

低活性钢渣在地面用水泥基自流平砂浆中的应用研究

徐风广, 杨凤玲, 李红伟, 侯海军, 王强

(盐城工学院材料科学与工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: 低活性钢渣经破碎、筛分和研磨处理后制得钢渣砂和钢渣粉, 将钢渣砂和钢渣粉分别作为地面用水泥基自流平砂浆中的细骨料和填料, 研究其对水泥基自流平砂浆流动度、耐磨性及抗折抗压强度等性能的影响。研究结果表明: 用钢渣砂 / 钢渣粉制备的水泥基自流平砂浆与用天然石英砂 / 重钙粉制备的砂浆相比, 前者具有后期强度高、耐磨性能好、表面不易粉化及生产成本低等优点, 其 28 d 及 3 month 的抗压强度最高分别提高了 6.4% 和 24.2%, 耐磨性最大提高了 48.5%。用钢渣砂和钢渣粉制备的水泥基自流平砂浆的其他各项指标均符合 JC/T 985-2005 标准规定的技术要求。

关键词: 钢渣; 活性指数; 自流平砂浆; 耐磨性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.019

中图分类号: TU528.04 文献标识码: A 文章编号: 1000-6532(2019)06-0084-05

地面用水泥基自流平砂浆由水泥基胶凝材料、细骨料、填料及添加剂等组成, 与水 (或乳液) 搅拌后具有流动性或稍加辅助性铺摊就能流动找平的地面用材料。水泥基自流平砂浆具有流平性能好、早期强度高、耐磨性好、易于铺设、施工速度快和施工工期短等特点, 是具有承载和装饰双重功能且发展前景看好的建筑材料^[1], 目前被广泛应用于新建或改建工业厂房、车间、商业卖场、展厅、体育馆、医院、地下停车场和仓储等各种开放空间及办公室的地面工程。

随着我国商品混凝土技术的不断发展和环境保护意识的不断加强, 一方面现代砂浆和混凝土对其集料及掺合料的要求越来越高^[2], 另一方面天然石英砂、方解石及石灰石等可开发资源越来越少, 使得传统方法以天然石英砂作细骨料和重钙粉作填料为主要原材料制备的水泥基自流平砂浆存在的耐磨性能差、表面易粉化、强度低和价格高等问题越来越突出。钢渣是炼钢生产过程中产生的一种固体工业废渣, 其产生率为粗钢产量的 8% ~ 15%, 由于其成分波动大, 游离 CaO 和

MgO 含量高和稳定性差等原因, 其综合利用率仅为 10%^[3-4], 对低活性的钢渣其利用率更低, 但其具有耐磨、成本低等特点, 它是一种具有潜在性能的建筑材料; 本文测试了钢渣的组成、结构和性能, 对比研究了用钢渣砂和钢渣粉分别替代天然石英砂和重钙粉制备水泥基自流平砂浆的工作性能和作用机理, 为水泥基自流平砂浆的制备和钢渣的资源化利用开辟了新的途径。

1 试验材料

普硅水泥: P·O42.5R, 铝酸盐水泥: CA-50, 其物理性能见表 1; 天然石英砂: 市售河砂, 筛取粒径为 0.16 ~ 0.63 mm 的颗粒; 钢渣: 钢渣来自江苏省盐城市某炼钢企业, 陈化时间为 3 a, 经过磁选, 将钢渣经颚式破碎机破碎后筛取粒径为 0.15 ~ 0.60 mm 颗粒制得钢渣砂, 余下的经磨细后制得钢渣粉, 重钙粉: 其密度为 2.65 g/cm³, 比表面积为 355 m²/kg; 脱硫石膏原料化学成分见表 2。

收稿日期: 2018-06-07; 改回日期: 2018-07-13

基金项目: 江苏省生态建材与环保装备协同创新中心项目 (CP201506); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A025); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2016065-35)

作者简介: 徐风广 (1962-), 男, 硕士, 主要从事生态环境材料方面的试验与研究。

表1 原材料的物理性能

Table 1 Physical properties of raw materials

原材料	密度 /(g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min			抗折强度/MPa				抗压强度/MPa			
			初凝	终凝	6 h	1 d	3 d	28 d		6 h	1 d	3 d	28 d
普硅水泥	3.01	355	170	260	/	/	4.7	8.1		/	/	23.1	46.6
铝酸盐水泥	3.05	350	125	185	3.5	6.0	7.3	/		24.0	45.4	56.4	/

表2 原材料的化学成分/%

Table 2 Chemical compositions of raw materials

原材料	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	MnO	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Loss
钢渣	13.82	22.16	1.96	3.75	39.65	7.98	2.99	1.31	1.97	0.415	0.156	0.017	0.033	2.99
脱硫石膏	2.70	0.50	1.71	/	31.61	1.02	/	/	/	/	42.43	/	/	19.24

标准砂：为ISO标准砂；减水剂：403型聚羧酸高性能减水剂；消泡剂：SBT-BB34型；保水剂：TE-E150000型羟丙基甲基纤维素；拌和水：为自来水或洁净的河水。

2 试验方法

2.1 材料化学成分分析

钢渣参照YB/T 140-2009《钢渣化学分析方法》；脱硫石膏参照GB/T 5484-2000《石膏化学分析》。

2.2 材料物理性能测定

普硅水泥参照GB 175-2007《通用硅酸盐水泥》；铝酸盐水泥参照GB 201-2000《铝酸盐水泥》；粉体的密度参照GB/T 208-1994《水泥密度测定方法》；粉体比表面积参照GB/T 8074-2008《水泥比表面积测定方法》（勃氏法）；钢渣的耐磨性采用与标准砂比较法进行；钢渣粉的活性指数参照GB/T 20491-2006《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》；自流平砂浆参照JC/T 985-2005《地面用水泥基自流砂浆》。

2.3 水泥基自流平砂浆的制备

(1) 按照原料配比要求，分别称取普硅水泥、铝酸盐水泥、钢渣砂、钢渣粉、脱硫石膏、减水剂、保水剂等各种粉状材料，然后在混料机中混合3 min，得到粉料混合物。

(2) 称取上述粉料混合物2 kg，按与2 kg粉料混合物相对应的比例量取自来水或洁净的河水倒入搅拌器，将粉料混合物在30 s内匀速放入搅拌器内，低速拌和1 min，停止搅拌后，在30 s内用刮刀将搅拌叶和料锅壁上的不均匀拌和物刮下，加入消泡剂，再高速搅拌1 min，静停5 min，再继续高速搅拌15 s，立即测定砂浆的流动度，使砂浆的初始流动度和20 min流动度≥130 mm，并使

流动度尽量控制在130~155 mm之间，如流动度达不到要求，应按上述配比重新称取2 kg粉料混合物并混合，调整加水量并搅和，直至拌和好的砂浆初始流动度和20 min流动度符合要求为止。

(3) 对上述制备好的自流平砂浆进行其他性能测定。

3 结果与讨论

3.1 钢渣的化学组成及XRD分析

从原料化学组成来看，本研究用的钢渣主要由钙、铁、硅、镁、铝、钛、锰、磷和钒等元素组成，其中钙含量最高，其次是铁、硅和镁，钢渣的碱性 $M = \text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 2.68$ ， $M > 2.5$ ，属于高碱度钢渣^[5]，因此其活性明显低于高炉矿渣；由钢渣的XRD图谱可知，本试验用钢渣主要有氢氧化钙、硅酸二钙、碳酸钙、钙铁氧化物、镁橄榄石、碱相等矿物，而文献^[4-6]中钢渣除含有上述矿物外，还含有硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙和游离氧化钙等矿物，说明本试验所用的钢渣由于陈化时间较长，因而相对活性较低，体积稳定性也较好，因而该钢渣可用作自流平砂浆的集料。

3.2 钢渣砂的耐磨性测定及钢渣粉的活性指数测定

表3 钢渣砂的相对可磨性能测定结果

Table 3 Determination of relative grindability of steel slag sand

材料名称	磨料量/g	磨制时间/min	粉体密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	相对可磨系数/km	备注
标准砂	2000	30	2.65	315	1.00	
天然石英砂	2000	30	2.63	335	1.06	粒径范围同标准砂
钢渣砂	2000	30	2.95	210	0.67	粒径范围同标准砂

表 3 为标准砂、天然石英砂及钢渣砂三者在粒径范围相同情况下的相对可磨性能的比较,由试验结果可知:天然石英砂与标准砂相比,其相对可磨系数为 1.06,而钢渣砂相对可磨系数只有 0.67,与文献^[7]中的数据接近,说明钢渣砂的可磨性能较差,其耐磨性能明显优于标准砂,更优于天然石英砂,因而可将钢渣砂用来代替天然石英砂作为地面用自流平砂浆中的细骨料,利用其本身的抗磨性来提高水泥基自流平砂浆的耐磨性能。

表 4 钢渣粉的活性指数测定结果

Table 4 Determination of the activity index of steel slag powder

强度	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d
对比样品	6.7	8.6	37.3	47.4
试验样品	3.6	5.4	20.3	30.2
强度比 /%	53.7	62.8	54.4	63.7

表 4 为磨细钢渣粉的强度活性指数测定,由测定结果知,尽管掺入 30% 磨细钢渣粉水泥各龄期的抗折抗压强度与对比样品的比值随着水泥水化龄期的增长而逐渐加大,但其 7 d、28 d 的抗压强度比分别为 54.4% 和 63.47%,未达到 GB/T 20491-2006《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》规定的二级粉的技术指标要求(7d 抗压强度比: > 55.0%; 28 d 抗压强度比 > 65.0%),因而该磨细钢渣粉的活性较低,但作为填料代替传统自流平砂浆的重钙粉,用来改善自流平砂浆的性能和降低自流平砂浆生产成本等作用。

3.3 钢渣砂与天然石英砂颗粒力学特性比较

表 5 为不同粒径的钢渣砂与天然石英砂的力

学性能,由测定结果可知:在粒径范围相同的情况下,钢渣砂的休止角、平板角和崩溃角都高于天然石英砂,这是由于钢渣砂表面纹理粗糙且多孔隙^[8],而一般的天然石英砂(除机制砂)由于自然界的作用,其外表面相对于经过机械加工的钢渣砂颗粒表面要光滑得多,特别是河砂、江砂及海砂,说明钢渣砂颗粒之间表面的摩擦力要大于天然石英砂;从压缩度测定结果可知,在粒径范围相同的情况下,钢渣砂的可压缩程度也高于天然石英砂,这是由于在一定的粒径范围内天然石英砂颗粒几乎是等径的球体,根据球体堆积理论,等径球体堆积的空隙率最大,因而压缩程度最低,而钢渣砂颗粒形状相比天然石英砂则不规则得多,因而可压缩性较天然石英砂要高。

表 5 钢渣砂与天然石英砂颗粒力学性能测定

Table 5 Mechanical properties of steel slag sand and natural quartz sand

材料名称	颗粒粒径 /mm	休止角 /°	平板角 /°	崩溃角 /°	压缩度 /%
钢渣砂	0.30 ~ 0.60	37.2	40.8	25.4	13.78
	0.15 ~ 0.30	39.8	41.5	28.8	16.65
天然石英砂	0.30 ~ 0.60	35.8	39.1	24.2	13.14
	0.15 ~ 0.30	37.9	40.3	27.7	15.14

3.4 钢渣制备的地面用水泥基自流平砂浆的配比方案及性能测试

3.4.1 钢渣砂 / 钢渣粉与天然石英砂 / 重钙粉制备的地面用水泥基自流平砂浆配比确定

通过对砂浆初始流动度、20 min 流动度及强度等性能的初步试验,最终确定钢渣砂 / 钢渣粉自流平砂浆(简称钢渣砂浆-下同)的配合比。

表 6 地面用水泥基自流平砂浆配比

Table 6 Proportion of the cement-based self-leveling floor mortar

原材料名称	原材料配比 /%									
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
普硅水泥	35	33	31	29	27	35	33	31	29	27
铝酸盐水泥	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5
钢渣砂	38	40	42	44	46	/	/	/	/	/
磨细钢渣粉	17.5	16.8	16.1	15.4	14.6	/	/	/	/	/
天然石英砂	/	/	/	/	/	38	40	42	44	46
重钙粉	/	/	/	/	/	17.5	16.8	16.1	15.4	14.6
脱硫石膏	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6
减水剂	0.30	0.29	0.28	0.27	0.25	0.30	0.29	0.28	0.27	0.25
保水剂	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
原材料名称	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022

表 6 中 A₁ ~ A₅, 其各种原材料质量百分比范围为普通硅酸盐水泥 27% ~ 35%、铝酸盐水泥 7.5% ~ 9.5%、钢渣砂 38% ~ 46%、钢渣粉

14.6% ~ 17.5%、脱硫石膏 1.7% ~ 2.6%、减水剂 0.25% ~ 0.30%、保水剂 0.018%、消泡剂 0.022%, 配比 A₁ ~ A₅ 骨料为钢渣砂, 填料为钢渣砂。

为了对钢渣砂 / 钢渣粉制备的自流平砂浆与天然石英砂 / 重钙粉制备的自流平砂浆 (简称石英砂浆 - 下同) 的性能进行对比, 石英砂浆的各种原材料配比见表 6 中 B1 ~ B5, 配比 B1 ~ B5 的骨

料和填料则分别是天然石英砂和重钙粉。

3.4.2 钢渣砂浆和石英砂浆的性能

钢渣砂浆和石英砂浆性能见表 7。

表 7 钢渣砂浆和石英砂浆性能

Table 7 Properties of steel slag mortar and quartz mortar

检测项目	《JC/T 985-2005》 技术指标要求	A ₁ /B ₁	A ₂ /B ₂	A ₃ /B ₃	A ₄ /B ₄	A ₅ /B ₅
初始流动度 /mm	≥ 130	151/152	150/149	148/150	149/153	152/150
20 min 流动度 /mm	≥ 130	149/140	146/136	148/137	146/138	145/134
24 h 抗压强度 /MPa	≥ 6.0	6.8/8.3	7.0/8.6	7.2/9.0	7.5/9.4	7.7/9.8
24 h 抗折强度 /MPa	≥ 2.0	2.5/3.7	2.7/4.0	2.8/4.2	3.1/4.5	3.4/4.7
28 d 抗压强度 (C 40 等级) /MPa	40	51.2/48.1	49.3/47.5	48.7/46.4	47.1/45.2	46.0/43.8
28 d 抗折强度 (F 7 等级) /MPa	7	8.5/7.6	8.1/7.4	7.8/7.1	7.5/6.9	7.1/6.7
3 month 抗压强度 /MPa	不作要求	69.8/56.2	66.9/55.3	64.3/52.4	62.3/50.6	60.4/49.3
3 month 抗折强度 /MPa	不作要求	10.1/8.1	9.6/7.9	8.9/7.7	8.4/7.5	8.0/7.3
拉伸粘结强度 /MPa	≥ 1.0	1.55/1.25	1.46/1.22	1.38/1.17	1.25/1.10	1.19/1.08
耐磨性 /g	≤ 0.50	0.17/0.33	0.22/0.36	0.29/0.39	0.30/0.42	0.33/0.45
尺寸变化率 /%	-0.15 ~ +0.15	-0.07/-0.10	-0.08/-0.11	-0.09/-0.11	-0.09/-0.12	-0.11/-0.13
冲击性能	无开裂或脱离底板	符合要求	符合要求	符合要求	符合要求	符合要求

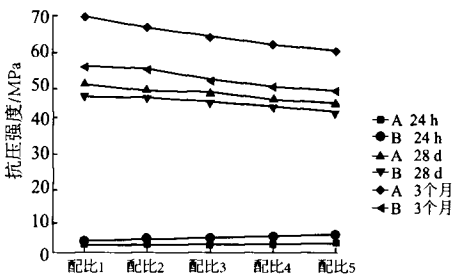


图 1 各配比抗压强度同龄期比较

Fig. 1 Compressive strength Comparison each ratio in same age

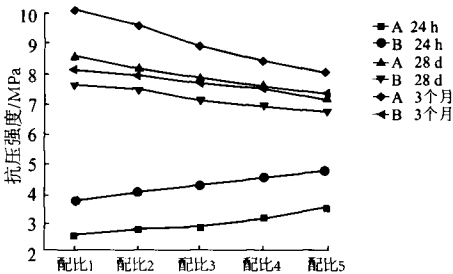


图 2 各配比抗折强度同龄期比较

Fig. 2 Folding strength omparisonof each ratio in same age

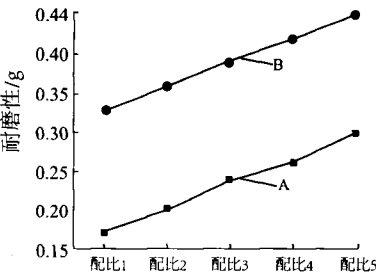


图 3 各配比耐磨性比较

Fig. 3 Wear resistance comparison of of each ratio in the same age

表 7、图 1 ~ 3 为地面用水泥基自流平砂浆的各种物理性能检测 results 和比较, 由流动度试验结果可知, 钢渣砂浆的流动度 (初始流动度和 20 min 流动度) 与石英砂浆一样, 均能够达到 JC/T 985-2005 标准规定的流动度要求, 并且钢渣砂浆的 20 min 流动度与初始流动度相比损失更小, 因而钢渣砂浆的流动度更易于控制, 更能满足工程施工的要求; 从强度试验结果可看出, 钢渣砂浆与用石英砂浆相比, 除早期强度稍低外, 后期强度 (28 d 及 3 month) 前者超过后者, 如配比 A1 的 28 d 及 3 month 的抗压强度分别比比 B1 提高了 6.4% 和 24.2%, 其主要原因有三方面, 一是由于钢渣粉尽管活性较低, 但与作为填料的重钙粉相比还是具有一定的水化活性, 具有增强水泥基自流平砂浆后期强度的功能, 表 4 中钢渣粉的活性指数测定结果也说明了这一点, 二是钢渣砂表面含有活性熟料矿物成分^[9], 它们的水化增强了钢渣砂颗粒与水泥浆体的粘结, 三是由于钢渣砂表面形貌的粗糙和不规则, 使得颗粒之间的咬合力及与水泥基胶凝材料结合能力高于表面光滑的天然石英砂, 表 5 中钢渣砂与天然石英砂的粉体力学性能综合测定结果对比也验证了这一点; 由耐磨性试验结果可知, 钢渣砂浆的磨耗值明显低于石英砂浆, 如配比 A1 的耐磨性比比 B1 提高了 48.5%, 钢

渣砂作为集料与天然石英砂相比, 钢渣砂的耐磨性能更好, 表 3 中钢渣砂的相对可磨性试验也验证了这一结果, 这与预处理钢渣作集料制备道路水泥砂浆^[9]和钢渣制备高耐磨水泥混凝土^[10]的研究结论一致; 钢渣砂浆的其他性能(如: 拉伸粘结强度、尺寸变化率及冲击性能)与石英砂浆一样, 均能达到标准《JC/T 985-2005》规定的技术要求。

用钢渣砂/钢渣粉代替天然石英砂/重钙粉制备的地面用水泥基自流平砂浆除具有上述优点外, 由于其主要原材料(如: 钢渣砂、钢渣粉、脱硫石膏等)都是固体工业废渣, 因而用钢渣砂/钢渣粉制备的地面用水泥基自流平砂浆, 还具有降低生产成本, 节约天然石英砂及石灰石资源, 保护环境等多重作用。

4 结 论

(1) 钢渣砂浆的各项技术性能指标完全达到地面用水泥基自流砂浆 JC/T985-2005 规定的技术要求。

(2) 钢渣砂浆比石英砂浆具有更好的流平性能, 后期抗折抗压强度高, 耐磨性能高等特点。

(3) 钢渣砂浆具有降低水泥基自流平砂浆的生产成本, 节约天然石英砂及石灰石资源和保护环境等作用。

参考文献:

- [1] 杨斌. 地面用水泥基自流平砂浆及其标准 [J]. 新型建筑材料, 2006(2):11-14.
- [2] 王爱国, 石妍, 刘开伟, 等. 高炉重矿渣作为细骨料对水泥砂浆性能的影响 [J]. 材料导报 B, 2017, 31(6):121-125.
- [3] 邹小平, 陈平, 刘荣进, 等. 利用钢渣作掺合料及骨料的高强混凝土试验 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3):532-537.
- [4] 李伟, 王鹤彬, 王达, 等. 转炉钢渣沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2016, 32(6):1062-1069.
- [5] 李超, 陈宗武, 谢君, 等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展 [J]. 材料导报 A, 2017, 31(2):86-95.
- [6] Jihui Zhao, Dongmin Wang, Peiyu Yan, et al. Comparison of Grinding Characteristics of Converter Steel Slag with and without Pretreatment and Grinding Aids [J]. Appl. Sci., 2016(6):237-252.
- [7] 陆静娟, 邢天鹏, 施存有, 等. 钢渣粉磨工艺技术探讨 [J]. 新型建筑材料, 2011(9):70-72.
- [8] 吴欢. 钢渣沥青密级配混合料路用性能试验研究 [J]. 交通建设与管理, 2015(8):77-81.
- [9] 陶海征, 林宗寿. 预处理钢渣作集料制道路水泥砂浆的试验研究 [J]. 水泥工程, 2002(2):51-53.
- [10] 丁庆军, 李春, 姜从威等. 利用钢渣制备高耐磨水泥混凝土的研究 [J]. 混凝土, 2000, 134(12):36-39.

Research on Application of Cement-based Self-leveling Floor Mortar Using Low Active Steel Slag

Xu Fengguang, Yang Fengling, Li Hongwei, Hou Haijun, Wang Qiang

(School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu, China)

Abstract: Steel slag sand and steel slag powder are prepared by crushing, sieving and grinding of low active steel slag. The slag sand and the steel slag powder were used as the fine aggregate and the filler of the cement-based self-leveling floor mortar respectively. The influence of the steel slag sand and the steel slag powder on the fluidity, abrasion resistance, flexural and compressive strength of the cement-based self-leveling floor mortar were studied. The research results show that comparing the cement-based self-leveling floor mortar prepared with steel slag sand/steel slag powder and natural quartz sand/heavy calcium powder, the former has higher late strength, better abrasion resistance, higher surface toughness, and lower production cost, etc. The compressive strengths of the former were increased 6.4% and 24.2% at 28 d and 3 month respectively, and its abrasion resistance increased by a maximum of 48.5%. All other indexes of cement-based self-leveling floor mortar prepared with steel slag sand and steel slag powder can meet the technical requirements specified in the JC/T 985-2005 standard.

Keywords: Steel slag; Activity index; Self-leveling floor mortar; Abrasion resistance