

山达克铜矿碎磨流程设计研究

Design Research on Shandake Copper Mine Crushing and Grinding Process

俞宏军¹, 刘兆瑞², 于保强²

(1. 中冶集团资源开发有限公司, 北京 100028; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 本文对山达克铜矿新建选厂碎磨流程进行半自磨工艺与高压辊磨工艺的详细技术经济比较。结果表明, 建设投资方面高压辊磨流程比半自磨流程高 567.4 万美元; 运营成本方面, 高压辊磨流程能耗低, 半自磨流程比高压辊磨流程吨矿电耗高 2.78 kWh/t, 全流程来看半自磨流程比高压辊磨流程吨矿成本高 0.54 美元; 综合费用现值, 当折现率 8% 时半自磨流程比高压辊磨流程费用现值高 708.6 万美元。综上所述, 山达克铜矿采用高压辊磨工艺具有更好的经济效益。

关键词: 铜矿; 半自磨流程; 高压辊磨流程; 技术经济分析

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)02-0077-05

Abstract: Technical and economic comparison between SABC and HPGR process was conducted for Shandake copper mine new plant. The results indicate that the investment of HPGR process is 5674 thousand dollar higher than SABC process. Energy consumption for treating one ton of ore of SABC process is 2.78 kWh/t higher than that of HPGR process. The operating cost of HPGR process is 0.54 dollar lower than SABC process when treating one ton of ore. Net present value of SABC process is 7086 thousand dollar higher than that of HPGR process when internal rate of return is 8%. In the long run, HPGR process has more better economic benefits for Shandake copper mine.

Key words: copper ore; SABC process; HPGR process; technical and economic analysis

1 前言

破碎与磨矿是选矿过程中的关键环节, 碎磨作业的投资、能耗及成本通常占整个选厂的一半以上^[1-2], 此外碎磨作业产品质量也直接影响着后续选别作业技术经济指标好坏^[3-4]。因此, 在矿山建设方案确定过程中, 根据矿山矿石性质特点选择适宜的碎磨工艺对于选矿厂节能降耗、提质增效具有重要意义。半自磨工艺流程是近年来国内外大型选矿厂普遍采用的流程之一, 它具有流程短、配置简单、占地面积小、易于管理等优点^[5-7]。高压辊磨机相对于传统破碎设备具有粉碎效率高、能耗和钢耗低、生态环境好、设备运转率高等优点。因此, 近 10 多年来高压辊磨工艺在国内外矿山的应用正在迅速扩大^[8-10]。

巴基斯坦山达克铜矿是一座经营多年的老矿山, 现有一座年处理能力为 500 万 t 的选矿厂, 为扩大对现有资源的开发利用, 该矿山拟新建一座年处

理矿石能力为 275 万 t 的选矿厂。随着碎磨技术的发展, 常规碎磨工艺已经不是新建选矿厂的首选, 常规碎磨工艺存在流程长、产尘点多、能耗相对较高等缺点, 本次山达克新建选矿厂拟采用近些年在有色金属矿山广泛推广的半自磨工艺和高压辊磨工艺。本文依据已经完成的碎磨专项试验数据, 结合矿石性质和当地地形特色, 对半自磨工艺和高压辊磨工艺两种碎磨流程方案进行详细技术经济比较, 为山达克铜矿新建选厂选择适宜碎磨流程, 为后续选别提供合格产品粒度提供保证, 最终为提高矿山整体经济效益提供技术支持。

2 工艺条件

山达克铜矿新建选厂碎磨流程工艺技术条件如下:

(1) 新建选厂设计规模为 8 333 t/d (275 万 t/年)。

(2) 半自磨工艺流程年工作 330 d, 3 班/天, 8 小时/班, 设备运转率 90.41%; 高压辊磨工艺流程中细碎、筛分作业年工作 330 d, 3 班/天, 6 小时/班, 设备年运转率 67.81%; 高压辊超细碎与湿式筛分、磨矿作业年工作 330 d, 3 班/天, 8 小时/班, 设备年运转率为 90.41%。

[作者简介] 俞宏军(1973—), 男, 江西上饶人, 工程师, 从事有色金属铜、金选矿工艺、选矿技术实践及研究工作。

[引用格式] 俞宏军, 刘兆瑞, 于保强. 山达克铜矿碎磨流程设计研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(2): 77-81.

(3)两种碎磨工艺流程均按单系统进行厂房布置及设备选型,且参与比较的范围从粗矿堆底排矿皮带至第一段磨矿旋流器溢流出口。

(4)半自磨流程中半自磨机闭路产品粒度为 $P_{80} = 2.0 \text{ mm}$, 高压辊磨流程中超细碎产品粒度为 $P_{80} = 1.6 \text{ mm}$, 两个碎磨方案的球磨机闭路产品粒度 -0.074 mm 粒级含量占 65%。

(5)根据山达克矿石落重试验结果,落重指数 DW_i 约为 8.41 kWh/m^3 , 属于中等偏硬矿石, 矿石抵抗冲击粉碎的能力较高。矿石标准邦德球磨功指数为 14.66 kWh/t 。

(6)矿石高压辊磨试验结果表明,相较于常规破碎, 辊压 -3 mm 原矿的磨矿功指数可以降低 14.69% ~ 19.35%, 可磨度提高了 17.7% ~ 20.30%, 即 -3.0 mm 辊压产品比常规破碎 -3 mm 更易磨、更节能。

本次技术方案比较中的设备均按国产考虑, 价格均由询价获得。土地平整挖、填方工程量费用按一般地形估算。

3 碎磨流程比较

3.1 半自磨工艺流程

山达克铜矿新建选厂半自磨工艺流程如图 1 所示, 主要设备见表 1。采场采出矿石经汽车运输至粗碎站破碎到 -300 mm 后, 再通过带式输送机输送到粗矿堆场, 粗矿堆下设置 3 台 $1250 \text{ mm} \times 4500 \text{ mm}$ 重型板式给矿机(变频调速, 2 用 1 备), 粗矿堆的矿石经重型板式给料机和皮带输送机给入 1 台 $\phi 8.8 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ 半自磨机, 半自磨机排矿采用直线振动筛(2 台 $3.0 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$, 1 用 1 备)进行筛分, 筛上产品通过皮带输送机给入圆锥破碎机(HP100)进行破碎, 破碎后的物料返回半自磨机进行再磨。筛下产品($P_{80} = 2.0 \text{ mm}$)自流至泵池, 并与球磨机

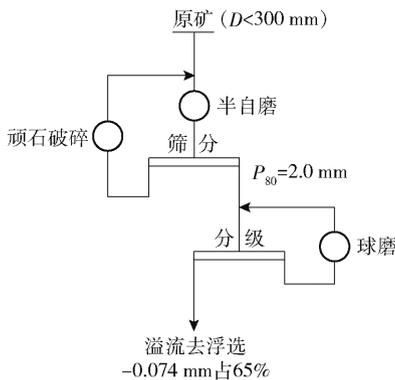


图 1 半自磨工艺流程

排矿合并后通过渣浆泵给入水力旋流器进行分级。球磨回路由 1 台 $\phi 5.5 \text{ m} \times 8.8 \text{ m}$ 溢流型球磨机和 1 组 $10-\phi 660$ 水力旋流器组成, 磨矿系统控制最终磨矿产品细度为 -0.074 mm 粒级含量占 65%, 该产品进入后续浮选作业进行选别。

表 1 半自磨工艺流程主要设备

设备名称	型号规格	数量/ 台	总功 率/kW
半自磨机	$\phi 8.8 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$	1	6 200
直线振动筛	STM-S3061	2	$9.3 * 2$
圆锥破碎机	HP100	2	90
溢流型球磨机	$\phi 5.5 \text{ m} \times 8.8 \text{ m}$	1	4 500
水力旋流器组	10- $\phi 660$	1	
渣浆泵(No. 1)	16/14TU-AH, $Q = 2\ 300 \text{ m}^3/\text{h}, H = 36 \text{ m}$	2	560
辅助设备			198.2
合计			11 368.6

半自磨工艺方案主要设备有 1 台 $\phi 8.8 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ 半自磨机(安装功率 6 200 kW)、2 台 $3.0 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$ 直线振动筛、2 台顽石破碎机(HP100)、1 台 $\phi 5.5 \text{ m} \times 8.8 \text{ m}$ 溢流型球磨机(安装功率 4 500 kW)、1 组 $10-\phi 660$ 水力旋流器以及 2 台渣浆泵, 此外还有辅助设备如皮带输送机、起重机、除铁器等, 设备总安装功率为 11 368.6 kW。

半自磨工艺方案选矿厂由粗碎站(位于采场坑口)、皮带廊、顽石破碎厂房、主厂房、精矿浓缩及泵房、精矿过滤厂房等几个部分组成, 其中皮带廊、顽石破碎厂房、主厂房为新建, 精矿浓缩及泵房、精矿过滤厂房利用现有选矿厂设施。

3.2 高压辊磨工艺流程

山达克铜矿新建选厂高压辊磨工艺流程如图 2 所示, 主要设备见表 2。采场采出矿石经汽车输送至粗碎站破碎到 -300 mm 后经皮带输送机送至粗矿堆场, 粗矿堆下设置 3 台 $1250 \text{ mm} \times 4500 \text{ mm}$ 重型板式给矿机(变频调速, 2 用 1 备), 粗矿堆的矿石经重型板式给料机和皮带输送机给入 1 台 CCS870 EC 圆锥破碎机进行中碎, 中碎破碎产品给入双层香蕉型振动筛进行筛分, 筛上产品($+25 \text{ mm}$)给入 1 台 CCS870 MC 圆锥破碎机进行细碎, 细碎产品与中碎产品合并返回双层香蕉型振动筛进行筛分。筛下产品作为高压辊磨机给矿, 经带式输送机输送至 1 台 $\phi 1.7 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ 高压辊磨机进行超细碎, 高压辊

磨排矿采用1台3.6 m × 7.3 m 双层直线振动筛进行筛分,筛上产品(+3 mm)返回高压辊磨机再粉碎,筛下产品(-3 mm)经过带式输送机输送至一段磨矿回路,磨矿回路由1台 ϕ 5.5 m × 8.5 m 溢流型球磨机和1组10- ϕ 660 水力旋流器构成,磨矿系统最终产品细度为-0.074 mm 粒级含量占65%,该产品进入后续浮选作业进行选别。

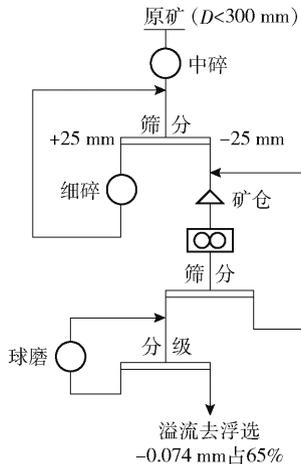


图2 高压辊磨工艺流程

表2 高压辊磨流程主要设备

设备名称	型号及规格	数量/台	总功率/kW
中碎圆锥破碎机	CCS870 EC	1	600
细碎圆锥破碎机	CCS870 MC	1	600
双层香蕉型振动筛	3.0 m × 6.0 m, 筛孔 25 × 40	2	30
高压辊磨机	ϕ 1.7 m × 1.4 m	1	2 × 1 450
双层直线振动筛	3.6 m × 7.3 m, 下层筛孔 4 × 10	2	75
溢流型球磨机	ϕ 5.5 m × 8.5 m	1	4 500
水力旋流器组	10- ϕ 660	1	
渣浆泵(No.1)	16/14TU-AH, $Q = 2\ 300\ m^3/h, H = 36\ m$	2	560
辅助设备			1 364
合计			10 562

高压辊磨工艺方案主要设备有1台CCS870 EC中碎圆锥破碎机、1台CCS870 MC细碎圆锥破碎机、2台3.0 m × 6.0 m 双层香蕉型振动筛、1台 ϕ 1.7 m × 1.4 m 高压辊磨机、2台3.6 m × 7.3 m 型双层直线振动筛、1台 ϕ 5.5 m × 8.5 m 溢流型球磨机(安装功率4 500 kW)、1组10- ϕ 660 水力旋流器

以及2台渣浆泵,此外还有辅助设备如皮带运输机、起重机、除铁器等,设备总安装功率为10 562 kW。

高压辊磨工艺方案选矿厂由粗碎站(在采场坑口)、皮带廊、中细碎厂房、干式筛分厂房、粉矿仓、高压辊超细碎厂房、主厂房、精矿浓缩及泵房、精矿过滤厂房等几个部分组成,其中皮带廊、中细碎厂房、干式筛分厂房、粉矿仓、高压辊超细碎厂房、主厂房为新建,精矿浓缩及泵房、精矿过滤厂房利用现有选矿厂设施。

3.3 方案技术特点分析

根据两种碎磨工艺的特点及生产实践,半自磨工艺流程具有以下优点:

(1)能接受较大的给矿粒度,适合处理含泥含水高的矿石。

(2)简化生产流程,取代中、细碎及筛分作业,减少生产环节,简化工艺流程。

(3)改善操作环境,设备噪音小,矿石倒运次数非常少,粉尘污染小,工人工作环境好。

(4)自动化程度高,设备台套数少,自动化水平高,节省操作人员,管理方便。

(5)厂房占地面积小,厂房间数量少,配置起来厂区环境简洁美观。

但半自磨工艺流程也有一些缺点及不确定性因素:

(1)对给矿性质(包括粒度及可磨性等)变化比较敏感,生产易波动。

(2)操作及控制相对复杂,对操作人员要求高。

(3)电耗一般比常规碎磨工艺高。

高压辊磨工艺流程的优点主要表现在:

粉碎效率高,能耗低。高压辊磨机粉碎物料的单位能耗约1.0 ~ 3.0 kWh/t,比传统破碎粉磨设备单位能耗降低约30% ~ 50%^[11]。

钢耗低。球磨机处理每吨物料的钢耗通常在一千克左右,而高压辊磨机处理水泥熟料的钢耗不到一克,处理矿石的钢耗只有几十克,这是由于高压辊磨机内物料以颗粒床的方式受载,仅有一小部分物料与辊面接触,此外高压辊磨机辊面采用了耐磨硬质合金,大大延长了设备使用寿命。

高压辊磨机结构紧凑、体积小、重量轻,而且操作维修方便,工作稳定可靠,易实现高压辊磨机的自动控制。

生态环境好。由于高压辊磨机采用层压粉碎原理,物料被封闭在挤压辊和给料装置中,依靠静压粉

碎,不会造成物料冲击和飞溅,因而振动小、噪音低且生产安全。

提高后续选别指标^[12-13]。高压施载能使有些矿石中目的矿物较好的解离,或生成的微裂纹有助于化学反应的进行,此外高压辊磨还能够减少磨矿过程中铁离子对目的矿物的污染,从而提高后续选别指标。

高压辊磨机在使用过程中也会存在一些问题:边缘效应^[14]。高压辊磨机受其结构特征及两侧挡料板磨损的影响,使挤压辊线压力呈现不均匀分布,通常是中间大两头小,边缘效应会造成挤压辊两侧的物料粉碎不足。

挤压辊磨损与修复。通常挤压辊面采用堆焊制造而成,这种结构在运行中辊面常常发生裂纹及脱落现象,严重时可能会出现断轴事故,这主要是由频繁焊接产生的局部应力集中造成的。

轴承寿命。高压辊磨机破碎物料所需的力由液压系统提供,强大的压力会使滚动轴承出现点蚀或疲劳破坏。

不适用于高含水率作业。一般物料的水分含量

应低于10%~15%,物料水分含量高可能会加剧辊面的磨蚀。

3.4 方案技术经济比较

为了全面分析和评价半自磨工艺流程和高压辊磨工艺流程的经济效果,对两个工艺流程的可比投资、经营成本及费用现值进行了详细的计算和对比,主要技术经济指标结果见表3。建设投资方面,高压辊磨流程比半自磨流程高567.4万美元,本次比较两工艺流程方案均采用露天布置,但高压辊磨工艺相对而言流程长、设备台套多、基础投资高,带式输送机数量多地表钢结构费用高,因此总体而言该流程的建筑工程和安装工程费用较高。运营成本方面,半自磨工艺流程比高压辊磨工艺流程年运营成本高149.1万美元,即吨矿成本高0.54美元,主要体现在半自磨工艺流程比高压辊磨工艺流程年耗电量高 7.66×10^6 kWh,即吨矿电耗高2.78 kWh/t,高压辊磨机工艺更节能,电费更节省;另一方面高压辊磨工艺流程年均钢耗比半自磨工艺流程低108.4万美元,主要是由于高压辊磨多碎少磨,且产品具有微细裂纹,磨矿时间短,此外高压辊磨机辊面采用了耐

表3 两种碎磨流程技术经济比较结果

序号	项目	单位	方案 I	方案 II	方案I-方案 II
1	各方案		半自磨流程	高压辊磨流程	
2	计算期	年	15	15	
3	可比年耗电量	10^4 kWh	6 242	5 476	766
4	可比劳动定员	人	24	54	-30
5	可比投资	千美元	40 007	45 681	-5 674
	建筑工程	千美元	8 880	12 367	
	设备费	千美元	24 691	23 792	
	安装工程	千美元	6 436	9 522	
6	年可比运营成本	千美元	15 776	14 286	1 491
6.1	材料	千美元	4 461	3 981	
	钢球	千美元	3 250	2 166	
	磨机衬板	千美元	433	288	
	胶带	千美元	10	35	
	托辊	千美元	28	74	
	橡胶筛板	千美元	3	6	
	辊面	千美元		431	
	破碎机衬板	千美元	157	462	
	其他	千美元	582	519	
6.2	动力费	千美元	9 828	8 622	
6.3	薪酬	千美元	164	369	
6.4	维修费	千美元	1 323	1 313	
7	可比部分费用现值($i=8\%$)	千美元	175 044	167 958	7 086
	可比部分费用现值($i=6.5\%$)	千美元	188 347	180 004	8 343

磨硬质合金,大大延长了设备使用寿命。从费用现值来看,若按照折现率为8%,计算时间15年,半自磨工艺流程比高压辊磨工艺流程费用现值高708.6万美元。当折现率为6.5%时,半自磨工艺流程比高压辊磨工艺流程费用现值高834.3万美元,说明高压辊磨工艺具有更好经济效益。

4 结论

通过对山达克铜矿新建选厂半自磨工艺流程和高压辊磨工艺流程的方案描述,主要设备选型和详细的技术经济比较,结果表明半自磨工艺流程短,前期建设投资相对较低,但能耗较高,运营成本相对较高;高压辊磨工艺流程设备数量多、流程较复杂,前期基建投资略高,但能耗低、钢耗少,运营成本相对较低。综合费用现值计算结果,高压辊磨工艺流程比半自磨工艺流程费用现值低。从长期生产运营而言,高压辊磨工艺流程能更好的适应矿石性质变化,特别是对极硬矿石其适应性强,对矿山长远发展具有更好经济效益和社会效益。

[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] 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.
- [4] Yin Wanzhong, Tang Yuan, Ma Yingqiang, et al. Comparison of sample properties and leaching

characteristics of gold ore from jaw crusher and HPGR [J]. Minerals Engineering, 2017(111): 140-147.

- [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] 宋龔. 半自磨工艺在大型矿山选矿中的应用[J]. 世界有色金属,2020(5):51-52.
- [8] 柳晓明,张英军,王前,等. 国产高压辊磨机在有色矿山的应用及分析[J]. 陶瓷,2021(9):45-47.
- [9] 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.
- [10] 瞿铁,辛亚淘. 高压辊磨工艺在有色选矿厂的应用实践及前景分析[J]. 矿山机械,2019,47(4):35-39.
- [11] Maxton D, Morley C, Bearman R. A quantification of the benefits of high pressure rolls crushing in an operating environment [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(9): 827-838.
- [12] 朱泊翰,张鹏羽,欧乐明,等. 高压辊磨对低品位金矿浮选的影响研究[J]. 矿冶工程,2022,42(3):80-83.
- [13] Yin Wanzhong, Tang Yuan, Ma Yingqiang, et al. Comparison of sample properties and leaching characteristics of gold ore from jaw crusher and HPGR [J]. Minerals Engineering, 2017, (111): 140-147.
- [14] Lim W I L, Campbell J J, Tondo L A. The effect of rolls speed and rolls surface pattern on high pressure grinding rolls performance [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(4): 401-419.