

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.05.020

基于总体平衡模型的半自磨机在线自诊断工具开发

宋涛 邹国斌 杨佳伟 宋晓梅

(矿冶科技集团有限公司, 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室,
矿冶过程自动控制技术北京市重点实验室, 北京 100160)

摘要: 工业云服务是工业互联网智能化升级, 实现数字矿山建设的重要手段。介绍了针对矿物加工磨矿流程中重要的大型磨矿设备开发数字化模拟模型, 并利用工业云服务模式进行半自磨机在线自诊断功能实现的具体研究过程。结果表明, 利用基于机理模型开发的半自磨机在线自诊断工具可以在不同选矿生产时段对半自磨机内部物料运动情况、磨矿产品粒度分布等重要信息进行量化计算, 并可通过云服务的模式对结果进行快速的可视化展示。该在线自诊断工具不但可以为半自磨机运行状态分析提供直观的判断方法, 还可对半自磨操作和流程优化提供建议。

关键词: 半自磨机; 工业云服务; 在线自诊断; 总体平衡模型

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2021)05-0128-06

Development of a SAG mill online self-appraisal tool based on population balance model

SONG Tao ZOU Guo-bin YANG Jia-wei SONG Xiao-mei

(Beijing Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, State Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Industrial cloud service is an important means of intelligent upgrading of industrial internet and realization of digital mine construction. This paper introduces the development of digital simulation model for the important large-scale grinding equipment in the mineral grinding process, and the specific research process of realizing the online self-diagnosis function of a SAG mill via the industrial cloud service. The SAG mill online self-appraisal tool can be used for quantitative calculation of important information such as material movement inside the SAG mill and particle size distribution of grinding products in different processing production periods. The results can be quickly visualized by cloud service mode. This tool can not only provide an intuitive judgment method for the operation state analysis of a SAG mill, but also provide suggestions for the SAG mill operation and process optimization according to the calculation results.

Key words: SAG mill; industrial cloud service; online self-appraisal; population balance model

以智能选矿厂为载体, 以关键设备、流程智能化为核心, 通过工业互联网支撑的智能矿山建设方式是近年来我国矿物加工行业转型升级和发展的主要方向^[1]。矿物加工流程工业的网络化、智能化升

级成为提升整个行业生产效率的重点突破方向。如何打破传统作业方式, 提升矿物加工行业数字化比例, 完成设计理论、操作经验与优化控制的对接, 也成为在矿物加工行业实现传统产业升级的关键^[2]。

磨矿流程是矿物加工工业中消耗电能最多的单元流程, 全世界磨矿消耗的电能占当年发电量的3%~4%^[3]。我国选矿企业碎磨作业投资占全厂投资的60%左右, 耗电量约占全厂用电量的50%, 日常生产经营费用占比约为全厂运营费用的

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704026); 国家重点研发计划项目(2019YFE0105000, 2020YFE0201100)

第一作者: 宋涛, 博士, 高级工程师, 主要从事矿冶设备及流程建模仿真研究。E-mail: songtao@bgrimm.com

40%~50%^[4]。利用工业云服务方式提高磨矿流程的运行效率，提升碎磨产品品质，降低设备、流程运行能耗，从而实现矿物加工单元流程数字化。一方面，利用数学模型精确描述磨矿流程大型设备工作状态以及磨矿产品变化范围，可以帮助工业云服务方式获取传统在线、离线检测手段不能完整呈现的工业数据流，做到“深入”；另一方面，发挥云服务计算能力，提供快速结果反馈及数据可视化计算结果，以及发挥互联网服务模式的特点，尽量降低用户使用门槛，提供友好易用的操作界面，做到“浅出”。在设计、建设、调试、生产、优化等全生命周期内，利用工业云服务模式提升效率，将是矿物加工工业数字化、智能化建设的有效途径。

本文介绍针对矿物加工磨矿流程中大型半自磨机设备开发的一种基于 web 服务模式的半自磨机在线自诊断软件。该软件可以通过接入服务网址的方式建立半自磨机粉碎过程模拟模型、半自磨机内部物料分布和磨矿介质运动轨迹模拟计算模型，并通过计算结果对在用或预选型半自磨机进行运行状态及磨矿流程产品进行评估。在介绍半自磨磨矿流程矿物粉碎模型及半自磨内部物料运动模型后，针对软件使用方法及国内某选矿厂应用实例进行详细描述，最后展望以该工具为基础提供矿物加工工业云服务前景。

1 模型描述

为了准确描述半自磨磨矿流程，填补传统检测数据节点，需要建立半自磨磨矿流程矿物粉碎模型预测流程各个节点处的矿石粒度变化情况以及矿浆流量，也需要建立半自磨内部物料运动模型在不同设备条件和操作条件下计算半自磨机内矿物的分布和钢球及大块矿物的运动轨迹。

1.1 半自磨磨矿流程矿物粉碎模型

MORRELL^[5]在 MUTAMBO^[6]、MORRELL 和 MORRISON^[7]工作的基础上，将半自磨机破碎效率函数与半自磨机操作条件紧密地结合起来，并且引入 LATCHIREDDI^[8]介绍的方法来计算半自磨机内物料输送过程，提出了较为完备的半自磨机矿物粉碎模型，在很大程度上提高了模型计算精度和模型的适用性。为了描述半自磨机物料粉碎过程，需要在建模过程中定义以下函数的计算方法：

- 1) 确定与破碎过程相关的能量计算方法；
- 2) 定义选择函数 S，用以计算半自磨机磨矿过

程中每一个矿石粒级的破碎速率；

3) 定义表观函数 B，用以计算不同粒级矿石经过破碎后其产品的粒度分布；

4) 定义排矿函数 D，用以计算经过筛孔和顽石窗的矿浆运动情况。

若定义 F , P , M 分别为表示给矿、磨矿产品和磨机负载各粒级矿石质量的向量，则依据质量守恒定律，半自磨机磨矿过程守恒方程见式 1。

$$\begin{cases} 0 = F - P - SM + BSM \\ P = DM \end{cases} \quad (1)$$

MUTAMBO^[6]通过大量实验室和工业试验数据，总结出不同半自磨机操作参数对选择函数计算的影响规律，并利用一种五点插值样条函数来计算选择函数。在五个特殊的粒级点(0.25、4、16、44、128 mm)处，计算得到五个插值点的值，然后利用样条函数表示整个粒级范围内的选择函数值 S。具体计算公式见参考文献[6]。

半自磨模型表观函数是代表大粒级矿石破碎后的矿石粒度分布情况，这里需要将不同粒级矿石的破碎能量与粒度分布关联起来。JKMRC 落重测试方法定义了两个参数来表征物料抵抗冲击破碎的能力，即 A 与 b ，它们都是拟合参数，在式 2 中表示破碎粒度与能耗的关系^[9]。

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{-b \cdot E_{cs}}) \quad (2)$$

式中， t_{10} 表示产物中粒度小于原始颗粒尺寸 1/10 的物料的产率， E_{cs} 是单位质量矿石破碎所消耗的能量。利用 JKMRC 落重测试获得参数 A 和 b ，以及 E_{cs} 后就可以计算得到 t_{10} ，进而得到冲击能量下的表观函数矩阵。另外，还需要计算研磨环境下的表观函数矩阵。最终，按照 LEUNG^[10] 研究的表观函数模型结构，表观函数 B 表示为：

$$B = \frac{t_{LE} + B_{LE} + t_{HE} + B_{HE}}{t_{LE} + t_{HE}} \quad (3)$$

这里， B_{LE} 和 B_{HE} 分别为低能量和高能量表观函数， t_{LE} 和 t_{HE} 分别为低能量和高能量 t 值。

排矿函数 D 体现了半自磨机尾端格栅和顽石窗对粉碎产品排出的影响，具体计算形式仍参考 LEUNG 的工作^[10]。

$$D = 1 \quad x < x_m \quad (4)$$

$$D = \frac{\ln(x) - \ln(x_g)}{\ln(x_m) - \ln(x_g)} \quad x_g > x > x_m \quad (5)$$

式中， x 为矿物颗粒直径； x_m 定义为 m 尺度，小于其的颗粒可以全部排除半自磨机； x_g 定义为 g 尺度，代表可以通过顽石窗的最大颗粒直径。

在获得给矿粒度分布和给矿量、给水量的条件下，利用上述平衡方程可以计算得到半自磨机磨矿产品和半自磨机内部物料流量、矿物粒度分布等信息，从而通过计算数据预测半自磨机生产情况。

1.2 半自磨内部物料运动模型

半自磨机内部磨矿介质运动源于其在磨机转动时受到衬板或提升条作用而产生的提升运动，以及其在脱离衬板或提升条后所做的抛物线运动。POWELL^[11]在MCIVOR^[12]、VERMEULEN^[13]等学者研究的基础上，对磨机筒壁处磨矿介质运动进行了系统的理论分析，总结了影响磨矿介质运动轨迹的因素，并通过实验验证了其提出的理论计算模型。

本文使用 POWELL^[11]介绍的方法计算半自磨机内部磨矿介质运动轨迹。按照以下计算步骤计算磨矿介质在半自磨机内部运动时各时刻的位置坐标及相应速度值，和位于半自磨机筒壁处的抛落点坐标及速度值。

1) 经过定义初始平衡状态；

2) 求解磨矿介质在衬板或提升条斜面处由于磨机转动获得角速度及其滚动、滑动状态下受力平衡方程，获得磨矿介质在进入抛落状态的初始时刻的速度和加速度；

3) 计算磨矿介质重心抛落速度及轨迹后，获得其在半自磨机内部运动时各时刻的位置坐标及相应速度值，和位于半自磨机筒壁处的抛落点坐标及速度值。

利用此模型可以计算工业尺度半自磨机内部磨矿介质的运动轨迹、冲击点和冲击速度，进而计算冲击能量，具体计算过程及计算公式详见参考文献^[11,14]。

2 半自磨机在线自诊断工具开发

半自磨机在线自诊断工具以 web 方式提供用户交互与服务模式，在线进行模型设置、模型计算以及计算结果显示，并根据不同用户权限提供不同的计算服务。软件主要的用户权限、交互界面、数据可视化等利用 JavaWeb 技术开发；半自磨机粉碎过程模拟计算、半自磨机内部物料分布及磨矿介质运动轨迹模拟计算算法利用 Matlab 语言开发，并在 JavaWeb 环境中调用并运行。软件包括了用户权限、模型管理、仿真计算、数据可视化等功能模块，在统一的平台提供半自磨机自诊断功能。

软件技术特点有：

1) 集成了半自磨机、顽石破碎机模型，用户可以通过人机交互界面设置模型参数或读取已储存的模型参数；

2) 可进行半自磨机磨矿流程仿真，并可以半自磨机内部物料分布和磨矿介质运动轨迹；

3) 可进行不同设备参数、操作参数调整情况下半自磨机运行及磨矿效果的仿真结果的可视化，可以绘制各节点矿物粒度分布曲线；

4) 利用 web 形式进行用户注册、在线计算、自诊断功能实现等。

半自磨机在线自诊断工具可以针对固定的半自磨磨矿流程进行计算，如图 1 所示。根据用户实际使用或准备测试的半自磨机设备及流程操作条件输入相关计算参数后，自诊断工具将保存输入数据并执行计算。输入参数变量名称及上下界见表 1。

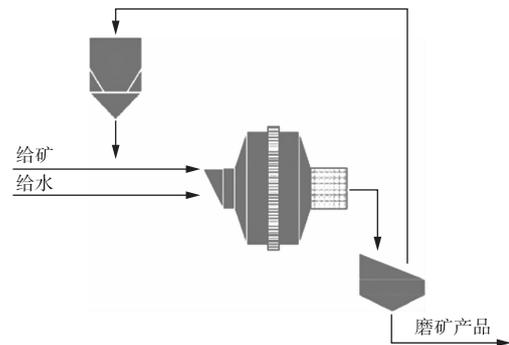


图 1 半自磨机在线自诊断工具通用流程图

Fig. 1 Flowsheet of the SAG mill online self-appraisal tool

表 1 半自磨流程计算参数列表

Table 1 Model coefficients of SAG grinding process calculation

变量名称/单位	默认值	下界	上界
有效直径/m	10.37	0.5	20
有效长度/m	5.16	0.3	20
磨机转速(实际转速/临界转速)%	76.2	0	100
负载填充/%	26	0	100
钢球填充/%	10	0	100
空隙填充/%	60	0	100
物料角度/°	45	0	90
矿浆固体含量/%	80	0	100
矿物密度/(t·m ⁻³)	2.7	0	30
钢球密度/(t·m ⁻³)	7.75	0	30
给矿湿度/%	5	0	100
格栅宽度/mm	70	0	500
筛孔尺寸/mm	10	0	500
最大矿浆尺寸/mm	10	0	500
功率损耗/%	3	0	100
开口面积比例/%	11	0	100
格栅数量/-	36	0	200
增量比能/(kW·h·t ⁻¹)	1.375	0.5	2

半自磨机在线自诊断工具磨矿介质抛落轨迹预测功能需要单独输入半自磨机及磨矿介质参数后方可进行计算。在输入用户实际使用或准备测试的半自磨机设备及操作信息后(输入参数包括提升条高度、提升条斜面角度、磨机转速、磨机直径和钢球尺寸),自诊断工具将保存输入数据并执行计算。磨矿介质在半自磨机衬板滑动和滚动的相关参数需要专业工具测量,根据 POWELL 文献数据^[11]在线自诊断工具在后台固定了相关参数,其中静摩擦系数设为 0.05,动摩擦系数设为 0.2。若用户可提供相关参数的测试数据,可以通过后台修改的方式更改参数并进行模拟计算。磨矿介质抛落轨迹计算输入参数变量名称及设定默认值见表 2。

表 2 磨矿介质抛落轨迹计算参数列表

变量名称/单位	默认值	备注
半自磨机直径/m	5.5	
新提升条高度/cm	25	
旧提升条高度/cm	15	
新提升条斜面角度/(°)	30	
旧提升条斜面角度/(°)	55	
钢球直径/mm	100	
磨机混合填充率/%	30	估计值
临界转速/(r·min ⁻¹)	18.22	
磨机转速/%临界转速	75	
衬板使用周期/month	5	

3 半自磨机在线自诊断工具应用

利用半自磨机在线自诊断工具可以针对半自磨磨矿流程及半自磨机分别进行自诊断仿真计算,也可以综合两种计算模式进行自诊断分析。

首先,以国内某铜矿大型选矿厂半自磨工段流程为例,介绍利用本工具进行磨矿—破碎回路的在线流程模拟计算,工艺流程如图 1 所示。通过输入新给矿量、新给水量、磨机尺寸和操作条件、给矿矿物粒度分布、顽石破碎机产品粒度分布等信息(如表 1 默认参数值),即可进行半自磨—顽石破碎回路的流程模拟计算,得到该流程矿物产品的质量与粒度信息。在结果显示栏可以显示新给矿、返回顽石、磨机排矿、磨机给矿、磨矿产品和磨机负载等各个流程节点的信息,包括矿石量、水量、矿浆质量流量、矿浆体积流量、矿浆密度和矿浆体积浓度以及各流程节点处的矿

物全粒级分布等信息,计算结果如图 2 所示。通过矿物全粒级分布结果显示,可以直观地看到经过半自磨机、破碎机后,矿物粒度的变化情况。更重要的是,利用模型模拟计算,可以获取磨机内部矿物的粒度分布情况,从而为磨机状态分析提供了直观的判断方法,并根据该计算结果对磨机操作给出指导建议。

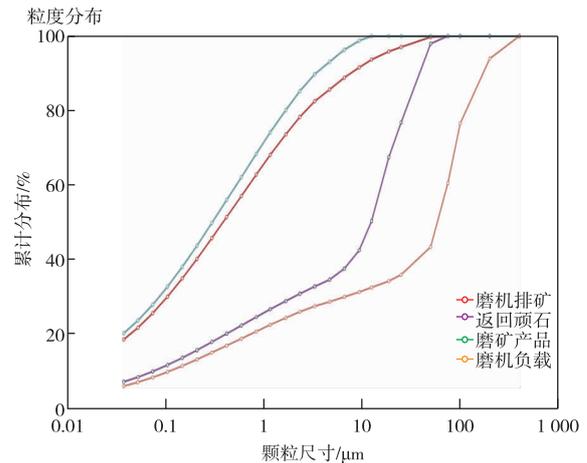


图 2 半自磨机在线自诊断工具模拟结果显示

Fig. 2 Simulation results of the SAG mill online self-appraisal tool

利用该工具还可以在设置不同衬板形状、不同衬板使用周期、不同磨机转速、不同磨矿介质尺寸条件下计算半自磨机内部磨矿介质的运动情况。这里以国内某铜矿选矿厂半自磨机为例,根据新旧衬板的实际情况进行磨机物料分布在线自诊断分析。主要的计算边界条件见表 2。新旧衬板几何信息对比如图 3 所示。

通过模型计算,得到五个月衬板使用周期内每个月磨机内部钢球抛落轨迹。具体计算结果见图 4。经计算结果可以初步分析,该半自磨机不同衬板使用时期可能的磨矿效果:

1) 新衬板: 钢球冲击点接近矿物分布趾部边缘,可能发生砸衬板现象(图 4a);

2) 1~2 个月后: 钢球冲击点较为合理,磨机磨矿效果较好(图 4b、图 4c);

3) 3~4 个月后: 随着提升条的磨损,钢球提升高度变小,冲击点较为接近矿物分布中心区域,磨矿效率降低(图 4d、图 4e);

4) 5 个月后: 磨矿效率进一步降低,冲击破碎效果消失,磨矿过程以研磨效应为主,更换衬板时间较恰当(图 4f)。



图 3 某选矿厂半自磨机新、旧衬板磨损情况比较

Fig. 3 Geometry difference of the new and replaced SAG lifter in a mineral processing plant in China

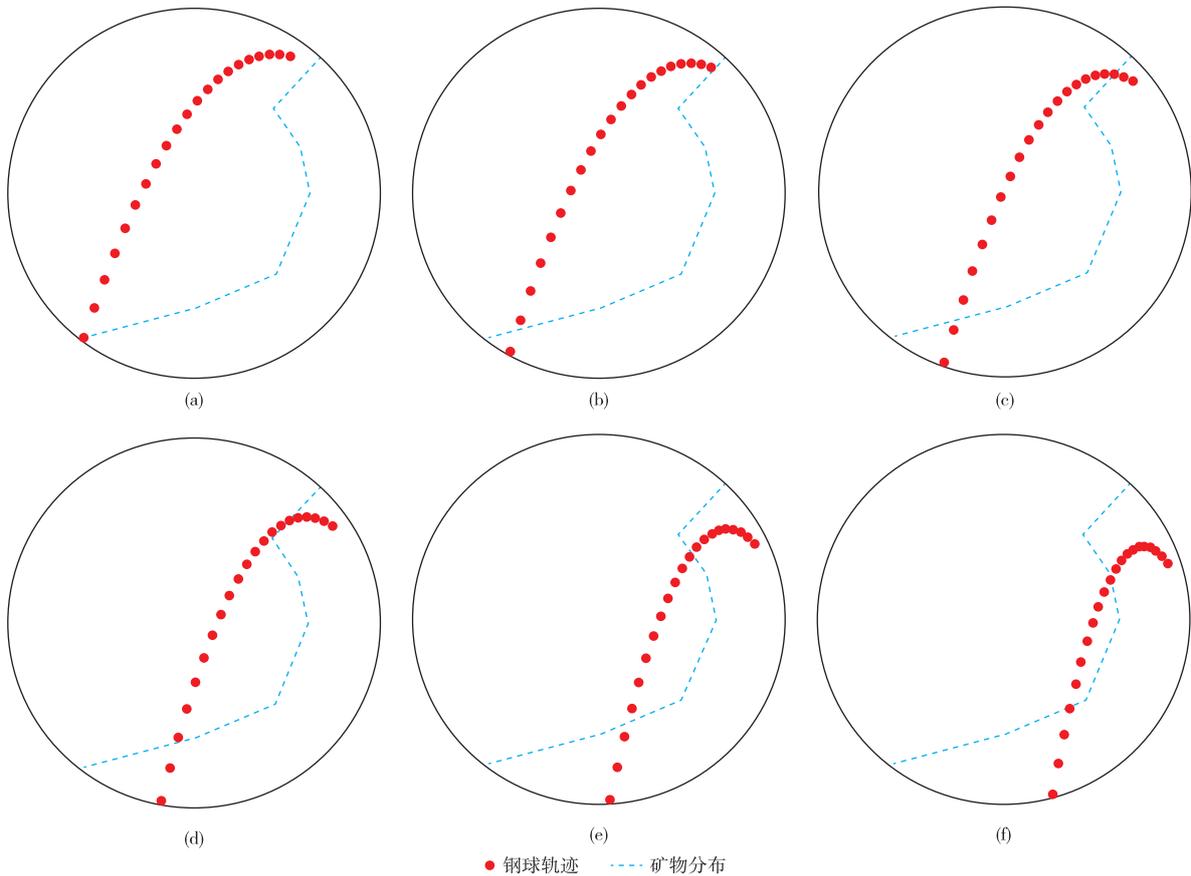


图 4 磨矿介质抛落轨迹预测结果(a: 新衬板; b~f: 使用 1~5 个月后)

Fig. 4 Simulation result image of grinding media trajectory prediction tool(a: new lifter; b-f: after 1—5 months)

为了使对磨矿过程基础知识还较为欠缺的新员工也能够很好地使用自诊断工具判断磨机运行状态，工具预设了由半自磨机操作经验划定的磨矿介质抛落点对应的磨机运行状态分区，如图 5

所示。利用自诊断工具模型和判断规则可以评测目前使用的衬板是否可以提供合理提升能力，钢球尺寸是否合适以及磨机设定转速是否处于合理区间等。

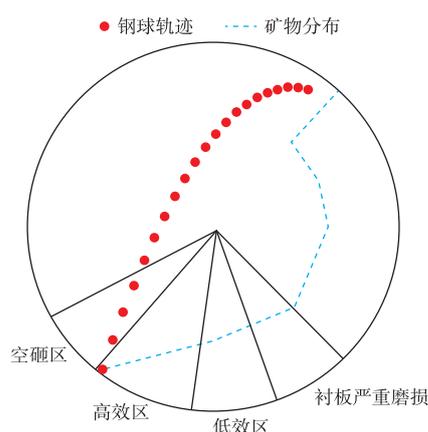


图5 普遍情况下磨机钢球抛落轨迹判断规则

Fig. 5 Normal criterion rule of SAG mill efficiency

4 结论

数学模型在矿冶工业流程设计、建设、调试、生产、优化等全生命周期内都可以得到利用，是矿物加工工业数字化、智能化建设的有效途径。半自磨机在线自诊断工具以机理模型为基础，结合互联网技术，开发了矿物加工大型设备在线自诊断、自评价的服务软件。通过该工具可以针对半自磨磨矿流程及半自磨机分别进行自诊断仿真计算，也可以综合两种计算模式进行自诊断分析，在设备选型、矿物粒度软测量、流程改造、新员工培训等方面为选矿企业用户提供技术支持。

参考文献

- [1] 周济. 智能制造—“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU J. Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] 孙传尧, 周俊武. 流程工业选矿过程智能优化制造发展战略[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 1-5.
SUN C Y, ZHOU J W. Smart and optimal manufacturing development strategy for mineral processing industry[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 1-5.
- [3] BOUCHARD J, DESBIENS A, POULIN E. Reducing the energy footprint of grinding circuits; The process control paradigm [J]. IFAC PapersOnLine, 2017, 50(1): 1163-1168.
- [4] 童熊, 罗溪梅. 低碳经济与选矿行业深化发展关系

的思考[J]. 矿山机械, 2011, 39(8): 9-13.

TONG X, LUO X M. Thinks on relationship between low carbon economy and further development of mineral processing industry [J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(8): 9-13.

- [5] MORRELL S. A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimization [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(3): 437-445.
- [6] MUTAMBO J P C. Further development of an autogenous and semi-autogenous mill model [D]. Australia: University of Queensland, 1993: 31-50.
- [7] MORRELL S, MORRISON R D. AG and SAG mill circuit selection and design by simulation [C] // Canada, Vancouver: Proceedings of SAG 1996, 1996.
- [8] LATCHIREDDI S R. Modelling the performance of grates and pulp lifters in autogenous and semi-autogenous mills [D]. Australia: University of Queensland, 2002: 71-80.
- [9] NAPIER-MUNN T J, MORRELL S, MORRISON R D, KOJOVIC T. Mineral comminution circuits - Their operation and optimisation [M]. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996: 102-131.
- [10] LEUNG K, MORRISON R D, WHITEN W J. An energy based ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding [C] // Chile, Santiago: Proceedings of Copper 87, 1987.
- [11] POWELL M S. The effects of liner design on the motion of the outer grinding elements in a rotary mill [J]. International Journal of Mineral Processing, 1991, 831(3/4): 163-193.
- [12] MCIVOR R E. Effects of speed and liner configuration on ball mill performance [J]. Mineral Engineering, 1983, 6: 617-622.
- [13] VERMEULEN L A. The lifting action of lifter bars in rotary mills [J]. Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, 1985, 85(2): 51-63.
- [14] 宋涛, 周俊武, 王庆凯. 磨矿介质抛落轨迹预测工具研究与开发[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(增刊1): 47-50.
SONG T, ZHOU J W, WANG Q K. Research and development of grinding media trajectory prediction tool [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(S1): 47-50.