

磨机负荷检测及建模方法研究进展

王廷¹, 赵建军², 陶乐¹, 田蕊¹, 邹文杰¹

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室, 北京 100089)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。选矿厂节能降耗需求强烈, 球磨机负荷检测是实现磨机控制、优化磨矿流程的关键技术。本文归纳了近年来磨机负荷的检测方法: 压差法、磨音法、振动法、功率法、超声波法、基于多源信号融合的间接检测方法; 总结并分析了磨机负荷的建模方法。未来一段时间内, 多源信息融合的间接法将仍是检测磨机负荷的主要方法, 改进神经网络为基础的建模方法、新型在线检测方法以及建立高效精准的负荷检测模型是磨机负荷检测的主要发展方向。

关键词: 磨机负荷; 软测量; 建模; 神经网络; 在线检测; 矿业工程

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.03.018

中图分类号: TD453 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)03-0107-05

磨机是典型的高耗低效设备, 用于研磨物料的能量占不到其总消耗能量的10%, 磨机进行磨矿作业的耗电量约占全世界总发电量的2.8%~3%^[1], 一方面, 在选矿厂所有的作业环节中, 磨矿工序的能耗占比为50%~70%, 节能降耗需求强烈; 另一方面, 磨矿作业须保证有用矿物和脉石达到较佳单体解离, 为后续的选别作业提供质量和流量合格的物料, 磨矿产品的质量对选矿厂的经济和技术指标起着关键的作用。

1 磨机负荷定义及检测框架

磨机负荷, 是指磨机内物质(钢球、水、矿石)负荷的加和^[2]。磨矿过程中, 一般将球磨机内部负荷状态划分为欠负荷、正常、过负荷。在选矿厂实际的生产过程中, 磨机经常处于欠负荷或过负荷的“胀肚”状态^[3], 使得磨机效率降低、甚至损坏。目前, 应用在磨机负荷状态检测的主要有压差法、振动法、磨音法、功率法、超声波法等单源检测方法, 但这些方法均难以完整地反映磨机内部负荷的全部变化。基于以上情况, 现在融合两种单源以及融合多源信号的新型测量方法

成为研究的一个焦点, 但还没有成熟完善的方案, 问题是磨机的特征参数与多源模态的机械信号难以映射, 不易建立模型。近年来, 基于神经网络的建模方法^[4]成为磨机负荷在线检测的改进方向, 在传统检测方法的频谱分析基础上建立磨机负荷的相应非线性模型, 根据模型进行频谱分割、去噪处理、分量重构、样本训练、磨机负荷识别模型建立^[5], 该方法识别准确率高, 现在处于小规模实验研究中, 有广阔的应用前景。

当前的磨机负荷检测方法大多将充填率、料球比、磨矿浓度、磨机转速等各特征参数与检测所得的信号数据相映射, 建立相应的特征参数融合模型, 应用神经网络等优势算法加以辅助, 以提升磨机负荷识别的准确率。

2 磨机负荷检测方法

2.1 振动法

振动法^[6]是指振动传感器采集磨机筒体或轴承等部位的振动信号, 而后对信号进行分析, 探索磨机负荷与振动能量的关系, 是当前磨机负荷检测领域最常用的单源检测方法, 相较于其他单

收稿日期: 2020-07-25

基金项目: 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室开放基金(BGRIMM-KZSKL-2019-02); 中央高校基本科研业务费(FRF-IP-20-03)

作者简介: 王廷(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 邹文杰(1986-), 女, 副教授, 研究方向为矿物加工工程。

源检测信号,振动信号具有干扰小、易检测和相关模型泛化能力强等特点,国内学者针对筒体表面振动、轴承振动信号处理做了大量研究,提出了成熟的检测方案,将最终磨机负荷预测结果的准确率提升至 95%~98%,具有广阔的应用前景。

磨机负荷较佳控制点受电压频率、磨机转速以及磨机衬板损耗等相关因素的影响而产生漂移,从而干扰振动信号检测磨机负荷的准确性,此外,振动法还较难检测磨机内部的物料充填率和磨矿浓度等特征参数。郭振宇^[7]等将分布式系统(DCS)采集的振动数据经主成分分析(PCA)提取磨机负荷特征指标,以快速傅里叶变换(FFT)分析频谱特征与负荷特征指标的关系,实现磨机负荷的预测,该方法未增设其他的检测器件,检测成本低。文献^[8]通过对磨机轴承和筒体表面不同区域的振动信号进行自适应滤波和特征提取,获取表征磨机负荷的特征信息,基于最小二乘支持向量机(LSSVM)建立约简加权的软测量模型,对各传感器的磨机负荷预测值进行数据融合,获得筒式磨机负荷测量值,该方法克服了以往检测方法易受干扰、灵敏度差、线性度不好等缺点。熊洋^[9]通过测定球磨机轴承的振动信号,建立特征参数融合模型,依靠递推向量机(SVM)算法实现对球磨机负荷的检测,该算法对各参数样本训练时间稍长,影响最终磨机负荷数据的实时获取。刘卓等^[10]提出了一种自适应提取多尺度振动频谱特征的磨机负荷参数软测量模型,该方法能有效地模拟人类听觉系统对有价值多尺度频谱特征的提取与选择能力,受诸多因素干扰,该模型泛化能力较差。

2.2 压差法

压差法^[11]通过检测磨机的入料口和出料口的压强差,而后根据压强差和磨机负荷曲线的特征关系,用经验公式表征磨机负荷,此方法适用于干式磨机,依靠工人对磨机温度、压强、出入口的风压等参数的综合把控,极度依靠工人经验,基于以上特点,压差法测量精度低且需频繁调节^[12],难以构建磨机负荷与差压参数之间的线性关系,影响磨机运行的稳定性。

2.3 功率法

功率法也称电流法^[13],通过检测磨矿过程中磨机筒体内的介质(钢球、物料)和矿浆一起转动所消耗的功率与负荷的相关性来预测磨机负荷。电机电流在电网电压的影响下可能会有较大波动,而干扰磨机负荷检测结果。针对有用功率的下降不一定是因为磨机处于过负荷状态的问题,

文献^[14]采用一种实时自适应学习的模糊逻辑控制器调节磨机功率的误差变化率,以实现磨机负荷的稳定控制;郑鉴君^[15]以磨机的主机电流表征磨机负荷,采用的 T-S 模糊模型能较好反映该工况下磨机主机电流的变化情况,该方法在离线情况下检测,可能会使得该模型泛化能力不够而出现失配现象。

2.4 磨音法

磨音法是指在磨机连续运转的过程中,通过检测噪声信号来判断球磨机处于何种运行状态,并确定磨机负荷的检测方法。现已开发了成系列产品的磨音测量仪,但磨音法易受相邻磨机和其他设备的交叉噪声影响而降低检测的精准性。张杰等^[16]通过噪声信号的功率谱建立了相应的球磨机负荷振声模型,噪声功率谱的理论测量值与实际测量值大致相同,验证了球磨机负荷振声模型的可行性和有效性。姜德轩等^[17]以数字信号处理技术(DSP)技术采集并分析水泥粉磨机的磨音信号,并与磨机实际状态进行对比,可得出磨机负荷实时检测结果。杜江^[18]将改进的中值滤波与小波变换对磨音信号混合滤波,用最小二乘法对磨机料位评估,可提高检测精度。田黎等^[19]介绍了一种应用于水泥磨机的新型噪声料位测量系统,该系统将高精度噪声传感器安装于钢球初始抛落区,将噪声信号进行滤波处理,连接 DCS 系统反馈料位信息,以便及时对磨机进行调整。

2.5 超声波检测法

超声波检测法主要是利用超声波在不同介质中的传播特性差异,实现对球磨机负荷情况的检测,目前主要应用于干式磨机。王庸贵等^[20]利用声发射波传感器提取相应信号,应用模糊控制方法对磨机料位进行检测,在工况条件恶劣的磨机内部,声发射波传播会产生衰减和畸变等问题。禰莉明等^[21]在球磨机的螺栓外端采用接收声-超声的方式检测料位,但是超声波传播要求衬板表面洁净,干式磨机内灰尘较多而难以达到检测要求,应用效果尚待研究。韩亚辉等^[22]认为温度是影响超声波传播速度的重要因素,并推导出带有温度补偿的速度修正计算公式,详细分析了超声波传播的实际路径。

综上,各种单源检测方法的特点总结见表 1。

2.6 多源信号融合的检测方法

多源信号融合检测方法是指对球磨机产生的振动、磨音、电机电流等信号进行特征提取,而后获得与磨机负荷参数变化相关性强、稳定性高的特征信息,以多源信息融合算法步骤建立软测

量模型，预测球磨机的内部负荷参数变化。罗小燕等^[23]提出了一种利用不精确推理理论（D-S）对振动、磨音等多源异类信号的特征层进行融合的磨机负荷检测方法，解决了磨机负荷预测中的检测信号存在的信号冲突以及融合结果的置信度低等问题。加力康^[24]使用振动传感器判断磨机的电机转子系统的载荷，同时检测转子电流信号，提出基于电流信号进行转子系统载荷类型识别的思

路，磨机的功率及电流信号主要来源于励磁柜和同步电机高压开关柜，有的选矿厂磨机可能需要另加采集元件。卢小江^[25]整理和采集了球磨机轴承的振动、筒体磨音和主机电流的各信号，应用先进最优融合集和 D-S 证据理论结合的多源信息融合技术，有效提高了磨机负荷预测的正确率，使用 SVM 方法对采集样本进行长时间训练影响磨机负荷信息的实时获取。

表 1 各单源检测手段原理及优缺点

Table 1 Principles, advantages and disadvantages of the single-source detection methods

检测方法	检测原理	优点	缺点
振动法	球磨机筒体和轴承等部位安装振动传感器，振动能量与磨机负荷的关系	较灵敏，能显示磨机内物料的变化	易受钢球等磨矿介质、衬板磨损的影响
磨音法	磨机内介质和筒壁相互碰撞产生的机械噪声特性与磨机负荷变化相关	形成系列产品，能预测大致的料球比	易受相邻磨机和环境噪音的影响，难于判断介质充填率和矿浆浓度
压差法	检测磨机入料口和出料口的压强差，以经验公式表征磨机负荷	适用于干式磨机，无需进行复杂的磨机负荷参数检测	极度依靠工人经验，测量精度较低
功率法	以介质与矿浆运动所消耗的功率预测磨机负荷	受周边环境的影响较小，检测结果精确	灵敏度不高，受电网电压波动影响大
超声波法	超声波在介质中的传播特性检测磨机料位，预测负荷	适用于干式磨机，穿透能力强，灵敏度高	信号传播存在衰减和畸变

3 磨机负荷的建模

磨机负荷的建模是在上述单源或多源信号检测所获信号中解析磨机负荷信息的关键过程，目前的研究热点和难点是如何建立泛化能力强、适度拟合、训练时间少、效率高的负荷预测模型，近年来，模型构建方面已取得一定进展。

3.1 基于神经网络的建模方法

神经网络以大量的函数逼近方法建立非线性模型，使网络具有快速收敛和较佳逼近特性，从而构造出磨机系统的特征参数和磨机负荷之间的映射关系。国内学者对传统神经网络处理训练样本的鲁棒性和容错能力不理想提出了相关的改进方法。

蔡改贫等^[26]针对传统神经网络建模没有降维，变量选择有人工干扰等问题，提出了一种针对单隐层神经网络的极限学习机（ELM）算法，对磨机筒体振动信息的特征信号训练样本进行优化，建立共生生物探索（ASOS）-ELM 模型，该模型泛化能力较高，可以提高磨机负荷预测的精准度；邓展等^[27]提出一种基于 RBF 神经网络的学习算法，学习速率加快，能有效预测磨机负荷，可进一步增强抗干扰信号能力，提高磨机负荷的识别准确率。赵立杰等^[28]针对集成模型成员间的相关性较高的问题，提出一种基于快速去相关神经网络集成的球磨机负荷参数建模方法，该方法所建模型泛化性高。蔡改贫等^[29]提出了一种基于改进的经验小波变换（EWT）-多尺度熵和核极限学

习机（KELM）的球磨机负荷识别方法，对 EWT 频谱分割方法进行改进，通过构建信号仿真模型，将重构的多尺度熵作为表征磨机不同负荷状态的特征向量以预测磨机负荷，该方法识别磨机负荷的准确率较高。

3.2 传统建模方法的改进

刘志刚等^[30]提出以 Welch 算法分割和修正振动频谱的周期、PCA 对高维参数信息降维、SVM 训练样本为构架的磨机负荷检测模型，该模型的建立为预测磨机负荷的过程提供了完整的思路，但 PCA 降维的结果不太理想以及 SVM 自身的局限性，使得该模型无法大范围推广使用。司刚全等^[31]针对上述 SVM 算法需求解线性规划、样本训练时间长等问题提出基于改进果蝇算法的最小二乘法支持向量机（LSSVM）对样本参数进行训练优化，该方法将 SVM 中的线性规划问题转化为线性方程组求解，减少了样本训练时间。赵立杰等^[32]提出基于正则化随机配置网络自动逼近 SVM 超平面自寻优，引入 L2 范数防止模型过拟合的优化方案。基于 LSSVM 算法，刘卓等^[33]提出的多尺度磨机筒体振动频谱建模方法，使用经验模态快速分解（EMD）和 FFT 获得多尺度频谱，通过实验仿真表明该模型的精度较高。蔡改贫等^[34]使用基于自适应噪声的完整集成经验分解算法（CEEMDAN）对振动信号进行分解，用相关系数法重构信号，将重构信号的云模型特征量输入 LSSVM 训练，能有效预测磨机负荷，但最终的

识别精确度还需进一步提升。刘吉顺等^[35]构建以使用 CEEMDAN 分解振动信号, 样本熵作为特征量输入 ELM 为框架的模型, 实验表明此种模型识别磨机负荷的准确率高。刘卓等^[36]提出由时频域变换、多模态线性/非线性特征子集选择、多模态 SEN 模型构建共 3 个模块组成的建模策略, 以实现多模态机械信号(噪音、振动、加速度)特征子集建立相应线性/非线性模型, 该模型可以为多模态高维机械信号与磨机特征参数之间难以映射的问题提供新的解决思路。

4 结 论

现有磨机负荷检测技术已取得一定工业应用, 未来一段时间内磨机负荷的预测仍将以多源信息融合的间接法为主, 人工神经网络对参数样本的训练成为近年研究磨机负荷新型建模方法的热点, 磨机负荷检测的发展方向主要是开发磨机负荷检测新方法, 构建高效的磨机负荷精准预测模型, 搭建磨机负荷实时在线监测系统, 以期实现磨机运行状态的综合控制及节能降耗。

参考文献:

- [1] 汤健, 田福庆, 贾美英, 等. 基于频谱数据驱动的旋转机械设备负荷软测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
TANG J, TIAN F Q, JIA M Y, et al. Load soft measurement of rotating machinery and equipment based on spectrum data drive[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [2] 王泽红, 陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势 [J]. *中国粉体技术*, 2001, 1(1):19-23.
WANG Z H, CHEN B C. Current status and development trend of ball mill load detection[J]. *China Powder Technology*, 2001, 1(1):19-23.
- [3] 李艳姣. 磨机负荷优化计算与专家控制 [D]. 唐山: 河北联合大学, 2014.
LI Y J. Mill load optimization calculation and expert control[D]. Tangshan: Hebei Union University, 2014.
- [4] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 磨机负荷检测方法研究综述 [J]. *控制工程*, 2010, 17(5):565-570+574.
TANG J, ZHAO L J, YUE H, et al. A review of the research on mill load detection methods[J]. *Control Engineering*, 2010, 17(5):565-570+574.
- [5] 高纯生, 刘鑫, 谢文涓, 等. 基于 EWT-奇异值熵的磨机负荷识别方法 [J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(11):130-136.
GAO C S, LIU X, XIE W J, et al. Mill load identification method based on EWT-singular value entropy[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(11):130-136.
- [6] B Behera, B K Mishra, C V R Murty. Experimental analysis of charge dynamics in tumbling mills by vibration signature technique[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 20(1).
- [7] 郭振宇, 邹国斌, 杨凌凌, 等. 基于 DCS 采集的振动数据的磨机负荷分析 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(4):69-74.
GUO Z Y, ZOU G B, YANG L L, et al. Mill load analysis based on vibration data collected by DCS[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2019(4):69-74.
- [8] Jianquan Shi, Gangquan Si, Shuiwang Li. Feature extraction based on the fractional Fourier transform for vibration signals with application to measuring the load of a tumbling mill[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 84.
- [9] 熊洋. 基于振动特征提取的球磨机负荷预测研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
XIONG Y. Research on load prediction of ball mill based on vibration feature extraction[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [10] 刘卓, 柴天佑, 汤健. 基于多尺度振动和振声频谱特征自适应提取与选择的磨机负荷参数软测量 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(12):2603-2610.
LIU Z, CHAI T Y, TANG J. Soft measurement of mill load parameters based on adaptive extraction and selection of multi-scale vibration and vibration-acoustic spectrum features[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(12):2603-2610.
- [11] 汤健, 乔俊飞, 刘卓, 等. 磨矿过程的球磨机研磨机理数值仿真及磨机负荷参数软测量综述 [J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(11):1459-1470.
TANG J, QIAO J F, LIU Z, et al. Numerical simulation of ball mill grinding mechanism for grinding process and review of soft measurement of mill load parameters[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(11):1459-1470.
- [12] 王颖洁. 钢球磨煤机料位的软测量及其动态过程建模与控制 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
WANG Y J. Soft measurement of ball coal mill level and its dynamic process modeling and control[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [13] 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. Analysis of influence factors of grinding sound and review of mill load detection methods[J]. *Metal Mine*, 2015(2):139-144.
- [14] 唐耀庚. 模糊逻辑控制在磨机负荷控制中的应用 [J]. *电气传动*, 2002(5):31-33.
TANG Y G. Application of fuzzy logic control in mill load control[J]. *Electrical Drive*, 2002(5):31-33.
- [15] 郑鉴君. 联合粉磨系统磨机负荷辨识方法研究 [D]. 济南: 济南大学, 2015.
ZHENG J J. Research on mill load identification method of combined grinding system[D]. Jinan: University of Jinan, 2015.

- [16] 张杰, 王建民, 杨志刚. 承德某选矿厂磨机运行专家系统[J]. *金属矿山*, 2013(7):144-148.
ZHANG J, WANG J M, YANG Z G. An expert system for mill operation in a concentrator in Chengde[J]. *Metal Mine*, 2013(7):144-148.
- [17] 姜德轩. 基于球磨机负荷优化控制的磨音检测 [D]. 济南: 济南大学, 2011.
JIANG D X. Grinding sound detection based on ball mill load optimization control[D]. Jinan: University of Jinan, 2011.
- [18] 杜江. 高精度智能型磨音测量仪的研制 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
DU J. Development of high-precision intelligent grinding sound measuring instrument[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [19] 田黎. 一种应用于水泥磨机的新型噪声料位测量系统 [C]. 中国硅酸盐学会, 2015: 205-211.
TIAN L. A new type of noise level measurement system applied to cement mills[C]. Chinese Ceramic Society, 2015: 205-211.
- [20] 黄成祥, 陈敏, 王庸贵. 球磨机负荷智能监控系统的研究[J]. *机械*, 1999(6):8-9+45.
HUANG C X, CHEN M, WANG Y G. Research on intelligent monitoring system of ball mill load[J]. *Machinery*, 1999(6):8-9+45.
- [21] 禚莉明, 何祖威. 采用超声 Lamb 波测量钢球磨煤机的料位[J]. *动力工程*, 2006(6):859-864.
XUAN L M, HE Z W. Using ultrasonic Lamb wave to measure the level of steel ball coal mill[J]. *Power Engineering*, 2006(6):859-864.
- [22] 韩亚辉, 郝成. 关于大量程超声波料位计的算法修正讨论[J]. *价值工程*, 2014, 33(25):301-302.
HAN Y H, HAO C. Discussion on the algorithm modification of large-range ultrasonic level gauge[J]. *Value Engineering*, 2014, 33(25):301-302.
- [23] 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. Research on load prediction method of ball mill based on multi-source signal fusion[J]. *Vibration and Shock*, 2019, 38(8):232-237.
- [24] 加力康. 基于多源融合技术的转子系统载荷识别研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
JIA L K. Research on rotor system load identification based on multi-source fusion technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [25] 卢小江. 基于多源信号融合技术的球磨机负荷预测方法研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
LU X J. Research on load forecasting method of ball mill based on multi-source signal fusion technology [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [26] 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+211.
CAI G P, ZHAO X T, ZHANG D R, et al. ASOS-ELM-based soft load measurement method of wet ball mill[J]. *Vibration Testing and Diagnosis*, 2020, 40(1):184-192+211.
- [27] 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.
- [28] 赵立杰, 李彬, 汪滢, 等. 磨机负荷参数快速去相关神经网络集成模型[J]. *控制工程*, 2017, 24(9):1952-1957.
ZHAO L J, LI B, WANG Y, et al. Neural network integrated model for fast decorrelation of mill load parameters[J]. *Control Engineering*, 2017, 24(9):1952-1957.
- [29] 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. Ball mill load identification method based on improved EWT-multi-scale entropy and KELM[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(3):1264-1277.
- [30] 刘志刚, 蔡改贫, 林龙飞, 等. 主元分析的振动频域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. Research on vibration frequency domain feature recognition and mill load modeling based on principal component analysis[J]. *China Tungsten Industry*, 2016, 31(3):68-73.
- [31] 司刚全, 李水旺, 石建全, 等. 采用改进果蝇优化算法的最小二乘支持向量机参数优化方法[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(6):14-19.
SI G Q, LI S W, SHI J Q, et al. Parameter optimization method of least square support vector machine using improved fruit fly optimization algorithm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(6):14-19.
- [32] 赵立杰, 邹世达, 郭烁, 等. 基于正则化随机配置网络的球磨机工况识别[J]. *控制工程*, 2020, 27(1):1-7.
ZHAO L J, ZOU S D, GUO S, et al. Ball mill working condition recognition based on regularized random configuration network[J]. *Control Engineering*, 2020, 27(1):1-7.
- [33] 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. A method of frequency spectrum analysis and modeling of multi-scale ball mill barrel vibration[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2015, 36(3):305-308.

our country contain high Ca and Mg impurities, which are more suitable for the production of $TiCl_4$ by the molten salt chlorination method. However, there is a large amount of residue of molten salt chlorination generated, which has complex components and is difficult to be recycled. Direct discharge of those residue will pollute the environment and waste resources. This paper systematically analyzes the research status and development trends of comprehensive treatments of residue of molten salt chlorination at home and abroad. It is pointed out that deep burial and accumulation after lime neutralization treatment of residue of molten salt chlorination cannot solve the environmental pollution problem. The water solution treatment can specifically recover certain substances in the filtrate, but the amount of wastewater is large, and the removal of impurities is difficult. Additionally, the process flow of those water solution treatments are always complicated, and there is no effective utilization of the filter residue. The non-water-soluble methods have unique development advantages, among which the method of high-temperature phase transformation is a promising treatment, which could recycle and utilize the residue of molten salt chlorination at high temperature without cooling and water dissolution, quite reducing the amount of wastewater, environmental pollution, and resources loss.

Keywords: Residue of molten salt chlorination; Comprehensive utilization; Water soluble; Chloride; High temperature phase transformation; Metallurgical engineering

(上接第 111 页)

[34] 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. Research on mill load prediction based on CEEMDAN-cloud model feature entropy and LSSVM[J]. *Vibration and Shock*, 2019, 38(7):128-133.

[35] 刘吉顺, 杨丽荣, 罗小燕, 等. CEEMDAN 和样本熵相结合的球磨机负荷识别方法[J/OL]. *机械科学与技术*: 1-8.

LIU J S, YANG L R, LUO X Y, et al. Load identification method of ball mill based on CEEMDAN and sample entropy[J/OL]. *Mechanical Science and Technology*: 1-8.

[36] 刘卓, 汤健, 柴天佑, 等. 基于多模态特征子集选择性集成建模的磨机负荷参数预测方法[J/OL]. *自动化学报*: 1-15.

LIU Z, TANG J, CHAI T Y, et al. A method for predicting mill load parameters based on selective integrated modeling of multi-modal feature subsets[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*: 1-15

Research Progress of Mill Load Detection and Modeling Methods

Wang Ting¹, Zhao Jianjun², Tao Le¹, Tian Rui¹, Zou Wenjie¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China;

2. State Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, Beijing, China)

Abstract: This is a paper in the field of mining engineering. With the increasing demands for energy conservation and consumption reduction in mineral processing plants, ball mill load measurement is the key technology to realize mill control and optimize the grinding process. This paper summarizes the measurement methods of mill load in the recent years: differential pressure method, grinding sound method, vibration method, power method, ultrasonic method, indirect detection method based on multi-source signal fusion. Moreover, it summarizes and analyzes the mill load modeling methods that have emerged in recent years. In the future, the indirect methods of multi-source information fusion will still be the main methods to detect mill load, modeling methods based on improvement of neural network and new online detection methods, as well as the establishment of efficient and accurate load detection models will be the main development direction of mill load detection.

Keywords: Mill load; Soft measurement; Modeling; Neural network; Online detection; Mining engineering