千万吨级超大型铜钼矿的碎磨工艺研究*

黄虎辉[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012)

摘要：针对内蒙古某超大型低品位斑岩型铜钼矿(储量9.5亿t,设计规模7万t/d,Cu品位0.165%、Mo品位0.032%),开展了碎磨工艺方案比选研究。矿石属中硬偏硬,且含绿泥石等易泥化矿物。在系统梳理常规碎磨、半自磨及高压辊磨三类碎磨工艺应用现状的基础上,拟定了半自磨+球磨+顽石破碎(SABC)工艺、50 mm给料高压辊磨干法工艺、30 mm给料高压辊磨干法工艺及高压辊磨湿法工艺共4个方案,从设备配置、建设投资、能耗、运营成本及全生命周期费用等方面进行了技术经济比较。结果表明:SABC工艺建设投资最低,较高压辊磨湿法工艺低17.89%,但吨矿生产成本最高(23.55元/t);高压辊磨湿法工艺吨矿生产成本最低(20.07元/t),较SABC工艺低17.34%。全生命周期费用现值最低的是高压辊磨湿法工艺,表明其长期经济性最佳。综合考虑矿石特性、设备成熟度及全生命周期经济性,推荐采用“圆锥中碎闭路筛分+高压辊磨机超细碎+湿式闭路筛分+一段闭路球磨”的高压辊磨碎磨湿法工艺,以期为同类型超大型低品位铜钼矿碎磨工艺的选择提供参考。

关键词：铜钼矿；碎磨工艺；半自磨工艺；高压辊磨工艺；全生命周期

中图分类号：TD95 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)09-0282-10

Study on Comminution Process of Ten-Million-Tonne Scale Super-Large Copper-Molybdenum Mine

Huang Huhui[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: A comparison and selection study on comminution process schemes was conducted for a super-large low-grade porphyry copper-molybdenum mine in Inner Mongolia (with reserves of 950 million t, a design scale of 70 000 t/d, a Cu grade of 0.165%, and a Mo grade of 0.032%). The ore is moderately hard to hard and contains easily sliming minerals such as chlorite. Based on a systematic review of the application status of three types of comminution processes, including conventional comminution, semi-autogenous grinding (SAG), and high-pressure grinding rolls (HPGR), four schemes were proposed: the semi-autogenous grinding+ball mill+pebble crushing (SABC) process, 50 mm feed high-pressure grinding roll dry process, 30 mm feed high-pressure grinding roll dry process, and high-pressure grinding roll wet process. A technical and economic comparison was conducted from the aspects of equipment configuration, construction investment, energy consumption, operating costs, and total lifecycle costs. The results show that the SABC process has the lowest construction investment, which is 17.89% lower than that of the high-pressure grinding roll wet process, but has the highest production cost per ton of ore (23.55 yuan/t); the high-pressure grinding roll wet process has the lowest production cost per ton of ore (20.07 yuan/t), which is 17.34% lower than that of the SABC process. The high-pressure grinding roll wet process has the lowest present value of the total lifecycle cost, indicating its optimal long-term economic performance. Comprehensively considering the ore characteristics, equipment maturity, and total lifecycle economic performance, the high-pressure grinding roll comminution wet process of “cone medium crushing, closed-circuit screening, high-pressure grinding roll ultra-fine crushing, wet closed-circuit screening, and one-stage closed-circuit grinding” is recommended, to provide a reference for the selection of comminution processes for similar super-large low-grade copper-molybdenum mines.

Key words: Copper-molybdenum mine, Comminution process, Semi-autogenous grinding process, High-pressure grinding roll process, Total lifecycle

---

* **收稿日期**：2026-05-09

作者简介：黄虎辉(1985—)，男，湖南平江人，硕士，高级工程师，主要从事矿物加工生产工艺及工程设计相关工作。E-mail:412276753@qq.com

0 引言

碎磨工艺是选矿厂的准备作业,包括破碎、筛分、磨矿、分级等工序,其目的是使有用矿物与脉石矿物分离,并使各种有用矿物相互间达到单体解离,为下一步选冶作业提供必要条件。据统计,选矿厂碎磨作业的能耗、钢耗和建设投资占全厂相应项目总额的50%~60%,甚至更高,是选矿厂控制建设投资、生产成本的核心环节之一[1-3],碎磨工艺的选择对选矿厂至关重要。

针对超大型低品位斑岩型铜钼矿的碎磨工艺选择,国内外学者与工程技术人员已开展了大量研究工作。在半自磨工艺领域,刘洪均等系统介绍了乌努格吐山铜钼矿采用SABC(半自磨+球磨+顽石破碎,Semi-Autogenous Grinding + Ball Mill + Pebble Crushing, SABC)流程的设计与应用实践,证明了该工艺在高寒地区超大型矿山的技术可行性[4]。洪建华结合德兴铜矿2.25万t/d半自磨工艺系统的生产指标,指出SABC流程在投资、占地及环保方面具有显著优势[5]。莫振军对多宝山铜矿SABC与常规碎磨组合工艺的创新实践进行了总结,指出改造后多宝山铜矿选矿厂整体产能提升至7 700 t/d,碎磨整体电耗下降2.63 (kW·h)/t,钢球单耗下降0.03 kg/t,经济效益非常显著[6]。在高压辊磨工艺方面,袁满等系统梳理了高压辊磨机在有色金属矿山的应用进展,指出该技术依托层压粉碎原理可使产品内部产生丰富微裂纹,在"多碎少磨"方面优势显著[7]。车文芳等介绍了河南某钼选厂引入高压辊磨机后处理能力由14 400 t/d提升至23 000 t/d的实践效果[8]。薛建森等研究表明辊压后物料的邦德磨矿功指数下降幅度达到20.26%[9]。此外,关于碎磨工艺方案的技术经济比较方法,赖桂华等对多宝山大型选矿厂的SABC工艺经济指标进行了分析[10];王福元等对西藏某大型铜钼矿的碎磨方案进行了对比研究[11]。

然而,既有研究多聚焦于单一工艺的应用实践或常规规模矿山的方案比选,针对储量9.5亿吨级、设计规模7万t/d的超大型低品位铜钼矿,系统开展SABC工艺与不同给料粒度及筛分方式的高压辊磨工艺之间的全生命周期技术经济比较的研究尚不多见。特别是对于含绿泥石等易泥化矿物的中硬偏硬矿石,不同碎磨工艺在设备配置、建设投资、能耗及运营成本等方面的长期经济性差异缺乏定量化的对比依据。鉴于此,本文在前人研究基础上,以内蒙古某超大型低品位斑岩型铜钼矿为对象(原矿Cu品位0.165%,Mo品位0.032%),拟定了SABC工艺、50 mm给料高压辊磨干法工艺、30 mm给料高压辊磨干法工艺及高压辊磨湿法工艺4个方案,从设备配置、建设投资、能耗、运营成本及全生命周期费用等方面进行系统比较,以期为同类型超大型低品位铜钼矿的碎磨工艺选择提供参考。

1 矿石性质

该矿矿石化学多元素分析结果见表1。矿石中的钼矿物为辉钼矿,铜矿物主要为黄铜矿,其他硫化物主要为黄铁矿,另含少量闪锌矿和方铅矿。金属氧化物主要为磁铁矿和钛铁矿,其次为金红石、菱铁矿、赤铁矿、褐铁矿等矿物。非金属矿物主要为钾长石和斜长石,其次为石英以及黑云母、绿泥石和方解石,矿石中各矿物的相对含量见表2。从表2中可以看到矿石含有绿泥石等易泥化矿物。

表1 矿石主要化学成分及微量元素分析结果

Table 1 Main chemical composition and trace element analysis results of the ore

成分	含量/%	成分	含量/%
Mo	0.032	TiO_2	0.500
Cu	0.165	P_2O_5	0.150
Fe	3.050	K_2O	4.270
Pb	0.013	CaO	2.970
Zn	0.064	Na_2O	2.760
S	1.050	MgO	1.660
Al_2O_3	14.470	SiO_2	59.810
As	0.007	Ag*	1.620
C	0.650	Au*	0.020

注:*的单位为g/t。

表2 矿石中各矿物的相对含量

Table 2 Relative contents of minerals in the ore

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铜矿	0.48	钾长石	36.19
辉钼矿	0.05	斜长石	23.39
黄铁矿	1.72	石英	17.63
磁铁矿	0.60	绿泥石	6.58
钛铁矿	0.52	黑云母	5.66
金红石	0.24	方解石	5.30
菱铁矿	0.23	磷灰石	0.36
赤铁矿	0.17	重晶石	0.10
闪锌矿	0.09	其他矿物	0.67
方铅矿	0.02	合计	100.00

对矿山的露天浅部矿样(1#)、井下深部矿样

(2#)和钻探岩芯矿样(3#)分别进行了邦德磨矿功指数测定、JK 落重试验(DW)和 SMC 粉碎试验,结果分别见表 3、表 4。由试验结果可知,矿石属于中硬偏硬。表 3 和表 4 中各参数含义如下:P_1 为筛孔尺寸;G_{bp}为邦德磨矿功指数试验中的可磨度参数,表示每转产生的合格粒级物料克数;F_{80} 为给矿中 80%的质量通过的筛孔尺寸;P_{80} 为磨矿产品中 80%的质量通过的筛孔尺寸;W_{ib}为邦德磨矿功指数;A 是 JK 落重试验模型中的硬度参数,反映矿石在冲击破碎下的粒度依存性,其数值越大,表明矿石在特定粒度下越显脆性或易受冲击破裂;b 是 JK 落重模型中的硬度参数,反映矿石在冲击破碎下的粒度依存性,其数值越大,表明矿石在特定粒度下越显脆性或易受冲击破裂;$A\times b$ 为综合破碎指标,是判断矿石在半自磨机(SAG 磨机)中抗冲击破碎性能的核心依据,其数值越小,说明矿石越难破碎;t_a 是抗研磨破碎能力参数,其值越小,表明抗研磨能力越强;D_{Wi}为 SAG 磨机功指数,表明将单位体积(m^3)矿石破碎至特定细度所需消耗的能量。

表 3 邦德磨矿功指数测定结果

Table 3 Bond ball mill work index test results

矿样	P_1/μm	G_{bp}/(g/r)	F_{80}/μm	P_{80}/μm	W_{ib}/((kW·h)/t)
1#露天浅部矿样	106.00	1.09	2 035.00	84.00	17.98
2#井下深部矿样	106.00	1.19	2 028.00	83.00	16.61
3#钻探岩芯	106.00	1.06	2 038.00	83.00	18.26

表 4 JK 落重试验和 SMC 粉碎试验测定结果

Table 4 JK drop-weight test and SMC comminution test results

矿样	试验名称	矿石密度/(t/m³)	JK 参数				
			A	b	$A\times b$	t_a	D_{Wi}/((kW·h)/m³)
1#	DW	2.65	75.3	0.55	41.42	0.48	—
	SMC	2.65	84.6	0.47	39.76	0.39	6.66
2#	DW	2.67	71.5	0.73	52.20	0.71	—
	SMC	2.66	78.6	0.57	44.80	0.44	6.03
3#	SMC	2.68	100.0	0.42	42.00	0.40	6.52

2 碎磨工艺现状及发展趋势

当前,有色金属选矿厂采用的碎磨工艺主要可归纳为三大类:常规碎磨工艺、半自磨工艺及高压辊磨工艺。不同类型的碎磨工艺在原理、流程结构、建设投资、运行成本和适用性等方面存在较大差异[12-14]。

2.1 常规碎磨工艺

常规碎磨工艺即“三段闭路破碎(或两段破碎、或一段破碎)+闭路球磨”(Traditional Three-Stage Crushing and Ball Milling, 3CB)流程,是最早在矿业领域应用、技术最成熟的碎磨工艺。该工艺通过粗碎、中碎、细碎等多段破碎,配合预先和检查筛分,逐步把矿石破碎至所需粒度,最后由闭路球磨完成细磨。

常规碎磨工艺的优点是技术成熟,可靠度高,设备生产厂家多,售后维护简便,性价比高,能耗中等。对于一些特殊性质矿石,简化的常规碎磨工艺也具有较大的优势。例如,长沙矿山研究院有限责任公司(简称长沙矿山院)设计的湘西某大型铅锌矿,生产规模为 12 000 t/d,矿石为灰岩型矿石,方解石含量高达 90%,物理性质易碎易磨,磨蚀性低。依据矿石特性,该矿突破性地采用“一段锤破+一段闭路磨矿”的极简碎磨工艺,破碎产品粒度为−50 mm,其中−10 mm 粒级占比超过 70%,−0.074 mm 含量可达 20%~25%,最终磨矿细度为−0.074 mm 占 70%。项目建成后,碎磨工艺能耗较常规铅锌矿低约 40%~50%。

当原矿中含泥、含水量偏高时,圆锥破碎机破碎腔和筛面容易出现黏结堵塞,影响正常生产,需要配套增加脱泥洗矿系统来提高流程顺畅性,但这会加剧破碎系统的复杂性。柿竹园东波选矿厂、瑶岗仙裕新选矿厂原矿含泥偏高,长沙矿山院在设计和技改中增加了中碎前的脱泥工艺,采用“三段一闭路破碎+中碎前预先脱泥+两段闭路球磨”流程,有效保障了流程的通畅,现场应用效果显著。

目前常规碎磨工艺在千万吨级的超大规模选矿厂应用非常少,主要原因在于圆锥破碎机、筛分等设备的单机能力偏小,所需设备数量多,导致常规碎磨工艺系统构成极其复杂,生产维护及管理困难,厂房占地和建设投资大。

2.2 半自磨工艺

半自磨工艺以矿石自身为主要研磨介质,同时加入少量钢球,用以替代中细碎及部分粗磨功能。根据不同的矿石性质,目前已发展出不同配置的细分工艺,主要包括半自磨+球磨(Semi-Autogenous mill+ Bill mill Circuit, SAB)、半自磨+球磨+顽石破碎(SABC)以及单段半自磨(Single Stage Semi-Autogenous Grinding Circuit, SSSAG)等形式[15-17]。

半自磨工艺的优点是流程简单,设备种类及数量大幅减少,占地及建设投资低;湿法作业,不产生粉尘,对含泥、含水高矿石适应性强。长沙矿山院设计的四川某锂辉石矿生产规模为260万t/a,该矿地处高寒高海拔地区,设计采用SABC半自磨工艺以简化流程,减少定员,降低环保风险,并减少前期投资。长沙矿山院设计的四川某大型金矿生产规模为90万t/a,因其成矿于破碎带中,原矿中含泥、含水高,采用"粗碎+半自磨+一段闭路磨矿"工艺,简化了流程,有效避免了含泥、含水矿石对流程通畅性的影响。

近十几年来,随着半自磨设备大型化,单系列产能不断提高,超大型选矿厂采用半自磨工艺已十分广泛且成熟,是当前碎磨工艺发展的主要方向之一。乌努格吐山铜钼矿一期、二期工程中,半自磨机规格由Φ8.80 m×4.80 m提升至Φ11.00 m×5.40 m,单系列处理能力达3.5万t/d以上,为我国高寒地区超大型铜钼矿半自磨工艺的成功应用提供了范例[4,18]。德兴铜矿大山选矿厂的2.25万t/d半自磨工艺系统的生产实践表明,SABC流程在投资、占地、人工及环保方面具有显著优势[5,19]。半自磨工艺矿山年生产规模已达上亿吨,单系列生产能力最大已达5万t/d。近些年建成的铜钼矿山半自磨工艺选矿厂情况统计见表5。

表5 铜钼矿山半自磨工艺选矿厂统计

Table 5 Statistics of semi-autogenous grinding (SAG) processing plants in copper-molybdenum mines

序号	名称	生产规模/(万t/a)	半自磨			球磨机		
			规格/m	功率/kW	数量/台	规格/m	功率/kW	数量/台
1	内蒙乌山二期	1 155	Φ11.00×5.40	12 686	1.00	Φ7.90×13.60	17 000	1.00
2	西藏甲玛二期	1 200	Φ10.40×5.20	11 000	2.00	Φ7.30×12.50	13 000	2.00
3	普朗铜矿	1 200	Φ9.72×4.72	8 202	2.00	Φ6.70×11.73	9 556	2.00
4	紫金山金铜矿	1 350	Φ11.00×5.40	13 000	1.00	Φ7.92×13.60	17 000	2.00
5	驱龙(巨龙)铜矿一期	4 500	Φ10.73×5.18	11 000	4.00	Φ7.92×14.33	18 000	4.00
6	驱龙(巨龙)铜矿二期	1 380	Φ11.60×6.20	18 000	1.00	Φ8.53×14.63	24 000	1.00
		4 620	Φ10.73×7.23	18 000	4.00	Φ7.92×14.33	18 000	4.00
7	鹿鸣钼矿	1 500	Φ11.60×6.20	17 000	1.00	Φ7.60×13.10	11 600	2.00

半自磨工艺主要不足在于电耗和钢球损耗高,衬板磨损严重,使用寿命较短;对给矿硬度和粒度组成的波动反应较为敏感,生产指标易出现起伏,投产初期的调试过程通常较长;大型半自磨机和球磨机生产制造技术要求高,设备生产商较少。

2.3 高压辊磨工艺

高压辊磨工艺是以高压辊磨机(High-Pressure Grinding Roll,HPGR)为核心的碎磨工艺。该工艺基于层压粉碎原理进行工作,通过对物料施加强大压力使其在颗粒间发生挤压破碎,产品内部会形成丰富的微裂纹,在"多碎少磨"和"节能降耗"方面优势显著[7,20]。

近年来,由于在高硬矿石上成本优势凸显,且更低的破碎粒度下限更有利于预选抛废,降低入磨矿量,高压辊磨工艺首先在铁选矿厂中迅速推广和发展,生产规模越来越大,目前已超过了5 000万t/a。设备规格也随之快速发展,最大规格辊径已达3 m,通过量达5 000~6 000 t/h。在铁矿应用成熟后,高压辊磨工艺目前也正逐步往有色金属等其他矿种拓展,是当前碎磨工艺发展的主要方向之一。金堆城钼业是国内首家将高压辊磨机作为超细碎设备应用于有色金属选矿的企业,新增高压辊磨机超细碎后,球磨机处理能力提升约15%[21]。栾川某钼矿通过引入高压辊磨机,处理能力由14 400 t/d提升至24 000 t/d,碎磨系统电耗降低约3.80元/t[8]。此外,针对高压辊磨机在铜冶炼渣选矿中的研究表明,辊压后物料邦德磨矿功指数可降低近20%,可磨性得到显著改善[9]。高压辊磨工艺在超大型选矿厂的应用案例见表6。

表6 高压辊磨工艺在超大型选矿厂的应用案例

Table 6 Application cases of high-pressure grinding roll (HPGR) in ultra-large processing plants

序号	项目名称	生产规模/(万t/a)	高压辊磨机	备注
1	鼎新建平铁矿	1 000	CLM260180	
2	鞍钢本钢南芬铁矿	1 350	CLM260160	
3	北票鼎新矿业	5 000	CLM260160×3	
4	首钢马城铁矿	2 200	CLM240170×2	
5	新疆东戈壁钼矿	1 320	CLM220160×2	设计阶段
6	湖南鸡脚山矿区(一期)	990	CLM260180	已安装未生产
7	内蒙古曹四夭矿区钼矿	1 650	CLM240140×2	设计阶段
8	内蒙古泰信祥金矿	1 000	CLM260180	设计阶段

高压辊磨工艺系统复杂,尤其是筛分系统较为庞大,不适宜处理含泥、含水高的矿石;对于硬度低的矿石,该工艺也无法发挥其节能降耗的优势;另外,在钨价较高的情况下,辊面磨损所带来的维护成本也不可忽视。

3 碎磨工艺选择

某超大型低品位斑岩型铜钼矿选矿厂设计规模为 7 万 t/d(2 310 万 t/a),属千万吨级的超大型选矿厂。矿石属中硬偏硬,原矿磨矿细度为 −0.074 mm 占 65%。根据前文分析,可供超大型选矿厂选择的碎磨工艺主要有"半自磨+顽石破碎+球磨"的半自磨工艺与"圆锥中细碎+高压辊磨机超细碎+球磨闭路磨矿"两种;而根据给料粒度、筛分方式的不同,高压辊磨工艺又可分为三种不同的方案,本文共计 4 种碎磨工艺。

3.1 SABC 半自磨工艺(方案一)

SABC 半自磨工艺即"半自磨+顽石破碎+一段闭路球磨"流程。粗碎后原矿块度 −250 mm,半自磨控制筛孔尺寸 6 mm。考虑矿石功指数较高,硬度偏硬,顽石量按给矿的 20%考虑,流程图见图 1。

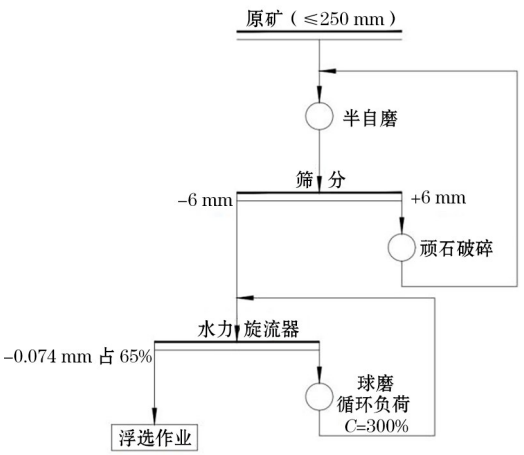


图 1 SABC 半自磨工艺流程

Fig.1 Flowsheet of SABC process

3.2 50 mm 给料高压辊磨干法工艺(方案二)

50 mm 给料高压辊磨干法工艺即"圆锥中碎闭路筛分(−50 mm)+高压辊磨机超细碎+干式闭路筛分+一段闭路球磨"流程。中碎产品粒度为 −50 mm,超细碎产品粒度为 −5 mm,筛分方式为干法,高压辊磨机工作制度与破碎系统一致,流程见图 2。

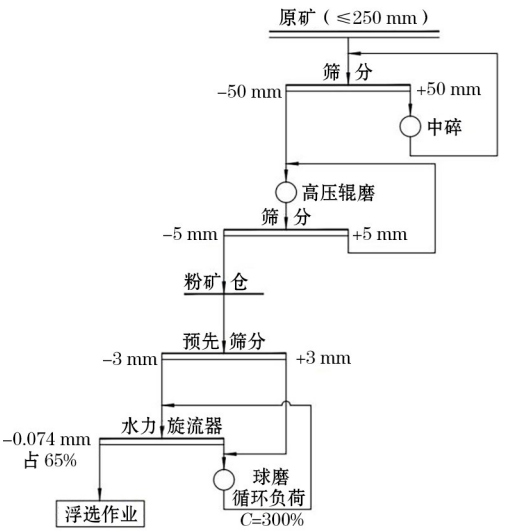


图 2 50 mm 给料高压辊磨干法工艺流程

Fig.2 Flowsheet of 50 mm feed HPGR dry process

3.3 30 mm 给料高压辊磨干法工艺(方案三)

30 mm 给料高压辊磨干法工艺即"圆锥中细碎闭路筛分(−30 mm)+高压辊磨机超细碎+干式闭路筛分+一段闭路球磨"流程,两段圆锥破碎产品粒度为 −30 mm,超细碎产品粒度为 −5 mm,筛分方式为干法,高压辊磨机工作制度与破碎系统一致,流程见图 3。

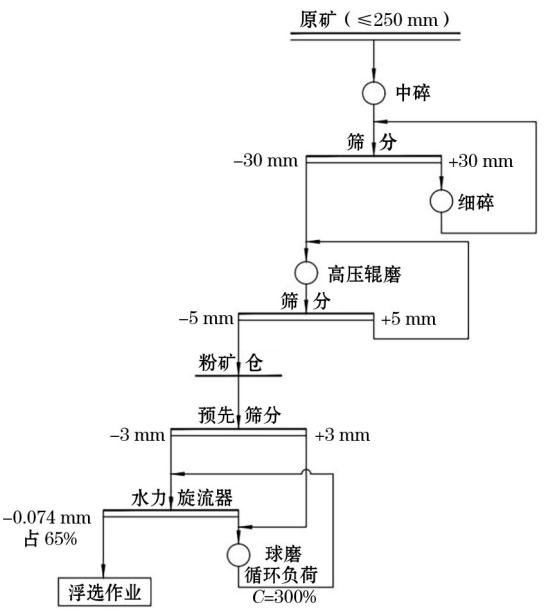


图 3 30 mm 给料高压辊磨干法工艺流程

Fig.3 Flowsheet of 30 mm feed HPGR dry process

3.4 高压辊磨湿法工艺(方案四)

高压辊磨湿法工艺即"圆锥中碎闭路筛分+高压辊磨机超细碎+湿式闭路筛分+一段闭路球磨"

流程。中碎产品粒度为－50 mm,超细碎产品粒度为－5 mm,筛分方式为湿法,高压辊磨机工作制度与磨矿系统一致,流程见图 4。

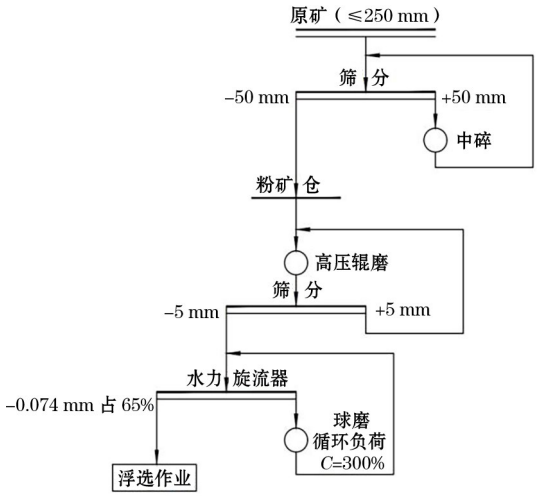


图 4 高压辊磨湿法工艺流程

Fig.4 Flowsheet of HPGR wet process

研究表明,SABC 流程中半自磨机与球磨机的装机功率比值宜控制在 0.65～0.85 之间,且顽石破碎系统对流程稳定至关重要[22-23]。高压辊磨工艺应关注高压辊磨机给料粒度、辊面磨损及筛分效率二者之间的匹配关系[24]。值得注意的是,直径 3 m 以上的超大型高压辊磨机在国内有色金属矿山应用尚处于起步阶段[25-26],其在超大型铜钼矿中的长期运行可靠性尚需进一步验证;相比之下,SABC 工艺单系列处理能力已达 5 万 t/d,在超大规模选矿厂中具有丰富的实践经验[27]。对于含泥、含水较高的矿石,干法高压辊磨工艺存在筛分效率低、流程堵塞等风险,而采用湿式筛分则可有效规避上述问题[25-26]。

4 碎磨工艺技术经济比较

对选择的 4 个碎磨方案进行技术经济对比,择优选出符合该矿矿石特性的碎磨工艺方案。

4.1 方案对比的基础条件

(1) 选矿厂生产规模为 7 万 t/d (2 310 万 t/a);

(2) 选矿厂工作制度为 330 d/a,3 班/d,其中,破碎筛分作业为每班 6 h,高压辊磨干式工艺作业为每班 6 h,高压辊磨湿式工艺作业为每班 8 h,磨矿作业为 8 h/班;

(3) 邦德磨矿功指数 W_{ib} 为 17.71 (kW·h)/t。鉴于暂未开展高压辊磨机相关试验,参考文献[26]至[28]及同类有色金属矿山的工程实践经验,高压辊磨后矿石(邦德磨矿)功指数通常可降低 8%～20%,本项目按 10%计,取值为 15.94 (kW·h)/t。

(4) 人工工资按照每人 12 万元/a 计,电费按照 0.54 元/(kW·h)计,钢球含税价按 0.58 万元/t 计,衬板含税价按 1.06 万元/t 计。采暖按每年 5 个月考虑。设备折旧按 12 a 计,土建折旧为 20 a 计,费用残值按 5%计,生产服务年限按 20 a,折现率 i=8%,采用直线法计算相应折旧。

(5) 本项目粗碎站与选厂相距较远,为保障长距离胶带输送的稳定性,所有方案均需考虑建设原矿仓和粉矿仓。其中,半自磨工艺方案的原矿仓和粉矿仓合并考虑,按 36 h 贮存量建设;高压辊磨工艺方案原矿仓按 12 h 贮存量建设,粉矿仓按 24 h 贮存量建设。

4.2 主要设备

在设备国产化的前提下,4 个方案的主要设备选型与配置见表 7。

表 7 主要设备选型与配置

Table 7 Main equipment selection and configuration

设备类型	名称	方案一			方案二			方案三			方案四		
		规格	台数	功率/kW	规格	台数	功率/kW	规格	台数	功率/kW	规格	台数	功率/kW
破碎设备	中碎	—	—	—	HP900	4	750	HP800	4	600	HP900	4	750
	细碎	—	—	—	—	—	—	HP800	6	600	—	—	—
	筛分	—	—	—	SDB4397	4	90	SDB4385	4	90	SDB4397	4	90
	高压辊	—	—	—	CLM300180	2	9 000	CLM260200	2	8 000	CLM260180	2	7 100
	微粉筛	—	—	—	SEMS49120	4	185	SEMS49120	4	185	SEMS43100	4	90
	顽石破碎	HP500	2	355	—	—	—	—	—	—	—	—	—
磨矿设备	半自磨	Φ11.00 m×6.90 m	2	15 500	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	直线筛	LH3673	4	90	LH3685	4	90	LH3685	4	90	—	—	—
	球磨机	Φ7.92 m×14.33 m	2	18 000	Φ7.92 m×14.33 m	2	18 000	Φ7.92 m×14.33 m	2	18 000	Φ7.92 m×14.33 m	2	18 000
辅助设备	皮带、除尘机等	—	—	4 544	—	—	16 724	—	—	17 304	—	—	14 066
功率合计		—	—	72 614	—	—	75 184	—	—	76 764	—	—	67 986

方案四总装机功率最低,匹配了高压辊磨工艺节能的优势,也是3个高压辊磨工艺方案可总装机功率最低的方案,最大因素是配套辅助的设备功率最低。

近年来,国内中信重工已具备制造 Φ12.20 m×11.00 m 自磨机(28 000 kW)和 Φ7.92 m×14.33 m 球磨机(18 000 kW)的能力,设备国产化率的提升为超大型选矿厂建设提供了有力支撑[26,29-30]。方案二采用CLM300180型高压辊磨机(辊径3 m),单台功率9 000 kW,国内在有色金属矿山尚无此规格设备的成熟应用案例;方案三和方案四均选用2.60 m辊径设备,国产化程度更高,设备供应及售后维护更有保障。

4.3 投资对比

分别对4个方案的建设投资进行了估算,主要包含主体设备、辅助设备及厂房建筑的建设投资。4个方案的建设投资柱状对比情况见图5。

方案一总投资最低,其中土建投资约占26.9%,是4个方案中土建投资占比最低的方案,也是总投资最低的主要原因。并且,方案一的辅助设备投资占比仅为4%,远低于其他方案,说明SABC流程的配套设备需求更少。

高压辊磨工艺3个方案(即方案二、方案三、方案四)土建投资占比普遍在33.80%~35.20%之间,是总投资高的重要因素。这3个方案的辅助设备投资占比也明显高于方案一,其中方案三的辅助设备投资占比达11.00%,说明干法工艺对除尘、输送等配套设备的需求更高。方案四土建投资占比略高于方案二、方案三,但辅助设备占比更低,整体结构更均衡。方案三的主体设备和辅助设备占比均为最高,土建占比也处于高位,导致总投资最高。

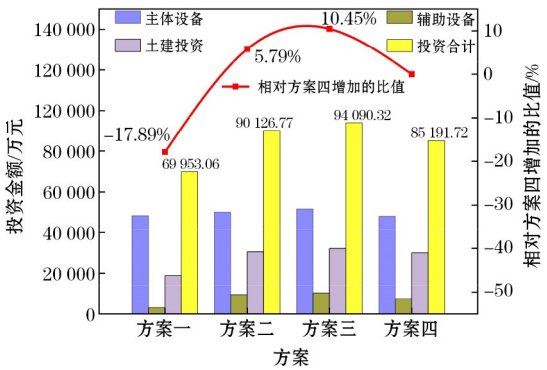


图5 建设投资对比柱状图

Fig.5 Construction investment comparison bar chart

4.4 材料消耗、能源消耗及定员

对4个方案的材料消耗、能源消耗及定员进行统计,主要统计了钢球、衬板、辊套、人工及电耗等,具体见表8。

4.5 生产成本对比

4个方案的生产成本见表9。

表8 材料、能源消耗及定员对比

Table 8 Comparison of material, energy consumption and staffing

方案	材料消耗							人工数量/人	电耗/(×10⁴ kW·h)		吨矿电耗/((kW·h)/t)
	半自磨机钢球消耗量/(kg/t)	半自磨机衬板消耗量/(kg/t)	球磨机钢球消耗量/(kg/t)	球磨机衬板消耗量/(kg/t)	圆锥衬板消耗量/(kg/t)	筛网消耗量/(m^2/t)	高压辊磨机辊套使用寿命/h		设备年用电量	采暖用电量	
方案一	0.50	0.08	0.60	0.14	0.02	0.000 2	—	36	53 995.93	2 956.34	24.65
方案二	—	—	0.50	0.14	0.04	0.000 8	8 000	72	44 412.35	3 946.11	20.93
方案三	—	—	0.50	0.14	0.08	0.008 0	10 000	76	45 024.96	4 118.40	21.27
方案四	—	—	0.50	0.14	0.08	0.000 8	8 000	72	42 939.05	3 620.47	20.16

表9 生产成本对比

Table 9 Comparison of production costs

方案	辅助材料/万元		人工费/万元	电费/万元	主要设备运维/万元	胶带机运维/万元	建筑维修/万元	投资折旧/万元	合计/万元	吨矿成本/(元/t)	相对方案四增加的比值/%	费用现值/万元
	破碎机及磨机消耗	高压辊磨机年辊套消耗										
方案一	17 780.40	—	432.00	29 045.66	700.00	200.00	1 347.66	4 899.65	54 405.37	23.55	17.34	555 074.57
方案二	9 963.36	2 420.55	864.00	24 662.81	1 000.00	900.00	1 466.78	6 100.32	47 377.83	20.51	2.20	494 133.11
方案三	10 802.88	1 841.40	912.00	25 063.11	1 000.00	900.00	1 510.77	6 360.38	48 390.54	20.95	4.39	505 428.22
方案四	9 963.36	2 772.00	864.00	23 745.36	1 000.00	900.00	1 383.65	5 727.79	46 356.15	20.07	0.00	482 882.39

4 个方案中电费和辅助材料消耗成本是生产成本的两大核心,合计约占总成本的 78%～86%以上,投资折旧、建筑维修、运维成本占比较小,但在不同工艺中差异明显。

方案一总运营成本最高,吨矿成本 23.55 元/t,较方案四高约 17.34%。辅助材料成本也显著高于其他方案,是高成本的主要因素;但人工费、运维成本最低,体现了 SABC 流程简化的优势。

方案四总运营成本最低,吨矿成本 20.07 元/t,是运营成本最优方案,其电费和辅助材料成本控制较好,抵消了辊套成本的增加。方案二和方案三生产成本处于中等水平,方案二各项成本相对均衡,方案三辊套成本最低,但电耗较高。

高压辊磨机年辊套消耗金额按"年运转时间/辊套使用寿命×单套辊套价格×设备台数"估算。方案二、方案三为干法工艺,高压辊磨机与破碎系统工作制度一致,年运转约 5 940 h;方案四为湿法工艺,高压辊磨机与磨矿系统一致,年运转约 7 920 h。因此,方案二、方案四辊套寿命虽同为 8 000 h,方案四因年运转时间明显更长,年辊套消耗 2 772.00 万元,高于方案二的 2 420.55 万元;方案三辊套寿命为 10 000 h 且年运转时间较短,年辊套消耗最低,为 1 841.40 万元。

根据国内类似大型铜矿的生产统计,SABC 工艺吨矿综合成本通常较高压辊磨工艺高 2～4 元/t,主要体现在电耗和钢球消耗的差异上[10]。本研究的成本计算结果与此规律基本一致,方案一 SABC 工艺吨矿成本(23.55 元/t)较方案四高压辊磨湿法工艺(20.07 元/t)高约 3.48 元/t,差额处于合理区间。

4.6 投资和运营成本变化趋势分析

对 4 个方案的建设投资和运营成本进行全生命周期分析,详见图 6。

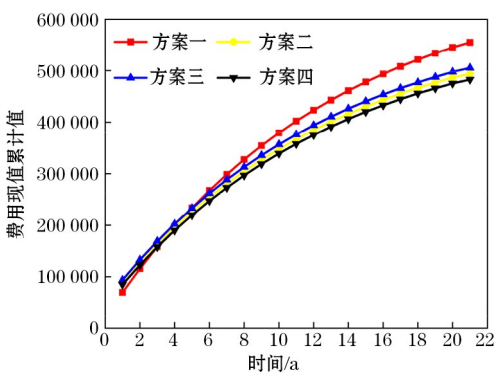


图 6 各方案费用现值逐年累计变化趋势

Fig.6 Trend of cumulative present value of total costs over years for each scheme

初期阶段(0～3 a),方案一因建设投资最低,总成本在初期具有一定优势;高压辊磨工艺方案投资高,初期总成本偏高,其中方案三尤为突出。

随着运营年限增加,方案一的高运营成本开始显现,总成本快速上升,约在第 3 年出现反转,方案四和方案二凭借更低的运营成本,使总成本反超方案一。反转之后,方案一的总成本差距被进一步拉大,长期经济性劣势完全暴露;方案四始终保持成本优势,方案二紧随其后,两者差距较小。

4.7 小结

方案一建设投资最低,较基准方案四低 17.89%,土建与辅助设备投资占比远低于高压辊磨系列方案,更适合项目前期资金压力大、建设周期短的场景。然而,该优势仅存在于项目初期,长期运营将被高运营成本完全抵消。

方案一的年运营成本最高,吨矿成本达 23.55 元/t,较方案四高 17.34%,核心短板是电耗与辅助材料消耗过高;高压辊磨工艺凭借"多碎少磨"的节能降耗优势,整体运营成本更低,其中方案四吨矿成本最低,为 20.07 元/t。

以 20 a 生产服务年限进行测算,总成本排序为方案四<方案二<方案三<方案一。方案一的低投资优势已被高运营成本完全覆盖,长期总成本最高;方案四投资与运营成本达到最佳平衡,方案二紧随其后,两者差距较小,均是长期运营的优选。

综合以上因素,本次碎磨工艺研究推荐采用方案四,即高压辊磨湿法工艺。

5 结论

本文以某超大型低品位斑岩型铜钼矿为研究对象,结合矿石性质及铜钼矿当前主流碎磨工艺应用现状,开展了半自磨 SABC 工艺和 3 种高压辊磨工艺共 4 个碎磨方案的技术经济对比研究,主要结论如下。

技术经济比较表明,SABC 工艺建设投资低但运营成本高,长期总成本劣势明显;高压辊磨湿法工艺在吨矿成本、电耗和 20 a 费用现值方面综合最优。结合矿石性质、设备成熟度与全生命周期经济性,推荐采用"圆锥中碎闭路筛分+高压辊磨机超细碎+湿式闭路筛分+一段闭路球磨"的高压辊磨湿法工艺。

本研究的主要创新在于将高压辊磨湿法工艺流

程应用于超大型铜钼矿,并构建了覆盖设备配置、投资、能耗、材料消耗、运营成本及费用现值的全生命周期比选方法,弥补了同类矿山缺乏定量比选数据的不足。该工艺对低品位、大规模、成本敏感的铜钼矿具有推广价值,但其长期可靠性和辊面磨损问题仍需工业验证。后续应开展高压辊磨半工业或工业试验,利用实测邦德磨矿功指数与磨损数据修正经济模型,并关注大型设备的国产化、备件供应与智能化运维。

参考文献(References):

[1] 雷存友,余浔,冯裕果.碎磨工艺现状及发展趋势[J].有色金属(选矿部分),2019(5):15-19.
Lei Cunyou, Yu Xun, Feng Yuguo. Present status and development trend of comminution process[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(5):15-19.

[2] 余浔,邵全渝.影响碎磨工艺选择的主要因素和流程方案的种类[J].现代矿业,2010(9):5-9.
Yu Xun, Shao Quanyu. Main factors affecting the choice of crushing and grinding technology and types of process schemes[J]. Modern Mining,2010(9):5-9.

[3] 杨松荣.半自磨(自磨)工艺的选择及应用[J].有色金属(选矿部分),2013(增刊1):41-43+49.
Yang Songrong. Selection and application of semi-autogenous (autogenous) grinding process[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2013(Suppl.1):41-43+49.

[4] 刘洪均,孙春宝,赵留成,等.乌努格吐山铜钼矿 SABC 碎磨流程的设计与应用[J].有色金属(选矿部分),2013(4):64-66.
Liu Hongjun, Sun Chunbao, Zhao Liucheng, et al. The design and application of SABC crushing-grinding process for treatment of Wunugetushan Copper-Molybdenum Mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2013(4):64-66.

[5] 洪建华.2.25 万 t/d SABC 工艺在德兴铜矿的应用[J].有色金属(选矿部分),2011(增刊1):124-126.
Hong Jianhua. Application of 25,000 t/d SABC process in Dexing Copper Mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2011(Suppl.1):124-126.

[6] 莫振军.SABC 碎磨工艺在多宝山铜矿的应用[J].有色金属(选矿部分),2022(6):102-108.
Mo Zhenjun. Application of SABC comminution process in Duobaoshan Copper Mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(6):102-108.

[7] 袁满,卢冀伟,张俊飞,等.高压辊磨机在有色金属矿山的应用进展与展望[J].中国矿业,2023(2):90-96.
Yuan Man, Lu Jiwei, Zhang Junfei, et al. Research progress and prospect of high pressure grinding rolls used in non-ferrous metal mines[J]. China Mining Magazine,2023(2):90-96.

[8] 车文芳,辛百军,吴玉洁,等.河南某钼选矿厂高压辊磨工艺应用实践[J].中国钼业,2025,49(3):42-46.
Che Wenfang, Xin Baijun, Wu Yujie, et al. Application practice of high pressure roller mill in a molybdenum ore processing plant in Henan[J].China Molybdenum Industry,2025,49(3):42-46.

[9] 薛建森,南君芳,薛鹏举,等.高压辊磨技术在铜冶炼渣选矿中的应用研究与探索[J].有色金属(选矿部分),2024(1):89-95.
Xue Jiansen, Nan Junfang, Xue Pengju, et al. Research and exploration on application of high pressure roller grinding technology in copper smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(1):89-95.

[10] 赖桂华,王金庆,莫振军,等.多宝山铜矿大型选矿厂碎磨工艺探析[J].矿山机械,2020,48(5):46-49.
Lai Guihua, Wang Jinqing, Mo Zhenjun, et al. Analysis on comminution process in large dressing plant of Duobaoshan Copper Mine[J]. Mining & Processing Equipment,2020,48(5):46-49.

[11] 王福元,张雯雯,王建国.西藏某大型铜钼矿碎磨工艺的方案研究[J].有色冶金设计与研究,2017,38(3):7-10.
Wang Fuyuan, Zhang Wenwen, Wang Jianguo. Scheme study on crushing and grinding process of a large copper-molybdenum mine in Xizang[J]. Nonferrous Metallurgy Design and Research,2017,38(3):7-10.

[12] 李仕亮.碎磨新设备在选矿厂设计中应用的进展[J].矿冶,2020(2):82-85.
Li Shiliang. Progress in application of new comminution equipment in concentrator design[J]. Mining & Metallurgy,2020(2):82-85.

[13] 李丽匣,李楠,刘飞飞,等.新型碎磨技术与装备的研究现状与发展趋势[J].金属矿山,2025(11):1-16.
Li Lixia, Li Nan, Liu Feifei, et al. Research status and development trend of novel crushing and grinding technology and equipment[J].Metal Mine,2025(11):1-16.

[14] 彭然.国外某大型铜矿选矿碎磨工艺设计优化[J].现代矿业,2019(5):212-218.
Peng Ran. Optimization of comminution process design for a large overseas copper mine[J]. Modern Mining,2019(5):212-218.

[15] 瞿安辉,陈建文.半自磨(SABC)流程与常规碎磨流程对比分析[J].有色金属(选矿部分),2020(3):85-88.
Qu Anhui, Chen Jianwen. Comparative analysis of SABC process and conventional comminution process[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2020(3):85-88.

[16] 冯裕果,余浔,赵岩森.单段半自磨工艺设计研究[J].现代矿业,2023(5):224-226.
Feng Yuguo, Yu Xun, Zhao Yansen. Study on process design of single-stage semi-autogenous grinding[J]. Modern Mining,2023(5):224-226.

[17] 周玉才,庞威,焦科诚,等.大型选矿厂 SABC 流程的选择与优化[J].有色矿冶,2017(2):41-45.
Zhou Yucai, Pang Wei, Jiao Kecheng, et al. Selection and optimization of SABC process for large concentrator[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2017(2):41-45.

[18] 周波,周显文.SABC 工艺在乌努格吐山铜钼矿的成功应用[J].矿业工程,2013,11(5):31-33.
Zhou Bo, Zhou Xianwen. Successful application of SABC process in Wunugetushan Copper-Molybdenum Mine[J]. Mining Engineering,2013,11(5):31-33.

[19] 曾明.半自磨工艺在矿山选矿中的应用现状及发展趋势[J].矿山机械,2021,49(7):32-36.
Zeng Ming. Application status and development trend of semi-autogenous grinding process in mine beneficiation[J]. Mining & Processing Equipment,2021,49(7):32-36.

[20] 陈睿哲,孙永升,刘杰,等.高压辊磨机碎磨新工艺国内外研究及应用现状[J].有色金属(选矿部分),2024(5):24-33.
Chen Ruizhe, Sun Yongsheng, Liu Jie, et al. Research and application status of new comminution process of high pressure grinding mill at home and abroad[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(5):24-33.

[21] 李九洲,王金玮,康建雄.高压辊磨机在金堆城钼矿的应用试验[J].现代矿业,2011(2):95-96.
Li Jiuzhou, Wang Jinwei, Kang Jianxiong. Application test of high pressure grinding rolls in Jinduicheng Molybdenum Mine[J].Modern Mining,2011(2):95-96.

[22] 井维和,刘伟,王越,等.乌山铜钼矿二期 SABC 碎磨流程设计及生产实践[J].黄金,2015,36(6):60-64.
Jing Weihe, Liu Wei, Wang Yue, et al. Design and production practice of SABC comminution circuit in phase Ⅱ of Wushan Copper-Molybdenum Mine[J]. Gold, 2015, 36(6):60-64.

[23] 杨远坤,廖银英,王庆金,等.浅谈 SAB 碎磨工艺在紫金矿业集团的应用[J].矿山机械,2019,47(10):44-48.
Yang Yuankun, Liao Yinying, Wang Qingjin, et al. Discussion on application of SAB comminution process in Zijin Mining Group[J]. Mining & Processing Equipment, 2019,47(10):44-48.

[24] 常亮亮,何荣权.浅析高压辊磨机在有色矿山的适用工艺[J].中国矿山工程,2020,49(3):56-58.
Chang Liangliang, He Rongquan. Analysis on the applicable technology of high pressure grinding rolls in nonferrous mines[J].China Mine Engineering,2020,49(3):56-58.

[25] 陆长龙,刘伟,洪保磊,等.常规 3 段 1 闭路+球磨与半自磨+球磨碎磨流程的方案对比[J].现代矿业,2016,32(3):92-94.
Lu Changlong, Liu Wei, Hong Baolei, et al. Scheme comparison of conventional three-stage one-closed-circuit crushing + ball milling versus SAG + ball milling comminution process[J]. Modern Mining, 2016, 32(3): 92-94.

[26] 魏波,张宪伟,李丽匣,等.高压辊磨机粉碎工艺国外应用进展与发展趋势[J].金属矿山,2022,51(2):10-18.
Wei Bo, Zhang Xianwei, Li Lixia, et al. Progress and development trend of high pressure grinding rolls comminution circuits abroad[J].Metal Mine,2022,51(2):10-18.

[27] 王吉,董新芳,徐培强,等.高压辊磨机在金矿破碎中的应用研究[J].黄金,2026,47(3):78-83.
Wang Ji, Dong Xinfang, Xu Peiqiang, et al. Application research of high pressure grinding rolls in gold ore crushing[J]. Gold, 2026, 47(3):78-83.

[28] 印万忠,侯英,丁亚卓,等.破碎方式对邦铺钼铜矿石可磨性及钼浮选的影响[J].金属矿山,2013(2):86-89.
Yin Wanzhong, Hou Ying, Ding Yazhuo, et al. Effect of different comminution processes on grindability and molybdenum flotation of Bangpu Mo-Cu ore[J]. Metal Mine,2013(2):86-89.

[29] 宋龑.半自磨工艺在大型矿山选矿中的应用[J].采矿工程,2020(5):51-52.
Song Yan. Application of semi-autogenous grinding technology in beneficiation of large mines[J]. Mining Engineering,2020(5):51-52.

[30] 刘俊,姬建钢,陈松战.磨矿装备技术发展趋势研究[J].矿山机械,2019,47(2):1-6.
Liu Jun, Ji Jian'gang, Chen Songzhan. Research on development trend of grinding equipment technology[J]. Mining & Processing Equipment,2019,47(2):1-6.