



某印度铁矿粉湿式磨矿—磁选提质工艺试验

徐梦杰¹, 谢思珺², 潘建², 杨聪聪²

(1. 中钢设备有限公司, 北京 100080; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为进一步拓宽球团原料来源、提高球团品质, 本文针对铁品位为 62.42%、SiO₂ 质量分数为 3.30% 的某印度铁矿粉, 在对其理化性质和矿相特征分析的基础上, 开展采用不同物理选矿方法时铁组分回收工艺参数优化研究, 并确定适宜的磨选提质流程。结果表明, 该铁矿粉的最佳提质工艺流程: 先对原矿进行水洗和筛分得到粗、细两个粒级 (>0.1、<0.1 mm) 矿粉, 其中粗粒级采用湿式磨矿—高梯度磁选的“一粗一精”流程, 细粒级则采用高梯度磁选“一粗一扫”流程; 选别得到的 2 种铁精矿产品 (1[#]、2[#]) 中, 1[#] 精矿产品的铁品位为 65.97%、产率为 23.29%、作业回收率为 24.62%, 2[#] 精矿产品的铁品位为 62.06%、产率为 72.89%、作业回收率为 72.52%, 全流程铁回收率达到 97.14%。普通铁矿粉分选出的一定比例高品位铁精矿有望用于直接还原铁 (DRI) 生产, 除铁精矿外的其他部分仍可作为普通球团和烧结原料, 实现无尾高效利用。

关键词: 印度铁矿粉; 选矿; 提质; 工艺矿物学; 高梯度磁选

中图分类号: TF521

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0103-11

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.047

Test on an Indian iron ore fine wet grinding-magnetic separation and upgrading process

XU Mengjie¹, XIE Sijun², PAN Jian², YANG Congcong²

(1. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to further broaden the source of pellet raw materials and improve the quality of pellets, based on the analysis of the physicochemical properties and ore phase characteristics of an Indian iron ore fine with an iron ore grade of 62.42% and a SiO₂ mass fraction of 3.30%, the optimization of the process parameters of iron component recovery under different physical beneficiation methods is carried out, and the appropriate grinding and upgrading process is determined. The results show that the optimal upgrading process of the iron ore fine is as follows: first, the raw ore is washed and screened to obtain two coarse and fine particle sizes (>0.1, <0.1 mm) ore fine, among which, the coarse particle size adopts the “one coarse and one fine” process of wet grinding and high gradient magnetic separation, and the fine particle size adopts the “one coarse and one scan” process of high gradient magnetic separation. Among the two kinds of iron ore concentrate products (1[#] and 2[#]), the iron grade of 1[#] concentrate is 65.97%, the yield is 23.29%, and the operation recovery rate is 24.62%, and the iron grade of 2[#] concentrate is 62.06%, the yield is 72.89%, the operation recovery rate is 72.52%, and the recovery rate of the whole process iron is 97.14%. The separation of a certain proportion of high-grade iron ore concentrate from ordinary iron ore fine is expected to be used for direct reduced iron (DRI) production, and other parts except iron concentrate can still be used as ordinary pellets and sintering raw materials, achieving tailless and efficient utilization.

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2025-01-10

基金项目: 湖南省重点研发计划资助项目(2022SK2075)

作者简介: 徐梦杰(1993—)男, 工程师, 从事球团工艺技术与设备方面的研究工作。

Key words: Indian iron ore fine; beneficiation; upgrading; process mineralogy; high gradient magnetic separation

钢铁工业是现代工业之基,钢铁资源是国家战略资源之脊^[1]。据统计,21世纪以来,我国生铁和钢的全球产量位居世界前列。2024年,我国粗钢产量为10.05亿吨,占全球总产量的53.3%,稳居世界第一^[2]。但钢铁行业的发展往往伴随着高污染、高能耗,在“双碳”战略目标的推动下,企业常使用球团矿作为高炉的原料以降低能源消耗以及污染^[3-4]。随着球团矿在高炉炉料中的占比不断升高,钢铁工业对优质铁精粉的需求也在持续增加^[5]。同时,高品位铁矿资源的减少使低品位难选铁矿的高效利用得到了关注。

我国长期开采的铁矿大多数以“贫、细、杂”为主,导致选矿成本高,而国外铁矿石具有品位高以及储量丰富等特点,使得我国铁矿粉的对对外依存度一直保持在80%左右^[6-7]。相比于磁铁精矿,赤-褐铁矿用于球团生产时具有明显的成本优势,这使得赤-褐铁矿成为球团矿的重要原料来源,尤其是近年来,中低品位赤-褐铁矿在球团工艺中的应用得到了研究人员的广泛关注^[8-12]。为确保球团铁品位和品质,对中低品位赤-褐铁矿进行高效分选得到更高品位的球团精粉是重要的研究方向之一,也是提高其使用比例、改善球团质量的有效措施之一。对此,国内外学者针对低品位赤铁矿及赤-褐铁矿等难选资源开展了大量的研究,主要包括强磁选、重选、浮选、磁化焙烧及其联合工艺。王普蓉等^[13]、王荣林等^[14]等研究了铁品位在50%以下赤铁矿的磨选过程,发现以赤铁矿为主的铁矿较难磨,铁矿物易泥化,适宜采用单一强磁选的方式进行提质;祁忠旭等^[15]等探究了赤铁矿在磁-重-浮联合选矿试验下精矿品质对铁品位的影响,发现将赤铁矿的铁品位由18.86%提高至60%以上,选矿回收率为72.59%,但提质过程的工艺较复杂,成本较高;朱海龙等^[16]研究了全铁品位为39.66%的赤-褐铁矿,发现采用阶段磨矿-弱磁选-强磁选-浮

选脱硫-阴离子反浮选的工艺流程能够获得铁品位为63.32%、铁回收率为70.38%的铁精矿。

本文结合生产所需,以某印度赤-褐铁矿粉为研究对象,采用常规物理选矿工艺制备一部分满足直接还原铁生产的高品位原料,提高球团品质和铁矿粉的附加值;从原料性能着手,在单一提质工艺变量条件下研究磨矿、洗矿、磁选的最优方案,比较磨矿-磁选、磨矿-磁选-浮选、磨矿-磁选-重选以及洗矿-磨矿-磁选这四种组合方案的磨选效果,并推荐最佳提质工艺,为同类型铁矿的提质和高效利用提供重要的借鉴。

1 试验原料与方法

1.1 铁矿粉的基本性质

1.1.1 化学成分

该铁矿粉的化学成分如表1所示。由表1可知,原矿的铁品位为62.42%,有害杂质硫、磷含量较低,但杂质中 Al_2O_3 质量分数较高,达到2.92%; $SiO_2 + Al_2O_3$ 的质量分数为6.22%,显著高于直接还原对铁矿的成分要求。高硅、铝含量会使得球团的还原粉化变严重,使球团在还原过程中异常膨胀^[17]。

1.1.2 不同粒级的铁品位

对印度铁矿粉进行粒度分析,确定不同粒度下的铁品位及分布比例,结果如表2所示。由表2可知,不同粒级矿粉的铁品位随着粒度变小呈现下降的趋势,粗粒级矿粉的铁品位较高,细粒级矿粉的铁品位较低。说明该铁矿粉中有用矿物主要分布在粗粒级矿粉中,脉石矿物多分布于细粒级矿粉中。

1.1.3 物相分析

将该铁矿粉破碎至0~2 mm后,对矿石进行筛分,将其分成1~2、0.5~1、0.125~0.5、0.074~0.125 mm和<0.074 mm共5个粒级,分别将上述不同粒级样品磨制成光片和薄片后,在

表1 印度铁矿粉的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and loss on ignition of Indian iron ore fines

TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O	Na ₂ O	烧损
62.42	3.30	2.92	0.105	0.097	0.025	0.073	0.037	0.026	3.96

显微镜下采用线段法对各种矿物进行含量统计, 同时结合扫描电镜的 EDS 分析以及铁物相分析计算出矿物含量。具体结果如表 3 所示。由表 3 可知: 主要铁矿物赤铁矿、褐铁矿的质量分数分别为 62.15%、32.51%, 硫化物黄铁矿的质量分数为 0.65%; 脉石矿物以含铁黏土和石英为主, 质量分数分别为 2.23% 和 1.28%, 矿物中还有较少

量的水铝氧石和铁白云石等。

该矿粉样品主要为风化壳型碎样, 并含有部分粗粒块状矿石。显微镜下的矿样形貌如图 1 所示。由图 1 可知, 该矿样包含纤维状、网眼状、斑状、片状、条带状、针状、鲕状、浸染状、粒状等结构。结合表 3 可知: 该铁矿粉的主要矿物是赤铁矿与褐铁矿, 其中赤铁矿主要呈纤维状、

表 2 印度铁矿粉粒度与铁品位的关系(质量分数)

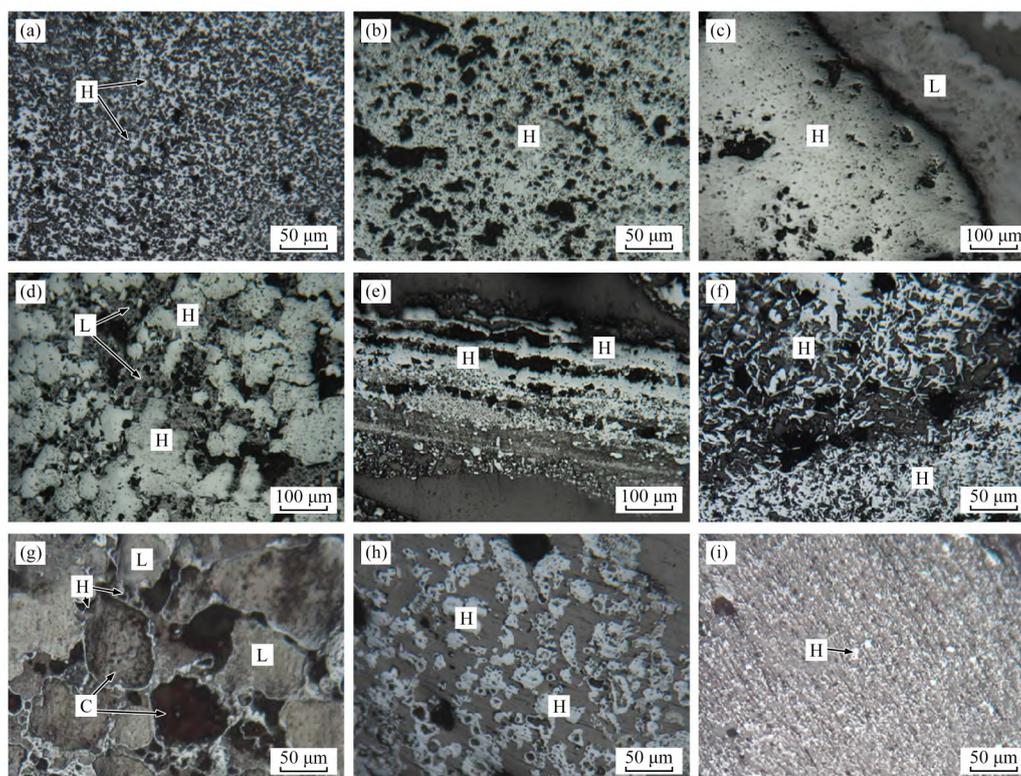
Table 2 The relationship between particle size and iron grade of Indian iron ore fines %

项目	> 8 mm	(5, 8] mm	(3, 5] mm	(2, 3] mm	(1, 2] mm	(0.5, 1] mm	(0.3, 0.5] mm	(0.1, 0.3] mm	(0.074, 0.1] mm	≤0.074 mm
产率	3.29	5.86	14.54	8.95	16.78	10.26	6.32	9.21	1.94	22.85
铁品位	65.53	65.31	64.93	64.82	64.58	64.35	63.97	61.42	59.45	56.64
铁分布率	3.45	6.12	15.12	9.29	17.35	10.57	6.47	9.06	1.85	20.72

表 3 印度铁矿粉矿物含量统计(质量分数)

Table 3 Statistical of mineral content of Indian iron ore fines %

赤铁矿	褐铁矿	黄铁矿	磁铁矿	含铁黏土	石英	水铝氧石	铁白云石	硬水铝石	其他
62.15	32.51	0.65	0.54	2.23	1.28	0.31	0.26	微量	0.06



(a) 纤维状结构; (b) 网眼状结构; (c) 斑状结构; (d) 片状结构; (e) 条带状结构;
(f) 针状结构; (g) 鲕状结构; (h) 浸染状结构; (i) 粒状结构
H—赤铁矿; L—褐铁矿; C—含铁黏土。

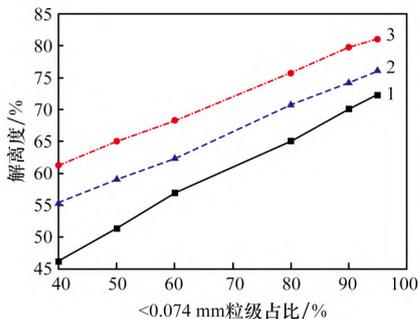
图 1 印度铁矿粉的显微结构及赤铁矿产出样貌

Fig. 1 Microstructure of Indian iron ore fines and occurrence of hematite

不规则状与脉石矿物互嵌，粒度主要分布在 5 ~ 20 μm ；褐铁矿主要呈斑状嵌布，斑晶中包含细粒赤铁矿和脉石矿物，同时斑状褐铁矿常与斑状赤铁矿共生嵌布。

1.1.4 解离度

对印度铁矿粉磨矿细度 <0.074 mm 粒级占比分别为 40%、50%、60%、80%、90%、95% 的 6 种产品，分析其赤铁矿、褐铁矿和脉石矿物的单体解离度，如图 2 所示。由图 2 可知，随着磨矿细度的增加，铁矿物的解离度不断增加，两者呈正相关。当 <0.074 mm 粒级占比为 95% 时，由于赤铁矿主要呈纤维状、不规则状与脉石矿物互嵌，不易分离，赤铁矿和褐铁矿的单体解离度只有 72.24% 和 80.98%，总体上解离效果不太理想。



1—赤铁矿；2—褐铁矿；3—脉石。

图 2 赤铁矿、褐铁矿与脉石在不同磨矿细度下的单体解离度

Fig. 2 Monomer dissociation degree of hematite, limonite and chalcopyrite at different grinding fineness

1.2 研究方法

由印度铁矿粉原矿性质可知，试验回收的主要有用矿物为赤—褐铁矿。赤—褐铁矿属弱磁性矿物，有望通过高梯度强磁选机进行富集。除此之外，利用铁矿物与脉石矿物之间的密度和表面物理化学性质差异，可以使用重选或浮选工艺进行回收。为了提高提质后矿粉的铁品位和回收率，试验主要采用磨矿—磁选、磨矿—磁选—浮选、磨矿—磁选—重选以及洗矿—磨矿—磁选相结合的组合工艺来实现铁硅分离和铁矿物的高效回收。每次试验的矿粉量均为 3 kg。其中，洗矿作业为原矿直接洗矿，其他作业均先把原矿破碎至 0 ~ 2 mm 进行后续选矿试验。通过对比不同试验方案的铁品位以及铁回收率来确定最佳矿粉提质工艺。

1.2.1 洗矿试验

洗矿试验对原矿进行筛分洗矿，是磨矿—磁选前的预处理流程，可以清理附着在铁矿表面的黏土以及脉石，以提高筛上产物的铁品位，同时减少磨矿的能耗。试验设备为高频振动细筛，细筛筛孔尺寸选择 0.1 mm。高频振动细筛的筛分面积为 0.4 m^2 ，转数为 3 000 r/min，振幅为 1.5 mm。

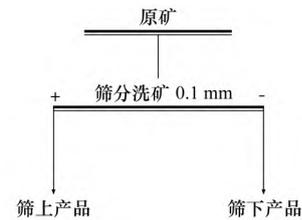


图 3 洗矿试验流程

Fig. 3 Ore washing test flow

1.2.2 磨矿试验

磨选试验的工艺流程：将原矿破碎至 0 ~ 2 mm 后，放置在 $\varnothing 350$ mm \times 160 mm 的锥形球磨机中磨至不同细度，磨矿细度 <0.074 mm 粒级占比分别为 40%、50%、60%、80%、90%、95%；完成磨矿操作后，将研磨完毕的矿粉给入 SLon-750 脉动高梯度强磁选机，在磁场强度为 0.8 T、充填介质为 4 mm 粗棒、冲程和冲次分别为 25 mm 和 200 次/min、转环转速为 2 r/min 的条件下进行磁选，磁选完毕后将矿样分为精矿与尾矿。试验流程如图 4 所示。当进行磁场强度优化时，固定铁矿粉 <0.074 mm 粒级占比大于 50%。

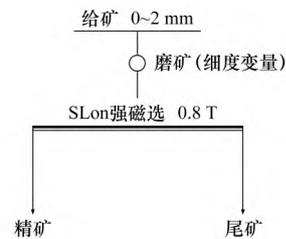


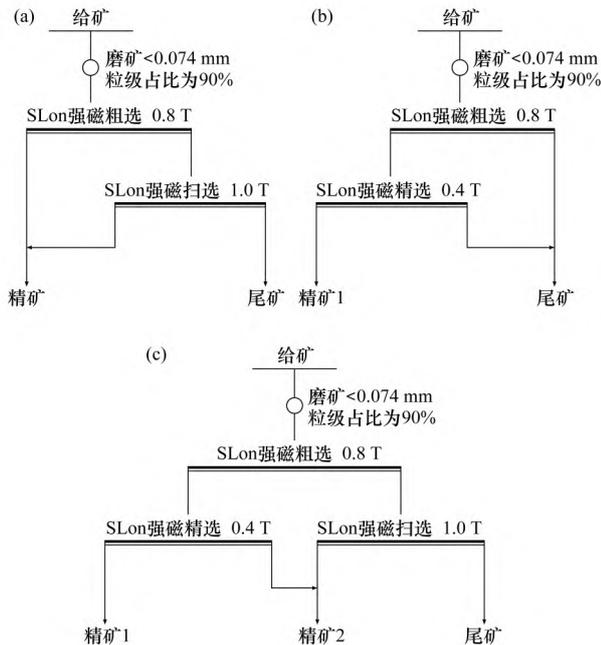
图 4 磨矿试验流程

Fig. 4 Grinding test flow

1.2.3 磨矿—磁选试验

磨矿—磁选试验主要步骤有粗选、精选以及扫选。试验流程：将矿样磨至设定细度后，先进进行粗选，将粗选结束后得到的精矿进行精选得到高品位精矿；将粗选结束得到的尾矿进行扫选以提高铁回收率。强磁扫选、强磁精选以及强磁选试验流程如图 5 所示。因试验所使用的铁矿粉为

印度铁矿粉,其主要成分为赤—褐铁矿,需要使用强磁才能选出,故使用 SLon 强磁选机作为磁选试验设备。



(a) 强磁扫选; (b) 强磁精选; (c) 强磁选
图5 强磁扫选、强磁精选和强磁选试验流程

Fig. 5 Test process of strong magnetic scavenging, strong magnetic selection and magnetic separation

1.2.4 磨矿—磁选—浮选试验

对强磁精矿进行浮选试验,如图6所示。浮选试验通过改变药剂种类以及药剂用量来比较不同浮选工艺的提质效果。浮选时间为3 min,各种药剂均搅拌2 min,矿浆温度控制在25℃左右,矿浆质量分数为30%左右。

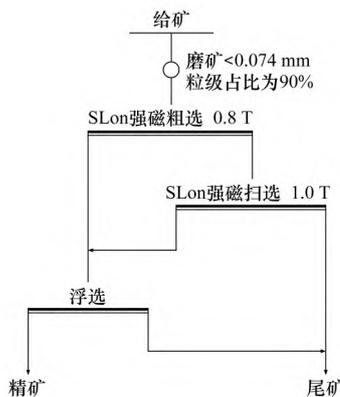


图6 浮选试验流程

Fig. 6 Flotation test flowsheet

1.2.5 磨矿—磁选—重选试验

重选试验采用螺旋溜槽“一粗一精”重选流程,

如图7所示。将前述提到的强磁扫选[图5(a)]工艺中得到的精矿进行重选,形成磨矿—磁选—重选工艺。

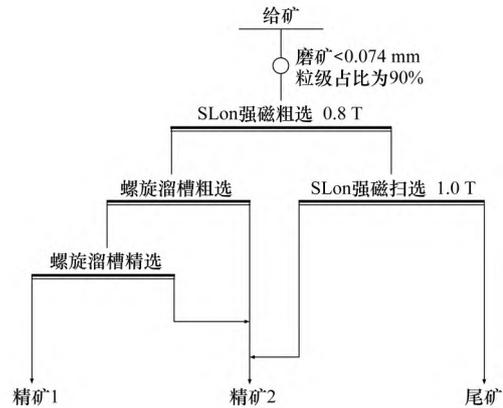


图7 重选试验流程

Fig. 7 Gravity separation test flowsheet

2 结果与讨论

2.1 铁矿粉预选工艺

2.1.1 洗矿工艺

铁矿粉化学成分中含有较高的硅和铝,存在黏土以及脉石。需在磨矿之前对该矿粉进行洗矿,以提高筛上物料的铁品位。试验结果如表4所示。由表4可知,洗矿是较好的预选手段,洗矿后原矿品位可以从62.38%提高到63.62%(此时>0.1 mm 粒级占比超过90%)。

分级效率(E ,%)计算公式:

$$E = \frac{100(\alpha - \theta)(\beta - \alpha)}{\alpha(\beta - \theta)(100 - \alpha)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为给矿中<0.1 mm 粒级质量分数,%; β 为筛下产品中<0.1 mm 粒级质量分数,%; θ 为筛上产品中<0.1 mm 粒级质量分数,%。

表4 筛分洗矿试验结果(质量分数)

Table 4 Test results of screening and washing %

产品名称	产率	铁品位	铁回收率	<0.1 mm 粒级占比	分级效率
筛上产品	80.58	63.62	82.17	6.57	
筛下产品	19.42	57.25	17.83	97.20	78.09
给矿	100.00	62.38	100.00	24.80	

2.1.2 一段磨矿细度

在矿物进行磁选、重选等分选操作之前,需要将铁矿粉磨至合适的粒度,以实现铁矿物单体

解离。将铁矿粉研磨至不同粒度,固定磁场强度为 0.8 T,分析铁精矿与尾矿中铁回收率随磨矿细度的变化趋势,如图 8 所示。由图 8 可知:随着磨矿细度(<0.074mm 粒级占比)的提高,铁回收率下降,说明过细的铁矿在磁选过程中无法被富集,流失到尾矿当中;且磨矿细度越高,磨矿能耗越高。另一方面,由图 2 可知,磨矿细度越高,铁矿物的单体解离度越高,对铁的分选和富集有利;同时,由于经磨选提质后的铁精矿最终将作为球团矿的生产原料,其比表面积适当增加,对造球过程有利。综合分析,建议印度铁矿粉的磨矿细度为 90%。

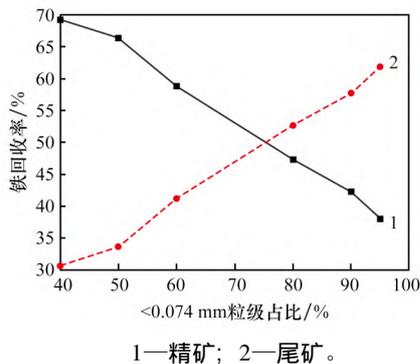


图 8 不同磨矿细度下精矿和尾矿的铁回收率

Fig. 8 Iron recovery rate of concentrate and tailings under different grinding fineness

2.2 不同选矿工艺研究

在磨矿细度为 <0.074 mm 粒级占比为 90% 的条件下,对比湿式磨矿—磁选、湿式磨矿—磁选—浮选、湿式磨矿—磁选—重选以及洗矿—湿式磨矿—磁选相结合的 4 种组合工艺的铁富集与回收效果,确定最合适的印度铁矿粉磨选提质工艺。

2.2.1 强磁粗选、精选以及扫选试验

由于铁矿粉主要成分以赤—褐铁矿为主,磁性不强,故使用强磁进行试验,探讨粗选、精选以及扫选过程中合适的磁场强度。为了探究适宜的磁场强度,将原矿磨至 <0.074 mm 粒级占比为 50%,并设置强磁磁场强度为 0.2、0.4、0.6、0.8 T 和 1.0 T 进行强磁选试验。试验结果如图 9 所示。

由图 9 可见,随着磁场强度的增加,铁精矿回收率升高,铁品位下降,但是在矿粉 <0.074 mm 粒级占比为 50% 的情况下,合格尾矿难以被抛除。考虑到不能阶段抛尾,同时也担心矿粉过磨,选

择将铁矿粉磨至 <0.074 mm 粒级占比为 90% 时进行后续试验。同时,为了保障精矿的产率,减少尾矿,后续将采用粗选磁场强度为 0.8 T、扫选磁场强度为 1.0 T 的条件进行试验。粗选结束之后,将得到的粗选精矿再进行精选,对精选的磁场强度进行优化。由结果可知,随着强磁精选磁场强度的降低,铁品位略有提高,铁回收率下降幅度较大,故选择 0.4 T 作为精选适宜的磁场强度。

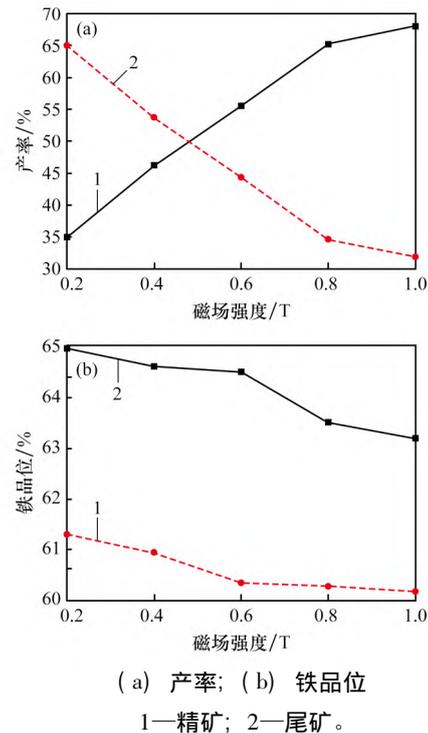


图 9 不同磁场强度下精矿与尾矿的产率以及铁品位的变化

Fig. 9 Variation of yield of concentrate and tailings as well as iron grade under different magnetic field strengths

2.2.2 磨矿—磁选工艺

在铁矿粉磨矿细度 <0.074 mm 粒级占比为 90% 和适宜的磁选强度的条件下,进行 SLon 脉动高梯度强磁扫选、强磁精选、强磁选三种工艺的对比试验。工艺流程如图 5 所示。粗选磁场强度为 0.8 T,精选磁场强度为 0.4 T,扫选磁场强度为 1.0 T。具体试验结果如表 5 所示。由表 5 可见,在不同的磁选工艺条件下,强磁扫选在增加铁品位的同时也增加了铁回收率,经粗选扫选后,精矿的铁回收率能达到 80.31%;而强磁精选流程能够提高精矿的铁品位,原矿的铁品位为 62.42%,

精选后该值提升至 65.05%。因此,为了得到更多、更高品位的铁矿粉,在后续试验中,对磨矿所得的精矿进行强磁精选流程;对于磨矿所得的尾矿,选用强磁扫选流程;在未使用洗矿流程时,采用强磁选流程。

表5 原矿—磨矿—强磁选试验结果(质量分数)

工艺流程	产品名称	产率	铁品位	铁回收率
强磁扫选流程	精矿	41.51	63.83	42.45
	扫精	37.27	63.41	37.86
	尾矿	21.22	57.91	19.69
	给矿	100.00	62.42	100.00
强磁精选流程	精矿	23.85	65.05	24.85
	尾矿	76.15	61.60	75.15
	给矿	100.00	62.42	100.00
强磁选流程	1#精矿	23.85	65.05	24.85
	2#精矿	54.93	63.03	55.46
	尾矿	21.22	57.91	19.69
	原矿	100.00	62.42	100.00

2.2.3 磨矿—磁选—浮选工艺

在确定粗选、精选以及扫选的磁选强度后,根据磁选磨矿工艺对比,可知精选过程能将铁品位提升至 65% 以上,但磁选精选流程对于赤—褐铁矿的回收效率差于磁铁矿,故选用浮选以及重选的方式代替精选工艺。对磨矿后进行强磁粗选得到的精矿进行浮选试验,通过改变药剂种类以

及药剂用量来比较不同浮选工艺的提质效果。试验结果如表 6 所示。由表 6 可见,通过不同药剂种类、药剂用量、流程结构浮选试验,铁精矿品位提高幅度均不大,难以达到 66% 以上的精矿品位,且铁回收率不高,故试验不采用浮选的手段进行选矿。

2.2.4 磨矿—磁选—重选工艺

在选用强磁扫选流程及前述适宜的磁场强度的基础上,考虑是否能通过加入重选来提高精矿的提质效率。与强磁选流程相比,磨矿—磁选—重选工艺流程将磁选中的精选流程改为螺旋溜槽“一粗—精”重选试验,结果如表 7 所示。由表 7 可见,该工艺与强磁选流程对比,所得精矿的铁品位比单纯采用精选要高,达到 67.06% 和 63.08%,说明重选能够改变精矿的品位,但该工艺流程较复杂。

2.2.5 洗矿—磨矿—磁选工艺对比

由于选矿试验不仅要提高铁品位,还需要降低硅、铝以及黏土等杂质,故引入筛分洗矿工艺。通过对不同磁选方式以及处理步骤下筛上、筛下产品的质量,确定最佳的提质工艺。其中,筛分洗矿会在洗矿结束后会形成筛上以及筛下两份产品,这两份产品后续进行不同的磁选工艺。试验结果如表 8 所示。由表 8 可知,最佳的提质工艺为洗矿—磨矿—强磁选工艺(如图 10 所示)。具体流程为将原矿经筛分洗矿后,矿粉被分为筛上产

表6 浮选试验结果(质量分数)

浮选条件	产品名称	产率	铁品位	铁回收率
阳离子反浮选(一粗—精,碳酸钠用量为 1 000 g/t, 淀粉用量为 200 g/t,十二胺用量为 50~100 g/t)	精矿	78.79	64.56	79.60
	尾矿	21.21	61.46	20.40
	给矿	100.00	63.90	100.00
阴离子反浮选(一粗—精,氢氧化钠用量为 1 000 g/t, 氧化钙用量为 400 g/t,淀粉用量为 500 g/t, 油酸钠用量为 300~500 g/t)	精矿	65.66	64.57	66.46
	尾矿	34.34	62.30	33.54
	给矿	100.00	63.79	100.00
酸性正浮选(硫酸用量为 1 250 g/t, 石油磺酸钠用量为 300 g/t)	精矿	70.00	63.90	70.30
	尾矿	30.00	63.00	29.70
	给矿	100.00	63.63	100.00
碱性正浮选(碳酸钠用量为 1 000 g/t, 硅酸钠用量为 600 g/t,油酸钠用量为 400 g/t)	精矿	54.31	64.40	54.75
	尾矿	45.69	63.26	45.25
	给矿	100.00	63.88	100.00

表 7 磨矿—磁选—重选工艺流程及产品质量(质量分数)

Table 7 Grinding-magnetic separation-heavy separation process and product quality table %

产品名称	产率	铁品位	铁回收率
1#精矿	10.82	67.06	11.63
2#精矿	67.96	63.08	68.68
尾矿	21.22	57.91	19.69
原矿	100.00	62.42	100.00

表 8 不同洗矿—磨矿—磁选工艺流程的产品质量对比(质量分数)

Table 8 Comparison table of product quality of different washing-grinding-magnetic separation processes %

工艺流程	产品名称	产率	铁品位	铁回收率
洗矿—磨矿—精选 尾矿强磁扫选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	65.03	62.45	65.10
	尾矿	11.68	54.88	10.28
	原矿	100.00	62.38	100.00
洗矿—磨矿— 强磁选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	72.89	62.06	72.52
	尾矿	3.82	46.49	2.86
	原矿	100.00	62.38	100.00
洗矿—磨矿—筛下 强磁扫选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	66.14	62.56	66.34
	尾矿	10.57	53.36	9.04
	原矿	100.00	62.38	100.00

品和筛下产品,筛上产品进行磨矿—强磁精选,筛下产品进行强磁扫选。

2.2.6 选矿工艺汇总

试验对比磨矿、洗矿、磁选、重选以及浮选等工艺流程,如表 9 所示。对比三个单磁选工艺可知,强磁扫选能提高精矿的铁回收率,强磁精选流程能够提高精矿的铁品位,而强磁选流程综合了两种流程的优势;对比磨矿—磁选、磨矿—磁选—重选和磨矿—磁选—浮选工艺可知,磨矿—磁选工艺更优,该工艺能在低能耗的条件下提高铁品位;除此之外,加入洗矿工艺能够减少磨矿能耗,再调整不同磨矿—磁选步骤可得出铁回收率最高的方法。

2.3 扩大连选试验

对矿样进行直接磨矿和洗矿磨矿选别工艺等多个工艺流程的研究,根据各流程特点,采用原矿—

筛分洗矿(0.1 mm)—筛上产品磨矿(<0.074 mm 粒级占比为 90%)—强磁“一粗—精选”—筛下产品强磁“一粗—扫选”工艺流程进行扩大连选试验,以进一步验证小型试验流程的技术指标和工艺参数。经调试稳定后,共计稳定运转 48 h,取样 24 批。以 95.42 kg/h 的矿量进行连选试验,并对洗矿沉砂、洗矿溢流、球磨分级溢流、1#精矿、2#精矿、尾矿每 0.5 h 取样一次,2 h 样品合并为一批分别送化验分析 TFe 质量分数和磨矿细度。在稳定运转 48 h 后,取全流程试验样品两批,测量每个产品的质量并化验其全铁品位,根据此结果确定连选矿浆流程。试验结果如图 11 所示。

表 9 选矿工艺汇总(质量分数)

Table 9 Summary of beneficiation processes %

工艺流程	产品名称	产率	铁品位	铁回收率
强磁扫选	精矿	41.51	63.83	42.45
	扫精	37.27	63.41	37.86
	尾矿	21.22	57.91	19.69
	给矿	100.00	62.42	100.00
强磁精选	精矿	23.85	65.05	24.85
	尾矿	76.15	61.60	75.15
	给矿	100.00	62.42	100.00
强磁选	1#精矿	23.85	65.05	24.85
	2#精矿	54.93	63.03	55.46
	尾矿	21.22	57.91	19.69
	原矿	100.00	62.42	100.00
磨矿—磁选—重选	1#精矿	10.82	67.06	11.63
	2#精矿	67.96	63.08	68.68
	尾矿	21.22	57.91	19.69
	原矿	100.00	62.42	100.00
洗矿—磨矿—筛上 精选、尾矿强磁扫选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	65.03	62.45	65.10
	尾矿	11.68	54.88	10.28
	原矿	100.00	62.38	100.00
洗矿—磨矿— 强磁选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	72.89	62.06	72.52
	尾矿	3.82	46.49	2.86
	原矿	100.00	62.38	100.00
洗矿—磨矿—筛下 强磁扫选	1#精矿	23.29	65.97	24.62
	2#精矿	66.14	62.56	66.34
	尾矿	10.57	53.36	9.04
	原矿	100.00	62.38	100.00

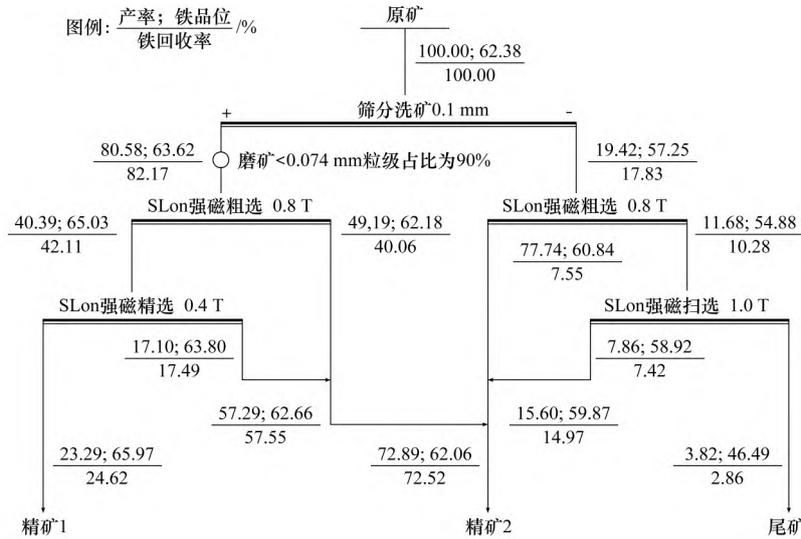


图 10 洗矿—磨矿—强磁选数质量流程

Fig. 10 Washing grinding high intensity magnetic separation quality flow

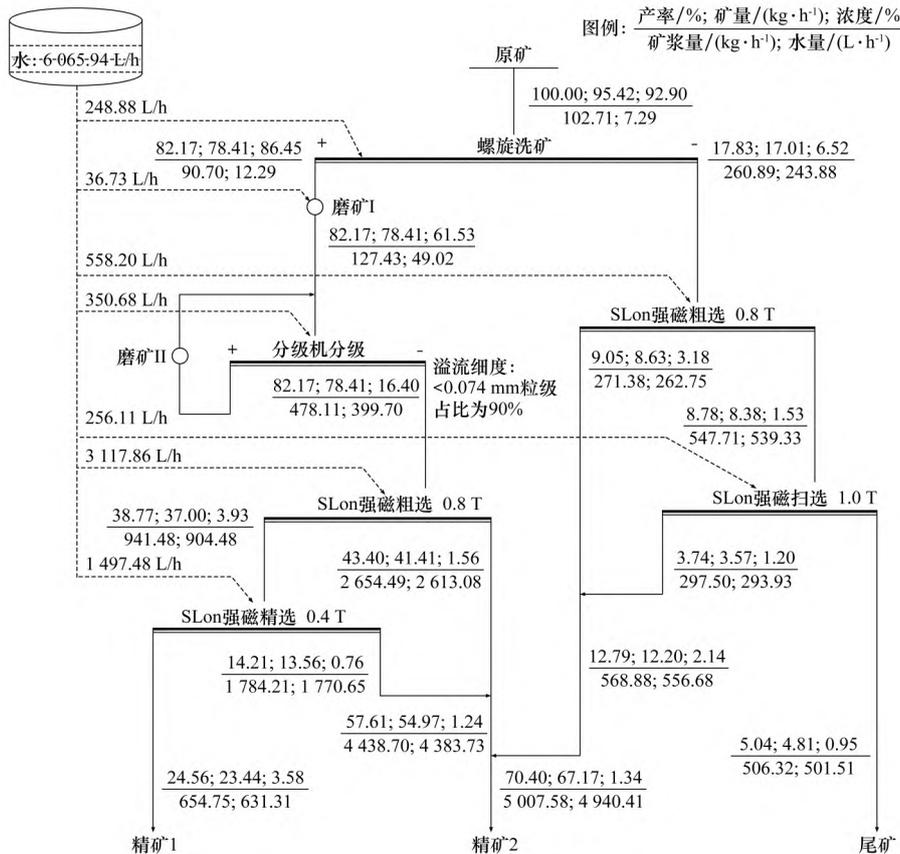


图 11 扩大连选试验矿浆流程

Fig. 11 Expand the experimental ore slurry process for large-scale selection

扩大连选试验最终获得产率为 24.56%、铁品位为 66.12%、SiO₂ 质量分数为 1.22%、Al₂O₃ 质量分数为 1.43%、铁回收率为 26.07% 的 1# 铁精矿和产率为 70.40%、铁品位为 62.13%、SiO₂ 质

量分数为 3.03%、Al₂O₃ 质量分数为 3.06%、铁回收率为 70.19% 的 2# 铁精矿。所获选别指标与小型试验结果接近, 最终选别指标如表 10 所示。

表 10 扩大连选试验结果(质量分数)

Table 10 Results of the expanded re-election test %

产品名称	产率	铁品位	铁回收率	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)
1#精矿	24.56	66.12	26.07	1.22	1.43
2#精矿	70.40	62.13	70.19	3.03	3.06
尾矿	5.04	46.31	3.74	14.85	11.41
原矿	100.00	62.31	100.00	3.18	3.08

3 结论

(1) 印度铁矿粉铁品位为 62.42%，主要矿物组成为赤铁矿和褐铁矿，质量分数分别为 62.15%、32.51%。原矿中的有害杂质硫、磷含量较低，但杂质中硅、铝含量较高，有用矿物的结构复杂、与脉石互嵌且主要分布在粗粒级中。

(2) 印度铁矿粉最佳的提质工艺流程为水洗筛分(0.1 mm)一筛上产品磨矿(<0.074 mm 粒级占比为 90%)一强磁“一粗一精选”一筛下产品强磁“一粗一扫选”，并进行了 48 h 的扩大连选验证试验，获得了两种优质铁精矿产品。其中，1#铁精矿产率为 24.56%、铁品位为 66.12%、SiO₂ 质量分数为 1.22%、Al₂O₃ 质量分数为 1.43%、铁回收率为 26.07%；2#铁精矿产率为 70.40%、铁品位为 62.13%、SiO₂ 质量分数为 3.03%、Al₂O₃ 质量分数为 3.06%、铁回收率为 70.19%。1#铁精矿铁品位高于 66%、(SiO₂ + Al₂O₃) 质量分数小于 3% 有望作为生产直接还原铁的优质原料，除铁精矿外的其他部分仍可作为普通球团和烧结原料，实现无尾高效利用。

参考文献:

- [1] 韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术与展望[J]. 金属矿山, 2024(2): 1-24.
HAN Yuexin, ZHANG Xiaolong, GAO Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024(2): 1-24.
- [2] 罗忠河. 2023 年我国粗钢产量为 10.19 亿吨[N]. 中国冶金报, 2024-01-19(1).
LUO Zhonghe. In 2023, China's crude steel production was 1.019 billion tons[N]. China Metallurgical News, 2024-01-19(1).
- [3] 赵书清, 宋阳, 刘巍, 等. 降低烧结工序能耗的生产实践[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(2): 18-20.
ZHAO Shuqing, SONG Yang, LIU Wei, et al. The production practice of reducing the energy consumption of sintering process[J]. Gansu Metallurgy, 2024, 46(2): 18-20.
- [4] 戚义龙, 黄世来, 余正伟, 等. 持续降低烧结工序能耗的关键协同技术开发与应用[J]. 烧结球团, 2023, 48(4): 110-118; 126.
QI Yilong, HUANG Shilai, YU Zhengwei, et al. Development and application of key synergistic technologies continuously reducing energy consumption in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4): 110-118; 126.
- [5] 朱德庆, 黄铮静, 杨聪聪, 等. GF88 赤铁精矿制备氧化球团的试验研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 61-68.
ZHU Deqing, HUANG Zhengjing, YANG Congcong, et al. Research on production of oxidized pellets from GF88 hematite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(6): 61-68.
- [6] 徐璇. 铁矿砂价格波动对我国进口与海关税收的影响分析[J]. 中国海关, 2023(12): 84-85.
XU Xuan. Analysis of the impact of fluctuations in iron ore prices on China's import and customs taxation[J]. China Customs, 2023(12): 84-85.
- [7] 程少逸, 高正波, 曹建. 我国战略性矿产资源供应安全的挑战与应对[J]. 矿冶, 2022, 31(1): 126-130.
CHENG Shaoyi, GAO Zhengbo, CAO Jian. Challenges and countermeasures on supply security of strategic mineral resources in China[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 126-130.
- [8] 杨聪聪, 曲士娟, 梁海源, 等. 某进口赤-褐铁矿磨矿特性及其氧化球团制备行为[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(9): 1152-1162.
YANG Congcong, QU Shijuan, LIANG Haiyuan, et al. Grinding characteristics of an imported hematite-limonite and its oxidized pellet preparation behavior[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(9): 1152-1162.
- [9] 范晓慧, 刘昌, 陈许玲, 等. 提高赤铁精矿配比对制备铁矿氧化球团的影响[J]. 矿冶工程, 2012, 32(5): 94-97.
FAN Xiaohui, LIU Chang, CHEN Xuling, et al. Effects of hematite concentrate ratio on preparing oxidized pellets[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012,

- 32(5):94-97.
- [10] 张高杰,毕克俊. 河南某赤褐铁矿石选矿工艺比较试验[J]. 现代矿业 2020, 36(7):168-170;203.
ZHANG Gaojie ,BI Kejun. Comparative test of a hematite and limonite ore processing technology in Henan[J]. Modern Mining 2020, 36(7):168-170;203.
- [11] 赵阳,刘泽伟. 新疆某难选赤褐铁矿石物理提纯工艺研究[J]. 现代矿业 2020, 36(1):156-158.
ZHAO Yang ,LIU Zewei. Experimental study on physical mineral processing and purification of hematite and limonite in a place in Xinjiang[J]. Modern Mining , 2020, 36(1):156-158.
- [12] 黄武胜,袁启东,林小凤,等. 国外某赤褐铁矿选矿试验研究[J]. 现代矿业 2021, 37(11):125-129.
HUANG Wusheng ,YUAN Qidong ,LIN Xiaofeng ,et al. Experimental study on beneficiation of a foreign hematite ore [J]. Modern Mining 2021, 37(11):125-129.
- [13] 王普蓉,徐国印. 云南某低品位难选鲕状赤铁矿选矿工艺研究[J]. 矿业研究与开发 2023, 43(6):197-201.
WANG Purong ,XU Guoyin. Study on beneficiation process of a low-grade refractory oolitic hematite ore in Yunnan[J]. Mining Research and Development ,2023 , 43(6):197-201.
- [14] 王荣林,李明军,常鲁平,等. 国外某赤铁矿选矿工艺研究[J]. 现代矿业 2023, 39(1):172-175.
WANG Ronglin ,LI Mingjun ,CHANG Luping ,et al. Study on beneficiation technology of a hematite abroad [J]. Modern Mining 2023, 39(1):172-175.
- [15] 祁忠旭,韩远燕,孙大勇,等. 提高云南某超贫微细赤铁矿选矿回收率的研究[J]. 烧结球团 2020, 45(5):59-62.
QI Zhongxu ,HAN Yuanyan ,SUN Dayong ,et al. Research on increasing the recovery ratio of an ultra-low-grade fine hematite in Yunnan [J]. Sintering and Pelletizing 2020 , 45(5):59-62.
- [16] 朱海龙,张铃,伍红强. 海南某选厂磁-赤褐铁矿选矿工艺试验研究[J]. 现代矿业 2022, 38(7):115-118.
ZHU Hailong , ZHANG Ling , WU Hongqiang. Experimental study on beneficiation process of magnetic-hematite ore dressing in a processing plant in Hainan [J]. Modern Mining 2022, 38(7):115-118.
- [17] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al₂O₃ 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报 2021, 33(10):1095-1108.
PAN Jian ,MA Wenzhuo ,ZHU Deqing ,et al. Effect of Al₂O₃ on sintering ,pelletizing and blast furnace smelting [J]. Journal of Iron and Steel Research 2021, 33(10):1095-1108.

(上接第 102 页)

- [12] 周明顺,王义栋,赵东明,等. 高硫铁精矿配比对球团工艺参数及性能的影响[J]. 钢铁 2018, 53(5):11-17.
ZHOU Mingshun ,WANG Yidong ,ZHAO Dongming , et al. Effects of adding high-sulfur magnetite concentrate on pelletizing parameters and performance [J]. Iron & Steel 2018, 53(5):11-17.
- [13] 王飞,毛瑞,许源,等. 球团链磨机回转窑工艺中氯和硫元素迁移规律[J]. 钢铁研究学报 2022, 34(4):326-333.
WANG Fei ,MAO Rui ,XU Yuan ,et al. Migration rule of chlorine and sulfur in grate-kiln process of pellet production [J]. Journal of Iron and Steel Research 2022 , 34(4):326-333.
- [14] 范建军,杨礼元. 高压辊磨预处理对超细粒度磁铁精矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁 2012, 47(9):19-24.
FAN Jianjun ,YANG Liyuan. Effect of high pressure roll grinding on pellet property of super-fine magnetite concentrate [J]. Iron & Steel 2012, 47(9):19-24.
- [15] 王聪渊,张洪海,李炜玺,等. 唐钢带式焙烧机熔剂性球团矿生产实践[J]. 河南冶金 2023, 31(5):36-40.
WANG Congyuan ,ZHANG Honghai ,LI Weixi ,et al. Production practice of fluxed pellet ore in belt sintering machine of Tangsteel [J]. Henan Metallurgy ,2023 , 31(5):36-40.
- [16] 刘卫星,李杰,杨爱民,等. 碱度对镁质熔剂性球团矿强度的影响机理[J]. 钢铁 2021, 56(1):28-36.
LIU Weixing ,LI Jie ,YANG Aimin ,et al. Influence mechanism of basicity on strength of magnesium fluxed pellets [J]. Iron & Steel 2021, 56(1):28-36.