

掺铁铝渣混凝土的抗压特性与微观结构

刘云兵¹, 吴非²

(1. 泸州职业技术学院 建筑工程学院, 四川 泸州 646000; 2. 战略金属资源绿色循环利用国家工程研究中心, 北京 100190)

摘要: 通过将不同掺量的铁铝渣添加到砂浆中以制备改性混凝土。开展压缩实验、计算机断层 (CT) 扫描实验和电子显微镜扫描实验对掺铁铝渣混凝土进行力学性能和微观结构特征的探究。实验结果表明: 随铁铝渣掺量的增加, 混凝土试件的抗压强度和弹性模量呈先升后降的变化趋势, 确定铁铝渣掺量为 15% 是混凝土较佳改性掺量; 根据混凝土的二维 CT 图像计算了材料的孔隙度, 随着掺量增加, 掺铁铝渣混凝土内孔隙度逐渐减小, 孔隙度与抗压强度呈现负相关的线性关系; 铁铝渣的改性作用促进了水泥砂浆的二次水化反应, 使得混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少, 水化硅酸钙 (C-S-H) 的含量增加, 最终引起骨料间的裂隙闭合, 材料整体力学性能提升。

关键词: 混凝土; 铁铝渣; 微观结构; 抗压性能; 机理分析

doi:10.12476/kczhly.202209220608

中图分类号: TD983 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 03-0051-06

引用格式: 刘云兵, 吴非. 掺铁铝渣混凝土的抗压特性与微观结构[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(3): 51-56.

LIU Yunbing, WU Fei. Compression characteristics and microstructure of ferric-aluminum slag modified concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(3): 51-56.

随着我国双碳战略的实施与推动, 绿色制造发展理念的不断深入, 新能源电池产业正蓬勃发展, 以锂电池为能源驱动的电动交通工具产量正飞速提高^[1]。锂电池寿命一般在 8~15 年左右, 故废弃锂电池堆积量随之快速增加^[2]。因此, 采用新技术和方法实现对废弃锂电池的回收利用具有重要价值和广阔前景。当前, 采用湿法工艺从锂电池材料中提取有价金属是一种常见的资源化利用方式^[3]。采用湿法工艺回收利用有价金属时会产生大量的铁铝残渣, 不加合理处置将会造成严重的生态污染与资源浪费^[4]。因此, 提高铁铝渣的资源化利用程度具有重要现实意义。目前, 我国主要通过物理沉降与化学浸出处理法对铁铝渣进行提纯, 再利用其中有用物质制备防火、耐火和胶凝材料等^[5]。近年来, 铁铝渣逐渐成为一种新型的矿化剂, 在高温烧结作用下, 铁铝渣具有一定化

学活性, 能显著降低晶体成核势能, 从而促进有益矿物的转化与形成, 降低了生料向熟料过渡的能耗^[6-7]。

当前, 一些学者采用不同类别的工业固体废物替代粗、细骨料对混凝土进行改性, 实现资源的回收利用。薛守宁^[8]采用高碳铬铁渣替代碎石配制了混凝土, 开展水泥-铬铁渣凝胶体系的水化过程研究, 结果表明矿渣可以提高水泥砂浆的水化程度, 进而增加凝胶体系的强度。刘宏敏^[9]以铝渣骨材替代粗、细骨料, 开展力学实验获得了铝渣的较佳掺量和配合比。祁皓等^[10]采用复合镍铁渣、粉煤灰和水泥复掺的方法, 配制出达到耐久性和力学性能要求的改性混凝土。丁先山等^[11]研究不同矿渣掺量条件下混凝土的破坏模式, 发现随着掺量的增加与水灰比的降低, 混凝土试件的破坏断面由单一断面逐渐过渡为多断面。前人

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (52078133); 四川省教育厅创新创业项目 (XM2-69)

作者简介: 刘云兵 (1985-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为新型建筑材料。

的研究表明铁铝渣的掺杂改性作用对混凝土凝结时间、强度特征和微观结构均有重要影响^[12-14]。然而，当前对掺铁铝渣混凝土性能改良的规律和机理还没有得到系统研究。

本研究制备了 5 种不同掺量的铁铝渣混凝土试件，开展无侧限压缩实验获取混凝土力学参数，结合 CT 扫描和扫描电镜实验对混凝土的微观结构进行分析，最后综合实验结果探讨了铁铝渣对混凝土的改性机理。本研究旨在为废锂电池的资源化利用与环保型混凝土的制备提供一定参考价值。

1 实验

1.1 实验材料

铁铝渣通过对铁铝渣废料进行破碎、磨细和筛分，得到了黄褐色的标准粒径的细集料。经检测，铁铝渣的含水率为 4.2%，密度为 2.67 g/cm³，孔隙度为 6.02%。通过粒度分布的测试发现铁铝渣的颗粒粒径主要分布在 50 ~ 200 μm。用 XRD 衍射实验分析了铁铝渣的矿物成分组成，结果见图 1，铁铝渣主要由氢氧化铝 (Al(OH)₃)、黄钠铁矾 (NaFe₃(SO₄)₂(OH)₆) 和二氧化硅 (SiO₂) 组成。

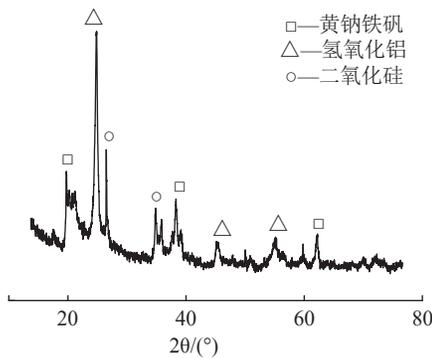


图 1 铁铝渣的矿物衍射图谱

Fig.1 Mineral diffraction pattern of iron-aluminum slags

采用铁铝渣掺量为 0 的素混凝土作为空白对照，素混凝土的原材料主要包括碎石粗集料、河砂细集料、胶凝材料（水泥与粉煤灰）、水和减水剂。粗集料的粒径选用为 3.75 ~ 22.50 mm 且均匀分布的碎石颗粒。细集料的粒径范围为 0.10 ~ 3.75 mm、细度模数为 3.0 的河砂。水泥选用 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥。粉煤灰购自当地某火电厂生产的 II 级粉煤灰。减水剂为聚羧酸

型，呈乳白色液体，减水率可达 39.6%。

1.2 试样制备

采用表 1 配合比制备 5 种不同掺量的铁铝渣混凝土。制备混凝土砂浆的水灰比设为 0.45，采用两种外加剂，引气剂浓度为 0.01%，减水剂浓度为 0.5%。混凝土的制备过程参照行业标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准 (GB/T 50080—2016)》，得到了直径为 50 mm，高度为 100 mm 的圆柱体试样。将制备完成的试样放在养护箱中标准养护 28 d。

表 1 混凝土试件的配合比
Table 1 Mass proportion of concrete samples

铁铝渣掺量/%	单位体积的质量/(kg/m ³)				
	铁铝渣	砂	碎石	水泥	粉煤灰
0	0	650	1 050	375	125
5	110	650	1 050	375	125
10	220	650	1 050	375	125
15	330	650	1 050	355	105
20	440	650	1 050	375	125

1.3 实验方法

1.3.1 压缩实验

压缩实验选用是 YAW-2000B 型无侧限压缩测试仪。实验过程中设置加载速率为 0.15 MPa/s。预计荷载达到仪器最大量程的 15% ~ 25% 时，铁铝渣混凝土发生破坏，根据获取的应力-应变曲线可以计算出混凝土的无侧限抗压强度 UCS 和弹性模量 *E* 等参数。

1.3.2 CT 扫描实验

采用工业 CT 扫描仪进行扫描实验，试样规格同无侧限压缩实验。实验中，首先将混凝土试件放置于工业 CT 扫描仪的载物台上，并以匀速的速度转动载物台；随后发射 X 射线，穿透试件的内部结构，显示出试件的横断面图像，每次扫描可获取 160 张断面图像；最后为使 CT 扫描结果更具可视化，采用 Image J 软件对图像进行数字化处理。

1.3.3 电子显微镜扫描

首先，利用高压水割机在铁铝渣混凝土试件的中心切割出边长为 10 mm 的立方体，随后对切割后试件的断面进行镀金，最后利用 VP435 型电子显微镜获取掺铁铝渣混凝土试件的微观 SEM 图像。

2 实验结果与讨论

2.1 宏观力学特性分析

图2为无侧限压缩实验获取的应力-应变曲线。由图2可知，不同铁铝渣掺量的混凝土的应力-应变曲线均包含3个变化阶段。在初始阶段，竖向荷载的作用导致试件开始被压密，但由于荷载较小，轴向应力增加较为缓慢。随着竖向荷载的增加，铁铝渣混凝土内部的孔隙被挤压，结构致密程度有所提高。进入线弹性阶段后，轴向应力以直线的形式上升，变化速率明显加快，且轴向应力在线弹性阶段的末尾处达到峰值。在软化阶段中，当轴向应变持续增加，应力却出现急剧下降的现象，同时铁铝渣混凝土试件的表面出现了贯通裂隙与压裂破坏面。根据应力-应变曲线获得了混凝土的无侧限抗压强度和弹性模量作为混凝土力学性能强度指标，不同铁铝渣掺量混凝土试件的强度指标的结果见图3。由图3可知，当铁铝渣掺量在0~15%范围内时，混凝土的强度指标随铁铝渣掺量的增加而增加，当铁铝渣掺量超过15%后，强度指标均开始下降。即当铁铝渣掺量为15%时，混凝土试件的无侧限抗压强度和弹性模量达到较大值，较普通混凝土试件分别上升了45%和32%。

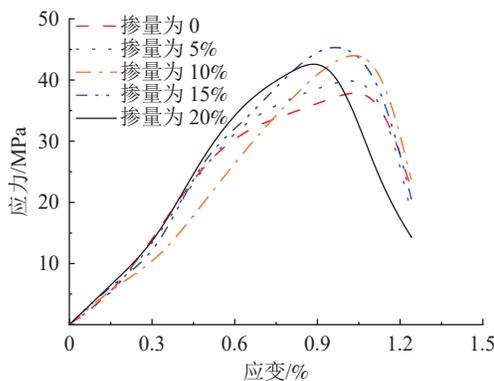


图2 混凝土应力-应变关系曲线

Fig.2 Stress-strain relation curve of concrete

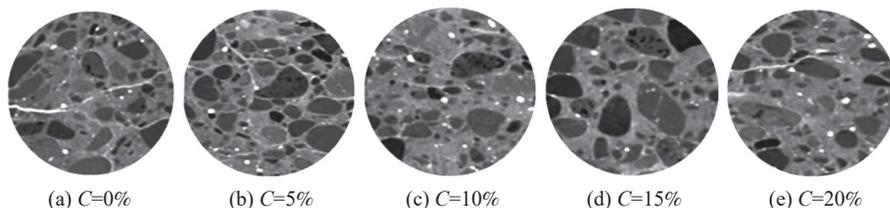


图4 不同铁铝渣掺量条件下混凝土试件的灰度CT图像

Fig.4 Grayscale CT-images of concrete at different ferric-aluminum slag contents

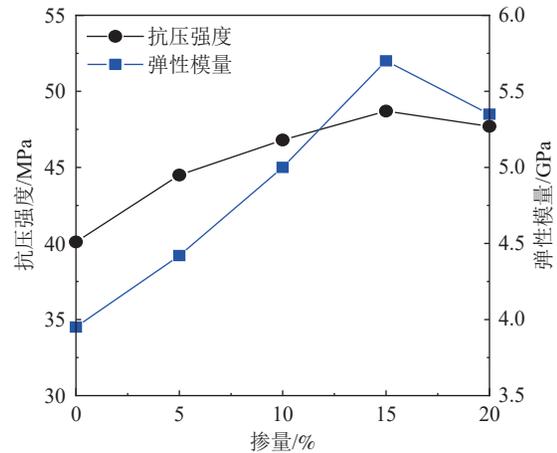


图3 力学指标与掺量的关系

Fig.3 Relationship between mechanical indexes and dosages

2.2 微观结构变化特点

由工业CT扫描实验获取了不同铁铝渣掺量条件下混凝土试件的二维灰度图像。选取了具有代表性的中间层剖切面的图像进行分析，见图4。灰度图像中不同的颜色代表不同密度的物质，低密度的物质颜色较浅，反之较深。为更加直观的显示混凝土的微观结构，特别是孔隙和裂隙的分布特点，对二维灰度图像进行阈值分割与图层渲染获得了二维彩色CT图像见图5。由图5可知，混凝土的内部空间主要由骨料与水泥水化产物所占据，而孔隙与裂隙不规则地分散于混凝土的内部空间。普通混凝土内部出现了较为明显的主裂隙和孔隙，并形成软弱面，对混凝土强度的发挥起到了不利的影响。随着铁铝渣掺量的增加，混凝土中的孔隙的大小和数量并无明显变化，而裂隙的数量余尺寸明显下降。当掺量为15%时，混凝土试件内几乎没有连通裂隙，砂浆密实度显著增加。说明铁铝渣颗粒促进了水化反应，形成的胶凝产物在骨料之间发挥了填充作用，降低了裂隙的连通性。然而，当铁铝渣掺量继续增加，混凝土内部又出现了较为显著的裂隙，表明过高的铁铝渣掺量对混凝土结构的致密性造成了负面影响。

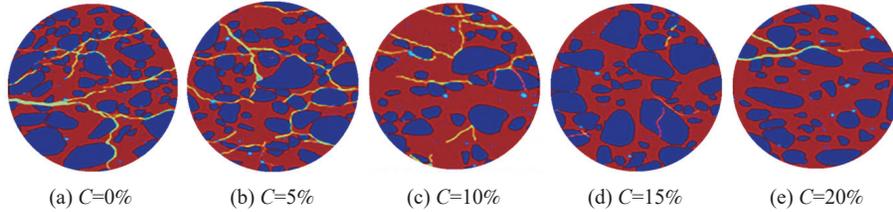


图 5 不同铁铝渣掺量条件下的混凝土试件的彩色 CT 图像

Fig.5 Colorful CT-images of concrete at different ferric-aluminum slag contents

利用 Image J 软件对二维 CT 图像进行数字化处理，计算出了各个试件的孔隙度，并以此参数来表征混凝土的致密程度。为明确孔隙度与铁铝渣掺量的关联性，采用数据拟合的方式给出了孔隙度与铁铝渣掺量之间的关系曲线，见图 6。可以看出拟合曲线复合抛物线型函数形式，孔隙度 ϕ 随掺量 C 增加呈先增后降的变化趋势。图 7 给出了无侧限抗压强度 UCS 与孔隙度 ϕ 之间的拟合关系曲线，从中可以看出，无侧限抗压强度 S_u 与 ϕ 呈现出负线性相关性，且相关系数 R^2 达到了 0.97。拟合数据表明，掺铁铝渣混凝土的宏观力学性质与细观结构特征的演化规律具有较高的同步性。

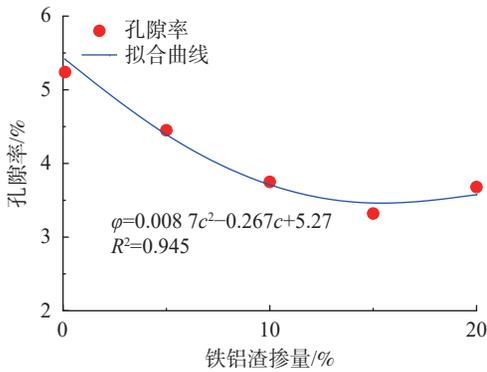


图 6 混凝土孔隙度与掺量的关系曲线

Fig.6 Relationship between porosity and ferric-aluminum slag contents

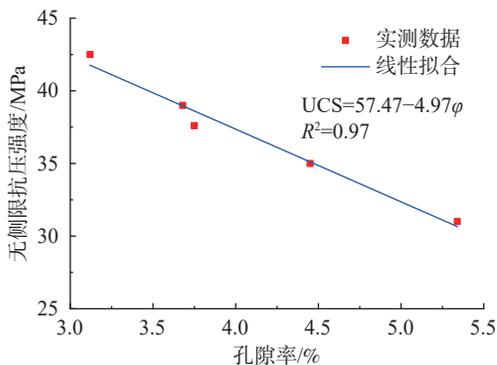


图 7 混凝土抗压强度与孔隙度的关系曲线

Fig.7 Curve between porosity and compressive strength

2.3 微观结构特征

分别对 0%、15% 和 20% 掺量的铁铝渣混凝土开展 XRD 衍射实验，获得了图 8 的混凝土内部硬化水泥砂浆的矿物成分结果。可以看出，掺入 15% 的铁铝渣后，XRD 衍射图谱中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 成分的衍射峰的强度值降低，而水化硅酸钙 (C-S-H) 的峰值有所提高。但当铁铝渣掺量增加至 20% 时，C-S-H 的衍射峰的强度具有下降的趋势，表明混凝土试件内部的水化硅酸钙凝胶减少。XRD 衍射实验的结果表明铁铝渣对混凝土试件内水泥砂浆的水化程度有重要影响。

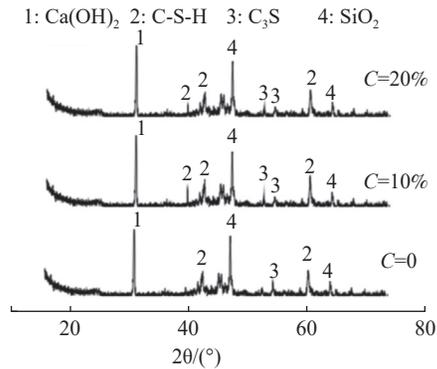


图 8 混凝土中水泥砂浆的 XRD

Fig.8 Mineral diffraction pattern of cement mortar in concrete

为进一步探究铁铝渣对混凝土微观结构的改性机理，对铁铝渣掺量为 0% 和 15% 的混凝土开展扫描电镜实验，结果见图 9。同时在图 9 中的“A 点位”进行材料的能谱分析，得到的元素分布结果图 10 给出。通过观察图 9(a) 发现未掺铁铝渣的混凝土骨料之间的间距较大，且主要以点-面和边-面方式连接。此外，混凝土试件具有较为发育的裂隙结构，对其力学性能和耐久特性均产生了较大的影响。从图 9(b) 可以看出，当铁铝渣掺量为 15% 时，骨料之间已经形成了明显的水化凝胶结构，水化胶凝结构物逐渐填充了试件内部的裂隙，因此混凝土试件的内部仅存在微量的细小孔隙。由图 10 的能谱分

析结果可以看出，经过铁铝渣改性后，Fe和Al元素的含量变化显著，分别上升了6.26倍和5.17倍，而Ca元素的含量也有所上升，说明混凝土的水化程度有所提高，生成了更多水化硅酸钙凝胶。

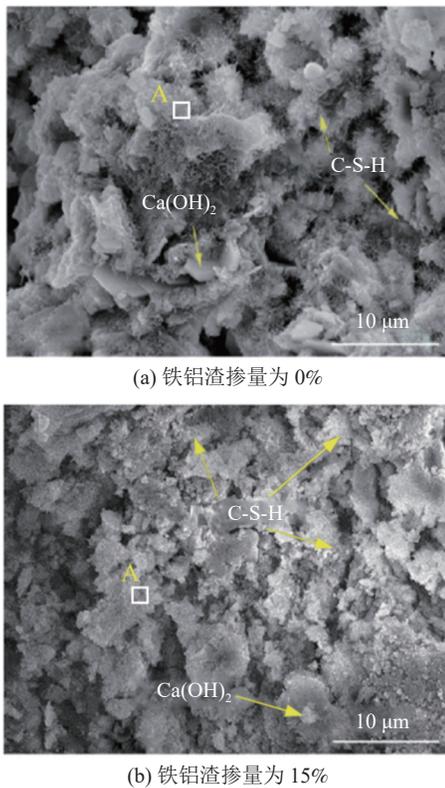


图9 混凝土微观结构的 SEM
Fig.9 SEM of concrete microstructure

2.4 机理分析

通过开展 XRD 实验和扫描电镜实验发现，铁铝渣是一种具有较高化学活性的材料。在混凝土的制备过程中掺入一定量的铁铝渣会促进水泥的水化反应。首先，水泥砂浆中形成了大量的水化硅酸钙以及氢氧化钙；然后，在铁铝渣中化学活性因子激发作用下，氢氧化钙发生二次水化反应，形成了大量可以黏结骨料颗粒的水化凝胶体，同时也在一定程度上对软弱面起到了保护和加固的作用，进而大幅改善了混凝土材料的孔隙结构。然而水化凝胶体的生成量是有一定限度的，当铁铝渣的掺量超过 15% 时，铁铝渣吸收过多水分，影响了水泥的化学反应活性，对水泥砂浆结构的硬化过程不利。因此，当铁铝渣掺量过高时，混凝土试件的强度性能不再随铁铝渣掺量增加而增加。

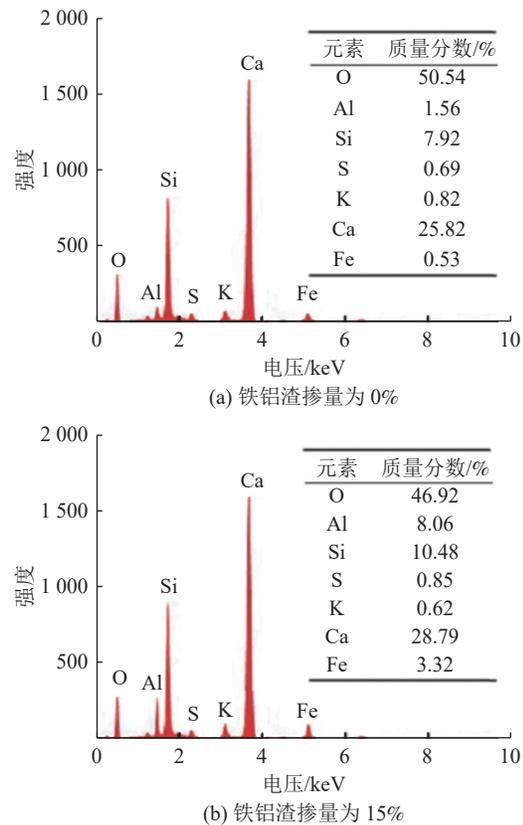


图10 混凝土的能谱分析结果

Fig.10 Results of energy spectrum analysis of concretes

3 结论

(1) 随铁铝渣掺量的增加，混凝土试件的无侧限抗压强度和弹性模量呈现出先增加后降低的变化趋势。当铁铝渣的掺量为 15% 时，强度指标提升最为显著，无侧限抗压强度和弹性模量均达到最大值，较普通的混凝土分别提升了 45% 和 32%。

(2) 在掺入的铁铝渣后，混凝土内部裂隙的尺寸和数量存在明显减少。由工业 CT 扫描结果与图像分析软件计算的孔隙度与铁铝渣掺量呈二次函数关系，无侧限抗压强度随孔隙度增加呈线性下降趋势。

(3) 铁铝渣掺入水泥砂浆后，改变了混凝土骨料之间的连接方式，促进了水泥的二次水化反应，生成了大量水化胶凝体，进而改善了混凝土的密实程度。当铁铝渣的掺量超过 15% 时，影响了水泥的化学活性，对水泥砂浆结构的硬化过程不利。

参考文献：

[1] 李宇, 刘月明. 我国冶金固废大宗利用技术的研究进展及趋势[J]. 工程科学学报, 2021, 43(12):1713-1724.
LI Y, LIU Y M. Progress and trend of bulk utilization technology of metallurgical solid wastes in China[J]. Journal of Engineering Science, 2021, 43(12):1713-1724.

- [2] 郭江, 李荣. B_2O_3 对高铝低镁渣稳定性影响研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):152-156.
- GUO J, LI R. Effect of B_2O_3 on high aluminum low magnesium slag stability[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):152-156.
- [3] ZHAO L H, LI Y, ZHOU Y Y, et al. Preparation of novel ceramics with high CaO content from steel slag[J]. *Mater Des*, 2014, 64:608.
- [4] 孙彦文, 郭持皓, 梁东东. 铝基废料焙烧浸出试验研究[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(4):13-15+21.
- SUN Y W, GUO C H, LIANG D D. Experimental study on roasting and leaching of aluminum base waste[J]. *China Comprehensive Utilization of Resources*, 2020, 38(4):13-15+21.
- [5] 严照照, 张淑会, 董晓旭, 等. 高炉渣的化学成分对其微观结构影响的研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):22-27.
- YAN Z Z, ZHANG S H, DONG X X, et al. Research status of the influence of blast furnace slag chemical composition on its microstructure[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):22-27.
- [6] 冯晓兰. 钠钙硅渣脱碱制备水化硅酸钙的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- FENG X L. Study on preparation of calcium silicate hydrate from sodium calcium silicate slag by dealcalization [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [7] 肖颖, 雷勇. ICP-AES 法测定高钛渣中氧化钙、氧化镁、三氧化二铝等元素[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):89-92.
- XIAO Y, LEI Y. Determination of calcium oxide, magnesium oxide and aluminum oxide in high titanium slag by ICP-AES[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):89-92.
- [8] 薛守宁. 高碳铬铁渣替代天然骨料配制混凝土实验研究[J]. *人民长江*, 2022, 53(S1):107-110+137.
- XUE S N. Experimental study on concrete preparation with high carbon ferrochrome slag instead of natural aggregate[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(S1):107-110+137.
- [9] 刘宏敏. 铝渣骨材作为混凝土粗细骨材再利用的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(2):655-659+669.
- LIU H M. Research on reuse of aluminum slag aggregate as thick and fine concrete aggregate[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramics*, 2016, 35(2):655-659+669.
- [10] 祁皓, 刘旭宏, 黄增楠, 等. 掺复合镍铁渣混凝土梁柱中节点承载力分析[J]. *混凝土*, 2022(6):45-50.
- QI A, LIU X H, HUANG Z N, et al. Analysis of bearing capacity of middle joint of concrete beam and column mixed with composite nickel-iron slag[J]. *Concrete*, 2022(6):45-50.
- [11] 丁先山, 宋凯强, 柳东. 镍铁渣微粉单掺及与粉煤灰复掺对混凝土性能的影响[J]. *水泥工程*, 2016(2):83-86+90.
- DING X S, SONG K Q, LIU D. Effect of single addition of nickel-iron slag and fly ash on concrete performance[J]. *Cement Engineering*, 2016(2):83-86+90.
- [12] 高艳宏. 含硼高炉钛渣粘性特征与结构的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- GAO Y H. Study on viscosity characteristics and structure of titanium slag from BF containing boron[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [13] LI Y, DAI W B. Modifying hot slag and converting it into value-added materials: A review[J]. *J Clean Prod*, 2018, 175:176.
- [14] 崔自治, 陈东东, 张程. 镁渣粉煤灰复掺配制混凝土的自收缩特性[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(3):759-764.
- CUI Z Z, CHEN D D, ZHANG C. Self-shrinkage characteristics of concrete mixed with magnesium slag and fly ash[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramics*, 2017, 36(3):759-764.

Compression Characteristics and Microstructure of Ferric-aluminum Slag Modified Concrete

LIU Yunbing¹, WU Fei²

(1.School of Architecture and Engineering, Luzhou Vocational & Technical College, Luzhou, Sichuan 646000, China; 2.National Engineering Research Center for Green Recycling of Strategic Metal Resources, Beijing 100190, China)

Abstract: Modified concrete was prepared by adding different amounts of iron and aluminium slag into mortar. Compression tests, computed tomography (CT) scans and electron microscope scans were carried out to investigate the mechanical properties and fine structural characteristics of the ferric-aluminum slag doped concrete. The results showed that the compressive strength and modulus of elasticity of the concrete specimens showed an increasing and then decreasing trend with the increase in the amount of ferric-aluminum slag, and the optimum amount of Fe-Al slag was determined to be 15%. The modifying effect of ferric-aluminum slag promoted the secondary hydration reaction of cement mortar, resulting in a reduction of $Ca(OH)_2$ content and an increase of hydrated calcium silicate (C-S-H) content in the concrete, which eventually caused the closure of cracks between the aggregates and improved the overall mechanical properties of the material.

Keywords: concrete; ferric-aluminum slag; microstructure; compression properties; microstructural mechanism