

综合技术

某 SABC 碎磨工艺模拟选型探讨

Discussion on the Simulation Calculation of SABC Comminution Process

邹毅仁, 何荣权, 邓朝安, 杨少燕(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文针对某复杂组分钼矿石,对其碎磨试验的数据进行了合理分析,拟定了关键设计参数,对 SABC 碎磨工艺中关键设备进行模拟选型。通过模拟七种不同工况下的运行状态,预测了矿山开采过程中由于矿石性质变化对碎磨系统产能的影响,为今后生产调节提供了技术支持。

关键词:SABC; 碎磨工艺; 模拟选型

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)02-0070-07

Abstract:In this paper, the data of comminution characterization test of molybdenum ore with complex components are analyzed, and the key design parameters are determined, then the key equipment in SABC comminution process is simulated. By simulating seven different operating conditions, the influence of ore property change on grinding system productivity in mining process is predicted, which provides technical support for the future production adjustment.

Key words:SABC; comminution process; simulation calculation

1 前言

SABC 碎磨工艺是目前大型有色矿山中应用最广泛的工艺流程,也是选矿工程中基建投资最大、生产费用占比最高的环节。SABC 碎磨工艺的核心装备是半自磨机和球磨机,目前半自磨机选型方法较多,主要有磨机制造商(如 Metso 和 FLSmith)的经验数据计算方法;Minovex 的半自磨功指数法(SAG Power);SMCC 的 DW 法;Outokumpu 的标准自磨设计(SAGDesign)试验方法;JKSimMet 软件模拟算法;Fluor 公司的磨矿功率法(Grindpower)^[1]。在不同的项目中,结合工程设计的实际情况,选用不同方法或多种方法结合使用,相互验证,其中应用最多的是 JKSimMet 模拟算法。

有色金属矿山服务年限长,矿石种类多,性质波动大,因此在项目建设前期的设备选型计算是需要综合考虑生命周期内的处理矿石的性质变化。国内针对 SABC 碎磨工艺的选型方法或案例分析的文献较多,但对于矿样的代表性分析、试验数据处理,生

产能力预测等研究相对较少。通常科学合理的选型步骤:首先需要根据地质模型,开采计划,采取有代表性矿样进行碎磨试验;其次对试验参数进行分析,确定用于设备选型的关键参数,以及关键变量;再次进行设备模拟选型,确定合理的设备规格;最后是模拟不同工况下的变量,为今后生产过程的调节提供技术支持^[2]。

某大型钼矿床主要岩石类型为安山玢岩和花岗岩斑岩,其可磨度差异较大,因此根据两种矿岩的占比进行了取样,并开展了大量的碎磨专项试验。本文针对该矿拟定的 SABC 碎磨工艺进行了试验数据处理与模拟选型计算。

2 基础数据及分析

2.1 试验测试数据

已完成的碎磨专项试验主要有 DW 试验(Drop-Weight Test)、SMC 试验(SAG Comminution Test)、Bond 功指数试验和磨蚀试验,获得了大量的矿石特性参数。根据所用样品岩性的分析,共筛选出 34 组有效数据,包括 A 、 b 、 t_a 、密度、功指数等,具体数据见表 1。

2.2 关键参数分析与取值

1) A 值

参数 A 表征矿石在某一能量破碎过程中,所能

[作者简介] 邹毅仁(1981—),男,湖南涟源人,高级工程师,从事选矿工程咨询设计工作。

[引用格式] 邹毅仁,何荣权,邓朝安,等. 某 SABC 碎磨工艺模拟选型探讨[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):70-76.

表1 样品试验数据表

序号	岩性	A	b	$A \times b$	t_a	密度/ $t \cdot m^{-3}$	BWI/ $kWh \cdot t^{-1}$
1	安山玢岩	61.4	0.9	55.3	0.53	2.68	10.3
2	花岗斑岩	66.7	1.26	84	0.82	2.64	12.3
3	安山玢岩	76.4	0.38	29	0.26	2.86	14.0
4	安山玢岩 + 花岗斑岩	60.8	1.59	96.7	0.92	2.72	10.6
5	花岗斑岩	74.7	0.79	59	0.58	2.63	12.6
6	安山玢岩	100	0.27	27	0.24	2.88	16.8
7	安山玢岩	100	0.23	23	0.21	2.87	15.2
8	安山玢岩	62.4	1.1	68.6	0.65	2.74	11.8
9	花岗斑岩	71.3	1.1	78.4	0.77	2.63	12.7
10	花岗斑岩	71	1	71	0.69	2.66	13.4
11	花岗斑岩	74.7	0.78	58.3	0.57	2.66	13.2
12	花岗斑岩	73.4	0.9	66.1	0.64	2.68	13.6
13	安山玢岩	57.5	0.63	36.2	0.32	2.89	13.3
14	花岗斑岩	83	0.43	35.7	0.35	2.63	12.2
15	安山玢岩	63.3	0.56	35.4	0.33	2.76	15.5
16	安山玢岩	65	0.64	41.6	0.37	2.94	16.9
17	安山玢岩	84.5	0.38	32.1	0.29	2.82	14.3
18	安山玢岩	77.8	0.42	32.7	0.3	2.8	14.1
19	安山玢岩	77.9	0.37	28.8	0.26	2.87	13.4
20	安山玢岩	81.8	0.34	27.8	0.25	2.88	13.1
21	安山玢岩	59.1	0.96	56.7	0.52	2.81	14.9
22	安山玢岩	76.3	0.48	36.6	0.33	2.87	14.5
23	安山玢岩	85.4	0.36	30.6	0.28	2.86	14.8
24	安山玢岩	60.9	0.99	60.3	0.56	2.79	13.2
25	安山玢岩	68.7	0.45	30.9	0.29	2.77	12.8
26	安山玢岩	81.8	0.34	27.8	0.25	2.84	12.7
27	安山玢岩	68.7	0.46	31.6	0.29	2.87	15.1
28	安山玢岩	75	0.35	26.3	0.23	2.96	14.5
29	安山玢岩	68.2	0.47	32.1	0.29	2.84	13.2
30	安山玢岩	86.4	0.27	23.3	0.21	2.89	15.7
31	安山玢岩	64.8	0.72	46.7	0.44	2.74	13.4
32	安山玢岩	71	0.54	38.3	0.36	2.78	13.1
33	花岗斑岩	96.5	0.8	84	0.82	2.64	12.3
34	安山玢岩	57.3	0.6	29	0.26	2.86	14.0

注:表中序号并非试验顺序,仅为有效数据顺序编码。在后续数据分析中,将根据试验参数的特性进行重排。

达到的最细细度, A 值越大,表示矿石在同样能级下产生的细粒级越多^[3]。

试验数据的 A 值分析结果如图1所示。 A 值集中分布在60~90,其最小值57.3,最大值100,平均值73.7,中位值71.3。由分析可知,相对于 b 值, A

值的变化相对稳定,拟选取平均值(73.7)进行选型计算。

2) b 值

参数 b 表征矿石在某一能量破碎过程中,达到平衡的速度有多快, b 值越大,表示破碎过程完成的

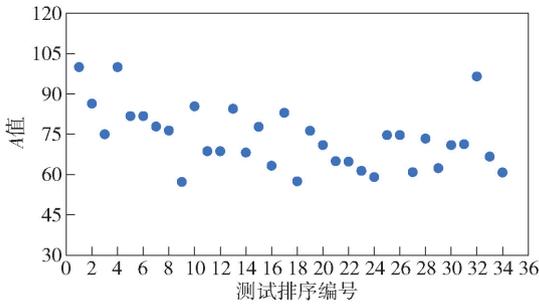


图1 A值数据分析图

速度越快。

试验数据 b 值分析结果如图 2 所示。 b 值变化曲线近似拟合为一个指数函数, 拟合度达到 98.32%。按照此拟合曲线对矿样的 b 值进行计算, 计算结果见表 2。由分析可知, 相对于 A 值, b 值波动较大, 因此可以先分析 A 值和 $A \times b$ 值, 然后再确

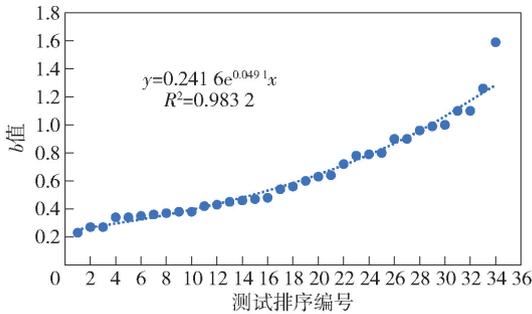


图2 b值数据分析图

定 b 值。

表2 b值数据取值表

参数	最小值	最大值	平均值	拟合函数				
				T_{20}	T_{50}	T_{70}	T_{80}	T_{90}
b	0.23	1.59	0.64	0.34	0.56	0.78	0.92	1.09

3) $A \times b$ 值

$A \times b$ 值用于评价矿石的可破碎性, 体现碎磨过程中, 钢球对矿石、矿石对矿石的冲击破碎机理。 $A \times b$ 值越小, 表示矿石的抗冲击破碎能力越强, 越难破碎。

试验数据 $A \times b$ 值的分析结果如图 3 所示和表 3。 $A \times b$ 值变化曲线近似拟合为一个多项式函数, 拟合度达到 98.28%。按照此拟合曲线对矿样的 $A \times b$ 数值进行了模拟计算, 计算结果见表 4。

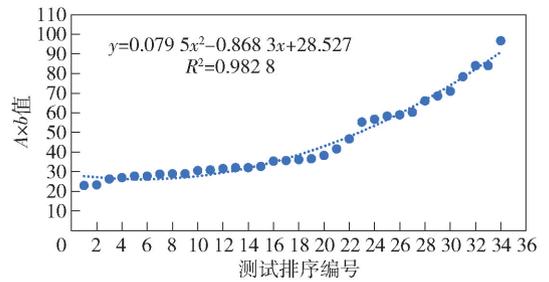


图3 A x b值数据分析图

表3 A x b值数据区间分布表

$A \times b$	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100
个数	9	11	2	4	3	2	2	1
占比/%	26	32	6	12	9	6	6	3

表4 A x b值数据取值表

参数	最小值	最大值	平均值	中位值	拟合函数						
					T_{20}	T_{30}	T_{40}	T_{50}	T_{60}	T_{70}	T_{80}
$A \times b$	23	96.7	45.3	35.70	63.7	52.9	43.9	36.7	31.4	27.9	26.3

$A \times b$ 值是影响半自磨机选型结果的核心参数, 其值波动较大, 最终选型结果应体现相应参数调节来适应今后生产过程中的波动情况, 因此需要针对不同的 $A \times b$ 值进行模拟。从表 3 可知 $A \times b$ 值小于 40 的样本占 58%, 大于 40 的样本占 42%, 矿石偏硬, 可选中位值 (35.7) 进行初始模拟。结合上述分析得到的 A 值 73.7, 可计算出 b 值为 0.49。

4) t_a 值

t_a 为低能量研磨函数, 可表征钢球与矿石、矿石与矿石之间的磨剥破碎机理, 其值越小, 表明矿石抗研磨能力越强。

试验数据 t_a 分析结果见表 5。样品 t_a 值分布在 0.21 ~ 0.92。60th ~ 80th 变化缓慢, 拟选取 80th (0.26) 参与模拟计算。

表5 t_a 数据取值表

参数	最小值	最大值	平均值	T_{50}	T_{60}	T_{70}	T_{80}
t_a	0.21	0.92	0.43	0.33	0.29	0.28	0.26

5) 矿石密度

试验数据矿石密度分析结果见表6。样品的矿石密度分布在2.63~2.96 t/m³,平均值2.79 t/m³,拟选取平均值参与模拟计算。

表6 矿石密度数据取值表

参数	最小值	最大值	平均值	中位值	T_{80}
密度/t·m ⁻³	2.63	2.96	2.79	2.80	2.87

6) Bond 功指数

样品 Bond 功指数 BWI(Bond Work Index)测试

表7 Bond 功指数取值表(kWh/t)

参数	最小值	最大值	平均值	中位值	拟合函数				
					T_{50}	T_{60}	T_{70}	T_{80}	T_{90}
功指数	10.3	16.9	13.6	13.4	13.56	14.05	14.53	15.02	15.50

根据上述测试结果分析,本矿样的特性参数“BWI”与“A×b”之间并未体现显著相关性。这为矿石的可碎性和可磨性分开处理创造了条件,使得在今后生产中可针对矿石性质的变化,实施半自磨机和球磨机做功比的分配调节提供了可能,强化了碎磨系统对矿石性质波动的适应性。本矿山为大规模露天开采,作业面较多,可通过调整出矿点均衡矿石可磨性,因此选型时无需考虑同时兼顾处理极难碎和极难磨的供矿。拟选取 T_{80} 值(15.02 kWh/t)参与模拟选型计算。

7) 原矿粒度

对粗碎产品进行过多次粒度分析,根据测试的平均值绘制粒度曲线,结果如图5所示。由图分析可知,原矿粒度 $F_{80} = 130$ mm,40 mm 以下约占40%,表明细粒级含量较多,大粒度矿石含量较少。处理这类粒度特征的矿石需要增加半自磨机钢球的充填率,提高冲击破碎效率。

2.3 数据处理要点

碎磨试验关键参数的取值,可显著影响SABC碎磨工艺中最终的设备选型。如果取值过于保守,将导致建设投资过大;如果过于激进,将不利于今后达产达标。碎磨试验数据取值应注意如下几点:

(1)一般矿样的可碎性和可磨性特性变化并不

数据如图4所示,最小值10.3 kWh/t,最大值16.9 kWh/t。BWI值变化曲线近似拟合为一个一次函数,拟合度达到91.94%。按照此拟合曲线对矿样的功指数进行了模拟计算,计算结果见表7。

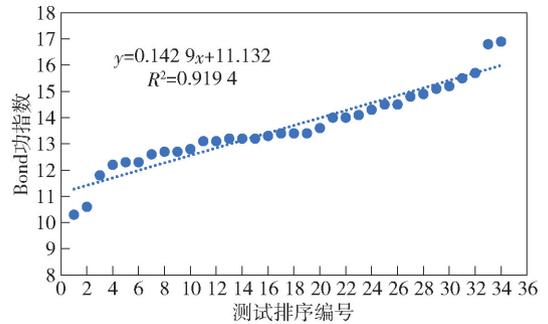


图4 Bond 功指数数据分析图

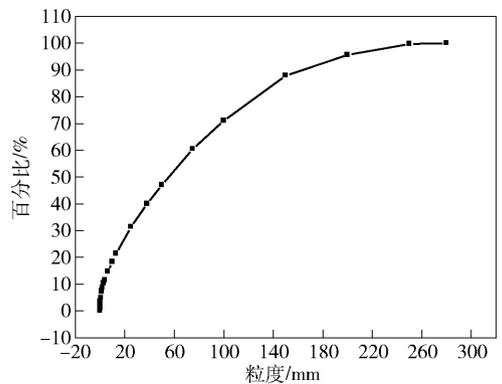


图5 原矿粒度分析曲线

同步,A×b值小,并不意味着BWI也随之变大,所以取值时需要综合考虑,避免选型过大。特别是大型露天采矿,出矿点较多,有条件实现部分配矿。另半自磨机和球磨机的做功也可进行一定程度调节分配。本文试验样本数据多,若参数选极大值,必然将导致选型过大,造成投资浪费。

(2)原矿中粉矿含量较多,大粒度矿石含量较少,这类矿石自身难以起到介质的作用。根据本矿石特性,模拟选型时应适当加大半自磨机钢球尺寸和装球率,提高破碎效率。

(3)生产中磨机衬板将受到钢球和块矿的冲击,以及矿石的磨蚀作用,逐渐磨损消减。衬板厚度是影

响磨机的有效容积计算的,一般模拟选型时,若选取半磨损衬板厚度参数计算容积时,对应功率系数应取小值;若选取新衬板厚度参数计算时,对应功率系数应取大值,以此原则来确保驱动与选型规格的匹配。

(4)通常情况,若试验参数取值激进(如取中间值),可以考虑矿量波动系数;若参数取值偏保守(如取80th值),则可不考虑矿量波动系数。

3 JK 模拟选型

3.1 基础参数

依据试验数据分析结果,结合工艺条件,确定本次选型基础参数见表8。

表8 模拟选型基础参数表

名称	代号	单位	参数	备注	
流程			SABC		
系列数			1		
工艺参数	处理能力	Q	t/h	1 250	30 000 t/d
	给料粒度	F ₈₀	mm	130	
	产品粒度	P ₈₀	μm	135	-0.074 mm 占65%
半自磨矿浆浓度	C	%	75		
球磨机矿浆浓度	C	%	75		
试验参数	矿石密度	SG	t/m ³	2.79	平均值
		A		73.7	平均值
		b		0.5	计算值
	SMC	A × b		35.7	中位值
		t _a		0.26	80 th
球磨功指数	BWI	kWh/t	15.02	80 th	
半自磨机设备参数	端盖斜角	°	15		
	转速率	%	76		
	钢球充填率	%	13~14	处理极硬矿石 时可到15%	
	砾石孔尺寸	mm	64		
	顽石循环率	%	20~25		
	筛分尺寸	mm	12.7		
	安装功率系数		0.85		
球磨球设备参数	端盖斜角	°	22.5		
	转速率	%	75		
	钢球充填率	%	30	处理难磨矿石 时可到33%	
	循环负荷	%	240~260		
	安装功率系数		0.9		

3.2 选型结果

利用JKSimMet软件对SABC碎磨流程进行了模拟,结果如图6所示。通过模拟计算设备选型结果为:1台φ10.36 m × 6.1 m半自磨机,装机功率2 × 6 600 kW;1台φ7.32 m × 12 m球磨机,装机功率2 × 6 600 kW。

φ10.36 m × 6.1 m半自磨机装球率与运行轴功率关系如图7所示。φ7.32 m × 12 m球磨机装球率与运行轴功率关系如图8所示。

3.3 工况模拟

根据试验结果分析可知,矿石的可碎性、可磨性差异较大,后续面临着开采方式的变化,且矿山整体服务年限长,为了更好的分析和了解不同工况下碎磨系统的运行状态,对以下7种工况进行JK模拟对比分析。模拟的编号和说明如下:

(1)SIM-01:基于试验数据分析选取的关键参数来模拟计算。

(2)SIM-02、03、04:基于中等矿石模拟。具体数值为:A × b = 45.3; t_a = 0.43; BWI = 14.53 kWh/t; 其中02对应为新衬板,03为半磨损衬板,04为全磨损衬板。

(3)SIM-05、06、07:基于硬矿石模拟。具体数值为:A × b = 27.9; t_a = 0.26; BWI = 16.9 kWh/t; 其中05对应为新衬板,06为半磨损衬板,07为全磨损衬板。

不同工况下半自磨机和球磨机模拟计算结果见表8、表9。

通过对7种工况条件的模拟可知,该选型在基本参数条件下的最大处理能力为34 000 t/d;在处理硬矿石时,仅在衬板全磨损的状态下才能达到30 000 t/d,此时球磨机负荷率达到97%。因此,建议在后续实际生产中应经常开展SABC回路的流程考察,关注矿石性质的变化,不断优化工艺参数,实现半自磨机的高效运行。

4 结论

(1)有色金属矿山矿石种类多样,矿石性质多变,SABC碎磨工艺的模拟选型,需要结合试验研究与工程设计两个方面综合分析。从矿样的代表性,试验数据处理,产能调节等因素考虑后合理地拟定计算的关键参数,这样模拟计算出的系统选型才是可靠的。

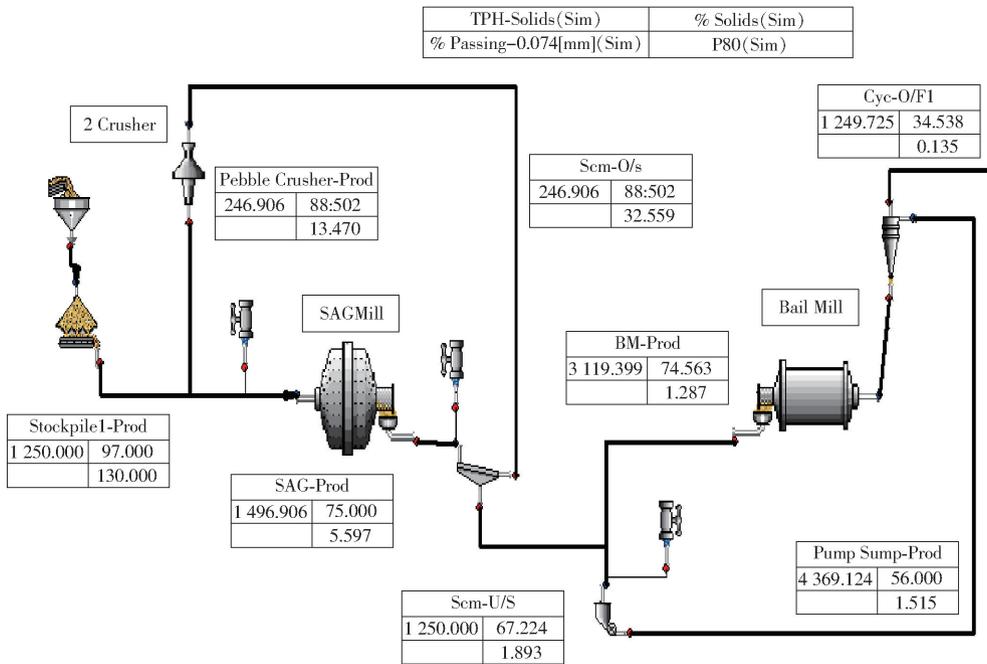


图6 JKSimMet 模拟流程图(SIM-01)

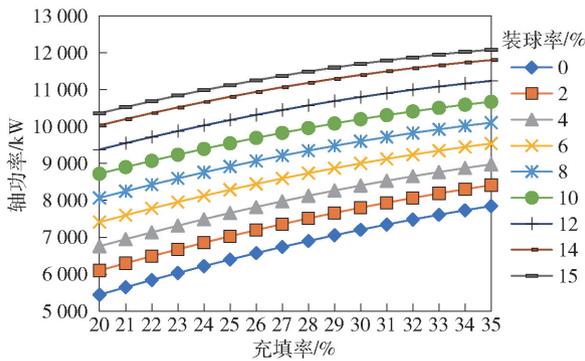


图7 $\phi 10.36\text{ m} \times 6.1\text{ m}$ 半自磨机装球率与运行轴功率关系(半磨损衬板)

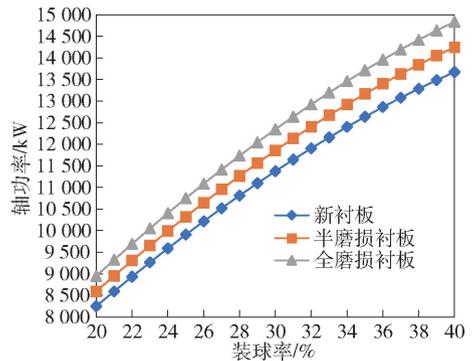


图8 $\phi 7.32\text{ m} \times 12\text{ m}$ 球磨机装球率与运行轴功率关系(75%临界转数)

表8 不同工况下半自磨模拟计算结果

模拟	A × b	衬板	规模 t/d	F ₈₀ / mm	规格型号(F/F)		安装 功率/ %	计算 功率/ kW	负荷 率/ kW	安装 功率/ mm	计算 功率/ %	转数/ %	顽石 量/ %	排矿 浓度/ %	格子 孔/ mm	T ₈₀ / μm	
					台数	kW											
SIM-01	35.7	半磨	30 000	130	1	13 200	11175	85	13 200	11 175	φ130	14	76	20	75	64	1 893
SIM-02	45.3	新	32 500	130	1	13 200	10 700	81	13 200	10 700	φ130	14	76	19	75	64	1 533
SIM-03	45.3	半磨	33 500	130	1	13 200	11 134	84	13 200	11 134	φ130	14	76	18	75	64	1 507
SIM-04	45.3	全磨	34 000	130	1	13 200	11 560	88	13 200	11 560	φ130	14	76	18	75	64	1 457
SIM-05	27.9	新	28 000	130	1	13 200	11 316	86	13 200	11 316	φ130	15	76	24	75	64	2 361
SIM-06	27.9	半磨	29 000	130	1	13 200	11 788	89	13 200	11 788	φ130	15	76	24	75	64	2 328
SIM-07	27.9	全磨	30 000	130	1	13 200	12 273	93	13 200	12 273	φ130	15	76	23	75	64	2 281

表9 不同工况下球磨机模拟计算结果

模拟	BWI	衬板	规模 t/d	F ₈₀ / mm	规格型号(F/F)			安装 功率/ %	计算 功率/ kW	负荷 率/ kW	安装 功率/ mm	计算 功率/ %	转数/ %	循环 量/%	排矿 浓度/ %	P ₈₀ / μm
					台数	kW	kW									
SIM-01	15.02	半磨	30 000	1 893	1	13 200	11 781	89	13 200	11 781	φ60	30	75	250	75	135
SIM-02	14.53	新	32 500	1 533	1	13 200	11 363	86	13 200	11 363	φ60	30	75	260	75	135
SIM-03	14.53	半磨	33 500	1 507	1	13 200	11 781	89	13 200	11 781	φ60	30	75	255	75	135
SIM-04	14.53	全磨	34 000	1 457	1	13 200	12 176	92	13 200	12 176	φ60	30	75	245	75	135
SIM-05	16.9	新	28 000	2 361	1	13 200	12 228	93	13 200	12 228	φ60	33	75	265	75	135
SIM-06	16.9	半磨	29 000	2 328	1	13 200	12 678	96	13 200	12 678	φ60	33	75	263	75	135
SIM-07	16.9	全磨	30 000	2 281	1	13 200	12 801	97	13 200	12 801	φ60	32	75	271	75	135

(2) 单个或多个样品的试验数据可基本描述矿床中某个范围内矿石的性质。设备选型确定后,需要验算不同工况下的运行状态,分析不同开采区域的配矿比例变化对系统产能的影响,预测矿山在开采进程中由于矿石性质变化对碎磨系统产能的影响,为今后生产调节提供了技术支撑。

(3) 半自磨机和球磨机在衬板使用周期内磨损程度是逐渐变化的,而处理矿石的性质也是波动的。在控制磨矿产品细度要求的前提下,需采取一整套控制策略,来实现原矿处理量和最佳工艺指标生产

任务的完成,为此先进和完善的半自磨/球磨控制系统是实现这一目标的必要条件。

[参考文献]

- [1] 杨松荣. 半自磨球磨磨矿回路设备计算及选型[J]. 中国矿山工程, 2019, 48(2): 46-51.
- [2] 周苏阳, 陈名洁, 姜燕清. 刚果某铜钴矿碎磨工艺流程的探讨[J]. 有色冶金节能, 2018, 34(3): 34-37.
- [3] 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.