

广东某硫铁矿 SAB 碎磨工艺模拟选型研究

Research on the Simulation and Calculation of SAB Comminution
Process of a Pyrite Mine in Guangdong

吴焕勋, 孔明宇, 吴忠俊, 罗智川 (广东广业云硫矿业有限公司, 广东 云浮 527300)

摘要: 本文针对广东某硫铁矿选厂碎磨系统设备型号小、数量多,且设备陈旧落后、维护成本高的问题,进行半自磨工艺流程改造。通过矿石性质研究以及碎磨试验确定半自磨工艺模拟选型基础数据。JKSimMet 模拟确定该矿半自磨工艺磨矿设备选型结果为1台 $\phi 8.53\text{ m} \times 4.27\text{ m}$ 半自磨机,装机功率为5400 kW以及1台 $\phi 5.8\text{ m} \times 9.5\text{ m}$ 球磨机,装机功率为5400 kW。对3种不同工况条件的模拟显示,该设备规格可以处理不同硬度和细度的矿石,其产品细度基本达到设计要求。该研究结果为企业设备选型以及矿山未来生产调控提供了技术支持。

关键词: 硫铁矿; 半自磨流程; 设备选型; JKSimMet 模拟

中图分类号: TD923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)05-0057-06

Abstract: Based on the problems of old equipment, small type, large quantities, high maintenance costs, etc, technical transformation of SAG mill process was carried out on the pyrite mine in Guangdong. Simulation basic data was confirmed according to the research on ore properties and experiment results of crushing and grinding. One $\phi 8.53\text{ m} \times 4.27\text{ m}$ SAG mill (5400 kW) and one $\phi 5.8\text{ m} \times 9.5\text{ m}$ ball mill (5400 kW) were selected according to JKSimMet simulation. Simulation on three different operation conditions demonstrated that different ore with different hardness and fineness could be treated, and the fineness of grinding products could meet design requirement. This study will provide technical support for the equipment calculation and future production adjustment.

Key words: pyrite ore; SAG mill process; equipment calculation; JKSimMet simulation

1 前言

半自磨工艺流程是目前大型金属矿山应用最为广泛的碎磨工艺,半自磨工艺流程短、配置方便、易于管理,且以所磨矿石自身作为磨矿介质,降低了钢耗,在生产中能够创造较大的经济效益^[1-2]。根据所处理的矿石性质不同,半自磨流程包括粗碎+半自磨+球磨流程(SAB)、粗碎+半自磨+球磨+顽石破碎流程(SABC)、粗碎+自磨+球磨+顽石破碎流程(ABC)、单一半自磨或自磨流程(SAG或AG)等^[3-6]。半自磨工艺中半自磨机和球磨机设备选型尤为关键,目前半自磨机选型方法主要包括磨机制造商(如Metso和FLSmith)经验数据计算方法、Minovex半自磨功指数法、Outokumpu标准自磨设计试验方法、JKSimMet软件模拟计算法等。不同的选型方法都有各自优势,而其中应用最多的是JKSimMet软件模拟算法^[7-8]。

广东某硫铁矿选厂是一座生产多年的老选厂,

其碎磨作业分别采用了“四段一闭路破碎+棒磨+球磨”以及“一段粗碎+自磨+球磨”的碎磨流程,设备规格小、数量多,且设备陈旧落后,整体维护成本高。选厂当前碎磨工艺与装备水平无法适应当今选矿技术的发展要求,制约了企业发展。为此,拟采用半自磨工艺流程代替现有老旧碎磨系统,以实现设备大型化并提高碎磨作业自动化水平。本文首先对该硫铁矿矿样的矿石性质进行研究,并进行相关碎磨试验,为半自磨机与球磨机的设备模拟选型确定基础数据。此外,通过对不同工况条件的模拟来预测不同工况条件对磨矿产品的影响,为企业半自磨流程设备选型以及未来生产过程中需要采取的措施提供参考。

2 原矿性质

2.1 矿石矿物组成

该硫铁矿中主要有用矿物为黄铁矿,此外还含有少量的磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等,黄铁

[作者简介] 吴焕勋(1975—),男,高级工程师,主要从事有色金属矿碎磨与浮选技术。

[引用格式] 吴焕勋,孔明宇,吴忠俊,等.广东某硫铁矿SAB碎磨工艺模拟选型研究[J].中国矿山工程,2024,53(5):57-62.

矿大多呈他形半自形和自形晶体。脉石矿物主要为石英、方解石、绢云母,其次为石墨、透闪石、石榴石、钾长石、萤石等。

矿石中 S、Fe 的含量较高,其品位分别为 29.58% 和 25.96%,除 S、Fe 元素外,其他有价元素的含量都较低,同时矿石中 As 和 P 等有害元素的含量也较低。脉石矿物主要由 Si、Al、Ca、Mg、C 等元素组成。

2.2 矿物嵌布特征

矿石中黄铁矿的含量较高,黄铁矿嵌布粒度较粗,但粗粒黄铁矿中常嵌布有脉石矿物,一定量微细粒脉石矿物多呈包裹体的形式与黄铁矿紧密共生,细粒自形黄铁矿也常嵌布在脉石矿物中。

黄铁矿在条带状矿石中嵌布粒度不均匀,粗者可达 0.50 mm 以上,细者则小于 0.010 mm。在 +0.147 mm 粒级中的占有率为 32.74%,在 +0.074 mm 粒级中的占有率为 66%,在 -0.043 mm 粒级中的占有率为 16.45%,细磨矿条件下绝大多数黄铁矿可以实现单体解离。

2.3 矿石结构构造

矿石结构以晶粒状结构为主,按结晶完好程度又分为半自形晶和自形晶结构。其次有碎裂结构、乳交代溶蚀结构和包含结构等。

矿石构造主要为条带状和致密块状构造,其次有浸染状构造、粉状构造、角砾状构造等。

2.4 矿石主要物理性质

1) 矿石密度

矿石平均为 3.60 t/m³,岩石平均为 2.79 t/m³。

2) 硬度

根据矿体赋存条件和矿岩的物理机械性质,矿石的 f 硬度系数平均为 6~17,块状黄铁矿 4~17,平均 15;条带状黄铁矿 3~16,平均 13。岩石的 f 系数分别为:石英岩 20~10,平均 15,变质千枚岩 1~5,平均 3。

3) 矿石含水率

块矿 0.5%~3%,平均 1.5%;粉矿 1.5%~5%,平均 2.5%。

3 碎磨试验

试验共采取了 3 个试验样品,分别为 IV 矿样、III 矿样和块粉矿样。III 矿样占比 13%,IV 矿样占比 80%,块粉矿样的硬度较软占比 7%。对 IV 矿样进行 DW 落重试验、BOND 金属磨损指数试验和

BOND 球磨功指数试验,对 III 矿样和块粉矿样进行 SMC 落重试验、BOND 金属磨损指数试验和 BOND 球磨功指数试验。三个矿样试验结果汇总表 1。

表 1 三个矿样试验结果汇总表

名称	代号	单位	III 矿样	IV 矿样	块粉矿样
矿体比例	/	%	13	80	7
矿体比重	SG	/	4.05	4.13	3.76
JK 落重试验	A	/	100.0	79.3	81.1
	b	/	0.32	0.57	1.01
	A × b	/	32.0	45.2	81.9
	ta	/	0.20	0.39	0.56
	DWi	kWh/m ³	12.6	/	4.6
	Mia	kWh/t	21.5	/	10.4
	Mih	kWh/t	18.0	/	7.1
	Mic	kWh/t	9.3	/	3.7
磨蚀指数	Ai	g	0.259 0	0.371 4	0.135 6
球磨功指数	BWi@90μm	kWh/t	13.22	11.16	10.83

表中参数 A × b 表示矿石的可破碎性。A × b 值越小,矿石越难破碎;反之,A × b 值越大,矿石越易破碎。Bond 球磨功指数表示矿石的可磨性。BWi 值越小,矿石越易磨;BWi 值越大,矿石越难磨。

从试验数据可以看出,矿石性质有明显变化,具体表现为:

(1) 可破碎性参数 A × b 范围为 32~81.9,矿石可破碎性分布范围从很软到很硬,表明矿体内矿石性质还是存在变化的。

(2) Bond 功指数变化范围为 10.83~13.32 kWh/t。

(3) 根据矿样试验数据,矿石性质主要表现出如下特点:

IV 矿样的 DW 试验参数为 A × b = 45.2,矿石的抗冲击破碎能力属于“中等”,Bond 球磨功指数 BWi@90μm = 11.16 kWh/t,矿石的抗研磨能力属于“中等”;

III 矿样的 SMC 试验参数为 A × b = 32.0,矿石的抗冲击破碎能力属于“硬”,Bond 球磨功指数 BWi@90μm = 13.22 kWh/t,矿石的抗研磨能力属于“中等”;

块粉矿样的 SMC 试验参数为 A × b = 81.9,矿石的抗冲击破碎能力属于“软”,Bond 球磨功指数 BWi@90μm = 10.83 kWh/t,矿石的抗研磨能力属于

“中软”。

3个矿样相比,Ⅲ矿样硬度最高,最难磨;块粉矿样的硬度最低,最容易研磨;Ⅳ矿样硬度、可磨性居中。

(4)通过试验研究,确定该硫铁矿适合半自磨工艺。根据试验数据、矿石性质、矿石配比等因素开展半自磨工艺流程模拟和磨机选型。

4 选型基础数据分析

4.1 给矿粒度 F_{80} 选取

该硫铁矿设计日处理原矿能力为 10 000 t/d,粗碎设备选用 5065 旋回破碎机,将有利于控制粗碎产品粒度。根据设备样本粒度曲线与项目经验,旋回破碎机粗碎产品粒度较细。结合矿石硬度情况,从满足 SAB 系统生产实际角度考虑,选取 $F_{80} = 150$ mm 作为本次选型的基本参数。

4.2 产品细度 P_{80} 选取

对现场进行了 4 次最终磨矿产品细度考察,结果如图 1 所示。根据考察结果可知,目前实际生产的平均磨矿细度为 -0.074 mm 粒级含量占 75.12%,对应 $P_{80} = 85.67 \mu\text{m}$ 。该项目要求的产品

粒度为 -0.074 mm 粒级含量占 82%,对应 $P_{80} \approx 70 \mu\text{m} \sim 72 \mu\text{m}$ 。因此,本研究进行模拟时最终磨矿产品细度设定为 $P_{80} = 70 \mu\text{m}$ 。

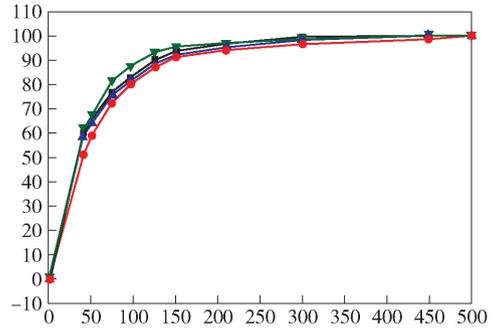


图 1 生产磨矿细度考察

4.3 $A \times b$ 值、 t_a 值、球磨邦德功指数选取

针对 3 个矿样进行了测试,分别获得的 $A \times b$ 值、 t_a 值、球磨邦德功指数见表 2。本次将按照占比 80% 的Ⅳ矿样参数进行模拟选型,并在此基础上针对处理三个矿样的加权平均值、最硬矿石时的工况进行模拟,为今后生产中根据矿石性质的变化进行调节提供技术支撑。

表 2 磨矿系统选型关键参数选取表

名称	参数	Ⅳ样	Ⅲ样	无标识样	平均值	加权平均值	备注
矿石密度	SG/(t/m ³)	4.13	4.09	4.05	4.09	4.12	
	A	79.3	100	81.1	86.8	82.1	
	b	0.57	0.32	1.01	0.63	0.57	
JK 参数	$A \times b$	45.2	32.0	81.9	53.04	46.67	
	t_a	0.39	0.2	0.56	0.38	0.38	
球磨功指数	BWI(kWh/t)	11.16	13.22	15.80	11.7	11.4	

4.4 半自磨和球磨参数选取

根据该矿矿石性质,并结合以往模拟工艺参数的经验,分别对该碎磨流程中主要关键设备,即半自磨机和球磨机的运行参数进行了选取,结果如下。

1) 半自磨机工艺参数

钢球充填率为 13%;转速:临界转速的 75%;矿浆浓度 80%;砾石尺寸:64 mm;筛分尺寸:12.7 mm;顽石循环率:15%~25%。

2) 球磨机工艺参数

给料粒度 $F_{80} \approx 1.5$ mm;球磨邦德功指数:11.16 kWh/t;钢球充填率 28%~23%;转速:临界转速的 75%;矿浆浓度 75%;循环负荷:240%~260%;磨矿产品 $P_{80} = 70 \mu\text{m}$ 。

4.5 磨机衬板厚度及装机功率

半自磨机和球磨机模拟需要考虑其它参数,比如确定半自磨机和球磨机是采用新村板、半磨损衬板还是全磨损衬板时的有效尺寸进行模拟。本次模拟计算时,采用新村板。

根据本项目前面的 $A \times b$ 值、 t_a 值和球磨机邦德功指数的选取适中,衬板选取、钢球充填率选取适中,因此考虑半自磨机和球磨机的整体系数按照半自磨机轴功率为装机功率的 86%,球磨机取值为 90%。

5 JK 模拟选型

5.1 模拟基础参数

根据原矿性质、碎磨试验数据以及选型基础数

据的分析,确定该矿 SAB 碎磨流程模拟基础参数见表 3。

5.2 选型结果

该硫铁矿碎磨工艺采用 SAB 流程,利用

JKSimMet 软件进行了模拟选型,JK 模拟流程如图 2 所示。本次磨矿设备选型结果为:半自磨机:1 台 $\phi 8.53 \text{ m} \times 4.27 \text{ m}$,装机功率 5 400 kW;球磨机:1 台 $\phi 5.8 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$,装机功率 5 400 kW。

表 3 SAB 碎磨流程磨机选型基础参数

名称	代号	单位	参数	备注	
工艺参数	流程			SAB	
	系列数			1	
	处理能力	Q	t/h	416.67	10 000 t/d
	给料粒度	F ₈₀	mm	150	
	产品粒度	P ₈₀	μm	70	-0.074 mm 占 82%
	半自磨矿浆浓度		%	80	
	球磨机矿浆浓度		%	75	
试验参数	矿石密度	SG	t/m ³	4.09	
	SMC	A		79.3	
		b		0.57	
		A × b		45.2	
	t _a		0.39		
球磨功指数	BWI	kWh/t	11.16		
半自磨机设备参数	端盖斜角		(°)	15	
	转速率		%	75	
	钢球充填率		%	13	
	砾石孔尺寸		mm	64	
	顽石循环率		%	15 ~ 25	
	筛分尺寸		mm	12.7	
	安装功率系数			0.86	
球磨球设备参数	端盖斜角		(°)	22.5	
	转速率		%	75	
	钢球充填率		%	28 ~ 32	
	循环负荷		%	240 ~ 260	
	安装功率系数			0.9	

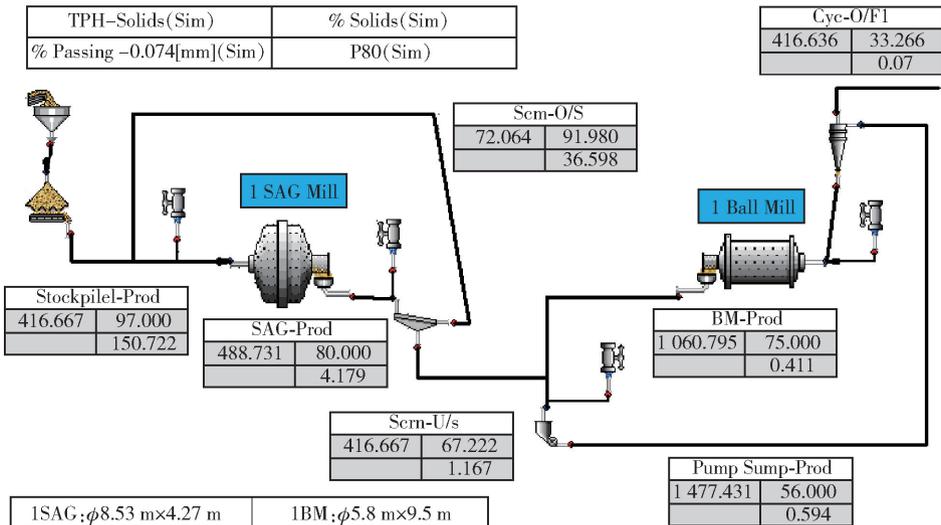


图 2 JKSimMet 模拟流程图 (SIM-01)

5.3 工况模拟

该硫铁矿矿石可碎性、可磨性差异较大,服务年限长,为了更好的分析和了解不同工况下半自磨机系统的运行状态,对以下工况的模拟对比分析。模拟的编号和说明如下。

(1)SIM-01:基于Ⅲ矿样的参数进行计算,模拟

处理硬矿石工况如图2所示。

(2)SIM-02:基于Ⅳ矿样的参数进行计算,模拟处理占比80%矿样的工况,具体如图3所示。

(3)SIM-03:基于3个试验样的加权平均参数进行计算,模拟该设备规格处理最大的平均矿量,具体如图4所示。

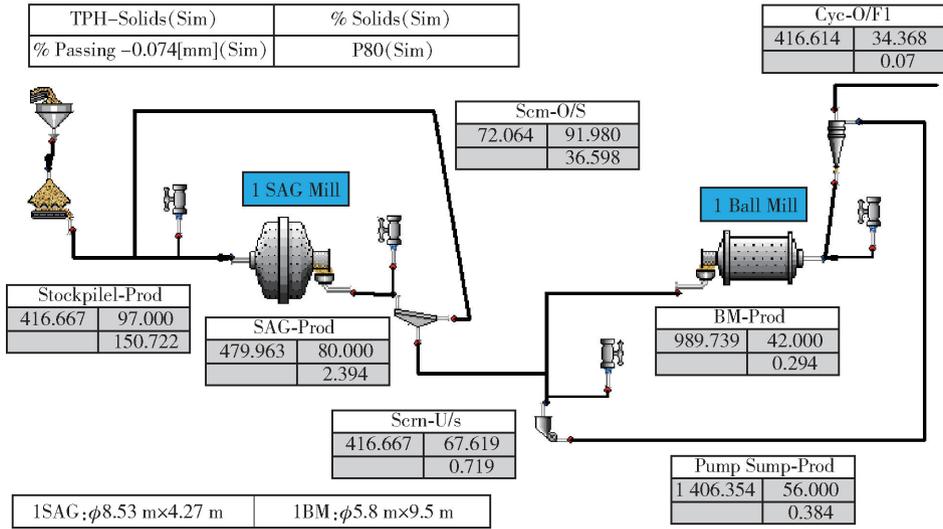


图3 JKSimMet 模拟流程图(SIM-02)

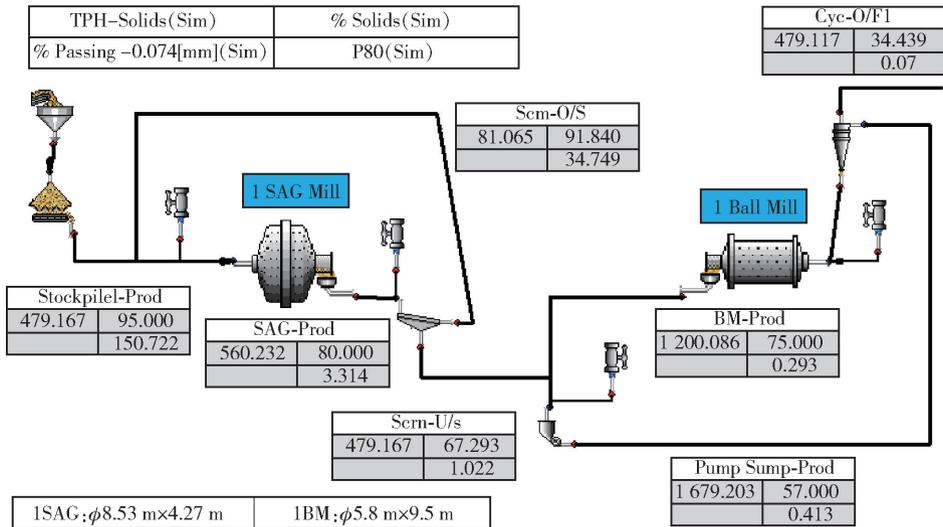


图4 JKSimMet 模拟流程图(SIM-03)

JKSimMet 模型不同工况的结果见表4、表5和表6。

通过对3种不同工况条件的模拟可知,调整钢球尺寸、装球率、筒体转数、顽石产率等相关参数,该设备规格可以处理不同硬度和细度的矿石,其产品细度基本达到设计要求。另外,在衬板使用寿命的周期内,磨机的能力也是波动的,建议将来生产时,有计划地开采硬矿石。

6 结论

(1)原矿矿石性质研究结果表明该硫铁矿中主要有用矿物为黄铁矿,脉石矿物主要为石英、方解石、绢云母,黄铁矿嵌布粒度相对较粗,矿石整体上属于中等硬度矿石。

(2)矿石碎磨试验结果表明该硫铁矿大部分矿石抗冲击破碎能力属于“中等”,抗研磨能力也属于

表4 SAB系统半自磨模拟结果

模拟	Axb	衬板	规模/ t·d ⁻¹	F ₈₀ / mm	规格型号(F/F)			计算 功率/ kW	功率需求			钢球 直径/ mm	装球 率/ %	临界 转数/ %	顽石 量/ %	排矿 浓度/ %	格子 孔/ mm	T ₈₀ / μm
					台数	直径/m	长度/m		kW	kW	kWh/t							
SIM-01	32	新衬板	10 000	150	1	8.53	4.27	4 599	5 348	12.8	Φ120	12	75	17	80	64	1 167	
SIM-02	45.2	新衬板	10 000	150	1	8.53	4.27	4 289	49 87	12.0	Φ120	8.5	75	15	80	64	719	
SIM-03	46.7	新衬板	11 500	150	1	8.53	4.27	4 621	5 373	11.2	Φ120	12.5	75	17	80	64	1 022	

表5 SAB系统球磨机模拟结果

模拟	BWi	衬板	规模/ t·d ⁻¹	F ₈₀ / mm	规格型号(F/F)			计算 功率/ kW	功率需求			钢球 直径/ mm	装球 率/%	临界 转数/ %	循环 量/ %	排矿 浓度/ %	P ₈₀ / μm
					台数	直径/m	长度/m		kW	kW	kWh/t						
SIM-01	13.22	新衬板	10 000	1 167	1	5.8	9.5	4 789	5 149	12.4	Φ50	30	75	255	75	33	
SIM-02	11.16	新衬板	10 000	719	1	5.8	9.5	4 537	4 878	11.7	Φ50	28	75	238	75	34	
SIM-03	11.4	新衬板	11 500	1 022	1	5.8	9.5	5 160	5 548	11.6	Φ50	33	75	250	75	34.4	

表6 SAB系统磨机模拟结果

模拟	规模/ t·d ⁻¹	F ₈₀ / mm	P ₈₀ / μm	半自磨机					球磨机					总装机 功率/ kW	单位安 装功率/ kW·h/t	安装功 率比 SAG/BM
				规格型号(F/F)			安装 功率/ kW	负荷 率/ %	规格型号(F/F)			安装 功率/ kW	负荷 率/ %			
				台数	直径/ m	长度/ m			台数	直径/ m	长度/ m					
							功率/ kW	率/ %				功率/ kW	率/ %			
SIM-01	10 000	150	70	1	8.53	4.27	5 400	85	1	5.8	9.5	5 400	89	10 800	25.9	1.00
SIM-02	10 000	150	70	1	8.53	4.27	5 400	79	1	5.8	9.5	5 400	84	10 800	25.9	1.00
SIM-03	11 500	150	70	1	8.53	4.27	5 400	86	1	5.8	9.5	5 400	96	10 800	22.5	1.00

“中等”,此外也有少量的抗冲击破碎能力较强的硬矿石。

(3)通过对3种不同工况条件的模拟可知,调整钢球尺寸、装球率、筒体转数、顽石产率等相关参数,该设备规格可以处理不同硬度和细度的矿石,其产品细度基本达到设计要求。

(4)本次磨矿设备选型结果为1台φ8.53 m×4.27 m半自磨机,装机功率为5 400 kW以及1台φ5.8 m×9.5 m球磨机,装机功率为5 400 kW。

[参考文献]

[1] 杨松荣,蒋仲亚,刘文拯. 碎磨工艺及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2013.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 肖庆飞,康怀斌,肖琿,等. 碎磨技术的研究进展及其应用[J]. 铜业工程,2016(1):15-27.

[5] 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.

[6] 马帅,肖庆飞,赵福刚,等. 半自磨流程的发展及应用[J]. 矿产保护与利用,2020,40(4):167-171.

[7] 杨松荣. 半自磨球磨磨回路设备计算及选型[J]. 中国矿山工程,2019,48(2):46-51.

[8] 邹毅仁,罗良烽. JKSimMet软件在半自磨机选型上的应用[J]. 有色设备,2015,29(1):20-25.