doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503003

水淬镍渣骨料混凝土的力学性能研究

王杜彬[1],尹明干[2],秦学龙[2]
(1. 江苏镇江路桥工程有限公司, 江苏 镇江　212000;
2. 盐城工学院 土木学院, 江苏 盐城　224051)

摘要:本文通过构建粗-细骨料协同取代体系,研究了水淬镍渣中粗、细骨料的掺入对混凝土力学性能的影响规律。结果表明,镍渣中粗、细骨料的掺入,可有效提升混凝土的力学性能。当镍渣粗骨料取代率达75%、细骨料取代率达100%时,混凝土试件的抗压强度和抗折强度较C0F0组分别提升45.0%和112.7%。

关键词:镍渣;混凝土;骨料;抗压强度
中图分类号:TQ528　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)03-0016-03

随着我国镍铁合金产业规模化扩张,镍渣年产量已突破千万吨级,但现行镍渣处置仍以露天堆存或简易填埋为主[1]。这种粗放的废弃物处置模式不仅加剧土地资源消耗,更衍生出重金属浸出风险、粉尘污染扩散等次生环境灾害。因此,开发基于建筑材料的镍渣增值利用技术,已成为实现循环经济发展的关键技术路径。

镍渣主要成分为SiO_2、Fe_2O_3及MgO等金属氧化物[2]。熔融镍渣排出后要经历水淬或风冷工艺[3],露天缓冷的风冷工艺生成以硅酸镁铁结晶为主的矿物结构;水淬法则以急速水冷却高温熔渣,高冷却速率促使玻璃体大量形成。风冷和水淬生成的镍渣均具有致密坚硬的物理特性,经破碎加工后作为优质骨料替代天然砂石资源[4-7],不仅可以缓解天然砂石资源压力,还能实现大宗固废的高效利用,有效规避传统堆填处置引发的环境风险[8]。

镍渣机械破碎过程中会生成多粒径级配颗粒。本研究选取江苏德龙镍业冶炼产出的水淬镍渣为原料,经多级筛分处理后协同替代传统混凝土的碎石与河砂组分,系统探究镍渣骨料全级配替代模式对混凝土抗压强度和抗折强度等关键力学性能参数的影响规律,进而构建其工程化应用的理论支撑体系。

1　实验原料

实验所用水淬镍渣原料取自江苏德龙镍业有限公司;胶凝材料选用安徽海螺水泥有限公司生产的P. O 42.5级普通硅酸盐水泥;外加剂采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的粉状聚羧酸系高效减水剂产品;集料包含两种,其中粗集料为5~20 mm连续级配的石灰岩机制碎石(级配质量比为60%(5~10 mm的碎石):40%(10~20 mm的碎石)),细集料为细度模数0.95的天然河砂。

为研究镍渣骨料的全级配替代模式对混凝土抗压强度和抗折强度等关键力学性能的影响规律,需要对原始的水淬镍渣原料实施破碎处理,再通过多级筛分工艺完成骨料分级,最终分离出符合典型建筑骨料区间的粒径为5~20 mm的粗骨料和细度模数为0.94的细骨料。

为保证镍渣骨料的使用安全性,采用《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法(HJ/T 299—2007)》[9]测定镍渣骨料浸出液中Pb、Ni、Cr、Cd、Zn和Ba等元素的浓度。结果表明,上述毒性元素浓度均低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别(GB 5085.3—2007)》[10]的鉴别标准值。

对上述符合安全标准的镍渣骨料通过X射线

收稿日期:2025-02-19
基金项目:安徽省先进建筑材料国际联合研究中心开放课题(JZCL2304KF)。
作者简介:王杜彬(1976—),男,江苏镇江人,高级工程师,主要研究方向为道路桥梁与改扩建工程。

荧光光谱（ARL ADVANT′XP）分析其化学组成，结果如表 1 所示。由表 1 可知，该镍渣主要成分为 SiO_2 和 MgO。利用 XRD 衍射（Thermo Scientific ARL 9900）图谱分析镍渣矿相组成，结果如图 1 所示。以刚玉为内掺标定物并利用 Rietveld 定量分析可知，镍渣中的无定型相含量>95%，且含有少量铁镁橄榄石 $Mg_{1.83}Fe_{0.18}SiO_4$ 和石英 SiO_2；大量玻璃体物相归因于水淬镍渣的急冷过程。通过扫描电子显微镜（SEM）观测镍渣细小颗粒的微观形貌，结果如图 2 所示。由图 2 可知，镍渣颗粒的断面较光滑，说明镍渣质地坚硬。

表 1　水淬镍渣的主要化学组分

Table 1　The main chemical components of water-quenched nickel slag　　%

氧化物	质量百分数
SiO_2	52. 30
Al_2O_3	4. 10
Fe_2O_3	6. 60
CaO	9. 82
MgO	24. 90
Cr_2O_3	0. 60
烧失量	0. 57

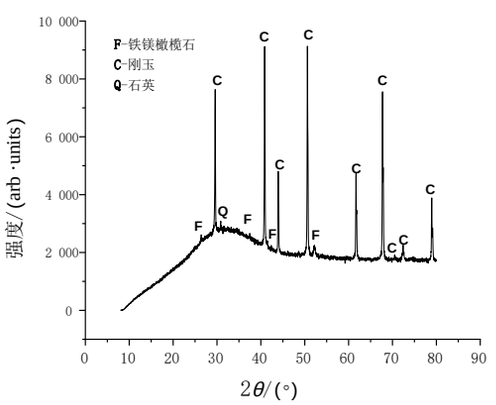


图 1　水淬镍渣的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of water-quenched nickel slag

2　混凝土制备与试件检测

依据《普通混凝土配合比设计规程（JGJ 55—2011）》[11] 和表 2 的混凝土配合比，采用梯度替代法进行 C50 混凝土的配合比设计与优化。实验时，粗骨料中镍渣替代天然碎石的比例设置为 0、25%、50%、75%、100%（粗骨料级配保持一致）5 个梯度，细骨料部分采用镍渣取代河砂的方案，替代率分别为 0、50%、100%（细骨料模数保持一致）3 个梯度；设定单位立方米混凝土总质量为 2 400 kg，采用 0. 40 的水胶比及 0. 365 的砂率配置体系。

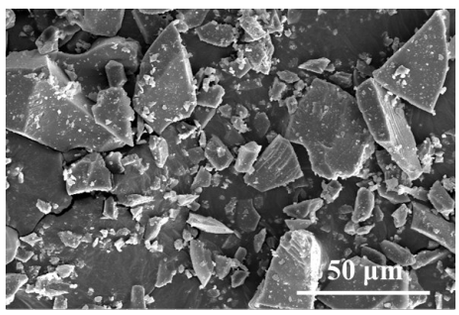


图 2　水淬镍渣的 SEM 照片

Fig. 2　SEM image of water-quenched nickel slag

将按照上述配比并搅拌均匀的混凝土料注入边长为 100 mm 的立方体试模和 150 mm×150 mm×600 mm 的长方体试模，经标准养护 24 h 后完成脱模操作；在标准养护条件下（20 ℃，相对湿度 95%）持续养护 28 d 后对试件进行抗压强度测试和微观结构观察，具体步骤如下：

1）试件抗压强度和抗折强度测试。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准（GB/T 50081—2019）》[12] 规范要求，采用全自动万能试验机（AWHY-200）分别测试立方体和长方体混凝土试块的抗压强度和抗折强度。

2）试件的微观结构观察。对抗压强度测试后获得的破碎试样实施粗骨料分离处理后，选取粒径约 5 mm 的砂浆颗粒采用分析纯级乙醇浸渍 24 h 终止水化反应，随后在真空干燥箱中完成脱水处理；将干燥试样包埋于环氧树脂中形成固化模块，经 1 000~7 000 目梯度砂纸精密研磨后，采用 10 000 目金刚石抛光膏实现亚微米级表面处理，继而通过乙醇超声清洗去除表面残留；最终对试样表面实施离子溅射镀金处理，再运用配备背散射电子探测器（BSE）的 FEI NoveNanoSEM 650 场发射扫描电镜，对细骨料-水泥基体界面过渡区（ITZ）的黏结特性进行显微结构表征。

3　试件力学性能的影响因素

3. 1　镍渣粗骨料

根据上述抗压强度测试过程，得到不同镍渣粗骨料取代率对混凝土 28 d 抗压强度、抗折强度的影响规律，如图 3 所示。由图 3 可知，基准组 C0F0（未掺镍渣粗骨料）试件抗压强度和抗折强

表2　混凝土配合比

Table 2　Mix proportions of concretes　　kg/m^3

编号	水泥	水	碎石 粗骨料	镍渣 粗骨料	河砂 细骨料	镍渣 细骨料	外加剂
C0F0	430	174	1 140		655.0		1
C25F0	430	174	855	285	655.0		1
C50F0	430	174	570	570	655.0		1
C75F0	430	174	285	855	655.0		1
C100F0	430	174		1 140	655.0		1
C75F50	430	174	285	855	327.5	327.5	1
C75F100	430	174	285	855		655.0	1
C100F50	430	174		1 140	327.5	327.5	1
C100F100	430	174		1 140		655.0	1

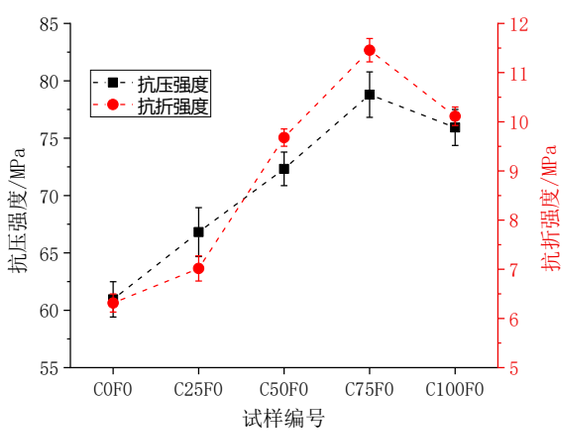


图3　掺镍渣粗骨料混凝土的28 d龄期抗压强度及抗折强度

Fig. 3　Compressive strength and flexural strength of concrete with nickel slag coarse aggregate at 28-day age

度分别为60.95 MPa和6.3 MPa,满足《普通混凝土配合比设计规程(JGJ 55—2011)》[11]的C50强度等级设计标准;提高镍渣粗骨料的取代率明显增加了混凝土的强度发展,当镍渣骨料取代率提升至75%(C75F0组)时,试件抗压强度和抗折强度均达到峰值,分别为78.8 MPa和11.5 MPa,较基准组实现29.3%和82.5%的强度提升,且抗折强度的增长率更大;当镍渣粗骨料取代率超过75%后试件出现强度衰减现象,当镍渣粗骨料取代率提升至100%(C100F0)时,试件的抗压强度和抗折强度分别降至75.9 MPa和10.1 MPa。这种现象可能因为,水淬镍渣因其特有的物理特性,其压碎指标显著优于传统的石灰岩骨料[4],适量镍渣(≤75%)掺入与石灰岩骨料在形态特征和物理性能上形成互补效应,通过优化颗粒级配有助于实现密实堆积结构,从而有效增强了混凝土基体的力学性能;然而过高的镍渣骨料取代率会破坏这种协同效应,特别是当粗骨料体系转变为单一镍渣组分时,界面过渡区薄弱环节增加,最终引起强度劣化[13]。

3.2　镍渣细骨料

图4揭示了镍渣细骨料取代率对C75/C100系列混凝土28 d抗压强度、抗折强度的差异化影响。由图4可知,镍渣细骨料取代天然河砂明显提升了混凝土的抗压和抗折强度,对于C75组,当细骨料取代率达到50%(C75F50组)和100%(C75F100组)时,抗压强度分别提升至84.1 MPa和88.4 MPa,抗折强度分别提升至12.9 MPa和13.4 MPa;C75F100组的强度最高,较C0F0组的抗压强度和抗折强度分别提升了45.0%和112.7%;对于C100组,镍渣细骨料取代率为50%(C100F50组)和100%(C100F100组)后,抗压强度分别提升至79.3 MPa和82.3 MPa,抗折强度分别提升至10.5 MPa和10.9 MPa。

3.3　混凝土养护龄期

以C75F100混凝土试件为例,研究养护龄期对试件抗压强度和抗折强度的影响,结果如图5所示。由图5可知,随着养护龄期的延长,C75F100混凝土试件的抗压强度和抗折强度均随之增加,至养护龄期28 d时混凝土试件的抗压强度和抗折强度均达到最大;养护龄期达28 d后,随着养护龄期的延长,试件的抗压强度和抗折强度均有小幅下降。具体地说,C75F100混凝土试件7 d养护龄期的抗压强度和抗折强度分别为

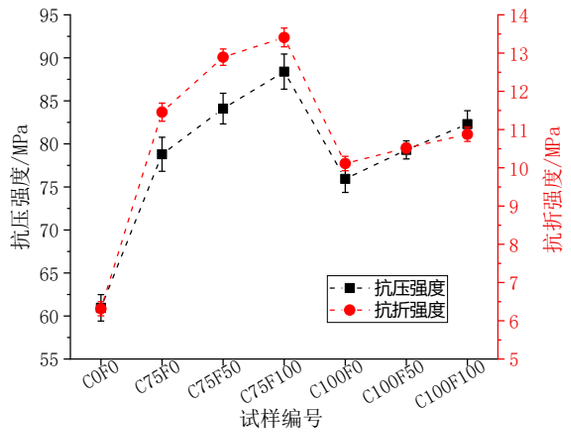


图 4　掺镍渣粗骨料和细骨料混凝土 28 d 龄期的抗压强度及抗折强度

Fig. 4　Compressive strength and flexural strength of concrete with nickel slag coarse and fine aggregates at 28-day age

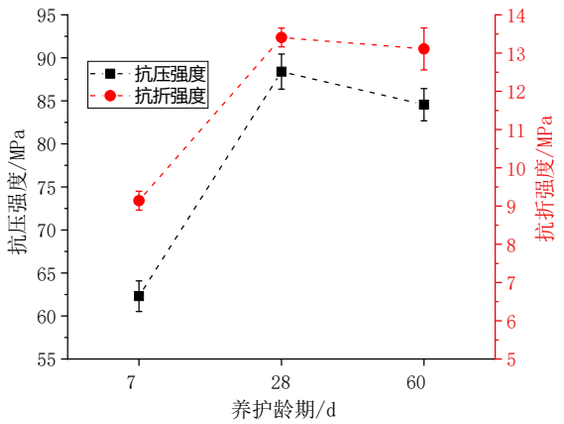


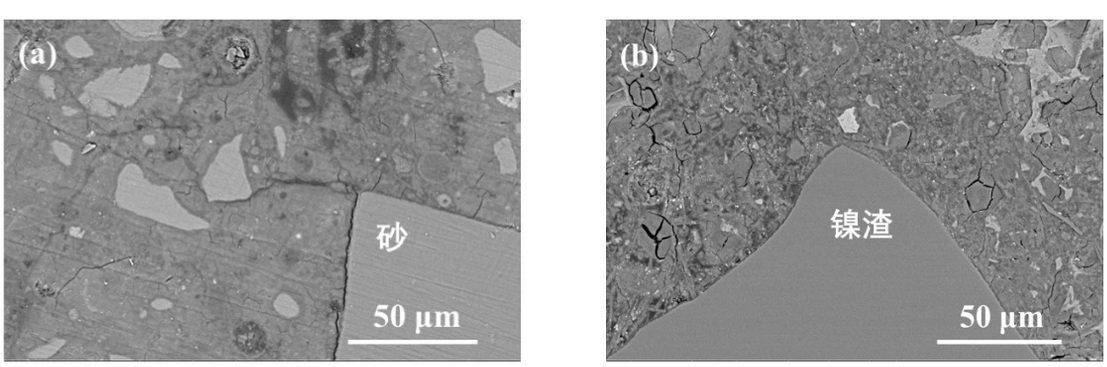
图 5　C75F100 混凝土试样不同龄期的抗压强度和抗折强度

Fig. 5　Compressive strength and flexural strength of C75F100 concrete specimens at different ages

62.3 MPa 和 9.14 MPa，28 d 养护龄期的抗压强度和抗折强度分别为 88.40 MPa 和 13.41 MPa，60 d 龄期的抗压强度和抗折强度分别为 84.56 MPa 和 13.11 MPa。

4　试件微观结构分析

图 6 的 SEM 显微图像揭示了不同细骨料体系对水泥基体界面特性的影响差异。由图 6 可知，在图 6a 的河砂体系（C100F0）中，骨料–浆体界面过渡区存在明显的裂隙带，表明河砂细骨料与水泥基体粘接并不严密；在图 6b 的镍渣细骨料体系（C100F100）中，骨料–浆体界面过渡区展现了连续致密结构。这是因为，水淬镍渣作为熔融渣经水淬急冷形成的团块状物料，内部玻璃体含量多，具有更好的微观结构均匀性，这种固有特性有助于缓解抗压过程中骨料内部的应力集中，直接提升了粗细骨料的力学性能。



a　C100F0　　b　C100F100

图 6　掺镍渣细骨料的砂浆断面形貌

Fig. 6　Fracture morphology of mortar with nickel slag fine aggregate

5　结论

本文通过构建粗–细骨料协同取代体系有效提升了混凝土试件的力学性能。通过混凝土试件的抗压强度、抗折强度检测，发现当镍渣粗骨料取代率达 75%、细骨料取代率达 100% 时，混凝土试件的抗压强度和抗折强度较 C0F0 组的抗压强度和抗折强度分别提升 45.0% 和 112.7%；通过混凝土试件的微观结构分析，发现粗骨料骨架的支撑作用，以及粗细骨料双掺体系产生的级配效应和紧密堆积可能是导致混凝土试件力学性能提高的重要原因。该发现为水淬镍渣在混凝土中的利用提供了关键技术路径，还可为绿色高性能混凝土的开发提供重要理论依据。但需要

注意的是,虽然镍渣中的活性镁质组分主要以硅酸镁的形式存在,但仍无法保证其不参与水化反应[3]。当镍渣中溶出的Mg^{2+}在水泥的碱性环境下生成$Mg(OH)_2$后会引发结晶膨胀,这种潜在的膨胀风险需要后续大量研究以保证镍渣骨料混凝土的体积安定性。

参考文献:

[1] 李小明, 沈苗, 王翀, 等. 镍渣资源化利用现状及发展趋势分析[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 100-105.

[2] 盛广宏, 翟建平. 镍工业冶金渣的资源化[J]. 金属矿山, 2005(10): 68-71.

[3] YANG T, ZHANG Z H, ZHU H J, et al. Re-examining the suitability of high magnesium nickel slag as precursors for alkali-activated materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 109-120.

[4] 单昌锋, 王键, 郑金福, 等. 镍渣在混凝土中的应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1263-1268.

[5] NGUYEN Q D, CASTEL A, KIM T, et al. Performance of fly ash concrete with ferronickel slag fine aggregate against alkali-silica reaction and chloride diffusion[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 139: 106265.

[6] LIU X M, LI T Y, TIAN W G, et al. Study on the durability of concrete with FNS fine aggregate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 381: 120936.

[7] CHOI Y C, CHOI S. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99: 279-287.

[8] SAHA A K, SARKER P K. Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 438-448.

[9] 国家环境保护总局. 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法: HJ/T 299—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[10] 国家环境保护总局. 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别: GB 5085.3—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[13] 王强, 曹丰泽, 于超, 等. 钢渣骨料对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1004-1010.

Study on the Mechanical Properties of Concrete with Water-quenched Nickel Slag Aggregate

WANG Dubin[1], YIN Minggan[2], QIN Xuelong[2]

(1. Jiangsu Zhenjiang Road and Bridge Engineering Co. Ltd., Zhenjiang Jiangsu 212000, China;
2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: In this study, a coordinated replacement system of coarse and fine aggregates was constructed to investigate the influence law of the incorporation of coarse and fine aggregates from water-quenched nickel slag on the mechanical properties of concrete. The results show that the incorporation of coarse and fine aggregates from nickel slag can effectively improve the mechanical properties of concrete.When the replacement rate of nickel slag coarse aggregate reaches 75% and that of nickel slag fine aggregate reaches 100%, the compressive strength and flexural strength of concrete specimens increase by 45.0% and 112.7% respectively,compared to the C0F0 group.

Keywords: nickel slag; concrete; aggregate; compressive strength

(责任编辑:邵 茗)