

梅山铁矿铁精矿含硅偏高原因初析与降硅对策^①

张祖刚, 钱新宇, 于翔州, 许继龙, 张登锋

(宝武资源南京宝地梅山产城发展有限公司矿业分公司, 江苏 南京 210041)

摘要: 针对梅山铁矿生产现场铁精矿中 SiO_2 品位超过 6.0% 的问题, 结合不同精矿产品的镜下检测结果, 开展降低弱磁选粗选磁场强度和新增强磁选扫选精矿再磨再选的流程试验研究, 探究其对铁精矿 TFe 品位和杂质 SiO_2 含量的影响。结果表明, 流程改造后, 弱磁选总精矿产率为 52.21%, TFe 和 SiO_2 品位分别为 63.57% 和 3.37%, TFe 和 SiO_2 回收率分别为 72.79% 和 12.94%; 强磁选总精矿产率为 17.51%, TFe 和 SiO_2 品位分别为 44.79% 和 9.07%, TFe 和 SiO_2 回收率分别为 17.20% 和 11.67%; 总精矿产率为 69.72%, TFe 和 SiO_2 品位分别为 58.85% 和 4.80%, TFe 和 SiO_2 回收率分别为 89.98% 和 24.61%。新流程有效降低了梅山铁矿总铁精矿中 SiO_2 品位。

关键词: 工艺流程; 强磁选; 弱磁选; 磁铁矿; 提铁降硅; 磁场强度; 再磨再选

中图分类号: TD92 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.018

文章编号: 0253-6099(2025)05-0104-04

Preliminary Analysis of Causes of Higher Silicon Content in Iron Concentrate from Meishan Iron Mine and Countermeasures of Silicon Reduction

ZHANG Zugang, QIAN Xinyu, YU Xiangzhou, XU Jilong, ZHANG Dengfeng

(Mining Branch of Nanjing Baodi Meishan Industry and City Development Co., Ltd., Baowu Resources Co., Ltd., Nanjing 210041, Jiangsu, China)

Abstract: In Meishan Iron Mine, the iron concentrate produced on the site has SiO_2 grade more than 6.0%. Aiming at this problem, an experimental study was carried out based on the microscopic identification of different concentrate products by using a new process flow, in which the magnetic field intensity of low-intensity magnetic separation (LIMS) was reduced for roughing, and a process of regrinding and re-separation was added for the scavenging concentrate by high-intensity magnetic separation (HIMS). The effects of those technical transformation on the TFe grade of iron concentrate and the content of impurity SiO_2 therein were explored. The results show that after such technical transformation, the LIMS can produce a concentrate grading 63.57% TFe and 3.37% SiO_2 with corresponding recoveries of 72.79% and 12.94%, with a yield of 52.21%; while the HIMS can produce a concentrate grading 44.79% TFe and 9.07% SiO_2 with corresponding recoveries of 17.20% and 11.67%, with a yield of 17.51%. This new flowchart can produce the concentrate grading 58.85% TFe and 4.80% SiO_2 at corresponding recoveries of 89.98% and 24.61%, with a total yield of 69.72%. It is shown the SiO_2 content in the total concentrate of Meishan Mine can be greatly reduced.

Key words: process flow; high-intensity magnetic separation (HIMS); low-intensity magnetic separation (LIMS); magnetite; iron improvement and silica reduction; magnetic field intensity; regrinding and re-separation

梅山铁矿选矿厂提铁降杂现采用磨矿(阶磨阶选, 两段闭路磨矿, 磨矿细度-0.075 mm 粒级占 65% 左右)-浮硫-弱磁选(一粗一扫)-强磁选(一粗一扫)工艺流程, 将弱磁选粗选、弱磁选扫选、强磁选粗选、强磁选扫选 4 种精矿合并为选矿厂最终铁精矿^[1-2]。随着矿

石开采向井下深部推进, 矿石中铁矿物的嵌布粒度变细、磁铁矿含量(质量分数, 下同)降低、杂质 SiO_2 含量升高, 导致铁精矿中 SiO_2 含量长期超过 6.0%。 SiO_2 含量偏高会使炉渣变稠, 对高炉冶炼不利, 需加入大量石灰, 进而增加渣量和焦炭消耗量^[3-6]。本文通过调整

① 收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 张祖刚(1970—), 男, 四川绵阳人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事难选铁矿选矿技术研究、尾矿资源综合利用和选矿生产技术管理。E-mail: 469122729@qq.com

弱磁选粗选、扫选工艺参数,优化设备技术参数,进行强磁选扫选精矿再磨再选等方法,提高铁精矿 TFe 品位和降低杂质 SiO₂ 含量,以期为梅山铁矿提铁降硅提供依据。

1 铁精矿产品分析

1.1 化学物相分析

对现场弱磁选总精矿、强磁选粗选精矿和强磁选扫选精矿产品进行了铁的化学物相分析,结果如表 1 所示。由表 1 可知:弱磁选总精矿中铁以磁铁矿为主,同时有较多的假象赤铁矿和赤铁矿,其他形式分布的铁很少;强磁选粗选精矿中铁主要为赤铁矿,同时回收了部分菱铁矿(碳酸铁)和比磁化系数高的含铁硅酸盐矿物,磁铁矿中铁分布很少,说明大部分磁铁矿已在弱磁选中得到了回收;强磁选扫选精矿中铁以赤铁矿为主,还有很多铁分布在碳酸盐中,说明菱铁矿的比磁化系数较低且低于部分含铁硅酸盐的比磁化系数,有较多菱铁矿是在扫选作业中进入了精矿。

表 1 现场铁精矿产品铁物相分析结果

Table 1 Iron phase analysis for on-site iron concentrate products

铁物相	弱磁选总精矿		强磁选粗选精矿		强磁选扫选精矿	
	含量/%	分布率/%	含量/%	分布率/%	含量/%	分布率/%
磁铁矿	39.78	63.86	3.30	6.70	2.55	6.51
假象赤铁矿	6.37	10.23	2.13	4.32	0.77	1.97
赤铁矿	13.70	21.99	35.98	73.03	23.34	59.59
碳酸铁	2.13	3.42	6.14	12.46	11.40	29.10
硫化铁	0.15	0.24	0.10	0.20	0.29	0.74
硅酸铁	0.16	0.26	1.62	3.29	0.82	2.09
合计	62.29	100.00	49.27	100.00	39.17	100.00

1.2 镜下检测

1.2.1 弱磁选总精矿

弱磁选总精矿粒度总体在 0.25 mm 以下,铁矿物含量在 90% 左右,其中以磁铁矿为主,含量约 57%,其余为赤铁矿和假象赤铁矿及很少量的菱铁矿。磁铁矿呈粒状、不规则粒状,大部分呈单体或富连生体产出,部分与赤铁矿连生形成混合铁矿物颗粒进入弱磁选总精矿。细粒磁铁矿常有磁团聚现象,絮团中夹杂少量微粒脉石。赤铁矿、假象赤铁矿常与磁铁矿连生,部分呈单颗粒或连生体。铁矿物中单体及富连生体总量占 92% 左右,少量呈贫连生体状态存在。脉石矿物主要为方解石、白云石,其次是石英及硅酸盐矿物,总量约 10%。大部分脉石与铁矿物不同程度地连生,单体脉石多以微细粒状夹杂进入弱磁选总精矿,通过进一步细磨精选提高铁品位的潜力不大,但弱磁选低浓度入

选可减少磁团聚夹杂的微粒脉石,实现提铁降硅。

1.2.2 强磁选粗选精矿

强磁选粗选精矿粒度比弱磁选总精矿粒度略粗,有少量 0.3 mm 颗粒,铁矿物含量在 75% 左右,其中以赤铁矿为主,含量约 58%,其余为菱铁矿及磁铁矿、褐铁矿。赤铁矿形态变化较大,多为不规则粒状,部分呈微细的树枝状、裂隙充填状、弥散状。赤铁矿中单体及富连生体总量约 85%,大部分形态较好的粒状赤铁矿呈单体或富连生体产出,形态较复杂的细小赤铁矿常与脉石呈紧密嵌布的连生体。脉石矿物含量约 25%,主要为方解石、白云石,其次是石英及硅酸盐矿物等。大部分脉石与铁矿物呈不同程度的连生,约有 1/3 的脉石呈单体状态。呈连生状态的脉石常与赤铁矿有较复杂的嵌连关系,即使细磨也难以充分分离,脉石矿物含量偏高,脉石中铁白云石及含铁硅酸盐与赤铁矿磁性相当,强磁选难以分离。

1.2.3 强磁选扫选精矿

强磁选扫选精矿粒度比强磁选粗选精矿粒度粗,有较多 0.3 mm 以上的颗粒,铁矿物含量仅 60% 左右,其中以赤铁矿为主,含量约 35%,其余为菱铁矿(含量约 20%)和少量磁铁矿。赤铁矿多为不规则粒状,部分为裂隙充填状、微细粒弥散状。赤铁矿中单体及富连生体总量约 60%,有 40% 的铁矿物不同程度地与脉石及菱铁矿连生,且连生关系较为复杂。磁铁矿大多与赤铁矿和脉石连生,很少有单体。菱铁矿多以集合体出现,其中常夹杂脉石。脉石矿物含量约 40%,主要为方解石、白云石,其次为石英及硅酸盐矿物。半数以上的脉石与铁矿物呈不同程度的连生,常与赤铁矿及菱铁矿有较复杂的嵌连关系;少部分脉石呈单体状态,其中多有 0.05 mm 以下的微细粒。该扫选精矿中铁矿物主要为赤铁矿和菱铁矿,脉石矿物多,加之菱铁矿含铁较低,使得扫选精矿品位较低,需要进一步去除脉石矿物。部分赤铁矿、菱铁矿粒度细小,与脉石紧密嵌布,分离难度较大,需要磨矿解离。

2 梅山铁矿弱磁选系统改造与对比考察

由铁精矿产品化学分析以及弱磁选精矿镜下检测结果可知,通过降低弱磁选分选浓度和改变弱磁选磁场梯度可以有效降低磁性夹杂,提高弱磁选精矿 TFe 品位并降低杂质 SiO₂ 含量。2023 年 4 月,梅山铁矿对弱磁选粗选磁选机进行改造,磁场强度由原来的 159.15 kA/m 调整为 95.49 kA/m,弱磁选扫选磁场强度保持不变(238.73 kA/m)。2023 年 4 月 10 日,对弱磁选系统改造前后各作业进行局部流程考查。

2.1 弱磁选系统流程

弱磁选系统流程如图1所示。

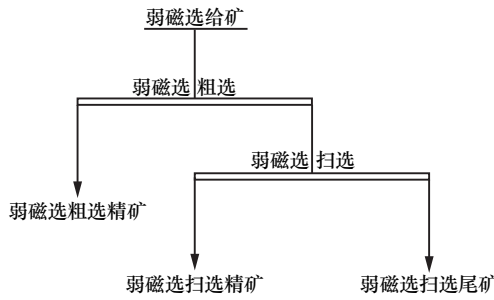


图1 弱磁选系统流程

Fig.1 Flowchart of low-intensity magnetic separation system

2.2 弱磁选系统改造前后指标对比分析

对弱磁选系统改造前后各产品指标进行了对比,结果见表2。改造前弱磁选总精矿产率为49.07%, TFe品位61.96%、回收率68.00%,杂质SiO₂含量4.44%、回收率15.86%。改造后弱磁选总精矿产率为45.62%, TFe品位63.57%、回收率64.86%,杂质SiO₂含量3.34%、回收率10.80%。

对改造前后弱磁选粗选精矿进行了筛分粒度分

表2 弱磁选系统改造前后各产品指标对比

Table 2 Indicators of product from LIMS system before and after technical transformation

项目	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	SiO ₂	TFe	SiO ₂
改造前	弱磁选粗选精矿	47.81	62.13	4.34	66.14	15.11
	弱磁选粗选尾矿	52.19	28.75	22.33	33.56	84.89
	弱磁选扫选精矿	1.25	55.56	8.15	1.56	0.74
	弱磁选扫选尾矿	50.93	28.09	22.68	32.00	84.14
	弱磁选总精矿	49.07	61.96	4.44	68.00	15.86
	弱磁给矿	100.00	44.71	14.11	100.00	100.00
改造后	弱磁选粗选精矿	20.99	63.68	3.31	29.90	4.92
	弱磁选粗选尾矿	79.01	39.67	16.98	70.10	95.08
	弱磁选扫选精矿	24.63	63.47	3.37	34.96	5.88
	弱磁选扫选尾矿	54.38	28.89	23.15	35.14	89.20
	弱磁选总精矿	45.62	63.57	3.34	64.86	10.80
	弱磁给矿	100.00	44.71	14.11	100.00	100.00

析,结果见表3。改造前后,影响弱磁选粗选精矿 TFe品位和杂质SiO₂含量的均为+0.15 mm 粒级产品。改造前,该粒级 TFe品位仅49.20%, SiO₂品位13.90%、分布率达42.96%。改造后,该粒级 TFe品位仅45.81%, SiO₂品位17.38%、分布率27.57%。

表3 改造前后弱磁选粗选精矿筛分粒度分析结果

Table 3 Sieving analysis of roughing concentrate from LIMS system before and after technical transformation

项目	粒级/mm	产率%		TFe品位%		SiO ₂ 品位%		TFe分布率%		SiO ₂ 分布率%	
		个别	累计	个别	累计	个别	累计	个别	累计	个别	累计
改造前	+0.15	13.40	100.00	49.20	62.13	13.90	4.34	10.61	100.00	42.96	100.00
	-0.15+0.074	36.00	86.60	63.10	64.13	3.73	2.86	36.56	89.39	30.98	57.04
	-0.074+0.046	16.90	50.60	65.61	64.87	2.13	2.23	17.85	52.83	8.30	26.06
	-0.046+0.037	7.40	33.70	64.87	64.50	2.2	2.29	7.72	34.98	3.75	17.76
	-0.037	26.30	26.30	64.39	64.39	2.31	2.31	27.26	27.26	14.01	14.01
	合计	100.00		62.13		4.34		100.00		100.00	
改造后	+0.15	5.25	100.00	45.81	63.68	17.38	3.31	3.78	100.00	27.57	100.00
	-0.15+0.074	25.81	94.75	62.97	64.67	3.93	2.53	25.52	96.22	30.64	72.43
	-0.074+0.046	21.20	68.94	65.72	65.31	2.03	2.01	21.88	72.70	13.00	41.79
	-0.046+0.037	8.60	47.74	64.96	65.13	2.07	2.00	8.77	48.82	5.38	28.79
	-0.037	39.14	39.14	65.17	65.17	1.98	1.98	40.05	40.05	23.41	23.41
	合计	100.00	/	63.68	/	3.31	/	100.00	/	100.00	/

对流程改造前后弱磁选粗选精矿、粗选尾矿、扫选精矿、扫选尾矿各元素品位进行对比,结果见表4。由表4可知,改造后,弱磁选粗选精矿 TFe品位提高1.55个百分点,杂质SiO₂含量降低1.03个百分点,杂质S、P含量均有不同程度降低;弱磁选扫选精矿 TFe品位提高7.91个百分点,杂质SiO₂含量降低4.78个百分点,杂质S、P均有不同程度降低。改造前后弱磁选扫选尾矿中 mFe品位没有明显变化。

流程改造后,弱磁选总精矿 TFe品位提高1.61个百分点,杂质SiO₂含量降低1.10个百分点,说明流程改造后,有效降低了弱磁选的磁性夹杂;流程改造后弱磁选总精矿产率降低3.45个百分点, TFe回收率降低3.14个百分点,杂质SiO₂回收率降低5.06个百分点;结合流程改造前后弱磁选扫选尾矿 mFe没有明显变化,表明流程改造后弱磁选总精矿产率和回收率下降均为磁性夹杂所致。

表 4 弱磁选系统改造前后各产品品位对比
Table 4 Grades of products from LIMS system before and after technical transformation

产品名称	条件	品位%				
		TFe	mFe	SiO ₂	S	P
弱磁选粗选精矿	改造后	63.68	/	3.31	0.172	0.070
	改造前	62.13	/	4.34	0.224	0.082
	差值	1.55	/	-1.03	-0.052	-0.012
弱磁选粗选尾矿	改造后	39.67	12.875	16.48	/	/
	改造前	28.75	2.317	23.90	/	/
	差值	10.92	10.558	-7.42	/	/
弱磁选扫选精矿	改造后	63.47	/	3.37	0.163	0.068
	改造前	55.56	/	8.15	0.370	0.129
	差值	7.91	/	-4.78	-0.207	-0.061
弱磁选扫选尾矿	改造后	28.89	1.752	23.15	/	/
	改造前	28.09	1.796	22.68	/	/
	差值	0.80	-0.044	0.47	/	/

表 5 强磁选扫选精矿再磨再选流程试验结果
Table 5 Testing results of regrinding and re-separation of scavenging concentrate by HIMS

产品名称	产率/%	品位%		回收率%	
		TFe	SiO ₂	TFe	SiO ₂
弱磁选总精矿 (弱磁选精矿 1+2)	52.21	63.57	3.37	72.79	12.94
强磁选总精矿 (强磁选精矿 1+2)	17.51	44.79	9.07	17.20	11.67
总精矿	69.72	58.85	4.80	89.98	24.61
隔粗产品	10.31	17.10	35.43	3.87	26.85
强磁选尾矿 (强磁选尾矿 1+2)	19.97	14.03	33.07	6.15	48.54
总尾矿	30.28	15.08	33.88	10.02	75.39
给矿	100.00	45.59	13.61	100.00	100.00

3 强磁选扫选精矿单独再磨再选试验研究

3.1 强磁选扫选精矿单独再磨再选试验结果

为探索降低总精矿中 SiO₂ 含量的可能性,在弱磁选改造后,对 SiO₂ 含量高的强磁选扫选精矿进行单独再磨再选,在提高铁精矿 TFe 品位的同时降低精矿中 SiO₂ 的含量,试验流程见图 2,结果见表 5。弱磁选总精矿产率为 52.21%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为 63.57% 和 3.37%,TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 72.79% 和 12.94%;强

磁选总精矿产率为 17.51%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为 44.79% 和 9.07%,TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 17.20% 和 11.67%;总精矿产率为 69.72%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为 58.85% 和 4.80%,TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 89.98% 和 24.61%;总尾矿产率为 30.28%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为 15.08% 和 33.88%,TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 10.02% 和 75.39%;尾矿中+0.25 mm 粒级粗砂产率为 10.31%。

3.2 梅山铁矿铁精矿降硅推荐工艺流程

根据梅山铁矿现场现有设备和试验研究结果,弱磁选粗选磁选机磁场强度降到 95.49 kA/m,并对强磁选扫选精矿单独再磨再选,可达到满意降硅的效果。推荐的工艺流程如图 2 所示。

4 结论

1) 适度降低弱磁选粗选磁场强度和入选浓度可有效降低磁性夹杂,进而降低铁精矿的硅含量。对比试验结果表明,弱磁选粗选精矿 TFe 品位提高 1.55 百分点,杂质 SiO₂ 含量降低 1.03 百分点;弱磁选扫选精矿 TFe 品位提高 7.91 百分点,杂质 SiO₂ 含量降低 4.78 百分点,杂质 S、P 含量均有不同程度降低。

2) 流程改造后,弱磁选总精矿 TFe 品位提高 1.61 百分点,杂质 SiO₂ 含量降低 1.10 百分点,弱磁选总精矿产率降低 3.45 百分点,TFe 回收率降低 3.14 百分点;弱磁选尾矿 mFe 品位没有明显变化,表明改造后弱磁选总精矿产率和回收率下降均为磁性夹杂所致。

3) 降低弱磁选粗选磁场强度并对强磁选扫选精矿进行再磨再选,取得了较好的选别指标:弱磁选总精矿产率为 52.21%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为 63.57% 和 3.37%,TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 72.79% 和 12.94%;强磁选总精矿产率为 17.51%,TFe 和 SiO₂ 品位分别为

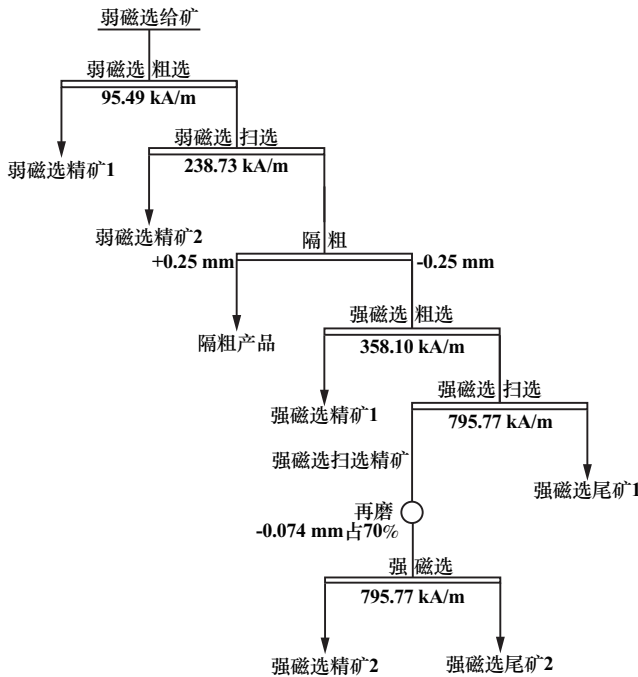


图 2 强磁选扫选精矿再磨再选流程图

Fig.2 Flowchart with regrinding and re-separation process for scavenging concentrate by HIMS

(下转第 112 页)

2) 对 Cu 品位 0.40%、S 品位 2.45% 的原矿,经铜快速浮选-混合浮选-混合粗精矿再磨后铜硫分离工艺,闭路试验获得了 Cu 品位 19.49%、回收率 87.68% 的混合铜精矿和 S 品位 48.65%、回收率 35.11% 的硫精矿,实现了该低品位铜矿中铜的高效富集以及硫的综合回收。

参考文献(References):

- [1] 苏兴才,王浩. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 世界有色金属, 2023(4):92-94.
SU Xingcai, WANG Hao. Analysis of the current situation and potential of copper resources in China [J]. World Nonferrous Metals, 2023(4):92-94.
- [2] 董敬申,刘全军,纪慧超,等. 硫化铜、砷矿物浮选分离的研究进展[J]. 有色金属工程, 2020,10(7):74-81.
DONG Jingshen, LIU Quanjun, JI Huichao, et al. Research progress on flotation separation of copper sulfide and arsenic sulfide minerals[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020,10(7):74-81.
- [3] 刘若曦,张楠. 2024 年中国铜工业供需形势分析[J]. 中国矿业, 2025,34(4):144-152.
LIU Ruoxi, ZHANG Nan. Supply and demand situation of China's copper industry in 2024[J]. China Mining Magazine, 2025,34(4):144-152.
- [4] 曹玉川. 某硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):82-84.
CAO Yuchuan. Experimental study on flotation processing of some copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):82-84.

(上接第 107 页)

44.79%和 9.07%, TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 17.20%和 11.67%;总精矿产率为 69.72%, TFe 和 SiO₂ 品位分别为 58.85%和 4.80%, TFe 和 SiO₂ 回收率分别为 89.98%和 24.61%。

参考文献(References):

- [1] 张祖刚. 梅山混合铁矿石磨矿选别回收试验研究[J]. 宝钢技术, 2019(5):30-34.
ZHANG Zugang. Experimental study on grinding recovery of Meishan mixed iron ore[J]. Baosteel Technology, 2019(5):30-34.
- [2] 张祖刚,曾霄祥. 梅山混合铁矿石磁选梯级回收工艺优化与实践[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5):68-71.
ZHANG Zugang, ZENG Xiaoxiang. Optimization and practice of stepwise recovery technique by magnetic separation for the mixed iron ore from Meishan Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(5):68-71.
- [3] 张祖刚,甘茂武,张登峰. 国内某混合铁矿精矿提质降杂试验研究[J]. 宝钢技术, 2024(6):1-10.
ZHANG Zugang, GAN Maowu, ZHANG Dengfeng. Experimental study on improving the quality and reducing impurities of a certain mixed iron ore concentrate in China [J]. Baosteel Technology, 2024(6):1-10.

- [5] CAI J P, JIA X D, MA Y Y, et al. Separation of copper-sulfur using sodium polyacrylate as pyrite depressant in acidic pulp: Floatability and adsorption studies[J]. Minerals Engineering, 2022,188:107815.
- [6] 王磊,李孟乐,邹玉超,等. 黄铜矿浮选体系晶态/无定形二氧化硅的流变特性与夹带行为[J]. 工程科学学报, 2023,45(8):1272-1280.
WANG Lei, LI Mengle, ZOU Yuchao, et al. Rheological properties and entrainment behavior of quartz/amorphous silica in chalcopyrite flotation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023,45(8):1272-1280.
- [7] 范宛惠,谢蕾,郭泽,等. 某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):185-188.
FAN Wanhui, XIE Lei, GUO Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfur copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.
- [8] 曾维能,任浏祎,曹雨琪,等. 黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离行为及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6):30-35.
ZENG Weineng, REN Liuyi, CAO Yuqi, et al. Study on mechanism of action of xanthate in flotation separation of chalcopyrite and pyrrhotite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(6):30-35.
- [9] 毕云霄,余攀,丁湛,等. 黄铁矿浮选抑制剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(4):157-166.
BI Yunxiao, YU Pan, DING Zhan, et al. The development of research on the pyrite flotation depressants[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(4):157-166.

引用本文:吕兵超. 低品位硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):108-112.

LYU Bingchao. Experimental study on flotation of low-grade copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):108-112.

- [4] 张祖刚,成磊,周润,等. 梅山铁矿 20~2 mm 磨前预选工艺现状分析及优化研究[J]. 现代矿业, 2022,38(7):185-188.
ZHANG Zugang, CHENG Lei, ZHOU Run, et al. Analysis and optimization of 20~2 mm preconcentration process before grinding in Meishan iron mine[J]. Modern Mining, 2022,38(7):185-188.
- [5] 张祖刚. 外磁系与内磁系永磁筒式磁选机对比研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):96-100.
ZHANG Zugang. Comparative study on permanent magnetic drum separators with external or internal magnetic systems [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):96-100.
- [6] 张祖刚,许继龙,王秋林. 墨西哥某含硫铁矿石提质降杂选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):64-66.
ZHANG Zugang, XU Jilong, WANG Qiulin. Upgrading concentrate from mineral processing of Mexican sulfur-bearing iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):64-66.

引用本文:张祖刚,钱新宇,于翔州,等. 梅山铁矿铁精矿含硅偏高原因初析与降硅对策[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):104-107.

ZHANG Zugang, QIAN Xinyu, YU Xiangzhou, et al. Preliminary analysis of causes of higher silicon content in iron concentrate from Meishan Iron Mine and countermeasures of silicon reduction [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):104-107.