

钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究

何良玉¹, 谯理格², 赵日照², 丁南泽², 丁庆军³

(1. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 中建商品混凝土有限公司, 湖北 武汉 430205; 3. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘要: 本文通过测试钢渣粉的活性、安定性和钢渣砂的颗粒级配、含水率、含泥量、吸水率、安定性等基本性能, 研究陈化龄期对钢渣砂安定性的影响。利用安定性合格、级配合理的钢渣砂、钢渣粉、矿渣粉、激发剂和工作性能、凝结时间调节组分, 通过配合比设计制备出工作性能良好、凝结时间合理、力学性能优良的高性能砂浆, 并对其体积稳定性进行研究。

关键词: 钢渣; 胶凝材料; 细集料; 高性能砂浆

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.021

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2019)06-0094-07

钢渣是冶金工业中产生的废渣, 其产生率为粗钢产量的 8% ~ 15%^[1]。我国钢铁的产量早在上世纪末就已超过其他国家跃居世界第一, 近年来钢渣产生量随着钢铁工业的快速发展而迅速递增。据相关统计, 2017 年全国钢渣产生量为 1.08 亿 t, 综合利用率仅 30% 左右^[2-3], 未得到有效处理利用的钢渣均采用露天堆放或填埋处理, 不仅占用大片宝贵的土地资源, 还会造成严重的环境污染。因此, 亟待开展钢渣的资源化应用研究, 提高钢渣综合利用率。

钢渣的组成虽受原料组成、冶炼方式等多种因素的影响, 但其主要化学成分大体相同, 一般包括 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO, 另还含有 MnO、FeO、Fe₂O₃、P₂O₅ 及金属铁等^[4]。其化学组成与

水泥相近, 具有一定的潜在水硬性能^[5-6]。研究钢渣在建筑材料中的应用, 可实现钢渣的大量消耗利用, 缓解钢渣对土地和环境造成的负荷。但是, 钢渣存在其自身活性较低、易磨性差、体积稳定性不良等问题, 限制了其在建筑材料中的应用。

本文针对上述问题, 选用合理的激发手段提高钢渣粉的胶凝活性, 利用钢渣砂替代河砂, 通过试验探究, 进行配合比设计, 制备出钢渣作胶凝材料和细集料的高性能砂浆。

1 原材料

1.1 粉料

钢渣粉 (SS): 武汉钢铁集团有限责任公司生产, 比表面积 450 m²/kg, 其化学组成见表 1。

表 1 粉料的化学组成 /%

Table 1 Chemical composition of different powders

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	Los
SS	20.66	15.72	6.41	4.58	0.16	0.11	41.86	1.37	1.31	2.65
BFS	38.5	0.3	11.9	7.3	0.6	0.5	40.28	0.28	0.16	0.3
C	21.4	2.95	5.10	3.85	0.53	0.13	59.07	2.24	0.13	4.15

粒化高炉矿渣粉 (BFS): 武钢绿色冶金渣公司生产, S95 级, 比表面积在 450 m²/kg 左右;

水泥 (C): 亚东水泥厂生产, PO42.5 水泥,

细度 0.3, 比表面积 350 m²/kg 左右。

1.2 集料

细集料: 钢渣砂经过陈化、烘干、破碎、磁选、

收稿日期: 2018-08-22; 改回日期: 2018-10-05

基金项目: 掺合料对大体积混凝土水化温升的贡献研究项目资助。

作者简介: 何良玉 (1991-), 男, 硕士研究生 主要从事高性能混凝土、多功能高效外加剂的研发与应用研究。

筛分、再陈化等工艺处理制得，测得其表观密度为 3340 kg/m^3 ，细度模数为 3.13，含水率为 4%，筛分试验结果见表 2。

表 2 钢渣砂的筛分
Table 2 Sifting of steel slag

孔径/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	筛底
质量/g	-	73.4	133.8	128.9	123.6	26.1	12
分计筛余百分率/%	-	14.7	26.8	25.8	24.7	5.2	2.4
累计筛余百分率/%	-	14.7	41.5	67.3	92	97.2	99.6

1.3 外加剂

激发剂 (NaOH)，市售分析纯，白色粉末； Na_2SO_4 ，市售分析纯，白色粉末；水玻璃：模数 3.2，波美度 36.2，主要指标见表 3。

表 3 水玻璃的主要技术指标
Table 3 The main technical indicators of water glass

B°	n	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Na}_2\text{O}/\%$	不溶物/%
36.2	3.2	27.3%	8.8%	0.03%

减水剂：聚羧酸系高效减水保塑超分散剂，液体，固含量 40%，减水率大于 20%。

缓凝剂：葡萄糖酸钠：市售分析纯，白色固体颗粒；硼酸：磷酸二氢钾：市售分析纯，白色固体颗粒。

2 钢渣性能检测

2.1 钢渣粉性能的检测

钢渣粉的碱度系数 $=w(\text{CaO})/[w(\text{SiO}_2)+w(\text{P}_2\text{O}_5)]=1.9$ ，为中碱度钢渣粉。

结合本文 1.1 节中钢渣的 XRF 的测试结果，钢渣的矿物相主要包括低活性的橄榄石 ($\text{CaO} \cdot \text{RO} \cdot \text{SiO}_2$)、蔷薇辉石 ($3\text{CaO} \cdot \text{RO} \cdot 2\text{SiO}_2$) 及活性较高的硅酸二钙 (C_2S)、硅酸三钙 (C_3S)、铁酸钙 ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)、铁酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)、RO 相 (FeO 、 MgO 、 MnO 等的固溶体)、游离氧化钙 (f-CaO) 等。

钢渣粉活性的测试参考 GBT 2049-2006《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》进行，粒化高炉矿渣粉的活性测试参考 GB/T 18046-2008《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》进行，见表 4。

表 4 钢渣、粒化高炉矿渣粉活性的测试

Table 4 Activity testing of steel slag powder and blast furnace slag powder

原料	钢渣	矿粉	对比水泥	标准砂	水	抗压强度 /MPa		活性指数 /%	
						7 d	28 d	7 d	28 d
对比胶砂	-	-	450	1350	225	34.8	49.8	-	-
钢渣胶砂	135	-	315	1350	225	28.4	43.3	82	87
矿粉胶砂	-	225	225	1350	225	29.9	47.6	86	96

由表 4 中数据可以看出：渣粉 7 d、28 d 活性指数分别为 82%、87%，粒化高炉矿渣粉 7 d、28 d 活性指数分别为 86%、96%，说明钢渣粉和粒化高炉矿渣粉的活性会随着水化龄期的延长而增大。这是由于钢渣、粒化高炉矿渣粉的活性较水泥低，其早期所发生的水化反应量较水泥偏低，随着水化反应的进行，钢渣、粒化高炉矿渣粉中的活性组分继续参与反应，而水泥的水化反应速率逐渐降低，表现为钢渣、粒化高炉矿渣粉活性随着水化龄期的延长得到了提高。

钢渣粉的安定性检测参考 GBT 2049-2006 进行，由 X 荧光数据可得 $w(\text{MgO})=4.58\% < 13\%$ ，故用沸煮法进行测试即可。用雷氏夹检测煮沸前后两个试样分别为 $A_1=16.5 \text{ mm}$ 、 $C_1=17 \text{ mm}$ ， $A_2=15 \text{ mm}$ 、 $C_2=15 \text{ mm}$ ， $C-A < 5 \text{ mm}$ 符合标准，安定性合格。

2.2 钢渣砂性能的检测

钢渣砂的渣粉含量采用筛洗法测得结果为渣粉量 $=4.8\%$ ，远大于 GB/T 14684-2001 中定义的含泥量为粒径 $< 75 \mu\text{m}$ 的颗粒含量 (1.1 节中 0.15 mm 以下量为 2.4%)，这是因为钢渣砂表面粗糙多孔，粘附有大量钢渣微细粉，故含泥量测试结果与筛分结果有较大差距。

钢渣砂的稳定性采用粉化率法进行测试^[7]，分别将未陈化、陈化半年、陈化 1 年和陈化 2 年而其余处理工艺相同制得的钢渣砂进行粉化率测试，试验结果见表 5。

表 5 不同陈化龄期对钢渣砂粉化率的影响

Table 5 The effect of difference ageing age on pulverization rate of steel slag sand

原料	钢渣	矿粉	对比水泥	标准砂	水	抗压强度		活性指数	
						/MPa		/%	
						7 d	28 d	7 d	28 d
对比胶砂	-	-	450	1350	225	34.8	49.8	-	-
钢渣胶砂	135	-	315	1350	225	28.4	43.3	82	87
矿粉胶砂	-	225	225	1350	225	29.9	47.6	86	96

钢渣粉及钢渣随着陈化年限的增长稳定性逐渐升高,并在陈化 1 年后趋于稳定。钢渣砂在蒸压条件下粉化率较大,究其原因,一方面是由于其内部不稳定因素水化膨胀,另一方面是由于钢渣中各组分在高温蒸汽作用下热膨胀系数不一致,且部分低活性的 C₂S、C₃S 相也发生了水化反应发生体积膨胀。

参考《砂、石碱活性快速试验方法》(CECS48:96)对 0.15 ~ 0.6 mm 的钢渣砂进行碱活性测试,测得其 150℃ 下蒸压 6 h 试件膨胀率约为 0.046% < 0.1%,利用砂浆长度法对其膨胀率进行测试,测得其 3 个月后的膨胀率仅为 0.043 < 0.05%,其安定性合格。武钢集团研究人员用陈化 1 年的钢渣,在 1984 年 6 月施工建成的武钢研究院家属区道路,至今仍在使用,进一步论证了陈化 1 年的钢渣安定性合格。

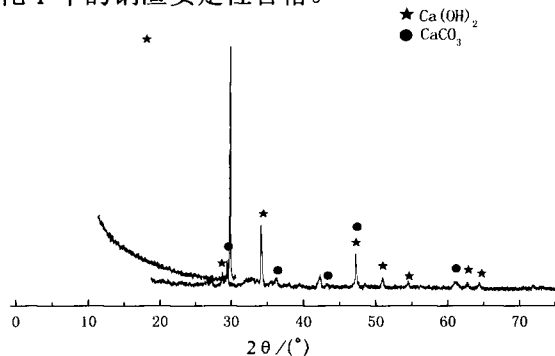


图 1 蒸压粉化钢渣砂的 XRD

Fig.1 X-ray diffraction pattern of autoclaved steel slag sand

图 1 为蒸压后 1.18 mm 筛下粉化钢渣砂的 XRD 图谱,可以看出其主要成分为 Ca(OH)₂ 和 CaCO₃,且氢氧化钙的量远大于碳酸钙,这些碳酸钙可能是由氢氧化钙暴露在空气中与其中的 CO₂ 反应生成。这说明钢渣砂存在微弱的活性,其中的活性组分 f-CaO、C₂S 等水化生成 Ca(OH)₂,未检测到含镁的物相,说明蒸压下的粉化主要是由钙的作用引起的。虽然钢渣砂蒸压下生成的水化产物具有一定的体积膨胀性能,会出现部分粉化的现象,但粉化量较少,微弱的活性下生成的少量具有体积膨胀效应的产物能对碱激发胶凝体系的收缩起到补偿的作用。对钢渣的吸水率进行测试,测得钢渣饱和吸水率为 14.6%,饱和面干吸水率为 12.1%,其吸水量较大,利用其制备的砂浆在后期可缓慢释放所吸附的水,促进胶材水化反应,起到内养护作用,降低砂浆收缩、提高强度。

3 钢渣作胶凝材料和细集料高性能砂浆的制备

本文用钢渣做胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的性能参考钢管混凝土的性能要求:初始流动性性能好(≥ 20 cm)、凝结时间较长(3 ~ 6 h)、早、后期强度高(3d 抗压强度 ≥ 25 MPa,28d 抗压强度 ≥ 48 MPa)、不离析泌水(泌水率 < 0.5%,不分层离析)、体积稳定性能优(安定性良好)。

3.1 胶凝材料组成对净浆强度的影响

控制胶材总量为 500 kg/m³,水胶比为 0.34,减水剂掺量为 1%。通过探究试验得出,激发剂掺量太大时,激发反应速度过快,难以满足对工作性能和凝结时间的要求;掺量太小,则激发效果不明显,试块强度过低,因此初步选定激发剂为 1%NaOH+4% 水玻璃溶液,改变胶凝材料组成进行试验,试验结果见表 6 和图 2。

表 6 胶凝材料组成对净浆强度的影响

Table 6 The influence of the composition of cementitious material on the strength of cement paste

原料	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
钢渣粉	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	100	120	140	160	180
粒化高炉矿渣粉	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50	0	150	180	210	240	270
水泥	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250	200	150	100	50

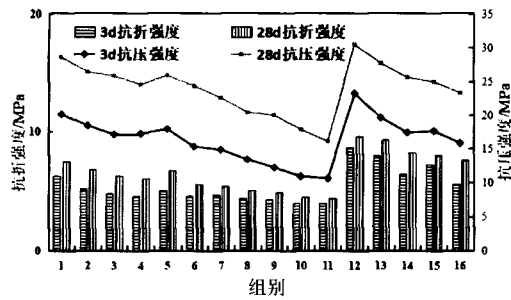


图2 胶凝材料组成对净浆强度的影响

Fig. 2 The influence of the composition of cementitious material on the strength of cement paste

比较有水泥胶凝体系和无水泥胶凝体系可得，相同水胶比条件下，有水泥参与的胶凝体系强度较高。在钢渣-粒化高炉矿渣粉胶凝体系（配比1~11）中，随着钢渣粉掺量的增大，试块3 d抗压强度先降低后增大随后又降低，而28 d抗压强度总体呈下降的趋势；但随着钢渣粉掺量的继续增大，钢渣粉和矿渣粉不仅能形成合理的颗粒级配，而且钢渣中的 C_2S 、 C_3S 参与反应释放的 $Ca(OH)_2$ 又能进一步起到对粒化高炉矿渣粉的激发作用，促进粒化高炉矿渣粉的水化进行，使强度下降幅度变小，甚至有所提高^[8]；随着钢渣掺量的进一步增大，胶凝体系强度下降且下降幅度变大。当钢渣：矿渣=2:3左右时，钢渣粉掺量较高，且其强度也较高。在钢渣：矿渣=2:3，掺加普硅42.5级水泥等量取代钢渣粒化高炉矿渣粉混合料时，随着水泥掺量的增大，胶凝体系的抗折强度和抗压强度整体呈增大的趋势，当水泥取代量超过30%后，强度的增大幅度有所降低。

3.2 激发剂对净浆强度的影响

选择NaOH、水玻璃作主激发剂，再用 Na_2SO_4 和 $CaSO_4$ 复掺调节^[9]，通过比较单掺或复掺效果，优选出合适的激发剂组分。

1) 氢氧化钠、水玻璃单掺的激发效果

控制胶材总量为 500 kg/m^3 （钢渣：粒化高炉矿渣粉=2:3），水胶比为0.34，减水剂掺量为1%，改变激发剂种类和掺量进行试验，试验结果见表7。

表7 激发剂单掺对净浆强度的影响

Table 7 The effect of single admixture activator on the strength of cement paste

原料	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NaOH/%	3	4	5	6	7	8	-	-	-	-	-
水玻璃/%	-	-	-	-	-	-	4	6	8	10	12

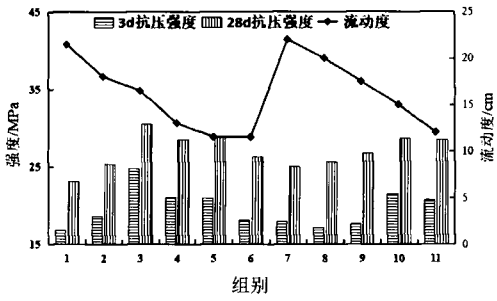


图3 激发剂单掺对净浆强度的影响

Fig. 3 The effect of single admixture activator on the strength of cement paste

由表3与图4中数据可以看出，随着NaOH掺量的增大，净浆的3 d抗压强度和28 d抗压强度均呈现先增大后减小的规律，浆体变得越来越稠；但随着掺量的进一步增大，净浆的工作性能大大降低、变得粘稠。随着水玻璃掺量的增大，净浆的强度整体呈增大的趋势，掺量为12%时的强度较掺量为10%时有所降低。比较4%、6%掺量下氢氧化钠和水玻璃的激发效果，可以看出氢氧化钠激发的净浆强度较高。

2) 激发剂复掺的激发效果

将氢氧化钠、水玻璃、硫酸钠、硫酸钙等复掺，研究激发剂复掺对净浆性能的影响。控制胶材总量为 500 kg/m^3 （钢渣：粒化高炉矿渣粉=2:3），水胶比为0.34，减水剂掺量为1%，激发剂掺量及试验结果见表8，激发剂掺加过程中先加入固体激发剂，再加入液体水玻璃，以防止固体颗粒不能完全溶解、搅拌不匀问题的发生。

表8 激发剂复掺对净浆强度的影响

Table 8 The effect of compound admixture activator on the strength of cement paste

掺量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NaOH/%	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
水玻璃/%	4	5	6	3	4	5	4	4	4	4
Na_2SO_4 /%	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-
$CaSO_4$ /%	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2

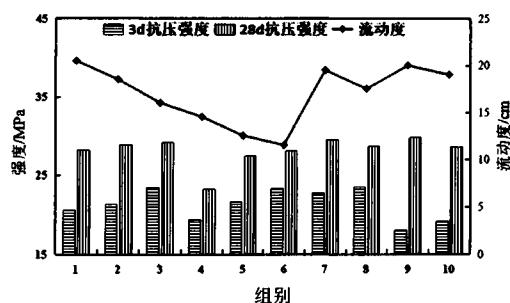


图 4 激发剂复掺对净浆强度的影响

Fig. 4 The effect of compound admixture activator on the strength of cement paste

由表 8 及图 4 中的数据可以看出, 氢氧化钠的量一定时, 随着水玻璃掺量的增大, 净浆的 3 d 抗压强度提高, 28 d 抗压强度略有增长, 且净浆的状态逐渐变差; 后期强度略有增长但基本保持不变。比较第 1 组与第 5 组、第 2 组与第 6 组可以发现, 水玻璃掺量相同时, 随着氢氧化钠掺量的增大, 净浆的早期强度增大, 后期强度略有降低, 且浆体明显变得粘稠。复掺硫酸钠可以提高净浆的早期、后期强度, 但随着掺量的进一步增大, 净浆的后期强度会略有降低, 净浆也变得粘稠; 复掺硫酸钙可以提高净浆的后期强度但早期强度会有所降低, 随着硫酸钙掺量的进一步增大, 虽然早期强度有所提高, 但后期强度会略有下降, 而净浆的状态变化较小。综合考虑激发剂对净浆早期强度、后期强度及工作状态的影响, 选定激发剂的组成为 1%NaOH+1%Na₂SO₄+4% 水玻璃。

3.3 水胶比对砂浆性能的影响

控制胶材总量为 500 kg/m³ (钢渣: 粒化高炉矿渣粉=2:3), 减水剂掺量为 1% (以胶材质量计), 激发剂为 1%NaOH+1%Na₂SO₄+4% 水玻璃 (以胶材质量计, 先加固体激发剂再加水玻璃), 钢渣砂的掺量参考河砂掺入质量为 1200 kg/m³ 时的体积, 则其掺量为 $(1200 \times 3.34 \div 2.65 \times 1.04) \approx 1570 \text{ kg/m}^3$, 改变水胶比进行试验, 结果见图 5。

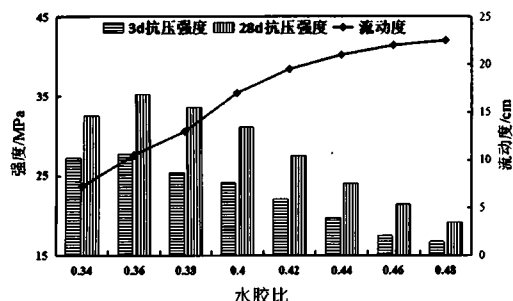


图 5 水胶比对砂浆性能的影响

Fig. 5 The influence of water-binder ratio on mortar performance

由图 6 可以看出, 随着水胶比的增大, 砂浆的 3 d 抗压强度和 28 d 抗压强度整体呈下降趋势, 且在水胶比为 0.42 左右时大幅下降; 水胶比对砂浆的工作状态有较大的影响, 水胶比较低时, 新拌砂浆干散, 不具备流动性能, 随着水胶比的提升砂浆状态逐渐改善, 但当水胶比超过 0.46 后, 又会明显泌水, 砂浆离析。

由净浆到砂浆, 水胶比为 0.34 时表现出明显不同的两种状态, 这是因为钢渣砂的含水率为 4%, 而其饱和面干吸水率和饱和吸水率分别为 12.1% 和 14.6%, 因此搅拌过程中即使有减水剂的作用, 钢渣砂仍会吸收大量的水, 导致砂浆的状态变差。由表 3-7 的试验结果可得, 综合考虑砂浆的工作性能和力学性能, 减水剂掺量为 1%, 激发剂为 1%NaOH+1%Na₂SO₄+4% 水玻璃时, 砂浆的水胶比在 0.38 ~ 0.42 较为合适。

3.4 胶砂比对砂浆性能的影响

控制胶材总量为 500 kg/m³ (钢渣: 粒化高炉矿渣粉=2:3), 水胶比为 0.4, 减水剂掺量为 1% (以胶材质量计), 激发剂为 1%NaOH+1%Na₂SO₄+4% 水玻璃 (以胶材质量计, 先加固体激发剂再加水玻璃), 改变胶砂比 (以质量比计) 进行试验, 结果见图 6。

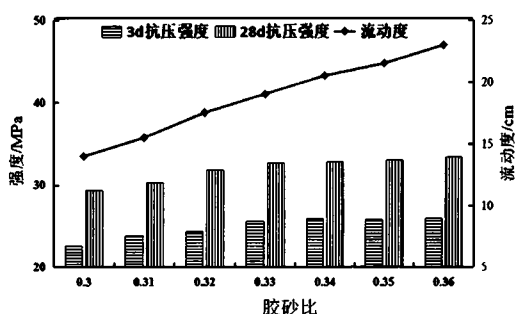


图 6 胶砂比对砂浆性能的影响

Fig. 6 The influence of binder-sand ratio on mortar performance

由图 6 可得, 随着胶砂比的增大, 砂浆的早期强度和后期强度呈增大趋势, 但整体变化不大, 在胶砂比超过 0.33 后增长幅度进一步变小; 然而随着胶砂比的增大, 砂浆的状态变化较大, 呈现变好的趋势。为了利用更多的钢渣砂, 胶砂比并不是越大越好, 因此, 胶砂比选为 0.33 ~ 0.34 较为合适。

3.5 外加剂对砂浆性能的优化

为了获取较长的凝结时间, 研究不同种类和不同掺量的缓凝剂对砂浆性能的影响, 得出合适种类和适当掺量的缓凝剂。

(1) 减水剂对砂浆性能的影响

控制胶材总量为 500 kg/m^3 (钢渣: 粒化高炉矿渣粉 = 2:3), 钢渣砂掺量为 1500 kg/m^3 , 激发剂为 $1\% \text{ NaOH} + 1\% \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 4\%$ 水玻璃 (以胶材质量计, 先加固体激发剂再加水玻璃), 提高减水剂掺量, 减小用水量进行试验, 结果见图 7 所示。

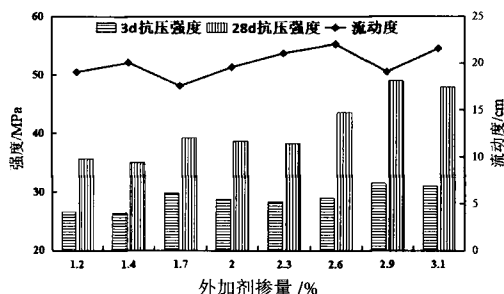


图 7 减水剂掺量对砂浆性能的影响

Fig. 7 The influence of dosage of water reducer on mortar performance

由图 7 中的数据可得, 其他条件一定时, 随着减水剂掺量提高, 砂浆的流动度变大, 但强度会略有降低; 减小用水量时, 砂浆的强度会显著上升, 尤其是后期强度; 当减水剂掺量小于 2.6% 时, 减水剂掺量对工作性能改善的效果较掺量大于 2.6% 的弱, 表明减水剂掺量较小时, 在碱激发体系中的效果没有普通水泥砂浆体系中发挥的好, 但超过一定限度后, 效果会凸显。综合考虑砂浆的工作性能和力学性能, 减水剂掺量在 2.9% ~ 3.1%, 水的掺量在 170 kg/m^3 较为合适。

(2) 缓凝剂对砂浆性能的影响

为了在较长时间内仍保持良好的工作性能, 砂浆的凝结时间要较长, 但又不能影响其早期强度。选择硼酸、葡萄糖酸钠、磷酸二氢钾作为缓凝剂进行试验, 结果见表 9。

表 9 缓凝剂对砂浆性能的影响

Table 9 The effect of retarder on mortar performance

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
缓凝剂种类	-	硼酸	葡萄糖酸钠	葡萄糖酸钠	葡萄糖酸钠	葡萄糖酸钠	磷酸二氢钾	磷酸二氢钾	磷酸二氢钾
掺量 / %	-	1	2	1	2	3	1	2	3
凝结时间 / h:min	1:30	2:20	3:10	2:35	3:30	4:20	3:05	2:45	1:40
3 d 抗压强度 / MPa	31.4	31.2	30.8	31.3	31.2	30.6	31.2	31.4	30.8

由表 9 可得, 缓凝剂对砂浆早期抗压强度 (3 d 强度) 影响不大, 掺量较小时 (1‰), 缓凝效果磷酸二氢钾 > 葡萄糖酸钠 > 硼酸, 但随着掺量的继续增大 (3‰), 磷酸二氢钾反而起到促凝的作用。根据缓凝效果可得磷酸二氢钾的缓凝作用较敏感^[10], 不宜多掺, 因此缓凝剂定为 1‰ 磷酸二氢钾 + 1‰ 葡萄糖酸钠。

3.2.6 砂浆的体积稳定性测试

利用优选出的试验配比制备钢渣作胶凝材料和细集料的砂浆进行体积稳定性性能的检测, 试验结果见表 10。

表 10 砂浆体积稳定性测试

Table 10 Test results of volume stability of mortar

试块编号	1	2	3	4	5	6
养护方式	标养			80℃ 蒸养		
1 d 体积变化率 / $\times 10^{-4}$	1.7	1.3	1.2	2.3	2.6	2.7
3 d 体积变化率 / $\times 10^{-4}$	1.3	1.9	1.8	2.9	3.9	3.8
7 d 体积变化率 / $\times 10^{-4}$	1	1.9	1.7	2.8	3.4	3
7 d 表面形貌	良好	良好	良好	良好	良好	良好
7 d 抗压强度 / MPa	39.3	38.8	39.1	42.6	41.5	41.7

注: 体积变化率的正值表示膨胀率, 负值表示收缩率, 所用钢渣砂为经过 1 年陈化的钢渣砂。

由表 10 可得, 钢渣作胶凝材料和细集料制备的砂浆, 无论标准养护还是 80℃ 蒸养, 7 d 龄期内均表现出良好的微膨胀性能。另外, 无论标养还是蒸养, 试块都具有充足的水分, 几乎不存在干缩影响, 因此, 整体上试块有所膨胀, 但膨胀率较小。

由表 10 我们还可以看出, 蒸养试块的体积膨胀率比标准养护试块的大, 7 d 强度没有下降反而有所上升, 所有试块均未出现边角表面粉化现象, 表面形貌良好。虽然试块蒸养条件下膨胀率较标养条件下更大, 但并不一定主要是由安定性问题引起的, 蒸养试块未粉化, 强度反而有所上升, 因此砂浆体积稳定性性能较好。

3 结 论

(1) 钢渣颗粒的主要矿物组成为橄榄石、蔷薇辉石、硅酸二钙、硅酸三钙、铁酸二钙、RO 相及游离氧化钙等, 随着陈化龄期的延长, 钢渣颗粒中的 f-CaO 含量降低, 体积稳定性提高。陈化 1 年

的 1.18 ~ 4.75 mm 的钢渣颗粒在 205 ℃、2.2 MPa 压蒸下粉化率 < 6%，在 80 ℃ 蒸养 7 d 的粉化率 < 1%，压碎值 < 20%，可作为高性能砂浆的集料。

(2) 控制胶材总量 500 kg/m³(钢渣: 粒化高炉矿渣粉 = 2:3)，钢渣砂掺量 900 kg/m³，砂率 0.42，激发剂 1%NaOH+1%Na₂SO₄+4% 水玻璃，减水剂掺量 3%，缓凝剂 1%葡萄糖酸钠+1%磷酸二氢钾，可制备出工作性能良好、凝结时间合理、力学性能优良的高性能砂浆。

参考文献:

- [1] 钱强. 低品位钢渣磁选粉在烧结工艺中的应用 [J]. 烧结球团, 2018, 43(3): 43-46,68.
- [2] 李灿华, 向晓东, 刘思, 等. 半刚性钢渣基层材料性能试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2015(3):73-77.
- [3] 赵余. 废弃钢渣的硅系与复合系激发及其在固化软土中的应用 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [4] 徐彬, 邓柱国, 张天石, 等. 碱激发钢渣水泥的研究 [J]. 重庆环境科学, 1998, 20(6):39-42.
- [5] 吴鹏, 韦选纯, 蔡新华, 等. 掺钢渣粉高韧性纤维增强水泥基复合材料弯曲性能试验 [J]. 混凝土, 2018(7):81-84.
- [6] 马俊. 钢渣 - 低品质粉煤灰复合微粉对混凝土长期性能的影响 [J]. 中外公路, 2018, 38(3):259-264.
- [7] 武伟娟, 刘家祥, 贾瑞权. 钢渣比表面积对钢渣 - 水泥复合胶凝材料安定性的影响 [J]. 矿产综合利用, 2018(1):133-136, 91.
- [8] 李倩. 钢渣 - 矿渣基胶凝材料的研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
- [9] 王毓, 张长森, 吴发红, 等. 不同激发剂对钢渣活性及水泥强度的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4):7-11.
- [10] 胡国栋, 游长江, 刘治猛, 等. 聚羧酸系高效减水剂减水机理研究 [J]. 广州化学, 2003, 28(1):48-53.

Study on Preparation of High Performance Mortar Using Steel Slag as Cementitious Material and Fine Aggregate

He Liangyu¹, Qiao Lige², Zhao Rixu², Ding Nanze², Ding Qingjun³

(1. JSTI Group, Nanjing, Jiangsu, China; 2. China Construction Ready Mixed Concrete Co., Ltd., Wuhan, Hubei, China; 3. Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, China)

Abstract: The influence of ageing time on the stability of steel slag sand was studied by testing the activity, stability of steel slag powder and the basic properties of steel slag sand, such as particle size distribution, moisture content, mud content, water absorption and stability. High performance mortar with good working performance, reasonable setting time and excellent mechanical properties was designed and prepared by steel slag sand with qualified stability and reasonable gradation, steel slag powder, mineral slag powder, activator, and through adjusting the composition according to the working performance and setting time. In the meantime, the volumetric stability of the mortar was researched.

Keywords: Steel Slag; Cementitious Material; Fine Aggregate; High Performance Mortar.