

引用格式:吴焕勋,章述广,荀文生,等.广东某硫铁矿碎磨流程技术改造与优化研究[J].有色设备,2024,38(4):50-54.

WU Huanxun, ZHANG Shuguang, XUN Wensheng, et al. Technical reform and optimization of crushing and grinding process of a pyrite mine in Guangdong[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 50-54.

# 广东某硫铁矿碎磨流程技术改造与优化研究

吴焕勋, 章述广, 荀文生, 冯青云

(广东广业云硫矿业有限公司, 广东 云浮 527300)

**[摘要]** 为解决广东某硫铁矿选厂碎磨系统设备老旧、规格小、数量多、生产维护困难、维修费用高、劳动生产率低、运行成本偏高等问题,进行了碎磨系统技术改造与优化研究。通过常规破碎+球磨、高压辊磨+球磨以及半自磨+球磨3种碎磨工艺研究,确定最优实施方案为半自磨+球磨工艺,即粗碎+半自磨+球磨(CSAB)。采用此碎磨工艺改造后单位矿石成本降低11.96元/t,同时大幅改善作业环境、提升安全水平、减少定员、大幅提高劳动生产率,减少维护工作量、更好地保障企业生产稳定,创造更好经济效益和社会效益。

**[关键词]** 硫铁矿; 碎磨流程改造; 半自磨流程; 投资估算; 技术经济分析

**[中图分类号]** TD92 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0050-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.008

## 0 前言

破碎与磨矿是选矿过程中实现目的矿物解离并进行选别的关键环节,碎磨作业能耗、运营成本及建设投资通常占整个选厂的50%以上<sup>[1-2]</sup>。碎磨作业产品质量直接影响后续选别作业生产指标,因此选矿厂建设中根据矿石性质特点确定适宜碎磨工艺对整个选厂技术经济指标提升具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。目前选矿厂常见碎磨工艺为:传统两段或三段一闭路破碎-球磨流程、粗碎-半自磨-球磨碎磨流程(SAB)、粗碎-半自磨-顽石破碎-球磨流程(SABC)、高压辊磨机第三段或第四段破碎流程等<sup>[5-8]</sup>。其中,两段或三段一闭路破碎-球磨流程技术成熟可靠,对矿石适应性较好,生产稳定,但工艺流程长、设备维护检修强度大、粉尘污染严重;半自磨工艺流程具有流程短、配置便捷、易于管理等优点,因此在国内外大型选矿厂获得广泛应用,但该流程也存在矿石性质变化导致生产不稳定的问题。近年来,随着高压辊磨技术的逐渐成熟,高压辊磨机在碎磨工艺中的应用正在迅速扩大,如SABC流程中高压辊磨机对顽石破碎产品进行细碎、高压辊磨机

对三段闭路破碎产品进行超细碎、高压辊磨与立式搅拌磨的联合工艺等<sup>[9-10]</sup>。

广东某硫铁矿选厂已投产多年,现有富矿和贫矿2个碎磨系统,其中富矿生产线采用“四段一闭路破碎+棒磨+球磨”的碎磨流程,贫矿生产线采用“一段粗碎+自磨+球磨”的碎磨流程,2个碎磨系统主要生产设备数量多达19台,辅助设备多达110台。目前生产使用设备大部分购置于20世纪80年代,设备陈旧,装备落后,截至目前已运行和使用30余年,继续使用整体维护成本高。选厂当前碎磨工艺与装备水平无法适应当今选矿技术发展要求,制约了企业高质量发展<sup>[11-13]</sup>。为解决现有碎磨系统中存在的设备台数多、规格型号小、运营成本高问题,本文开展了碎磨系统技术改造与优化研究,包括碎磨流程选择和主要设备选型,并对改造后碎磨工艺进行详细技术经济比较,以评价碎磨系统进行技术改造与优化的必要性。

## 1 选厂碎磨现状

### 1.1 原碎磨流程

该硫铁矿选厂包括富矿、贫矿2条生产线,其中富矿生产线年处理矿石能力约170万t,贫矿生产线年处理矿石能力约120万t。

富矿生产线现碎磨流程为四段一闭路破碎工艺

**[收稿日期]** 2024-06-20

**[第一作者]** 吴焕勋(1975—),男,广东茂名,主要研究方向为有色金属矿碎磨与浮选技术。

和棒磨+球磨两段连续磨矿。富矿碎磨工艺流程见图1。

贫矿生产线现碎磨流程为破碎一段开路 and 自磨+球磨两段闭路磨矿,共计3条生产线。贫矿碎磨工艺流程见图2。

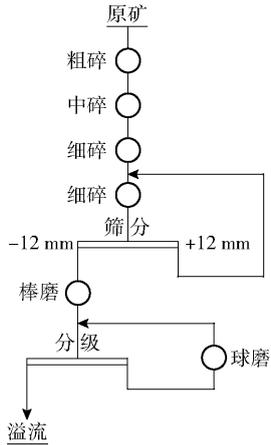


图1 富矿生产线碎磨流程

Fig. 1 Crushing and grinding flow of rich ore

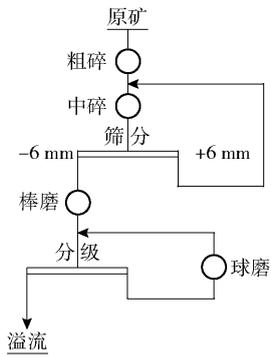


图2 贫矿生产线碎磨流程

Fig. 2 Crushing and grinding flow of poor ore

## 1.2 原碎磨系统主要设备

现选矿厂碎磨系统主要设备见表1。

## 1.3 原碎磨系统存在问题

现有碎磨系统存在如下问题。

1) 现有碎磨系统工艺复杂、生产流程长且系列多,导致设备台(套)数多且布置分散,相应辅助设备多,全厂能耗较高。

2) 整个碎磨系统设备台(套)数多且布置分散,造成设备维护点多且广,设备型号小、自动化控制程度低,造成工人劳动强度大。

3) “四段破碎+棒磨+球磨”流程复杂;棒磨机清、加棒需停机,造成设备运转率低。厂房内操作

表1 选厂碎磨系统主要设备

Table 1 Main equipment of crushing and grinding system

设备名称	设备型号	电机功率/ (kW/台)	台数
颚式破碎机(粗碎)	山特维克 CJ815	200	1
圆锥破碎机(中碎)	山特维克 CS660C	315	1
圆锥破碎机(细碎)	山特维克 CH660MF	315	1
粗碎颚式破碎机	PEJ2100×1500	280	1
圆锥破碎机	山特维克 CH440	250	1
圆锥破碎机	山特维克 CH430	160	1
棒磨机	MBYΦ2.7 m×3.6 m	400	4
球磨机	MQYΦ4.0 m×6.5 m	1 600	1
自磨机	Φ5.5 m×1.8 m	800	3
球磨机	MQGΦ2.7 m×3.6 m	400	4
球磨机	MQYΦ3.2 m×4.5 m	630	1

和检修空间狭小,造成作业效率低下。

4) “四段破碎+棒磨+球磨”的破碎为干式作业,其工艺流程长、设备台(套)数多、产尘点多。“一段粗碎+自磨+球磨”的设备规格较小,系列和台(套)数多,管理相对烦琐。

## 2 碎磨系统改造与优化

### 2.1 矿石性质

#### 2.1.1 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。

矿石中硫、铁的含量较高,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均较低,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。

#### 2.1.2 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。  
+0.147 mm 粒级的占有率为 32.74%, +0.074 mm 粒级的占有率为 66%, -0.043 mm 粒级的占有率为 16.45%, 细磨矿条件下绝大多数黄铁矿可以实现单体解离。

### 2.1.3 矿石主要物理性质

矿石平均密度为 3.60 t/m<sup>3</sup>, 岩石平均密度为 2.79 t/m<sup>3</sup>。

根据矿体赋存条件和矿岩的物理机械性质, 矿石的硬度系数: 块状黄铁矿 34~11, 平均 23; 条带状黄铁矿 26~6, 平均 16。岩石的硬度系数分别为: 石英岩 20~10, 平均 15; 变质千枚岩 20~9, 平均 14。

矿块含水率 0.5%~3%, 平均 1.5%; 粉矿含水率 1.5%~5%, 平均 2.5%。

## 2.2 碎磨方案优选

本研究碎磨系统技术改造规模为年处理矿石量 300 万 t, 每天矿石处理量为 10 000 t, 要求碎磨系统最终溢流产品细度与现生产指标保持一致, 即 -0.074 mm 粒级含量占 82%, 溢流产品浓度为 35%~40%。

本文对碎磨工艺开展 3 个方案研究和比较, 分别为方案 I (三段一闭路常规碎磨)、方案 II (高压辊磨超细碎+球磨) 和方案 III (半自磨+球磨)。3 个碎磨工艺方案技术经济比较结果见表 2。由表 2 可知, 方案 III 基建投资与费用现值最小, 方案 II 生产成本相对低, 方案 I 投资最大且费用现值最高, 综合以上情况, 从基建投资、生产经营费用及费用现值方面综合考虑, 方案 III (半自磨+球磨) 最优。

表 2 碎磨方案比较表

Table 2 Comparison of crushing and grinding schemes

项目	方案 I	方案 II	方案 III	
	常规破碎+球磨	高压辊超细碎+球磨	半自磨+球磨	
生产数据	矿石日处理能力/t	10 000	10 000	10 000
	年处理能力/kt	3 000	3 000	3 000
日运转时数	破碎及筛分/h	18	18	
	磨矿/h	24	24	24
投资	可比基建投资/(万元·a <sup>-1</sup> )	22 858.15	20 264.1	17 075.7
	可比单位矿石基建投资/(元·t <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	76.19	67.55	56.92
	可比碎磨生产费用/(万元·a <sup>-1</sup> )	6 215.06	5 968.56	6 226.14
生产费用	可比单位矿石碎磨生产费用/(元·t <sup>-1</sup> )	20.72	19.89	20.75
	费用现值(i=10%)/万元	75 431	70 781	69 823

## 2.3 优化后碎磨工艺

根据碎磨系统研究和比较结果, 确定碎磨工艺采用“粗碎+半自磨+球磨”(CSAB) 工艺流程, 工艺流程见图 3。露天矿采出矿石(粒度-1 000 mm) 经卡车运输至粗碎前缓冲矿仓, 进入粗碎作业。矿石经旋回破碎机破碎, 粗碎产品粒度为-300 mm, 经重型板式给料机给矿, 带式输送机输送至粗矿仓。粗矿仓矿石经仓底重型板式给料机给矿, 带式输送机倒运输送至半自磨机, 半自磨机选用 1 台 Φ8.53 m × 4.27 m, 变频调速, 装机功率 5 400 kW。半自磨机排矿端直线筛, 筛上顽石经带式输送机返回半自磨机形成闭路。直线振动筛筛下进入泵池, 再经 2 台渣浆泵扬送至水力旋流器组进入球磨回路。球磨回路由

1 台 Φ5.8 m × 9.5 m 球磨机, 装机功率 5 400 kW 和两段水力旋流器组组成, 两段水力旋流器沉砂返回球磨机形成闭路。两段水力旋流器组串联, 两段水力旋流器溢流为最终磨矿产品自流至选别作业。最终得到的溢流产品细度为-0.074 mm 占 82%, 矿浆浓度为 35%~40%。

## 3 技术经济指标分析

### 3.1 投资分析

本次碎磨流程技术改造和优化研究结果表明, 碎磨系统改造新增建设投资约 31 669 万元, 其中土建工程费用为 11 155 万元, 设备购置费为 11 623 万元, 安装工程费为 5 091 万元。

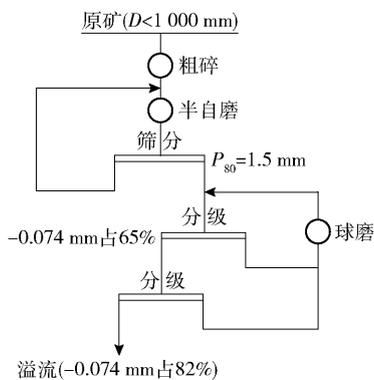


图 3 改造后碎磨工艺流程

Fig. 3 Crushing and grinding process flow after reformation

### 3.2 劳动定员分析

根据当前生产实际数据,该选厂改造前碎磨系统劳动定员总计 188 人。经碎磨系统改造后,相应作业取消,操作岗位人员减少,所需定员总计为 57 人,较改造前减少 131 人。假设职工薪酬水平按 15 万元/(人·a) 计算,改造前碎磨系统人工成本为 2 820 万元/年,改造后碎磨系统人工成本为 855 万元/年,减少了 1 965 万元/年。

### 3.3 成本费用分析

根据当前生产实际数据(年处理量为 3 000 kt/a),改造前碎磨流程生产成本见表 3,总生产成本 14 454 万元/a,其中材料成本 3 144 万元/a,动力成本 4 770 万元/a,人工成本 2 820 万元/a,维修费用 3 000 万元/a,折旧 720 万元/a。改造前选矿厂单位矿石生产成本为 48.18 元,其中碎磨系统材料成本 10.48 元/t,动力成本 15.90 元/t,人工成本 9.40 元/t,维修费用 10.00 元/t,折旧 2.40 元/t。

表 3 改造前碎磨系统生产成本

Table 3 Operation cost of crushing and grinding system before reformation

项目	数量/人	单价/元	吨矿成本/元	总成本/(万元·a <sup>-1</sup> )
材料			10.48	3 144
动力			15.90	4 770
人工	188	150 000	9.40	2 820
维修			10.00	3 000
折旧			2.40	720
合计			48.18	14 454

改造后碎磨系统生产成本见表 4,总生产成本 10 866 万元/a,其中材料成本 2 592 万元/a,动力成本 4 734 万元/a,人工成本 855 万元/a,维修费用 863 万元/a,折旧 1 822 万元/a。改造后碎磨系统生产成本为 36.22 元/t,其中材料成本 8.64 元/t,动力成本 15.78 元/t,人工成本 2.85 元/t,维修费用 2.88 元/t,折旧 6.07 元/t。

表 4 改造后碎磨系统生产成本

Table 4 Operation cost of crushing and grinding system after reformation

项目	数量/人	单价/元	吨矿成本/元	总成本/(万元·a <sup>-1</sup> )
材料			8.64	2 592
动力			15.78	4 734
人工	57	150 000	2.85	855
维修			2.88	863
折旧			6.07	1 822
合计			36.22	10 866

由表 3 和表 4 的数据对比可知,碎磨流程改造后单位生产成本相比改造前降低 11.96 元/t,每年可降低生产成本 3 588 万元,主要体现为材料消耗、维修费用等显著降低。

## 4 结论

通过广东某硫铁矿选厂碎磨系统改造与优化研究,获得以下结论。

1) 该选厂现有碎磨系统设备老旧、规格小、型号杂、数量多,导致生产维护困难,维修费用高,劳动生产率低,运行成本偏高。

2) 经常规破碎 + 球磨、高压辊磨 + 球磨以及半自磨 + 球磨 3 种碎磨工艺改造研究比较,确定最优方案为半自磨 + 球磨粉碎工艺,即粗碎 + 半自磨 + 球磨(CSAB)。该工艺具有流程短、配置简单、占地面积少、生产自动化水平高等优点。

3) 碎磨流程改造新增建设投资约 31 669 万元,改造实收后碎磨作业生产人员可减少 131 人,人工成本降低 1 965 万元/a,碎磨系统生产成本总计降低 3 588 万元/a,单位矿石成本降低 11.96 元。

4) 碎磨系统改造后能较好地改善生产作业环境、提升生产安全水平、减少定员、大幅提高劳动生产

率,同时减少维护工作量、保障企业生产稳定、降低人工、用电等生产成本。

碎磨系统实施改造后能有效降低碎磨系统安全风险及运行成本,促进有效推进选矿厂大型化、自动化转型,提升整个选矿厂本质安全,优化现有人力资源配置,最终实现企业经济效益和社会效益最大化,为打造绿色化工新材料制造标杆企业奠定坚实基础。

#### [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] Wanzhong Yin, Yuan Tang, Yingqiang Ma, et al. Comparison of sample properties and leaching characteristics of gold ore from jaw crusher and HPGCR[J]. Minerals Engineering, 2017(111):140-147.

- [5] 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.
- [6] 何荣权,尤腾胜,邓朝安. 智能磨矿系统半自磨机控制关键参数研究[J]. 绿色矿冶,2023,39(1):17-20.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 孟宪瑜,高起鹏,秦贵杰,等. 某伴生铜锌硫铁矿选矿试验研究[J]. 有色矿冶,2018,34(6):26-28,32.
- [12] 何荣权,秦华江,杨少燕,等. 某钼选矿厂技改工程的厂址选择[J]. 矿业研究与开发,2020,40(12):138-142.
- [13] 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.

## Technical reform and optimization of crushing and grinding process of a pyrite mine in Guangdong

WU Huanxun, ZHANG Shuguang, XUN Wensheng, FENG Qingyun  
(Guangdong Guangye Yunliu Mining Co., Ltd., Yunfu 527300, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of outdated equipment, small specifications, large quantity, difficult production and maintenance, high maintenance costs, low labor productivity and high operating costs in the crushing and grinding system of a certain pyrite beneficiation plant in Guangdong, technical transformation and optimization research on the crushing and grinding system were carried out. Through the study of regular crushing-ball mill grinding, HPGR-ball mill grinding and SAG mill-ball mill, the optimal implementation plan is determined to be SAG mill-ball mill process, namely coarse crushing-SAG mill-ball milling (CSAB). After adopting this crushing and grinding process, the unit ore cost is reduced by 11.96 yuan/t. At the same time, it can significantly improve the working environment, enhance safety level, reduce staffing, significantly increase labor productivity, reduce maintenance workload, better ensure the stability of enterprise production, and create better economic and social benefits.

**Key words:** pyrite ore; technical transformation of crushing and grinding process; SAG mill process; investment estimate; technical and economic analysis

