

矿石破碎与磨粉设备的能效提升技术分析

石炎昌 410322198807260012

摘要：矿石破碎与磨粉是矿物加工流程中能源消耗占比最高的环节，其能效水平直接影响整个选矿企业的生产成本与碳排放强度。本文梳理了当前矿石破碎磨粉工艺的能效现状，分析了传统设备存在的能效短板，从工艺优化、设备改造、智能控制三个维度总结了当前主流的能效提升技术路径，并结合工程应用案例分析了不同技术的应用效果与适用场景。研究表明，通过采用多碎少磨工艺、层压破碎技术改造以及智能化变频调速控制系统，可有效降低破碎磨粉环节单位能耗15%~30%，在双碳目标背景下，能效提升技术的推广应用对矿物加工行业绿色转型具有重要的现实意义。

关键词：矿石破碎；磨粉设备；能效提升；多碎少磨；绿色选矿

一、矿石破碎与磨粉环节的能效现状

在矿物加工工业中，矿石破碎与磨粉是实现矿石单体解离、为后续选别作业提供合格原料的核心工序，同时也是整个流程中能源消耗最高的环节。据国内选矿行业的统计数据显示，破碎磨粉环节的能源消耗占选矿厂总能耗的50%~70%，其中磨粉作业的能耗占比就超过了50%，产生的生产成本占矿石加工总成本的40%以上。我国作为全球最大的矿石生产与消费国，每年仅黑色金属、有色金属与非金属矿的破碎磨粉加工量就超过100亿吨，年耗电量超过4000亿千瓦时，能效水平每提升1个百分点，就可以节约近40亿千瓦时的电力，减少近300万吨的碳排放，节能降碳空间十分巨大。

长期以来，我国矿物加工行业的破碎磨粉工艺普遍沿用传统的“三段一闭路破碎+球磨磨粉”流程，设备层面以传统颚式破碎机、圆锥破碎机、卧式球磨机为主，整体能效水平偏低。一方面，传统破碎设备多采用冲击破碎与劈裂破碎原理，破碎过程中存在大量无用能耗，大约只有10%~20%的能量用于矿石的有效破碎，其余能量都以热能、机械能损耗以及设备磨损的形式耗散；另一方面，传统磨粉设备中，球磨机的能量利用率更低，仅有不到5%的能量用于矿石的粉磨，大部分能量消耗在钢球碰撞磨损、筒体摩擦发热以及振动耗散上。

二、核心能效提升技术路径分析

2.1 工艺优化：推广多碎少磨工艺，降低入磨粒度

多碎少磨是当前破碎磨粉领域公认的能效优化核心工艺路线，其核心原理是

通过降低破碎最终产品的粒度，提高磨粉工序的处理能力，利用破碎作业能效远高于磨粉作业的特点，优化整个破碎磨粉流程的能量分配，实现整体能效的提升。相关研究表明，破碎作业的单位能耗仅为磨粉作业的 $1/10\sim 1/6$ ，破碎 1 吨矿石的能耗大约在 1~3 千瓦时，而磨碎 1 吨矿石的能耗则达到 10~30 千瓦时，因此将更多的破碎任务前移，降低入磨矿石粒度，可以显著降低整个流程的总能耗。

在实际应用中，多碎少磨工艺的实现主要依赖于破碎流程的改造，将传统三段破碎的最终产品粒度从 15~25mm 降低到 8~12mm，部分改造项目甚至可以将入磨粒度控制在 5mm 以下。某铁矿选矿厂的改造数据显示，在将入磨粒度从 20mm 降低到 10mm 之后，磨粉工序的台时处理能力提高了 28%，单位矿石磨粉能耗降低了 22%，虽然破碎环节的能耗增加了约 0.8 千瓦时/吨，但整体破碎磨粉流程的单位能耗降低了 18%，年节电超过 260 万千瓦时，经济效益十分显著。多碎少磨工艺除了能效提升之外，还可以降低钢球与衬板的磨损，延长设备使用寿命，减少磨矿介质消耗，进一步降低生产成本。

2.2 设备升级：采用新型能效设备替代传统设备

设备升级改造是实现能效提升的直接路径，近年来针对破碎磨粉设备的能效改进主要围绕破碎原理优化与结构改进两个方向，开发出了一批高效低耗的新型设备。在破碎设备领域，传统颚式破碎机与圆锥破碎机多采用自由破碎原理，而新型层压破碎设备通过改变破碎腔型设计，利用矿石之间的层压破碎作用实现矿石破碎，不仅提高了破碎效率，还可以改善产品粒度组成，降低过粉碎现象。目前主流的高效圆锥破碎机采用了液压调整、层压破碎腔设计，相比传统圆锥破碎机，处理能力提高 30% 以上，单位破碎能耗降低 15%~20%，已经成为中小型矿石破碎的主流设备。此外，立轴冲击式破碎机也在细碎作业中得到广泛应用，其特殊的破碎方式可以产出粒度更均匀的细碎产品，适配多碎少磨工艺的需求。

在磨粉设备领域，传统卧式球磨机的能效短板十分明显，近年来新型辊式磨料机、搅拌磨、立式磨等高效磨粉设备逐步得到推广应用。其中立式辊磨机采用料床粉磨原理，依靠辊子的压力对矿石料床进行碾压粉磨，相比球磨机，能量利用率提高了 2~3 倍，单位粉磨能耗可以降低 20%~40%，而且可以同时完成破碎与粉磨作业，简化工艺流程。

2.3 智能控制：优化设备运行状态，降低空载与低效运行损耗

除了工艺与设备改造之外，通过智能化控制技术优化设备运行状态，减少因负载波动、操作不当导致的能源浪费，也是能效提升的重要路径。传统破碎磨粉设备多采用定速运行，人工调整参数的运行方式，当矿石性质、给料量发生波动

时，无法及时调整运行参数，经常出现设备欠载或者过载运行的情况，不仅影响产品质量，还会造成额外的能源消耗。而智能化控制系统通过在线传感器实时采集给料量、矿石硬度、产品粒度、设备负载等参数，通过算法自动调整设备给料速度、排矿口大小、电机功率等运行参数，始终让设备保持在最优负载区间运行，从而降低无效能耗。

在磨粉作业中，基于磨音检测、负荷电流分析的智能磨矿控制系统已经得到广泛应用，该系统可以根据磨矿负荷自动调整给矿量与分级机返砂量，避免胀肚、欠磨等问题，稳定磨矿产品粒度，同时可以降低单位能耗 5%~10%。而变频调速技术的普及，进一步提升了节能效果，针对破碎磨粉设备经常处于变负载运行的特点，采用变频电机替代传统定速电机，可以根据实际负载调整电机输出功率，避免了轻载运行时的功率浪费。

三、应用效果与发展方向

从目前国内选矿行业的应用情况来看，上述三种技术路径的组合应用，可以实现破碎磨粉环节 15%~30%的节能效果，投资回收期普遍在 2~3 年，经济与环境效益都十分显著。对于新建选矿厂，优先采用多碎少磨工艺搭配新型高效破碎磨粉设备与智能控制系统，可以从源头实现能效提升，单位能耗比传统工艺降低 25%以上；对于存量选矿厂，通过局部改造，比如更换破碎腔型、加装变频控制系统、优化破碎流程，也可以在较低投资的前提下实现 10%~20%的能效提升，适合多数中小企业的改造需求。

未来，矿石破碎磨粉设备的能效提升技术将朝着两个方向发展：一是设备本身的进一步大型化与高效化，随着选矿厂规模不断扩大，大型高效破碎磨粉设备的规模效应更加明显，单位能耗更低；二是智能化程度的进一步提升，结合大数据与人工智能技术，实现基于矿石性质预测的前馈控制，进一步提高运行参数优化的精准性，挖掘更大的节能空间。在双碳目标的背景下，破碎磨粉环节作为矿物加工行业的主要能耗来源，能效提升技术的推广将成为行业绿色转型的核心方向之一，具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [2] 刘建远. 碎磨工艺与装备的新进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2020(1): 1-9.
- [3] 陈炳炎. 我国选矿碎磨工艺节能技术现状与发展趋势[J]. 有色金属工程,

2017, 7(3): 78-82.