

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2022.03.014

碎磨流程智能化改造提升路径分析

任明昊^{1,2,3} 谢贤^{1,2,3} 胡尚军^{1,2,3} 陈桃^{1,2,3} 李加文^{1,2,3}
张守逊^{1,2,3} 李悦^{1,2,3} 童雄^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093)

摘要: 碎磨工艺流程是矿产资源开发过程中的关键环节和能耗重点,也是如今智能化浪潮下选矿厂进行优化完善的首选工序。从碎磨流程的装备升级、工艺优化和生产控制这三个角度详细阐述了碎磨流程智能化改造提升领域的技术和应用现状,希望能为该领域的优化提供一些借鉴。装备升级方面,介绍了智能碎磨设备功能和传统碎磨设备改造的现状。工艺优化方面,描述了仿真模拟技术和优化算法用于碎磨流程数据工艺参数优化。生产控制方面,阐述了多种技术应用于实时检测、故障诊断和过程控制方面的效果和适用条件。碎磨流程的智能化改造提升高度契合当下企业提质增效、节能降耗的需求。

关键词: 选矿自动化; 碎磨; 智能化

中图分类号: TD921

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2022)03-0103-09

Path analysis of intelligent transformation and improvement of grinding process

REN Ming-hao^{1,2,3} XIE xian^{1,2,3} HU Shang-jun^{1,2,3} CHEN Tao^{1,2,3} LI Jia-wen^{1,2,3}
ZHANG Shou-xun^{1,2,3} LI Yue^{1,2,3} TONG Xiong^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean, Utilization, Kunming 650093, China;

3. Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources, Kunming 650093, China)

Abstract: The grinding process is the key link and energy consumption focus during the process of mineral resources development, and it is also the preferred process for the optimization and perfection of concentrator under the wave of intelligence nowadays. In this paper, the technology and application status in the field of intelligent transformation and upgrading of grinding process were described in detail from the three perspectives of equipment upgrading, process optimization and production control, hoping to provide some reference for the optimization of this field. In the aspect of equipment upgrade, the function of intelligent grinding equipment and the status quo of traditional grinding equipment transformation are introduced. In terms of process optimization, simulation technology and optimization algorithm are described for process parameters optimization of grinding process data. In production control, the effects and applicable conditions of various technologies applied in real-time detection, fault diagnosis and process control are described. The intelligent transformation and improvement of grinding process highly meets the demand of improving quality and efficiency, saving energy and reducing consumption of current enterprises.

Key words: mineral processing automation; grinding; intelligent

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174252)

第一作者: 任明昊, 硕士研究生, 研究方向为选矿智能化、尾矿资源二次利用。E-mail: 3256316452@qq.com

通信作者: 谢贤, 博士, 教授; E-mail: kgxianxie@126.com

碎磨流程属于物料准备阶段, 他为选别作业提供粒度适宜的物料, 在整个选矿过程中耗能最多, 而且直接影响着生产成本和选矿指标。然而, 想要提高碎磨流程产品的质量需要克服很多困难, 包括

解决矿石特性差异、碎磨工艺选择和能耗匹配不等实际生产问题,满足有高效节能生产、绿色环保发展的时代要求等。而数字化、智能化能显著提高碎磨分级的工作效率和应变能力^[1]。因此,继续深耕电气及自动化领域,主动引入人工智能、大数据等信息技术,推动生产方式向数字化、精细化、柔性化转变,成为碎磨技术领域新的重要研究方向。此外,国家为促进传统优势产业提质增效,要求企业实施技术改造提升行动计划。这也让“如何进行智能化改造提升”成为了各工业领域不得不面对的现实课题。基于此,本文着重从技术和应用方面探讨碎磨流程的数字化、智能化改造提升的技术路线和行动路线。

1 碎磨流程的装备升级

1.1 生产设备升级

为适应新时代手动开关和现场控制所不能满足的快节奏、高标准生产要求,需要升级改造各类碎磨设备。

1.1.1 智能碎磨设备功能

如今,新型的碎磨设备能通过对机电一体化、过程检测、PLC控制、冗余系统、组态软件等自动化技术的组合,实现可视化操作、过载保护和对设备各组件及整体运行状态的实时监控。设备还可以通过内置适宜通信技术来分享状态参数、应用机器学习算法进行分析预测、调用多种智能策略微调工作状态,实现在线维护、故障警告、稳定负荷等基础的智能操作。

以新型球磨机为例,磨机的运行声音、衬板磨损、油膜厚度、轴承温度、电机转速等都在监测范围,一有异常就会发出警报。舒云峰^[2]研制的破碎机PLC控制系统,配置了冗余系统来增加系统可靠性,避免了故障对生产过程产生影响。他通过程序设计实现了设备监控功能,还给出了破碎机液压泵和油加热器等关键部件的就地及远程控制手段。智淑亚等^[3]开发了智能控制旋转冲击破碎机,能检测钎杆到打击物表面距离并通过累次击打确定入料矿物的硬度和强度,最终据此选出破碎时的最优冲击速度和频率。

1.1.2 传统碎磨设备改造

除了研发内置感知功能的新设备,还可以对传

统设备进行智能化改造。常见的手段是首先通过运用各种新型检测技术和配套传感器实现对环境参数和设备状态参数的获取,然后将参数移交控制系统做出决策,再通过调节软启动柜、变频器、无功补偿柜、框架断路器、液压系统等直接手段,以及改变给矿速度、调节矿浆浓度等间接手段,控制碎磨设备执行命令,最终实现控制物料平衡和优化产品质量两大目标^[4]。

例如,甘桂裕等^[5]研制的圆锥破碎机智能化控制系统可以接收传感器收集的参数和运行记录并实时显示,自主判断运行状况并在设备运行异常时发出警报反馈。张卫等^[6]使用激光物位计在重板给矿机运行间隙检测颚式破碎机下部矿仓料位和破碎腔料位。其团队设计的自适应控制系统还可以调节给矿机的给矿速度和启停,使破碎机始终处于“挤满式”给矿的最佳工作状态。曾涛等^[7]使用金属检测仪在输送过程中检测物料,然后在必要时控制高压辊磨机主动避让金属杂质,可以避免磨机被其损坏。OLIVIER等^[8]则通过使用深度卷积神经网络即时地对矿石图像进行分类,实现了提前将入料矿物的尺寸表征提供给磨机的功能。

1.2 工具软件赋能

使用数字化工具为行业赋能是常用的改造提升手段。在碎磨设备相关领域,建模仿真和分析预测类的软件工具已经同实际生产过程联系在了一起,并成功应用于设备研发、工业试验和设备选型等环节。

1.2.1 碎磨设备设计

工具软件已广泛应用于现代碎磨设备的设计制造流程。如罗秀建等^[9]在对惯性圆锥破碎机进行大型化研究时,其团队首先完成的是对主要结构参数、工作参数的理论计算,再按设计经验对部分参数进行调整优化,之后建立三维模型并基于模型对设备整体和部分重要零部件进行仿真模拟,如确定动锥实际工作中的应力分布和位移状况、探寻动锥装配体的共振频率范围等,最终,经由上述全部流程得到GYP-1500惯性圆锥破碎机的整机设计资料后,才会制备样机、进行试验。

而在使用实体设备进行工业试验之前,还会先使用计算机技术来预测设备的实际工作状态,实现对物理样机功能的部分替代。如此不仅能降低成本,还能缩短开发周期。常见技术是虚拟样机技

术,如庞国强等^[10]就基于 ADAMS 建立了 MQYG 系列溢流型磨机参数化模型。JAYASUNDARA 等^[11]将动力学模型运用到不同尺寸的球磨机上。这些模型可用于研究该系列磨机在各种不同工况下的特性。而张将等^[12]为验证某液压圆锥破碎机各关键部件结构强度能否满足设计要求,对整机结构进行了仿真分析计算,最终得到了最大过载工况下,破碎机各关键部件的弹性变形状况和应力分布,实现了对各部件强度的校核。

1.2.2 碎磨设备优化升级

设备的优化升级主要是通过调整碎磨设备各项结构参数乃至增加新的构件来增益它的运行状况,而为实现此类增益往往需要进行复杂的数理计算和应用各类仿真优化软件。

仿真模拟手段常用于结构参数的探索。有限元分析软件如 ANSYS,常用于结构静力分析、结构动力分析和模型性能预测领域,在碎磨领域中被用来研究应力分布、检测结构强度。如李柏林^[13]采用 ANSYS 对大型立式辊磨机进行了研究,给出了盘体应力分布更加合理的设计方案。软件 ADAMS 则在动力学和运动学分析领域的效果更好,可以用于计算磨机介质运动轨迹和动能等动态特性。李小莹^[14]采用 ADAMS 软件建立了偏心机构不同的两种振动磨机的运动模型,分析比较了空载和有载情况下两者研磨钵盖体与磨矿介质相互冲击时的运动形式和能量状况,选出了运动效果更优的一方。

离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法,所以特别适于研究主要状态是颗粒物质进行不连续运动的破碎磨矿过程,在探究碎磨机理和分析碎磨过程中的异常状况等方面能够发挥重要作用。例如,武秋俊等^[15]使用 EDEM 对惯性圆锥破碎机的破碎过程进行仿真研究,发现了破碎区下半区域颗粒流动不均匀的原因:部分大颗粒未被及时破碎,在间隙处造成了短期瞬态的堵塞,阻碍了上方颗粒流动。而在探明异常原因后,就可以继续研究如何调整结构、解决问题。

此外,大多数仿真模拟软件还提供了耦合功能和程序接口,实现了丰富的功能。如 EDEM 可以与 PBM 模型等 CFD 软件功能耦合,进行颗粒一流体系统仿真^[16],还可以引入自行设计的接触模型、颗粒工厂。如毕秋实等^[17]使用 EDEM 仿真得到破碎过程中双齿辊破碎机辊齿的分布载荷,然后加载

到 ANSYS 环境中进行强度分析,最终确定了辊齿的最大受力、最大应力和最大变形量的位置,并给出了齿形优化方案。

2 碎磨流程的工艺优化

2.1 工艺回路设计

新的理念可以帮助我们确定碎磨工艺流程设计的大方向。如“多碎少磨、能耗前移”提醒我们应该降低磨矿环节给料粒度和用细破碎部分取代常规磨矿。“能收早收、能抛早抛”催生出了阶段磨矿阶段选别工艺。但工艺和设备的最终选择必须依赖充分的试验,要靠数据证明选择的合理性。过去回路设计和设备选型只能依赖从业者经验和实验室的小规模试验,而如今一些专业的流程模拟软件可起到很好的辅助作用,它们可以较为直观地表现出不同工艺选择下的碎磨效果,实现不同方案的快速比较。

常见碎磨流程模拟软件有 JKSimMet 和 CITIC SMCC,而选矿过程模拟软件 USIM PAC、MODSIM 以及冶金过程模拟软件 METSIM 中也集成了碎磨模拟功能。以 JKSimMet 的使用为例,其需要通过邦德功指数、JK 落重试验、研磨试验等手段收集数据来建立粉碎模型,之后再输入回路设计和预选设备参数,即可进行碎磨流程的物料平衡计算,实现对实际生产时的处理量及各作业的产率、产品粒度等运行细节参数的准确模拟。若模拟结果不佳,可以重新设计工艺回路、调整设备规格,直到选出符合需求的工艺流程^[18]。此外,这些流程模拟软件还可以结合现场生产数据进行模型拟合,实现预测结果验证和薄弱环节调整、优化。如林炜^[19]利用 JKSimMet 比较了增加中碎环节和使用二段顽石破碎两项改造方案,发现前者对选矿厂原矿处理能力的提升更高。而孙文瀚^[20]使用流程模拟软件还原了某选矿厂 SAB 碎磨工艺生产情况,并考察了各阶段的粒度分布,由此确定半自磨机排矿的筛后粒度过低是造成球磨机运行功率过低的主要原因,进而给出增大筛孔尺寸的改进方案,解决了该厂半自磨机与球磨机负荷不匹配问题。

2.2 碎磨设备选型

流程模拟软件等具有仿真模拟功能的软件工具还可以用于 AB、ABC、SAB、SABC 和高压辊磨

工艺流程中的碎磨设备选型。自磨机/半自磨机和高压辊磨对矿石性质非常敏感,没有统一的处理量计算公式,只能先进行半工业试验才能确定设备规格、耗时严重。而流程模拟软件模拟得出的各作业节点的产率和物料流信息非常丰富,可以作为选择碎磨设备的依据。王星亮等^[21]应用 JKSimMet 软件磨矿单元对两个矿山进行了半自磨机的模拟选型,并与实际生产数据进行了分析比较,发现模拟结果的产品粒度、单位功耗及循环负荷均与实际符合,证实了通过模拟可以确定设备规格。

2.3 工艺参数优化

探讨设备最优工艺参数的方法与之前碎磨设备优化升级小节存在共通之处,均需要先大量运用仿真模拟手段,再基于这些预测结果和历史数据进行统计分析。如 ATA 等^[22]就使用随机森林处理了六个月的磨机工况数据,通过建模实现了磨机功耗的预测。其团队还评估出运行条件与功耗间的关系,结果可以作为工艺参数的选别标准。马连铭等^[23]将实际筛分获取的破碎机产品粒度分布数据与通过 JKSim Met 模拟所得结果进行模型拟合,探索出了新的能表达入料粒度与破碎产品粒度分布间关系的公式。由于对碎磨性能的评价标准不同,相应的工艺参数选取也会不同,而我们往往想要实现综合性能的优化,即实现多目标的优化。具体到多目标优化问题的处理方法一般有两种,一种是将问题降维转化成单目标优化问题。如王文博^[24]采用线性加权法建立了圆锥破碎机性能多目标规划模型,先将涉及破碎腔衬板磨损状况、立方状破碎产品质量占比、产品标定粒度占比以及生产率的这些目标函数各自乘以权重并加和组合成了综合评价函数,再据此进行优化。另一种是使用 NSGA-II、MOPSO 等多目标优化算法直接处理多目标优化问题,然后获取 Pareto 最优解集,供人们在实际生产中结合工况进行选择。张笑等^[25]使用多目标遗传算法 NSGA-II,以振动强度最高、撞击力最大以及研磨介质体积最小为优化目标,对立式振动磨的响应面模型进行了多目标优化设计,得到了可以提供决策参考的最优解集。由于传统的逐阶段优化取得的最终结果往往未必最优,而流程模拟等手段可以将碎磨流程视作整体,给出同时调整各阶段工艺参数后的预测结果,找出能够实现整体最优的改进措施。如龚道振等^[26]就通过模拟分析得出了涉及粗磨、

细磨、中矿再磨等环节,给矿粒度、给矿量、钢球尺寸、填充率等参数的,能够实现整体优化的改进措施。

3 碎磨流程的生产控制

3.1 实时检测技术

在实际生产中,想要保持碎磨设备的可靠运行、确保产品指标能与设计相符,必须要做到对环境参数与关键运行参数的实时测量。而想要更进一步,实现碎磨过程控制以及连锁控制,也要依赖监测技术了解运行状态、把握操作节点。总之,需要运用实时检测技术实现对生产控制的全流程感知。实时检测技术包括直接检测手段和间接的软测量技术。直接检测方面,一般使用各类检测仪表与传感器获取数据并综合取样分析结果后再做判断。以粒度分析为例,矿山可以配置基于超声波、光散射和图像识别的分类识别装置。随着图像滤波和分割两种关键技术的成熟,布置好光源和工业照相机后,基本可以实现 30 mm 级别破碎矿石的表层粒度分布信息的准确获取,如可以确定 6~50 mm 的煤颗粒的密度分数和灰分含量^[27]。卢才武等^[28]使用 GLCM 算法,在优化了生成距离和灰度压缩等级的选取方法后,训练构建了支持向量机的分类模型,实现了 0~7 mm 细粒度矿石的高精度分级测定。当受限于复杂环境和直接检测手段缺失时,还可以使用建立在工艺机理分析和离线/在线数据处理之上的软测量技术,通过机理建模、经验建模以及两者结合的建模来预测估计实际情况。如 TANG 等^[29,30]使用球磨机筒体振动、轴承座振动和振声信号等多源机械信号,在互补融合、去除冗余后,建立了数据驱动的磨机负荷软测量模型。为覆盖实际工况变化,包括适应概念漂移以及考虑异常数据,还需研究软测量模型的在线自适应策略。如李德鹏等^[31]基于 Bagging 方法进行采样,获取的样本数据集训练构筑了多个鲁棒基随机向量函数神经网络模型,然后将基模型采用自适应加权数据融合算法进行组合,得出的集成模型可以少受样本中异常数据的影响,很好地实现磨矿过程地粒度检测。

3.2 故障诊断方法

故障诊断方法需要在感知的基础上更进一步做

到识别。传统的分类方法是这一识别过程分为基于模型、基于知识和基于数据三类，但前两类方法也要应用历史数据进行补足优化。现在流行的基于人工智能的故障检测方法也需要运用到大量数据。其中，基于数学模型的故障诊断方法，需要通过对比模型与实际生产来实现故障检测与分离，典型的方法包括参数估计法、状态估计法以及等价空间法。由于碎磨流程入料多变、机理复杂，难以建立精准的数学模型，此类诊断方法往往不能用于整个环节的监控管理，但可以用于对机理明确的单元设备建模。如可以建立滚动轴承中转子和内外圈的复杂接触过程的解析模型，还可以用于设计仅考虑少量已知影响因素的简化过程模型，如衬板磨损时变模型等^[32]。基于知识的故障诊断方法主要有两类，包括借助专家经验对症状进行溯源和建立定性模型作为诊断依据。具体来说，就是建立知识库和规则库，再运用推理机制对故障做出诊断。碎磨过程中的一些运行信息与故障类型存在简单的对应关系，如温度与电机过热、油位与油箱液面过低，很容易就能转换成规则或者生成故障树以用于之后的识别。但是碎磨流程整个环节的具有多闭环、高耦合的特点，难以从中拆解故障的因果逻辑关系，往往要基于监测数据进行类比、训练、聚类，使用数据挖掘乃至深度学习的算法，才能取得可用的规则。基于数据的故障诊断方法是实时性最强的方法，它强调直接对能反映系统状态变化的监测信号进行处理、分析和做出识别。不过单纯以信号处理为核心的方法缺点也很明显，其擅长提取故障特征和检测是否故障，对故障的分离和诊断无力。而支持向量机擅长针对小样本进行训练和分类，一些集成学习方法和神经网络也常用于解决分类问题，它们和上述的信号处理方法之间互补性很强。所以，如今基于数据的故障检测往往将其与机器学习或神经网络技术结合。如田晶晶^[33]使用BP神经网络和遗传算法分布构建和优化了旋回式破碎机的故障诊断方法，并以此为基础进一步实现基于实时数据的诊断和预警。

此外，实际生产中往往正常工作状态较长，故障状态的数据较少，所以利用历史数据进行训练实现故障分类的人工智能方法往往面临着很大的样本不均匀的问题。而深度学习，尤其是迁移学习和生成对抗网络为样本不均衡调整和扩充提供了新

思路。

3.3 过程控制策略

过程控制是感知、识别和控制三者的结合。包括要通过传感器、软测量等感知手段实时追踪各设备、各阶段的生产细节，通过基于机理、知识、数据等方法实现对工况变更、工序衔接等关键生产节点的识别，最后是完成碎磨过程控制策略的设计，需要选取合适的控制框架和控制理念。当磨矿过程相对稳定时，即待磨矿石嵌布粒度均匀、化学组分和物理性质稳定或可以通过配矿的方式实现均匀化时，适宜采用基于模型的控制框架，并采用实时优化和多变量解耦控制方法进行碎磨流程的控制。此时，为了应对模型不够精确和碎磨过程必然会存在的不确定性，可以引入鲁棒控制和自适应控制理念进行补足。二者中，一个牺牲每种工况时的性能，以获得对所有工况的鲁棒性；一个为适应每种工况，设计了在线调节控制器参数的机制。如周颖等^[34]利用逆解耦方法实现磨矿分级系统的解耦，并对解耦后的子系统采用了改进的内模控制和自抗扰内模控制。其还通过引入内模补偿器和增益对时滞进行补偿，减小了系统对模型的依赖。当矿石成分性质不稳定时，考虑碎磨过程的动态时变状况会非常复杂以至于难以建立模型时，可以使用模型预测控制、模糊控制和专家系统的控制策略。其中模型预测控制使用的是简化模型，通过在每一个采用时刻反复的预测加优化，实现按时间向前滚动式的有限时域优化，也相应的适应了复杂工况。如孙志民^[35]针对磨矿过程，建立了一种基于最小二乘支持向量机的非线性预测控制器，并将基于高斯搜索的改进粒子群优化算法作为最佳控制量的优化求解方法。模糊控制和专家系统则均无需建立精确的数学模型。模糊控制将现场数据与操控经验翻译成规则，再利用模糊逻辑推理和解模糊，将模糊的控制规则上升为数值运算和控制程序再执行。其中最常见是模糊-PID控制，如张健明^[36]将每次待磨矿石的供给量偏差及偏差速率作为模糊控制的输入，实现了PID控制器的自调整机制可以抑制干扰。专家控制系统则是通过检索知识规则库中收集的碎磨流程案例和经验，进行整个流程的参数修正以及优化。如张元元^[37]提出了分布式优化控制专家系统的架构，由两个分别针对一段磨矿、二段磨矿优化控制的专家子系统和协同控制子系统组成，系统投

入使用后增产降耗效果显著。

此外,一些完全基于数据驱动的控制策略也已经运用到了碎磨流程的过程控制过程,包括无模型自适应控制、Q 学习最优控制方法、迭代学习控制等。如郭卫平^[38]将无模型自适应控制和预测控制结合,应用到了磨矿过程控制的单回路控制器及主控制器的设计中。代伟等^[39]以磨矿粒度和负荷为优化目标,基于案例推理选出适合当前工况的 Q 函数网络模型,然后采用增强学习算法优化了磨矿过程的设定值。

神经网络技术是一种构建非线性模型的方法,常用做模式识别、模式分类和数据分析,可以构建识别模型并配合控制策略实现优化。邓展等^[40]通过训练神经网络,实现了对磨矿分级过程的在线辨识,然后结合自寻优控制方式实现了对磨机负荷的控制。神经网络也可以用来设计控制器。神经网络本身不是控制策略,但是依照各类控制理念和算法使用神经网络训练数据集,可以构建出磨矿回路,实时控制和优化模型^[41]。如穆海芳等^[42]采用模糊算法对 BP 神经网络的输入值进行调整,最终实现了磨矿过程的自适应控制。

4 碎磨流程改造未来展望

随着国家和企业对提质增效、节能降耗需求的不断推进,碎磨流程的智能化必将迎来发展浪潮。碎磨设备方面,显而易见的趋势是新的设备将不断朝着智能化或易于自动控制的方向发展,用于配套矿山现状研发的各类碎磨控制系统也将接管更多的矿山。随着仿真模拟软件结果准确性的提高,仿真模拟软件将会更多应用于设备研发,用于提供预测和排错的参考。碎磨工艺方面,如今工艺选择和实时控制对数据的需求越来越多,不管将来选择何种优化手段和控制策略,矿山企业均需要有意识地留存和处理数据甚至建立配套的数据仓库以待将来。

此外,还需关注工业界的数字双生技术和工业互联网两类发展趋势。其中,数字双生技术力求在虚拟空间中映射现实世界中实体、实现对实体对象的动态仿真;工业互联网是叠加物联网、大数据、人工智能等新兴技术和复用工业技术、经验知识的云边端协同网络平台。它们都是我们可以学习和借鉴的方向,可以引进到碎磨流程中。

参考文献

- [1] 周俊武,徐宁. 智能选矿厂架构设计[J]. 自动化仪表, 2016, 37(7): 1-5.
ZHOU J W, XU N. Architecture design of intelligent concentrator [J]. Process Automatic Instrument, 2016, 37(7): 1-5
- [2] 舒云峰. 破碎机 PLC 控制系统研制[D]武汉: 湖北工业大学, 2017.
SHU Y F. Development of PLC control system for crusher[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [3] 智淑亚,高素美,刘宏军,等. 智能控制旋转冲击破碎机开发与设计[J]. 机械设计与制造, 2019(12): 205-208.
ZHI S Y, GAO S M, LIU H J, et al. Intelligent control rotary impact crusher development and design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(12): 205-208.
- [4] YAMASHITA A S, THIVIERGE A, EUZÉBIO T. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries [J/OL]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107036. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107036>.
- [5] 甘桂裕,张美义. 圆锥破碎机智能化控制系统研究与应用[J]. 数字技术与应用, 2016(9): 14, 16.
GAN G Y, ZHANG M Y. Research and application of intelligent control system for cone crusher[J]. Digital Technology & Applications, 2016(9): 14, 16.
- [6] 张卫,万正道,贺祥红. 颚式破碎机自适应控制系统的设计与实现[J]. 金属矿山, 2020, 49(11): 203-210.
ZHANG W, WAN Z D, HE X H. Design and implementation of adaptive control system for jaw crusher[J]. Metal Mine, 2020, 49(11): 203-210.
- [7] 曾涛,刘凤亮,刘世昌,等. 高压辊磨机自主避让控制系统[J]. 陶瓷, 2020(8): 45-46.
ZENG T, LIU F L, LIU S C, et al. Autonomous collision avoidance control system for high pressure roller mill[J]. China Ceramic, 2020(8): 45-46.
- [8] OLIVIER L E, MARITZ M G, CRAIG I K. Deep convolutional neural network for mill feed size characterization[J]. IFAC-Papers On Line, 2019, 52(14): 105-110.
- [9] 罗秀建,刘方明,陈帮,等. 惯性圆锥破碎机大型

- 化研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(增刊 1): 1-4, 40.
- LUO X J, LIU F M, CHEN B, et al. Research on large-scale inertia cone crusher [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017 (Z1): 1-4, 40.
- [10] 庞国强, 王建彬, 林阳, 等. 浅谈基于 ADAMS 的磨机参数化建模及仿真[J]. 现代矿业, 2016(2): 186-188.
- PANG G Q, WANG J B, LIN Y, et al. Discussion on the parametric modeling and simulation of mill based on ADAMS[J]. Modern Mining, 2016(2): 186-188.
- [11] JAYASUNDARA C T, ZHU H P. Impact energy of particles in ball mills based on DEM simulations and data-driven approach [J]. Power Technology, 2022, 395: 226-234.
- [12] 张将, 王雷刚, 王富勇, 等. 某液压圆锥破碎机整机非线性有限元分析[J]. 矿山机械, 2019, 47(7): 35-40.
- ZHANG J, WANG L G, WANG F Y, et al. Nonlinear finite element analysis of a hydraulic cone crusher[J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(7): 35-40.
- [13] 李柏林. 大型立式辊磨机关键结构件仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI B L. Simulation research on key Structural parts of large vertical roller mill[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 李小莹. 立式振动磨机的运动分析与设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
- LI X Y. Motion analysis and design of vertical vibration mill[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2016.
- [15] 武秋俊, 张勇, 刘浩宇, 等. 非规则物料黏结颗粒下的惯性圆锥破碎机仿真[J]. 烧结球团, 2020, 45(4): 55-60.
- WU Q J, ZHANG Y, LIU H Y, et al. Simulation of inertia cone crusher with irregular material bonded particles [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(4): 55-60.
- [16] TB A, HN A, HT A, et al. DEM—PBM coupling method for the layering granulation of iron ore[J]. Powder Technology, 2021, 378: 40-50.
- [17] 毕秋实, 王国强, 黄婷婷, 等. 基于 DEM-FEM 耦合的双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1770-1776.
- BI Q S, WANG G Q, HUANG T T, et al. Analysis of tooth strength of two-tooth roll crusher based on DEM and FEM coupling[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1770-1776.
- [18] 张萌, 于伟涛, 姬建钢, 等. JKSImMet 粉磨流程模拟软件的建模原理及其应用[J]. 矿山机械, 2016, 44(9): 51-57.
- ZHANG M, YU W T, JI J G, et al. Modeling principle and application of JKSImMet milling process simulation software [J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(9): 51-57.
- [19] 林炜. 某金矿选矿厂的碎磨流程模拟优化分析[J]. 世界有色金属, 2019(13): 38-39.
- LIN W. Simulation and optimization analysis of grinding process in a gold concentrator[J]. World Nonferrous Metals, 2019(13): 38-39.
- [20] 孙文瀚. 基于 JKSImMet 模拟的某选矿厂矿石碎磨特性及流程优化研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- SUN W H. Study on grinding characteristics and process optimization of a concentrator based on JKSImMet Simulation [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [21] 王星亮, 宋峰. 应用 JKSImMet 软件进行半自磨机选型[J]. 矿业工程, 2016, 14(3): 60-63.
- WANG X L, SONG F. JKSImMet software is used to select semi-autogenous mill [J]. Mining Engineering, 2016, 14(3): 60-63.
- [22] ATA T, SCC C, SSM D, et al. Power-draw prediction by random forest based on operating parameters for an industrial ball mill[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(3): 967-972.
- [23] 马连铭, 姬建钢, 杜波, 等. 基于 JKSImMet 仿真数据的破碎机和半自磨机破碎粒度分布研究[J]. 矿山机械, 2017, 45(1): 30-35.
- MA L M, JI J G, DU B, et al. Study on particle size distribution of crusher and semi-autogenous mill based on JKSImMet simulation data[J]. Mining & Processing Equipment, 2017, 45(1): 30-35.
- [24] 王文博. 球磨机筒体仿真与磨矿参数优化[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WANG W B. Barrel simulation and grinding parameter optimization of ball mill[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [25] 张笑, 唐敦兵, 杨俊, 等. 立式振动磨关键结构参

- 数的多目标优化设计[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 821-827.
- ZHANG X, TANG D B, YANG J, et al. Multi-objective optimization design of key structural parameters of vertical vibration mill[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(6): 821-827.
- [26] 龚道振, 王培龙, 孙春宝, 等. JKSImMet 模拟软件在某金矿磨矿分级系统多目标协同优化中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 99-104.
- GONG D Z, WANG P L, SUN C B, et al. Application of JKSImMet simulation software in multi-objective cooperative optimization of grinding and classification system in a gold mine [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 99-104.
- [27] ZHANG Z L, LIU Y, HU Q, et al. Multi-information online detection of coal quality based on machine vision [J]. Powder Technology, 2020, 374: 250-262.
- [28] 卢才武, 齐凡, 阮顺领. 基于深度图像分析的细粒度矿石分级测定方法[J]. 应用科学学报, 2019, 37(4): 490-500.
- LU C W, QI F, RUAN S L. Determination method of fine grained ore classification based on depth image analysis [J]. Journal of Applied Sciences, 2019, 37(4): 490-500.
- [29] TANG J, QIAO J, LIU Z, et al. Mechanism characteristic analysis and soft measuring method review for ball mill load based on mechanical vibration and acoustic signals in the grinding process [J]. Minerals Engineering, 2018, 128: 294-311.
- [30] 汤健, 乔俊飞, 刘卓, 等. 面向磨机负荷参数预测的多通道机械信号分析评估与优化组合[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(9): 997-1007.
- TANG J, QIAO J F, LIU Z, et al. Multi-channel mechanical signal analysis, evaluation and optimization combination for mill load parameter prediction [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(9): 997-1007.
- [31] 李德鹏, 代伟, 赵大勇, 等. 一种基于鲁棒随机向量函数链接网络的磨矿粒度集成建模方法[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 67-77.
- LI D P, DAI W, ZHAO D Y, et al. An integrated modeling method for grinding particle size based on robust random vector function link network [J]. Journal of Engineering Science, 2019, 41 (1): 67-77.
- [32] WAKEFIELD B J, LINDNER B S, MCCOY J T, et al. Monitoring of a simulated milling circuit: Fault diagnosis and economic impact[J]. Minerals Engineering, 2018, 120: 132-151.
- [33] 田晶晶. 基于遗传算法-BP 神经网络的旋回式破碎机故障诊断系统研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- TIAN J J. Research on fault diagnosis system of rotary crusher based on GENETIC algorithm-BP neural network [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [34] 周颖, 贾巧娟, 张燕, 等. 改进的逆解耦自抗扰内模控制在磨矿中的应用[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 837-847.
- ZHOU Y, JIA Q J, ZHANG Y, et al. Application of improved inverse decoupling active disturbance rejection internal model control in grinding [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32 (5): 837-847.
- [35] 孙志民. 基于改进粒子群优化的磨矿过程预测控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- SUN Z M. Predictive control of grinding process based on improved particle swarm optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [36] 张健明. 基于模糊 PID 控制的磨矿控制系统[J]. 电子科技, 2018, 31(11): 72-74.
- ZHANG J M. Grinding control system based on fuzzy PID control [J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(11): 72-74.
- [37] 张元元. 磨矿分级优化控制专家系统的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- ZHANG Y Y. Study on expert system for optimal control of grinding classification [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [38] 郭卫平. 无模型自适应预测控制在磨矿过程中的应用研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- GUO W P. Research on application of model-free adaptive predictive control in grinding process[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [39] 代伟, 王献伟, 路兴龙, 等. 基于案例推理增强学习的磨矿过程设定值优化[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 53-64.
- DAI W, WANG X W, LU X L, et al.

- Optimization of grinding process set point based on case-based enhanced learning[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 53-64.
- [40] 邓展, 王建民. 基于 RBF 神经网络的磨机负荷智能控制的研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(2): 89-94.
- DENG Z, WANG J M. Research on intelligent control of mill load based on RBF neural network[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(2): 89-94.
- [41] MIRIYALA S S, MITRA K. Deep learning based system identification of industrial integrated grinding circuits [J]. Powder Technology, 2020, 360: 921-936.
- [42] 穆海芳, 韩君, 何康, 等. 模糊神经网络 PID 控制在磨粉过程中的应用[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2019, 19(3): 32-35, 41.
- MU H F, HAN J, HE K, et al. Application of fuzzy neural network PID control in grinding process[J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 19(3): 32-35, 41.

通信作者简介: 谢贤, 博士, 教授, 博士生导师, 任金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心副主任, 主要从事矿产资源绿色综合利用、尾矿二次资源综合利用及无害化处理等研究工作。主持国家自然科学基金、省重大专项等纵向科研项目 8 项、校企合作科研项目 15 余项。获中国有色金属工业协会科技进步奖一等奖 3 项(主持 1 项)、二等奖 1 项, 获云南省科技进步奖一等奖 2 项, 获广东省科技进步奖一等奖 1 项。以第一/通信作者发表专业论文 50 余篇、其中 SCI 15 篇, 以第一发明人授权发明专利 5 项, 参编专著 2 部。

