基于DEM-CFD耦合的螺旋搅拌磨机工作性能影响因素研究*

于文达[1],崔家璇[1],邹德芳[1],胡金璐[2],路社斌[3]

(1.沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
2.北方重工集团有限公司, 辽宁 沈阳 110027;
3.北方重工富勒(沈阳)矿业有限公司, 辽宁 沈阳 110027)

摘要:为建立立式螺旋搅拌磨机工作性能预报模型并确定合理的模型输入自变量,从粉磨机理出发,采用单变量分析法系统研究了影响磨机工作性能的关键因素。首先,采用离散元法(DEM)与计算流体动力学(CFD)耦合方法建立螺旋搅拌磨机数值仿真模型,分析搅拌过程中研磨介质与矿浆的动力学特性,验证仿真模型的可靠性;然后,基于验证后的数值仿真模型,系统分析工艺参数(转速、介质填充率及矿浆质量浓度)与空间结构参数(底隙、侧隙及螺旋升角)对磨机工作性能(碰撞能、驱动扭矩及能量利用率)的影响规律,明确各因素与粉磨性能指标间的定量关系;最后,采用灵敏度分析法研究各因素影响性能指标的程度。研究结果表明,在满足粉磨效果的前提下,磨机空间尺寸设计与工艺参数选取均存在设计最优值,可达到粉磨性能与能量利用率的平衡点;空间结构参数对磨机能量利用率、碰撞能及驱动扭矩的影响程度强于工艺参数,其中螺旋升角是影响塔磨机粉磨性能的关键参数,可作为塔磨机性能预报模型的核心输入变量。

关键词:螺旋搅拌磨机;粉磨性能;工艺参数;灵敏度分析;数值模拟

中图分类号:TD453 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0212-09

Study on Influencing Factors of Working Performance of Spiral Stirred Mill Based on DEM-CFD Coupling

Yu Wenda[1], *Cui Jiaxuan*[1], *Zou Defang*[1], *Hu Jinlu*[2], *Lu Shebin*[3]

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;
2.Northern Heavy Industries Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110027, China;
3.Northern Heavy Industry Fuller (Shenyang) Mining Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110027, China)

Abstract: To establish a working performance prediction model for a vertical spiral stirred mill and determine reasonable model input independent variables, this study systematically investigates the key factors influencing the mill's working performance from the grinding mechanism perspective using a univariate analysis method. Firstly, a numerical simulation model of the spiral stirred mill was established using a coupled discrete element method (DEM) and computational fluid dynamics (CFD) approach. The dynamic characteristics of the grinding media and slurry during the stirring process were analyzed, and the reliability of the simulation model was verified. Subsequently, based on the validated numerical simulation model, the influence laws of process parameters (rotational speed, media filling rate, and slurry mass concentration) and spatial structural parameters (bottom clearance, side clearance, and helix angle) on the mill's working performance (collision energy, driving torque, and energy utilization rate) were systematically analyzed, clarifying the quantitative relationships between each factor and the grinding performance indicators. Finally, a sensitivity analysis method was employed to investigate the degree of influence of each factor on the performance indicators. The research results indicate that, under the premise of satisfying the grinding effect, optimal design values exist for both the mill's spatial dimension design and process parameter selection, which can achieve a balance point between grinding performance and energy utilization rate. Spatial structural parameters exert a stronger influence degree on the mill's energy utilization rate, collision energy, and driving torque compared to process parameters. Among them, the helix angle is the critical parameter affecting the grinding performance of the tower mill and can serve as the core input variable for the mill's performance prediction model.

Key words: Spiral stirred mill, Grinding performance, Process parameter, Sensitivity analysis, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-07-10
基金项目:辽宁省科技计划联合项目-博士启动项目(2024-BSLH-245);辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20231604)
作者简介:于文达(1987—),男,辽宁大连人,博士,讲师,主要研究方向为矿山装备数字化建模技术。E-mail:13840574586@163.com

0 引言

立式螺旋搅拌磨机(简称塔磨机)是一种高效的矿物精加工装备[1],与传统球磨机相比,塔磨机具有高效、低能耗、低噪声的显著技术优势[2]。目前,塔磨机的工作性能优化与操作策略制定,仍主要依赖现场操作人员经验[3]。随着数字化与智能化技术的广泛应用,传统粉磨矿物加工技术已难以满足高效、绿色、低碳的产业发展需求[4]。

塔磨机工作性能预报模型是实现性能优化与操作策略动态调节的核心理论依据,可正向计算塔磨机性能指标、反向指导工艺参数优化调节。预报模型的计算精度直接决定粉磨系统能否实现高效、低能耗及自动化运维,同时显著影响矿物的最终粉磨质量(细度、比表面积)。当前塔磨机粉磨性能预报模型中的关键参数多依赖经验确定,如搅拌转速、介质填充率、矿物可磨性等,导致模型计算精度偏低[5]。此外,现有预报模型难以精确描述塔磨机粉磨过程中矿物、矿浆间的相互作用的动力学行为。该问题的根本原因在于:对影响塔磨机粉磨性能的因素、敏感程度及因素间的耦合关系认识不够深入,难以精确评估生产过程中的设备运行状况。

随着计算机技术的快速发展,学者们采用数值模拟方法可视化揭示螺旋搅拌过程中介质与矿物的粉磨机理[6]。该方法的优势在于能够从微观与宏观尺度分析矿物-矿浆的动力学行为及相互作用内在机制。离散单元法(DEM)、DEM-CFD 等多物理场耦合方法作为数值仿真的主要方法,已被广泛应用于塔磨机工作性能的影响因素分析与结构优化研究[7]。任廷志等[8]较早采用 DEM 方法分析搅拌槽内介质运动特性,揭示了搅拌转速、搅拌器直径、螺旋升角、介质填充率对塔磨机工作性能的影响规律。肖正明等[9]采用 DEM 方法分析矿物特性与塔磨机工作性能(碰撞能量、碰撞频率及功率)的定量关系,确定了最优搅拌转速与介质填充率。De Oliveira 等[5]采用 DEM 方法建立塔磨机仿真模型,研究了搅拌转速、介质填充率、介质尺寸及磨机直径对矿物破碎率与破碎粒径分布的影响。Sun 等[10]采用 DEM 方法分析了不同尺度结构下塔磨机粉磨过程颗粒流垂直速度分布规律。上述研究表明,影响塔磨机粉磨性能的因素主要包括工艺参数、空间结构参数及矿物属性。同时,单一 DEM 方法仅从介质运动角度分析螺旋搅拌粉磨机理,虽可预测塔磨机宏观工作性能,但无法揭示矿浆属性与研磨介质粒径的匹配关系。

为克服单相模拟方法的局限性,李洋波等[11]采用 DEM-CFD 固液耦合方法模拟塔磨机湿法粉磨过程,分析了研磨介质(陶瓷球)与矿浆的动力学行为。Liu 等[12]、唐勇等[13]通过建立塔磨机 DEM-EMBD-FEM 多场耦合模型研究了螺距、搅拌直径、转速及研磨介质粒度对驱动扭矩和能耗的影响规律。综上,建立固液两相流模型能够准确描述湿法工艺下的塔磨机粉磨过程,深入揭示螺旋搅拌粉磨的工作机理。然而,现有研究多仅从介质动力学角度分析塔磨机结构参数与工艺参数对工作性能的影响,对影响磨粉性能的因素分析不够系统全面,研究结论难以直接用于高精度螺旋粉磨性能数学模型的建立。

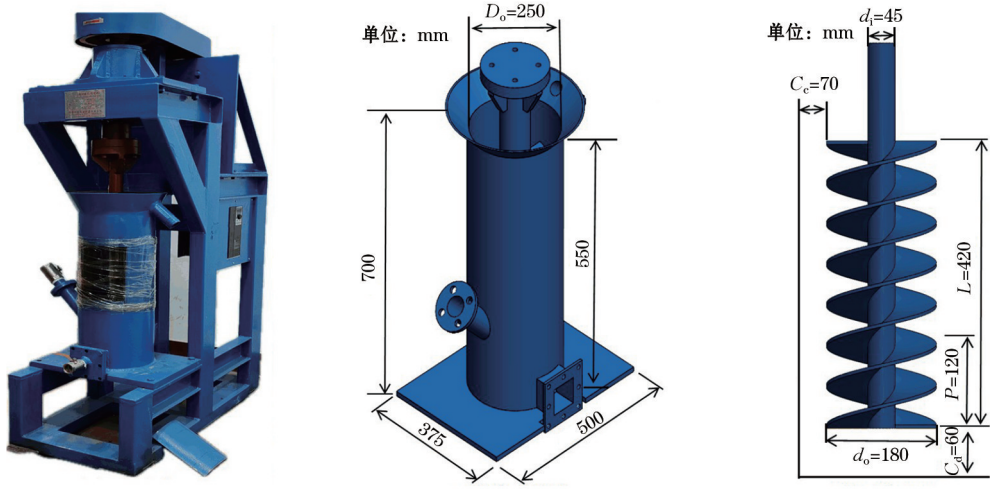
本文从塔磨机搅拌粉磨机理出发,首先,建立 DEM-CFD 耦合仿真模型,系统分析了螺旋搅拌粉磨过程的多相动力学行为;其次,搭建塔磨机试验台开展粉磨试验,以搅拌电机驱动扭矩为指标验证仿真模型的准确性;然后,基于验证后的塔磨机数值仿真模型定量讨论工艺、结构等因素对粉磨性能的内在影响机制;最后,采用单因素灵敏度分析法研究影响性能指标的因素排序,为塔磨机性能预报数学模型输入变量的合理选取提供理论依据。

1 塔磨机流固耦合分析

塔磨机主要由螺旋搅拌器、筒体、研磨介质、电机及驱动控制器等组成,试验装置与几何模型如图 1 所示。磨机核心结构参数包括:螺旋升角 $P/d_{\circ}$、螺距 P、螺旋外径 $d_{\circ}$、侧隙 C_{c}、底隙 C_{d}、塔磨机内径 $D_{\circ}$、搅拌杆直径 d_{i}。塔磨机工艺参数包括:矿浆质量浓度、介质填充率、螺旋搅拌转速。塔磨机在搅拌过程中,研磨介质和矿浆存在复杂的相互作用关系,其受力和运动行为复杂,属于典型的固液两相流问题。本文建立了 DEM-CFD 耦合仿真模型,从研磨机理角度探索影响塔磨机工作性能的因素。

1.1 DEM-CFD 耦合仿真模型

为提高数值计算效率,对塔磨机三维模型进行简化处理[14]。通过 DEM 计算研磨介质在筒体内实时运动速度与受力,并将结果信息反馈至 CFD 求解器进行矿浆流动力学计算;同时,将 CFD 计算的矿浆流动矢量力反馈至 DEM 模型,更新介质球的运动轨迹与速度,耦合仿真流程如图 2 所示。其中,采用 Hertz Mindlin(no slip)接触模型计算研磨介质球-矿浆、介质球-壁面间的相互作用关系;选用标准 k-ε 湍流模型计算螺旋搅拌过程中矿浆流体压力梯度力和曳力。



（a）磨机试验台 （b）三维仿真模型 （c）螺旋搅拌器

图 1 塔磨机模型

Fig.1 Tower mill models

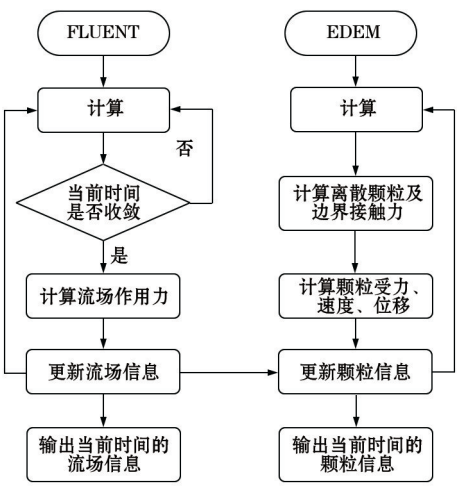


图 2 DEM-CFD 耦合流程[15]

Fig.2 DEM-CFD coupling process[15]

本研究中筒体和研磨介质球均为碳钢材质，密度为 7 850 kg/m^3，泊松比为 0.32，介质球粒径为 10 mm。DEM 接触参数设置为：静摩擦因数为 0.25，滚动摩擦因数为 0.5，钢－钢接触恢复系数为 0.8。CFD 流体接触参数设置为：矿浆密度为 1 923 kg/m^3，黏度为 0.002。上述材料属性参数与文献[15]保持一致，数值模拟总时间为 10 s，时间步长为 0.01 s。

评价塔磨机粉磨性能的核心指标为磨矿强度和能量耗散。磨矿强度可通过介质球速度矢量、受力、碰撞能量及碰撞次数进行表征；能量耗散可通过磨机功率消耗与介质球能量利用率进行描述。本文选取碰撞能、能量利用率及驱动转矩作为评估塔磨机性能的评价指标。

塔磨机的结构和工艺参数是影响粉磨性能的关键指标，本文采用单因素试验法开展塔磨机搅拌粉磨试验，详细试验因素见表 1。

表 1 试验因素

Table 1 Test factors

螺旋升角	侧隙/mm	底隙/mm	矿浆质量浓度/%	介质填充率/%	转速/(r/min)
0.56～0.72	35	60	70	60	75
0.67	35	60	70	60	75
0.67	20～35	60	70	60	75
0.67	35	30～60	70	60	75
0.67	35	60	40～80	60	75
0.67	35	60	70	40～70	75
0.67	35	60	70	50	45～90

1.2 仿真模型验证

为验证所建塔磨机数值仿真模型的准确性，测量塔磨机试验台不同螺旋搅拌转速下的驱动扭矩，并与仿真结果进行对比验证。试验选取搅拌转速为 40～80 r/min，转速步长为 20 r/min，每组试验数据采集时间为 10 s。为减小测量误差，每组试验重复测量 3 次取平均值，计算试验值和仿真值的相对误差，结果见表 2。

表 2 不同转速下螺旋搅拌驱动扭矩

Table 2 Drive torque of spiral stirrer at different speeds

转速/(r/min)	仿真扭矩/(N·m)	试验扭矩/(N·m)	相对误差/%
40	13.9	13.5	2.88
60	14.7	14.1	4.08
80	15.2	15.8	−3.95

当螺旋转速为 60 r/min 时，相对误差最大，为 4.08%。结果表明，本文建立的塔磨机 DEM-CFD 耦合模型能够较为准确地描述螺旋搅拌过程中研磨

介质与矿浆的动态相互作用规律,可为后续空间结构参数与工艺参数对粉磨性能的影响分析提供可靠的理论基础。

1.3 螺旋搅拌粉磨过程分析

本节基于塔磨机 DEM 仿真模型,分析筒体内部介质球动力学特性变化规律。仿真边界条件为:介质填充率为 60%,转速为 75 r/min,矿浆质量浓度为 70%。图 3 为仿真 10 s 时塔磨机内介质球的整体运动速度矢量和介质球运动轨迹分布(颜色标识见电子版)。

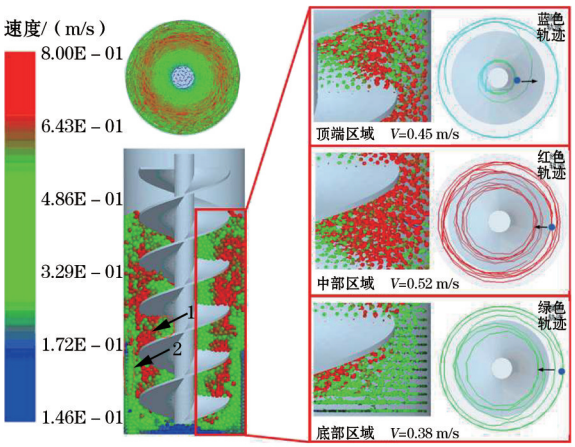


图 3 塔磨机内介质球运动速度矢量及轨迹分布

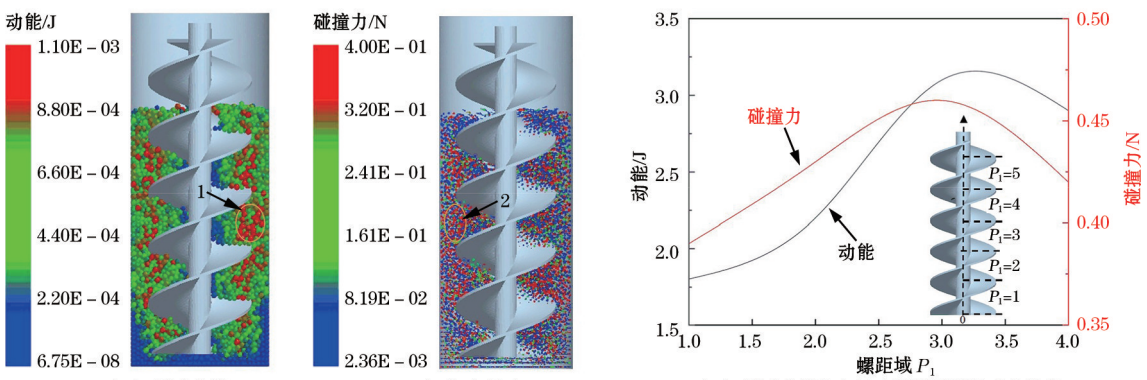
Fig.3 Distribution of velocity vectors and trajectories of medium balls moving inside the tower mill

为深入分析螺旋搅拌过程中介质的动力学特性,提取介质在垂直和水平方向上的运动速度及不同位置介质球的运动轨迹进行分析。由图 3 可知,塔磨机筒体内部介质球的速度矢量存在显著的空间梯度分布。根据空间坐标系,随着 Y 轴尺寸增加,介质球运动速度整体呈先增后减的变化趋势,筒体底部存在明显的“搅拌死区”;随着 X 轴尺寸增加,介质球运动速度也呈现相似的分布规律。其中,螺旋叶片外径区域内的介质运动速度最大,贴近螺旋轴径与筒壁的介质球速度相对较小,尤其以螺旋轴附近最为显著。这一规律可由贴近筒体内壁和螺旋轴径圆周域蓝绿色介质球数量表征,见图 3 中线圈 1 和 2。这是由于在相同转速下,螺旋叶片外径的线速度最大,带动介质球产生更剧烈的碰撞、挤压,磨损程度更剧烈。

上述介质动力学特性研究结果表明,螺旋搅拌器的旋转带动介质球相互挤压、摩擦、碰撞运动。由介质球运动速度矢量变化梯度可知,搅拌器中部为高效粉磨区域,介质间相互作用最为强烈;搅拌器底部为低效粉磨区,介质间相互作用较弱。这是由于介质球堆积时产生向下的垂直压力,使得底部区域介质速度矢量梯度值变化较小;随着介质球堆积高度增加,垂直压力的影响显著下降,介质球之间的相互碰撞、挤压作用更为剧烈。

为进一步揭示塔磨机螺旋搅拌粉磨机理,基于介质球运动轨迹角度分析高效粉磨区内的介质球运动规律。随机选取搅拌器中部 3 处典型位置的介质球,统计其运动轨迹。其中,螺旋轴、螺旋叶片外径及筒体内壁处的介质球运动轨迹分别采用蓝色线、红色线及绿色线表示。由图 3 可知,螺旋轴附近的介质球初期以轴心为中心,以轴径为半径做圆周转动;随着时间推移,介质球在离心力作用下逐渐向筒壁靠近并绕其转动。螺旋叶片外径处的介质球初期运动以叶片外径为半径持续转动,随后向轴心方向运动。筒壁附近的介质球运动规律与螺旋叶片外径周围介质球运动相似,二者的主要差异在于旋转运动速率存在明显梯度,这可由外径周围运动圈数清晰地显示。

此外,在搅拌器转动过程中,介质球之间、介质球与筒壁间存在显著的矢量力和动能差异,结果如图 4 所示(颜色标识见电子版)。



(a) 运动动能 (b) 矢量力 (c) 运动动能与矢量力随螺距域的变化规律

图 4 塔磨机内介质球运动动能和矢量力分布

Fig.4 Distribution of kinetic energy and vector force of medium balls moving inside the tower mill

粉磨过程中,不同螺距域内物料-介质球、介质球-介质球间存在速度梯度,进而产生强烈的冲击行为和剪切行为,尤以搅拌轴中段最为显著。这一规律可由螺旋外径周围红色介质球和矢量力箭头数量表征,见图 4 中线圈 1 和 2。搅拌轴底部(靠近坐标系原点)圆周域内的介质球受上部堆积压力作用,介质球间的矢量速度减小,但介质球间的矢量力相对较大。根据岩石破碎理论,较大的法向力和切向力可提高物料之间的碰撞强度,有利于提升破碎效率[16-17]。但过大的法向力或切向力会加剧介质球和设备的磨损。因此,在实际生产中,需要根据具体情况合理调控研磨介质球的作用力,以实现最佳的工作性能和设备运行状态。

螺旋搅拌器运行过程中,螺旋叶片与介质球存在持续的相互碰撞、挤压、摩擦作用,结构磨损量与工作时间呈正相关。图 5 为粉磨过程中搅拌器结构磨损程度分布情况。

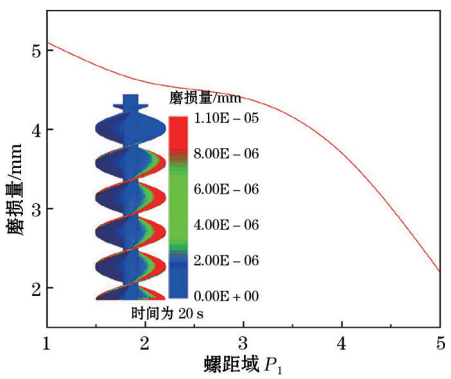


图 5 搅拌器磨损量分布

Fig.5 Distribution of wear amount of agitator

由图 5 可知,沿轴向,搅拌轴端部的表面磨损程度最严重;沿径向,螺旋叶片外径处的表面磨损最为显著。这是由于搅拌轴底部受上部介质堆积压力作用,相同条件下剪切扭矩值更大;同时,相同转速下,螺旋外径处的介质球的线速度最大。介质球运动的线速度或剪切扭矩增大均会加剧介质球与壁面间的相互冲击、碰撞及摩擦作用。上述研究结论与谢朋书等[2]的塔磨机搅拌器实际磨损情况研究相互印证,进一步验证了本文建立的塔磨机 DEM-CFD 耦合模型计算精度的可靠性。因此,通过结构优化设计和工艺参数调节,可在保证粉磨效率的前提下,减缓结构表面磨损变形,延长设备维护周期。

2 空间结构参数对塔磨机粉磨性能的影响

为揭示塔磨机空间结构参数与粉磨性能的定量关系,本节采用单因素分析法,系统研究底隙、侧隙及螺旋升角对介质球碰撞能、驱动扭矩及能量利用率的影响规律。

图 6 为不同空间结构参数下塔磨机粉磨性能的变化曲线。由图 6(a)可知,随着底隙尺寸由 30 mm 增大至 40 mm,搅拌器能量利用率逐渐升高;当底隙尺寸超过 40 mm($C_d/D_o=0.16$)时,能量利用率显著下降;底隙尺寸继续增大至 50 mm($C_d/D_o=0.2$)后,能量利用率趋于稳定。介质球碰撞能和驱动扭矩随着底隙尺寸增大呈单调递减趋势。由曲线变化梯度可知,底隙尺寸对介质球碰撞能的影响程度高于驱动扭矩。由此可知,在满足粉磨性能的前提下,磨机底隙尺寸宜选在 40 mm 附近。

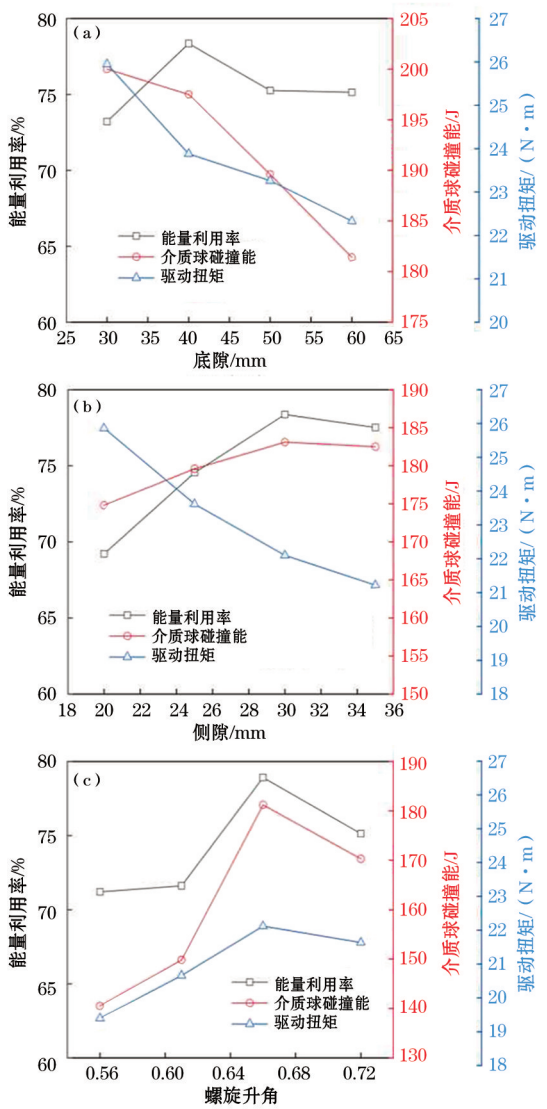


图 6 不同空间结构参数下塔磨机粉磨性能变化曲线

Fig.6 Variation curves of grinding performance under different spatial structure parameters of the tower mill

由图 6(b)可知,随着侧隙尺寸由 20 mm 增大至 30 mm,能量利用率和介质球碰撞能不断升高;当侧隙尺寸超过 30 mm 时,二者均趋于稳定。搅拌器驱动扭矩随侧隙尺寸增大显著下降。由此可知,增大侧隙尺寸可同时提升塔磨机粉磨性能并降低驱动搅拌器所需能耗,这主要是在螺旋搅拌能力范围内,侧隙尺寸增大为研磨介质球相互碰撞提供了充足的运动空间,显著提升了介质粉磨效果。同时,在填充量恒定情况下,侧隙尺寸增大使得筒体内介质堆积高度降低,驱动搅拌器所需扭矩也显著下降,从而降低了能耗。因此,在磨机空间尺寸设计中存在设计最优值,当侧隙尺寸为 30 mm 时,粉磨性能和效果均达到相对平衡要求。

由图 6(c)可知,能量利用率、介质球碰撞能及搅拌器驱动扭矩均随着螺旋升角的增加呈先增大后减小的变化趋势。其中,螺旋升角 $P/d_{。}=0.66$ 为曲线变化的临界点。螺旋升角增大即螺距尺寸变大,使得螺旋容积内填充的介质球和矿浆体积增多。在相同螺旋搅拌剪切力作用下,螺旋叶片带动更多介质球与介质球、介质球与矿浆发生剪切碰撞作用。同时,螺旋搅拌所需能耗也同步增加。当螺旋升角超过 0.66 时,螺旋叶片对介质球和矿浆的剪切能力迅速减弱,介质球和矿浆随螺旋转动的运动速度和作用力减小,导致粉磨性能和效果显著下降。因此,在满足粉磨性能的情况下,需要根据矿物和介质球物理属性选取螺旋升角的最优值。

3 工艺参数对磨机粉磨性能的影响

图 7 为不同工艺参数下塔磨机粉磨性能的变化曲线。由图 7(a)可知,随着螺旋转速增大,搅拌驱动能量利用率呈先增大后减小的变化趋势,当螺旋转速为 73 r/min 时,能量利用率达到峰值,而后随螺旋转速增大显著下降。介质球碰撞能和驱动扭矩与螺旋转速呈正相关,且由曲线变化梯度可知,螺旋转速对介质球碰撞能的影响更为显著。由此可知,在塔磨机搅拌转速设置中存在临界转速,在达到临界值之前,能量利用率、介质球碰撞能及驱动扭矩与螺旋转速呈正相关;超过临界转速后,螺旋转速增幅并未转化为介质球碰撞能,反而加剧了搅拌器的能耗。因此,在满足粉磨性能的前提下,搅拌器转速设置尽可能选在临界值附近。

由图 7(b)可知,能量利用率和介质球碰撞能随介质填充率增加而增大,当介质填充率超过 60%时性能指标趋于平稳;搅拌器驱动扭矩与介质填充率呈正相关。这主要是在螺旋搅拌能力范围内,介质填充率增加使筒体内介质球和矿浆体积增大,根据能量守恒原理,在粉磨能力恒定情况下,用于驱动介质与矿浆相互作用的有效能量增多。尽管介质填充率的增加会增大螺旋搅拌阻力(能量消耗增强),但螺旋粉磨性能提升效果更为显著。在生产过程中,介质填充率的设定存在最优解,即填充率为 60%。上述研究结果与肖正明等[9]关于塔磨机介质填充率最优解的试验结果相吻合。

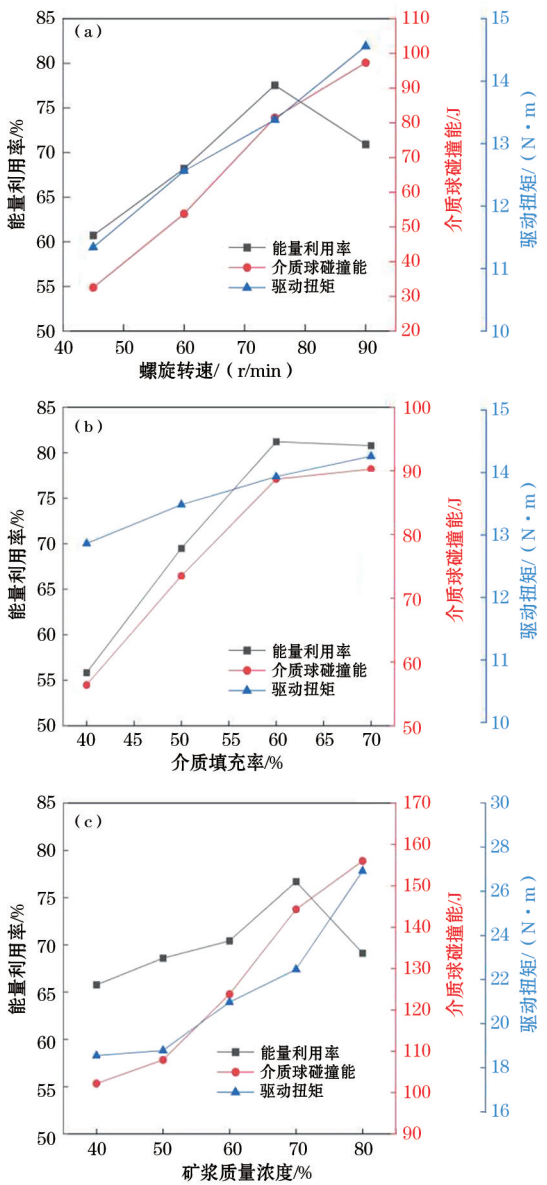


图 7 不同工艺参数下塔磨机粉磨性能变化曲线

Fig.7 Variation curves of grinding performance under different process parameters of the tower mill

由图 7(c)可知,介质球碰撞能和驱动扭矩与矿浆质量浓度呈正相关,能量利用率随着矿浆质量浓

度增大呈先增大后减小的变化趋势。这主要是由于矿浆质量浓度的增加会增强矿浆对研磨介质的包裹能力,在相同搅拌剪切作用下,螺旋叶片带动介质球-矿浆的相互作用力和矢量速度增强。同时,矿浆质量浓度增加使搅拌器克服的驱动阻力增大,即能耗增多。当矿浆质量浓度超过70%时,在相同能量输入情况下,搅拌器用于克服介质和矿浆阻力的无效能耗显著增强。因此,在满足粉磨效果的前提下,需要通过试验确定矿浆质量浓度最优值,以达到粉磨性能与能量利用率的平衡点。

4 影响因素的灵敏度分析

本节采用单因素灵敏度分析法研究各参数对螺旋搅拌粉磨性能的影响程度[18],通过有限差分公式计算输入参数增幅与对应的输出性能指标增幅间的比值(定义为"变幅值"),量化各因素的灵敏度。表3为不同塔磨机空间结构参数和工艺参数下能量利用率、介质球碰撞能及螺旋搅拌驱动扭矩分析结果。

表3 多元变量对研磨性能的敏感性分析结果

Table 3 Sensitivity analysis results of multiple variables on grinding performance

参数	变幅值		
	能量利用率/%	碰撞能/J	驱动扭矩/(N·m)
螺旋转速	−0.44～0.62	1.06～1.84	0.05～0.08
介质填充率	−0.04～1.37	0.16～1.71	0.03～0.06
矿浆质量浓度	−0.76～0.63	0.57～2.05	0.02～0.45
底隙	−0.31～0.51	−0.82～−0.25	−0.21～−0.06
侧隙	−0.17～1.07	−1.88～−0.46	−0.45～−0.18
螺旋升角	−1.73～3.32	−4.95～14.27	−0.23～0.68

由表3可知,当螺旋转速从45 r/min增至90 r/min时,能量利用率的变幅值梯度为1.06%,介质球碰撞能的变幅值梯度为0.78 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.03 N·m;当介质填充率从40%增至70%时,能量利用率的变幅值梯度为1.41%,介质球碰撞能的变幅值梯度为1.55 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.03 N·m;当矿浆质量浓度从40%增至80%时,能量利用率的变幅值梯度为1.39%,介质球碰撞能的变幅值梯度为1.48 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.43 N·m;当底隙从30 mm增至60 mm时,能量利用率的变幅值梯度为0.82%,介质球碰撞能的变幅值梯度为0.57 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.15 N·m;当侧隙从20 mm增至35 mm时,能量利用率的变幅值梯度为1.24%,介质球碰撞能的变幅值梯度为1.42 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.27 N·m;当螺旋升角从0.56增至0.72时,能量利用率的变幅值梯度为5.05%,介质球碰撞能的变幅值梯度为19.22 J,驱动扭矩的变幅值梯度为0.91 N·m。

根据各性能指标的增幅大小,对影响因素的灵敏度进行排序。对于能量利用率而言,各因素影响程度由强到弱依次为:螺旋升角、介质填充率、矿浆质量浓度、侧隙、螺旋转速及底隙。从空间结构参数角度分析,螺旋升角变化对能量利用率的影响远高于侧隙和底隙;从工艺参数角度分析,介质填充率和矿浆质量浓度对能量利用率的影响高于螺旋转速。

对于介质球碰撞能而言,各因素影响程度由强到弱依次为:螺旋升角、介质填充率、矿浆质量浓度、侧隙、螺旋转速及底隙。从空间结构参数角度分析,螺旋升角变化对碰撞能的影响远高于侧隙和底隙;从工艺参数角度分析,介质填充率和矿浆质量浓度对于碰撞能的影响高于螺旋转速。

对于螺旋搅拌驱动扭矩而言,各因素影响程度由强到弱依次为:螺旋升角、矿浆质量浓度、侧隙、底隙、螺旋转速及介质填充率。从空间结构参数角度分析,螺旋升角尺寸对驱动扭矩的影响高于侧隙和底隙;从工艺参数角度分析,矿浆质量浓度对于驱动扭矩的影响高于螺旋转速和介质填充率。

总体而言,塔磨机空间结构参数对能量利用率、碰撞能及驱动扭矩的影响程度更强。在塔磨机结构设计阶段,适当增大搅拌器螺旋升角等参数,可提升矿物与介质相互作用强度,进而提升设备粉磨性能。但螺旋搅拌器结构参数变化会导致驱动能耗出现显著变化。因此,以塔磨机粉磨性能和能耗为优化目标,设备结构参数在设计中存在最优设计解集。上述研究结论可用于建立多元空间结构参数与塔磨机粉磨性能映射关系模型。

5 结论

本文基于DEM-CFD耦合理论建立塔磨机数值仿真模型,动态揭示了塔磨机螺旋粉磨机理,并通过试验验证了模型的可靠性。采用单因素分析法,从空间结构设计和工艺参数设定两方面,系统研究了各因素对塔磨机粉磨性能的影响,得出以下主要结论。

(1) 工艺参数对粉磨性能的影响呈现显著的非线性特征。能量利用率随转速增大呈先增大后减小的趋势,临界值为73 r/min;介质球碰撞能和驱动扭矩则与转速呈正相关。转速从45 r/min增加至

90 r/min 时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为 1.06%、0.78 J、0.03 N·m。能量利用率和碰撞能随介质填充率的增大先升高后趋于平稳,临界值为 60%;介质填充率从 40%增至 70%时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为 1.41%、1.55 J、0.03 N·m。矿浆质量浓度的最优值为 70%,低于该值时能量利用率随矿浆质量浓度的增大而提升,超过后无效能耗显著增加;矿浆质量浓度从 40%增至 80%时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为 1.39%、1.48 J、0.43 N·m。

(2) 塔磨机空间结构参数对粉磨性能的影响具有明显的区间特性。能量利用率随底隙尺寸增大先增大后减小再趋于稳定,介质球碰撞能和驱动扭矩则呈单调递减趋势。底隙尺寸从 30 mm 增加至 60 mm 时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为0.82%、0.57 J、0.15 N·m。能量利用率和碰撞能随侧隙尺寸增大而显著提升后趋于平稳,驱动扭矩则呈单调递减趋势。侧隙从 20 mm 增加至 35 mm 时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为1.24%、1.42 J、0.27 N·m。能量利用率、碰撞能和驱动扭矩均螺旋随升角的增大先增大后减小。螺旋升角从 0.56 增加至 0.72 时,能量利用率、碰撞能、驱动扭矩变幅值梯度分别为 5.05%、19.22 J、0.91 N·m。

(3) 计算多因素影响塔磨机碰撞能、扭矩及能量利用率的灵敏度,得到主要影响因素的排序。对于能量利用率和介质球碰撞能而言,各因素影响程度由强到弱依次为:螺旋升角、介质填充率、矿浆质量浓度、侧隙、螺旋转速及底隙。对于搅拌器驱动扭矩而言,各因素影响程度由强到弱依次为:螺旋升角、矿浆质量浓度、侧隙、底隙、螺旋转速及介质填充率。总体而言,空间结构参数对磨机能量利用率、碰撞能及驱动扭矩的影响程度强于工艺参数,其中螺旋升角是影响塔磨机粉磨性能的最关键参数,可作为塔磨机性能预报模型的核心输入变量。

参考文献(References):

[1] 姚宗伟,高旭东,刘刚.基于数值仿真的大型塔式磨机工作特性分析[J].吉林大学学报:工学版,2021,51(5):1642-1650.
Yao Zongwei, Gao Xudong, Liu Gang. Research on working performance of vertical screw stirring mill based on numerical simulations [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (5): 1642-1650.

[2] 谢朋书,崔达,王国强,等.基于离散元方法的立式螺旋搅拌磨机工作性能[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(9):2423-2431.
Xie Pengshu, Cui Da, Wang Guoqiang, et al. Working performance of vertical screw stirring mill based on discrete element method[J]. Journalof Jilin University (Engineering and Technology Edition),2024,54(9):2423-2431.

[3] 谢朋书.立式螺旋搅拌磨机粉磨机理及性能优化研究[D].长春:吉林大学,2023.
Xie Pengshu. Research on grinding mechanism and performance optimization of vertical spiral stirred mills[D]. Changchun:Jilin University,2023.

[4] 邹德芳,刘子涵,曲迪,等.基于离散元法的塔磨机筒体高径比研究[J].有色金属(选矿部分),2024(7):119-125.
Zou Defang, Liu Zihan, Qu Di, et al. Study on ratio of height to diameter of tower mill based on discrete element method [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(7):119-125.

[5] De Oliveira Alessandro L R, De Carvalho Rodrigo M, Tavares Luis Marcelo. Predicting the effect of operating and design variables in grinding in a vertical stirred mill using a mechanistic mill model[J]. Powder Technology, 2021, 387: 560-574.

[6] 刘伟,刘俊,程波,等.基于流固耦合的搅拌磨磨矿离散元仿真及试验研究[J].金属矿山,2023(10):189-195.
Liu Wei, Liu Jun, Cheng Bo, et al. Discrete element simulation and experimental study of grinding of stirring mill based on fluid-structure interaction [J]. Metal Mine, 2023(10):189-195.

[7] 何建成,卢世杰,周宏喜,等.基于离散单元法立式螺旋搅拌磨机内介质运动学研究进展[J].有色金属(选矿部分),2018(1):90-93.
He Jiancheng, Lu Shijie, Zhou Hongxi, et al. Research progress of media kinematics in vertical stirred mill based on DEM[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1):90-93.

[8] 任廷志,李卓,刘长远,等.基于离散元法的塔磨机数值模拟分析[J].中国粉体技术,2016,22(4):88-91.
Ren Tingzhi, Li Zhuo, Liu Changyuan, et al. Simulation of tower mill analysis based on discrete element method[J]. China Powder Science and Technology,2016,22(4):88-91.

[9] 肖正明,王鑫,伍星,等.塔磨机运行参数优化匹配的仿真分析与试验研究[J].中国机械工程,2016,27(4):483-487.
Xiao Zhengming, Wang Xin, Wu Xing, et al. Simulation analyses and experimental investigation on optimum matching of operating parameters of tower mill[J]. China Mechanical Engineering,2016,27(4):483-487.

[10] Sun Xiaoxia, Zhao Yang, Meng Wenjun, et al. Research on average vertical velocity of rubber particles in vertical screw conveyor based on bp neural network [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2021,35:5107-5116.

[11] 李洋波,何建成,王芏卜,等.立式螺旋搅拌磨机磨矿介质动力学研究[J].中国矿业,2024,33(9):212-220.
Li Yangbo, He Jiancheng, Wang Dubo, et al. Research on the dynamics of grinding medium in vertical spiral mixing mill[J].China Mining Magazine,2024,33(9):212-220.

[12] Liu Zhengbin, Wang Shuai, Zhang Haoyan, et al. Performance analysis of vertical stirred mill based on multi-coupling method[J].Advanced Powder Technology,2024,35(9):104603.

[13] 唐勇,吴伟,樊帆,等.基于CFD-DEM耦合算法的后混合磨料水射流数值模拟[J].矿业研究与开发,2023,43(6):163-168.
Tang Yong, Wu Wei, Fan Fan, et al. Numerical simulation of post-mixed abrasive water jet based on CFD-DEM coupling algorithm[J].Mining Research and Development,2023,43(6):163-168.

[14] 王朝华,赵炎龙,瞿铁,等.基于离散元的立式螺旋搅拌磨机介质球运动轨迹研究[J].金属矿山,2025(5):265-271.
Wang Zhaohua, Zhao Yanlong, Zhai Tie, et al. Research on the motion trajectories of grinding media in vertical spiral stirring mill based on discrete element method[J]. Metal Mine,2025(5):265-271.

[15] 邹德芳,贺子涵,于文达,等.基于DEM-CFD耦合的立式螺旋搅拌磨粉磨性能研究[J].矿业研究与开发,2025,45(6):229-236.
Zou Defang, He Zihan, Yu Wenda, et al. Research on grinding performance of vertical spiral stirred mill based on DEM-CFD coupling[J]. Mining Research and Development,2025,45(6):229-236.

[16] Rhymer D, Ingram A, Sadler K, et al. A discrete element method investigation within vertical stirred milling:changing the grinding media restitution and sliding friction coefficients [J].Powder Technology,2022,410:117825.

[17] De Carvalho Rodrigo M, Oliveira Alessandro L R, Petit Horacio A, et al. Comparing modeling approaches in simulating a continuous pilot-scale wet vertical stirred mill using PBM-DEM-CFD[J]. Advanced Powder Technology,2023,34(9):104135.

[18] 徐平,韩述琦.富水砂层联络通道冻结温度场影响因素分析[J].地下空间与工程学报,2025,21(1):61-69.
Xu Ping, Han Shuqi. Analysis of influence factors of connecting channel temperature field in sand layer with rich water[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2025,21(1):61-69.