

离散单元法在立磨机实时输入功率预测中的应用

王芑卜^{1,2}, 何建成^{1,2}, 孙小旭^{1,2}, 姚建超^{1,2}

(1. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160; 2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

[摘要] 立式螺旋搅拌磨机的高效性已经得到选矿行业的广泛认可,然而工业型设备放大和选型设计缺少理论支持。通过实验室试验获取实验室 10L 立磨机的实时功率,运用 DEM 方法模拟同条件下的立磨机实时扭矩,并以此计算功率与实验结果相对比,以验证 DEM 方法在立磨机实时输入功率预测中的可行性。结果表明,基于 DEM 方法的立磨机实时功率预测结果与实验室试验相比,平均差值为 5.55%。证明 DEM 方法对于立磨机输入功率的预测有较强的参考作用。

[关键词] 立式螺旋搅拌磨机; 实验室试验; DEM; 实时输入功率; 功率预测; 放大选型

[中图分类号] TD45 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0053-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.010

许多选矿工作者都认可立式螺旋搅拌磨机在细磨领域的高效性,实际生产中与球磨机相比节能的效果也证明了这一点。但是,国内大型立式螺旋搅拌磨机技术起步晚,设备研发和应用时间不长,技术水平和应用经验还有很大差距,大型立式螺旋搅拌磨机技术创新和高效应用面临着明显的障碍。工业型设备放大和选型设计缺少理论支持,设备装机功率过大,运行参数调整没有理论依据,工业立磨机实际运行还有节能空间。目前大型化立式搅拌磨机的研发主要靠工业型物理样机试制和工业试验验证,并通过工业规模的动力学试验探索设备的工作原理和参数进行推测。这种方法虽然可行,但存在很多问题和风险。一方面消耗了大量的人力物力财力,另一方面工业试验相关的机理性研究范围小,普适性结论缺乏,导致不同规格型号的设备没有共性理论基础。工业应用过程中主要靠经验参考,对设备型号和介质添加不够精确。在立式螺旋搅拌磨机工作过程中,有复杂的能量转化过程。搅拌器的机械能转化为介质的动能和势能,介质之间相互摩擦产生了很多热量损耗。输入能量是衡量立式螺旋搅拌

磨机规格的重要标准,获取输入功率的影响因素对于立式螺旋搅拌磨机的放大和选型非常重要。

目前立磨机的模拟仿真以 CFD 计算流体力学及 DEM 离散单元法^[1-6]为主。立磨机的计算机仿真可以极大程度的模拟立磨机内矿浆的分布与流动,更真实的揭示影响立磨机磨矿机理的流体特性。并可模拟实时扭矩,以此获得较为准确的实时输入功率。

在立磨机中,磨矿介质由大量的颗粒(通常是钢球或陶瓷球)组成。这些颗粒之间具有强烈的相互作用,属于聚集态物质。它们的运动过程中伴随着波动、碰撞等瞬态性能变化。以前,人们通常使用宏观连续体力学理论来分析这些颗粒的运动过程。但是,这种方法所假定的均匀性和连续性颗粒的实际特征不符,甚至相冲突。它无法准确反映颗粒的实际运动情况,例如介质自转角速度、加速度、介质间切应力和单个介质能量等真实运动状态。这就无法揭示真正的研磨机理。因此,本项目采用 DEM 方法对磨矿介质进行动力学仿真。

DEM 是一种由美国科学家 Cundall 在 1971 年提出的计算方法^[7-8]。它通过根据颗粒体之间的相互作用和牛顿运动定律,使用多种叠加方法对每个时刻的颗粒体进行叠加计算,从而得到每个时间步长内所有颗粒体的受力和位移,并且可以随时更新颗粒体的位置。通过对单个颗粒体进行跟踪计算,就可以得到整个要研究的颗粒系统的运动规律。

[收稿日期] 2023-02-26

[第一作者] 王芑卜(1991—),男,安徽铜陵人,工程师,硕士,主要从事细磨及超细磨设备的研究工作。

[引用格式] 王芑卜,何建成,孙小旭,等.离散单元法在立磨机实时输入功率预测中的应用[J].有色设备,2023,37(3):53-57.

在立磨机的实际运行过程中,其磨腔内的流动介质由水、被研磨物料和研磨介质三部分组成,属于多相流范畴。由于浆料微粒直径很小,与水充分混合后可视为一种流体。同时,介质充填密度较大,介质球间隙小,相对运动可以忽略不计。在整个研磨过程中,流场中的研磨介质浓度分布基本不变。因此,在仿真分析时可以将整个流场的运动介质看作是一种均一的单相流,并假设整个筒体是封闭的,没有物料进出。

使用 10L 实验室立磨机细磨试验系统和平台,通过试验获取立磨机的实时输入功率,通过 DEM 仿真在相同条件下分别对立磨机的实时输入功率进行仿真,并与试验结果对比,证明 DEM 仿真对于立磨机输入功率的预测有较强的参考作用。

1 实验室试验

试验采用北矿机电科技有限责任公司研制的

KLM-10 型立式螺旋搅拌磨机作为实验设备。该实验设备与工业型立磨机具有完全相同的搅拌器结构,上部轴连接一个变频电机,其转速范围为 0 ~ 800 r/min。搅拌装置下部轴及实验所用筒体可以拆卸与更换。实验所用立磨机主轴连接一个功率传感器与扭矩传感器,可以实时记录磨矿过程中的主轴转速和主轴的功率。扭矩传感器及功率传感器输出值作为实验系统实时扭矩及功率。该实验系统参数如表 1 所示。实验系统示意图与实验室设备如图 2、图 3 所示。

表 1 实验系统参数表

名称	数值
筒体内径/mm	250
筒体总高/mm	740
筒体几何容积/L	34.4
螺旋轴容积/L	2.9

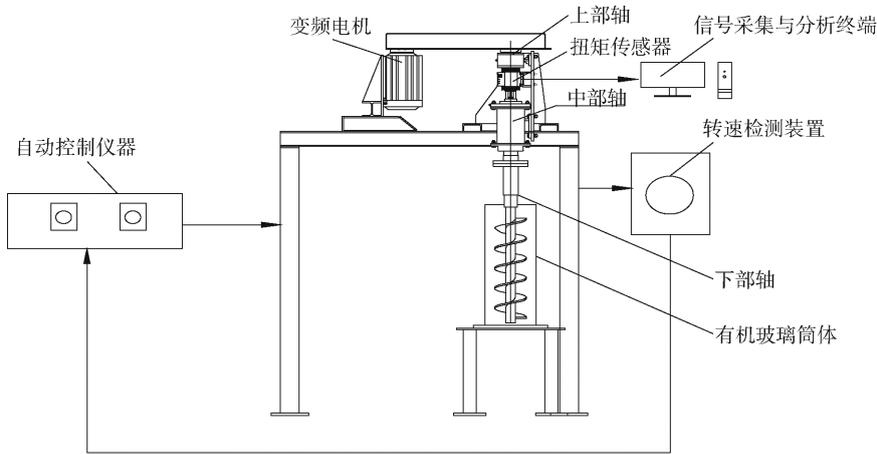


图 1 实验系统示意图



图 2 立磨机实验设备图

使用以上设备,实验室进行了两组不同转速的实验,实验工艺参数如表 2 所示,测得主轴扭矩和功率如表 3 所示。不同转速条件下扭矩值基本相当,变化不大;功率主要受转速的影响,两者基本成线性

关系。

表 2 实验系统参数表

名称	数值
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	216
介质充填率/%	30
介质类型	钢
介质重量/kg	77.7
矿浆浓度/%	60
液面高/mm	700

表3 实验室实测数据表

频率/ Hz	测试一				测试二			
	运转扭矩/ Nm	扭矩取值/ Nm	实测转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	功率 P / kW	运转扭矩/ nm	扭矩取值/ nm	实测转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	功率 P / kW
	5	3.9 ~ 5.4	10.30	36.4	0.04	10.8 ~ 11.2	11.00	36.4
10	4.4 ~ 5.4	10.50	73.2	0.08	11.2 ~ 11.4	11.30	73.2	0.09
15	5 ~ 5.4	10.40	110	0.12	10.8 ~ 11.2	11.00	110	0.13
20	5.1 ~ 5.6	10.85	147	0.17	10.6 ~ 11.4	11.00	147	0.17
25	5.2 ~ 5.7	11.00	184	0.21	10.8 ~ 11.8	11.30	184	0.22
30	5.4 ~ 5.8	11.25	222	0.26	10.8 ~ 11.6	11.20	222	0.26
35	5.4 ~ 5.7	11.10	258	0.30	11.0 ~ 11.6	11.30	258	0.31
40	5.4 ~ 5.7	11.10	295	0.34	10.9 ~ 11.6	11.25	295	0.35
45	5.4 ~ 5.6	11.00	332	0.38	10.7 ~ 11.4	11.05	332	0.38
50	5.3 ~ 5.5	10.80	369	0.42	11.2 ~ 11.7	11.45	369	0.44

对比两组实验,得到功率随频率的变化趋势图如图4,发现两组实验条件下,得到的功率数值基本一致,说明实验具有可重复性,亦可代表在设定试验条件下,立磨机的实时功率。同时可以看出不同转速条件下扭矩值基本相当,变化不大;功率主要受转速的影响,两者基本成线性关系。

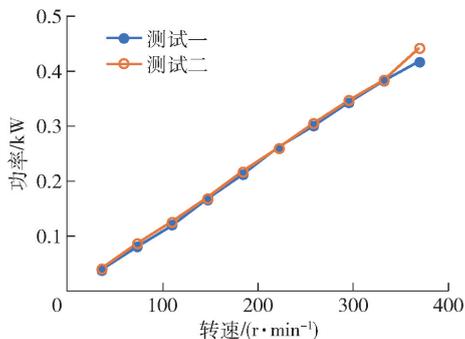


图3 功率变化趋势图

2 DEM 仿真

DEM 仿真计算过程中主要有两个影响计算结果的因素:一是选择的计算模型,二是研究对象的物性参数。

DEM 仿真计算中常用的计算模型有:Hertz - Mindlin、Linear Cohesion、Linear Spring、Hysteretic Spring、Moving Plane (Conveyor)等。

本文以立式螺旋搅拌磨机中的主轴扭矩为主要研究目标,在不考虑矿物的情况下,常用介质尺寸在 5 ~ 30 mm 之间,属于常规的大尺寸颗粒,不存在范

德华力、粘接及团聚等因素影响,本文在仿真中应用 Hertz - Mindlin 模型做基本的计算模型,该计算模型是基本的颗粒接触模型,常用于常规大尺寸颗粒的接触作用。

Hertz - Mindlin 模型法向力和切向力都具有阻尼分量,与阻尼系数和恢复系数有关;切向摩擦力遵守库伦摩擦定律,滚动摩擦力通过接触独立定向恒转矩模型实现。

法向力 F_n 是法向重叠量 δ_n 的函数,表达式见式(1)。

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中, E^* 为当量杨氏模量, R^* 为当量半径,其定义分别见式(2)、式(3)。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - \nu_j^2)}{E_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (3)$$

E_i, ν_i, R_i 和 E_j, ν_j, R_j 分别是杨氏模量、泊松比和接触球体的半径,阻尼力 F_n^d 的表达式见式(4)。

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{s_n m^*} \vec{v}_n^{rel} \quad (4)$$

式中, $m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}$ 是当量质量, \vec{v}_n^{rel} 是相对速度的法向分量, β 和 s_n (法向刚度) 表达式见式(5)、式(6)。

$$\beta = \frac{lne}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (5)$$

$$s_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (6)$$

式中： e 是弹性恢复系数。

切向力 F_t 取决于切向重叠量 δ_t 和切向刚度 S_t ，见式(7)。

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (7)$$

其中， $S_t = 8G^* \sqrt{R^* S_n}$ (8)

式中： G^* 是当量剪切模量。

切向阻尼表达式见式(9)。

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \vec{v}_n^{rel} \quad (9)$$

式中： \vec{v}_n^{rel} 是相对速度的切向分量。切向力受库伦摩擦 $\mu_s F_n$ 限制，其中 μ_s 是静摩擦系数。

对于仿真，滚动摩擦系数也是一个重要参数，通过在接触表面施加一个力矩来考虑，见式(10)。

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (10)$$

式中： μ_r 是滚动摩擦系数； R_i 是接触点到质心的距离； ω_i 是物体在接触点处单位角速度矢量。

应用 Hertz-Mindlin 模型进行计算，需要测定的物性参数主要有本征参数和基本接触参数。其中，

本征参数包括泊松比、剪切模量和密度等，基本接触参数包括弹性恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数。根据何建成的文献^[9]，得到 DEM 仿真需要的本征参数及基本接触参数，如表 4、表 5 所示。

表 4 基本接触参数表

参数	弹性恢复系数 e	静摩擦因数 μ_s	动摩擦因数 μ_R
有机玻璃-碳钢	0.80	0.26	0.01
碳钢-碳钢	0.60	0.22	0.015

表 5 本征参数表

参数	密度	泊松比	弹性模量 G
碳钢	7 850	0.25	8.4e + 10 Pa

对实验室设备进行适当简化，按照表 4、5 标定的参数，得到如图 5 所示的仿真模型。输入如表 3 的转速，得到不同转速条件下搅拌轴的扭矩并计算实时功率如表 6、图 7、图 8 所示，实测扭矩采两次测试平均值。

表 6 功率、扭矩统计表

转速/(r·min ⁻¹)	仿真扭矩/Nm	实测扭矩/Nm	扭矩差值/Nm	仿真功率/kW	实测功率/kW	差值占比/%
36.4	11.45	10.65	0.80	0.04	0.04	7.51
73.2	11.8	10.90	0.90	0.09	0.08	8.26
147	10.35	10.93	-0.58	0.16	0.17	-5.26
222	10.95	11.23	-0.28	0.25	0.26	-2.45
295	11.65	11.18	0.48	0.36	0.35	4.25

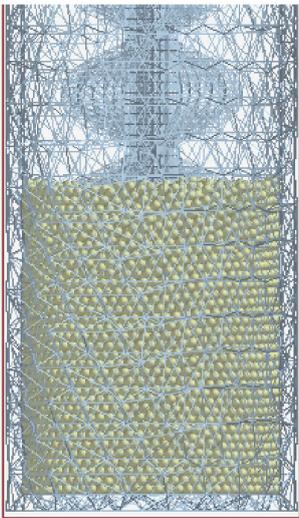


图 4 DEM 简化模型

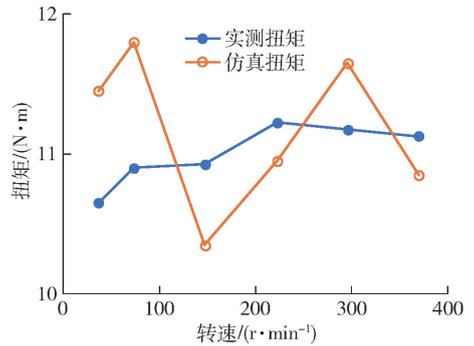


图 5 实测仿真扭矩对比图

3 试验分析及结论

本文初步建立了 DEM 的立磨机仿真模型，运用

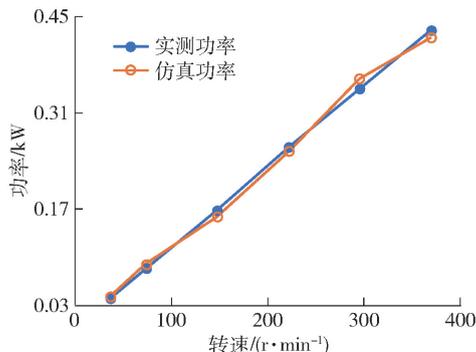


图6 实测仿真功率对比图

该仿真模型对实验室试验进行了验证,证明了 DEM 仿真在立磨机输入功率的预测中具有相当的指导作用。通过对表 6、图 7 及图 8 的分析,得到如下结论。

1) 调整主轴转速得到不同转速条件下主轴的扭矩。实测值为两次测量值的平均值。

2) 从图中可以看出实测与仿真扭矩、实测与仿真功率,两者大小互现,且转速与功率基本上成正比。

3) 吻合最好的是转速为 222 r/min 时,两者仅相差 2.45%。

4) 差距最大的是转速为 73.2 r/min 时,两者相差 8.26%。

5) 五组数据对比,平均误差 5.55%,据此认为仿真数据相对准确可靠,验证了 DEM 模拟仿真对于立磨机大型化的选型具有指导作用。

Application of DEM Methods in Predicting the Input Power of Vertical Stirring Mill

WANG Du-bo, HE Jian-cheng, SUN Xiao-xu, YAO Jian-chao

Abstract: The efficiency of vertical stirring mills has been widely recognized in the mineral processing industry. However, the scaling up and selection design of industrial equipment lacks theoretical support. By obtaining real-time power from laboratory tests on a 10L vertical mill and using DEM simulation to simulate the real-time torque of a vertical mill under the same conditions, the power is calculated and compared with experimental results to verify the feasibility of DEM method in predicting input power of vertical mills. The results show that the average difference between the predicted power of vertical mill based on DEM method and laboratory test is 5.55%, which proves that DEM method has strong reference value for predicting real time input power of vertical mills.

Key words: Vertical stirring mill; Laboratory test; DEM method; Input power; Power prediction; Selection design

4 总结

本文通过试验与 DEM 模拟仿真相结合的方式,验证了一种运用 DEM 方法的立磨机实时输入功率的预测方法,该方法与实验室试验相对比,搅拌轴实时扭矩及实时功率平均误差 5.55%,该方法对于工业装备放大及选型具有参考作用。

[参考文献]

- [1] 张国旺. 超细搅拌磨机的流场模拟和应用研究[D]. 长沙:中南大学,2005:90-95.
- [2] 赵艳萍. 超细卧式搅拌磨的流场模拟及其粉碎机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2009:31-35.
- [3] 张宏伟. 介质搅拌磨单向流场 CFD 仿真模拟和实验验证研究[D]. 广州:华南理工大学,2013:31-35.
- [4] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010:51-57.
- [5] 赵选恒. 卧式搅拌磨结构参数对其性能影响的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013:78-81.
- [6] 母福生,杨鹏. 搅拌磨机介质运动离散元数值模拟分析[J]. 中国机械工程,2012,23(20):2465-2468.
- [7] Cundall PA, The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[D]. London:University of London,1971:3-5.
- [8] Cundall PA, A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky systems[J]. In: Proceeding of the symposium of the International society of Rock Mechanics, Nancy, France,1971:38-42.
- [9] 何建成. 立式螺旋搅拌磨机介质运动学研究[A]. 中国矿物加工大会[C]. 2019:107-108.