

DOI:10.11918/201902099

滚筒渣与热闷渣基础性能研究

李云云^{1,2},倪文^{1,2},李佳^{1,2},李宁^{1,2},陈心颖^{1,2},张钰莹^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学),北京 100083)

摘要:为实现钢渣的高效资源化利用,采用X射线荧光光谱(XRF)、X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、粒径分布、安定性、易磨性等检测方法研究了滚筒法、热闷法处理工艺对钢渣基础性能的影响。研究表明:滚筒渣和热闷渣的主要化学成分和物相组成相差不大,滚筒渣中硅酸二钙(C₂S)、硅酸三钙(C₃S)和铁酸二钙(C₂F)的质量分数较大,且可以较明显的观察到金属铁粒;与热闷渣相比,滚筒渣中CaO质量分数较大,而f-CaO质量分数较少。在2.0 MPa饱和蒸汽下进行压蒸试验发现,在相同粒径范围内,滚筒渣的安定性指数普遍大于热闷渣,安定性优异。采用水泥试验小磨进行粉磨,得到比表面积随粉磨时间延长的特征曲线。结果发现,在相同的粉磨时间内,滚筒渣的比表面积均小于热闷渣的比表面积,当粉磨时间超过70 min时,滚筒渣的粉磨效率趋于平缓,而热闷渣继续粉磨到110 min时,比表面积增加15.67%,因此滚筒渣的易磨性较差。粒度筛分与压碎值测定试验结果显示,滚筒渣的粒径大部分集中在3~5 mm,热闷渣主要集中在3~10 mm且粒度分布较均匀;滚筒渣和热闷渣粗细骨料的压碎值均达到I类粗细骨料技术指标,可直接用作粗细骨料。

关键词: 滚筒渣;热闷渣;安定性;易磨性;粗细骨料;处理工艺

中图分类号: TF711

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)12-0132-08

Study on basic performance of roller steel slag and hot smoldering steel slag

LI Yunyun^{1,2}, NI Wen^{1,2}, LI Jia^{1,2}, LI Ning^{1,2}, CHEN Xinying^{1,2}, ZHANG Yuying^{1,2}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (University of Science and Technology Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: To achieve efficient resource recovery of steel slag, the effects of roller method and hot smoldering process on the basic properties of steel slag were studied by means of X-ray fluorescence spectrometry (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), particle size distribution, stability, and grindability. Research indicates that the main chemical composition and phase composition of roller steel slag (RSS) and hot smoldering steel slag (HSSS) have little difference. RSS contains a large amount of dicalcium silicate (C₂S), tricalcium silicate (C₃S), and dicalcium ferrite (C₂F), and metal iron particles can be observed clearly. Compared with HSSS, the CaO content of RSS is larger, while the f-CaO content is smaller. Autoclave stability test was carried out under 2.0 MPa saturated steam, and it was found that with in the same particle size range, the stability index of RSS was higher than that of HSSS, indicating that RSS has better stability. Cement test mill was used for grinding, and the curve of specific surface area with the increase of grinding time was obtained. Results show that during the same grinding time, the specific surface area of RSS was smaller than that of HSSS. When the grinding time exceeded 70 min, the grinding efficiency of RSS tended to be gentle, while the specific surface area of HSSS increased by 15.67% when the grinding time reached 110 min, which suggests that RSS has poor grindability. Sizing experiments and crush value test show that the particle size of RSS was mostly 3-5 mm, while that of HSSS was mainly 3-10 mm, and the particle size distribution was relatively uniform. The crushing values of RSS and HSSS coarse and fine aggregates both reached the technical index of type I coarse and fine aggregates, which can thus be directly used as coarse and fine aggregates.

Keywords: roller steel slag; hot smoldering steel slag; stability; grindability; coarse and fine aggregates; treatment process

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(41573080);国家重点研发计划重点专项(2017YFC0210301)

作者简介: 李云云(1990—),女,博士研究生;

倪文(1961—),男,教授,博士生导师

通信作者: 倪文, niwen@ces.ustb.edu.cn

中国的钢铁产量已连续多年位居世界第一,据统计2017年中国粗钢的生产量为 $83\,172.8 \times 10^4$ t^[1]. 钢渣是炼钢过程产生的大宗副产物,按每生产1 t粗钢约产生0.2 t钢渣测算,2017年钢渣的排放量约为 $16\,634.56 \times 10^4$ t吨。从投资、环境保护、节能等

方面考虑, 钢渣处理工艺是影响钢渣综合利用的关键因素. 目前中国钢渣的主要处理工艺有热闷法、滚筒法、热泼法、风淬法、水淬法等^[2-3], 其中热闷法和滚筒法最为常用.

热闷法是将热熔钢渣用吊车将渣倾倒在热闷池或热闷罐中, 压盖密封后适量间歇喷水冷却, 利用池内渣的余热产生大量饱和蒸汽与钢渣中不稳定的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)、游离氧化镁($f\text{-MgO}$)发生水化等反应, 加上 C_2S 等冷却过程中体积增大, 使钢渣自解粉化, 同时渣钢分离, 处理完后用挖掘机或抓斗从池内挖出外运^[4-5]. 其优点有: ①适应性强, 液态、半固态都能处理; ②处理后渣铁分离好, 粉化率高, 20 mm 以下达 80%; ③渣性能稳定、粒度小, $f\text{-CaO}$ 、 $f\text{-MgO}$ 体积分数小于 2%, 便于后续综合利用^[6-7]. 但其缺点有: 处理周期长, 处理后的钢渣粒度不均匀, 以及在冬季渣处理厂房内蒸汽较大, 且余热不能完全利用等^[6].

滚筒法是将液态钢渣倒入渣罐后, 由吊车吊至滚筒前, 顺着溜槽将高温熔渣倒入筒体, 滚筒边旋转边向筒内急速喷水使尾渣冷却, 尾渣落下后被筒内钢球挤压破碎, 然后随水从筒下部出口流出滚筒^[8-9]. 其优点有: ①封闭处理, 尾气经净化处理达标后排放, 较为清洁; ②钢渣粒度细小, 废钢与渣可分离完全; ③游离氧化钙质量分数低, 一般小于 4%, 炉渣不需陈化便可利用在建材行业^[10]. 滚筒法处理工艺装置自动化程度高, 环保效果好, 但具有一定的应用局限性, 仅适用于处理热状液态渣, 且运行设备、动力成本高. 此外, 滚筒法与热闷法相对比渣的处理率较低^[11].

目前国内外对钢渣基础性能的研究主要集中在化学成分、物相、微观结构等方面^[12-14]. 前期通过浸出液检测法对热闷渣的腐蚀性进行评估, 研究发现短期和长期堆存的热闷渣浸出液的 pH 均未超过标准限值, 不属于碱性危险废物^[15]. 张朝晖等^[16]对热闷渣基础性能进行分析, 结果表明热闷渣中 CaO 质量分数高, S、P 等有害元素少, 可代替部分溶剂返回烧结利用. 肖永力等^[17]对宝钢滚筒渣的性能进行分析, 结果表明滚筒渣的粒径小且均匀, 游离氧化钙($f\text{-CaO}$)质量分数低, 性能稳定. 李婷等^[18]对不同产出环节和处理工艺钢渣的基本性能进行研究, 研究表明滚筒渣与热泼渣相比易磨性和胶凝活性较差, 但稳定性较好.

不同预处理工艺的钢渣在化学成分及物相等基础性能方面呈现较大差异. 但目前关于滚筒法和热闷法预处理钢渣的基础性能对比分析的报道较少, 因此, 本文针对滚筒法和热闷法两种方法处理后的

钢渣进行基本性能分析, 为钢渣处理和产品化技术提供一定的参考意见.

1 材料及方法

1.1 原材料

试验原料取自上海某钢厂滚筒法处理的钢渣, 简称为滚筒渣, 以及邯郸某钢厂热闷法处理的钢渣, 简称为热闷渣. 滚筒渣呈灰黑色, 方形块状; 热闷渣呈深灰白色, 形状不规则.

1.2 方法

取不同批次的原状滚筒渣和热闷渣进行如下试验.

1) 粒度分布试验. 按照 GB/T 1480-2012《金属粉末干筛分法测定粒度》规定的筛分方法对滚筒渣和热闷渣进行粒度筛分试验. 试验筛的筛孔尺寸为 1、3、5、6、8、10、12、15 mm.

2) 安定性试验. 参照 GB/T 24175-2009《钢渣稳定性试验方法》规定的压蒸法对滚筒法、热闷法钢渣进行安定性试验. 其原理是钢渣在 2.0 MPa 的饱和蒸汽条件下压蒸, 使其中所含游离氧化钙、游离氧化镁消解粉化, 通过安定性指数来判断钢渣的稳定性.

3) 压碎值测定试验. 按照 GB/T 14684-2011《建筑用砂》、GB/T 14685-2011《建筑用碎石、卵石》标准规定选用 0.30~0.60、0.60~1.18、1.18~2.36、2.36~4.75 mm 的细骨料和 9.5~16.0、16.0~19.0 mm 的粗骨料进行压碎值试验, 试验由国家建筑材料测试中心检验完成.

4) 易磨性试验. 将滚筒渣和热闷渣置于 50 °C 烘箱内烘干(含水率 $\leq 1\%$)后, 用 SM Φ 500 \times 500 型 5 kg 的试验小磨粉磨, 粉磨时间设定为 20、30、50、70、90、110 min, 用 FBT-9 自动比表面积测定仪测定滚筒渣和热闷渣的比表面积.

钢渣经烘干、破碎后研磨至 80 μm 以下, 进行如下分析: 用岛津 XRF-1800 荧光光谱仪对滚筒渣和热闷渣进行化学成分分析. 用 XRD 测定滚筒渣和热闷渣的物相, 其分析采用日本理学 Rigaku Ultima-IV 高功率旋转阳极 X 射线衍射仪, Cu 靶, 波长为 15.406 nm, 工作电流为 150 mA, 工作电压为 40 kV, 扫描范围 10°~70°, 步长为 0.02°, 扫描速度为 5°/min. 按照 YB/T 4328-2012《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》规定对滚筒渣和热闷渣中游离氧化钙($f\text{-CaO}$)的质量分数进行测定. 用 SEM 及 EDS 能谱观察滚筒渣和热闷渣的微观形貌和测定物相成分, 其分析采用德国卡尔蔡司 EVO18 扫描电子显微镜及 Bruke XFlash Detector 5010 能谱分析仪.

2 结果与讨论

2.1 两种钢渣的化学成分比较

选用不同钢厂的滚筒渣(GS)和热闷渣(HS),

利用 X 射线荧光光谱法(XRF)进行化学成分分析,结果见表 1.

表 1 钢渣化学成分分析结果

Tab. 1 Chemical compositions of steel slag

样品	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Alkalinity
GS-1	42.70	1.39	9.60	21.29	0.05	8.84	2.41	1.72	3.77
GS-2	40.95	1.58	10.21	22.43	0.04	11.11	2.79	1.62	3.46
GS-3	42.14	0.94	9.98	21.62	0.05	11.18	3.68	1.50	3.67
均值	41.93	1.30	9.93	21.78	0.05	10.38	2.96	1.61	3.65
HS-1	39.19	5.34	12.61	26.33	0.40	10.31	2.46	1.63	2.75
HS-2	22.57	1.58	10.21	37.23	0.13	5.33	4.56	0.67	2.07
HS-3 ^[19]	37.93	1.33	8.72	36.20	0.26	7.80	3.54	2.77	3.30
均值	33.23	2.75	10.51	33.25	0.26	7.81	3.52	1.69	2.71

注: Alkalinity = wt(CaO)/[wt(SiO₂) + wt(P₂O₅)].

从表 1 可以看出, 滚筒渣和热闷渣的化学成分相差不大, 但是氧化物的质量分数差别较大. 滚筒渣和热闷渣的主要化学成分为 CaO, 其次是 Fe₂O₃ 和 SiO₂, 同时还有少量的 MgO、P₂O₅、MnO、Al₂O₃ 等成分. 与热闷渣相比, 滚筒渣中含有大量的 CaO, 有害杂质 SO₃ 质量分数相对较低.

钢渣中游离氧化钙的质量分数会影响钢渣的体积膨胀率, 按照 GB/T 20491-2017《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》规定, 游离氧化钙超过 4%, 则不能直接用于建筑、建材和道路工程行业. 选用 GS-1 和 HS-1 检测其 f-CaO 的质量分数, 结果分别为 1.33% 和 1.70%. 与热闷渣相比, 滚筒渣中 f-CaO 的质量分数相对较低, 更加适用于建筑、建材和道路工程中.

2.2 两种钢渣的矿物组分分析

滚筒渣与热闷渣的 XRD 结果如图 1 所示.

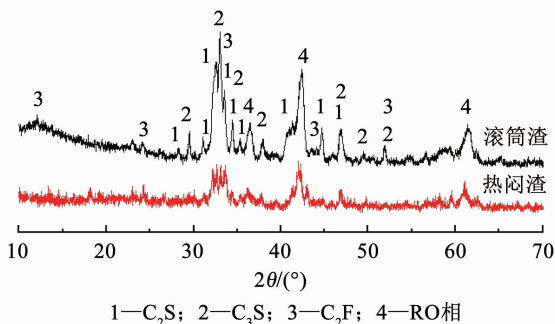


图 1 钢渣 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of steel slag

从图 1 可以看出, 滚筒渣和热闷渣的主要矿物组成均为硅酸二钙(C₂S)、硅酸三钙(C₃S)、RO 相(MgO、FeO 和 MnO 的固溶体)、铁酸二钙(C₂F). 钢

渣中具有水硬活性的硅酸二钙(C₂S)、硅酸三钙(C₃S), 且钢渣的活性随水硬活性矿物质量分数的增大而增高, 因此钢渣被认为潜在的矿物掺合料^[20]. 研究表明, 钢渣磨细后可代替部分水泥作为混凝土掺和料应用于混凝土生产中, 具有改善水泥浆体的流动性, 减少早期水化放热, 改善混凝土后期的强度等特点^[21-22]. 张爱萍等^[23]研究了钢渣复合掺和料配制混凝土的工作性能与力学性能, 研究表明钢渣的早期活性优于矿渣及粉煤灰, 且钢渣与矿渣复合可以产生良好的复合效应. 崔孝炜等^[24]研究钢渣—矿渣基全固废胶凝材料发现钢渣水化产生 C-S-H 凝胶与 Ca(OH)₂ 为体系提供碱性环境, 从而促进矿渣水化, 并且表现为协同促进作用, 使硬化浆体的结构更加致密, 因此提高整个混凝土体系的稳定性. 滚筒渣与热闷渣相比, 硅酸二钙、硅酸三钙含量较高, 因此更适用于作矿物掺合料应用于水泥行业.

2.3 两种钢渣的表面结构分析

图 2、3 分别为滚筒渣和热闷渣 SEM-EDS 分析的面扫描结果, 图 4 为滚筒渣和热闷渣根据面扫描结果得到的物相成分图.

由图 2 滚筒渣面扫结果和图 4(a) 滚筒渣微观结构图可以看出, 试样结构较为均匀. 滚筒渣试样可明显观察到亮白色的金属铁粒, 其粒径在 80 μm 左右; 硅酸钙相主要呈深灰色, 形状为圆粒状; 滚筒渣试样中铁酸二钙的质量分数较大, 颜色为灰色, 呈不规则状, 并以网状形式充填在硅酸钙之间; RO 相为 Mg_{1-x}Fe_xO 固溶体, 呈灰黑色圆块状, 分布在金属铁周围, 且被铁酸二钙包裹.

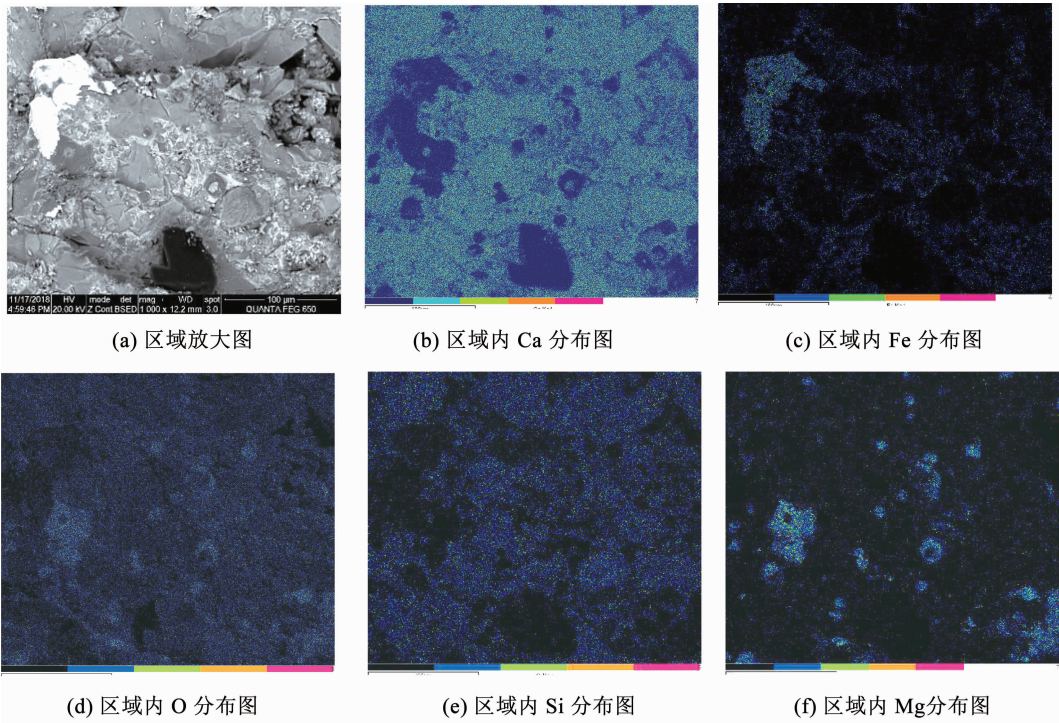


图 2 滚筒渣的面扫描结果
Fig.2 SEM-EDS images of GS

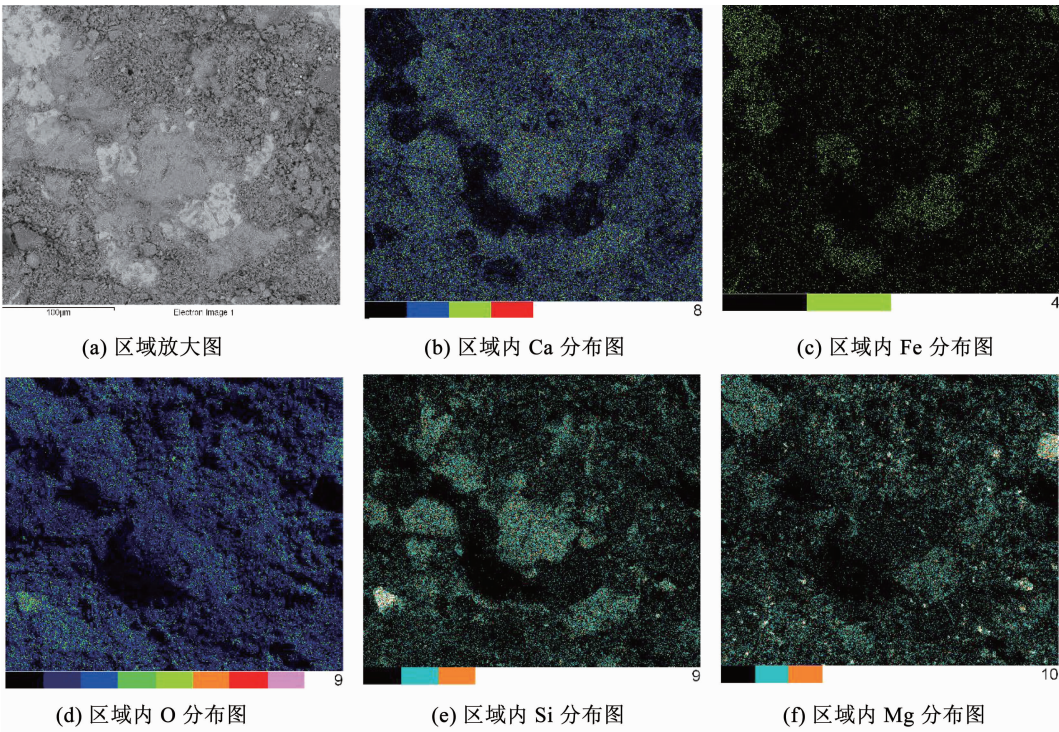
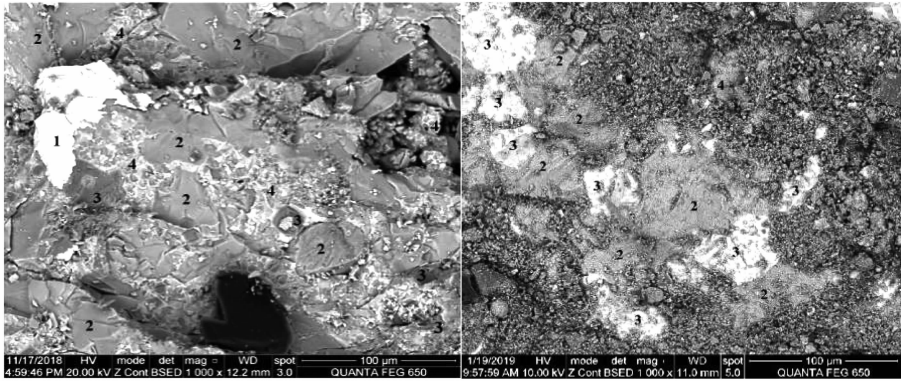


图 3 热闷渣的面扫描结果
Fig.3 SEM-EDS images of HS

由图 3 热闷渣面扫结果和图 4(b) 热闷渣微观结构图可以看出, 试样结构不均匀. 硅酸钙相主要呈深灰色, 不规则状; RO 相为灰白色, 形状为圆块状, 粒径在 50 μm 左右, 嵌布在硅酸钙相之间; 铁酸二钙相质量分数较少, 未明显观察到.

滚筒渣与热闷渣的微观结构差异较大, 滚筒渣

可明显观察到金属铁粒, 而热闷渣中未观察到. 滚筒渣中硅酸钙的质量分数较大, 但热闷渣中硅酸钙相晶粒较大, 粒径在 100 μm 左右, 说明热闷法处理工艺在高温段属于缓冷体系, 因此有较充分的时间析晶. 滚筒渣中铁酸二钙相质量分数较大, 嵌布在钢渣基体中, 而热闷渣中未明显观察到铁酸二钙相. 微观



1—铁(Fe); 2—硅酸二钙、硅酸三钙等(C₂S、C₃S 等); 3—RO 相(Mg_{1-x}Fe_xO); 4—铁酸二钙(C₂F)
(a) 滚筒渣 (b) 热闷渣

图 4 钢渣微观结构图

Fig. 4 Microstructurediagram of steel slag

结构分析与化学分析和 XRD 分析结论相符。

2.4 两种钢渣的粒径分布

对比两种处理工艺钢渣的粒径分布如图 5 所示。

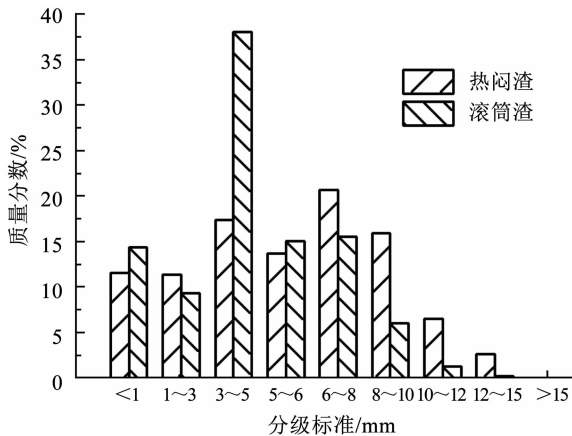


图 5 不同处理工艺钢渣的粒度分布

Fig. 5 Particle size distribution of steel slag in different treatment processes

由图 5 不同处理工艺钢渣的粒度分布可以看出,滚筒渣在粒径 < 5 mm 质量分数占 60% 以上, < 10 mm 占 90%, 且大部分集中在 3 ~ 5 mm, 更适用于做细集料. 热闷渣主要集中在 3 ~ 10 mm, 粒度分布较均匀。

对比两种工艺的钢渣做细集料的细度模数, 选取 0 ~ 4.75 mm 滚筒渣和热闷渣按表 2 粒级进行筛分, 筛分结果见表 2。

表 2 钢渣筛分试验结果(0 ~ 4.75 mm)

Tab. 2 Screening test results of steel slag (0 ~ 4.75 mm)

粒级/mm	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15
滚筒渣筛上累计/%	0	51.0	70.1	79.2	81.8	89.9
热闷渣筛上累计/%	0	57.5	78.0	87.8	92.2	95.3

细度模数公式为:

$$M_x = [(A_{0.15} + A_{0.30} + A_{0.60} + A_{1.18} + A_{2.36}) - 5A_{4.75}] / (100 - A_{4.75}),$$

$$M_{\text{滚筒渣}} = (52.0 + 70.1 + 79.2 + 84.8 + 89.9) / 100 = 3.7,$$

$$M_{\text{热闷渣}} = (57.5 + 78.0 + 87.8 + 92.2 + 95.3) / 100 = 4.1.$$

由表 2 可以看出, 滚筒渣的粒度组成主要集中在 0 ~ 0.60 mm 粒级范围内, 只要经过简单的筛选, 就能得到性能良好的细集料. 经计算, 滚筒渣的细度模数为 3.7, 热闷渣的细度模数为 4.1, 滚筒渣与热闷渣相比粒度较细. 研究表明^[8, 25-26], 由于渣粒越细, 在一定的水热条件激发下, 渣粒越细, 越容易被活化, 从而可加速其安定性的进程, 因此细渣更容易稳定。

对比两种工艺的钢渣做粗集料的粒度分布, 选取 4.75 ~ 19.00 mm 滚筒渣和热闷渣按表 3 粒级进行筛分, 筛分结果见表 3. 由表 3 可以看出, 钢渣块的粒度均小于 19.00 mm, 滚筒渣在粗集料粒径范围与热闷渣相比粒径较小。

表 3 钢渣筛分试验结果(4.75 ~ 19.00 mm)

Tab. 3 Screening test results of steel slag (4.75 ~ 19.00 mm)

粒级/mm	19.00	16.00	9.50	4.75
滚筒渣筛上累计/%	0	3.5	53.5	100.0
热闷渣筛上累计/%	0	12.0	58.7	100.0

2.5 两种钢渣的压碎值比较

钢渣用于混凝土骨料是实现钢渣大宗利用的有效途径. 压碎值是衡量骨料力学性能的重要指标, 因此, 压碎值指标很大程度上决定了混凝土的强度. 不同批次的原状滚筒渣和热闷渣的压碎值试验结果见表 4。

表 4 不同处理工艺钢渣的压碎值检测结果

Tab. 4 Test results of crushing value of steel slag in different treatment processes

类别	样品名称	指标分类			压碎值/%	结论
		I 类	II 类	III 类		
细骨料	滚筒渣	≤20	≤25	≤30	7	I 类
	热闷渣				9	
粗骨料	滚筒渣	≤10	≤20	≤30	7	I 类
	热闷渣				6	

由表 4 可以看出, 细骨料(0.30~4.75 mm) 滚筒渣和热闷渣的压碎值均小于 20, 均达到 I 类细骨料技术指标. 细骨料的滚筒渣与热闷渣相比硬度较高. 粗骨料(9.5~19.5 mm) 滚筒渣和热闷渣的压碎值均小于 10, 均达到 I 类粗骨料技术指标. 粗骨料的热闷渣与滚筒渣相比硬度较高.

2.6 两种钢渣的安定性比较

钢渣中含有较多的游离氧化钙(f-CaO), 水化会产生体积膨胀^[27-28], 是造成钢渣安定性不良的最主要原因. 钢渣中的 f-CaO 主要来源于炼钢过程中的各种物理化学反应, 其主要途径有: ①在转炉吹炼的过程中, 由于投入过量的石灰, 使 f-CaO 被饱和的钢渣包裹; ②石灰石的溶解度已经饱和, 石灰颗粒不能与酸性氧化物结合成矿物, 从而游离存在钢渣中; ③固溶体(CaO·FeO·MnO) 的形成; ④钢渣中硅酸三钙(C₃S) 在一定的高温下分解成硅酸二钙(C₂S) 和 CaO, 而 CaO 也是游离状态^[28]. f-CaO 质量分数和体积膨胀率均呈现近似的线性正相关, 因此钢渣中 f-CaO 质量分数是衡量钢渣安定性的一个重要指标^[29].

对滚筒法、热闷法钢渣进行安定性试验发现, 利用滚筒法处理方法有利于消解钢渣中 f-CaO, 液态转炉渣经滚筒法处理的 f-CaO 质量分数比热闷缓冷处理的 f-CaO 质量分数低 30.57%. 因此, 滚筒法处理钢渣是钢渣稳定化处理的有效途径之一.

表 5 比较了分别用热闷法和滚筒法处理钢渣的安定性. 从表 5 可以看出, 在相同粒径范围内, 用滚筒法处理的钢渣的安定性指数普遍大于热闷法处理的钢渣, 而且当钢渣粒径为 2.36 mm 时, 用滚筒法处理的钢渣的安定性指数均达到 90% 以上, 其安定性优异.

2.7 两种钢渣的易磨性比较

对滚筒渣和热闷渣进行易磨性试验, 测得相同粉磨时间两种钢渣的比表面积如图 6 所示.

表 5 不同处理工艺钢渣安定性分析结果

Tab. 5 Analysis results of steel slag stability in different treatment processes

组别	工艺	粒径/mm	本组	筛下	安定	2.36 mm	2.36 mm
			质量	质量	性指	筛下质	安定性
			/g	/g	数/%	量/g	指数/%
1	热闷法	2.36~4.75	2 000.0	815.3	59.24	815.3	59.24
2		4.75~9.50	2 000.0	590.1	70.50	315.9	84.21
3		9.50~19.00	2 000.0	520.4	73.98	227.4	88.63
4	滚筒法	19.00~38.00	1 000.0	368.4	63.14	113.7	88.63
5		2.36~4.75	2 000.0	136.5	93.17	136.5	93.17
6		4.75~9.50	2 000.0	240.8	87.96	18.1	99.10
7	滚筒法	9.50~19.00	1 000.0	144.1	85.59	5.1	99.49
8		19.00~38.00	302.2	81.9	72.90	0.9	99.70

* 注: 安定性指数 = 1 - 筛下质量/全部质量.

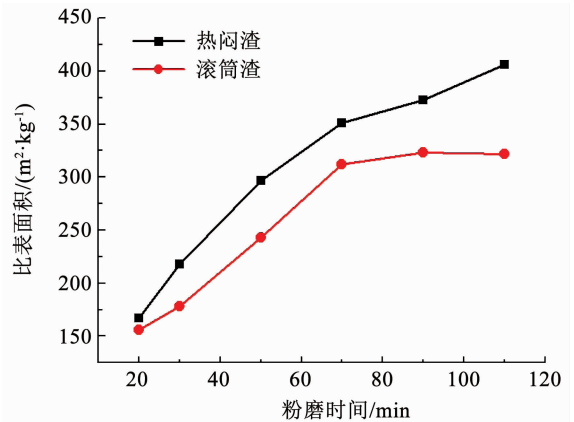


图 6 不同粉磨时间对应比表面积

Fig. 6 Specific surface area for different grinding time

由图 6 可以看出, 滚筒渣与热闷渣的易磨性差异较大, 滚筒渣易磨性较差. 粉磨时间为 20 min 时, 两种钢渣的比表面积相差不大, 此阶段影响细度的主要因素是钢渣的内部结构缺陷^[30], 由于两种钢渣的内部缺陷相差不大, 因此比表面积相差不大. 粉磨 30 min 时, 两种钢渣的易磨性差距变大, 热闷渣的比表面积比滚筒渣大 22.47%, 此阶段的主要影响因素是金属铁的粒度和质量分数, 滚筒渣金属铁质量分数较大, 且粒度较大, 因此易磨性差. 30 min 后, 钢渣在粉磨过程中被包裹的铁粒被逐渐剥离, 形成金属颗粒聚集在磨机内, 会严重影响磨机的粉磨效率, 增加衬板和研磨体的消耗, 使粉磨状况恶化. 因此, 对钢渣进行除铁操作, 有利于钢渣的粉磨. 70 min 后, 滚筒渣粉磨效率趋于平缓, 而热闷渣继续粉磨后, 比表面积可增加 15.67%. 因此, 与热闷渣相比, 滚筒渣在粉磨时间较短时粉磨效果较好, 延长粉磨时间对滚筒渣比表面积的增加影响不大. 滚筒渣比较难磨的原因可能有: 1) 在粉磨过程中被包裹的铁

粒被逐渐剥离,形成金属颗粒聚集在磨机内,严重影响磨机的粉磨效率,增加衬板和研磨体的消耗,使粉磨状况恶化;2) 钢渣内部缺陷随粒度减小而减少,由内部破碎转化为表面粉碎^[30];3) 滚筒法处理的钢渣结晶致密^[31],且粉磨后形成粉体团聚,阻碍物料进一步磨细,因此粉磨效果较差。

3 结 论

1) 滚筒法工艺处理后的钢渣与热闷法比较,其化学成分中氧化钙的质量分数较高,游离氧化钙和有害组分质量分数较少,安定性较好。

2) 与热闷法处理的钢渣相比,滚筒渣的易磨性较差,但粒径分布粒径偏细,且较为均匀,可直接用于混凝土粗细集料。

参 考 文 献

- [1] 工业固废网. 2017 年度中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R]. 北京: 工业固废网, 2018
Industrial Solid Waste Network. 2017 China's large-scale industrial solid waste comprehensive utilization industry development report [R]. Beijing: Industrial Solid Waste Network, 2018
- [2] 张朝晖, 廖杰龙, 巨建涛, 等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(7): 1
ZHANG Zhaohui, LIAO Jielong, JU Jiantao, et al. Treatment process and utilization technology of steel slag in China and abroad [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(7): 1. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn.1001-0963.2013.07.008
- [3] 赵海晋, 余其俊, 韦江雄, 等. 钢渣矿物组成、形貌及胶凝活性的影响因素[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(15): 22
ZHAO Haijin, YU Qijun, WEI Jiangxiong, et al. Influence on composition and morphology of mineral of steel slag and cementitious property [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(15): 22. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2010.15.006
- [4] 谷金生, 薛军. 钢渣热闷技术及再利用分析[J]. 鞍钢技术, 2010(5): 56
GU Jinsheng, XUE Jun. Hot closed pot technology for steelmaking slag and analysis on recycling for slag [J]. Angang Technology, 2010(5): 56. DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2010.05.014
- [5] 谢光荐, 赵亮, 石拥军. 重钢钢渣处理工艺研发及综合利用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2009, 11(4): 63
XIE Guangjian, ZHAO Liang, SHI Yongjun. Development and comprehensive utilization of steel slag treatment at Chongqing Iron and Steel Group [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2009, 11(4): 63. DOI: 10.19406/j.cnki.cqkxyxbzkb.2009.04.020
- [6] 赵刚. 不同种类钢渣的处理工艺的选择[J]. 山西冶金, 2016, 39(3): 57
ZHAO Gang. The choice of treatment process for various sorts of steel slag [J]. Shanxi Metallurgy, 2016, 39(3): 57. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2016.03.20
- [7] 刘瑛, 方宏辉, 卢丽君. 钢渣处理与综合利用技术研究进展[J]. 化学工程与装备, 2014(9): 190
LIU Ying, FANG Honghui, LU Lijun. Research progress on steel

- slag treatment and comprehensive utilization technology [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014(9): 190
- [8] 李嵩. BSSF 滚筒法钢渣处理技术发展现状研究[J]. 环境工程, 2013, 31(3): 113
LI Song. A review on development of BSSF technology [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(3): 113. DOI:10.7617/j.issn.1000-8942.2013.03.029
- [9] 金强, 徐锦引, 高卫波. 宝钢新型钢渣处理工艺及其资源化利用技术[J]. 宝钢技术, 2005(3): 12
JIN Qiang, XU Jinyin, GAO Weibo. New technology of steel slag processing and its application as the second resource at Baosteel [J]. Baogang Technology, 2005(3): 12. DOI:10.3969/j.issn.1008-0716.2005.03.004
- [10] 沈成孝. 滚筒法渣处理技术的现状及发展[J]. 冶金设备, 2003(3): 1
SHEN Chengxiao. Practice and prospects for technology of slag processing by rotary cylinder at Baosteel [J]. Metallurgical Equipment, 2003(3): 1. DOI:10.3969/j.issn.1001-1269.2003.03.001
- [11] 王延兵, 许军民, 范永平, 等. 钢渣全流程处理技术对比分析研究[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 143
WANG Yanbing, XU Junmin, FAN Yongping, et al. Comparison analysis of the whole process treatment technology of steel slag [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 143. DOI:10.13205/j.hjgc.201403034
- [12] YI Huang, XU Guoping, CHENG Huigao, et al. An overview of utilization of steel slag [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 791. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.108
- [13] GUO Jianlong, BAO Yanping, WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management [J]. Waste Management, 2018, 78: 318. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.045
- [14] MA Jiao, ZHANG Yibo, HU Tianqi, et al. Utilization of converter steel slag by remelting and reducing treatment [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 382: 22088. DOI:10.1088/1757-899X/382/2/022088
- [15] LI Yunyun, NI Wen, GAO Wei, et al. Corrosion evaluation of steel slag based on a leaching solution test [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 41(7): 790. DOI:10.1080/15567036.2018.1520359
- [16] 张朝晖, 孔维明, 巨建涛, 等. 热闷渣基础性能分析及应用前景[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 869
ZHANG Zhaohui, KONG Weiming, JU Jiantao, et al. Analysis of basic properties to the hot braised slag and it's application prospect [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(4): 869. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2014.04.051
- [17] 肖永力, 陈华, 刘茜, 等. 宝钢 BSSF 渣处理工艺技术的发展及应用[C]//第二届全国宝钢学术年会论文集. 上海: 第二届全国宝钢学术年会, 2006, 161
XIAO Yongli, CHEN Hua, LIU Yin, et al. Development and application of Baosteel Short Slag Flow (BSSF) [C]//Proceedings of the 2nd National Baosteel Academic Annual Meeting. Shanghai: Baosteel BAC, 2006: 161
- [18] 李婷, 杨刚, 陈华, 等. 不同产出环节和处理工艺钢渣的基本性质及其利用[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2619
LI Ting, YANG Gang, CHEN Hua, et al. Basic properties and utilization of steel slags produced in different processes and prepared by different treatment process [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2619. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-

- 1625.2015.09.043
- [19] 张作良, 陈韧, 孟祥然, 等. 转炉钢渣物相组成及其显微形貌[J]. 材料与冶金学报, 2019, 18(1): 37
ZHANG Zuoliang, CHEN Ren, MENG Xiangran, et al. Phase compositions and microstructure of slag in BOF[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2019, 18(1): 37. DOI:10.14186/j.cnki.1671-6620.2019.01.007
- [20] WANG Qiang, SHI Mengxiao, YANG Jun. Influence of classified steel slag with particle sizes smaller than 20 μm on the properties of cement and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 601. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.042
- [21] 朱航. 钢渣矿粉的制备及其在水泥混凝土中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006
ZHU Hang. The research on the preparation of steel slag and its application in cement and concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. DOI:10.7666/d.y1021152
- [22] 王强, 阎培渝. 大掺量钢渣复合胶凝材料早期水化性能和浆体结构[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1406
WANG Qiang, YAN Peiyu. Early hydration characteristics and paste structure of complex binding material containing high-volume steel slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10): 1406. DOI:10.3321/j.issn:0454-5648.2008.10.011
- [23] 张爱萍, 李永鑫. 钢渣复合掺合料配制混凝土的工作性能与力学性能研究[J]. 混凝土, 2006(6): 38
ZHANG Aiping, LI Yongxin. Workability and compressive strength of concrete with steel slag composite mineral admixtures[J]. Concrete, 2006(6): 38. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2006.06.012
- [24] 崔孝炜, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基固废胶凝材料的水化反应机理[J]. 材料研究学报, 2017, 31(9): 687
CUI Xiaowei, NI Wen, REN Chao. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials based on steel slag and blast furnace slag[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(9): 687. DOI:10.11901/1005.3093.2016.741
- [25] 石磊, 陈荣欢, 王如意. 宝钢滚筒渣安定性的试验研究[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 93
SHI Lei, CHEN Ronghuan, WANG Ruyi. Experiment study on stability of Baosteel rotary cylinder steel slag[J]. Iron and Steel, 2009, 44(8): 93. DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.
- 2009.08.022
- [26] 徐兵, 於林锋. 宝钢转炉滚筒渣用于混凝土的安定性分析[J]. 粉煤灰, 2013, 25(4): 34
XU Bing, YU Linfeng. The analysis of stability of Baosteel converter roller steel slag for concrete[J]. Coal Ash, 2013, 25(4): 34. DOI:10.3969/j.issn.1007-046X.2013.04.010
- [27] 黄毅, 徐国平, 程慧高, 等. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1902
HUANG Yi, XU Guoping, CHENG Huigao, et al. Analysis on chemical composition, micro-morphology and phase of typical steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(8): 1902. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2014.08.044
- [28] 王强, 杨建伟, 张波. 机械磨细对钢渣中粗颗粒的胶凝性能的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(9): 1227
WANG Qiang, YANG Jianwei, ZHANG Bo. Influence of mechanical grinding on the cementitious properties of coarse particles in steel slag[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(9): 1227. DOI:10.16511/j.cnki.qhdx.2013.09.002
- [29] 赵计辉, 阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 477
ZHAO Jihui, YAN Peiyu. Volume stability and stabilization treatment of steel slag in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 477. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.02.011
- [30] 赵福才, 巨建涛, 廖杰龙, 等. 转炉钢渣基础性能及综合利用分析[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(11): 23
ZHAO Fucui, JU Jiantao, LIAO Jielong, et al. Analysis of comprehensive utilization and basic properties of converter slag processed[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(11): 23. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.2013.11.009
- [31] 吴龙, 郝以党, 岳昌盛, 等. 钢渣资源化利用技术现状和探讨[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(9): 99
WU Long, HAO Yidang, YUE Changsheng, et al. Current situation and discussion of steel slag utilization technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(9): 99. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2016.09.030

(编辑 张红)