

蒸汽动能磨超细电炉镍铁渣试验

付海峰^{1 2} 李天翮^{1 2} 秦文茜^{1 2} 李 红^{1 2} 张明星^{1 2}

(1.西南科技大学环境与资源学院,四川 绵阳 621010; 2.四川省非金属矿粉体改性与高质化利用技术工程实验室,四川 绵阳 621000)

摘 要: 电炉镍铁渣排放量日益增长,直接利用率低,为了提高电炉镍铁渣的综合利用价值,采用 LNGS-80 型(总功率 6.7 kW、蒸汽耗量 80 kg/h)蒸汽动能磨对电炉镍铁渣进行了超细粉碎试验,研究了分级机转速对电炉镍铁渣粒度、比表面积和产量的影响,并估算了 LNGS-10T 型(总功率 165 kW,耗气量 10 000 kg/h)蒸汽动能磨制备镍铁渣的能耗和成本。结果表明:采用 LNGS-80 型蒸汽动能磨对电炉镍铁渣粉碎分级可制备出常见的 $d_{50} = 12.9 \sim 52.7 \mu\text{m}$,比表面积 $305 \sim 669 \text{ m}^2/\text{kg}$,产量为 $167 \sim 480 \text{ kg/h}$ 超细粉体,又能制备 $d_{50} = 2.4 \sim 4.7 \mu\text{m}$,比表面积为 $1\,788 \sim 2\,669 \text{ m}^2/\text{kg}$,产量为 $35 \sim 80 \text{ kg/h}$ 的超细粉体;预估 LNGS-10T 型蒸汽动能磨制备 $d_{50} = 28.5 \mu\text{m}$,比表面积为 $464 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的电炉镍铁渣细粉,系统电耗为 5.2 kWh/t ,相比于辊磨电耗量节约 89%,成本节约 11%。

关键词: 电炉镍铁渣; 蒸汽动能磨; 超细粉碎; 电耗

中图分类号: X757,TD453

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2019)06-0077-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.06.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Ultra-fine Electric Furnace Nickel Iron Slag Prepared by Steam Power Mill

Fu Haifeng^{1 2} Li Tianhe^{1 2} Qin Wenqian^{1 2} Li Hong^{1 2} Zhang Mingxing^{1 2}

(1.School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2.Sichuan Engineering Lab of Non-metallic Mineral Powder Modification and High-value Utilization, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: The electric furnace nickel-iron slag emission is increasing, but the direct utilization rate is low. In order to improve the comprehensive utilization value of electric furnace nickel iron slag, ultra-fine pulverization experiments were carried out on a LNGS-80 steam power mill (total power 6.7 kW, steam consumption 80 kg/h). The effects of the classifier speed on the particle size, specific surface area and output of the electric furnace nickel-iron slag were studied. The energy consumption and cost for milling the nickel-iron slag by the LNGS-10T steam power mill (total power 165 kW, gas consumption 10 000 kg/h) were estimated. The results show that the ultra-fine powder commonly with $d_{50} = 12.9 \sim 52.7 \mu\text{m}$, specific surface area of $305 \sim 669 \text{ m}^2/\text{kg}$ and yield of $167 \sim 480 \text{ kg/h}$, or the ultra-fine powder with $d_{50} = 2.4 \sim 4.7 \mu\text{m}$, specific surface area of $1\,788 \sim 2\,669 \text{ m}^2/\text{kg}$ and yield of $35 \sim 80 \text{ kg/h}$ can be prepared by pulverization and classification of electric furnace nickel-iron slag using LNGS-80 steam power mill. It is estimated that LNGS-10T steam power mill can prepare fine powder of electric furnace nickel-iron slag with $d_{50} = 28.5 \mu\text{m}$ and specific surface area of $464 \text{ m}^2/\text{kg}$, and the system power consumption is 5.2 kWh/t which saves 89% of power consumption and 11% of cost compared with the roller mill.

Key words: electric furnace nickel iron slag; steam power mill; ultra-fine pulverization; power consumption

收稿日期: 2019-08-20

基金项目: 悬浮玻璃新技术国家重点实验室开放基金(编号: 2018KF04), 西南科技大学龙山学术人才科研支持计划重点支持项目(编号: 18LZX659), 西南科技大学研究生创新基金资助项目(编号: 19ycx0040)。

作者简介: 付海峰(1993—),男,硕士研究生,研究方向: 固体废物利用。E-mail: 827741933@qq.com; 通讯作者: 张明星(1982—),男,博士研究生,副研究员。E-mail: 22142173@qq.com。

0 引言

我国镍铁冶炼合金工艺主要包括高炉冶炼和电炉冶炼^[1]。由于电炉冶炼排放 CO_2 含量较少,符合环保要求,现已成为我国主要镍铁合金冶炼工艺。自2010年以来,国内镍铁产量呈不断增长趋势,特别是近两年产能得到扩充释放后,镍铁产量大幅上升。据统计,2018年镍铁渣的排放量接近一亿t,现已成为我国继铁渣、钢渣、赤泥之后的第四大冶炼渣。然而只有不到25%的镍铁渣得到了有效的利用^[2-3],大部分的电炉镍铁渣都未经处理随意堆放和填埋,严重危害着自然环境,制约着企业的可持续发展。

大量的研究表明^[4-6],电炉镍铁渣综合回收利用的途径有很多。施引珍等人^[7]研究了使用镍铁渣作混凝土集料对其性能的影响;杨全兵等人^[8]将镍铁渣磨细至比表面积 $200 \sim 680 \text{ m}^2/\text{kg}$ ($d_{50} = 15 \sim 55 \mu\text{m}$) 添加水泥混合材,镍渣的活性指数随着比面积的增大而提高,即镍渣需要粉磨到一定细度才能充分发挥活性(即使是比表面积达到 $471 \text{ m}^2/\text{kg}$,其28d活性指数也仅为67.7%);郑鹏^[9]利用镍铁渣在 1600°C 制备粒度为 $30 \sim 90 \mu\text{m}$ 无机矿物纤维;张文军等人^[10]将镍铁渣粉磨细($d_{50} = 10 \sim 20 \mu\text{m}$)与粉煤灰配合制备微晶玻璃;宋美等人^[11]粉磨镍铁渣制作保温砌块等建筑材料;镍铁渣含有的Si、Mg元素可以用于农业,还可以从中提取丰富的Ni、Fe等元素^[12];吴伟等人^[13]指出当电炉镍铁渣粒度 $d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$ 时比表面积 $\geq 700 \text{ m}^2/\text{kg}$,可以高掺量地应用于水泥中。综上所述,电炉镍铁渣的综合利用具有较好的经济效益和社会效益,但存在直接利用价值不高的问题,而将其进行超细化处理后,能有效提高电炉镍铁渣的经济价

值。

电炉镍铁渣虽然有较多的应用领域,却没有较为合适的大宗资源化处理的技术,严重制约着镍铁渣的综合利用。目前对电炉镍铁渣进行超细粉碎加工方法中^[14],主要采用辊磨设备,辊磨将电炉镍铁渣粉碎至比表面积为 $455 \text{ m}^2/\text{kg}$,系统电耗为 48 kWh/t ,辊磨在生产过程中,磨辊、磨盘磨损较大,系统结构复杂,费用高,很难制备 $d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$ 的超细粉体。因此,研发关于大宗电炉镍铁渣的低成本、规模化超细粉碎新技术,是提高电炉镍铁渣综合利用率的重要途径。

从气流粉碎相关设备的试验研究和数值模拟^[15-17]发现,以过热蒸汽作动力的粉磨设备,在降低能耗和加大粉碎强度上是非常显著的。张明星、陈海焱^[18]提出利用工业余热规模化制备超细固体废弃物,该技术的核心设备是蒸汽动能磨,蒸汽动能磨是以工业余热为动力,粉碎能力强,可制备 $d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$ 的超细粉体。此技术解决了工业余热与固体废物的处置问题。

笔者开展了LNGS-80型蒸汽动能磨制备电炉镍铁渣超细粉体的试验,研究了分级机转速对其粒度、比表面积和产量的影响;并估算了工业上LNGS-10T型蒸汽磨生产电炉镍铁渣超细粉体的电耗和成本,为实现大宗电炉镍铁渣的低成本、规模化超细粉碎电炉镍铁渣提供基础参考数据。

1 试验原料与仪器

原料:

试验所用电炉镍铁渣由广东阳江某公司提供,见图1,原料粉磨后利用X荧光分析(型号Axios-荷兰帕纳科)电炉镍铁渣主要化学组分见表1,XRD图谱见图2。

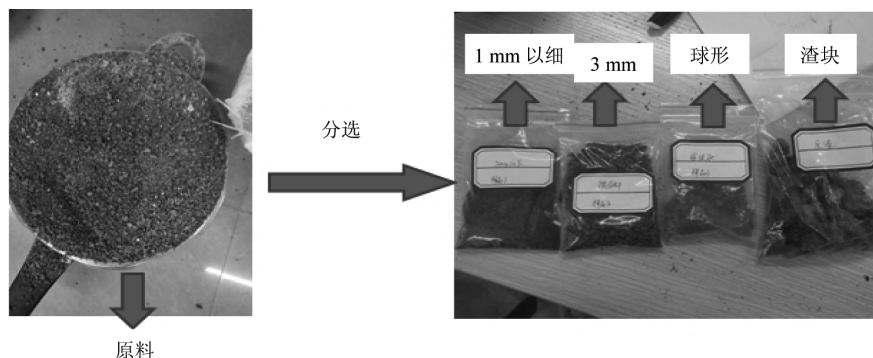


图1 电炉镍铁渣

Fig.1 Electric furnace nickel iron slag

表 1 镍铁渣的主要化学组分
Table 1 Chemical composition of nickel iron slag

SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO	MnO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	NiO
50.94	30.57	11.42	3.36	1.81	0.95	0.66	0.11	0.05	0.04	0.03

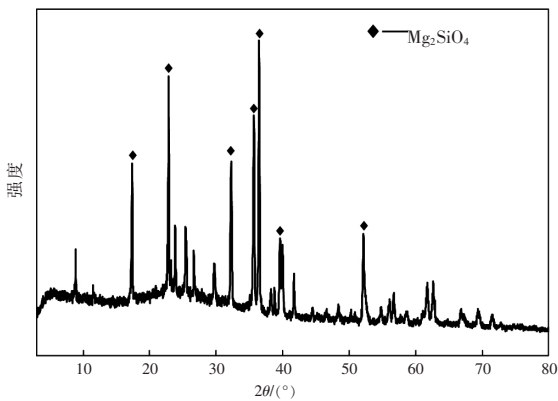


图 2 电炉镍铁渣 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of electric furnace nickel iron slag

由图 1 可见,电炉镍铁渣是经水淬急冷后形成的粒化炉渣,颗粒大小不一,可分为球形颗粒和不规则的块状颗粒,大部分颗粒尺寸为 3 mm 左右。

由表 1 可知,电炉镍铁渣中化学组分复杂,其主要活性成分是 SiO₂,含有少量 Cr₂O₃、Al₂O₃、CaO 等,而 MgO、Fe₂O₃ 含量较高,属于 SiO₂-MgO-Fe₂O₃ 三元

渣系,易磨性较差。电炉镍铁渣主要晶相为镁橄榄石,未见其他不稳定特征峰,说明电炉镍铁渣中 MgO 是以镁橄榄石形式存在。

设备:

绵阳流能粉体设备有限公司生产的 LNSG-80 型蒸汽动能磨成套设备,主要由加料仓、流化床、分级机(Y225M-8 型电机功率 2.2 kW)、引风机(M7-16-N010 型电机功率 4.5 kW)组成。蒸汽动能磨是以过热蒸汽经超音速喷嘴产生超音速气流卷吸周围的颗粒进行加速碰撞、摩擦、剪切,实现对物料的超细粉碎。试验前必须经过空气加热器进行设备预热,待除尘器出口温度趋于 100 ℃,开始加入物料进行粉碎,粉碎后的固硫灰干粉经上升气流带入分级机进行分级,通过调节分级轮的转速,较粗的颗粒受到的离心力大于气流对它产生的阻力而碰撞到壁面滑入粉碎腔继续加速碰撞、摩擦、剪切,粒径符合要求的进入收集系统。收集系统选用脉冲喷吹袋式除尘器收尘。蒸汽动能磨系统如图 3 所示。

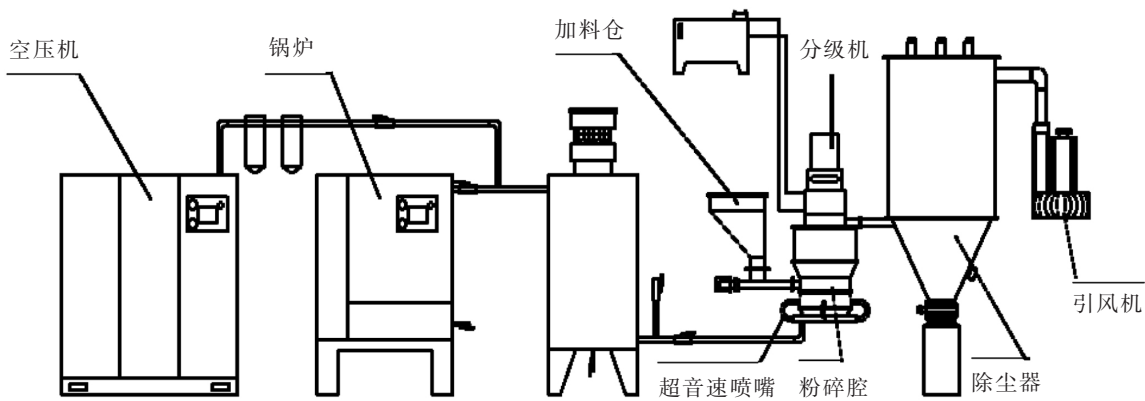


图 3 蒸汽动能磨粉碎分级系统

Fig.3 Diagram of steam power mill pulverizing and grading system

测试仪器:

LS-POP 型激光粒度分析仪,珠海市欧美克仪器有限公司,主要测试粉碎后六种电炉镍铁渣的粒度分布; Ultra55 型高分辨冷场发射扫描电子显微镜(SEM),主要测试颗粒形貌; NOVA3000 自动比表面积测定仪,主要测试超细粉体的比表面积。

2 结果与讨论

2.1 粉碎与分级

本试验以广东某公司电炉镍铁渣为原料,选取蒸汽温度 250 ℃,粉碎压力 0.5 MPa,保持其他条件不变,调节分级机转速频率 5、8、10、15、25、30 Hz

(对应的分级机转速为 300、480、600、900、1 500、1 800 r/min) 制得电炉镍铁渣细粉粒度、比表面积和产量,试验结果如表 2 和图 4 所示。

由表 2 和图 4 可知,电炉镍铁渣的产量、成品粒度 d_{50} (累计体积分数为 50%时对应的颗粒粒径)与分级机转速呈反比关系,而比表面积与分级机转速呈正相关。分级机的转速为 300 r/min 时,电炉镍铁渣成品粒度 $d_{50}=52.7\ \mu\text{m}$,比表面积为 $305\ \text{m}^2/\text{kg}$,产量为 480 kg/h。当分级机的转速从 300 r/min 提高到 1 800 r/min 电炉镍铁渣的粒度 d_{50} 从 $52.7\ \mu\text{m}$ 减小至 2.4

μm ,比表面积从 $305\ \text{m}^2/\text{kg}$ 增大至 $2\ 669\ \text{m}^2/\text{kg}$,产量降低了 93%。利用蒸汽动能磨粉碎电炉镍铁渣制备超细粉体,通过调控分级机的转速达到分级效果,离心分级机的切割粒径公式^[19]为:

$$d_c = \frac{k}{n} \sqrt{\frac{Q}{\rho_s}}$$

式中 d_c 为分级机的切割粒径, μm ; n 为分级轮的旋转速度, r/min; Q 为通过分级轮的气体流量, m^3/min ; ρ_s 为颗粒密度, g/cm^3 ; k 为与分级轮结构尺寸、形状、空气黏度等相关的系数。

表 2 LNGS-80 型蒸汽磨制备电炉镍铁渣超细粉试验结果

Table 2 Experimental results of ultra-fine powder of electric furnace nickel-iron slag prepared by LNGS-80 steam power mill

产品编号	蒸汽温度/ °C	粉碎压力/ /MPa	分级机转速/ (r·min ⁻¹)	成品粒度/ μm			比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
				d_{10}	d_{50}	d_{90}		
1	250	0.5	300	23.2	52.7	163.7	305	480
2	250	0.5	480	5.3	34.9	97.6	406	384
3	250	0.5	600	6.4	28.5	67.7	464	256
4	250	0.5	900	3.8	12.9	33.2	669	167
5	250	0.5	1 500	1.6	4.7	10.6	1 788	80
6	250	0.5	1 800	1.1	2.4	4.5	2 669	35

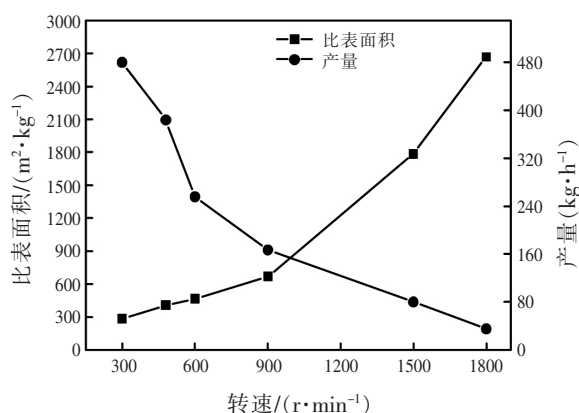


图 4 不同分级机转速下电炉镍铁渣的产量和比表面积
Fig.4 Yield and specific surface area of electric furnace nickel iron slag under different classifier speeds

粉体切割粒径与分级机转速成反比,当流量一定,随着分级机转速的提高,粉体的切割粒径变小^[20]。电炉镍铁渣粉体颗粒受到叶片的强制力作用增强,使得颗粒获得的离心速度变大,较粗的颗粒就会碰撞到壁面,减小了粗颗粒通过分级机的机率,因此电炉镍铁渣的粒度随着分级机转速的增加而减小,产量也随之降低。

2.2 形貌分析

采用 Ultra55 型高分辨冷场发射扫描电子显微

镜观察蒸汽动能磨粉碎分级后的超细电炉镍铁渣的形貌。

从图 5 可以看出,原料经过粉碎后,电炉镍铁渣是一种呈堆积层块状结构,形状不规则,棱角较多。随着粒径的降低,块状结构被打碎,颗粒分布逐渐均匀,在工业上的后期应用中具有更大的接触面积。出现这种现象主要是因为蒸汽磨内部粉碎是颗粒与颗粒之间加速碰撞、摩擦的结果,块状相互碰撞之后会出现多种不规则但逐渐均匀的细小颗粒。

2.3 粒度与能耗分析

为了实现对电炉镍铁渣的大宗超细化处理,根据 LNGS-80 型蒸汽动能磨的配置(总功率 6.7 kW、蒸汽耗量 80 kg/h)和运行参数,可初步评估工业上 LNGS-10T 型蒸汽动能磨(总功率 165 kW,耗气量 10 000 kg/h)生产每吨电炉镍铁渣细粉的成本如表 3 所示(不计人工、原料成本,只包括电价和蒸汽耗量价格,以电价 1.0 元/kWh,蒸汽 120 元/t 计),LNGS-80 和 LNGS-10T 蒸汽耗量之比为: 10 000/80 = 125,可估算出 LNGS-10T 成品粒度的产量,即 LNGS-80 各个粒度下的产量×125=LNGS-10T 各个粒度下的产量。

从表 3 可知,由 LNGS-80 型蒸汽动能磨的运行数据初步估算出 LNGS-10T 大型蒸汽动能磨生产

$d_{50}=52.7\text{ }\mu\text{m}$ 的电炉镍铁渣细粉产量可达 60 t/h ,成本为 27.3 元/t; 制备 $d_{50}=2.4\text{ }\mu\text{m}$,比表面积为 2 669 m^2/kg 的电炉镍铁渣超细粉 ,产量达 5 t/h ,成本为 273 元/t。生产 $d_{50}=12.9\text{ }\mu\text{m}$ 电炉镍铁渣细粉的产量比 $d_{50}=52.7\text{ }\mu\text{m}$ 产量降低了 66% ,电耗增加了 2 倍。石光等人^[14] 在辊磨制备电炉镍铁渣的应用中

指出 辊磨将电炉镍铁渣粉碎至比表面积为 455 m^2/kg 系统电耗为 48 kWh/t ,以电价 1.0 元/kWh 计 ,成本为 48 元/t ,以 LNGS-80 估算 LNGS-10T 蒸汽动能磨制备比表面积为 464 m^2/kg 的电炉镍铁渣细粉 ,系统电耗为 5.2 kWh/t ,相比于辊磨节约电耗量 89% ,节约成本 11%。

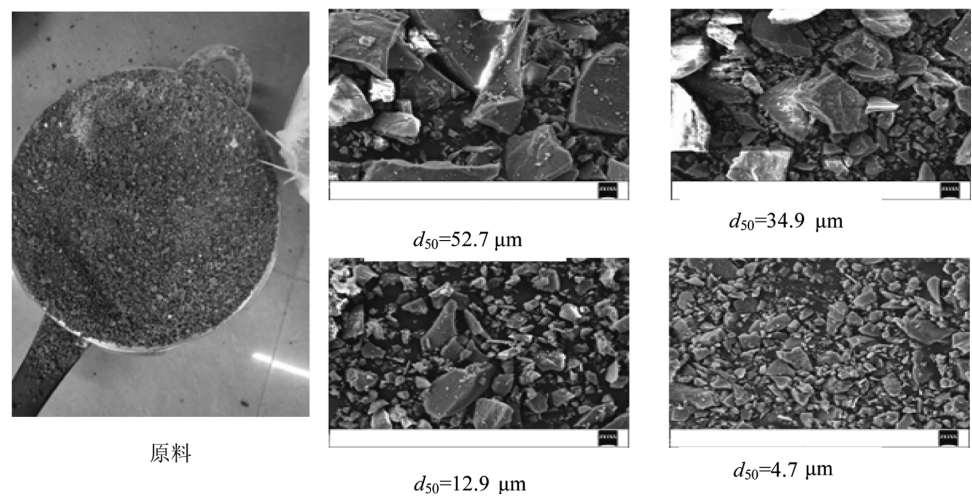


图 5 扫描电镜形貌
Fig.5 SEM images of electric furnace nickel iron slag

表 3 LNGS-10T 型蒸汽动能磨评估产量和成本
Table 3 Yield and cost estimation of LNGS-10T steam power mill

编号	成品粒度/ μm			比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	产量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	单位产量电耗/ ($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	单位产量电价/ ($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$)	单位产量蒸汽 价格/($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$)	能耗/ ($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$)
	d_{10}	d_{50}	d_{90}						
1	23.2	52.7	97.6	305	60	2.8	2.8	20	22.8
2	5.3	34.9	163.7	406	48	3.4	3.4	25	28.4
3	6.4	28.5	67.7	464	32	5.2	5.2	37.5	42.7
4	3.8	12.9	33.2	669	20	8.2	8.2	60	68.2
5	1.6	4.7	10.6	1 788	10	16.5	16.5	120	136.5
6	1.1	2.4	4.5	2 669	5	33	33	240	273

根据目前电炉镍铁渣的研究^[21] 来看 ,电炉镍铁渣比表面积为 300~600 m^2/kg ,可用于水泥、混凝土行业 ,而随着粒度的降低和比表面积的增大 ,用于水泥和各行业的掺量也将会大比例增加 ,具有较好的应用途径 ,能加快解决电炉镍铁渣的囤积问题。

2.4 电炉镍铁渣比表面积与应用展望

电炉镍铁渣超细化后可适用于许多领域 ,不仅可以消耗固废囤积 ,减少环境污染 ,还可以为企业创造巨大利润 ,符合可持续发展理念。电炉镍铁渣不同应用领域下的经济效益见表 4。

2015~2017 年 ,全国水泥产量每年 23 亿 t ^[22] ,如果把电炉镍铁渣掺和生产则每年可以消耗(1.3~2.6) 亿 t 镍渣废弃物。比表面积为 400~600 m^2/kg

的电炉镍铁渣粉作为矿物掺合料用于混凝土中效果最佳 ,其适宜的掺量范围为 10%~20% ,按照全国年混凝土使用量达到 30 亿 t ,电炉镍铁渣年用量则可达(3~7) 亿 t 。电炉镍渣粉磨至比表面积为 540 m^2/kg 以上 ,掺入激发剂制备胶结填充采矿专用胶凝材料 ,可以满足矿山胶结充填采矿要求 ,作为井下填充材料电炉镍铁渣每年利用率 30 万 t 左右。目前我国污染土壤有 1 000 万公顷^[23] ,将 50~100 nm (比表面积 2 000 m^2/kg 以上) 的镍铁渣混合改良剂加入土壤中 ,年使用量 1 亿多 t ,可降解土壤中多氯联苯 ,修复土壤。

从表 4 可以看出 ,当电炉镍铁渣粉磨至 300~600 m^2/kg 时 ,可广泛应用于水泥、混凝土、蒸压砖

领域,该应用领域单价较低,属于低值化利用。而粉磨至 $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ 以上用作微晶玻璃、井下填充料、陶瓷、土壤固定领域,价格较高,属于高值化利用。

表4 电炉镍铁渣不同应用领域下的效益
Table 4 Benefits of different applications for electric furnace nickel-iron slag

应用领域	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	年使用 量/亿 t	预估单价/ (元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	经济效益/ (亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$)
水泥	300~600	1.3~2.6	350	455~910
混凝土	480~600	3~7	270	810~1 890
井下填充料	540 以上	0.003	1 000	3
蒸汽透水砖	100~200	2~5	250	500~1 250
微晶玻璃	600 以上	0.016	2 000	32
陶瓷	800 以上	2~5	1 000	2 000~5 000
土壤修复	2 000 以上	1	1 500	1 500

3 结论

1) 以广东某电炉镍铁渣为原料,采用 LNGS-80

型蒸汽动能磨对电炉镍铁渣粉碎分级制备出粒径 $d_{50} = 2.4 \sim 52.7 \text{ } \mu\text{m}$,比表面积在 $305 \sim 2\,669 \text{ m}^2/\text{kg}$,产量为 $35 \sim 480 \text{ kg/h}$ 的六种超细粉体。经过连续运行试验表明:蒸汽动能磨分级精度高,可控能力强,出料产量稳定。

2) 为了实现对电炉镍铁渣的大宗处理利用,以 LNGS-80 型蒸汽动能磨试验机的运行数据估算工业上 LNGS-10T 型蒸汽动能磨生产能力和成本可得:预估 LNGS-10T 蒸汽动能磨制备 $d_{50} = 28.5 \text{ } \mu\text{m}$,比表面积为 $464 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的电炉镍铁渣细粉,系统电耗为 5.2 kWh/t 相比于辊磨节约电耗量 89% ,节约成本 11% 。

3) 本试验提出可以通过蒸汽动能磨超细粉碎电炉镍铁渣,满足不同利用领域的要求,解决传统辊磨能耗高的问题,从而实现对电炉镍铁渣低成本、规模化制备。

参考文献

- [1] Wu Chunli, Xie Hongbo, Chen Zhe *et al.* Research on the status quo of comprehensive utilization of nickel-iron slag resources [J]. Guangdong Building Materials 2019, 35(6): 77-79.
(吴春丽, 谢红波, 陈哲, 等. 镍铁渣资源化综合利用现状研究 [J]. 广东建材 2019, 35(6): 77-79.)
- [2] Yu Jie, Wang Wanlin, Zhou Yuejun *et al.* The comprehensive recovery and utilization ways of ferronickel slag [C] // Proceedings of the 11th China Steel Annual Conference-S15. Energy and Environmental Protection 2017.
(余杰, 王万林, 周乐君, 等. 浅谈镍铁渣综合回收利用的方法 [C] // 第十一届中国钢铁年会论文集-S15. 能源与环保 2017.)
- [3] Li Xiaoming, Shen Miao, Wang Chong *et al.* Current situation and development of comprehensive utilization of nickel slag [J]. Materials Reports 2017, 31(3): 100-105.
(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(3): 100-105.)
- [4] Shan Changfeng, Wang Jian, Zhen Jinfu *et al.* Study on application of nickel slag in cement concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society 2012, 31(5): 1263-1268.
(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] Liu Liangyou, Liu Yun, Zhang Kang *et al.* Influence of nickel-iron slag used as admixture on cement properties [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society 2016, 35(6): 1705-1710.
(刘梁友, 刘云, 张康, 等. 镍铁渣用作混合材对水泥性能影响的研究 [J]. 硅酸盐通报 2016, 35(6): 1705-1710.)
- [6] Ma Mingsheng, Pei Zhongzhi. Progress and prospect of recycling utilization technology of nickel iron smelting slag [J]. China Non-ferrous Metallurgy 2014, 43(6): 65-70.
(马明生, 裴忠治. 镍铁冶炼渣资源化利用技术进展及展望 [J]. 中国有色冶金 2014, 43(6): 65-70.)
- [7] Shi Yinzen, Qian Zhongwei, Zhou Tingting. Study on application of nickel Iron smelting waste residue in concrete [J]. Jiangxi Building Materials 2015(12): 14-19.
(施引珍, 钱忠伟, 周婷婷. 镍铁冶炼废渣在混凝土中的应用研究 [J]. 江西建材 2015(12): 14-19.)
- [8] Yang Quanbing, Luo Yongbin, Zhang Yaxin *et al.* Grinding characteristics and activity of nickel slag [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization 2013(2): 23-26.
(杨全兵, 罗永斌, 张雅钦, 等. 镍渣的粉磨特性和活性研究 [J]. 粉煤灰综合利用 2013(2): 23-26.)
- [9] Zheng Peng. Study on preparation of inorganic mineral fiber by using nickel iron smelting slag [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy 2015, 31(6): 54-56.

- (郑鹏.镍铁冶炼渣制备无机矿物纤维的研究[J].有色矿冶,2015,31(6):54-56.)
- [10] Zhang Wenjun, Li Yu, Li Hong *et al.* Research of preparing CMSA glass-ceramics with the nickel iron slag and fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(12): 3359-3365.
(张文军,李宇,李宏,等.利用镍铁渣及粉煤灰制备CMSA系微晶玻璃的研究[J].硅酸盐通报,2014,33(12):3359-3365.)
- [11] Song Mei, Zhu Ruojun, Yang Li *et al.* Research on making composite insulation block by ferronickel slag [J]. Brick-Tile, 2016(4): 6-9.
(宋美,朱若君,杨莉,等.对镍铁渣制复合保温砌块的探索研究[J].砖瓦,2016(4):6-9.)
- [12] Zhang Peiyu, Guo Qiang, Song Yunxia *et al.* Separation and leaching of nickel-chromium from laterite nickel ore nickel-iron slag [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(4): 608-614.
(张培育,郭强,宋云霞,等.从红土镍矿镍铁渣中分离浸取镍铬工艺[J].过程工程学报,2013,13(4):608-614.)
- [13] Wu Wei, Xie Gang, Cao Deguang *et al.* Experimental investigation on cement manufactured with large volume of low activity nickel slag [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(4): 1596-1602.
(吴伟,谢刚,曹德光,等.低活性镍渣高掺量制成水泥的试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1596-1602.)
- [14] Shi Guang, Liu Zhen, Nie Wenhai *et al.* Application of grinding roller in the system of nickel powder application powder preparation from nickel-iron slag using electric furnace preparation furnace [J]. Cement Technology, 2014(4): 37-40.
(石光,刘箴,聂文海,等.辊磨在电炉镍铁渣制备镍铁微粉系统中的应用[J].水泥技术,2014(4):37-40.)
- [15] Lin Longyuan, Chen Haiyan, Xu Hailun *et al.* Preparation of ultra-fine fly ash by using low-grade superheated steam from power plant [J]. China Powder Science and Technology, 2010, 16(3): 37-39.
(林龙沅,陈海焱,胥海伦,等.应用电厂低品位过热蒸气制备超细粉煤灰[J].中国粉体技术,2010,16(3):37-39.)
- [16] Wang Yaping, Zhu Mucheng, Chen Haiyan *et al.* Numerical simulation of a superheated steam comminution classifier [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(2): 167-170.
(王雅萍,朱目成,陈海焱,等.过热蒸汽气流粉碎分级机的数值模拟[J].机械科学与技术,2009,28(2):167-170.)
- [17] Yuan Shulin, Chen Haiyan. Numerical simulation of fluid bed jet mill under different working media [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(6): 1004-1008.
(袁书林,陈海焱.不同工质下流化床气流粉碎机流场数值模拟[J].化工进展,2010,29(6):1004-1008.)
- [18] Zhang M, Chen H. Steam jet mill—a prospective solution to industrial exhaust steam and solid waste [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2018, 25(18): 1-13.
- [19] Yang Junrui, Xu Hailun, Chen Haiyan. Numerical simulation and application research of new circular compound nozzle [J]. China Powder Science and Technology, 2009, 15(4): 11-14.
(杨军瑞,胥海伦,陈海焱.新型环形复合喷嘴的数值模拟分析与研究[J].中国粉体技术,2009,15(4):11-14.)
- [20] Chen Haiyan, Li Xianyin. Research on horizontal turbine classifier [J]. Mining & Processing Equipment, 1996(12): 42-44.
(陈海焱,李显寅.卧式涡轮分级机的研究[J].矿山机械,1996(12):42-44.)
- [21] Song Liuqing, Wang Feng, Chai Xingteng *et al.* Research on the performance of nickel-iron slag as cement mixture [J]. Cement Technology, 2016(4): 34-37.
(宋留庆,王峰,柴星腾,等.镍铁渣粉用作水泥混合材的性能研究[J].水泥技术,2016(4):34-37.)
- [22] Du Genjie. The advantages of using industrial solid waste to prepare ceramic materials are obvious [N/OL]. China Building Materials News, 2018-05-04.
(杜根杰.利用工业固废制备陶瓷材料优势明显[N/OL].中国建材报,2018-05-04.)
- [23] Cong Xin, Zhu Hanlu, Mei Aoxue *et al.* On the competitive reduction features of the seven polychlorinated biphenyls in the soil via the nickel-iron bimetal [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 716-720.
(丛鑫,朱含露,梅傲雪,等.土壤中7种多氯联苯在镍铁双金属作用下的竞争还原特性[J].安全与环境学报,2018,18(2):716-720.)