

引文格式:代文彬,陈曦,陈奎元,等. 镍铁渣-高炉渣复合微粉力学性能研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(2): 135-142.

DAI Wenbin, CHEN Xi, CHEN Kuiyuan, et al. Mechanical properties of the admixture of ferronickel slag blended with the ground granulated blast furnace slag[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(2): 135-142.

镍铁渣-高炉渣复合微粉力学性能研究

代文彬, 陈曦, 陈奎元, 樊亚鑫, 陈学刚

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 我国电炉镍铁渣(FNS)产出较多,该渣具有一定碱水化活性,可作为辅助胶凝材料;高炉渣(GGBS)具有优良的水化胶凝活性,是性能最佳的辅助胶凝材料之一。为了最大资源化利用镍铁渣,本文采用在高炉渣中掺入镍铁渣的方式制备活性复合微粉,并考察了其活化性能和力学性能等指标,得到以下主要结论。增加镍铁渣粉比表面积,能够提高镍铁渣-水泥砂浆试件力学强度,但会降低韧性;当镍铁渣在复合微粉中占比低于20%时,能够达到S105级矿渣微粉活性要求;占比为20%~40%时,能够达到S95级活性要求;掺入镍铁渣能够降低易磨性,故混配成复合微粉之前,镍铁渣需预磨至一定细度;掺入镍铁渣后能导致砂浆早期强度损失,但随龄期增加镍铁渣水化活性逐渐显现;当微粉比表面积为410~432 m²/kg时,活性可达到Ⅱ级复合掺合料标准,比表面积增至519 m²/kg,活性可达到Ⅰ级标准;镍铁渣价格低于高炉渣,掺入镍铁渣能降低复合微粉生产成本,但掺加比例不宜超过20%,此时成本可降低约10%,同时具有较好的技术经济性。

[关键词] 镍铁渣;高炉渣;复合微粉;力学性能;建筑材料

[中图分类号] [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)02-0135-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.02.014

随着不锈钢的广泛使用,使得镍铁合金被大量生产,但同时也产出大量镍铁渣(FNS)固废。在中国,镍铁渣年产量近300万t,累积排放量超过1亿t,而综合利用率却仅为8%,其余仍处于堆存状态,对环境造成污染^[1-3]。

镍铁渣主要成分是SiO₂、Fe₂O₃、MgO、Al₂O₃、CaO等。经火法冶炼后直接水碎处理,表面光滑有玻璃光泽,应用于混凝土时能减少用水量,提高混凝土和易性和强度^[4]。镍铁渣有约50%非晶玻璃相,以及约48%镁橄榄石、2.2%顽火辉石和0.4%石英等晶体相^[5]。在碱性水溶液环境中,硅酸盐非晶相能同溶液中Ca(OH)₂发生水化反应,形成水化硅酸钙凝胶(C—S—H);此外,非晶相中的FeO还可形

成Fe(OH)₃或Fe(OH)₂凝胶,填充在其他水化产物之间,起到填充和胶结作用。镍铁渣和火山灰用于生产复合水泥,可降低水泥需水量,延长凝结时间,改善砂浆和易性^[6]。在水泥中掺入镍铁渣,可以降低C—S—H凝胶中Ca/Si比,提高硅酸盐链聚合度^[6];使用机械活化后的镍铁渣制做蒸压混凝土,其水化产物可从C—S—H和钙矾石转变为托勃莫来石和硬石膏,进而产生优异力学性能^[7]。用碱活化后的高炉镍铁渣制备胶凝材料,能加快初始放热速率,提高水化反应程度,使孔结构更加致密^[8]。综上,镍铁渣具有一定碱水化活性,能够作为辅助胶凝材料。

目前,镍铁冶炼多使用红土镍矿,但因所采用的冶炼工艺和矿石种类不同,产出的镍铁渣主要分为高炉镍铁渣和电炉镍铁渣两种。其中,以电炉镍铁渣产出较多,其MgO含量较高。MgO水化为Mg(OH)₂时会产生约1.5倍体积膨胀,导致水泥石和混凝土膨胀开裂^[9]。因此,只有不到8%的电炉镍

[收稿日期] 2024-12-10 [修订日期] 2024-01-23

[录用日期] 2024-01-25 [出版日期] 2025-04-01

[第一作者] 代文彬(1986—),安徽界首人,博士后,高级工程师,主要从事工业固废综合利用、火法冶金、建筑材料等方面研究。

[基金项目] 五矿科创基金(YG2302)。

铁渣被用于建材,绝大部分被填埋处理^[10]。然而,镍铁渣中的 MgO 多以镁橄榄石或非晶相存在,非游离方镁石,掺有镍铁渣的混凝土经长时间热养护也未发现膨胀开裂现象,但会降低早期强度,通常会限制镍铁渣掺入比例。

炼铁高炉水碎渣 (GGBS) 因具有优良的水化胶凝活性,被广泛应用于水泥、混凝土、预制件等建材领域,是性能最佳的辅助胶凝材料之一。但在部分地区,高炉矿渣粉价格甚至接近于普通硅酸盐水泥,使用成本较高。而向高炉渣中掺入镍铁渣,既能消纳镍铁渣固废,弥补活性不足劣势,还能降低高炉渣粉加工成本,增加经济收益。因此,本文研究了掺入电炉镍铁渣后的复合高炉矿渣粉性能,评估其技术经济可行性,以促进镍铁渣高效资源化应用。

1 试验介绍

1.1 原材料

1.1.1 镍铁渣成分属性

镍铁渣主要化学组成(质量百分比)为 SiO₂ 30% ~63%、Fe₂O₃ 1% ~15%、MgO 2% ~34%、CaO 0.3% ~25%、Al₂O₃ 2% ~26%,并含有少量的 Cu、Ni、S、Co 等金属元素。通常,高炉镍铁渣含有较低含量的 MgO,主要由 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 构成,而电炉镍铁渣则含有较高含量的 MgO 和 SiO₂。

图 1 为不同 MgO 含量镍铁渣主要化学组分统计变化,主要分为 2% ~13% MgO 的低镁镍铁渣(高炉镍铁渣)和 23% ~34% MgO 的高镁镍铁渣(电炉镍铁渣)。高镁镍铁渣具有较高的 SiO₂ 含量、(S+A)/(F+C) 比值、S/(F+M+C) 比值和较低的 F+C 含量。通常 S/(F+M+C) 比值或 SiO₂ 饱和度越低,火山灰活性越高。因此,对于 CaO 和 Al₂O₃ 含量较高的高炉镍铁渣,其活性高、应用性好^[6],而电炉镍铁渣应用性较差。

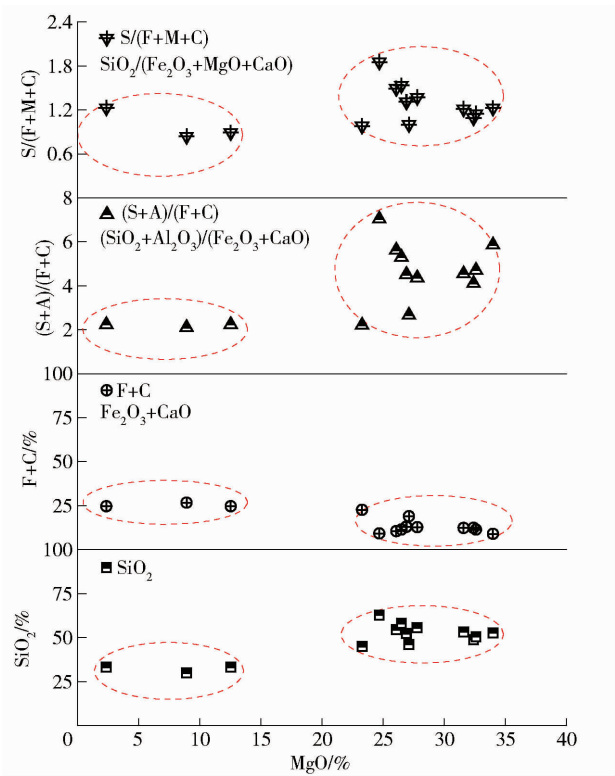


图 1 不同 MgO 含量镍铁渣化学组成分布
Fig. 1 Chemical composition distribution of FNS vs MgO content

1.1.2 试验原料属性

试验所用渣原料主要为电炉镍铁渣和炼铁高炉渣,均取自曹妃甸地区。为减少其他原料影响,试验水泥选用 P. I 42.5 基准水泥。表 1 为采用 X 射线荧光光谱仪(型号 Axios MAX, Panalytical)分析的原料化学成分。表 2 为镍铁渣和高炉渣基础物性,图 2 为采用 X 射线粉末衍射仪(型号 Utima IV, 日本理学)分析的矿物相构成。

相比高炉渣,镍铁渣含有更多的 SiO₂、MgO 和 Fe₂O₃,具有较高的密度和磁性物,非晶相含量也较低。虽然两种渣综合碱度(R 值)相近,但镍铁渣 A/S 值更低,表面水化活性较差。

表 1 不同原料化学成分(质量百分比)

Table 1 Chemical composition of raw materials(mass percent) %

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	KNaO
镍铁渣	45.49	3.66	4.74	30.87	10.68	0.2	1.5	0.09	0.18
高炉渣	32.76	36.52	15.01	6.43	1.26	1.27	0.61	—	1.16
水泥	20.64	63.61	4.94	2.92	3.35	2.57	—	—	0.85

表 2 镍铁渣和高炉渣基础物性

Table 2 Fundamental properties of FNS and GBFS

性能参数	镍铁渣	高炉渣
R 值 ^①	0.90	0.93
A/S 指数 ^②	0.10	0.46
吸水率/%	3.38	4.20
磁性物/%	23.92	<0.5%
真密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3.01	2.91
烧失率/%	-0.72	-1.47
非晶相/%	40.69	96.39
晶相/%	58.72(橄榄石), 2.68(铁), 0.93(碳) 0.59(石英)	

注：① R 值 = $w. \% (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / w. \% (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ ；
②A/S 指数 = $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ 。

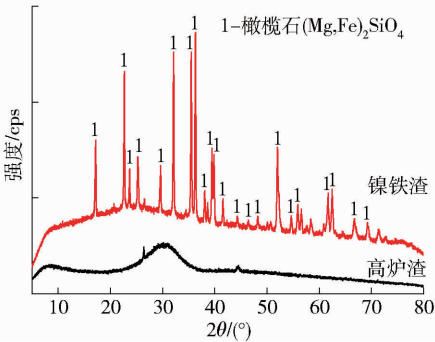


图 2 镍铁渣和高炉渣矿物相分析
Fig.2 XRD patterns of FNS and GBFS

1.2 试验方法

参照相关标准^[8, 11]，对镍铁渣粉、高炉渣粉及两者复配微粉进行替代部分水泥后的水化性能研究。在同水泥混合之前，镍铁渣和高炉渣均先在 105 ℃烘箱内干燥 24 h 以充分脱除自由水；然后，将镍铁渣预先破碎至粒径小于 5 mm 后，再将两种渣分别单独粉磨或混合粉磨至一定比表面积后（勃氏法测量，型号 FBT-9），再按表 3 配料比例制作成 40 mm × 40 mm × 160 mm 水泥胶砂标准试件。在标准条件（20 ℃湿度 > 95%）养护至一定龄期后（7 d 和 28 d），采用 EHDC 恒力加载压力试验机测试试件抗折强度和抗压强度，并计算不同龄期微粉活性指数。

其中，活性指数为参比试件抗压强度/对比试件抗压强度的百分比。试验渣的粉磨处理，所用设备为水泥试验小磨，每次入磨渣量固定为 2 kg。

表 3 标准胶砂试件配比(GB/T 18046)

Table 3 Raw materials composition of standard

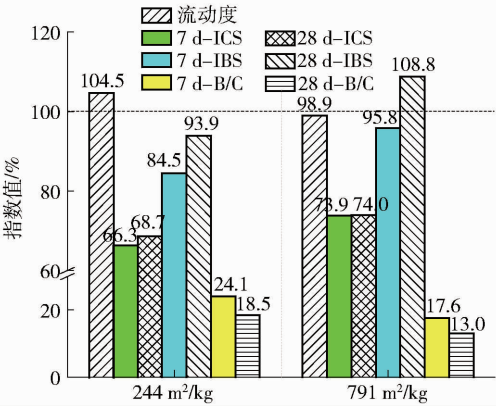
mortars				
试件种类	水泥	矿渣粉	标准砂	水
对比试件	450	—	1 350	225
参比试件	225	225	1 350	225

2 试验结果与讨论

2.1 不同比表面积镍铁渣粉胶砂强度

将镍铁渣分别研磨成比表面积 244 m²/kg 的粗粉和 791 m²/kg 的细粉，研究单掺两种渣粉后标准砂浆性能，结果见图 3。

可见，增加镍铁渣比表面积，试件抗压强度指数（ICS）和抗折强度指数（IBS）均得到提高，但砂浆流动性和折/压比则会降低。这表明提高镍铁渣比表面积可促进其水化反应进行，增强材料水化胶结力和试件强度，但也会提高材料标准需水量，降低材料韧性。这是由于比表面积增加，固液水化反应界面增多，渣中更多活性物质参与水化胶凝反应，促进更多胶结物形成。但颗粒表面吸附水量也会增加，在保证砂浆流动性前提下，会需要加入更多水，这样在固化体材料中会形成更多气孔，不利于提高胶结材料密实性，应合理控制渣粉比表面积。



ICS - 抗压强度比; IBS - 抗折强度比; B/C - 抗压强度/抗折强度

图 3 两种比表面积镍铁渣粉砂浆性能

Fig.3 Properties of cement-FNS mortar in two BET

2.2 机械混合复合微粉砂浆性能

按表 4 配制表 3 标准砂浆试块所用胶凝材料，研究不同掺比和不同比表面积复合微粉性能变化，各渣粉活性指数（ICS）和砂浆流动性见图 4。

随着镍铁渣在复合微粉中掺入比例增加,试件砂浆流动性和7 d、28 d 活性指数均呈逐渐降低趋势。当镍铁渣掺入比例不高于20%时,复合微粉活性仍满足S105级矿渣微粉要求。当镍铁渣掺入比例达20%~40%时,复合微粉活性仍满足S95级矿渣微粉要求。这能够降低混凝土搅拌站常用S95级及以上高炉矿渣微粉原料成本。因此,复合微粉性能主要取决于高炉矿渣粉自身性能,镍铁渣粉磨越细,越能提高复合微粉早期水化活性,但对后期活性有影响。此外,镍铁渣粉磨越细,砂浆流动性越低于95%标准要求,故对于机械混合方式制备复合微粉,镍铁渣不能粉磨过细。

表4 标准试块用不同镍铁渣掺比
胶凝材料组成(质量百分比)

Table 4 The cementitious material with
different FNS ratio for standard mortar

block (mass percent)				%
序号	镍铁渣 F	高炉渣 G	水泥 C	镍铁渣/复合微粉 F/(F+G)
NC	0	0	100	—
No. 0	0	50	50	0%
No. 1	5	45	50	10%
No. 2	10	40	50	20%
No. 3	15	35	50	30%
No. 4	20	30	50	40%
No. 5	25	25	50	50%

2.3 机械混合粉磨复合微粉砂浆性能

2.3.1 渣粉比表面积变化

将不同比例镍铁渣和高炉渣采用直接混合粉磨方式制备复合微粉。图5为不同比例复合微粉经不同研磨时间后的比表面积变化。可见,高炉渣具有良好的易磨性,但掺入镍铁渣后,易磨性变差,并且所有复合微粉易磨性几乎同镍铁渣相近。因此,镍铁渣能够降低高炉渣易磨性,在同高炉渣复合混磨之前应先对镍铁渣进行预研磨。

2.3.2 砂浆流动性变化

图6为不同镍铁渣掺入比例复合微粉水泥砂浆流动性指数。基于高炉渣和镍铁渣砂浆流动性大小,根据 $F/(F+G)$ 比例按加权法计算理论流动性指数,阴影区域为实验值和理论值差值。

可见,复合微粉流动性实验值在理论虚线附近

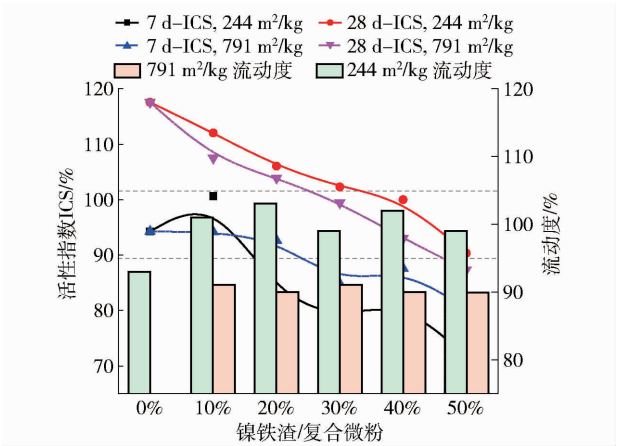


图4 不同比表镍铁渣-高炉渣复合粉
活性指数和砂浆流动性

Fig. 4 Activity index of strength and fluidity
of C—F—G mortars with different BET of FNS

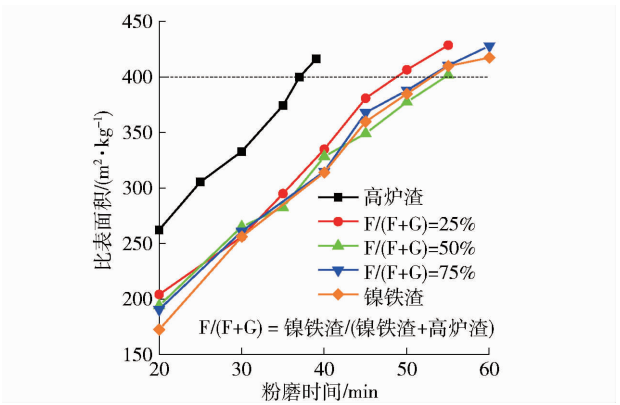


图5 不同混磨时间比表面积变化

Fig. 5 Variation of BET vs grinding time

波动,并随 $F/(F+G)$ 比例增加整体呈上升趋势。这是由于高炉渣粉具有高含量非晶相,原子排列无序,颗粒表面极性高,易吸附水。相比镍铁渣,晶相含量高,颗粒吸水性差,使得其在同样配水量下砂浆内自由水过多,使得砂浆流动性提高。因此,在高炉渣粉中掺入镍铁渣,砂浆标准需水量会减少,易于改善砂浆工作性,并减少砂浆硬化体含水量,降低气孔率。

2.3.3 复合微粉砂浆力学性能

图7为不同比例复合微粉试件力学强度变化。随着镍铁渣掺比增加,7 d和28 d活性指数(ICS,图7(a))均呈下降趋势。7 d龄期试验ICS值接近理论值,而28 d龄期试验ICS值高于理论值,且随着 $F/(F+G)$ 比例增加,试验ICS值偏离量越来越多。

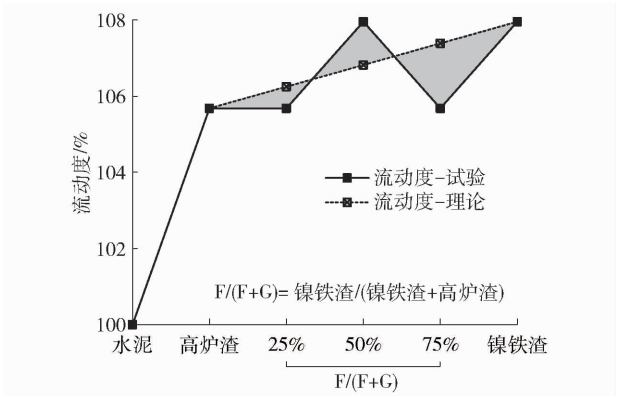


图 6 混有不同比例镍铁渣复合微粉的砂浆流动性

Fig. 6 Fluidity index of cement-slag mortar with different F/G ratio

表明复合微粉中掺入镍铁渣会导致试件早期强度损失,无明显双渣耦合性水化反应。但随着养护龄期延长,耦合性水化反应发生,此时试件后期强度高于理论值,说明镍铁渣具有较高的后期水化反应性。

图 7(b) 为试件抗折强度比值 (IBS) 变化。除高炉渣试件 28 d 时 IBS 值较高外,其他试件随着 $F/(F+G)$ 比值增加,IBS 值均呈明显下降趋势,且试验值均略高于理论值。这说明向高炉渣中加入镍铁渣会减弱材料抗拉伸张力,但在后期因镍铁渣发生水化反应,又提高试件抗拉伸能力。

图 7(c) 为不同 $F/(F+G)$ 比例试件折/压比值 (B/C) 变化,可反映材料韧性大小。可见,试件早期 (7 d) B/C 值普遍高于后期 (28 d) B/C 值。且随着 $F/(F+G)$ 比例增加, B/C 值呈增长趋势,但试验值远低于理论值。由此,对于水泥-高炉渣胶材体系,掺入镍铁渣虽可提高材料韧性,但也同时降低材料耐压性能。

2.4 不同比表面积试件流动性和抗压强度统计

考虑在砂浆、混凝土等建材生产中,活性掺合料在胶材中的比例通常不超过 30%,因此,固定复合微粉/总胶材比例为 30%,即 JG/T 486^[12] 标准检测方法,研究不同 F/G 比例复合微粉在不同比表面积时砂浆流动性和活性指数 (ICS) 情况,统计结果见图 8。

随着渣粉比表面积从 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ 增加至 $600 \text{ m}^2/\text{kg}$,砂浆流动性从 108% 降低到 102%,而 7 d 和 28 d 的 IBS 值均有所增加。根据 JG/T 486 混凝土

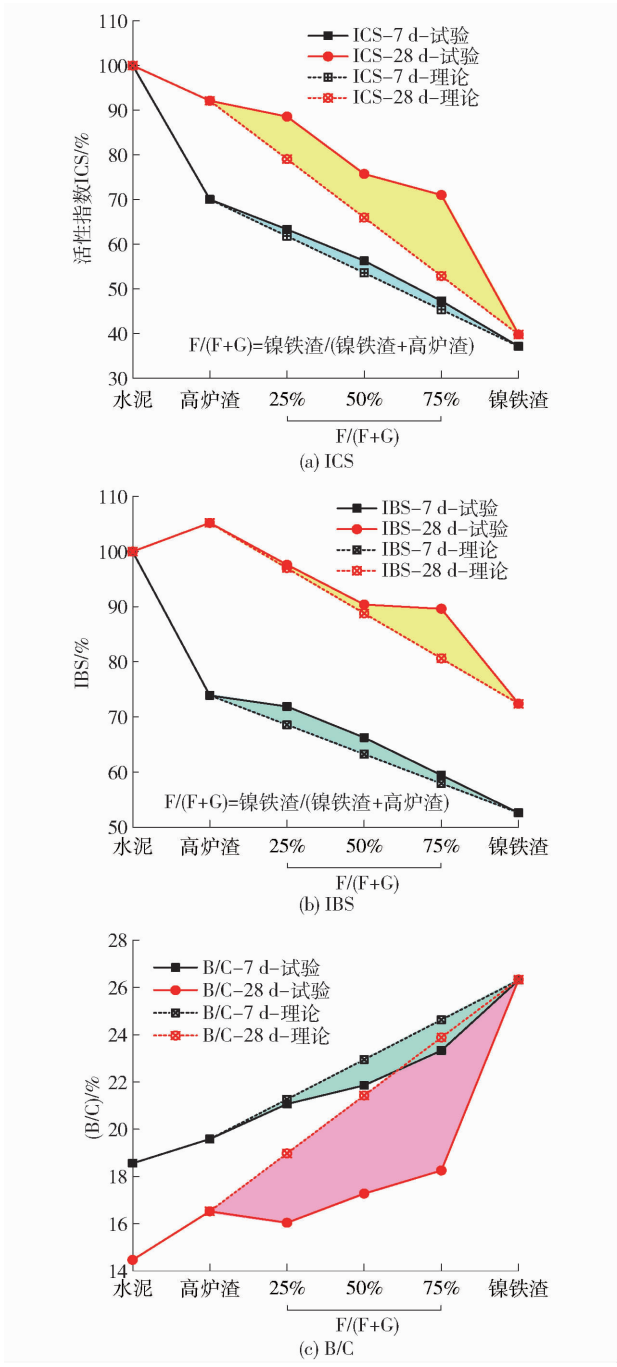


图 7 不同比例镍铁渣-高炉渣复合微粉砂浆力学

Fig. 7 ICS, IBS and B/C values of mortars with different F/G ratio

用复合掺合料标准^[12],若渣粉比表面积为 $410 \sim 432 \text{ m}^2/\text{kg}$,复合微粉将达到 II 级掺合料活性要求;若渣粉比表面积高于 $519 \text{ m}^2/\text{kg}$,复合微粉将达到 I 级掺合料活性要求。因此,增加复合微粉比表面积将有

助于提高试件力学强度。颗粒越细,形成的表面积就越大,颗粒表面 Si—O—Si 和 Si—O—Al 键更易断裂并同碱溶液发生水化反应形成胶结体。为了更多利用镍铁渣并形成良好力学性能的镍铁渣-高炉渣复合微粉,有必要将两种炉渣混磨至不低于 410 m²/kg 细度。

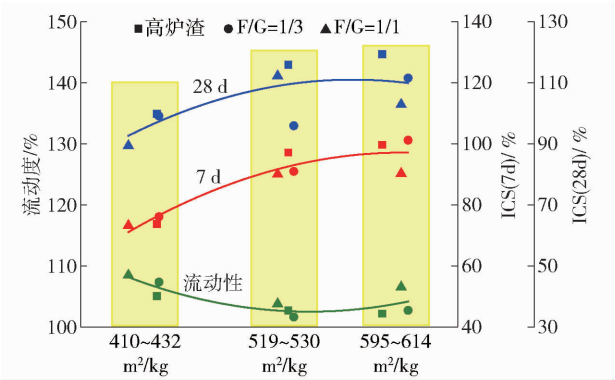


图 8 复合微粉不同比表面积砂浆性能变化
Fig. 8 Property behavior of cement-slag mortars of different slag BET

2.5 不同粉磨方式微粉活性对比

表 5 是不同镍铁渣-高炉渣复合微粉加工方式对微粉活性的对比影响。选择 2 种机械混合微粉和 1 种混合粉磨微粉的 7 d 和 28 d 活性指数做对比。考虑复合微粉所用高炉渣比表面积和活性指数不同的影响,以不同龄期活性指数相对值来对比不同制备方式复合微粉活性差别。

可见,在比表面积不超过 400 m²/kg 时,随着微粉比表面积增加,混合粉磨方式有利于提高复合微粉活性;同时,7 d 和 28 d 龄期的活性指数相对值相接近,说明不同混磨方式对微粉不同龄期活性的影响较小。但当比表面积继续增加,7 d 活性指数增加,而 28 d 活性指数则小幅降低,说明比表面积增加仅有利于复合微粉早期龄期活性增长。此外,复合微粉不同龄期活性相对值均值在 76.4% ~ 81.3% 之间,说明机械混合和混合粉磨两种制备复合微粉的方式对活性影响不高,但混合粉磨效果略好些,且从增加粉磨均匀度考虑选择预粉磨-混合粉磨工艺较合适。

表 5 不同粉磨方式镍铁渣-高炉渣复合微粉活性对比

Table 5 Activity comparison of FNS-GGBS composite powders by different grinding methods							
制备方式	微粉	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	7 d 活性指数/ %	28 d 活性指数/ %	7 d 相对值 ^①	28 d 相对值 ^①	备注
机械混合	高炉渣 A	430	94.3	117.6			商品矿渣粉
	复合微粉 A1	337	71.6	90.3	76%	77%	均值 76.4%
	复合微粉 A2	611	80.3	87.3	85%	74%	均值 79.7%
混合粉磨	高炉渣 B	400	70.0	92.1			
	复合微粉 B	400	56.3	75.7	80%	82%	均值 81.3%

备注:①相对值=复合微粉对应龄期活性指数/对应高炉渣粉活性指数×100%。

3 经济性估算

综上,将镍铁渣同高炉渣混磨制成复合微粉(活性掺合料)具有技术可行性。其生产成本主要由原材料和加工成本构成,按式(1)进行成本估算,表 6 为相关参数,得到不同 F/G 比例复合微粉成本估算情况,如图 9 所示。

因镍铁渣成本低于高炉渣,故随着镍铁渣掺入比例增加,复合微粉原料成本有明显降低趋势,而加工成本仅有稍许增加。因此,总成本降低主要源于原料成本降低。但是,结合上述复合微粉试件力学性能,镍铁渣在复合微粉中的比例不易超过 20%

表 6 复合微粉经济性估算

Table 6 Economic estimation of composite admixture

成本组成	明细项目	高炉渣	镍铁渣	单位
原材料	出厂价	100	50	元/t
	含水量	10	3.4	%
处理工艺	干燥	20	8	元/t
	破碎	—	3	元/t
	磁选	—	2	元/t
	粉磨	30	40	元/t
	管理	15	15	元/t

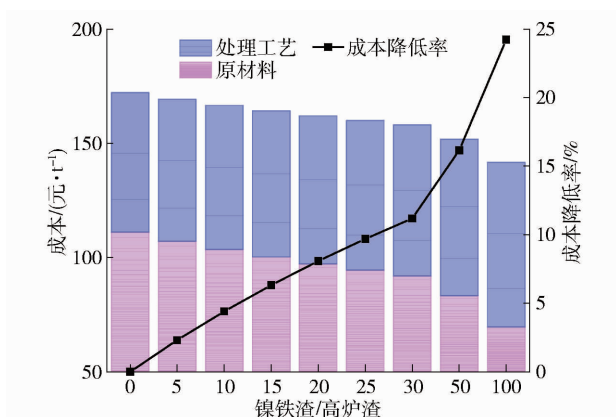


图9 不同 F/S 比例复合微粉成本情况

Fig.9 Cost reduction of the final F-G admixture vs different F/G ratio

(镍铁渣/高炉渣 = 25%)。此时能够降低约 10% 生产成本,对于镍铁渣应用于高炉渣粉具有较好的经济性。

$$C_{fpc} = C_{rm} + C_{pc} \quad (1)$$

式中: C_{fpc} 为总成本,元/t; C_{rm} 为原料成本,元/t; C_{pc} 为处理成本,元/t。

目前,还尚未见有电炉镍铁渣应用于高炉矿渣粉生产领域的相关报道。一是由于缺少相关标准规范指导,在镍铁渣方面仅有 JC/T 2503—2018《用于水泥和混凝土中的镍铁渣粉》标准发布,也仅针对原状镍铁渣粉作技术要求;此外,将镍铁渣应用于水泥建材可能会担心 MgO 含量较高出现水化膨胀情况。目前,国内部分电炉镍铁渣直接外售作骨料,而且国内红土镍矿冶炼产业逐渐向东南亚转移,导致国内缺少复合微粉技术创新应用市场环境。但开发多源固废协同技术,加大镍铁渣胶凝材料的研究,能够解决镍铁行业废渣再利用和当地建材资源短缺问题。

4 结论

为了资源化利用镍铁渣,本文采用在高炉水碎渣中掺入镍铁渣的方式制备复合微粉,并对比了其活化性能和力学性能等指标,得到以下主要结论。

1) 在电炉镍铁渣和炼铁高炉渣中,非晶玻璃相含量分别约为 40% 和 96%,能够在水泥液中进行水化凝胶反应;增加镍铁渣粉比表面积,能够提高镍铁渣-水泥砂浆试件力学强度,但会降低韧性;镍铁渣在水泥液中虽可发生水化反应,但反应程度不足。

2) 在机械混合方式下,镍铁渣替代高炉渣比例越高,砂浆流动性越高,而复合微粉 7 d 和 28 d 活性指数越低;当镍铁渣在复合微粉中占比低于 20% 时,能够达到 S105 级矿渣微粉活性要求;占比为 20% ~ 40% 时,能够达到 S95 级活性要求。掺入镍铁渣能够降低高炉渣易磨性,混配成复合微粉之前,镍铁渣需预磨至一定细度。

3) 采用混合粉磨方式更适合高炉渣基复合微粉制备工艺。镍铁渣在复合微粉中占比越多,试件韧性越高,力学强度越低;提高复合微粉比表面积可增加试件力学强度,当比表面积为 410 ~ 432 m²/kg 时,复合微粉能够达到 II 级复合掺合料活性,当比表面积高于 519 m²/kg 时,能够达到 I 级复合掺合料活性。

4) 镍铁渣价格低于高炉渣,其在复合微粉中占比不宜超过 20%,此时可降低约 10% 生产成本,具有较好的技术经济性。

[参考文献]

- [1] 苗希望,白智韬,卢光华,等. 典型铁合金渣的资源化综合利用研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 663-679.
- [2] MIAO Xiwang, BAI Zhitao, LU Guanghua, et al. Review of comprehensive utilization of typical ferroalloy slags[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(6): 663-679.
- [3] 刘梁友,刘云,张康,等. 镍铁渣-水泥复合胶凝材料化学活化的研究[J]. 水泥工程, 2016(2): 8-11.
- [4] LIU Liangyou, LIU Yun, ZHANG Kang, et al. Study on chemical activation of nickel iron slag-cement composite cementitious material[J]. Cement Engineering, 2016(2): 8-11.
- [5] 李沙,代文彬,杨飞华,等. 矿渣-镍铁渣活性掺合料粉的基础性能研究[J]. 混凝土世界, 2019(3): 56-62.
- [6] LI Sha, DAI Wenbin, YANG Feihua, et al. Research on fundamental performance of concrete admixture prepared by ferronickel slag and blast furnace slag[J]. China Concrete, 2019(3): 56-62.
- [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 & Building Materials, 2015, 99: 279-287.
- [8] RAHMAN M A, SARKER P K, SHAIKH F U A, et al. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag [J]. Construction & Building Materials, 2017, 140: 194-202.
- [9] HUANG Y, WANG Q, SHI M. Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 773-789.

- [7] WU Q, GUANG J, LI S, et al. Development of autoclaved aerated concrete from mechanically activated magnesium-rich nickel slag [J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018,30(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002330)
- [8] 中国建筑材料联合会. 水泥胶砂强度检测方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
China Building Materials Federation. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [9] WANG D, WANG Q, ZHUANG S, et al. Evaluation of alkali-activated blast furnace ferronickel slag as a cementitious material: Reaction mechanism, engineering properties and leaching behaviors[J]. Construction and Building Materials, 2018,188.
- [10] 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.
- [11] SHAN Changfeng, WANG Jian, ZHENG Jinfu, et al. Study on application of nickel slag in cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012,31(5):1263-1268.
- [11] 中国建筑材料联合会. 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉: GB/T 18046—2017[S]. 2017.
China Building Materials Federation. Ground granulated blast furnace slag used for cement, mortar and concrete: GB/T 18046—2017[S]. 2017.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土用复合掺合料: JG/T 486—2015[S]. 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Compound mineral admixtures for concrete: JG/T 486—2015[S]. 2015.

Mechanical properties of the admixture of ferronickel slag blended with the ground granulated blast furnace slag

DAI Wenbin, CHEN Xi, CHEN Kuiyuan, FAN Yaxin, CHEN Xuegang

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: China produces a large amount of electric furnace Ferronickel iron slag (FNS), which has certain alkaline hydration activity and can be used as an auxiliary cementitious material. Ground granulated furnace slag (GGBS) has excellent hydration cementitious activity and is one of the best performing auxiliary cementitious materials. In order to maximize the utilization of FNS, this paper prepared active composite micro powder (CMP) by adding FNS into GGBS, and investigated its activation performance and mechanical properties. The main conclusions are as follows. Increasing the specific surface area of FNS can improve the mechanical strength of FNS-cement mortar specimens, but it will reduce toughness. When the proportion of FNS in the CMP is less than 20%, the CMP can meet the activity requirements of grade S105 GGBS. When the proportion is between 20% and 40%, it can meet the S95 level. The addition of FNS can reduce the grindability, so before mixing into CMP, the FNS needs to be pre-ground to a certain fineness. The addition of FNS can lead to early strength loss of mortar, but the its hydration activity gradually becomes apparent with increasing curing age. When the specific surface area of the CMP is between 410 and 432 m²/kg, the activity can reach the level II composite admixture standard; when the specific surface area increases to 519 m²/kg, the activity can reach the level I standard. The price of FNS is lower than that of GGBS, and adding FNS can reduce the production cost of CMP, but the proportion of addition should not exceed 20%. At this time, the cost can be reduced by about 10%, and it has good technical and economic efficiency.

Key words: ferronickel slag; blast furnace slag; admixture; mechanical properties; building materials