

半自磨工艺流程与常规破磨工艺流程对比研究^①

王志杰

(攀钢集团矿业有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 介绍了白马铁矿半自磨工艺流程和常规破磨工艺流程, 对比分析了工艺流程、生产指标、设备运行指标、建设投资、生产运行成本等, 结果表明, 半自磨工艺具有流程简单、基建投资低、对矿石适应性较强、排矿粒度细等优点, 但存在设备故障率较高、衬板使用寿命短、设备作业率相对较低、单位生产成本高等缺点。研究结果可供同类矿山建设参考。

关键词: 选矿; 铁矿石; 半自磨; 常规破磨; 磨矿; 设备选型

中图分类号: TD92

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.017

文章编号: 0253-6099(2024)03-0077-05

Comparison Between SAG Mill Grinding Process and Conventional Crushing-Grinding Process

WANG Zhijie

(Pangang Group Mining Industry Co Ltd, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: SAG mill grinding and conventional crushing-grinding processes adopted in Baima Iron Mine are introduced. Based on the detailed comparison of processing flowsheet, production index, equipment operation parameter, construction investment, operation cost, it can be concluded that the SAG milling process has the advantages of simple process, low construction investment, good adaptability to ores and fine grinding fineness, also some disadvantages like high equipment failure rate, short service life for lining plate, relatively low equipment operation rate and high production cost. These results can be referred in the construction of similar mines.

Key words: mineral processing; iron ore; SAG mill grinding; conventional crushing and grinding; grinding; equipment selection

半自磨工艺具有流程短、操作人员少、对矿石处理适应性强等特点。随着大型半自磨设备国产化, 半自磨工艺在矿山的应用越来越普遍。目前国内新建大型铁矿选矿厂中已有太钢袁家村、昆钢大红山等单位采用了半自磨工艺流程。许多新建矿山在前期试验时得出“可以采用半自磨工艺”后, 将面临选择半自磨还是常规三段一闭路破碎-磨矿(简称常规破磨)的难题。太钢袁家村^[1-2]、河北钢铁集团常峪铁矿^[3-4]等大型铁矿选矿厂建设前均对半自磨、常规破磨、常规破磨+高压辊磨超细磨等进行了方案比较, 但都是采用测算和推论等方法进行。本文对比了攀钢集团白马铁矿现有半自磨工艺与常规破磨工艺的生产建设实践, 分析两种工艺流程的优缺点, 以供矿山同行参考。

1 半自磨与常规破磨流程对比

1.1 常规破磨流程

白马铁矿一期设计处理钒钛铁矿石 650 万吨, 生产钒钛铁精矿 233 万吨。白马铁矿一期常规破磨流程及设备配置见图 1。采用美卓公司 C160 颚式破碎机对 0~1000 mm 原矿进行粗破, 粗破产品粒度 0~300 mm; 采用瑞典 SANDVIC 公司 CH880 圆锥破碎机进行中破, 中破产品粒度 0~70 mm; 采用 SANDVIC 公司生产的 H895 圆锥破碎机进行细破, 并与 2YKR3073 振动筛形成闭路, 最终产品粒度 0~12 mm。破碎产品进入一、二段 MQY3.6 m × 6.0 m 溢流型球磨机, 共 4 个系列。这是典型的三段一闭路破碎+两段球磨阶段磨选的常规破磨流程。

① 收稿日期: 2023-12-19

作者简介: 王志杰(1968—), 男, 四川射洪人, 高级工程师, 主要从事选矿技术及管理工作。E-mail: zhijwang@163.com

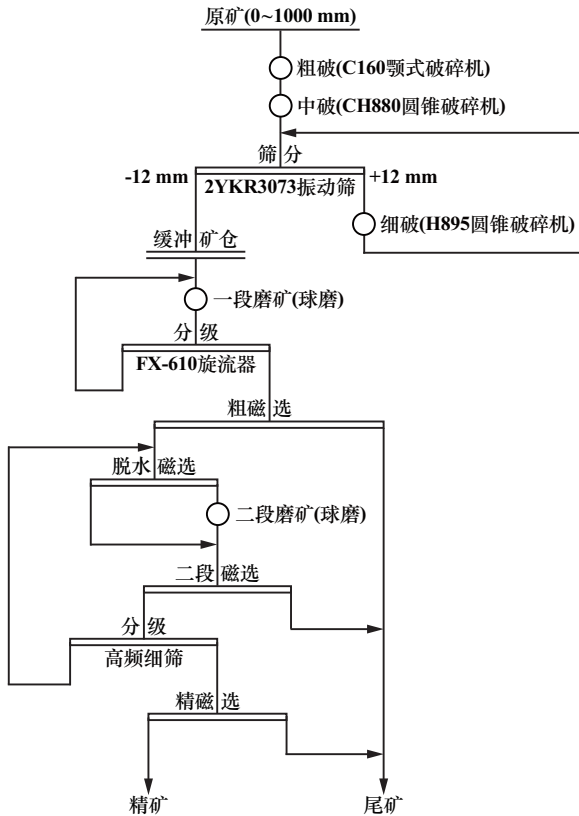


图1 白马铁矿一期常规破磨工艺流程

1.2 半自磨流程

白马铁矿二期共建有3个半自磨系统:田家村采场采用 $\Phi 9.15\text{ m} \times 5.03\text{ m}$ 半自磨,设计年处理矿石500万吨,半自磨系统建在采场附近,半自磨矿浆采用长约6.5 km的管道输送至磨选厂房集中磨矿、选别;及及坪采场设计有2个 $\Phi 7.32\text{ m} \times 4.27\text{ m}$ 半自磨系统,设计年处理矿石各200万吨,其中一个200万吨半自磨系统建在万年沟磨选厂房内,另一个半自磨系统建在及及坪采场附近,半自磨矿浆用长约6.5 km的管道输送至磨选厂房,集中进入磨选厂房二段磨矿和选别系统。二期设计年处理矿石共计900万吨,生产铁精矿278万吨,采用美卓公司C160颚式破碎机粗破,矿石破碎至0~300 mm,采场附近的半自磨系统采用预先大块干式抛尾,给入半自磨机磨矿。半自磨工艺流程见图2。

1.3 半自磨与常规破磨流程对比分析

1) 半自磨流程环保成本依然较大。白马铁矿位于山区,受地形及地质条件限制,位于采场附近的 $\Phi 9.15\text{ m} \times 5.03\text{ m}$ 半自磨系统和 $\Phi 7.32\text{ m} \times 4.27\text{ m}$ 半自磨系统从粗破至半自磨皮带分别长1138 m和420 m,矿石转运过程中仍存在扬尘问题,环保要求高,环保投入和成本依然较大。

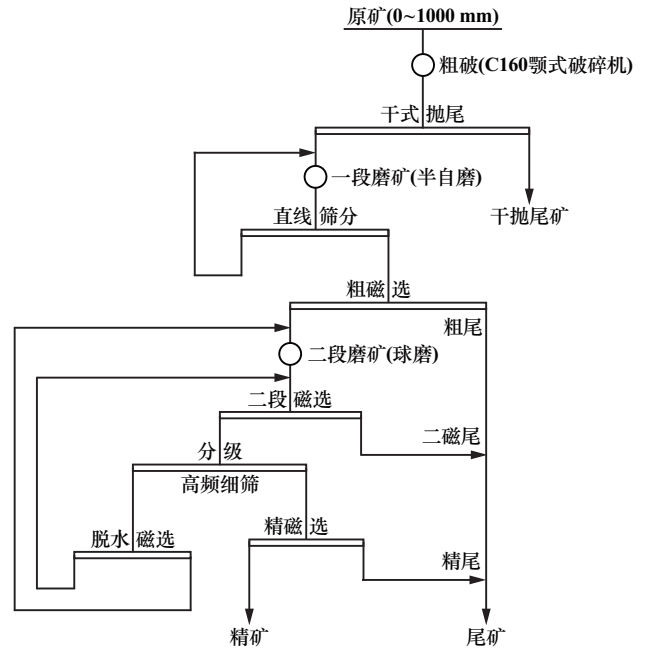


图2 白马铁矿半自磨工艺流程

2) 采用半自磨流程以适应风化矿的优势已不存在。白马铁矿一期投产初期,矿石中含风化矿比例较高,部分时段风化矿比例超过50%,导致破碎流程不畅。为解决这一问题,白马铁矿二期采用半自磨工艺。随着采场的推进,风化矿比例逐年降低,低品位矿石和风化矿全部交由外委民营选矿厂加工。从二期投产后的第5年开始,进入白马铁矿选矿厂的矿石基本为原生矿,白马铁矿还将服务20年以上,采用半自磨工艺以适应风化矿的优势已不存在。

3) 田家村半自磨达产难度大。建在田家村采场附近的 $\Phi 9.15\text{ m} \times 5.03\text{ m}$ 半自磨系统设计采用粗磨产品-3 mm粒级泵送至磨选厂房,由于粒度粗、临界流速大,投产初期,管道堵塞、无法正常运行,经优化后采用-2 mm粒级输送,矿浆管道恢复正常运行,但难磨粒级长期在半自磨机内循环,影响了半自磨机处理量。另一方面,设计前期委托美卓公司对田家村和及及坪矿分别进行的半自磨试验结果表明,田家村矿石和及及坪矿石邦德球磨功指数分别为18.15 kWh/t和17.50 kWh/t,说明田家村矿石比及及坪矿石难磨。由于田家村试验矿样含有16.12%的风化矿,及及坪试验矿样为全原生矿样,设计选用田家村和及及坪矿区半自磨比能值分别为9.7 kWh/t和11.0 kWh/t,在目前田家村半自磨系统生产为全原生矿的情况下,田家村难以达到设计的台时处理量672 t/h,实际生产台时处理量基本稳定在610 t/h,只达到设计指标的90%。

4) 半自磨流程较短,生产顺行快。从图1和图2

可以看出,半自磨取代了常规破磨流程中破、细破、检查筛分和一段球磨的功能,后续的磁选和二段球磨等流程相同。可根据设计的半自磨处理能力匹配适宜的粗破、磨选设备,完成不同的生产规模。由于半自磨工艺对风化矿的适应性较强,两个 $\Phi 7.32\text{ m} \times 4.27\text{ m}$ 半自磨系统投产2年后达产。一期常规破磨系统因风化矿对流程的影响和破碎设备不匹配等,通过对中细破设备进行填平、补齐等改造,投产6年后才达到设计处理能力650万吨/年。

2 半自磨与常规破磨生产指标对比

半自磨和常规破磨的最终目的都是将矿石磨细,使矿物达到单体解离,为后续分选提供合格原料。白马铁矿半自磨流程中矿石经粗破至0~300 mm后给入半自磨机磨矿。常规破磨流程经三段一闭路破碎,将矿石破碎至-12 mm粒级占95%以上(-0.074 mm粒级占6.5%),经一段球磨机闭路磨矿后进行粗粒抛尾。对半自磨磨矿产品和一段球磨磨矿产品进行了粒度分析,结果见表1。

表1 白马铁矿半自磨和常规破磨磨矿产品粒度分析结果

流程名称	台时处理量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	单位容积处理量/ [$\text{t} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$]	粒级/mm	粒级含量/%	
				磨机排矿	筛下产品
及及坪半自磨	290	1.67	+3	8.04	2.18
			-3+0.36	30.85	33.45
			-0.36+0.25	11.90	11.09
			-0.25+0.18	2.5	1.06
			-0.18+0.15	5.93	6.65
			-0.15+0.098	10.29	11.51
			-0.098+0.074	5.06	5.56
			-0.074	25.43	28.50
			+3	9.39	0.05
			-3+0.36	31.43	30.79
田家村半自磨	610	1.89	-0.36+0.25	8.93	10.44
			-0.25+0.18	4.63	5.42
			-0.18+0.15	6.23	7.29
			-0.15+0.098	9.67	11.32
			-0.098+0.074	6.06	7.08
			-0.074	23.66	27.61
一期一段球磨	205	3.82	+3	10.54	6.29 ¹⁾
			-3+0.36	46.66	42.24 ¹⁾
			-0.36+0.25	8.56	8.59 ¹⁾
			-0.25+0.18	8.71	9.95 ¹⁾
			-0.18+0.15	3.18	2.72 ¹⁾
			-0.15+0.098	9.00	11.28 ¹⁾
			-0.098+0.074	1.72	2.41 ¹⁾
			-0.074	11.63	16.52 ¹⁾

1) 为旋流器溢流粒度分析结果。

分析表1可知:

1) 半自磨排矿粒度较常规破磨排矿粒度更细。

及及坪半自磨和田家村半自磨排矿粒度较接近,+3 mm粗粒级含量较常规破磨一段球磨排矿+3 mm粒级含量分别减少了2.50和1.15个百分点,+0.36 mm粒级含量分别减少了18.31和16.38个百分点,-0.074 mm细粒级含量分别提高了13.80和12.03个百分点;半自磨机和球磨机排矿产品经分级后粒度亦呈现相同规律。说明半自磨机产品粒度更细,可以适当减轻二段磨机负荷。

2) 常规破磨单位容积处理量明显高于半自磨。位于磨选厂房内的及及坪半自磨系统不受半自磨矿浆长距离管道输送的制约,分级筛孔3 mm,筛上循环量相对较小,台时处理量较设计台时处理量268 t/h高22 t/h,但与常规破磨相比,单位容积处理量仍然较低。一期常规破磨台时处理量达到设计值205 t/h,磨矿效率明显高于半自磨。从单位容积处理量看,因入磨粒度的巨大差异,一期常规破磨单位容积处理量分别为及及坪半自磨和田家村半自磨的2.28倍和2.02倍。

3) 常规破磨流程和半自磨流程最终精矿粒度和精矿品位接近。生产前期,由于一期常规破磨流程二段磨矿分级设备配置不合理,未能充分发挥二段磨矿效率。近年通过对二段分级进行优化,增加旋流器与高频细筛形成组合分级后,二段磨机 q 值可提高到1.0左右。常规破磨和半自磨最终的精矿粒度均为-0.074 mm粒级含量65%~70%,精矿品位分别为55.08%和55.10%,指标接近。

3 半自磨与常规破磨设备运行对比

半自磨机设备体积大、钢球直径大、衬板使用寿命短、衬板更换时间长,设备作业率低于球磨机。白马铁矿近年来半自磨机和常规破磨球磨机设备作业率统计结果见表2。

表2 白马铁矿半自磨机及球磨机设备作业率统计结果

时间	设备作业率/%			
	及及坪半自磨	万年沟半自磨	田家村半自磨	一期球磨
2016年	91.93	87.87	80.16	94.19
2017年	88.16	93.70	82.47	92.88
2018年	84.68	88.50	87.45	95.77
2019年	89.90	84.95	87.56	95.46

从表2可以看出,一期常规破磨流程运行较稳定,除2017年因精矿输出限产及球磨机集中更换衬板等因素影响外,近几年作业率基本稳定在95%左右。半自磨流程设备运行不稳定,设备故障多,检修时间长,半自磨机作业率明显低于球磨机,且 $\Phi 9.15\text{ m} \times 5.03\text{ m}$

半自磨系统作业率低于 $\Phi 7.32 \text{ m} \times 4.27 \text{ m}$ 半自磨系统。

为了分析半自磨作业率低的原因,选取 $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨系统运行较为稳定的 2019 年数据进行统计,影响作业率的主要因素见表 3。

表 3 $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨机作业率影响因素统计结果

影响因素	停机时间/h	影响次数	占比/%	
计划检修	衬板更换	636.79	13 (正常更换 6 次,零星更换 7 次)	7.29
	螺栓紧固	107.08	58	1.22
	常规检修	88.48	11	1.01
非计划检修	28.03	18	0.32	
工艺影响	110.38	33	1.26	
外部供水电影响	119.14	17	1.36	
合计	1 089.9	137	12.46	

从表 3 可以看出:

1) 影响 $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨作业率的因素主要为换衬板,对年作业率影响高达 7.29%。一是半自磨机衬板寿命较短,对铸造工艺和衬板材质改进后^[5], $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨排矿段筒体衬板寿命平均也只有 3~4 个月,其他衬板一般寿命为 6 个月左右,且衬板质量不稳定,经常出现衬板断裂、变形等情况。二是更换衬板时间较长,采用进口 4 轴机械手更换衬板, $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨系统更换筒体衬板及格子板需要 8 d 左右,更换全套衬板需要 12 d。太钢袁家村 3 台 $\Phi 10.36 \text{ m} \times 5.49 \text{ m}$ 半自磨机在设备采购初期配备了 2 台进口 6 轴机械手及液压螺栓冲,更换衬板效率较高,更换全套筒体衬板及排料格子板需 3~4 d(不含进料端衬板及矿浆提升器等),但进口 6 轴机械手及液压螺栓冲价格较高。

2) 半自磨机螺栓紧固影响作业率达到 1.22%。半自磨机直径大,矿石和钢球在提升中以抛落形式实现冲击破磨,对衬板和螺栓冲击力大,螺栓容易松动和断裂,在运行中需要经常停车紧固和更换螺栓。

3) 工艺影响主要包括给料小车堵塞、更换、输送带倒停、筛板更换等,对作业率的影响比例为 1.26%。

4) 在近几年的运行中,白马铁矿 3 台半自磨机先后出现大齿轮开裂和脱落、齿圈腹板裂纹、大齿轮与进料端盖连接螺栓断裂脱落、进料端盖与给料套筒漏矿等大的停机事故,每次停机处理故障,少则 7 天,多则 25 天,极大影响了半自磨机作业率。

实践表明,大型半自磨设备虽然实现了国产化,价格较进口设备大幅度下降,但在设备可靠性方面还有待提高。

4 半自磨与常规破磨可比投资对比

对白马铁矿一期常规破磨和二期半自磨投资情况进行了统计。一期征地及建设供水供电设施时,已为二期扩能留有余地,该部分投资不易拆分,因此剔除了选厂以外的供水、供电及征地等费用,仅对与选矿工艺有关的设备、工艺管道及建构筑物、联络道路等投资进行对比。白马铁矿一期工程 2003 年开始建设,2006 年底投产;二期工程 2008 年开始建设,2011 年完全投产,中间相差 5 年时间,价格因素对投资有一定影响,但对投资对比结果影响不大。统计结果见表 4。

表 4 白马铁矿一期工程与二期工程可比投资对比

投资项目	投资/亿元		单位原矿可比投资/(元·t ⁻¹)	
	一期	二期	一期	二期
厂房及建构筑物	7.200 0	4.671 9	110.76	51.91
机器设备	2.142 7	4.225 1	32.92	46.95
其他 ¹⁾	2.988 0	0.729 3	46.02	8.10
合计	12.330 7	9.626 3	189.70	106.96

1) 其他包括总图、联络公路、桥梁等。

由表 4 可以看出,一期工程由于常规破磨流程较长、工艺环节较多,加上一期建设时与外部联络公路投资大,单位原矿可比投资比二期半自磨流程高 82.74 元/t。一期厂房及建构筑物单位原矿可比投资是二期的 2.13 倍。一期常规破磨装备水平低,建设时除细破设备采用进口设备外,其余全部采用国产设备;二期半自磨虽然采用了国产设备,但 $\Phi 9.15 \text{ m} \times 5.03 \text{ m}$ 半自磨机配套的同步机及控制系统、粗破设备颚式破碎机、尾矿浓缩机等均为进口设备;半自磨流程尽管设备数量少,但国产设备大型化后价格较高,半自磨流程机器设备单位原矿可比投资较常规破磨流程高 14.03 元/t。

5 半自磨与常规破磨生产成本对比

生产成本核算对比从粗破开始,到产出精矿和尾矿浓缩为止。精矿过滤、尾矿输送及堆存为常规破磨流程和半自磨流程的混合精矿与尾矿,故精矿过滤、尾矿输送及堆存不参与比较。为了使生产成本具有可比性,考虑到白马铁矿二期有 2 台半自磨机不在万年沟磨选主厂房内集中配置,将输送矿浆的管道消耗费用一并剔除,视为 3 台半自磨机与常规破磨球磨机选别厂房集中配置来分析成本构成。

对某核算年度选矿工序原矿处理成本进行了分析,

结果表明,半自磨流程较常规破磨流程成本高 4.12 元/t。具体如下:

1) 钢球单位成本:半自磨流程较常规破磨流程高 2.87 元/t_{原矿}。钢球均采用轧制锻球,其中半自磨钢球平均单耗 0.879 9 kg/t_{原矿},常规破磨一段球磨钢球单耗为 0.229 4 kg/t_{原矿}。半自磨钢球单耗是常规破磨一段球磨单耗的 3.28 倍,且半自磨机越大,钢球消耗越高。

2) 衬板单位成本:半自磨流程较常规破磨流程(含破碎机衬板)低 0.06 元/t_{原矿}。白马铁矿两种工艺二段球磨均采用磁性衬板,差别主要是半自磨衬板和常规破磨一段球磨及破碎衬板,半自磨比常规破磨衬板消耗低 0.01 kg/t_{原矿}。两种工艺衬板消耗差别不大。

3) 油脂单位成本:半自磨流程较常规破磨流程低 0.04 元/t_{原矿}。半自磨机设备大,对润滑油脂要求高,润滑油脂价格更高些;但常规破磨流程长,设备台套更多,润滑油脂消耗量更大。总体而言,两种工艺油脂消耗成本差别不大。

4) 皮带单位成本:半自磨流程较常规破磨流程低 0.03 元/t_{原矿}。

5) 备件材料及修理费单位成本:半自磨较常规破磨低 1.43 元/t_{原矿}。统计年度内半自磨系统大小齿轮等大型备件均未到使用周期,常规破磨设施、设备数量多,单位修理费更高。

6) 动力单位成本:半自磨流程较常规破磨流程高 2.67 元/t_{原矿},其中电单位成本高 3.02 元/t_{原矿},水单位成本低 0.35 元/t_{原矿}。半自磨流程一次性将 0~300 mm 矿石磨细到-3 mm,能量利用率更低,电单耗更高。

7) 人工单位成本:半自磨流程较常规破磨流程低 0.47 元/t_{原矿}。半自磨流程较短,工艺相对简单,人工成本更低。

8) 固定资产折旧单位成本:半自磨流程较常规破磨流程高 0.61 元/t_{原矿}。尽管半自磨流程投资较常规破磨流程少,但由于机器设备投资大、设备折旧年限短,折旧率高。常规破磨流程虽然投资高,但主要集中在房屋及建构筑物,设备折旧年限长,折旧率较低,使得半自磨流程固定资产折旧单位成本反而更高。

9) 其他费用:如安全生产费、运输费、尾矿浓缩絮凝剂消耗等,费用按照比例分摊,不进行比较。

6 结 论

通过对白马铁矿运行多年的半自磨流程和常规破磨流程进行对比分析,得出如下结论:

1) 半自磨流程对矿石适应性较强,尤其对前期风化矿比例较大的矿山,有利于流程顺利运行,有利于快速达产达效。半自磨流程排矿粒度细,有利于降低后续二段磨矿负荷。半自磨流程工序简单,基建投资低,仅从节省投资角度考虑,采用半自磨流程是有利的。

2) 在生产环节,国产半自磨设备受设计、材料及加工精度影响,设备故障率较高;半自磨设备大型化后,对设备维护要求高,半自磨机衬板长寿化问题尚待解决;半自磨流程运行不及常规破磨流程稳定,作业率低于常规破磨流程。

3) 白马铁矿半自磨流程单位矿石加工成本较常规破磨流程高 4.12 元/t,主要原因是钢球单耗和电力消耗较高,其他因素如人工成本、固定资产折旧等对成本影响并不显著。折算成精矿单位成本,半自磨流程较常规破磨流程高 13.12 元/t,按设计精矿产能 278 万吨/年计算,每年多支出 3 647 万元,仅考虑成本支出,常规破磨流程优于半自磨流程。

4) 白马铁矿选矿工艺流程对比分析结果表明,半自磨流程和常规破磨流程各有优缺点,需结合矿山风化矿比例、投资及成本等综合因素确定相对合理的选矿工艺流程。

参考文献:

- [1] 王永章,段伟伟,魏兵团. 太钢袁家村铁矿闪石型原生矿选矿技术方案研究[J]. 矿业工程, 2017(3):29-34.
- [2] 李 贤,罗良飞. 袁家村铁矿选矿厂流程考查与分析[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):57-61.
- [3] 蒋文利. 半自磨与常规选矿工艺流程的探讨[J]. 矿冶工程, 2012, 32(增刊):27-31.
- [4] 刘谊兵,朱 宁. 半自磨工艺顽石与介质高效分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):75-77.
- [5] 邓清锐,索绪洲,马文高. 大型半自磨机筒体衬板长寿化研制[J]. 攀枝花学院学报, 2018(5):67-70.

引用本文: 王志杰. 半自磨工艺流程与常规破磨工艺流程对比研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):77-81.