

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.06.018

## 地下选矿厂磨机(半自磨机)机械振动研究综述

王海军<sup>1,2</sup> 刘建博<sup>1</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

**摘 要:** 地下选矿厂磨矿硐室(半自磨机硐室)需要承受磨矿设备筒体内矿石、介质和筒体交互冲击产生的机械振动作用。对国内外学者及工程技术人员针对与半自磨机类似的球磨机、磨煤机等设备, 从数据采集及分析方法、改进设备作业效率、监控设备运行性能及保持设备基础稳定方面取得的研究成果进行了综述, 总结了磨机(半自磨)机械振动信号采集、分析识别方法、仿真反演及实际应用等方面研究成果, 具有较高的借鉴意义。

**关键词:** 地下选矿厂; 磨机(半自磨); 机械振动

**中图分类号:** TH133; TB534

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-7854(2023)06-0131-08

## Mechanical vibration research on grinding mills(semi-autogenous mills) in underground processing plant: a review

WANG Haijun<sup>1,2</sup> LIU Jianbo<sup>1</sup>

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The underground ore processing plants' grinding chambers(semi-autogenous grinding caverns) need to withstand the mechanical vibration caused by the interaction of ore, medium, and the barrel within the grinding equipment. This article reviews the research achievements of domestic and foreign scholars and engineering technicians for equipment similar to semi-autogenous mills, such as ball mills and coal mills, from the perspectives of data collection and analysis methods, improving equipment operating efficiency, monitoring equipment performance, and maintaining equipment foundation stability. The article summarizes the research results in terms of mechanical vibration signal collection, analysis and identification methods, simulation inversion, and practical application of grinding mills (semi-autogenous), providing significant reference value.

**Key words:** underground processing plant; grinding mills(semi-autogenous mills); mechanical vibration

大型旋转机械设备(如半自磨机、球磨机、磨煤机)在地下选矿生产中有较好的应用前景, 其运行状态和性能直接关系到生产效率和安全。然而, 由于机械结构和运行环境的复杂性, 这些设备常常面临振动问题。机械振动不仅会降低机械设备的工作效率, 还可能引发硐室围岩结构破

坏。因此, 对大型旋转机械设备中的振动特征进行准确识别和分析, 尤其是与旋转基本特征相对应的低频振动频率的识别研究对于实现地下选矿厂硐室长期稳定性的安全可靠运行具有深远的理论意义和科学价值, 有必要对近年来国内外学者及工程技术人员针对与半自磨机类似的球磨机、磨煤机等设备, 从数据采集及分析方法、改进设备作业效率、监控设备运行性能及保持设备基础稳定等方面开展研究分析。

收稿日期: 2023-05-05

第一作者: 王海军, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩石力学工程与安全研究。E-mail: wnacky@163.com

## 1 磨机(半自磨)机械振动基本特征、振动数据采集及分析方法

国内外学者对磨机械振动基本机理开展了较多的研究工作。AUSTIN 等揭示了破碎过程可被视为三个区域破碎作用的总和:由介质(钢球或矿石)之间的颗粒夹持引起的正常破碎,当颗粒或块状物相对于介质太大而不易被夹紧时,介质造成的异常断裂,以及岩石块体在翻滚作用下的碎裂和磨损所引起的自破碎,并指出破碎作用的每个区域都有特定的破碎率和碎片分布<sup>[1]</sup>。

基于磨机振动机理可知半自磨机的振动数据组成是复杂的。GAO 等<sup>[2]</sup>通过自适应变分模态分解(VMD)和改进功率谱有效全面提取了磨机磨矿过程中的振动数据,发现磨机机械振动频率主要在0~20 kHz,振动幅度与磨机处理能力、物料块度密切相关。TANG 等<sup>[3]</sup>通过磨机振动频率范围识别分析,将机械振动频率主要分为两大类:一类是与破碎过程密切相关的高频机械振动(磨音大于100 Hz),另外一类是与磨机设备刚度相关的低频机械振动(磨音小于100 Hz)。对于高频和低频机械振动,国内外学者都针对振动信号数据采集、振动信号处理方法也做过很多研究工作。如彭奕亮等<sup>[4]</sup>通过测试基础上、下台板和设备本体的振动位移和加速度,并考虑中速磨煤机与基础的动力相互作用,评价了弹簧隔振基础中速磨煤机的振动性态。TANG 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于振动频谱的湿式球磨机磨削载荷参数的特征提取与选择方法,通过将振动加速度信号快速傅里叶变换(FFT)转化为频谱,从频谱中提取和选择候选特征,包括特征频率子带、频谱主成分和局部峰值特征,利用互信息、谱段聚类 and 核主成分分析来获得候选特征,再采用基于自适应遗传算法的组合优化方法同时选择软测量模型的输入子集和参数,并应用于实验室规模的湿式球磨机。王恒等<sup>[5]</sup>针对球磨机料位检测的现实需要,提出了一种球磨机筒体振动信号采集方法,结合筒内料位分布特点,确定了筒体振动传感器类型和测点位置,确定了筒体信号无线采集的系统构成,基于钢球冲击模型和理想化钢球分层模型,并结合采集的筒体实际振动数据确定了筒体振动信号的采样参数。杨志刚等<sup>[6]</sup>简述了球磨机的发声机理,分析了球磨机填充率、筒体转速以及钢球大小等因素对磨音的影响,归纳总结了近年来磨机负荷的检测方法:基于数学模型的软测量方法、磨音

法、振动法、功率法、超声波方法和基于神经网络的方法。MOHANTY 等<sup>[7]</sup>利用微机电系统(MEMS)加速度计传感器对工业湿式球磨机的振动特征进行了分析,信号采集使用两个无线加速度计传感器安装在球磨机进料端和出料端,验证铜矿石的磨矿状态,通过对比进料前后的振动谱,估算出球磨机内矿石的实际磨矿状态,从频谱分析中确定了强度的限制阈值水平,以监测所需的矿石研磨状态,并利用皮尔逊相关系数(Pearson correlation)分析了样本长度及其与磨机转速的相关性对确定实际振动特征的影响。康岩等<sup>[8]</sup>针对采用传统方法建立球磨机料位软测量模型存在测量精度不高和稳定性较低的缺点,提出一种结合深度信念网络和极限学习机的软测量方法。许永强等<sup>[9]</sup>通过采集轴承座振动信号,采用自回归(Auto Regressive, AR)模型对振动信号进行特征提取和进行功率谱估计,研究了5种充填率条件下的磨机负荷参数与信号时域特征的相关性,得出随着磨矿过程中筒体中钢球、物料的变化,低频段、高频段的频谱能量值曲线的相应变化规律。SHI 等<sup>[10]</sup>研究了分数阶傅里叶变换在声音信号中估计磨机负荷参数的应用,根据声谱在分数阶傅里叶域中的分布,将球磨机负荷预测策略分为特征提取、离线建模和在线监测三个部分,并确认分数傅里叶域内对轧机负荷的估计是有效的。浦友尚等<sup>[11]</sup>为有效提取球磨机磨音信号特征实现负荷识别,提出了一种基于主元分析法(PCA)的特征提取方法,采集球磨机的工作磨音信号,进行噪声处理,再通过 Welch 法进行功率谱估计,并通过主元分析法进行特征提取,最后再通过支持向量机预测模型对特征提取后的样本集进行了仿真验证。余刚等<sup>[12]</sup>针对磨机负荷与磨机运行所产生多组分机械信号间存在的非确定性复杂映射关系,以及运行专家基于耳所固有“带通滤波”效应凭借人脑模型有效估计所熟悉磨机的负荷及其内部参数等问题,为获得具有物理含义和互补特性的多个单模态信号用于磨机负荷建模,提出了磨机筒体振动单模态子信号选择方法。蔡改贫等<sup>[13]</sup>针对球磨机振动信号非线性、非平稳性特点及总体平均经验模态分解方法(CEEMDAN),舍弃高频分量降噪方法和小波阈值降噪方法存在的不足,提出了一种基于 CEEMDAN-小波阈值联合的球磨机筒体振动信号去噪方法。罗小燕等<sup>[14]</sup>针对球磨机在磨矿过程中负荷靠经验难以准确判断的问题,提出了一种基于改进的经验小波变换(Empirical Wavelet

Transform, EWT) — 多尺度熵和核极限学习机 (KELM) 的球磨机负荷识别方法。CAI 等<sup>[15]</sup> 提出了一种基于改进经验小波变换 (EWT)、改进复合多尺度离散熵 (RCMDE) 和烟花算法 (FWA) 优化支持向量机的新方法, 利用改进的 EWT 对振动信号进行降噪, 利用三次样条插值计算包络谱进行分割, 然后计算去噪后信号的 rcmde 作为特征向量, 用主成分分析 (PCA) 对矢量进行降维, 建立了基于 FWA 优化支持向量机的磨机负荷预测模型, 将缩减后的特征向量输入模型, 输出料球比和填充率, 所提出的球磨机负荷预测方法具有较高的精度和稳定性。

## 2 磨机(半自磨)机械振动数据应用

近年来, 国内外学者把磨机(半自磨)机械振动数据作为反应磨机(半自磨)作业状态和故障诊断的依据, 开展了较多的相关工作。如 TANG 等<sup>[16]</sup> 基于实验室规模的球磨机壳体振动信号, 对湿磨载荷进行了分析, 利用遗传算法-偏最小二乘 (GA-PLS) 技术建立了轧机负荷振动信号与轧机运行参数之间的软测量模型, 并进行了工业规模球磨机验证。汤健等<sup>[17]</sup> 针对磨矿过程的磨机负载难以有效确定和检测, 尤其是球磨机常运行在欠负荷状态, 造成该过程难以实现优化控制和节能降耗的难题, 提出了采用料球比、浓度及充填率三个负荷参数对磨矿负载进行软测量建模的方法, 也提出了基于频域特征提取与多传感器信息融合的磨机工作负载软测量新方法<sup>[18]</sup>。黄鹏等<sup>[19]</sup> 通过实验采集了不同给煤量工况下球磨机筒体与轴承座振动信号, 然后根据料位与球磨机筒体及轴承座振动之间的关系对原始振动信号进行了滤波处理, 比较了球磨机筒体与轴承座振动料位特征量。王恒等<sup>[20]</sup> 针对球磨机优化工况监测的不足, 提出了一种基于筒体振动信号的球磨机优化工况监测方法。傅贵兴<sup>[21]</sup> 通过对机械振动谱图的分析诊断, 找出了球磨机故障产生的原因和确定的故障部位。HUANG 等<sup>[22]</sup> 通过采集的振动信号对填料液位变化具有较高的灵敏度, 为准确测量填料液位提供了可靠依据。李声旭等<sup>[23]</sup> 使用半自磨机机械振动数据对减速机故障发生过程进行趋势监控, 由事后维修转变为预防性维修。赵明等<sup>[24]</sup> 通过在球磨机轴承上安装振动传感器获取轴承振动信号, 并利用小波包频带顺序分解技术进行振动信号特征提取, 以表征不同球径配比

的特征量, 最后通过统计分析对球径配比做出评判。钟庆海<sup>[25]</sup> 采用振动传感器对电机自由端、驱动端和小齿轮驱动端、自由端及进料端主轴承、出料端主轴承进行在线监测, 及时消除了半自磨机的振动故障, 防止了故障事故的扩大, 使半自磨机稳定运行, 为振动检测技术在大型低速旋转设备振动故障诊断、分析、处理中的应用提供了成功案例。胡显能等<sup>[26]</sup> 针对球磨机负荷特征提取难以及负荷状态识别难的问题, 将多尺度排列熵引入到球磨机负荷识别中, 提出一种具有自适应噪声的完整集成经验模态分解 (CEEMDAN) 与多尺度排列熵 (MPE) 相结合的球磨机负荷识别方法。蔡改贫等<sup>[27]</sup> 针对球磨机磨矿过程中负荷难以检测和不能准确判断负荷状态的问题, 提出了一种基于 CEEMDAN-云模型特征熵和 LSSVM 的磨机负荷预测方法, 用完整集成经验分解算法 (CEEMDAN) 对不同负荷的磨机振动信号进行分解, 通过使用相关系数法选取敏感模态分量重构信号, 利用逆向云发生器计算重构信号的云模型特征熵作为信号的表征参数, 运用正向云发生器生成云模型特征向量的云滴图。罗小燕等<sup>[28]</sup> 针对单一因素的球磨机负荷预测时存在的局限性问题, 分别提取磨矿过程中振动、磨音、电流的特征信息值, 采用网格搜索与交叉验证相结合的支持向量机 (SVM) 磨机负荷预测方法判断磨机负荷的类型, 提出了磨机负荷的多源异类信号特征层融合方法。袁铸等<sup>[29]</sup> 为对球磨机进行振动监测与故障诊断, 在现有一些小波阈值去噪方法的基础上提出一种新的阈值去噪算法, 并对去噪后的信号进行小波分解和 Hilbert 小波包络谱分析, 实现了有效应用。邓海英等<sup>[30]</sup> 基于振动信号分析的球磨机工况检测技术进行了论述。LUO 等<sup>[31]</sup> 提出了一种基于互补集成经验模态分解 (CEEMDAN) — 精化复合多尺度色散熵 (RCMDE) — 长短期记忆 (LSTM) 神经网络的磨机负荷参数预测方法, 并选用 CEEMDAN 算法对强噪声作用下的磨机机筒振动信号进行分解, 再采用相关系数法选取与原始信号具有强相关性的敏感模态分量进行重构, 并通过 RCMDE 提取不同载荷参数下重构信号的特征。

## 3 磨机(半自磨)机械振动数据数值模拟及反演

虽然国内外专家学者针对磨机(半自磨)机械振动产生机理、振动信号采集、分析方法开展了很多

研究工作,也取得了很多卓有成效的成果,但磨机(半自磨)的机械振动组成复杂,尤其是机械振动过程物料不均、设备内部无法直接观察、现场监测环境复杂等问题造成很难全面掌握磨机(半自磨)振动机理。

鉴于此,国内外专家学者通过数值建模、仿真模拟等手段开展了磨机(半自磨)机械振动数据模拟机反演的研究工作。如汤健等<sup>[32]</sup>针对传统磨机负荷(ML)检测方法只能依靠灵敏度较低的轴承振动、筒体振声和磨机功率等信号监督判断 ML 状态,难以检测磨机内部负荷参数的问题,提出了一种基于高灵敏度的筒体振动频谱的集成建模方法。针对磨机负荷(ML)软测量模型难以适应磨矿过程的时变特性,模型需要依据工况实时在线更新的问题,基于磨机筒体振动频谱,通过递归主元分析(RPCA)和在线最小二乘支持向量回归机(LSSVR)的集成,提出了 ML 参数(料球比、矿浆浓度、充填率)在线软测量方法<sup>[33]</sup>。针对磨机筒体振动和振声信号组成复杂难以解释、蕴含信息存在冗余性和互补性、与磨机负荷参数映射关系难以描述等问题,提出了基于经验模态分解(Empirical Mode decomposition, EMD)技术和选择性集成学习算法分析筒体振动与振声信号组成,建立磨机负荷参数软测量模型的新方法<sup>[34]</sup>。针对目前采用经验模态分解(Empirical Model Decomposition, EMD)得到的系列子信号构建的磨机负荷参数软测量模型泛化性能差、难以进行清晰物理解释,以及 EMD 算法存在的模态混叠等问题,提出了基于选择性融合多尺度筒体振动频谱的建模方法<sup>[35]</sup>。刘永周等<sup>[36]</sup>根据中速磨煤机现场振动测试数据,采用 ANSYS@程序建立中速磨煤机—基础耦合体系的有限元模型,分别进行了弹簧隔振基础和非隔振基础中速磨煤机的模态分析和谐响应分析。康岩等<sup>[8]</sup>针对采用传统方法建立球磨机料位软测量模型存在测量精度不高和稳定性较低的缺点,提出一种结合深度信念网络和极限学习机的软测量方法。刘卓等<sup>[37]</sup>针对基于传统快速傅里叶变换获得的单尺度筒体振动频谱难以有效揭示磨机研磨机理和筒体振动信号组成,以及现有文献中经验模态分解(EMD)技术预测精度低的问题,提出了基于偏最小二乘算法的多尺度筒体振动频谱分析与模型构建方法。WÓJCICKI 等<sup>[38]</sup>介绍了波兰某矿石选矿厂加工工艺线中球磨机基础的模态分析结果,模态分析以 FEM 和 OMA 两种方式进行,通过试验结果验证

并对有限元模型进行了适当的调整。王丹等<sup>[39]</sup>针对采用振动法对球磨机料位测量时,其特征值存在非线性和随机性强的问题,引入二型模糊逻辑对球磨机料位进行概念阐释,基于区间二型 T-S 模糊系统建立了球磨机料位预测模型。罗小燕等<sup>[40]</sup>采用小波分析方法对球磨机轴承振动信号进行了关键特征提取。刘志刚等<sup>[41]</sup>通过监测筒体轴承座产生的振动信号,采用 Welch 法对其进行功率谱估计,分析信号功率谱与磨机筒体内负荷之间的关系,并采用主元分析法(PCA)对振动谱能量值进行降维,得到与负荷高度相关的能量谱成分,最后利用支持向量机(SVM)建立磨机负荷参数分类模型,实现了磨机负荷参数(填充率、料球比)的预测。程瑞辉等<sup>[42]</sup>针对采用传统极限学习机在球磨机料位软测量建模过程中存在鲁棒性差、预测精度不高等缺点,提出了一种基于最优定界椭球(Optimal Bounding Ellipsoid, OBE)改进极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)的建模方法。杨小兰等<sup>[43]</sup>针对振动磨现有技术中粉碎效率偏低之现状,进行激振机构动力学分析,利用拉格朗日方程导出其运动方程,构建 Adams 仿真模型,应用优化的六频段变正弦变频激振曲线,仿真模拟出不同频段下的混沌态数值图表,如相轨图、最大 Lyapunov 指数变化曲线、振幅-振强分布曲线等。PEDRAYES 等<sup>[44]</sup>探索了 DEM 在频域表征滚转球磨机负载扭矩的可能性,通过干磨在不同磨机转速、待磨颗粒和填充水平条件下一系列模拟和实验测试,从仿真和随后的扭矩数据处理中发现了在频域表征球磨机的负载扭矩的可能性,建立了一种能够估计磨机填充水平的方法的基础理论,表明了球磨机的负载转矩信号包含足够的信息来明确表征球磨机的负载水平。针对湿式球磨机在磨矿过程中内部负荷靠专家经验难以准确预测的问题,提出一种基于改进的共生生物搜索(Ameliorated Symbiotic Organisms Search, 简称 ASOS)—极限学习机(Extreme Learning Machine, 简称 ELM)的磨机负荷软测量方法<sup>[45]</sup>。李思思等<sup>[46]</sup>针对工况改变后数据分布差异造成模型失配的问题及球磨机运行时振动信号的不确定性,研究了半监督域适应模糊推理的球磨机负荷参数软测量方法。YOSHIDA 等针对与半自磨机及其相似的球磨机开展了机械振动的特性研究,利用离散元法可以预测磨球和物料颗粒等内容物的运动,估计磨球与磨壁的碰撞力,并采用有限元方法进行振动分析,计算了由 DEM 估计

的碰撞力引起的振动时程响应, 通过仿真和实验研究了材料颗粒直径的变化对振动特性的影响<sup>[47]</sup>。XIE 等<sup>[48]</sup>结合剪切冲击能量模型(SIEM)和离散元法(DEM), 应用粒子碰撞能量谱分析了某工业凹陷磨机切片中充填料对磨机功率、对矿石冲击能量以及衬板和介质磨损的影响。

#### 4 磨机(半自磨)机械振动力学响应

近年来, 研究者们针对磨机(半自磨机)机械振动的驱动机理、对设备基础的动力作用等做了研究工作。RODRÍGUEZ 等<sup>[49]</sup>介绍了两种不同的大功率磨机传动技术的技术评价和实践经验, 从磨机驱动源方面重点分析了驱动电机所需的静态功率变换器和相关控制方案, 从电网相互作用、电机相互作用、控制方案等方面分析了循环变换器和负载换相逆变器。豆攀乔等<sup>[50]</sup>基于结构与设备动力相互作用, 现场测试弹簧隔振基础中速磨煤机的振动反应, 根据测试结果评估了中速磨煤机的振动安全性, 采用 ANSYS(R)程序建立有限元模型, 进行模态分析和谐波响应分析。孙经周等<sup>[51]</sup>根据中速磨煤机现场振动测试数据, 采用 ANSYSOR 程序建立中速磨煤机—基础耦合体系的有限元模型, 分别进行了弹簧隔振基础和非隔振基础中速磨煤机的模态分析和谐波响应分析。彭奕亮等<sup>[4]</sup>考虑中速磨煤机与基础的动力相互作用, 测试了基础上、下台板和设备本体的振动位移和加速度。闫晓芳等<sup>[52]</sup>为决生产过程中磨煤机振动对设备基础产生的影响, 分别对不同工况条件的磨煤机进行振动测试。

#### 5 结论

通过现有研究成果可知, 对于磨机(半自磨)机械振动的研究多集中在振动基本特征、振动信号采集与分析、振动信号的应用、磨机(半自磨)机械振动数据模拟及反演, 磨机(半自磨)机械振动是多种运动冲击力的叠加所致, 受磨机转速、衬板类型和形状、球径配比、充填率、料球比、矿浆温度、矿浆浓度、矿浆黏度、矿浆体积等众多因素的影响, 其机械振动信号可由速度或加速度传感器进行有效采集。目前研究主要考虑振动信号的采样频率、采样点数、采样区域采集而通过使用传感器获取磨机(半自磨)振动加速度及速度信号, 主要通过信号处理、频谱分析、模态分析和功率谱分析方法分析

振动信号获得包括特征频率分布、频谱成分和局部峰值特征。国内外学者通过磨机负荷参数软测量等仿真模拟方法和手段, 更好地解决了磨机(半自磨)机械振动过程物料不均、设备内部无法直接观察、现场监测环境复杂等问题而无法全面掌握磨机(半自磨)振动机理的问题。但受制于磨机(半自磨)设备基础的冗余设计, 对磨机(半自磨)机械振动力对设备地基、设备厂房的响应研究工作偏少, 尤其是地下选矿厂在国内外先例较少, 针对磨机(半自磨)机械振动对硐室围岩的动力响应研究不多。从直观判断来看, 磨机(半自磨)机械振动与水电机组机械振动、地铁振动和矿山地下破碎机机械振动的基本特征、信号采集与分析以及机械振动数据数值模拟及反演等方面存在较大的相似性, 尤其是对硐室围岩和建构筑物机械振动响应研究方法、手段具有高度借鉴性, 有必要开展硐室围岩和建构筑物机械振动响应研究。

#### 参考文献

- [1] AUSTIN L G, MENACHO J M, PEARCY F. A general model for semi-autogenous and autogenous Milling [ C ]//APCOM 87: Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Metallurgy Vol. 2. Johannesburg: SAIMM, 1987: 107-126.
- [2] GAO Y P, QING Z S, WU C, et al. Feature extraction method of ball mill load based on adaptive variational mode decomposition and improved power spectrum analysis [J]. Journal of Physics, 2020 (3): 32-46.
- [3] TANG J, CHAI T, YU W, et al. Feature extraction and selection based on vibration spectrum with application to estimating the load parameters of ball mill in grinding process [J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(10): 991-1004.
- [4] 彭奕亮, 彭志丰, 刘永周, 等. 中速磨煤机基础耦合体系振动测试与减振研究 ( I )——现场振动测试 [J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(1): 133-136, 166.  
PENG Y L, PENG Z F, LIU Y Z, et al. Vibration test and shock absorption research on medium-speed mill-foundation coupled system ( I )-vibration test in site [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39 (1): 133-136, 166.
- [5] 王恒, 贾民平, 黄鹏, 等. 球磨机筒体振动信号监测方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(12): 1812-1816.

- WANG H, JIA M P, H P, et al. On the monitoring method of vibration signal in the ball mill shell [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(12): 1812-1816.
- [6] 杨志刚, 张杰, 李艳姣. 磨音影响因素分析与磨机负荷检测方法综述 [J]. *金属矿山*, 2015 (2): 139-144.
- YANG Z G, ZHANG J, LI Y J, et al. Mill sounds influence factors analysis and mill load detection methods review [J]. *Metal Mine*, 2015(2): 139-144.
- [7] MOHANTY S, GUPTA K K, RAJU K S. Vibration feature extraction and analysis of industrial ball mill using mems accelerometer sensor and synchronized data analysis technique [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 58: 217-224.
- [8] 康岩, 卢慕超, 阎高伟. 基于 DBN-ELM 的球磨机料位软测量方法研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2015(4): 73-75, 92.
- KANG Y, LU M C, YAN G W. Soft sensor for ball mill fill level based on DBN-ELM model [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(4): 73-75, 92.
- [9] 许永强, 姜志宏, 蔡改贫, 等. 基于 AR 模型的磨机振动信号特征提取方法 [J]. *中国钨业*, 2017, 32(2): 71-76.
- XU Y Q, JIANG Z H, CAI G P, et al. AR model-based extraction for ball-mill vibration signals [J]. *China Tungsten Industry*, 2017, 32(2): 71-76.
- [10] Shi J, Si G, ZHANG Y. Application of fractional fourier transform for prediction of ball mill loads using acoustic signals [J]. *IEEE Access*, 2019 (7): 84170-84181.
- [11] 浦友尚, 魏镜骥, 吴张永, 等. 基于主元分析法的磨音信号特征提取 [J]. *中国钨业*, 2020, 35(3): 68-73.
- PU Y S, WEI J T, WU Z Y, et al. Feature extraction of grinding signal based on principal component analysis [J]. *China Tungsten Industry*, 2020, 35(3): 68-73.
- [12] 余刚, 汤健, 刘卓, 等. 磨机筒体振动单模态子信号选择方法研究 [J]. *中国科技论文*, 2020, 15(12): 1422-1428.
- YUG, TANG J, LIU Z, et al. Selection method of single-mode sub-signal of mill shell vibration [J]. *China Science Paper*, 2020, 15(12): 1422-1428.
- [13] 蔡改贫, 赵小涛, 胡显能, 等. CEEMDAN 小波阈值联合的球磨机筒体振动信号去噪方法研究 [J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(7): 1077-1085.
- CAI G P, ZHAO X T, HU X N, et al. Denoising method of vibration signal of ball mill based on ceemdan-wavelet threshold combination [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(7): 1077-1085.
- [14] 罗小燕, 戴聪聪, 程铁栋, 等. 基于改进 EWT 多尺度熵和 KELM 的球磨机负荷识别方法 [J]. *化工学报*, 2020, 71(3): 1264-1277.
- Luo X Y, DAI C C, CHENG T D, et al. Load identification method of ball mill based on improved EWT multiscale entropy and KELM [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(3): 1264-1277.
- [15] CAI J C, YANG L, ZENG C X, et al. Integrated approach for ball mill load forecasting based on improved EWT refined composite multiscale dispersion entropy and fireworks algorithm optimized SVM [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(2). DOI: 10. 1177/1687814021991264.
- [16] TANG J, ZHAO L J, ZHOU J W, et al. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(9): 720-730.
- [17] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 湿式球磨机筒体振动信号分析及负荷软测量 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(11): 1521-1524.
- TANG J, ZHAO L F, YUE H, et al. Analysis of vibration signal of wet ball mill shell and soft sensing for mill load [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31 (11): 1521-1524.
- [18] 汤健, 郑秀萍, 赵立杰, 等. 基于频域特征提取与信息融合的磨机负荷软测量 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(10): 2161-2167.
- TANG J, ZHENG X P, ZHAO L J, et al. Soft sensing of mill load based on frequency domain feature extraction and information fusion [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2161-2167.
- [19] 黄鹏, 贾民平, 钟秉林, 等. 基于球磨机筒体振动的料位特征量 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 898-903.
- HUANG P, JIA M P, ZHONG B L, et al. Characteristic value of fill level based on vibration of ball mill shell [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 898-903.
- [20] 王恒, 贾民平, 黄鹏, 等. 基于筒体振动信号的球磨机优化工况监测 [J]. *仪表技术与传感器*, 2012(11): 145-148.
- WANG H, JIA M P, HUANG P, et al. Research on optimize monitoring method for ball mill based on mill shell vibration signal [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(11): 145-148.
- [21] 傅贵兴. 球磨机故障频谱诊断实践 [J]. *煤矿机械*, 2013, 34(8): 304-306.
- FU G X. Practice of spectrum diagnosis about fault

- of ball mill [J]. *Coal Mine Machinery*, 2013, 34(8): 304-306.
- [22] HUANG P, JIA M, ZHONG B. Study on the method for collecting vibration signals from mill shell based on measuring the fill level of ball mill[J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/472315>.
- [23] 李声旭, 谢昌俊. 半自磨减速机故障诊断[J]. *设备管理与维修*, 2016(11): 76-77, 75.  
LI S X, XIE C J. Fault diagnosis of semi-automatic grinding reducer [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2016(11): 76-77, 75.
- [24] 赵明, 王培红, 李孟阳, 等. 基于小波包特征提取及统计分析的磨煤机球径配比诊断[J]. *能源研究与利用*, 2018(6): 15-19, 45.  
ZHAO M, WANG P H, LI M Y, et al. Coal pulverizer ball diameter ratio diagnosis based on wavelet packet feature extraction and statistical analysis[J]. *Energy Research & Utilization*, 2018(6): 15-19, 45.
- [25] 钟庆海. 某大型低速半自磨机振动故障处理[J]. *现代矿业*, 2018, 34(9): 174-176.  
ZHONG Q H. A large low-speed semi-autogenous mill vibration troubleshooting[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(9): 174-176.
- [26] 胡显能, 蔡改贫, 罗小燕, 等. 基于 CEEDAN 和多尺度排列熵的球磨机负荷识别方法[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(3): 146-151.  
HU X N, CAI G P, LUO X Y, et al. Load identification method for ball mills based on CEEMDAN and multiscale permutation entropy[J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(3): 146-151.
- [27] 蔡改贫, 宗路, 罗小燕, 等. 基于 CEEMDAN 云模型特征熵和 LSSVM 的磨机负荷预测研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(7): 128-133.  
CAI G P, ZONG L, LUO X Y, et al. Prediction of ball mill's load based on IEDA-cloud model feature entropy and LSSVM[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(7): 128-133.
- [28] 罗小燕, 邵凡, 陈慧明, 等. 基于多源信号融合的球磨机负荷预测方法研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 232-237.  
LUO X Y, SHAO F, CHEN H M, et al. A ball mill load prediction method based on multi-source signal fusion technology[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 232-237.
- [29] 袁铸, 李名莉. 基于小波分析的球磨机振动监测与故障诊断[J]. *矿山机械*, 2019, 47(12): 38-41.  
YUAN Z, LI M L. Vibration monitoring and fault diagnosis of ball mill based on wavelet analysis[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2019, 47(12): 38-41.
- [30] 邓海英, 许美宗. 基于振动信号分析的球磨机工况检测技术的研究与应用[J]. *中国金属通报*, 2021(11): 254-255.  
DENG H Y, XU M Z. Research and application of ball mill working condition detection technology based on vibration signal analysis [J]. *China Metal Bulletin*, 2021(11): 254-255.
- [31] LUO X Y, HUANG Y F, ZHANG F W, et al. Study of the load forecasting of a wet mill based on the CEEMDAN-refined composite multiscale dispersion entropy and LSTM nerve net [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2022, 16(3): 340-348.
- [32] 汤健, 柴天佑, 赵立杰, 等. 基于振动频谱的磨矿过程球磨机负荷参数集成建模方法[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(2): 183-191.  
TANG J, CHAI T Y, ZHAO L J, et al. Ensemble modeling for parameters of ball-mill load in grinding process based on frequency spectrum of shell vibration[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 183-191.
- [33] 汤健, 赵立杰, 柴天佑, 等. 基于振动频谱的磨机负荷在线软测量建模[J]. *信息与控制*, 2012, 41(1): 123-128.  
TANG J, ZHAO L J, CHAI T Y, et al. Online soft-sensing modeling of mill load based on vibration spectrum [J]. *Information and Control*, 2012, 41(1): 123-128.
- [34] 汤健, 柴天佑, 丛秋梅, 等. 基于 EMD 和选择性集成学习算法的磨机负荷参数软测量[J]. *自动化学报*, 2014, 40(9): 1853-1866.  
TANG J, CHAI T Y, CONG Q M, et al. Soft sensor approach for modeling mill load parameters based on EMD and selective ensemble learning algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(9): 1853-1866.
- [35] 汤健, 柴天佑, 丛秋梅, 等. 选择性融合多尺度筒体振动频谱的磨机负荷参数建模[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(12): 1582-1591.  
TANG J, CHAI T Y, CONG Q M, et al. Modeling mill load parameters based on selective fusion of multiscale shell vibration frequency spectra[J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(12): 1582-1591.
- [36] 刘永周, 彭志丰, 魏霞冰, 等. 中速磨煤机基础耦合体系振动测试与减振研究(II)-有限元分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2013, 39(2): 211-214.  
LIU Y Z, PENG Z F, WEI X B, et al. Vibration test and shock absorption research on medium-speed mill-foundation coupled system (II)-Finite element analysis [J]. *Sichuan Building Science*, 2013,

- 39(2): 211-214.
- [37] 刘卓, 柴天佑, 汤健. 一种多尺度球磨机筒体振动频谱分析与建模方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 305-308.  
LIU Z, CHAI T Y, TANG J. Multiscale shell vibration frequency spectrum analysis and modeling approach of ball mill [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36 (3): 305-308.
- [38] WÓJCICKI Z, GROSEL J, SAWICKI W, et al. Experimental (OMA) and numerical (FEM) modal analysis of ball mill foundations [J]. Procedia Engineering, 2015, 111: 858-863.
- [39] 王丹, 郭磊, 阎高伟. 二型 T-S 模糊系统在球磨机料位预测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 103-106, 109.  
WANG D, GUO L, YAN G W. Application of Type-2 T-S fuzzy system in ball mill fill level prediction [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(12): 103-106, 109.
- [40] 罗小燕, 卢小江, 熊洋, 等. 小波分析球磨机轴承振动信号特征提取方法[J]. 噪声与振动控制, 2016(1): 148-152.  
LUO X Y, LU X J, XIONG Y, et al. Feature extraction method for ball-mill bearing's vibration signals using wavelet analysis [J]. Noise and Vibration Control, 2016(1): 148-152.
- [41] 刘志刚, 蔡改贫, 林龙飞, 等. 主元分析的振动频段特征识别与磨机负荷建模研究[J]. 中国钨业, 2016, 31(3): 68-73.  
LIU Z G, CAI G P, LIN L F, et al. Study of vibration frequency domain feature identification and mill load modeling by principal element analysis [J]. China Tungsten Industry, 2016, 31(3): 68-73.
- [42] 程瑞辉, 阎高伟. 基于 OBE-ELM 的球磨机料位软测量[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 574-579, 598.  
CHENG R H, YAN G W. Soft sensor for ball mill fill level based on OBE-ELM model [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 574-579, 598.
- [43] 杨小兰, 刘极峰, 陆云韬, 等. 变频激振优化之磨机混沌态仿真与实验[J]. 振动与冲击, 2017, 36(20): 44-51.  
YANG X L, LIU J F, LU Y T, et al. Optimization of frequency conversion excitation vibration and simulation test on chaotic state in a vibration mill [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(20): 44-51.
- [44] PEDRAYES F, NORNIELLA J G, MELERO M G, et al. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modeling: application to filling level monitoring [J]. Powder Technology, 2018, 323: 433-444.
- [45] 蔡改贫, 赵小涛, 张丹荣, 等. 基于 ASOS-ELM 的湿式球磨机负荷软测量方法[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(1): 184-192.  
CAI G P, ZHAO X T, ZHANG D R, et al. Soft measurement method of wet ball mill load based on ASOS-ELM [J]. Journal of Vibration [J]. Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 184-192.
- [46] 李思思, 杜永贵, 闫飞, 等. 基于半监督域适应模糊推理的球磨机负荷参数软测量[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(3): 364-368.  
LI S S, DU Y G, YAN F, et al. Soft sensor of ball mill load parameters based on semi-supervised domain adaptive fuzzy inference [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(3): 364-368.
- [47] 康一. 郑州地铁运行引起邻近建筑物的振动响应研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
KANG Y. Study on vibration response of adjacent subway buildings in Zhengzhou [D]. Zhengzhou University, 2019.
- [48] XIE C, ZHAO Y, SONG T, et al. Investigation of the effect of filling level on the wear and vibration of a SAG mill by DEM [J]. Particology, 2022, 63: 24-34.
- [49] RODRIGUEZ J R, PONTT J, NEWMAN P, et al. Technical evaluation and practical experience of high-power grinding mill drives in mining applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 866-874.
- [50] 豆攀乔, 马颖飞. 基于动力相互作用的中速磨煤机隔振基础振动特性研究 [J]. 四川建材, 2012, 38(6): 191-193.  
DOU P Q, MA Y F. Study on vibration characteristic of medium-speed mill with vibration-isolated foundation based on dynamic interaction [J]. Sichuan Building Materials, 2012, 38(6): 191-193.
- [51] 孙经周, 王嵘峰, 房继忠. 火电厂中速磨煤机基础振动有限元分析 [J]. 科技信息, 2012(36): 414-415.  
SUN J Z, WANG R F, FANG J Z. Finite element analysis of foundation vibration of medium speed coal mill in thermal power plant [J]. Science & Technology Information, 2012(36): 414-415.
- [52] 闫晓芳, 曹波. 磨煤机基础减振加固技术 [J]. 环球市场, 2016(15): 42-43.  
YAN X F, CAO B. Vibration reduction and reinforcement technology of coal mill foundation [J]. Global Market, 2016(15): 42-43.