

选矿工艺

极硬矿石碎磨工艺探讨

Discussion on Communion Process of Extremely Hard Ore

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

摘要:本文探讨了半自磨工艺在处理极硬矿石的优势和面临的问题,提出在传统半自磨工艺中引入细粒磨矿设备立磨机,形成了SABCV半自磨工艺流程。该工艺既能克服传统球磨机在处理细粒级矿石方面的低效,降低单位矿石的能耗,又能避免过粉碎,提高磨矿效率。实现了将某极硬矿石从 $P_{80} = 120\text{ mm}$ 连续碎磨至 $P_{80} = 53\text{ }\mu\text{m}$ 的目标,并获得了良好的经济指标,为研究极硬矿石的碎磨工艺提供了一个新的思路。

关键词:极硬矿石; 碎磨工艺; 半自磨

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)03-0062-06

Abstract: This paper discusses the advantages and problems of semi-autogenous grinding process (SAG) in treating extremely hard ore, and puts forward that the vertical mill, a fine grinding equipment, is introduced into the traditional semi-autogenous grinding process, forming SABCV semi-autogenous grinding process. This process can not only overcome the low efficiency of traditional ball mill in treating fine ore, reduce the energy consumption per unit ore, but also avoid over-crushing and improve the grinding efficiency. The goal of grinding an extremely hard ore from $P_{80} = 120\text{ mm}$ to $P_{80} = 53\text{ }\mu\text{m}$ has been achieved, and good economic indexes have been obtained, which provides a new approach for studying the communion process of extremely hard ore.

Key words: extremely hard ore; communion process; SAG mill

1 前言

碎磨工艺是选矿厂设计中的关键性技术问题,是提高技术经济指标的前提条件,也是选矿厂建设中基建投资最大,生产费用占比最高的环节,同时其生产的稳定性将制约整个选厂的作业率。随着碎磨设备的不断发展,逐渐形成了以下两类主要的碎磨工艺流程:

其一、常规碎磨工艺流程,即以高能圆锥破碎机为核心,采用两段或三段碎矿,并通过筛分作业控制最终破碎产品粒度,采用球磨机磨矿的常规流程,其中常规三段一闭路碎磨流程是国内外应用最广泛的工艺,三段二闭路碎磨流程也有不少成功应用案例。

该工艺主要优点:技术成熟可靠,应用广泛,操作管理经验丰富,对矿石硬度和可磨性变化适应性强,生产较稳定,波动较小。

该工艺主要缺点:工艺流程复杂,生产环节多,

厂房占地面积大,部分作业粉尘污染大,设备维护保养工作量大,操作人员多;对于含泥、含水高的矿石,设备易堵塞、流程不畅,严重时可能需要增加洗矿作业。

其二、(半)自磨工艺流程,以(半)自磨机为核心,形成了AB、ABC、SAB、SABC等工艺流程。自磨是由被磨矿石自身作为介质的磨矿过程,当被磨矿石作为介质不足时,需要通过补充一定比例的钢球作为介质的磨矿过程即为半自磨。与自磨机相比,半自磨机对矿石性质变化的适应性更强,应用范围更广。中国矿山应用较多的半自磨流程为SAB和SABC流程,具体如图1所示。SAB(半自磨+球磨)流程无破碎及筛分作业,流程简单,设备配置紧凑,投资较省,且对铁件的适应性强。然而与SABC流程相比,SAB流程的球耗和钢耗相对较高,处理能力对矿石性质的波动更敏感,一般应用在规模较小的矿山。SABC(半自磨+球磨+顽石破碎)流程是在磨矿回路中引入破碎设备以破碎“临界砾石”,消除由于砾石循环而在筒体内形成的聚集效应,这既可改变磨机内部自然磨矿介质的粒度组成,又可防止有用矿物的过粉碎。该流程对矿石的适应性更

[作者简介] 邹毅仁(1981-),男,湖南涟源人,高级工程师,硕士研究生,主要从事选矿工程咨询设计工作。

[引用格式] 邹毅仁,邓朝安,夏自发,等.极硬矿石碎磨工艺探讨[J].中国矿山工程,2022,51(3):62-67.

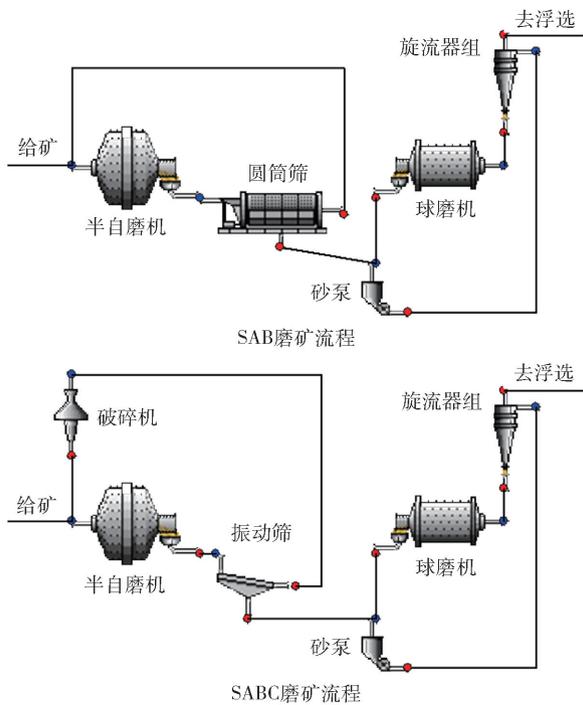


图1 典型的SAB和SABC磨矿流程

强,流程更为稳妥。所以SABC一般应用在规模较大,硬度相对较高的矿山。

该工艺主要优点:流程短,占地面积小,操作人员少,易于实现集中自动化控制,管理方便,避免了粉尘和中间环节堵塞现象,作业环境友好,尤其是对含泥含水高的矿石有很强的适应性。

该工艺主要缺点:对给矿的粒度组成和硬度变化较敏感,电耗较高,半自磨机一般需变频调速以适用矿石性质波动。

目前这两类碎磨工艺在金属矿山应用最广泛,但是半自磨工艺用于处理极硬矿石的案例极少。部分极硬矿石采用半自磨工艺案例见表1。

$A \times b$ 值可用于对矿石进行评价,该参数数值越小,表示矿石的抗冲击破碎能力越强^[1]。通常将 $A \times b < 30$ 的矿石定义为极硬矿石。根据JKSimMet功率计算模型可知^[2],采用半自磨工艺处理极硬矿石将是高能耗、低效率的,所以在极硬矿石的碎磨工艺一般采用常规碎磨工艺或高压辊工艺,实现多碎少磨。

表1 半自磨工艺处理极硬矿石案例

序号	矿山	碎磨流程	DWi/kWh·m ⁻³	A	B	A × b	BBWi/kWh·t ⁻¹
1	河南某钼矿	SABC		100	0.26	26	13.60
2	黑龙江某铜钼矿	SABC	11.85	100	0.24	24	17.62
3	非洲某金矿	SABC	11.1	100	0.25	25	17.80

通常碎磨工艺需根据建设条件情况综合确定。由于半自磨工艺具有占地少、便于自动化、对环境友好等优点,在大型选矿厂应用越来越普遍。本文针对某极硬铜矿石进行了碎磨工艺探讨,提出一种经济可行的新半自磨工艺,即SABCV流程,该工艺提升了传统半自磨工艺处理极硬矿石时的经济性。

2 矿石性质

2.1 矿物成分

矿石的矿物成分主要为铜的硫化物,包括原生和次生矿物,含极少量氧化物,主要有辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、自然铜等。脉石矿物主要有长石、石英、云母、绿泥石等。矿石属于典型的辉铜矿矿石,铜的物相分析见表2。

表2 铜矿石的矿物组成及相关含量

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铜矿	0.2	绿泥石	7.5
斑铜矿	0.2	石英	20.1
辉铜矿	12.9	云母	10.8
铜蓝	0.0	高岭石	0.1
蓝铜矿	0.0	长石	43.9
硅孔雀石	0.0	铁(钛)氧化物	2.2
自然铜和氧化铜	0.2	碳酸盐	1.4
硫铜钴矿	0.0	磷灰石	0.2
黄铁矿	0.1	其他	0.1
辉石/角闪石	0.1	总计	100

矿石的化学成分分析结果见表3。

表3 矿石的化学成分分析表

元素	Cu	Fe	S	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	As
高品位矿石	8.12	4.97	1.95	52.34	3.76	13.27	0.86	<0.01
低品位矿石	4.08	5.07	1.20	55.48	4.71	12.66	2.19	<0.01

由化学成分分析结果可知:铜矿石的主要化学成分为SiO₂,其次为Al₂O₃;具有回收价值的主要有价元素为Cu、S;有害元素为As,其含量较低。

2.2 粉碎性测试结果

针对岩芯样品进行了粉碎试验研究,矿石CWI测试结果见表4,棒磨功指数测试结果见表5;球磨邦德功指数测试结果见表6,SMC测试结果见表7。

表4 矿石CWI测试结果 kWh/t

样品编号	最小值	最大值	平均值	75%的数值
SD-1017	3.35	18.49	8.33	8.85
SS-1017	4.63	22.07	7.99	8.79
SD-1032	6.59	15.54	10.47	11.63
SS-1032	4.60	14.64	8.35	10.06
SD-1065	4.49	14.30	8.88	11.98
SS-1065	3.07	17.74	7.82	10.39
SD-997	6.17	13.20	9.45	10.82
SS-997	4.66	15.32	8.49	10.52
平均值	4.70	16.41	8.72	10.38

从已知的试验情况分析可知,该矿石属于极硬矿石,A×b值很低,邦德功指数很高。

3 碎磨工艺技术分析

3.1 粉碎比能耗分析

辉铜矿中硫化铜的嵌布粒度很细(平均0.033 mm),工艺试验研究要求的入选粒度为P₈₀=53 μm。根据工艺条件,从粒度逐级破碎的角度拟定了两种典型工艺进行比能耗预测。

(1) 常规三段一闭路+两段连续磨矿-3CBB流程如图2所示。

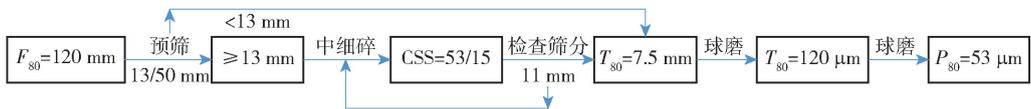


图2 常规三段一闭路+两段连续磨矿流程图

表7 矿石SMC测试结果

样品编号	DWi/kWh·m ⁻³	DWi/%	Mia/kWh·t ⁻¹	Mih/kWh·t ⁻¹	Mic/kWh·t ⁻¹	A	b	A×b	t _a	sg/t·m ⁻³
SS-997	12.65	98	29.7	25	12.9	75.4	0.31	23.4	0.21	2.94
SD-1065	12.56	98	30.6	25.7	13.3	80.8	0.28	22.6	0.21	2.84
平均值	12.605	98	30.15	25.35	13.1	78.1	0.295	23	0.21	2.89

(2) 典型的半自磨工艺-SABC流程如图3所示。

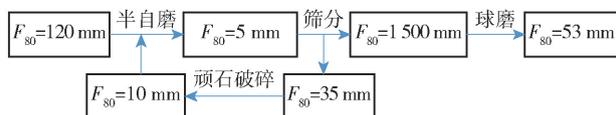


图3 半自磨工艺流程图

表5 矿石BRWI测试结果

样品编号	筛孔粒度/μm	F ₈₀ /μm	P ₈₀ /μm	净产量/g·rev ⁻¹	功指数/kWh·t ⁻¹	矿石密度/t·m ⁻³
SD-1065	1 180	9 173.79	804.10	3.47	24.87	1.71
SS-1065	1 180	9 536.63	806.13	3.52	24.50	1.79
SD-1032	1 180	10 117.18	763.35	4.26	20.69	1.72
SS-1032	1 180	11 326.91	785.09	4.88	18.97	1.83
SS-1017	1 180	9 870.59	905.40	4.49	22.68	1.74
SD-1017	1 180	10 030.87	856.69	5.07	20.14	1.73
SS-997	1 180	10 051.05	862.30	3.83	24.12	1.76
SD-997	1 180	9 536.68	732.25	4.36	20.04	1.81
平均值	1 180	9 955.46	814.41	4.24	22.00	1.76

表6 矿石BBWI测定结果

样品编号	筛孔粒度/μm	F ₈₀ /μm	P ₈₀ /μm	净产量/g·rev ⁻¹	功指数/kWh·t ⁻¹	矿石密度/t·m ⁻³
SS-1065	106	2 762.43	68.42	0.90	17.99	1.72
SS-1065	75	2 762.43	49.53	0.73	19.06	1.79
SD-1065	106	2 579.99	63.63	0.85	18.13	1.75
SD-1065	75	2 579.99	51.33	0.77	18.79	1.80
SD-997	106	2 750.38	70.75	1.01	16.64	1.79
SD-997	75	2 750.38	50.53	0.82	17.56	1.83
SS-1017	106	2 735.67	64.90	1.01	15.86	1.80
SS-1017	75	2 735.67	50.91	0.85	17.08	1.82
SD-1032	106	2 537.22	65.53	0.95	16.84	1.80
SD-1032	75	2 537.22	53.53	0.90	16.88	1.77
SS-1032	106	2 683.54	69.25	1.06	15.87	1.91
SS-1032	75	2 683.54	54.85	1.03	15.35	1.94
平均值	106	2 674.87	67.08	0.96	16.89	1.795
	75	2 674.87	51.78	0.85	17.45	1.825

基于Morrell模型对矿石破碎的比能耗预测:

① 常规碎磨回路比能计算

常规破碎比能耗:

$$W_c = K_2 M_{ic}^4 (x_2^{-(0.295 + x_2/1\,000\,000)} - x_1^{-(0.295 + x_1/1\,000\,000)}) = 2.81 \text{ kWh/t}$$

粗粒磨矿比能耗(抛落):

$$W_a = K_1 M_{ia} 4 (x_3^{-0.295 + x_3/1\,000\,000} - x_2^{-0.295 + x_2/1\,000\,000}) = 9.45 \text{ kWh/t}$$

细粒磨矿比能耗(研磨):

$$W_b = M_{ib} 4 (x_4^{x_4/1\,000\,000} - x_3^{x_3/1\,000\,000}) = 21.14 \text{ kWh/t}$$

3CBB 碎磨回路总比能耗:

$$W_T = W_c + W_a + W_b = 34.64 \text{ kWh/t}$$

② SABC 回路比能耗计算

粗粒磨矿比能耗:

$$W_a = k_1 M_{ia} 4 (x_2^{-0.295 + x_2/1\,000\,000} - x_1^{-0.295 + x_1/1\,000\,000}) = 21.14 \text{ kWh/t}$$

细粒磨矿比能耗:

$$W_b = M_{ib} 4 (x_3^{-0.295 + x_3/1\,000\,000} - x_2^{-0.295 + x_2/1\,000\,000}) = 15.93 \text{ kWh/t}$$

顽石破碎比能耗:

$$W_c = K_2 M_{ic} 4 (x_5^{-0.295 + x_5/10\,000} - x_4^{-0.295 + x_4/10\,000}) = 7.41 \text{ kWh/t}$$

SABC 碎磨回路总比能耗:

$$W_T = W_a + W_b + W_c = 44.48 \text{ kWh/t}$$

根据比能耗预测可知,SABC 回路的比能耗远高于常规碎磨回路的比能耗(不包含辅助设施的能耗),若采用常规半自磨工艺处理该矿石将是高能耗、低效率的。主要有两个因素:①A × b 值小,功指数高,属于极硬矿石;②产品粒度要求细。

3.2 拟定碎磨方案

众所周知,不同的产品粒度,宜对应相应类型的磨矿设备,在半自磨工艺中引入细粒磨矿设备立磨机,形成 SABCV 半自磨工艺流程,可克服传统球磨机在处理细粒级矿石方面的低效,实现窄粒级磨矿,既能避免过粉碎,又能提高处理细粒级矿石(75 ~ 53 μm)的磨矿效率,预计将有效地降低磨矿能耗。SABCV 半自磨工艺流程如图 4 所示。

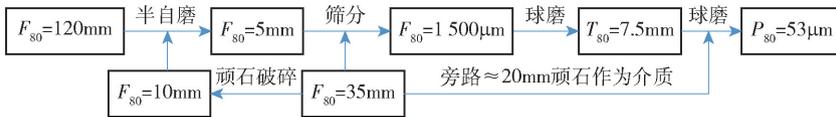


图 4 SABCV 半自磨工艺流程图

4 碎磨方案比较

4.1 方案比较基础

(1)建设规模 600 万吨/年(碎磨主要设备按照 800 万 t/a 能力选型),井下粗碎产品粒度 $P_{80} = 120 \text{ mm}$,地表碎磨回路最终产品粒度 $P_{80} = 53 \text{ μm}$ 。

(2)主要耗材不含税价格:电价 0.462 元/kWh, 钢球 8 元/kg, 职工人均薪酬 46 200 元/a,按 10 年来折算费用现值,建构筑物修理费率取 1.5%,设备的修理费率取 4.5%。

(3)参比范围从粗矿堆底部的带式输送机至第二段磨矿旋流器为止。

4.2 拟定方案描述

方案 I:以进口高能圆锥破碎机为核心的常规二段一闭路碎磨工艺(2CBB),即“预先筛分 + 中、细碎 + 闭路筛分 + 球磨机闭路连续磨矿”流程,其中粗碎设在井下。方案 I 原则流程如图 5 所示。

方案 II:以半自磨机为核心的 SABCV 碎磨工艺,即“半自磨 + 顽石破碎 + 球磨机及立磨机闭路磨矿”流程,其中粗碎设在井下。方案 II 原则流程如图 6 所示。

两个方案主要设备见表 8。

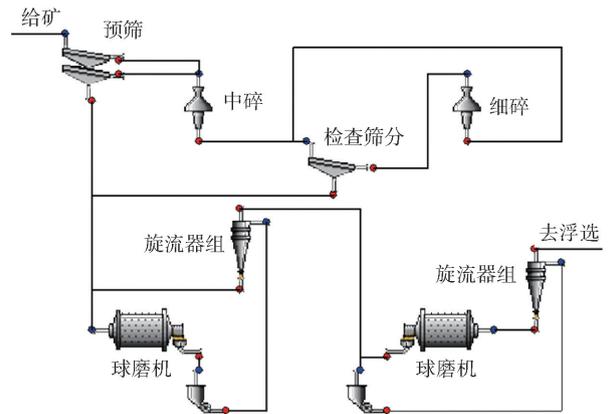


图 5 方案 I 原则流程图(2CBB)

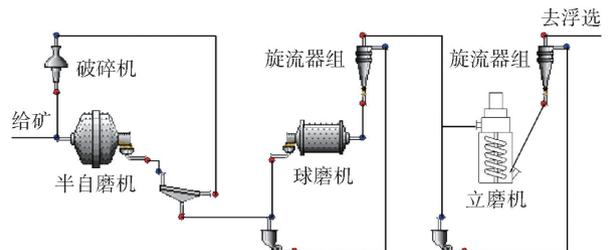


图 6 方案 II 原则流程图(SABCV)

4.3 方案比较结果

建筑工程费用见表 9 和表 10,方案比较结果见

表 8 碎磨工艺主要设备表

方案	作业	规格型号	台数
方案 I :二段一闭路常规碎磨流程(2CBB)	中碎	GP7 圆锥破碎机	1 台
	细碎	HP6 圆锥破碎机	4 台
	预先筛分	2YKR3675 圆振动筛	1 台
	闭路筛分	ZXF3073 香蕉型直线振动筛	5 台
	一段球磨	φ6.71 m × 10.97 m 溢流型球磨机	2 台
	二段球磨	φ6.71 m × 11.58 m 溢流型球磨机	2 台
	一段分级	9-φ660 水力旋流器组	2 组
	二段分级	12-φ500 水力旋流器组	2 组
方案 II :SBCV 碎磨流程	半自磨	φ8.8 m × 4.8 m 半自磨机	2 台
	顽石破碎	HP5 圆锥破碎机	3 台
	一段球磨	φ7.32 m × 10.68 m 溢流型球磨机	2 台
	二段立磨	VTM3000	2 台
	一段分级	9-φ660 水力旋流器组	2 组
	二段分级	12-φ500 水力旋流器组	2 组

表 9 方案 I 可比建筑工程费用

序号	建构筑物	建筑 面积/m ²	建筑 容积/m ³	单价/ ¥·m ⁻²	投资额/ 10 k ¥
1	破碎车间	3 107.0		6 000	1 864
2	筛分车间	2 549.3		6 000	1 530
3	皮带地上通廊	1 400.0		9 000	1 260
	皮带地下通廊		2 400	1 500	360
4	转运站	127.8		4 000	51
5	粉矿仓	4 650.0		5 000	2 325
6	磨矿车间	6 708.0		5 000	4 025
7	通风收尘设施	1 264.4		4 500	569
	小计				11 984

表 10 方案 II 可比建筑工程费用

序号	建构筑物	建筑 面积/m ²	建筑 容积/m ³	单价/ ¥·m ⁻²	投资额/ 10 k ¥
1	破碎车间	1 680.25		6 000	1 008.2
2	皮带地上通廊	1 050.0		9 000	945.0
	皮带地下通廊		1 680	1 500	252.0
3	转运站	84.5		4 000	33.8
4	磨矿车间	8 115.0		5 000	4 868.0
5	通风收尘设	37.2		4 500	16.7
	小计				7 124.7

类多,缓冲矿仓数量及矿石倒运、收尘点多,建筑费用高,总基建投资较大。

方案 II 省去筛分车间、粉矿仓等建构筑物,流程短,占地小,设备数量少,总基建投资较小。

综合比较,方案 I 基建投资大于方案 II,相差 22.08M ¥,基建投标比较情况如图 7 所示。

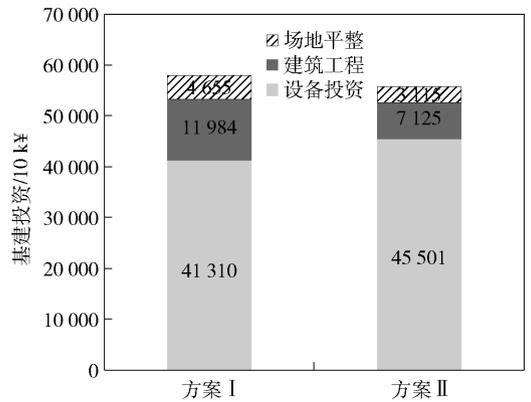


图 7 碎磨方案基建投资比较

2) 生产经营费用

碎磨生产费用中主要包含电费、钢耗(包括衬板与钢球)、胶带、筛网、人工费及修理费等。

方案 I 破碎衬板消耗高,维修强度大,收尘电耗大,人工费用高,但通过“多碎少磨”,降低了电耗。

方案 II 维修强度低,人工费用省,钢耗低。虽然二段磨矿选用高效节能的立磨机,但总体电耗仍较高。

综合比较,方案 I 单位矿石碎磨平均生产费用

表 11。

由表 11 分析可知:

1) 基建投资方面分析

方案 I 流程长,厂房多,占地大,设备数量及种

表 11 碎磨工艺流程综合比较表

序号	项目	单位	方案 I	方案 II
			2CBB	SABCV
1	生产数据			
1.1	处理能力	10 kt/a	600	600
1.2	年运转天数	d	330	330
1.3	日运转时数			
	碎矿及筛分	h	15	24
	磨矿	h	24	24
2	综合数据			
2.1	设备数量	台	82	46
2.2	安装功率	kW	42 354	42 588
2.3	操作工及维修工	台	55	33
3	基建投资			
3.1	设备、运输及安装费	10k ¥	41 310	45 501
3.2	厂房(建筑工程)	10k ¥	11 984	7 125
3.3	场地平整费	10k ¥	4 655	3 115
3.4	合计	10k ¥	57 949	55 741
3.5	基建投资平均	¥/(t·a)	96.58	92.90
4	生产消耗			
4.1	单位矿石电耗	kWh/t	37.88	40.27
4.2	单位矿石钢球消耗	kg/t	2.00	1.99
4.3	破碎设备单位矿石衬板消耗	¥/t	1.45	0.15
4.4	磨矿设备单位矿石衬板消	kg/t	0.14	0.11
4.5	单位矿石胶带消耗	m ² /10 ⁴ t	10.00	5.00
4.6	筛网	m ² /a	849.60	263.52
5	生产费用			
5.1	年电费	10k ¥/a	10 500	11 164
5.2	年钢耗费用	10k ¥/a	9 600	9 552
5.3	年破碎机衬板费用	10k ¥/a	870	90
5.4	年球磨机衬板费用	10k ¥/a	979	817
5.5	年胶带费用	10k ¥/a	720	360
5.6	年筛网费用	10k ¥/a	382.32	118.58
5.7	年人工费用总额	10k ¥/a	254.1	152.46
5.8	维修费	10k ¥/a	2 039	2 154
5.9	碎磨生产费用合计	10k ¥/a	25 344	24 409
5.10	单位矿石碎磨生产费用	¥/t	42.24	40.68
6	综合分析			
6.1	基建投资	10k ¥	57 949	55 741
6.2	生产费用	10k ¥/a	25 344	24 409
6.3	费用现值(i=10%,10)	10k ¥	213 678	205 720

大于方案 II,比较结果如图 8 所示。

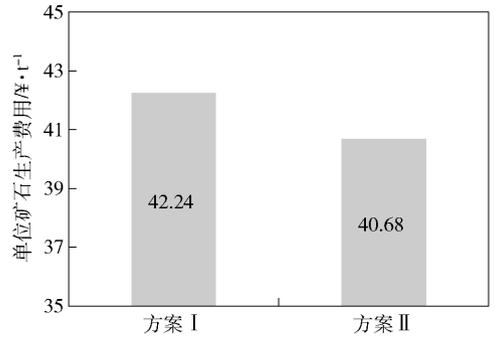


图 8 单位矿石碎磨生产费用比较

综合比较其费用现值($i=10\%$, $n=10$),方案 I 大于方案 II,即常规方案的费用现值高 79.58M ¥。

综上所述,方案 II SABCV 流程具有厂房数量少,占地面积少,设备数量少,建设周期短,基建投资少,工艺流程简单,生产环节少,生产故障率低,操作人员少,自动化程度高,工作环境较好等优点,该工艺在处理嵌布粒度细、硬度高的铜矿石上具有良好的应用前景。另极硬矿石易在半自磨机中形成顽石,若利用顽石作为立磨机磨矿介质,可进一步降低钢耗,从而降低生产成本^[3]。

5 结论

(1)仅根据 $A \times b$ 值判定极硬矿石而排除半自磨方案是片面的,应结合项目建设条件,优化工艺流程,克服缺点、发扬优点,择优选择。

(2)针对入选矿石硬度高,磨矿产品粒度要求细的半自磨工艺回路中,引入高效节能的立磨机,能有效地降低单位矿石的比能耗,实现窄粒级磨矿,提高磨矿效率。

(3)极硬矿石易在半自磨机中形成顽石,将顽石作为立磨机的磨矿介质,进一步降低生产成本,有利于提高半自磨工艺 SABCV 流程的经济性。

[参考文献]

[1] 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(1):20-25.
 [2] MORRELL S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(6): 544.
 [3] 刘赣华. 银山矿采用顽石替代钢球作立磨机磨矿介质工业应用实践[J]. 矿冶工程, 2017, 37(4):54-56.