

矿物加工工艺流程设计与优化研究

韩永明

核工业二〇八大队 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿有限公司, 内蒙古 包头 014010

[摘要]矿物加工是矿产资源与工业之间的桥梁纽带,它的工艺流程的设计以及不断完善决定了矿产资源利用效率高低、企业的生产成本大小以及矿区的环境质量好坏,现在我们国家的矿产资源严重存在着贫、细、杂的现象,传统的选矿过程中普遍存在能耗过高、回收率不稳定、自动化程度低等一系列通病现象,“在冶金行业中的选矿过程中,磨矿选别阶段的能源消耗往往占全选厂能耗的一半以上”,节能降耗的任务迫在眉睫。此文以工艺流程改造的迫切性为切入点,全面总结出矿物加工过程中工艺繁琐程度高、能耗大、产品质量波动大及自动化水平低等问题,再从工艺参数控制、节约能源降低消耗量、提高产品品位以及实现智能化升级改造等多个方面给出系统的改进方法,并通过国内外代表性企业实例加以证明。

[关键词]矿物加工; 工艺流程优化; 节能降耗; 智能化选矿; 工艺参数

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19777

中图分类号: TD9

文献标识码: A

Research on the Design and Optimization of Mineral Processing Process Flow

HAN Yongming

Inner Mongolia Urad Middle Banner Tugurige Gold Mine Co., Ltd., Nuclear Industry 208 Brigade, Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract: Mineral processing is the bridge between mineral resources and industry. The design and continuous improvement of its process flow determine the efficiency of mineral resource utilization, the production cost of enterprises, and the environmental quality of mining areas. Nowadays, our country's mineral resources are severely poor, refined, and miscellaneous. In the traditional mineral processing process, there are a series of common problems such as high energy consumption, unstable recovery rate, and low degree of automation. "In the metallurgical industry, the energy consumption in the grinding and beneficiation stage often accounts for more than half of the energy consumption of the entire beneficiation plant." The task of energy conservation and consumption reduction is urgent. This article takes the urgency of process transformation as the starting point, comprehensively summarizes the problems of high process complexity, high energy consumption, large product quality fluctuations, and low automation level in mineral processing, and then provides systematic improvement methods from multiple aspects such as process parameter control, energy conservation and consumption reduction, product quality improvement, and intelligent upgrading transformation. These methods are demonstrated through representative enterprise examples at home and abroad.

Keywords: mineral processing; process optimization; energy conservation and consumption reduction; intelligent beneficiation; process parameters

引言

我国是全球最大的矿产资源消费国,随着工业化的持续推进,高品位、易选的矿产资源日益枯竭,低品位、复杂共伴生矿石的开采比例不断上升。行业数据显示,“近年来,选矿厂磨矿用电占全厂用电的 40%左右,是该厂能耗、物耗占比最高的工艺环节”。与此同时,环保政策持续收紧,对尾矿排放、药剂使用的限制日益严格,倒逼矿物加工工艺向绿色化、智能化转型。“自然资源部发布了矿产资源节约与综合利用先进适用技术目录(2025 年

版),共有 376 项技术入选”,充分反映出行业对工艺优化的迫切需求。在此背景下,科学设计矿物加工工艺流程并持续优化已成为行业提升竞争力的核心路径。本文围绕工艺流程设计中存在的普遍问题,探讨相应的优化策略,以期为选矿厂的提产增效与节能减排提供系统性思路。

1 矿物加工工艺流程优化的必要性

矿石处理工艺流程优化的迫切性在于对资源、生产和环境三大方面的考虑。就资源而言,随着开采深度的加深,所需目的矿物就越贫、细、杂,原矿品位越来越低,以难

处理的复杂共生矿为主要代表的资源筛选变得异常困难。“江西某铜矿是我国特大型斑岩铜矿，随着矿山开采深度的不断下降，矿石可磨性逐渐降低，碎磨成本逐渐增加；同时，目的矿物愈发贫、细、杂，原矿铜品位低至0.3%左右”。单一的传统工艺流程已经很难得到令人满意的选择结果了。从生产成本考虑，磨矿、浮选、脱水等环节的能耗占整个厂生产的比重最大，大大增加了磨矿的成本；从环保方面来说，传统工艺所用的一些化学药品会对环境造成一定影响，尾矿排出量很大并且长时间堆积浪费了大量的耕地资源，所以对于矿物加工工艺流程的整体改进既是响应绿色矿山的要求，也是为了实现矿产资源的可持续发展。

2 矿物加工工艺流程设计存在的问题

2.1 工艺流程复杂性较高

目前很多选矿厂的工艺流程存在着工序冗余、结构繁冗的现象。我国矿产资源以贫矿为主，富矿较少，复杂的矿物成分以及多元素共生现象导致常规选矿工艺流程环节众多，流程较长。传统的工艺设计必须要进行多级破碎、多级磨矿及多级精选，设备较多，厂房规模较大，其检修工作也相应增大。在生产过程中，冗长的选矿流程中任何一个环节的小变动都将通过工序链条依次累加扩大，对产品的质量控制造成很大的困扰^[1]。对多元矿而言，在工艺流程之中各种产品选别路线相互交错，在循环返回的中矿如何处置对全系统的回收率有着决定性影响，从这方面来看加大了工艺设计完善及性能调校的技术难度。“老式球磨机是通过定量填充球磨介质，靠底座支撑筒体，由动力设备传动齿轮带动筒体转动，用筒体旋转所形成的离心力进行磨碎”，这种球磨机不仅构造烦琐而且电耗巨大。

2.2 能耗与资源消耗较大

在矿物加工过程中，能量使用主要集中在两个方面。一个是破碎研磨过程；另一个就是矿浆输送方面，而磨矿则是长期以来各个选矿厂最大的能耗来源。“在冶金行业中，选矿阶段中的磨矿-富集工艺环节的能耗往往能达到整个选矿厂能耗的50%以上，传统的球磨机，用定量添加磨矿介质……这种做法耗能非常严重。”传统球磨机采用的是密度大的钢球作磨矿介质，在运行过程中负载很重，钢球磨损严重，也容易出现矿物过度磨的情况，造成过度磨细产品比例过高，“此过程中噪声很大，还经常造成筒体内衬板掉落。”同时浮选阶段由于矿浆加热、药剂溶解以及搅拌所需的动力等也会消耗大量能量。化学用料方面也必须注意，因为缺少有效的控制措施，一些选矿厂实际

用药超过试验室建议量很多倍，大量药剂最后都成为尾矿的一部分进入到环境中去，对尾矿库水质处理造成持久性的负担。

2.3 精矿回收率不稳定

精矿品位和回收率的波动是困扰选矿的一个大问题。原矿质量变化是最大的外在扰动因素，不同的采场、不同的爆破区以及不同的堆场所得到的矿石在品位组成上、硬度特性上、矿物解离程度上有很大的差别，如果配矿不到位，就会出现短时间内入磨矿石的质量突然大幅波动的情况，那么根据既定的设计方案的工艺参数已经不能适应这种快速变化了的原料性质，那么其分选的效果肯定是达不到要求的。设备的异常磨损、衬板及介质更换滞后也会严重地削弱磨粉能力，从而牵连后面的浮选环节。一些选矿企业在管控中忽视中间因素的问题，使得很多重要工序及匹配失当的调节因子一直得不到解决，“精矿品位下滑与回收率偏低双低下行尴尬局面”已成为普遍性问题。

2.4 自动化与智能化水平不足

现有大部分选矿厂的自动化只实现了对单一设备的控制以及仪表监控显示的功能，缺少系统融合式的智能探测、自我判断、自动执行的功能，在浮选加工过程中传统的做法是操作工要依靠人眼观察出泡沫的颜色、精矿颗粒大小及其流动情况等，然后根据自身经验来估计现在处理的效果进而对充气量和药剂量进行调整。长期而言“金川镍钴选矿厂浮选生产一直沿用着人工经验的方法进行，而pH值、品位等重要的生产指标却还没有实现在线监测技术的应用”。传统操作模式的操作人员需要通过人眼来观察泡沫的颜色及大小以及是否有粘连性等，再手动来调整气流量还有药剂的数量等等。这种“人为经验为主”的方式也存在一定的缺点：“人为主观”容易造成调节慢，不够精准，造成工艺变动，“数据采集系统支离破碎”，很多工况变量靠纸张或者表格分散储存，这些数字空白的存在，让选厂长期处于“补课”甚至是“出了问题再修理”的状态。

3 矿物加工工艺流程优化方法研究

3.1 工艺流程优化目标与原则

矿产资源开采工艺流程优化应该以“高效、节能、绿色、智能化”为核心任务。一是高效，就是在保证精矿品质的基础上尽可能提升有用矿物的回收率；二是节能，在设备更新以及简化工艺流程的基础上尽量减少单位能耗系数；三是绿色，从源头上减少药剂污染和尾矿排放问题；四是智能化，运用信息技术对生产工艺进行准确调控，“中

铁资源新鑫公司围绕‘提效率,降消耗,优指标’的任务”,取得了一些成果^[2]。在具体的改进过程中,要以“多碎少磨、能收早收、能抛早抛”为方针,尽可能节约磨矿消耗,先集中精力对易于提取的有用成分进行回收,尽早抛弃品位较低的尾矿,从而整体减轻后工序的压力。“预富集和搅拌介质磨矿相结合既能减小磨矿量又能达到 12%~20% 的节电效果。”

3.2 工艺参数优化方法

工艺参数优化即通过对磨机设置值、药液制度以及阀门开度等进行定量调节来达到最佳的技术指标的方法,一般常用的工艺方法。磨矿过程中可由技术人员在生产操作过程中取样并带回化验室分析确定工艺参数的最佳值,在磨矿过程中,通过合理控制磨机球体之间的比例以及加大矿浆浓度到 65%~70%可以大大地增加有用矿物的解离程度;而在浮选过程当中可以对使用的抑浮剂以及捕收剂的品种及其用量进行系统的匹配实验,从而建立起动态优化模型,根据实际情况不断调整相应的工艺参数。利用响应曲面法等统计方法,“采用 Box-Behnken 响应曲面法对磨矿过程中的多个因素间相互影响进行探究并构建了铁精矿品位与回收率的响应曲面模型”,达到由“凭经验给药”变为“精确施治”。

3.3 节能降耗优化措施

节能降耗势必要从生产工艺的根本做起,全方位地系统地改进。在粗碎阶段增设干法预选出料环节,在破碎与磨矿之间设立有效的废物筛选门槛,减少后续磨矿、精选作业的负担。在球磨机方面,“纳米复合陶瓷球应用于铁矿细磨较为适合……陶瓷球磨矿能耗、电耗较之钢球磨矿低得多,节能作用明显”。“同样磨矿条件下,使用陶瓷球较之钢球可节约能耗 36.36%,而且磨出的产品更加细微,避免了过粉磨的情况”,使产品更加细。“马钢矿业南山矿技术研发中心自主创新的‘低碳磨选关键技术集成及工业化新工艺新技术’把永磁直驱磨矿、纳米陶瓷球代替钢球立磨等新技术巧妙结合在一起,原矿品位提升 21.32%,现场噪声降到 71dB 以下”成功攻克了长期以来困扰人们的传统卧式球磨机噪声超过 92dB 的瓶颈问题。“某选矿厂入料量为 275t/h 时,日耗电量由原来的 13884kWh 下降到现在的 8146kWh”。该技术革新大大减少企业的能耗支出,同时也有利于改善一线工人工作环境。

3.4 提高精矿品位与回收率的措施

提高精矿品位和综合回收率要多措并举共同破解难题。化学药剂技术的进步一直是最重要的基础动力之源:

“金川镍钴选矿厂构建了智能辨别 AI 算法以及浮选专家系统,实现了化学药剂投加的智能化调整,使浮选的泡沫层处于较佳状态,从而达到提高精矿品位以及综合回收率的目的。”在工艺上,“江西某选矿厂通过‘多碎少磨’‘流程简化’‘设备更新’‘药剂调整’等手段后粗选段铜回收率上升 1.31%,整个流程铜回收率提升 1.11%”;设备革新上,“采用自动化装置代替人工操控可以有效地提升其甄别的准确性”。对于难处理的微细粒矿物的回收问题,进行矿泥开路实验及添加强力捕收剂都取得了很好的效果^[3]。由此可见,通过环节重组、流程简化的方法对有用成分综合利用率有较大的改善作用。

3.5 智能化与信息化优化技术

智能化全面革新传统选矿的生产工艺流程。在浮选过程中,“国内首台刮板式浮选机泡沫智能控制系统结合 AI 视觉识别、机械传感器以及自动化控制系统技术形成一个完整的‘识别、分析、控制、反馈’的全自动循环回路,可以针对不同的泡沫类型及工艺需要做出毫秒级调整。泡沫特征识别精度大于 90%,控制系统响应时间小于 90s”。“金川镍钴选矿厂配置泡沫图像分析仪、在线品位分析仪等智能感知设备,集成设备状况监测及健康管理功能,建立浮选工况与主要生产设备工作状态智能监控体系。”在磨矿数字化上,“美卓磨矿专家系统(APC)实现了对磨机电流、磨音、给矿量这些重要参数的在线监测,形成了‘感知-决策-执行’的闭环控制系统”。“它完成了从半自磨给料到旋流器分级间的所有操作控制,包括半自磨给矿量、半自磨前补水以及半自磨转速这几个主要指标”。“罗河矿硫浮选智能化控制技术经过三个月的试验运行使硫精矿合格率达到 76%,且浮选尾矿含硫量精确控制在 0.9%,智能化改造后生产线硫精矿回收率平均提高 2.15%”。在重选方面,“江西理工大学研制出数字化智能选矿摇床,利用机器视觉的方法来识别、提取床面矿物分布带特征,创建一个以矿物回收率最大为目标的‘矿带特征-控制参数’智能优化控制系统”;“华锡有色高峰公司安装了基于 YOLOv11 实时图像识别的摇床智能接矿系统,完成锡精矿接矿毫米级精准控制”。智能化就是用数据指导工艺调节过程,把传统的“经验调节”转换成“数据驱动+自动运行”的方式。

3.6 工艺流程优化效果评价

工艺流程改进效果评估是对改进成果进行检验、为未来进行调整提供理论基础的,在评估中涉及技术参数、经济效益以及环境影响三个方面。其中技术参数有:精矿

品位、回收率、磨矿细度、分级效率等等；经济效益包含单位能耗、药剂单耗、设备运转率和加工成本；环境影响体现在对尾矿排放量和废水回用率等方面^[4]。“罗河矿硫浮选智能化控制系统年创效潜力近千万元”，整体效果良好。构建一套合理的评价标准有利于公正地评判出改进所带来的影响大小，表 1 就是某选矿厂在进行工艺改进前后的一些指标变化情况。

表 1 某选矿厂工艺优化前后主要指标对比

评价指标	优化前	优化后	变化
精矿品位 (%)	15.24	18.71	+3.47
回收率 (%)	59.94	65.19	+5.25
磨矿电耗 (kWh/t)	32.0	23.6	-8.4
钢球单耗 (kg/t)	0.88	0.71	-0.17
尾矿含硫 (%)	1.20	0.90	-0.30

由表格的数据可以得出，在流程改造以及设备更新后，精矿品位及回收率都有很大的提高，在此基础上电耗、介质耗量大幅降低，整体改进达到了预期的要求。

4 结语

本文从工艺复杂性、能耗、回收率稳定性及智能化水平四个方面分析了当前矿物加工流程设计中存在的问题，并在此基础上从参数优化、节能降耗、品位提升、智能化升级等维度提出了系统性的优化方法。自然资源部最新发布的《矿产资源节约与综合利用先进适用技术目录（2025 年版）》显示，共有 376 项技术入选，行业技术创新成果

丰硕。磨矿专家系统（APC）以智能化手段破解了传统磨矿工艺的稳定性与能耗难题，不仅稳定了关键工艺指标，更建立起持续优化的数字底座。面向未来，随着低品位矿石处理比例持续增加和环保要求不断提高，矿物加工工艺将朝着短流程化、低药剂量化和智能化方向深入演进。人工智能、机器视觉和工业互联网等新一代信息技术的加速落地，有望推动行业从“经验驱动”向“数据驱动”的根本性转变，为实现矿产资源的高效、清洁和可持续开发提供坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]赵杰,李航谦,张博文,等.矿物加工过程智能化的进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(11):75-80.
 - [2]李伟英.矿物加工工程中的矿石质量不稳定问题及质量控制对策研究[J].矿业装备,2024(7):86-88.
 - [3]田峻华,龚潇,杨同正,等.工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的应用[J].世界有色金属,2024(3):190-192.
 - [4]张臻悦,蒋灵,郭文达,等.智能技术在矿物加工领域中的应用进展[J].有色金属(选矿部分),2023(6):16-18.
- 作者简介：韩永明（1982—），男，汉族，河南省林州市人，高级工程师，工程硕士，毕业于兰州交通大学应用化学专业，现就职于核工业二〇八大队 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿有限公司，从事选冶生产技术与工艺/选冶生产工作。