基于DEM-CFD耦合的立式螺旋搅拌磨粉磨性能研究*

邹德芳[1],贺子涵[1],于文达[1],曲迪[2],路社斌[2]

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

摘要:为探究立式螺旋搅拌磨机结构参数对粉磨性能的影响机制,采用离散元(DEM)与计算流体动力学(CFD)耦合方法,系统分析了磨机底隙、侧隙及搅拌器螺旋升角对粉磨性能的作用规律。首先,构建了立式螺旋搅拌磨机的数值模型,通过仿真揭示了粉磨过程中介质的动力学特性;其次,基于试验台开展了粉磨试验,以螺旋搅拌器驱动转矩为指标验证了仿真模型的准确性,结果显示最大误差仅为3.85%;最后,通过多参数仿真与正交试验,量化了各结构参数对粉磨性能的影响程度,并提出了以能量利用率、转矩、平均法向力和切向力为指标的综合评价方法。研究表明,磨机侧隙对粉磨性能的影响最为显著,其次是底隙和螺旋升角;最优参数组合为底隙与介质球径之比$A=4.0$、侧隙与球径之比$B=3.0$、螺旋升角$C=0.61$。研究可为立式螺旋搅拌磨机的结构优化与性能提升提供参考。

关键词:立式螺旋搅拌磨机;结构参数;粉磨性能;DEM-CFD耦合;正交试验

中图分类号:TD453 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)06-0229-08

Grinding Performance of Vertical Spiral Stirred Mill Based on DEM-CFD Coupling

ZOU Defang[1], *HE Zihan*[1], *YU Wenda*[1], *QU Di*[2], *LU Shebin*[2]

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

Abstract: In order to explore the influence mechanism of structural parameters of vertical spiral stirred mill on grinding performance, the coupling method of discrete element method (DEM) and computational fluid dynamics (CFD) was used to systematically analyze the effects of mill bottom gap, side gap and helical lift angle on grinding performance. Firstly, the numerical model of the vertical spiral stirred mill was constructed, and the dynamic characteristics of the medium in the grinding process were revealed by simulation. Secondly, the grinding test was carried out based on the test bench, and the accuracy of the simulation model was verified by the driving torque of the spiral agitator. The results show that the maximum error is only 3.85%. Finally, through multi-parameter simulation and orthogonal test, the influence degree of each structural parameter on grinding performance was quantified, and a comprehensive evaluation method based on energy utilization rate, torque, average normal force and tangential force was proposed. The results show that the side gap of the mill has the most significant effect on the grinding performance, followed by the bottom gap and the helical lift angle. The optimal parameter combination is the ratio of the bottom gap to the medium sphere diameter $A=4.0$, the ratio of the side gap to the sphere diameter $B=3.0$ and the helical lift angle $C=0.61$. The research can provide a reference for the structural optimization and performance improvement of vertical spiral stirred mill.

Key words: Vertical spiral stirred mill, Structural parameter, Grinding performance, DEM-CFD coupling, Orthogonal test

0 引言

立式螺旋搅拌磨机是一种节能环保、生产效率高的粉磨设备[1],磨矿介质一般为钢球或陶瓷球[2]。与球磨机相比,立式螺旋搅拌磨机细磨能力更强,正逐渐替代球磨机进行细磨、再磨以及超细磨作业。因此,基于螺旋粉磨机理提升粉磨性能成为国内外学者的主要研究方向[3]。

* **收稿日期**:2024-09-02
基金项目:辽宁省教育厅高校基本科研项目-面上项目(JYTMS20231604)
作者简介:邹德芳(1978—),女,黑龙江绥化人,硕士,正高级实验师,主要研究方向为矿山机械数字化技术。E-mail:59408598@qq.com

离散单元法(DEM)是用于分析磨机粉磨机理的常用方法之一。王珊[4]基于 DEM 法系统分析了搅拌盘结构对搅拌磨机粉磨效率的影响;刘长远[5]通过 DEM 法探究了不同结构和工艺参数对磨机粉磨性能的影响;RHYMER 等[6]采用离散元法研究了研磨介质颗粒的恢复系统和滑动摩擦因数对粉磨性能的影响;OLIVEIRA 等[7]利用离散元法模拟了立式螺旋搅拌磨机中的破碎过程,并实现了驱动功率的准确预测;HOU[8]利用离散元法研究了磨机的操作参数对粉磨性能的影响规律。尽管上述文献从固相研磨介质的动力学特性角度探讨了影响磨机性能的因素,但均未考虑粉磨过程中矿浆流动对磨机粉磨性能的影响,这种单一固相的研究视角使结论存在一定的局限性。

随着数值模拟技术的不断发展,DEM-CFD 耦合法因其能够有效模拟固液两相介质的相互作用,已成为探索磨机的粉磨机理的重要手段[9]。如刘正彬[10]通过建立立式螺旋搅拌磨机的耦合动力学模型与 DEM-CFD 耦合模型,系统分析了磨机的力学特性,并在此基础上构建了异步电机的数学模型;高旭东[11]利用立式螺旋搅拌磨机的 DEM-CFD 耦合模型,分析了搅拌器转速等关键参数对粉磨性能的影响机制。尽管国内外学者已对立式螺旋搅拌磨机的粉磨机理开展了大量研究,但现有研究在搅拌轴螺旋叶片螺旋升角、叶片外缘到筒体内壁的间隙(侧隙)、叶片底部到筒体底部的间隙(底隙)等结构参数对粉磨性能的综合影响仍显不足。

本研究采用基于 DEM-CFD 耦合法,系统模拟了立式螺旋搅拌磨机的工作过程,并结合试验台的数据验证了仿真模型的准确性;在此基础上通过多参数仿真分析,探究了不同结构参数对粉磨性能的影响规律,并提出了一种综合评价粉磨性能指标,采用多元变量相关性分析,评估了磨机底隙、侧隙、螺旋叶片螺旋升角等关键参数对粉磨性能的影响程度。研究成果以期为立式螺旋搅拌磨机的设计与结构优化提供参考。

1 立式螺旋搅拌磨机数值模型建立与验证

1.1 立式螺旋搅拌磨机 DEM-CFD 模型建立

立式螺旋搅拌磨机主要由螺旋搅拌器、驱动装置、筒体、介质及回收装置等组成。为了简化计算,本研究对磨机进行简化处理[12-13]。简化后的模型只包括搅拌器和筒体,其结构参数与试验台一致,简化模型如图 1 所示,具体结构参数见表 1。

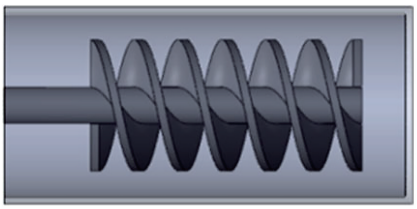


图 1 磨机简化模型

Fig.1 Simplified model of mill

表 1 模型结构参数

Table 1 Structural parameters of the model

筒体内径/mm	筒体外径/mm	筒体高度/mm	搅拌器外径/mm	导程/mm	底隙/mm	螺旋个数	螺旋圈数
250	270	550	180	120	60	2	3

在利用网格处理软件对模型进行网格划分后,将其导入仿真软件,利用耦合插件,将模型的流场信息与颗粒信息进行传递,搭建 DEM-CFD 耦合模型,其耦合流程如图 2 所示。

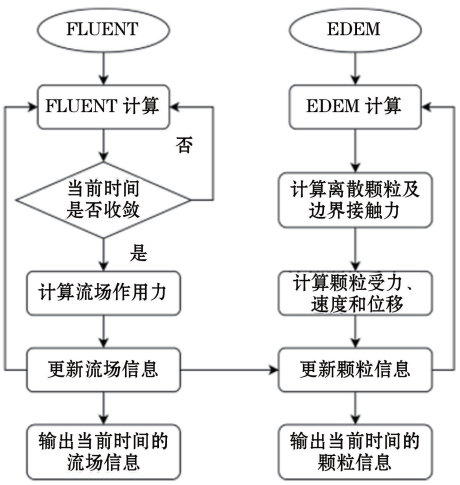


图 2 DEM-CFD 耦合流程

Fig.2 DEM-CFD coupling process

1.2 模型参数设置

本研究中选用的筒体和介质球材质均为碳钢,介质填充率为 60%,介质球尺寸为 10 mm,其他材料参数设置见表 2。

表 2 仿真参数设置[14]

Table 2 Simulation parameters setting[14]

介质泊松比	介质球密度/(kg/m³)	恢复系数	滚动摩擦因数
0.32	7 850	0.8	0.5
静摩擦因数	筒体密度/(kg/m³)	仿真时长/s	搅拌器转速/(r/min)
0.25	7 850	5	80

1.3　数值模型验证

为了验证仿真参数设置及结果的准确性，采用试验台进行粉磨试验。分别选取转速为 40 r/min、60 r/min、80 r/min 进行 3 组试验与仿真，得到不同转速下的螺旋搅拌器转矩随时间变化曲线，并计算了试验和仿真结果之间的误差，结果如图 3 所示。

通过对比图 3 可知，3 种转速下仿真结果预测的最大误差为转速 80 r/min 条件下的 3.85%。由此可知，本文建立的立式螺旋搅拌磨机 DEM-CFD 耦合模型能够准确描述介质和矿浆多相流运动规律。为接下来讨论结构参数与粉磨性能的映射关系提供方法。

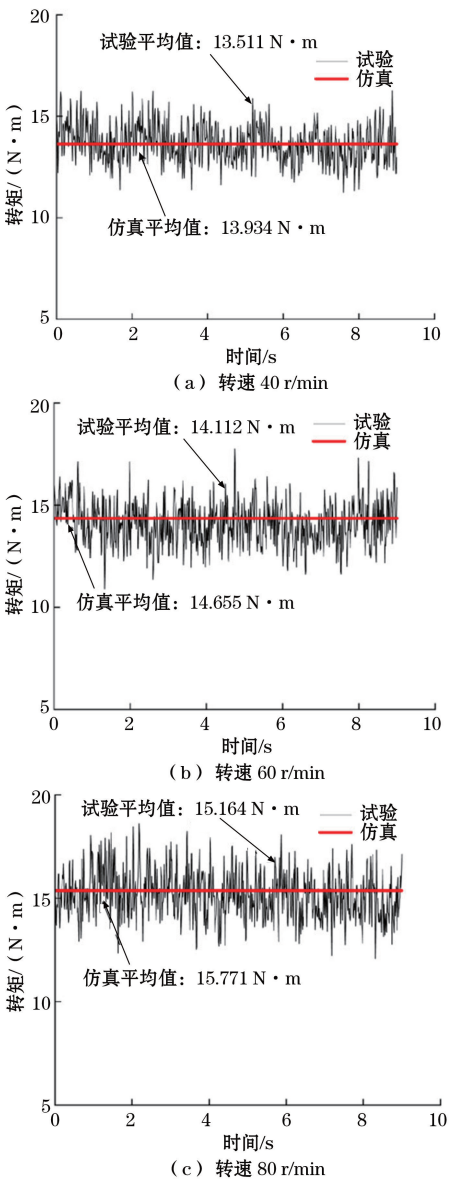


图 3　试验和仿真转矩对比

Fig.3　Comparison of torque between test and simulation

2　结构参数对粉磨性能单因素影响研究

在立式螺旋搅拌磨机的作业过程中，磨机侧隙、底隙和搅拌器螺旋升角的设计直接影响到物料在磨机中的运动状态。合理的结构设计可以改善粉磨性能，降低能耗和设备磨损，提高生产效率。

2.1　磨机底隙对粉磨性能的影响

设置 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 四种底隙变量，分析底隙对立式螺旋搅拌磨机粉磨性能的影响，为方便表示，将磨机底隙的大小 L_D 改写为与介质球径倍数关系，即底隙与介质球径之比 $A=L_D/D_R$，其中 D_R 为介质球球径。

图 4 为磨机搅拌器转矩随底隙变化曲线。因为介质球球径不变，从图 4 中可以看出，转矩随底隙的增加而减小。这是由于随着底隙的增加，大量介质球被留在底隙的空间内，从而参与磨料循环的介质球数量减少，搅拌器所受负载减少，进而转矩减小。底隙过小将导致介质球卡顿，增加了摩擦力，当搅拌器旋转时，摩擦力使得搅拌器需要更大的力才能旋转，这就增加了搅拌器的转矩。

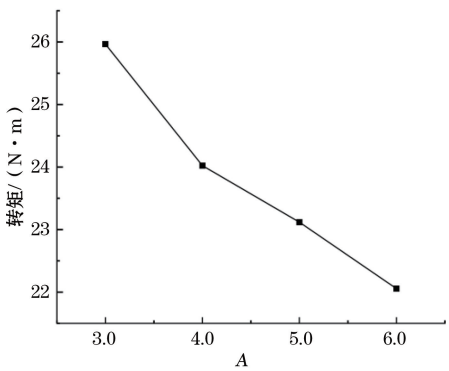


图 4　不同底隙影响下的搅拌器转矩

Fig.4　Stirred torque under the influence of different bottom gaps

在立式螺旋搅拌磨机工作时，物料的粉磨主要依靠搅拌器旋转带动介质球运动碰撞获得能量，但实际工作中能量在传递过程中有损耗[15]。真正有效传递给介质球的能量，可以通过介质球的总碰撞能与搅拌器提供能量之比来评估，即能量利用率。能量利用率越高，表明转化给介质球的有用功越多[16]，介质球在运动过程中获得的动能就越大，用于粉磨物料的能量也就越多，从而提升粉磨性能。

磨机能量转化率可以通过式(1)求得：

$$P=\frac{Tn}{9.55} \tag{1}$$

式中：P 为搅拌器的功率，W；T 为搅拌器所受的扭

矩,N·m;n 为搅拌器的转速,r/min。

能量利用率 ψ 可由式(2)得出:

$$\psi=\frac{E_Z}{Pt} \tag{2}$$

式中:E_Z 为单位时间内介质球总碰撞能,J;t 为单位时间,取 1 s。

图 5 为介质球碰撞能和能量利用率随底隙变化的曲线。从图 5 中可以看出,随着磨机底隙的增加,介质球的碰撞能逐渐减小,能量利用率先增大后减小,在底隙与介质球径之比 $A=4.0$ 时达到最大。

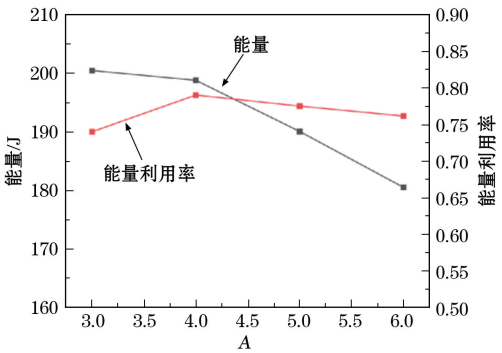


图 5 不同底隙影响下的介质球总碰撞能及能量利用率

Fig.5 Total collision energy and energy utilisation of the dielectric sphere under the influence of different bottom gaps

在立式螺旋搅拌磨机进行粉磨作业时,当粉磨的物料颗粒之间的平均法向力达到最小抗压力时,物料颗粒可以实现有效粉磨。同时,物料之间的平均切向力大于受到的最小剪切力时,也会实现有效粉磨[17]。

根据岩石破碎理论,计算物料的最小抗压力值 F_n 和最小剪切力 F_τ:

$$F_n=\sigma_n S \tag{3}$$

$$F_\tau=0.3F_n \tag{4}$$

式中:σ_n 为矿料的抗压强度,Pa;S 为矿料的受力面积,m^2。

图 6 为介质平均切向力和平均法向力随底隙变化的曲线。由图 6 可知,在 A 由 3.0 增加到 6.0 的过程中,介质球的平均法向力和平均切向力均不断减小。当底隙减小时,介质球与磨机底部的接触增加,介质球受到的压力变大,介质球间的压力传递增强。根据岩石破碎理论,较大的法向力和切向力可以增加物料之间的碰撞频率和强度,有助于提高破碎效率。但过大的法向力和切向力可能导致介质球和设备磨损加剧[18]。因此,在实际应用中,需要根据具体情况来调整和控制平均法向力和平均切向力,以达到最佳的粉磨性能和设备运行状态。

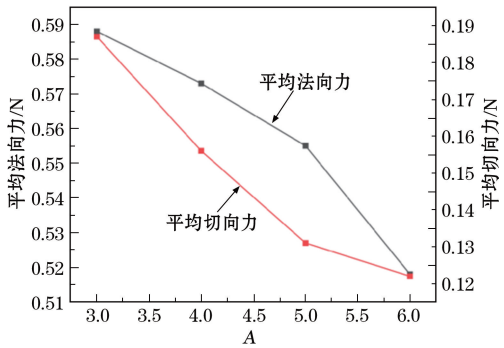


图 6 不同底隙影响下的介质球受力

Fig.6 Dielectric ball force under the influence of different bottom gaps

2.2 磨机侧隙对粉磨性能的影响

图 7 为磨机搅拌器转矩随侧隙变化曲线,图 8 为介质球碰撞能和能量利用率随侧隙变化曲线。为方便表示,将磨机侧隙的大小 L_C 同样改写为与介质球径倍数关系,即侧隙与介质球径之比 $B=L_C/D_R$,其中 D_R 为介质球球径。

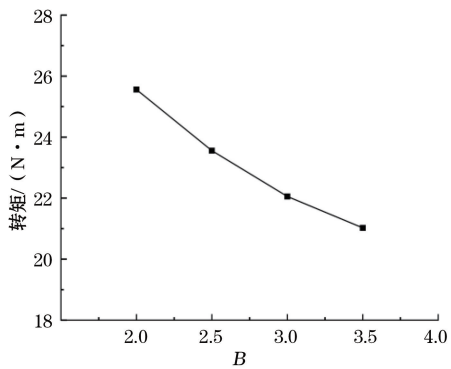


图 7 不同侧隙影响下的搅拌器转矩

Fig.7 Sttirred torque under the influence of different side gaps

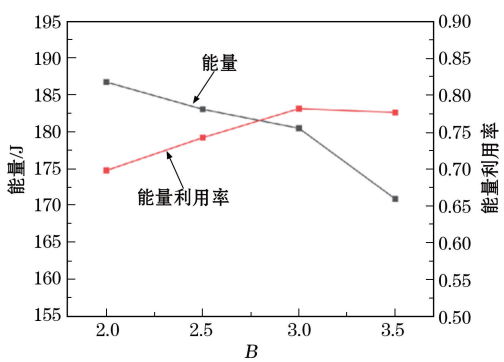


图 8 不同侧隙影响下的介质球总碰撞能及能量利用率

Fig.8 Total collision energy and energy utilisation of the dielectric sphere under the influence of different side gaps

从图 7 可以看出，随着侧隙的增加，搅拌器所受转矩逐渐减小。这是因为当侧隙减小时，介质球在搅拌器和磨机筒壁之间的空间变得狭窄，介质球的分布更加密集，与搅拌器之间的接触面积变大，搅拌器在旋转过程中要克服更大的阻力。

从图 8 可以看出，介质球的总碰撞能随着磨机侧隙的增加而减小，这是因为磨机侧隙越小，介质球分布变得更密集，它们之间以及搅拌器和磨机内壁之间的碰撞频率增加，总碰撞能增大。随着侧隙的增加，能量利用率先增大后减小，在侧隙与介质球径之比 B 为 3.0 时达到最大。

介质球所受的平均法向力和平均切向力随侧隙变化曲线如图 9 所示。随着侧隙的增加，搅拌器所能带动的介质球数量减少，这使介质球之间的碰撞强度降低。介质球之间的有效接触面积减小，相对滑动和剪切作用也随之减小，从而介质球所受的平均法向力和平均切向力逐渐变小。

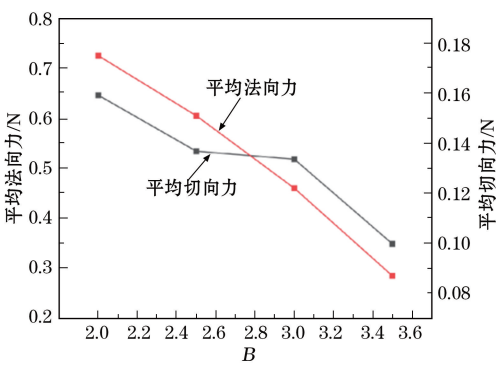


图 9　不同侧隙影响下的介质球受力

Fig.9　Dielectric ball force under the influence of different side gaps

2.3　搅拌器螺旋升角对粉磨性能的影响

图 10 为搅拌器转矩随搅拌器螺旋升角变化的曲线。为方便表示，用 $C=S'/D$ 来表示不同搅拌器螺旋升角，S' 为搅拌器导程，D 为搅拌器直径。从图 10 可以看出，随着搅拌器螺旋升角的增加，搅拌器所受转矩先增加后减小。图 11 为介质球总碰撞能和能量利用率随螺旋升角变化曲线。从图 11 可以看出，介质球的总碰撞能及其能量利用率随着螺旋升角增加逐渐增大，在螺旋升角 C 为 0.67 时最大。介质球所受的平均法向力和平均切向力随搅拌器螺旋升角变化趋势如图 12 所示。由图 12 可知，介质球所受的平均法向力和平均切向力的大小随着搅拌器螺旋升角的增加而增大。

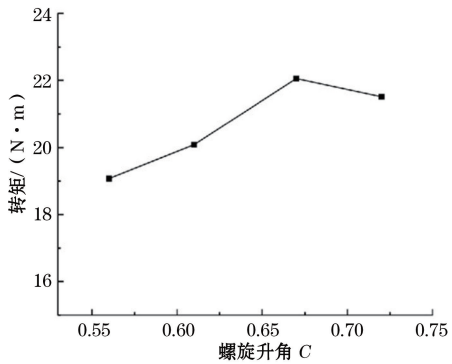


图 10　不同螺旋升角影响下的搅拌器转矩

Fig.10　Sttirred torque under the influence of different helical lift angles

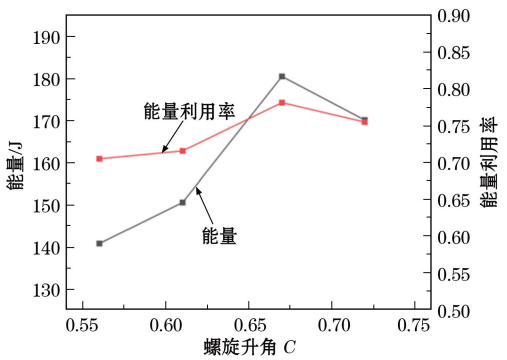


图 11　不同螺旋升角影响下的介质球总碰撞能及能量利用率

Fig.11　Total collision energy and energy utilisation of the dielectric sphere under the influence of different helical lift angles

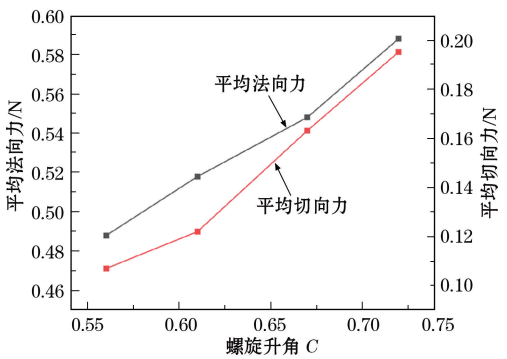


图 12　不同螺旋升角影响下的介质球受力

Fig.12　Dielectric ball force under the influence of different helical lift angles

随着搅拌器螺旋升角的增加，介质球在底部堆积，增加了局部压力和摩擦，转矩随之增加；处在同一空间的介质球数量增多，碰撞频率增加，从而使总碰撞能增加；介质球受到水平方向的阻力也逐渐增大，从而使所受平均法向力和平均切向力增大。

3 粉磨性能综合评价

3.1 多元变量影响下粉磨性能的相关性分析

为了研究磨机底隙、侧隙和搅拌器螺旋升角对立式螺旋搅拌磨机粉磨性能的综合影响,对这 3 个因素进行正交试验,每个因素选取 4 个水平,具体数值见表 3。试验为三因素四水平试验,选择 $L_{16}(4^3)$的正交表。

表 3 试验因素及水平

Table 3 Test factors and levels

水平	因素		
	A (L_D/D_R)	B (L_C/D_R)	C 螺旋升角 (S'/D)
1	3.0	2.0	0.56
2	4.0	2.5	0.61
3	5.0	3.0	0.67
4	6.0	3.5	0.72

为了综合评价立式螺旋搅拌磨机的粉磨性能,选择能量利用率 x_1、转矩 x_2、平均法向力 x_3、平均切向力 x_4 等多个参考指标开展仿真和计算。设定权重系数分别为 0.4, 0.3, 0.15, 0.15,详细的理论依据参考文献[16]。对于参考指标的计算,由式(5)、式(6)和式(7)所得。

效率指标平均值为:

$$\overline{x}_n=(x_{n1}+x_{n2}+\cdots+x_{n16})/16 \tag{5}$$

则试验效率指标值为:

$$\overline{x}_{n,i}=\frac{x_{n,i}}{\overline{x}_n} \tag{6}$$

式中:$n=1,2,3,4$;$i=1,2,\cdots,16$。

则粉磨性能综合指标 Q_i 为:

$$Q_i=0.4\overline{x}_{1,i}+0.3\overline{x}_{2,i}+0.15\overline{x}_{3,i}+0.15\overline{x}_{4,i} \tag{7}$$

通过仿真及计算,试验方案及结果见表 4。

表 4 仿真试验方案及结果

Table 4 Simulation test programmes and results

编号	A	B	螺旋升角 C	$\overline{x}_{1,i}$	$\overline{x}_{2,i}$	$\overline{x}_{3,i}$	$\overline{x}_{4,i}$	Q_i
1	3.0	2.0	0.56	1.236	0.701	1.194	1.026	1.038
2	3.0	2.5	0.61	0.970	0.970	0.946	0.983	0.965
3	3.0	3.0	0.67	0.917	0.805	0.962	0.994	0.902
4	3.0	3.5	0.72	0.753	0.866	0.913	0.973	0.844
5	4.0	2.0	0.61	0.969	1.192	1.013	1.100	1.062
6	4.0	2.5	0.56	0.656	1.401	0.983	1.110	0.997
7	4.0	3.0	0.72	1.242	1.030	1.178	1.036	1.138
8	4.0	3.5	0.67	0.863	1.504	1.076	1.132	1.128
9	5.0	2.0	0.67	0.909	1.023	0.975	1.026	0.971
10	5.0	2.5	0.72	1.201	0.651	0.891	0.867	0.939
11	5.0	3.0	0.56	1.369	0.727	1.129	0.983	1.083
12	5.0	3.5	0.61	1.006	0.733	0.834	0.857	0.876
13	6.0	2.0	0.72	0.924	1.304	1.012	1.047	1.069
14	6.0	2.5	0.67	0.970	0.966	0.885	0.931	0.950
15	6.0	3.0	0.61	1.244	1.045	1.082	0.983	1.121
16	6.0	3.5	0.56	0.771	1.107	0.889	0.962	0.918

3.2 影响程度分析

为减少计算量,采用直观分析法对各因素影响程度进行分析[19]。对因素 A 分析如下,其中 $\overline{K}$ 表示平均影响程度。

$$\begin{cases}\overline{K}_{1A}=(1.038+0.965+0.902+0.844)/4=0.937\\ \overline{K}_{2A}=(1.062+0.997+1.139+1.128)/4=1.081\\ \overline{K}_{3A}=(0.971+0.939+1.083+0.876)/4=0.967\\ \overline{K}_{4A}=(1.069+0.950+1.121+0.918)/4=1.015\end{cases} \tag{8}$$

因为 $\overline{K}_{1A}<\overline{K}_{3A}<\overline{K}_{4A}<\overline{K}_{2A}$,所以因素 A 的最优水平是 A_2。

同理可对因素 B、C 进行影响程度分析,结果见表 5。

表 5 影响程度结果分析

Table 5 Analysis results of influence degrees

	因素		
	A	B	C
$\overline{K}_1$	0.937	1.035	1.009
$\overline{K}_2$	1.081	0.963	1.012
$\overline{K}_3$	0.967	1.101	0.988
$\overline{K}_4$	1.015	0.942	0.992

由表 5 可知,因为 $\overline{K}_{4B}<\overline{K}_{2B}<\overline{K}_{1B}<\overline{K}_{3B}$,所以因素 B 的最优水平是 B_3。

对于因素 C 有:$\overline{K}_{3C}<\overline{K}_{4C}<\overline{K}_{1C}<\overline{K}_{2C}$,所以因素 C 的最优水平是 C_2。

选用每个因素影响程度的最大和最小值计算综合平均值的极差 R 以区分因素的重要程度:

$$\begin{cases}R_A=\overline{K}_{2A}-\overline{K}_{1A}=0.144\\ R_B=\overline{K}_{3B}-\overline{K}_{4B}=0.159\\ R_C=\overline{K}_{2C}-\overline{K}_{3C}=0.024\end{cases} \tag{9}$$

极差的大小反映了各因素对试验指标的影响程度,极差越大,影响程度越大。因此对于本次试验来说,3 个因素影响程度 $B>A>C$,即侧隙>底隙>螺旋升角。

通过上述计算分析可知最优水平组合为 $A_2B_3C_2$。在设计的 16 组试验中,由表 4 可知,第 7 组的粉磨性能指标最佳,其对应的因素组合为 $A_2B_3C_4$。由于因素 A、B 的影响程度远大于因素 C,因此确定最优组合方案为 $A_2B_3C_2$,即底隙与介质球径之比 $A=4.0$、侧隙与球径之比 $B=3.0$、螺旋升角 $C=0.61$。

4 结论

本文建立了立式螺旋搅拌磨机 DEM-CFD 耦合模型，对磨机的粉磨过程进行了仿真分析与试验验证，得出以下结论。

(1) 随着立式螺旋搅拌磨机的侧隙、底隙增加，磨机搅拌器转矩、介质球所受的平均法向力和切向力逐渐减小，粉磨性能逐渐降低；介质球能量利用率先增大后减小，在底隙与介质球径之比 $A=4.0$ 时，侧隙与介质球径之比 $B=3.0$ 时均能达到最大。

(2) 随着立式螺旋搅拌磨机搅拌器的螺旋升角增加，磨机搅拌器转矩和介质球能量利用率先增加再减小。在螺旋升角 C 为 0.67 时最大，物料粉磨性能最好。

(3) 结合能量利用率、搅拌器转矩、平均法向力和平均切向力，提出一种粉磨性能综合评价方法。采用正交试验，分析了磨机侧隙、底隙和搅拌器螺旋升角的综合影响，影响度排序为磨机侧隙＞底隙＞搅拌器螺旋升角。最优参数组合为底隙与介质球径之比 $A=4.0$，侧隙与介质球径之比 $B=3.0$，螺旋升角 $C=0.61$。本文的研究方法为立式螺旋搅拌磨机的结构优化与性能提升提供了参考。

参考文献(References)：

[1] 刘丹.立式螺旋搅拌磨机磨矿机理研究及动力学仿真分析[D].成都：西华大学，2015.
LIU Dan. Research on grinding mechanism and dynamic simulation analysis of vertical spiral agitating mill [D]. Chengdu：Xihua University，2015.

[2] 姚雷，吴迪，谢永鑫.磨矿过程理论及设备研究进展[J].选煤技术，2023，51(2)：1-8.
YAO Lei，WU Di，XIE Yongxin. Progress of research on grinding process theory and equipment[J].Coal Preparation Technology，2023，51(2)：1-8.

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

[4] 王珊.搅拌盘结构型式对卧式超细搅拌磨磨矿效果的分析[D].昆明：昆明理工大学，2014.
WANG Shan. Analysis of stirrer disc structure type on grinding performance of a horizontal ultrafine stirred mill [D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2014

[5] 刘长远.卧式圆盘搅拌磨机结构及工艺参数研究[D].秦皇岛：燕山大学，2016.
LIU Changyuan. Research on the structure parameters and process parameters of the horizontal disc stirred mill [D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2016.

[6] 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.

[7] OLIVEIRA A L R，RODRIGUEZ V A，DE CARVALHO R M，et al. Mechanistic modeling and simulation of a batch vertical stirred mill [J]. Minerals Engineering，2020，156：106487.

[8] HOU Y. DEM simulation and analysis of operating parameters on grinding performance of a vertical stirred media mill [D]. Columbia：University of British Columbia，2014.

[9] 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.

[10] 刘正彬.立式螺旋搅拌磨机动态性能仿真及优化研究[D].吉林：吉林大学，2023.
LIU Zhengbin. Study on dynamic simulation and optimization of the vertical screw stirred mill [D].Jilin：Jilin University，2023.

[11] 高旭东.基于流固耦合分析的大型立式螺旋搅拌磨机磨矿效果研究[D].吉林：吉林大学，2021.
GAO Xudong. Study on grinding effect of large vertical screw stirring mill that based on fluid-structure interaction [D].Jilin：Jilin University，2021.

[12] 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].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2024，54(9)：2423-2431.

[13] 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＋110.
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＋110.

[14] 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.

[15] 李新忠.立式螺旋搅拌磨机工艺参数与磨机结构对磨矿过程的影响研究[D].沈阳：东北大学，2019.
LI Xinzhong. Study the influence of process parameters and mill structure on grinding process of vertical spiral agitator mill [D].Shenyang：Northeastern University，2019.

[16] 邵冬冬.立式螺旋搅拌磨机工艺和结构参数研究[D].沈阳：东北大学，2020.

SHAO Dongdong. Study on process and structural parameters of vertical spiral agitating mill [D]. Shenyang: Northeastern University,2020.

[17] 李海森,孟庆有,袁致涛.立式搅拌磨机磨矿机理研究进展[J].中国矿业,2022,31(5):107-113.
LI Haisen, MENG Qingyou, YUAN Zhitao. Research progress on grinding mechanism of vertical stirring mill [J]. China Mining Magazine,2022,31(5):107-113.

[18] 杨杰.基于离散元法的立式搅拌球磨机建模仿真研究[D].昆明:昆明理工大学,2015.
YANG Jie. Study on the modeling simulation and experiment of vertical mixing mill based on discrete element method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2015.

[19] 刘吉顺,杨丽荣.湿式球磨机磨矿效率影响因素正交试验与分析[J].矿业研究与开发,2020,40(5):149-153.
LIU Jishun, YANG Lirong. Analysis on the factors affecting the grinding efficiency of wet ball mill by orthogonal experiment method [J]. Mining Research and Development,2020,40(5):149-153.