弱磁性铁矿石干式制粉试验研究①

张志荣，陈毅琳，高泽宾
（甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司，甘肃 嘉峪关 735100）

摘　要：采用高压辊磨机对镜铁山弱磁性铁矿进行磁化焙烧前干式制粉。结果表明，相对湿式制粉，采用干式制粉工艺可降低生产成本和能耗；高压辊磨挤压压力对料饼形状和后续打散有直接影响；与单次挤压相比，多次挤压的主机电耗明显降低；工作压力 4 MPa，粉料−0.074 mm 粒级占 53%左右时，主机电耗为 6.74 kWh/t，循环负荷约 330%，满足后续焙烧粒度的要求。

关键词：弱磁性铁矿；高压辊磨；干式制粉；电耗；循环负荷；悬浮磁化焙烧
中图分类号：TD92　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.014
文章编号：0253-6099(2025)06-0083-04

Experimental Study on Powder Preparation with Weakly Magnetic Iron Ore by Dry Milling

ZHANG Zhirong, CHEN Yilin, GAO Zebin
(*Gansu Jiu Steel Group Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Jiayuguan* 735100, *Gansu*, *China*)

Abstract: A high-pressure grinding roll (HPGR) was adopted for dry milling of the weakly magnetic iron ore from Jingtieshan prior to magnetizing roasting. The results indicate that compared to wet milling, the dry milling process can reduce production costs and energy consumption. The extrusion pressure of the HPGR exerts a direct impact on the shape of the obtained cake and the subsequent breaking process. In contrast to single extrusion, multiple extrusions lead to a significant reduction in power consumption of the main machine. With the pressure of 4 MPa, the final powder with approximately 53% of passing size of −0.074 mm will require the main machine with power consumption of 6.74 kWh/t, and a circulating load of about 330%. It can meet the requirement of particle size for the subsequent roasting process.

Key words: weakly magnetic iron ore; high-pressure grinding roll (HPGR); dry milling; power consumption; circulating load; suspension magnetizing roasting

甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司选矿厂主要处理镜铁山弱磁性铁矿石。近些年，悬浮磁化焙烧工艺解决了该类型复杂难选氧化铁矿石资源高效利用难题，为国内同类型矿山资源高效开发利用提供了范例[1-2]。

悬浮磁化焙烧要求铁矿石在适宜的粒度和水分条件下进行焙烧。酒钢选矿厂悬浮炉给料−0.074 mm 粒级占比 50%~60%，最大粒径小于 1 mm。悬浮磁化焙烧前湿式制粉经高压辊磨、球磨机湿式磨矿-分级、浓缩、加压盘式过滤等流程完成[3]。现有悬浮磁化焙烧前湿式制粉工艺流程见图 1。

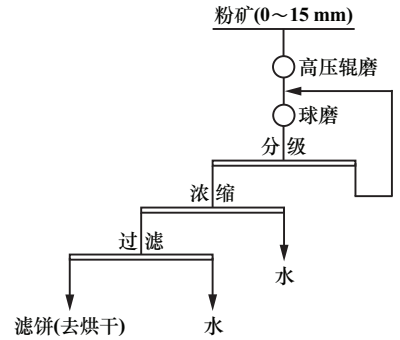


图 1　悬浮磁化焙烧前湿式制粉工艺流程

Fig. 1　Process flowchart of wet milling before suspension magnetizing roasting

① **收稿日期**：2025-06-12
基金项目：甘肃省科技计划资助项目(24RCKA005)
作者简介：张志荣(1971—)，男，陕西人，硕士，正高级工程师，主要从事难选铁矿工艺研究和选矿工程技术应用。E-mail：zhangzhirong@jiugang.com

湿式制粉工艺成熟,但存在流程长、能耗高、投资大、占地多、生产成本高等问题。镜铁山原矿水分含量(质量分数,下同)约1.7%,将此干矿配水调浆进行湿式磨矿分级,适宜粒级的矿粉脱水后还需耗费热能和电能使其变干,打散后再高温焙烧,物料历经“干→湿→干”的过程。通过能耗测算,铁矿粉由湿变干仅热能消耗就达0.2 GJ/t以上。从工艺需求来看,开发高效节能的干式制粉工艺是悬浮磁化焙烧技术向更绿色、低碳发展的趋势和方向[4-5]。干式制粉同湿式制粉相比,简化了制粉工艺,可大幅度降低项目投资、生产成本和能耗,对企业提高效益、减少碳排放有现实意义。本文采用高压辊磨机对镜铁山弱磁性铁矿进行磁化焙烧前干式制粉,并进行稳定试验,探讨磁化焙烧前干式制粉的可行性。

1 矿石性质、中试流程和设备

1.1 矿石性质

取镜铁山桦树沟和黑沟矿铁矿石各5 t,按1∶1混匀、破碎到所需试验粒度,进行干式制粉试验。原矿水分含量1.6%。原矿中有用金属矿物为镜(赤)铁矿、菱铁矿、褐铁矿,脉石矿物为碧玉、石英、铁白云石、重晶石和千枚岩(微细粒石英、绿泥石、绢云母等矿物的混合物)。将原料破碎到15 mm以下,进行粒度分布分析,结果见表1。

表1 原料粒度分布分析结果

Table 3 Particle size distribution of raw materials

粒级/mm	产率/%	负累计产率/%
-15.0+10.0	19.39	100.00
-10.0+7.0	16.61	80.61
-7.0+5.0	11.89	64.00
-5.0+3.0	13.24	52.11
-3.0+1.0	15.01	38.87
-1.0+0.5	9.44	23.86
-0.5+0.2	7.25	14.42
-0.2+0.125	2.95	7.17
-0.125+0.08	2.45	4.22
-0.08	1.77	1.77

从表1可知,镜铁山原矿破碎到15 mm以下时,入炉合格粒级(-0.5 mm粒级)产率为14.42%,超过了10%,有必要对原料先分级再给入高压辊磨机。

1.2 中试流程及设备

干式制粉工艺流程见图2。试验设备包括高压辊磨机(Φ400 mm×100 mm)、半工业V形选粉机(以下简称V选)、半工业动态选粉机(以下简称动选)、旋风筒、收尘器及系统风机等。制粉流程为:物料给入V选分级后,粗粒级经高压辊磨机挤压后再送至V选分级;细粉由系统风机带入动选分级,动选细粒级物料主要由旋风筒收集,部分超细成品由收尘器收集,动选粗粉则返回高压辊磨机仓,经高压辊磨机再次辊压后返回V选。

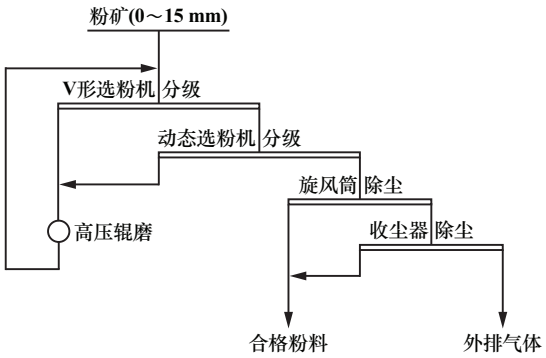


图2 铁矿石干式制粉工艺流程

Fig. 2 Process flowchart of preparing iron ore powder by dry milling

2 条件试验和稳定试验

2.1 条件试验

2.1.1 单次高压辊磨压力条件试验

取样300 kg,分成3组,分别在工作压力3、4、5 MPa(对应投影压力3 000、4 000、5 000 kN/m^2),辊面线速度0.46 m/s条件下进行单次高压辊磨挤压试验,对比产品粒度分布情况,考察不同压力条件下的辊压效果。单次高压辊磨压力试验结果如表2~3所示。

表2 单次高压辊磨压力试验结果

Table 2 Pressure tests for HPGR with a single extrusion

工作压力/MPa	动辊定辊功率和/kW	料饼厚度/mm	料饼密度/(t·m^{-3})	单位能耗/(kWh·t^{-1})	料饼状态
3	6.77	12.0	2.80	1.22	松散
4	8.66	11.5	2.85	1.60	易打散
5	9.54	11.0	2.91	1.80	紧实

从表2~3可以看出,随着工作压力增加,单次辊磨产品-0.08 mm粒级产率逐渐升高,但增幅趋缓;随着工作压力增加,单位能耗逐渐增大;随着工作压力增加,料饼状态更紧实、更难打散。

2.1.2 多次高压辊磨压力条件试验

取样300 kg,分成3组,分别在工作压力3、4、5 MPa(对应投影压力3 000、4 000、5 000 kN/m^2),辊面线速度0.46 m/s条件下进行多次高压辊磨挤压试验,对比产品粒度分布情况,考察不同压力条件下的辊压效果。多次高压辊磨压力试验结果如表4~5所示。

表 3　不同压力单次高压辊磨产品粒度分布

Table 3　Particle size distribution of products by HPGR with single extrusion under different pressures

粒径/mm	不同压力辊磨产品粒级产率/%		
	3 MPa	4 MPa	5 MPa
+10	4.60	3.13	2.53
−10+7	11.91	8.85	7.58
−7+5	10.98	11.06	11.10
−5+3	12.00	11.56	11.38
−3+1	16.43	17.42	17.84
−1+0.5	11.66	12.65	13.06
−0.5+0.2	9.79	10.71	11.10
−0.2+0.125	3.74	3.78	3.79
−0.125+0.08	3.74	3.78	3.79
−0.08	15.15	17.05	17.84

表 4　多次高压辊磨压力试验结果

Table 4　Pressure tests for HPGR with multiple extrusions

工作压力/MPa	动辊定辊功率和/kW	料饼厚度/mm	料饼密度/(t·m^{-3})	单位能耗/(kWh·t^{-1})	料饼状态
3	4.51	9.2	2.80	1.08	松散
4	5.16	9.0	2.84	1.22	易打散
5	6.46	9.0	2.85	1.49	紧实

表 5　不同压力多次高压辊磨产品粒度分布

Table 5　Particle size distribution of products by HPGR with multiple extrusions under different pressures

粒径/mm	不同压力辊磨产品粒级产率/%		
	3 MPa	4 MPa	5 MPa
+10	1.42	0.21	0.88
−10+7	3.44	3.61	2.65
−7+5	8.89	6.68	6.82
−5+3	13.08	11.03	11.36
−3+1	18.91	19.41	19.19
−1+0.5	14.35	16.54	15.66
−0.5+0.2	12.71	14.63	13.89
−0.2+0.125	4.86	5.09	4.80
−0.125+0.08	5.38	4.35	4.92
−0.08	16.97	18.45	19.82

从表 4~5 可以看出,随着工作压力增加,多次辊压产品−0.08 mm 粒级产率逐级升高,单位能耗逐渐增大。

2.1.3　对比分析

对比表 3 和表 5 数据可见,多次挤压所得产品 3~10 mm 粒级累计产率明显减少,0.2~3 mm 粒级累计产率明显增加,−0.2 mm 粒级产率增加有限。

单次挤压和多次挤压高压辊磨压力试验数据对比结果如表 6 所示。由表 6 可见,随着试验压力增大,挤压产品−0.50 mm 粒级产率和单位能耗均增大;相同条件下,多次挤压可以获得更多的入炉合格粒级产品,单位能耗也更低。

表 6　单次挤压和多次挤压高压辊磨压力试验数据对比

Table 6　Comparison of pressure test data for single and multiple extrusions of HPGR

工作压力/MPa	−0.50 mm 粒级产率/%		单位能耗/(kWh·t^{-1})	
	单次	多次	单次	多次
3	32.42	39.92	1.22	1.08
4	35.32	42.52	1.60	1.22
5	36.52	43.43	1.80	1.49

2.2　铁矿干式制粉稳定试验

在条件试验基础上,进行了连续稳定试验。设定高压辊磨机辊面线速度 0.46 m/s,试验压力 4 MPa,调节合适的 V 选风速、动选转速,使产品细度满足产品要求。试验中保持稳定喂料。稳定试验结果见表 7。

表 7　铁矿干式制粉稳定试验结果

Table 7　Stability test results of preparing iron ore powder by dry milling

参数	结果
试验时长/min	51.12
产品质量/kg	841
产品细度(−0.074 mm 粒级含量)/%	53.2
料饼厚度/mm	9
料饼密度/(t·m^{-3})	2.85
动辊平均功率/kW	3.47
定辊平均功率/kW	3.18
计算台时产量/(t·h^{-1})	0.987
计算主机通过量/(t·h^{-1})	4.25
计算单位主机电耗/(kWh·t^{-1})	6.74
计算循环负荷/%	330

由表 7 可知,高压辊磨机两辊功率大部分时间分布在 3.0~4.0 kW 之间,运行较为平稳。通过对试验过程中两辊功率的统计数据进行计算,得到铁矿石辊压试验定辊平均功率为 3.18 kW,动辊平均功率为 3.47 kW。成品−0.074 mm 粒级占比 53.2%,符合产品要求。试验时长 51.12 min,得到产品 841 kg,计算得:台时产量 0.987 t/h,试验过程中料饼厚度 9 mm,密度约 2.85 t/m^3,主机通过量 4.25 t/h;用合计功率比台时产量得到主机电耗约 6.74 kWh/t;用主机通过量与台时产量可以算得终粉磨循环负荷约 330%。

辊压终粉磨流程在水泥行业应用得非常成熟。相同的试验工艺流程,以 0.125 mm 作为终粉控制粒度,水泥生料辊压终粉磨循环负荷为 400%~1 000%不等。表明酒钢铁矿石采用干式制粉的循环负荷较低,能耗也低。

3 结语

1）与湿式制粉工艺相比，干式制粉简化了工艺流程，可大幅降低项目投资、生产成本和能耗；悬浮磁化焙烧前的干式制粉是绿色、低碳工艺。

2）干式制粉工艺中，高压辊磨工作压力是关键参数，它对料饼形状和紧实状态有直接影响；与单次挤压相比，多次挤压主机电耗明显降低。

3）铁矿石干式制粉稳定试验结果表明，工作压力4 MPa，主机电耗约6.74 kWh/t，循环负荷约330%。

参考文献(References)：

[1] 唐晓玲，陈毅琳，韩跃新，等. 酒钢粉矿悬浮磁化焙烧扩大试验研究[J]. 金属矿山，2019(2)：29-33.
TANG Xiaoling，CHEN Yilin，HAN Yuexin，et al. Expansion experimental study for suspension magnetization roasting in Jiugang powder ore[J]. Metal Mine，2019(2)：29-33.

[2] 魏霞，王星亮. 某企业粉矿悬浮磁化焙烧经济效益分析[J]. 矿业工程，2021，19(5)：25-27.
WEI Xia，WANG Xingliang. Economic benefit analysis of suspended magnetization roasting of fine ore in a certain enterprise[J]. Mining Engineering，2021，19(5)：25-27.

[3] 王晓奇，姜晖. 酒钢悬浮磁化焙烧技术配套工艺及设施浅析[J]. 甘肃冶金，2024，46(1)：11-14.
WANG Xiaoqi，JIANG Hui. Analysis of supporting technology and facilities of suspension magnetization roasting technology in Jiusteel[J]. Gansu Metallurgy，2024，46(1)：11-14.

[4] 王景玉，张珂，胡沿东，等. 高压辊磨—干式分级—弱磁选集成系统工艺技术概述[J]. 金属矿山，2016(6)：101-106.
WANG Jingyu，ZHANG Ke，HU Yandong，et al. Overview on high pressure grinding roll-dry classification-low intenity magnetic separation integration system technology[J]. Metal Mine，2016(6)：101-106.

[5] 张珂，周伟，胡沿东，等. 干式粉磨分选集成系统及其可行性分析[C]//2016(第七届)中国矿业科技大会，2016：288-291.
ZHANG Ke，ZHOU Wei，HU Yandong，et al. Dry grinding and sorting integrated system and its feasibility analysis[C]//2016 (7th China Mining Science and Technology Conference)，2016：288-291.

引用本文：张志荣，陈毅琳，高泽宾. 弱磁性铁矿石干式制粉试验研究[J]. 矿冶工程，2025，45(6)：83-86.
ZHANG Zhirong，CHEN Yilin，GAO Zebin. Experimental study on powder preparation with weakly magnetic iron ore by dry milling[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(6)：83-86.

(上接第82页)

[4] ROBBEN C，WOTRUBA H. Sensor-based ore sorting technology in mining：Past，present，and future[J]. Minerals，2019，9(9)：523.

[5] 费泽通，袁致涛，孟庆有. 新疆某钛铁矿重选粗精矿工艺矿物学及分选可行性研究[J]. 矿冶工程，2025，45(1)：61-64.
FEI Zetong，YUAN Zhitao，MENG Qingyou. Process mineralogy and separation feasibility of rough concentrate from gravity separation of ilmenite ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(1)：61-64.

[6] 张倩，陈辰，王文才，等. X射线分选机预选钍矿石的试验研究[J]. 矿冶，2021，30(4)：20-25.
ZHANG Qian，CHEN Chen，WANG Wencai，et al. Experimental study on pre-enrichment of thorium minerals by an X-ray sorter[J]. Mining and Metallurgy，2021，30(4)：20-25.

[7] 何从行，欧也斐，颜顺德. 康家湾铅锌金银矿预选抛废工艺研究及应用[J]. 矿冶工程，2022，42(3)：67-69.
HE Conghang，OU Yefei，YAN Shunde. Pre-concentration process for waste rock discarding in beneficiation of lead-zinc-gold-silver ore in Kangjiawan[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(3)：67-69.

[8] 罗仙平，宁湘菡，王涛，等. 智能分拣选矿技术的发展及其应用[J]. 金属矿山，2019(7)：113-117.
LUO Xianping，NING Xianghan，WANG Tao，et al. Development and application of intelligent picking technology[J]. Metal Mine，2019(7)：113-117.

引用本文：王慎正，潘晓光，康穗，等. 基于X射线分选高效回收白云鄂博稀土矿中的稀土和铁[J]. 矿冶工程，2025，45(6)：78-82.
WANG Shenzheng，PAN Xiaoguang，KANG Sui，et al. Efficient recovery of rare earth and iron from Bayan Obo rare earth ore based on XRF sorting[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(6)：78-82.