沈阳山水工源牌 P·O42.5 级;铁尾矿产自本溪歪头山铁矿;铁尾矿碎石和铁尾矿砂产自壹立方砂业有限公司,均符合《普通混凝土用砂、石质量及检测方法标准》(JGJ52—2006)要求;钢渣、锂渣产自天源新能源材料有限公司;减水剂为 P-II 型引气减水剂,产自盛鑫源建材有限公司;酸选用 99.5% 浓度的乙酸配制 pH=3 的酸性溶液;水采用普通自来水。

铁尾矿、钢渣、锂渣主要化学成分见表1;粒度分布曲线见图1。骨料颗粒级配曲线见图2。

表1 原料主要化学成分分析结果

Table 1 The chemical composition analysis results of raw materials

原料	w (SiO ₂)	w (Al ₂ O ₃)	w (CaO)	w (Fe ₂ O ₃)	w (MgO)	w (SO ₃)	w (K ₂ O)	w (Na ₂ O)
铁尾矿	62.26	4.78	7.77	14.37	6.33	0.48	1.39	1.34
钢渣	15.20	2.53	42.65	27.54	6.05	0.12	0.06	0.02
锂渣	54.55	25.38	6.44	1.41	0.60	6.05	0.70	0.10

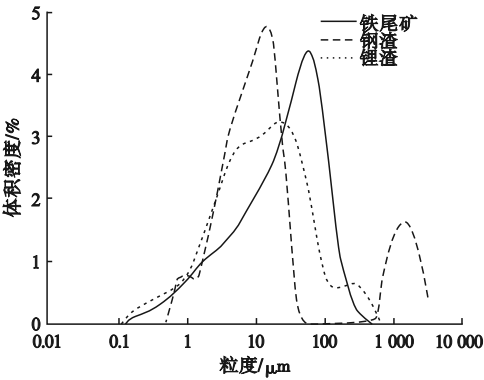


图1 原料粒度分布曲线

Fig. 1 The partial size distribution curves of raw material

1.2 试验方法

1.2.1 配合比设计

混凝土配合比设计如表2所示。L-0为纯水泥对照组;L-1~L-4组中铁尾矿、钢渣、锂渣质量比均为1:2:2,水胶比均为0.42,分别替代10%、20%、30%、40%的水泥;L-5~L-7组中铁尾矿、钢渣、锂渣的质量比均为1:2:2,水胶比分别为0.44、0.46、0.48,均替代20%的水泥。

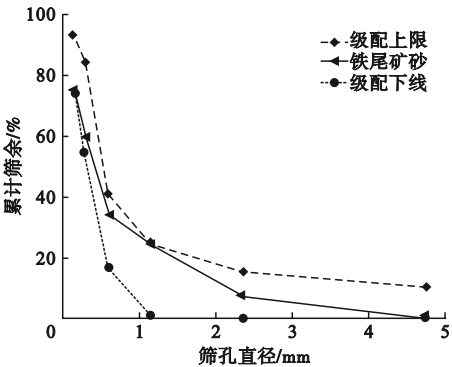
表2 混凝土试块配合比设计

Table 2 The mix proportion design of concrete test blocks

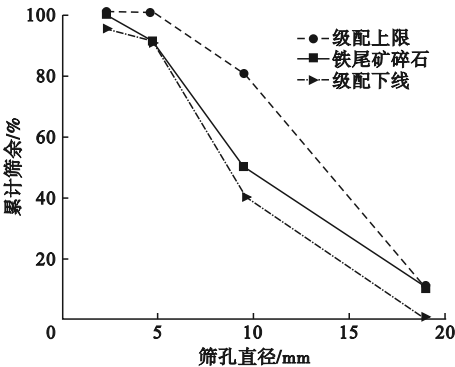
组别	配合比/(kg·m ⁻³)							
	水	水泥	铁尾矿	钢渣	锂渣	细骨料	粗骨料	减水剂
L-0	176.4	420	0	0	0	740	1 110	5.2
L-1	176.4	378	8	17	17	740	1 110	5.2
L-2	176.4	336	17	34	34	740	1 110	5.2
L-3	176.4	294	25	50	50	740	1 110	5.2
L-4	176.4	252	34	67	67	740	1 110	5.2
L-5	184.8	336	17	34	34	740	1 110	5.2
L-6	193.2	336	17	34	34	740	1 110	5.2
L-7	201.6	336	17	34	34	740	1 110	5.2

1.2.2 样品制备

- (1)将粗、细骨料和铁尾矿、钢渣、锂渣置于105℃的烘箱中烘干至含水率小于0.1%;
- (2)将铁尾矿置于卧式球磨机中研磨1.5h;
- (3)根据表2的配合比,将粗、细骨料置于搅拌机中干拌1min,加入水泥和铁尾矿、钢渣、锂渣搅拌1min,再加入减水剂和水搅



(a)细骨料颗粒级配曲线



(b)粗骨料颗粒级配曲线

图2 骨料颗粒级配曲线

Fig. 2 The gradation curves of aggregate particles

拌 2 min;

(4) 将混凝土拌合物搅拌均匀倒入 100 mm×100 mm×100 mm 的模具中,置于振动台振 30 s 后刮平;

(5) 室温养护 24 h 脱模,将混凝土试块移至标准养护室(温度 (20±2)℃,湿度大于 95%) 养护 28 d。

(6) 将养护 28 d 的混凝土试块置于体积分数 99.5% 的乙酸配制 pH=3 的酸性溶液中进行为期 60 d 的酸侵蚀试验。

1.2.3 测试方案

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019),测试标准养护 28 d 和经酸侵蚀 60 d 混凝土试块的抗压强度,试验结果乘以 0.95 的折算系数。计算抗压强度损失率:

$$C = \frac{f_1 - f_2}{f_1} \times 100\%.$$
 (1)

式中: C 为抗压强度损失率; f₁ 为标准养护 28 d 混凝土试块抗压强度,MPa; f₂ 为经酸侵蚀 60 d 混凝土试块抗压强度,MPa。

将标准养护 28 d 和经酸侵蚀 60 d 的混凝土试块烘干称重,计算质量损失率:

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%.$$
 (2)

式中: M 为质量损失率; W₁ 为标准养护 28 d 混凝土试块烘干后的质量, g; W₂ 为酸侵蚀 60 d 混凝土试块烘干后的质量, g。

根据酚酞试剂遇酸无色,遇碱变红色的性质判定混凝土试块的酸侵蚀深度。将酸侵蚀 60 d 的混凝土试块从中央劈开,用体积分数为 1% 的酚酞试剂均匀喷洒于劈裂面,在劈裂面四周取 20 个点位测量酸侵蚀深度,取平均值为酸侵蚀深度值。

选取混凝土试块表面无粗骨料处,通过压汞(MIP)测试混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的累计孔体积及孔径分布,得出孔体积占比。通过扫描电镜(SEM)观察混凝土试块经酸侵蚀 60 d 后的微观结构及水化产物。

2 试验结果与分析

2.1 不同水胶比下混凝土试块质量损失率分析

根据表 2 混凝土配合比设计,水泥替代率为 20%,不同水胶比下混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率见图 3。

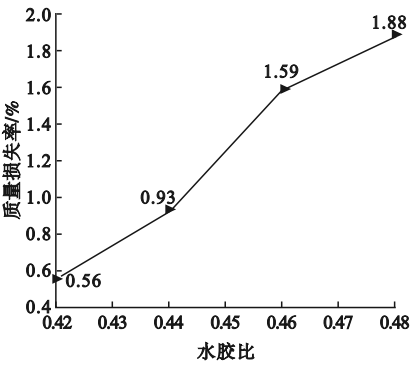


图 3 不同水胶比下混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率

Fig. 3 The mass loss rate of concrete test block after acid erosion for 60 days under different water-binder ratios

由图 3 可知,水泥替代率一定,水胶比由 0.42 增加到 0.48,混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率由 0.56% 升高到 1.88%。说明随着水胶比的增加混凝土的耐酸侵蚀性能降低。究其原因,水胶比增大时,混凝土内部水分较多,产生了较多的孔隙通道,增大了可溶性盐(CH₃COO)₂Ca 的浸出速率,导致质量损失率提高。

2.2 不同水泥替代率下混凝土试块质量损失率分析

根据表 2 混凝土配合比设计,水胶比为 0.42,不同水泥替代率下混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率见图 4。

由图 4 可知,水胶比一定,水泥替代率由 0 增加到 40%,混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率分别为 2.49%、0.95%、0.56%、0.12%、1.23%,呈先下降后上升趋势,掺加掺合料各组的质量损失率均低于纯水泥组的

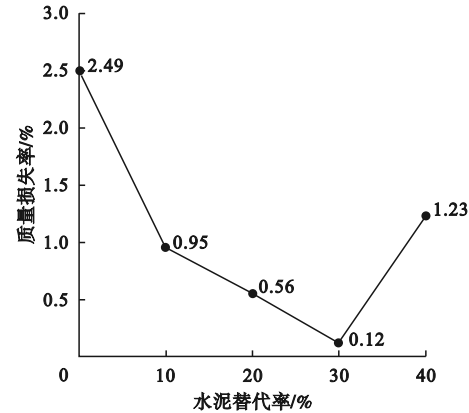


图 4 不同水泥替代率下混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的质量损失率

Fig. 4 The mass loss rate of concrete test block after acid erosion for 60 days under different cement replacement rates

质量损失率,且水泥替代率为 30% 时,质量损失率最低。以上结果表明,掺合料的掺入有效抑制了酸侵蚀带来的质量损失,水泥替代率为 30% 时混凝土耐酸侵蚀性能最好。究其原因:铁尾矿、钢渣、锂渣的填充作用、自身的水化反应以及与水泥的二次水化反应生成的水化产物阻碍了酸的侵入,减少了可溶性盐 $(CH_3COO)_2Ca$ 的生成和流失;二次水化消耗了易于酸反应的 CH ,生成了更稳定的 C-S-H 凝胶;生成的水化产物提高了混凝土的质量,一定程度上弥补了 $(CH_3COO)_2Ca$ 的流失导致的质量损失。

2.3 不同水胶比下混凝土试块抗压强度和抗压强度损失率分析

根据表 2 混凝土配合比设计,水泥替代率为 20%,不同水胶比下混凝土试块抗压强度见图 5。

由图 5 可知,水泥替代率一定,水胶比由 0.42 增加到 0.48,混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的抗压强度损失率分别为 -5.2%、-3.2%、2.1%、5.7%。水胶比为 0.42 和 0.44 时,经酸侵蚀后混凝土试块的抗压强度有不同程度的增长,说明酸侵蚀导致的抗压强度损失量小于混凝土继续水化带来的强度增长量。水胶比为 0.46 和 0.48 时,经酸侵蚀后混凝土

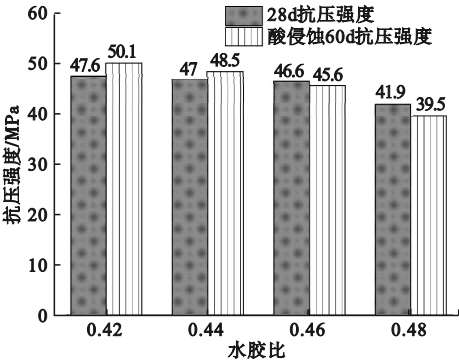


图 5 不同水胶比下混凝土试块抗压强度

Fig. 5 The compressive strength of concrete test block under different water-binder ratios

试块的抗压强度有不同程度的降低,说明酸侵蚀导致的抗压强度损失量大于混凝土继续水化带来的强度增长量。究其原因,水胶比为 0.42 和 0.44 时,产生的毛细水通道较少,致使酸较难侵入混凝土内部,从而减小了抗压强度损失率。水胶比为 0.46 和 0.48 时,多余的水会使混凝土中孔隙增多,使更多的酸溶液进入到混凝土内部,从而增大了抗压强度损失率。

2.4 不同水泥替代率下混凝土试块抗压强度损失率分析

根据表 2 混凝土配合比设计,水胶比为 0.42,不同水泥替代率下混凝土试块抗压强度见图 6。

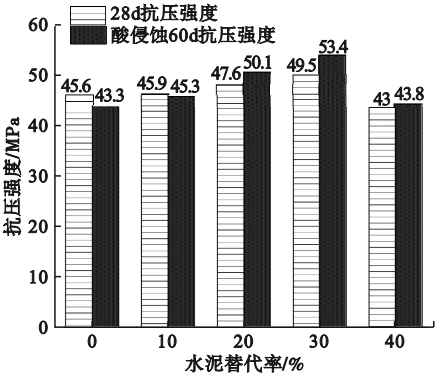


图 6 不同水泥替代率下混凝土试块抗压强度

Fig. 6 The compressive strength of concrete test block under different cement replacement rates

由图 6 可知,水胶比一定,水泥替代率由 0 增加到 40%,混凝土试块抗压强度损失率

分别为 5.0%、1.3%、- 5.2%、- 7.8%、- 1.9%，呈先降低后升高的趋势，水泥替代率为 30% 时，混凝土试块抗压强度损失率最低；掺入掺合料的混凝土试块抗压强度损失率均低于纯水泥混凝土试块抗压强度损失率。究其原因：经机械研磨的铁尾矿、钢渣、锂渣具有良好的微集料效应，锂渣的高火山灰活性促进了水泥和钢渣的二次水化反应，

改善了混凝土内部孔隙，阻碍了酸的侵入，同时提高了混凝土的强度，降低了抗压强度损失率。

2.5 表观劣化分析

观察混凝土试块在酸侵蚀 60 d 过程中表观劣化情况：侵蚀前期表现为初步溶蚀、侵蚀中期表现为深度溶蚀、侵蚀后期出现蚀坑麻面，如图 7 所示。

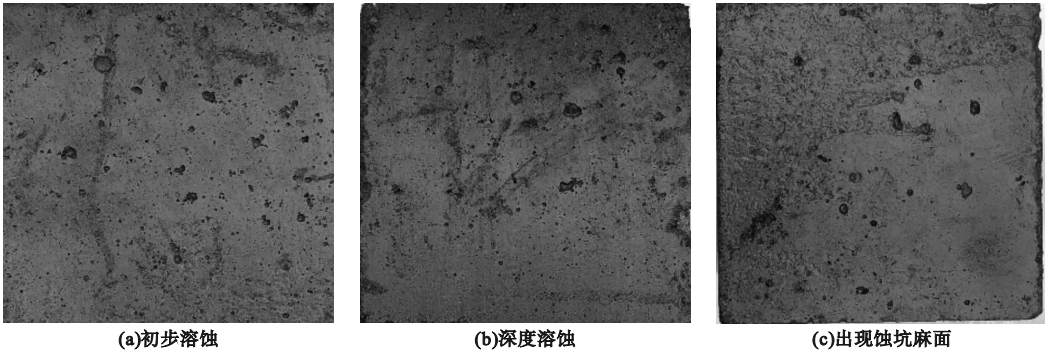


图 7 混凝土试块表观劣化情况

Fig. 7 The apparent deterioration of concrete test block

由图 7 可知，酸侵蚀前期混凝土试块边角完好，没有出现骨料暴露，表面有轻微的腐蚀痕迹，表现为初步溶蚀。随着时间的推移，酸侵蚀中期试块边角处开始出现少量的骨料暴露，表面腐蚀痕迹加重表现为深度溶蚀。

酸侵蚀后期试块边角处骨料暴露加重，表面出现蚀坑麻面。

2.6 侵蚀深度分析

根据表 2 混凝土配合比设计，混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的侵蚀深度见图 8。

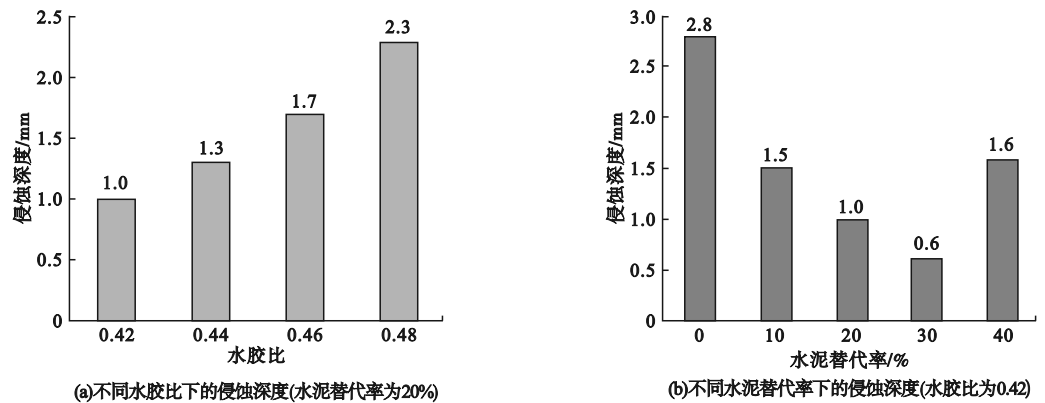


图 8 混凝土试块经酸侵蚀 60 d 的侵蚀深度

Fig. 8 The erosion depth of concrete test block after acid erosion for 60 days

由图 8(a)可知，水泥替代率为 20%，水胶比为 0.42、0.44、0.46、0.48 时，侵蚀深度分别为 1.0 mm、1.3 mm、1.7 mm、2.3 mm，侵蚀深度随水胶比的增加呈上升趋势。因为

水胶比升高，混凝土内部游离水分随之增多，这些游离水会附着在胶凝材料和骨料之间，形成孔隙水通道，降低两者的粘结性，使混凝土变得不致密，酸溶液容易进入混凝土，导致

侵蚀深度升高。

由图8(b)可知,水胶比为0.42,水泥替代率为0%、10%、20%、30%、40%时,侵蚀深度分别为2.8mm、1.5 mm、1.0 mm、0.6 mm、1.6 mm,侵蚀深度随着水泥替代率的提高呈先下降后上升趋势,水泥替代率为30%时,侵蚀深度达到最低,且掺入掺合料各组的侵蚀深度均低于纯水泥组的侵蚀深度。由于水泥水化后提供的碱环境对掺合料起到了一定的激发作用,促进体系发生二次水化反应,水化产物胶结了混凝土体系且与掺合

料的微填充效应协同填充了混凝土孔隙,使混凝土变得相对致密,一定程度降低了混凝土的侵蚀深度。当水泥替代率过高时,水泥水化产生的CH不足,二次水化不充分,混凝土致密性下降,导致侵蚀深度升高。

2.7 压汞(MIP)试验

通过压汞(MIP)试验,测试混凝土试块经酸侵蚀60 d后的累计孔体积、孔径分布及孔体积占比,结果见图9。L-0是水胶比为0.42的纯水泥混凝土试块;L-3是水胶比为0.42水泥替代率为30%的混凝土试块。

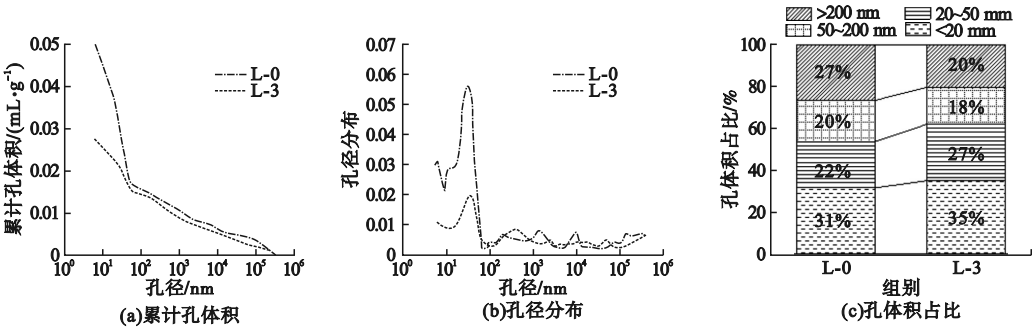


图9 MIP试验结果

Fig. 9 The MIP test results

由图9(a)可见,L-0的累计孔体积曲线整体高于L-3,表明L-0的累计孔体积大于L-3的累计孔体积。由图9(b)可知,L-0和L-3最可几孔径都小于10² nm,L-3曲线整体低于L-0。以上结果说明L-3试块相较于L-0试块孔隙率更低,内部更为密实。根据吴中伟院士对混凝土中孔级的划分^[16]:孔径大于200 nm为多害孔,孔径在50~200 nm为有害孔,孔径在20~50 nm为少害孔,孔径小于20 nm为无害孔。由图9(c)可知,L-3的多害孔和有害孔均少于L-0,L-3的少害孔和无害孔均大于L-0,说明L-3试块相较于L-0试块细化了孔径。

2.8 扫描电镜(SEM)试验

通过扫描电镜(SEM)观测试块经酸侵蚀60 d后的水化产物及微观结构,结果见图10。

由图10(a)可观察到少量的C-S-H凝胶

和较多的孔隙,整体表现不密实。说明未掺加掺合料的混凝土,缺少了掺合料的填充作用,且二次水化不足,混凝土表现不密实。由图10(b)可观察到有大量孔隙,内部结构体系稀疏。说明水胶比为0.48时,形成了较多的孔隙水通道,增大了孔隙率,使混凝土内部结构体系稀疏。由图10(c)观察到C-S-H凝胶增多,堵塞了孔隙,表现较为密实。说明掺入20%掺合料后,掺合料发挥了填充作用 and 提高了二次水化反应,使混凝土中C-S-H凝胶增多,孔隙减少。由图10(d)观察到有大片C-S-H凝胶,凝胶增强了内部体系的粘结,整体表现最为致密,说明掺入30%掺合料后,二次水化反应程度更高,生成了更多的C-S-H凝胶。综上所述,铁尾矿、钢渣、锂渣的微集料填充效应和二次水化反应生成的产物改善了孔隙结构,使混凝土内部结构体系更加致密。

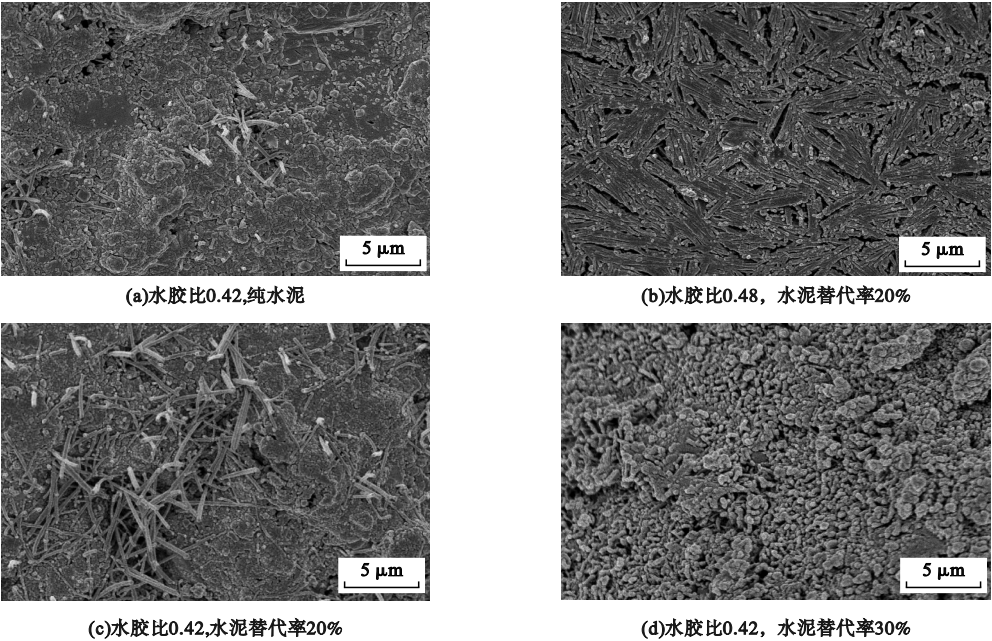


图 10 SEM 试验结果

Fig. 10 The SEM analysis results

3 结 论

(1) 混凝土经酸侵蚀 60 d, 当水胶比一定, 水泥替代率为 30% 时, 混凝土的质量损失率最低; 当水泥替代率一定, 水胶比为 0.42 时, 混凝土的质量损失率最低; 且均低于纯水泥混凝土的质量损失率。铁尾矿、钢渣、锂渣的填充作用、自身的水化反应以及与水泥的二次水化反应生成的水化产物阻碍了酸的侵入, 减少了可溶性盐的生成和流失; 二次水化消耗了易与酸反应的 CH, 生成了更稳定的 C-S-H 凝胶; 生成的水化产物提高了混凝土的质量, 一定程度上弥补了因可溶性盐的流失导致的质量损失, 从而降低了混凝土的质量损失率, 提高了混凝土耐酸侵蚀性能。

(2) 混凝土经酸侵蚀 60 d, 当水胶比一定, 水泥替代率为 30% 时, 混凝土的抗压强度损失率最低; 当水泥替代率一定, 水胶比为 0.42 时, 混凝土的抗压强度损失率最低; 且均低于纯水泥混凝土的抗压强度损失率。铁尾矿、钢渣、锂渣的微集料效应和二次水化反

应, 不仅提高了混凝土的强度, 而且提高了混凝土的密实性, 阻碍了酸溶液的侵入, 从而降低了混凝土的抗压强度损失率, 提高了混凝土的耐酸侵蚀性能。

(3) 混凝土经酸侵蚀 60 d, 当水胶比一定, 水泥替代率为 30% 时, 混凝土的侵蚀深度最低; 当水泥替代率一定, 水胶比为 0.42 时, 混凝土的侵蚀深度最低; 且均低于纯水泥混凝土的侵蚀深度。水泥水化后提供的碱环境对掺合料起到了一定的激发作用, 促进体系发生二次水化反应, 水化产物胶结了混凝土体系且与掺合料的微填充效应协同填充了混凝土孔隙, 使混凝土变得相对致密, 一定程度降低了混凝土的侵蚀深度。

(4) 铁尾矿-钢渣-锂渣混凝土中的铁尾矿、钢渣、锂渣与水泥发生的二次水化反应生成了更多的 C-S-H 凝胶, 协同自身发挥的填充效应, 填充了孔隙, 加强了组织间的联结, 孔隙更少且更细小, 体系更致密, 很大程度上阻碍了酸的侵入, 表现出更好的耐酸侵蚀性能。

参考文献

- [1] YONG D. Effect of acid rain pollution on durability of reinforced concrete structures [J]. Earth and environmental science, 2020, 450 (1):012115.
- [2] ROY D M, ARJUNAN P, SILSBEE M R. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete [J]. Cement and concrete research, 2001, 31(12):1809-1813.
- [3] 张延年,刘文亮,张文洁,等.铁尾矿-钢渣-磷渣协同制备矿物掺合料试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3):314-321.
(ZHANG Yannian, LIU Wenliang, ZHANG Wenjie, et al. Experimental study on synergistic preparation of mineral admixtures with iron tailings-steel slag-phosphorus slag [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2023, 42(3):314-321.)
- [4] GOYAL S, KUMAR M, SIDHU D S, et al. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack [J]. Journal of advanced concrete technology, 2009, 7(2):273-283.
- [5] 武越锋,马昆林,黄正华,等.酸性环境对不同材料组成混凝土侵蚀深度的试验研究[J].中外公路,2019,39(4):224-228.
(WU Yuefeng, MA Kunlin, HUANG Zhenghua, et al. Experimental study on corrosion depth of concrete made of various materials under acidic environment [J]. Journal of China & foreign highway, 2019, 39(4):224-228.)
- [6] 刘江,曾逢春,蔡老虎,等.酸性水环境下桥梁桩基混凝土的配制与耐久性研究[J].武汉理工大学学报,2012,34(6):91-95.
(LIU Jiang, ZENG Fengchun, CAI Laohu, et al. Research on preparation and durability of bridge pile concrete under acidic water environment [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(6):91-95.)
- [7] 梁艳涛,赵振兴.铁尾矿资源综合利用现状及意义[J].现代矿业,2020,36(11):156-157.
(LIANG Yantao, ZHAO Zhenxing. Status and significance of comprehensive utilization of iron tailing resources [J]. Modern mining, 2020, 36(11):156-157.)
- [8] 朴春爱.铁尾矿粉的活化工艺和机理及对混凝土性能的影响研究[D].北京:中国矿业大学,2017.
(PIAO Chun' ai. Study on the activation process and mechanism of iron tailing powder and its effect on concrete properties [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.)
- [9] ZHANG Y, LIU B, GU X, et al. Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials [J]. Construction and building materials, 2022, 346: 128420.
- [10] 高敏.铁尾矿制备矿物掺合料和再生集料的关键技术研究[D].南京:东南大学,2021.
(GAO Min. Research on the key technology of preparing mineral admixture and recycled aggregate from iron tailings [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.)
- [11] YI H, XU G, CHENG H, et al. An overview of utilization of steel slag [J]. Procedia environmental sciences, 2012, 16(4):791-801.
- [12] 胡瑾,王强,杨建伟.钢渣-硅灰复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(2):145-149.
(HU Jin, WANG Qiang, YANG Jianwei. Effect of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete [J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2015, 55(2):145-149.)
- [13] 王晨霞,刘军,曹芙波,等.钢渣粗骨料混凝土单轴受压应力-应变试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(6):1096-1103.
(WANG Chenxia, LIU Jun, CAO Fubo, et al. Uniaxial compressive stress-strain test of steel slag coarse aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu university (natural science), 2022, 38(6):1096-1103.)
- [14] 陈志友,苏小琼,杨志文,等.锂云母锂渣性质及利用研究现状[J].硅酸盐通报,2021,40(3):877-882.
(CHEN Zhiyou, SU Xiaoqiong, YANG Zhiwen, et al. Current status of research on the nature and utilization of lithium mica lithium slag [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2021, 40(3):877-882.)
- [15] ZHANG L, PAN Y, XU K, et al. Corrosion behavior of concrete fabricated with lithium slag as corrosion inhibitor under simulated acid rain corrosion action [J]. Journal of cleaner production, 2022:134300.
- [16] 冯奇,刘光明,巴恒静.颗粒级配水泥基材料有害孔隙率的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2004(9):1168-1172.
(FENG Qi, LIU Guangming, BA Hengjing. Effect of particle grade on the harmful porosity of cementitious materials [J]. Journal of tongji university (natural science), 2004(9):1168-1172.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)