基于DEM-CFD的立式搅拌磨机研磨球碰撞特性研究*

宋现洲[1,2],韩春阳[1,2],王铭浩[1,2],纪昊男[3],王朝华[3]

(1.中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳市 471039;
2.洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 河南 洛阳市 471039;
3.太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:为探究立式搅拌磨机筒体内部运行过程中研磨球的碰撞特性,以试验级立式搅拌磨机为研究对象,基于离散元方法(Discrete Element Method, DEM)与计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD),以研磨球、矿浆、搅拌器为研究对象,建立了离散元流固耦合(DEM-CFD)仿真模型。从碰撞次数、法向和切向碰撞能、法向和切向碰撞力5个方面系统研究了研磨球的碰撞特性及其沿轴向方向的变化规律。结果表明:研磨球间的碰撞次数占总碰撞次数的90.5%,远高于研磨球与筒体间的碰撞次数;研磨球间的切向碰撞能约为法向碰撞能的1.4倍,法向碰撞力约为切向碰撞力的6.2倍,说明研磨球在切向方向的研磨作用更显著;位于筒体底部至3/8筒体高度处的研磨球存在高碰撞次数、高碰撞能、低碰撞力的碰撞特性,能够有效细化物料;其他区域的研磨作用相对较小,适合快速物料分级并使符合粒度条件的物料溢流出筒体。研究成果可为优化磨机结构、提高磨矿效率提供理论指导。

关键词:立式搅拌磨机;DEM-CFD;研磨球;碰撞特性

中图分类号:TD453 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0204-10

Research on the Collision Characteristics of Grinding Balls in a Vertical Stirred Mill Based on DEM-CFD

SONG Xianzhou[1,2], *HAN Chunyang*[1,2], *WANG Minghao*[1,2], *JI Haonan*[3], *WANG Zhaohua*[3]

(1.CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang, Henan 471039, China;
2.Luoyang Mining Machinery Engineering Design Institute Co., Ltd., Luoyang, Henan 471039, China;
3.College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: To investigate the collision characteristics of grinding balls inside the cylinder of a vertical stirred mill during operation, a laboratory-scale vertical stirred mill was used as the research subject. Based on the Discrete Element Method (DEM) and Computational Fluid Dynamics (CFD), a DEM-CFD simulation model was developed, taking grinding balls, slurry, and the agitator as the objects. The collision characteristics of grinding balls and their variation along the axial direction were systematically investigated based on five aspects, including the number of collisions, normal and tangential collision energies, and normal and tangential collision forces. The results show that collisions among grinding balls account for 90.5% of the total number of collisions, which is significantly higher than the number of collisions between grinding balls and the grinding cylinder. The tangential collision energy among grinding balls is approximately 1.4 times that of the normal collision energy, while the normal collision force is approximately 6.2 times that of the tangential collision force, indicating that the grinding effect of the grinding balls is more pronounced in the tangential direction. Grinding balls located between the bottom and the 3/8 mark of the cylinder exhibit collision characteristics marked by high collision frequency, high collision energy, and low collision force, which effectively refine the materials. The grinding effect in other areas is relatively small, suitable for rapid materials grading and allowing materials that meet the particle size conditions to overflow from the cylinder. This research achievement provides theoretical guidance for optimizing mill design and improving grinding efficiency.

Key words: Vertical stirred mill, DEM-CFD, Grinding ball, Collision characteristics

---

* **收稿日期**:2025-05-19
基金项目:河南省重大科技专项项目(241100220300);中信重工机械股份有限公司2025年度科研开发项目(25A-J-19QZ)
作者简介:宋现洲(1981—),男,河南浚县人,硕士,高级工程师,主要从事矿山粉磨装备研发。E-mail:songxz@citic-hic.com.cn
通信作者:王朝华(1993—),男,山西运城人,博士,副教授,主要从事矿山装备设计与优化。E-mail:wangzhaohua@tyust.edu.cn

0　引言

磨机作为矿物加工领域的主要设备，为解决矿产资源当中存在的“贫、细、杂”等问题提供了有效解决方案[1-3]，其中，立式搅拌磨机作为一种节能型超细粉磨设备，生产能耗比球磨机小 30%左右[4]，同时具有能量密度高、占用空间小、粉磨效率高、产品粒度分布均匀等优点，在选矿厂得到广泛的应用[5-8]。

立式搅拌磨机工作过程中，电机及传动装置驱动搅拌器旋转，进而引导筒体内的研磨球和矿浆做循环往复运动[9]。在运动过程中，研磨球、搅拌器和筒壁衬板相互作用，完成矿浆中颗粒的细化，同时，不断发生各种介质之间的碰撞。立式搅拌磨机通过上述途径实现了高效磨矿，因此，研究磨机内各介质间的碰撞特性具有重要意义。代献仁等[10]基于离散元方法(Discrete Element Method，DEM)模拟了球磨机的研磨球配比试验，对比分析了研磨球与研磨球、研磨球与矿石之间的碰撞能量变化，为现场应用提供了理论依据；桑艳伟等[11]基于 DEM 研究了研磨球的受力、运动参数、能量分布，为立式搅拌磨机优化提供了具体方向；刘俊等[12]以立式搅拌试验磨机为研究对象，对比了在不同材料研磨球之间的碰撞次数、碰撞力等差异；李国峰等[13]以试验级立式搅拌磨机为对象，采用离散元方法研究了不同工艺参数下磨机内的研磨球碰撞次数、碰撞力、碰撞能的变化规律，对选取磨矿工艺参数有一定指导意义。由此可见，立式搅拌磨机运行过程中研磨球的碰撞参数受到学者们的广泛关注。

根据立式搅拌磨机工作原理，筒体内部填充的研磨球、矿浆等在竖直方向上产生复杂循环的过程，过程中矿石颗粒的高度及所受影响成为研究热点之一。第旺平等[14]在球磨机磨矿方案对比的研究中提到了球磨机中不同运动区域的划分，并将惰性研磨区的面积作为评价方案的指标之一；GRETA 等[15]进一步融合了计算流体力学(Computational Fluid Dynamics，CFD)，建立离散元流固耦合(DEM-CFD)模型，模拟卧式搅拌磨机运动，基于研磨球速度剖面将磨机内部划分成 4 个类型的区域，对比了研磨球的碰撞次数等参数在各区域的差异；孙小旭等[16]基于 DEM 研究了研磨球在立式搅拌磨机中不同区域的运动规律，对比了各区域研磨球的速度、受力等差异，为选择性细磨研究提供了具体方向；LIU 等[17]基于多重耦合方法分析了立式搅拌磨机性能，研究了研磨球在磨机内水平、垂直方向速度和受力的变化情况。综上可知，针对卧式球磨机区域化差异研究已经相对成熟，但立式搅拌磨机区域化分析以及磨机内碰撞特性仍缺乏系统性研究。

基于此，本文以试验级立式搅拌磨机为研究对象，建立 DEM-CFD 耦合模型，从研磨球与磨机本体结构、研磨球间的碰撞次数、碰撞能、碰撞力等方面系统研究研磨球的碰撞特性，分析其沿轴向方向的变化规律，以期为解析立式搅拌磨机内部碰撞特性和研磨区域性质提供理论依据。

1　立式搅拌磨机结构及工作原理

立式搅拌磨机结构如图 1(a)所示，主要由电机、减速器、螺旋搅拌器、筒体、耐磨衬板等组成。工作原理如图 1(b)所示，矿浆经进料口流入装有一定质量研磨球的磨机筒体内，通过电机与减速器驱动螺旋搅拌器旋转，并带动矿浆和研磨球做上下循环、圆周等复杂运动，矿石颗粒在研磨球的相互碰撞、挤压下逐渐被细化。矿浆在螺旋搅拌器推动下从磨机底部向上流动，较粗颗粒因重力下沉继续参与研磨过程，较细颗粒受浮力向上流动并从出料口溢出，实现完整的磨矿过程。

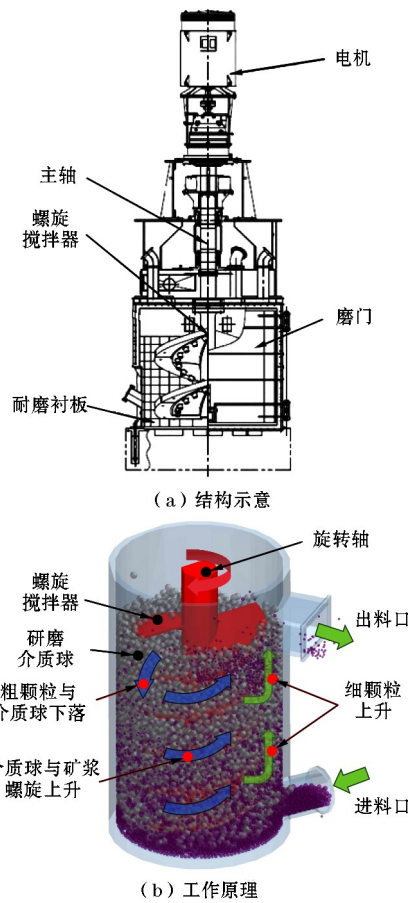


图 1　立式搅拌磨机结构及工作原理示意

Fig.1　Structure and working principle of vertical stirred mill

本文以试验级立式搅拌磨机为研究对象,试验样机如图 2 所示,由电机、螺旋搅拌器、筒体、底座、扭矩传感器、研磨球等组成,扭矩传感器可以监测搅拌器的实时扭矩。研究过程中选用龙蟒铁矿作为矿浆的干基,将 11.2 kg 的干基和 6.72 kg 的水混合得到质量浓度为 62.5%的矿浆,矿浆密度为 1 957.4 kg/m^3,研磨球选用 8 mm 直径的钢球。筒体材质为 316 不锈钢,搅拌器材质为 Q355B,其转速为 173～350 r/min,筒体内的有效容积为 36 L,电机功率为 2.2 kW。

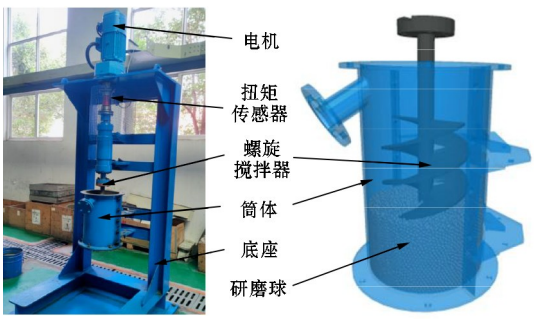


图 2 试验样机

Fig.2 Experimental prototype

2 建立 DEM-CFD 耦合模型

2.1 建立简化模型

为确保仿真环境与试验方案一致,尽可能减小仿真偏差,在不改变模型尺寸的基础上,忽略试验样机上的电机、传感器等对设备运行过程无影响的部件,建立筒体、螺旋搅拌器的三维简化模型,如图 3 所示。其中,筒体和螺旋搅拌器的尺寸参数见表 1,筒体尺寸为 300 mm×500 mm(外径×高度),螺旋搅拌器的螺距为 175 mm,搅拌器尺寸为 220 mm×400 mm(最大外径×高度)。

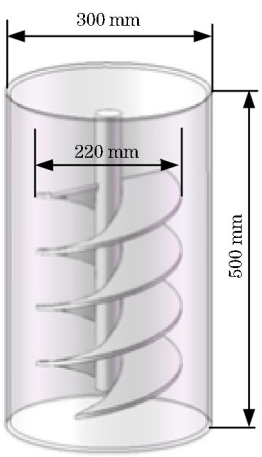


图 3 试验样机三维简化模型

Fig.3 Simplified 3D model of experimental prototype

表 1 三维简化模型尺寸参数

Table 1 3D simplified model size parameters

筒体		搅拌器		
外径/mm	高度/mm	外径/mm	高度/mm	螺距/mm
300	500	220	400	175

2.2 建立 DEM-CFD 模型

根据研磨球的尺寸及材料属性,定义离散颗粒密度为 7 850 kg/m^3,直径为 8 mm,泊松比和剪切模量分别为 0.32 和 79 GPa,研磨球、磨机筒体及螺旋搅拌器的接触参数[18]见表 2。然后,设置合适的研磨球颗粒模型。按照试验填充的研磨球质量为 49 kg,则磨机实际填充研磨球总数为 23 300 个,设置单位时间内生成 12 000 个具有一定初始降落速度的研磨球,在 2 s 内生成完毕。当全部研磨球堆积于筒体底部并趋于静止后,设置搅拌器转速为 175 r/min,得到离散元模型,如图 4 所示。经测量,筒体内研磨球堆积高度为 165 mm 时,与试验样机内部的研磨球填充高度相同。

表 2 离散元模型接触参数

Table 2 Discrete Element Model contact parameters

恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
0.7	0.2	0.01

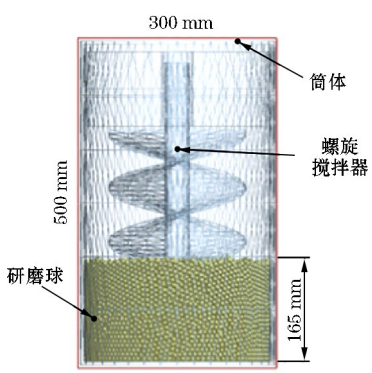


图 4 筒体内研磨球离散元模型

Fig.4 Discrete Element Model of grinding ball inside the cylinder

在搅拌器旋转运动过程中,远离筒壁的流体运动属于湍流,而靠近筒壁的流体进行被动运动,相对速度较低,视为层流。为准确模拟筒体内部流场的运动规律,利用交接面将流体域划分为旋转域和静止域。根据筒体和螺旋搅拌器尺寸,在二者之间建立尺寸为 250 mm×475 mm(直径×高度)的圆柱面,将其作为筒体内部湍流和层流互相作用的交接面。通过布尔运算将流体域进行划分,筒体内壁面

与圆柱面之间的流体域定义为静止域，其运动模式为层流；圆柱面包裹的流体域定义为旋转域，运动模式为湍流。其中，设定流体域旋转速度为 175 r/min，为主动运动区域，静止域不添加旋转速度，为被动运动区域。然后，对流体域进行网格划分，设定单元尺寸为 12 mm，其数值为研磨球半径的 3 倍，设置试验矿浆流体密度为 1 957.4 kg/m^3，得到最终的流体域模型如图 5 所示。

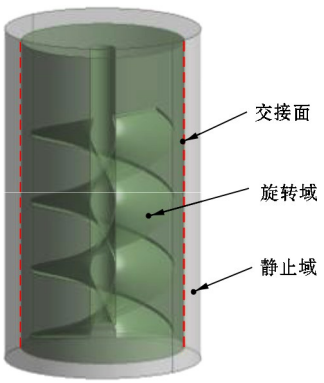


图 5　筒体内矿浆流体域模型

Fig.5　Fluid domain model of slurry inside the cylinder

由于本文研究的流固耦合模型是更为复杂的多相流模型，故采用双向耦合的 Eulerian 模型进行耦合分析[19]，设置流体域为主相，离散的研磨球为次相，选择标准 k-ε 模型作为湍流模型。然后，设定耦合仿真总时长为 6 s，在 DEM 和 CFD 中的双向耦合仿真过程中，为保证仿真总时长一致，设定 CFD 的仿真时间步长为 DEM 的 100 倍，进行耦合仿真，直至迭代计算收敛并完成计算。

2.3　仿真模型验证

为验证耦合仿真模型的准确性，分别提取试验与仿真结果中螺旋搅拌器的扭矩值，对比均值差异。以搅拌器转速作为变量，设置 5 组试验转速为 175 r/min、215 r/min、260 r/min、300 r/min、350 r/min，进行仿真和试验，其他参数保持一致，每组分别运行 30 min。通过扭矩传感器获取搅拌器扭矩变化情况，如图 6 所示，经计算得到稳定运行阶段各转速下搅拌器扭矩均值为 16.22 N·m、18.60 N·m、21.35 N·m、23.37 N·m、26.12 N·m。然后，在仿真模型中设置相同转速进行耦合计算，得到不同转速下仿真与试验扭矩均值，见表 3。由表 3 可知，耦合仿真与试验均值之间存在偏差，这是由于相比试验的工作环境，仿真的模拟环境是一种更理想化的均匀分布矿浆流体，且仿真过程中磨机内部无能量耗散，致使仿真分析的扭矩数值略低，但受此因素导致的仿真结果与试验的偏差均值在允许的范围内。因此，建立的仿真模型能够准确模拟试验级立式搅拌磨机的运行过程，下文将以 175 r/min 的磨机转速进一步研究碰撞特性。

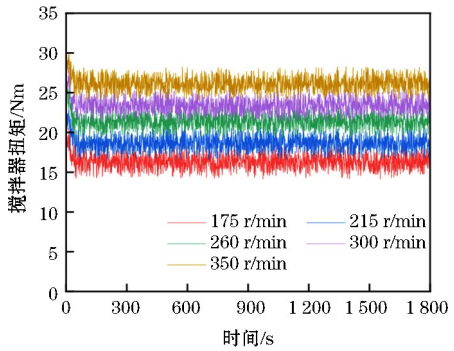


图 6　试验扭矩

Fig.6　Experimental torque

表 3　不同转速下仿真与试验扭矩均值对比

Table 3　Comparison of simulated and experimental torque mean values at different speeds

转速/(r/min)	试验扭矩/(N·m)	仿真扭矩/(N·m)	偏差/%
175	16.22	15.34	5.43
215	18.60	17.33	6.83
260	21.35	20.19	5.43
300	23.37	21.35	8.64
350	26.12	23.43	10.30

3　立式搅拌磨机碰撞特性分析

3.1　碰撞参数分析

依据立式搅拌磨机工作原理，矿石颗粒受研磨球和筒体间碰撞挤压研磨作用后，粒径不断减小。在工作过程中，筒体内部会持续产生碰撞行为，其可通过碰撞次数、碰撞过程中产生的碰撞能量和碰撞力等物理量描述。在本研究中，将碰撞能和碰撞力两个指标按照法向和切向进行划分，选择法向碰撞能、切向碰撞能、法向碰撞力、切向碰撞力和碰撞次数 5 个参数来研究立式搅拌磨机的碰撞特性，如图 7 所示。

筒体内不同区域对矿石物料的处理作用存在差异，这一差异主要受重力、浮力等因素影响。随着轴向高度增加，碰撞参数发生变化，因此，需沿轴向对磨机筒体内部进行划分。通过划分区域，可研究各区域研磨球对矿石颗粒的作用效果及差异，从而掌握筒体内部研磨球碰撞特性随搅拌轴高度的变化规律。

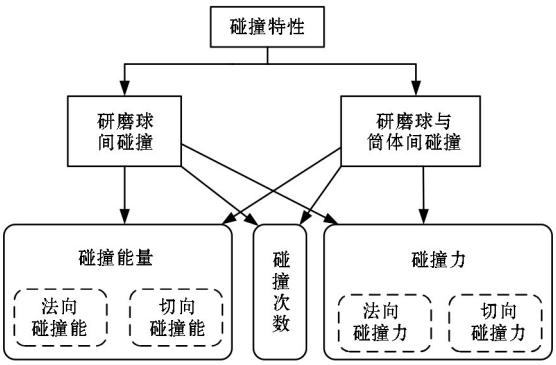


图 7 碰撞特性参数

Fig.7 Collision characteristic parameters

磨机内部区域划分如图 8 所示,依据筒体尺寸,以底面为基准,设轴向高度增加方向为正方向,考虑到搅拌器底端距离筒体底部 30 mm,每隔 30 mm 设置一个分区,共划分 16 个子区域。由图 8 可知,分区 01 的上表面刚好与螺旋搅拌器叶片底端接触,分区 02～13 的空间域均具备螺旋搅拌器叶片的牵引作用,而分区14～16 空间域只含有搅拌器主轴。

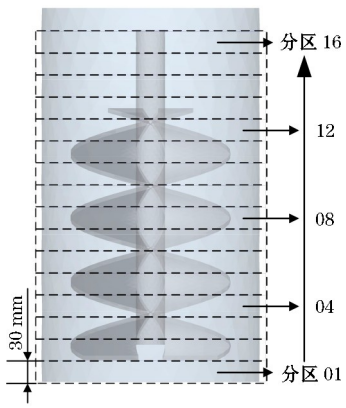


图 8 磨机内部区域划分

Fig.8 Internal area division of the mill

3.2 碰撞次数分析

分析碰撞次数可掌握筒体内部不同介质之间相互作用的频率,进而确定研磨作用的主要介质对象。本文对研磨球间碰撞次数、研磨球与筒体间碰撞次数以及磨机内总碰撞次数进行研究,各碰撞次数随工作时间的变化情况如图 9 所示。

由图 9 可知,研磨球间的碰撞次数远大于其与筒体间的碰撞次数,且磨机内的总碰撞次数变化趋势与研磨球间碰撞次数相似。其中,在磨机运行前 1 s 内,研磨球间的碰撞次数波动变化最大,这是由于搅拌器促使筒体底部堆积研磨球改变了运动状态。经计算可知,总碰撞次数均值约为 611 307 次,其中,研磨球间碰撞次数均值约为 553 455 次,占总碰撞次数的 90.5%,而研磨球与筒体间碰撞次数均值约为 57 852 次,仅占总碰撞次数的 9.5%。因此,研磨球间的碰撞对磨矿起主导作用。下文将以研磨球间的碰撞参数为主要研究对象,对磨机内的碰撞特性及各分区的磨矿作用进行分析。

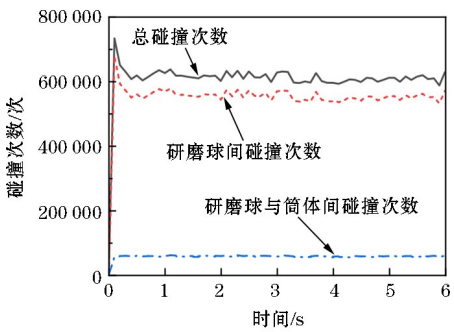
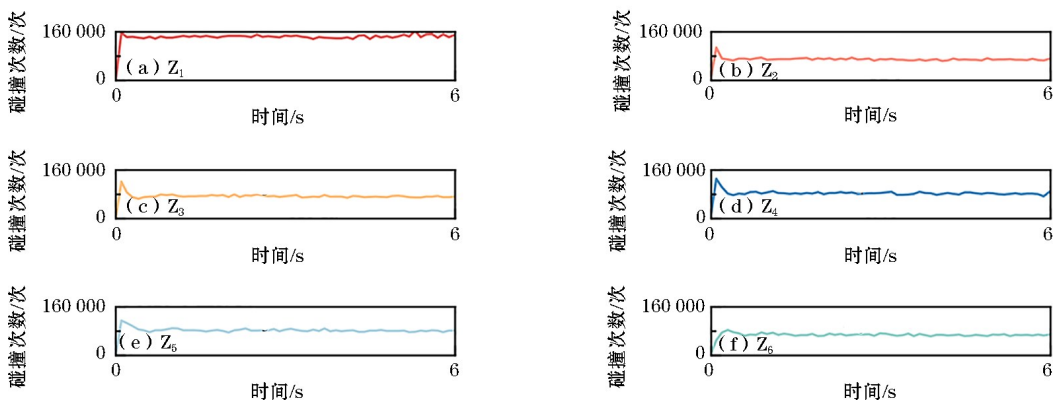


图 9 总碰撞次数随工作时间的变化规律

Fig.9 Variation regulation of the total number of collisions with work time

首先,对筒体内各子分区产生的碰撞次数进行分析。图 10 展示了各子分区碰撞次数随时间的变化规律,图中 Z_1～Z_{16}依次代表分区 01～16,并将运行时段内各分区的碰撞次数取均值,结果见表 4。



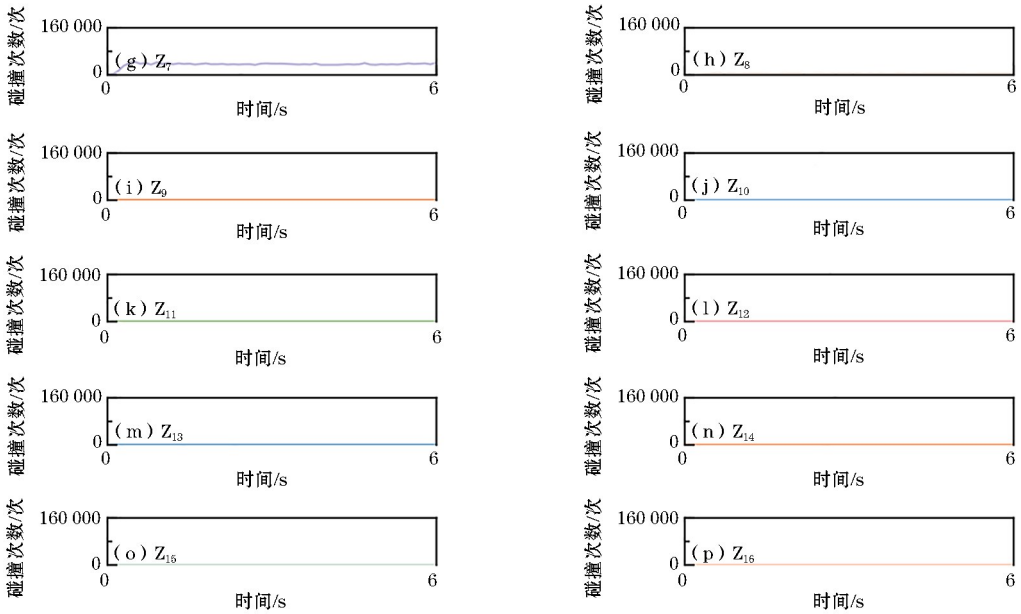


图 10　各分区碰撞次数随时间的变化规律

Fig.10　Variation regulation of the number of collision with time in each zone

表 4　各分区碰撞次数均值结果

Table 4　Mean number of collisions results of each zone

分区	平均碰撞次数/次	分区	平均碰撞次数/次
01	143 502	09	9
02	68 961	10	0
03	72 822	11	0
04	82 696	12	0
05	81 026	13	0
06	66 384	14	0
07	34 772	15	0
08	3 284	16	0

对比各分区中研磨球间的碰撞次数，可以看出，分区 01 的碰撞次数远超其他分区，碰撞次数达到了 143 502 次；分区 02～06 具有相近的碰撞次数，约为 66 000～82 000 次，且变化趋势基本相同，这与研磨球的初始堆积高度相关；而从分区 07 开始，碰撞次数开始随着分区高度的上升迅速下降；自分区 10 起，研磨球间的碰撞次数均为 0。

综上可知，研磨球在分区 01～07 中单位时间内的碰撞次数相对较多，对物料的研磨频率较大，而分区 08～16 中研磨球的碰撞次数很少，故认为对于当前的磨机内部，底部的 01～07 分区磨矿效果较好，其他分区更适合进行矿料分级溢流作业。

3.3　碰撞能分析

研磨球间的碰撞会出现能量交换，在此交换过程中夹杂在研磨球间的矿石颗粒会吸收传递的能量，即促使颗粒发生粉碎细化所需的碰撞能。图 11 为研磨球间法向、切向碰撞能随时间的变化规律。由图 11 可知，在运行时间内，切向碰撞能始终大于法向碰撞能，且二者的变化规律基本相同。经计算得，研磨球之间切向碰撞产生的能量均值为 0.817 J，而法向碰撞产生的能量均值为 0.574 J，切向碰撞能约为法向碰撞能的 1.4 倍，说明磨机内研磨球对矿石颗粒在切向方向的剪切摩擦作用更加显著，而法向方向的冲击挤压作用相对较弱。

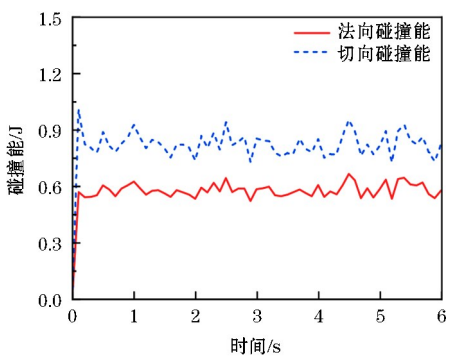
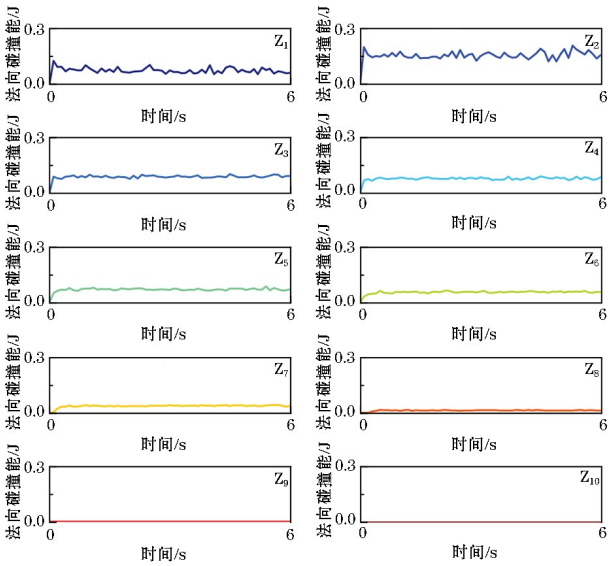


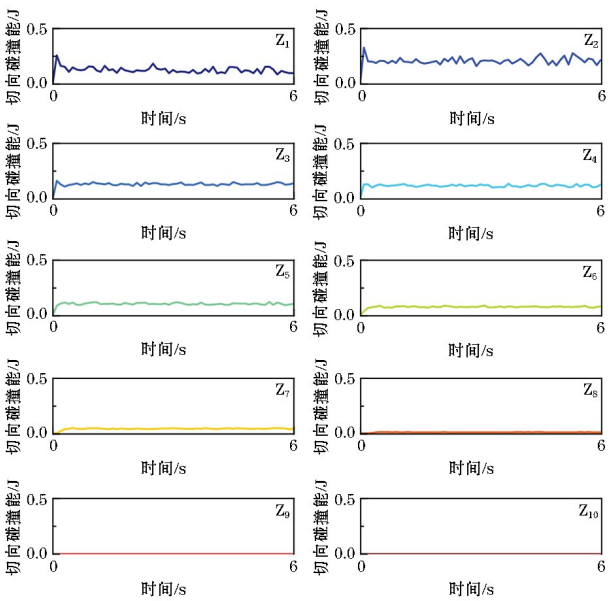
图 11　碰撞能随时间的变化规律

Fig.11　Variation regulation of collision energy with time

分区 10～16 的研磨球间碰撞次数均为 0，表明这些区域无碰撞产生，下文主要对分区 01～10 的 10 个子分区进行分析，其变化规律如图 12 所示，结合各分区碰撞次数的变化规律，得到了不同分区内研磨球对矿石颗粒的作用效果。



(a) 各分区法向碰撞能随时间变化规律



(b) 各分区切向碰撞能随时间变化规律

图 12 各分区碰撞能随时间的变化规律

Fig.12 Variation regulation of collision energy with time of each zone

各子分区的研磨球间碰撞能的均值计算结果见表 5,其变化规律如图 13 所示。可知研磨球的法向碰撞能和切向碰撞能在不同子分区的变化趋势基本相同,其中,分区 02 的碰撞能最大,分区 01 的碰撞能次于分区 02,与分区 03 相近;分区 03～06 的碰撞能曲线趋势相近,说明对矿石物料的研磨作用效果相近;分区 07～09 的碰撞能均低于 16 个子分区的碰撞能均值,分区 07 的变化曲线可以作为过渡线;分区 10～16 的碰撞能均为 0,说明该区域研磨球对矿石颗粒作用可以忽略。

表 5 各分区碰撞能均值结果

Table 5 Mean collision energy results of each zone

分区	法向碰撞能/J	切向碰撞能/J
01	0.072 7	0.123 5
02	0.153 3	0.206 1
03	0.088 4	0.132 2
04	0.079 1	0.118 2
05	0.071 6	0.105 0
06	0.057 7	0.078 1
07	0.037 7	0.042 5
08	0.013 1	0.011 2
09	0.000 2	0.000 2
10	0.000 0	0.000 0

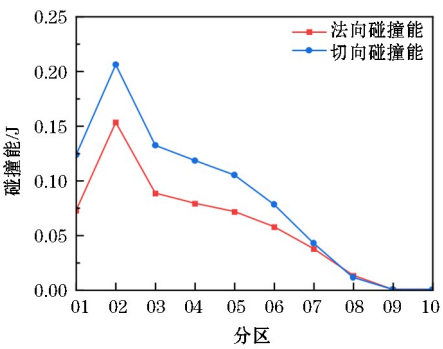


图 13 平均碰撞能随分区变化规律

Fig.13 Variation regulation of average collision energy with zones

综上,结合法向和切向碰撞能,在分区 01～06 中,研磨球碰撞能均值达到磨机内总碰撞能的平均水平,分区 07～09 中的碰撞能均在总碰撞能的平均水平之下,但不同于碰撞次数。分区 01 的碰撞能低于分区 02 的碰撞能,说明分区 01 内的研磨球在无搅拌器的直接作用影响下,高碰撞次数是由于该分区堆积的研磨球数量始终大于其他分区,但碰撞的剧烈程度要低于分区 02,故认为在筒体内部,分区 01～06 比分区 07～16 内的研磨球对矿石物料的研磨细化效果更佳。

3.4 碰撞力分析

研磨球在磨机内部运行过程的碰撞特性不仅与碰撞次数、碰撞能量有关,还与碰撞过程中的作用力有关。碰撞力是指研磨球之间相互碰撞过程中产生的作用力,也是细化矿石颗粒的直接作用力,图 14 给出研磨球碰撞力在法向和切向方向上分别随时间的变化规律。

由图 14 可知,筒体内部研磨球间的法向碰撞力远大于切向碰撞力,这与研磨球在法向和切向的碰撞能大小相反,说明在法向方向产生的有效碰撞能略低。经计算,研磨球间切向碰撞力均值约为 0.221 N,而法向碰撞力均值约为 1.373 N,是切向碰撞力的 6.2

倍，因此，研磨球可通过较小的切向碰撞力向矿石物料传递更多能量，进而形成更有效的磨矿效果。

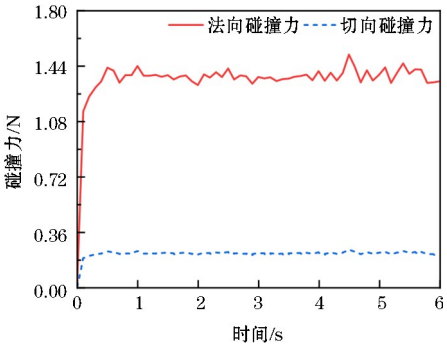
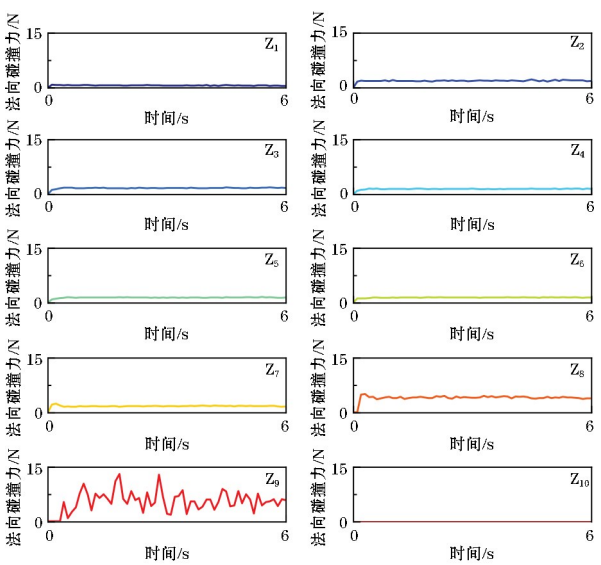


图 14　碰撞力随时间的变化规律

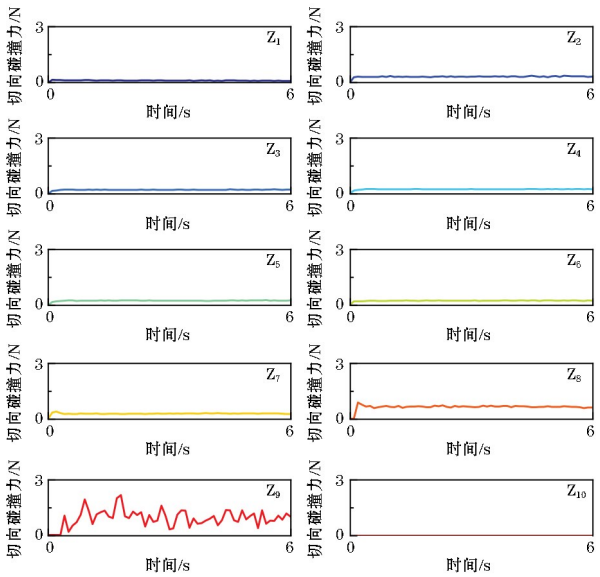
Fig.14　Variation regulation of collision force with time

为进一步获取研磨球间法向、切向碰撞力在磨机内不同分区中的变化规律及差异，图 15 给出了二者随时间的变化关系，表 6 统计了各分区碰撞力均值，碰撞力随分区变化曲线如图 16 所示。

由图 15 可知，各分区对应的法向、切向碰撞力变化趋势基本相同。其中，分区 01～07 的法向、切向碰撞力变化曲线在近 x 轴处平稳变化，分区 08～09 的碰撞力变化曲线波动起伏较大且数值上远高于前半区，这是由于位于磨机下半部的 01～07 分区，研磨球与研磨球之间的空隙距离较近，只能进行碰撞力度小但频率高的研磨作业，对于 08～09 分区，研磨球间的距离增大导致相互碰撞后会产生更大的碰撞作用力。由图 16 可知，分区 01 的平均碰撞力相对较小；在分区 02～09，随着分区高度的增加，研磨球间的碰撞力呈现出先减小后增大的趋势；分区 10～16 中的研磨球碰撞力为 0。



（a）各分区法向碰撞力随时间变化规律



（b）各分区切向碰撞力随时间变化规律

图 15　各分区碰撞力随时间的变化规律

Fig.15　Variation regulation of collision force in each zone with time

表 6　各分区碰撞力均值结果

Table 6　Mean collision force results of each zone

分区	法向碰撞力/N	切向碰撞力/N	分区	法向碰撞力/N	切向碰撞力/N
01	0.668 4	0.102 5	06	1.420 9	0.231 3
02	1.948 2	0.314 0	07	1.702 6	0.275 5
03	1.721 0	0.279 8	08	4.103 9	0.650 7
04	1.483 0	0.241 0	09	12.110 3	1.986 0
05	1.416 7	0.230 7	10	0.000 0	0.000 0

结合图 15、图 16 及表 6，以法向碰撞力为例，分区 01 的研磨球碰撞力最小，而分区 02～07 的碰撞力波动比较平稳，结合碰撞能规律，说明此分区可以稳定进行有效的研磨作业；与此相反，分区 08～09 具有更大碰撞力及更小碰撞能，说明此分区对物料的提升效果较为明显（碰撞力较大），但对矿石物料的研磨效果不佳（碰撞能较小）。

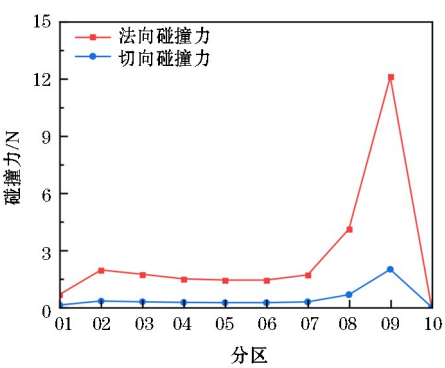


图 16　平均碰撞力随分区变化规律

Fig.16　Variation regulation of average collision force with zones

综合以上分析,在该磨机内的分区 01～07 具有更高的碰撞频率,分区 01 具有最大的碰撞次数,分区 08～09 的碰撞次数极少;分区 01～06 中研磨球间能够产生平均水平以上的碰撞能,分区 02 具有最大碰撞能,分区 07～09 中的碰撞能远远低于平均水平;分区 08～09 的碰撞力远大于分区 01～07,且分区 01 的碰撞力最小;分区 10～16 在各参数上均表现为 0。针对具有最高碰撞频率的分区 01,碰撞能和碰撞力却低于分区 02,这是由于分区 01 没有搅拌器叶片搅动的直接影响,且该区域的研磨球数量最密集,它们只能在间接的牵引作用下进行类似“蠕动”的运动。

由于矿石物料需要频繁的研磨次数、足够的碰撞能量、稳定的碰撞力等条件以保证平稳且高效的研磨作业,结合各分区各参数差异,认为当前磨机在分区 01～06 中可以进行有效的细化物料作业,即筒体底部至 3/8 高度处的研磨球存在高碰撞次数、高碰撞能、低碰撞力的碰撞特性,磨矿效果较好;其他区域的研磨作用相对较低,在分区 07～13 中可以进行快速的物料分级并使符合粒度条件的物料溢流出磨机,考虑磨机转速高低的因素,上述分区的作用效果会在交界处动态变化,而分区 14～16 由于没有搅拌器叶片而成为无效研磨区域。

4 结论

通过建立试验级立式搅拌磨机 DEM-CFD 仿真模型,分析了磨机筒体内不同分区研磨球的碰撞次数、碰撞能和碰撞力,研究了研磨球碰撞特性随搅拌轴高度的变化规律,得出以下主要结论。

(1) 碰撞次数分析结果表明,研磨球间的碰撞次数占总碰撞次数的 90.5%,远高于研磨球与筒体间的碰撞次数,表明研磨球间碰撞对矿石物料的研磨起主导作用。在筒体底部分区 01～07 的碰撞次数远高于筒体顶端的分区 08～16,表明筒体内底部至 7/16 筒体高度为主要研磨区域,其他区域更适合进行矿料分级和溢流作业。

(2) 碰撞能分析结果表明,研磨球间的碰撞能在法向和切向存在显著差异,切向碰撞能约为法向碰撞能的 1.4 倍,表明磨矿过程中研磨球剪切摩擦消耗的能量高于挤压冲击能量。在筒体底部分区 01～06 的碰撞能高于筒体内部的平均碰撞能水平,表明筒体内底部至 3/8 筒体高度消耗的碰撞能量较大,为重要的研磨区域。

(3) 碰撞力分析结果表明,研磨球间法向碰撞力约为切向碰撞力的 6.2 倍,表明磨矿过程中研磨球挤压冲击力显著强于剪切作用。在筒体底部分区 01～07 的碰撞力分布相对稳定,表明该区域的研磨球可通过较小的切向碰撞力向矿石物料传递更多能量,形成更充分的切向碰撞。

(4) 筒体内底部至 3/8 筒体高度处的研磨球存在高碰撞次数、高碰撞能、低碰撞力的碰撞特性,能够进行有效的研磨物料作业。而其他区域适合快速物料分级并使符合粒度条件的物料溢流出筒体。同时,考虑磨机转速高低的影响,上述分区的作用效果会于交界处动态变化。

参考文献(References):

[1] BERGERMAN Maurício Guimarães, JUNIOR Homero Delboni. Development and validation of a simplified laboratory test to design vertical stirred mills[J]. KONA Powder and Particle Journal,2020,37:187-194.

[2] 彭艳荣,闫国英.典型搅拌磨工作原理及应用情况[J].现代矿业,2021,37(1):194-195.
PENG Yanrong, YAN Guoying. Working principle of and application of typical agitating mill[J]. Modern Mining, 2021,37(1):194-195.

[3] 刘鑫,蔡改贫,肖洪力.基于 CFD-DEM 的立式离心分选参数匹配与实验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(2):126-133.
LIU Xin, CAI Gaipin, XIAO Hongli. Parameter matching and experimental research on vertical centrifugal separation based on CFD-DEM[J]. Mining Research and Development, 2019,39(2):126-133.

[4] ESTEVES PRISCILA M, MAZZINGHY Douglas B, GALÉRY Roberto, et al. Industrial vertical stirred mills screw liner wear profile compared to discrete element method simulations[J]. Minerals,2021,11(4):397.

[5] 刘洋,周洁,胡向军,等.基于智利抗震规范的立式搅拌磨抗震分析[J].矿山机械,2023,51(4):34-39.
LIU Yang, ZHOU Jie, HU Xiangjun, et al. Seismic analysis of vertical stirring mill based on Chilean seismic code[J]. Mining & Processing Equipment, 2023, 51(4): 34-39.

[6] OSBORNE T, RHYMER D, WERNER D, et al. Investigating the impact of impeller geometry for a stirred mill using the discrete element method: effect of pin number and thickness[J]. Powder Technology,2023,428:118810.

[7] PRZIWARA P, HAMILTON L D, BREITUNG-FAES S, et al. Impact of grinding aids and process parameters on dry stirred media milling[J]. Powder Technology, 2018, 335: 114-123.

[8] OKAY Altun, TOLGA Sert, DENIZ Altun, et al. Scale-up of vertical wet stirred media mill (HIGmill) via signature plots, stress analyses and energy equations[J]. Minerals Engineering,2024,205:108460.

[9] 瞿铁，马立峰，宋现洲，等.基于 DEM-CFD 的立式搅拌磨机耦合仿真方法及实验研究[J].矿产保护与利用，2025，45(1)：15-22.
QU Tie，MA Lifeng，SONG Xianzhou，et al. Coupling simulation method and experimental study of vertical stirred mill based on DEM-CFD[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2025，45(1)：15-22.

[10] 代献仁，肖庆飞，李云啸，等.某铜矿球磨机钢球配比离散元仿真模拟分析研究[J].有色金属(选矿部分)，2024(8)：107-114.
DAI Xianren，XIAO Qingfei，LI Yunxiao，et al. Discrete element simulation and analysis of steel ball proportion in ball mill of a copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(8)：107-114.

[11] 桑艳伟，张国旺，黄礼龙，等.基于离散单元法的立磨机介质球运动规律研究[J].矿山机械，2018，46(2)：38-43.
SANG Yanwei，ZHANG Guowang，HUANG Lilong，et al. Study on movement laws of media in vertical stirring mill based on DEM[J]. Mining & Processing Equipment，2018，46(2)：38-43.

[12] 刘俊，刘伟，薛玉君，等.陶瓷球为磨矿介质的立式搅拌磨磨矿特性研究[J].矿山机械，2024，52(3)：33-38.
LIU Jun，LIU Wei，XUE Yujun，et al. Research on grinding characteristics of vertical stirring mill with ceramic balls as grinding medium [J]. Mining & Processing Equipment，2024，52(3)：33-38.

[13] 李国峰，李椿楠，刘立伟，等.基于 EDEM 的搅拌磨机内介质碰撞特征研究[J].金属矿山，2023(5)：137-143.
LI Guofeng，LI Chunnan，LIU Liwei，et al. Research on collision characteristic of media in vertical stirred mill based on EDEM[J]. Metal Mine，2023(5)：137-143.

[14] 第旺平，李艳秋，许宏图，等.基于 DEM 的球磨机内介质碰撞特征研究[J].有色金属(选矿部分)，2024(9)：57-64+79.
DI Wangping，LI Yanqiu，XU Hongtu，et al. Study on medium collision characteristics in ball mill based on DEM [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(9)：57-64+79.

[15] GRETA Fragnière，ALEKSANDRA Naumann，MARCEL Schrader，et al. Grinding media motion and collisions in different zones of stirred media mills[J]. Minerals，2021，11(2)：185.

[16] 孙小旭，何建成，王芏卜，等.基于离散单元法的立磨机关键影响因子分析[J].有色金属(选矿部分)，2023(5)：134-138+152.
SUN Xiaoxu，HE Jiancheng，WANG Dubu，et al. Key influence factor analysis of vertical mill based on discrete element method[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2023(5)：134-138+152.

[17] 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.

[18] DE CARVALHO Rodrigo M，OLIVERIRA Alessandro L R，PETIT Horácio 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.

[19] 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 Dubu，et al. Research on the dynamics of grinding medium in vertical spiral mixing mill[J]. China Mining Magazine，2024，33(9)：212-220.