面向负压成型系统的缺陷改进评价方法研究

王勇¹ 朱国栋^{1*} 杨江帆¹ 纪琦峰¹ 周际² 刘建辉² 鲁兵² (1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009; 2. 浙江新余宏智能装备有限公司 杭州 311115)

Evaluation Method for Defect Improvement of Negative Pressure Forming System

WANG Yong¹, ZHU Guodong^{1*}, YANG Jiangfan¹, JI Qifeng¹, ZHOU Ji², LIU Jianhui², LU Bing²

School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
 Zhejiang Xinyuhong Intelligent Equipment Co., LTD, Hangzhou 311115, China)

Abstract In this paper, an evaluation method for defect improvement of the negative pressure forming system is proposed, which is based on CFD-DEM bidirectional coupling to simulate and analyze the negative pressure molding system under different outlet pressures, and the velocity and pressure distribution of the forming surface under negative pressure is obtained. The uniformity coefficient and the material distribution of the final screen surface are taken as important evaluation indexes to reflect the forming quality. Given the phenomenon that the velocity/pressure values are concentrated in the forming defect area, the parameters of the velocity and pressure uniformity of the forming surface are optimized to improve the forming quality. Finally, the method is applied to a negative pressure molding system for the pad of diapers. The results show that the velocity distribution of the forming ring at the outlet of the wind barn. When the thickness of the retaining ring is 140 mm, the inner diameter is 1000 mm and the relative position *l*=0 mm, the velocity uniformity coefficient can be reduced by 44.2% at most, and the forming quality is significantly improved by simulation and experiment.

Keywords Negative pressure forming system, Defect improvement, Optimization validation, Evaluation method, Diapers

摘要 本文提出了一种面向负压成型系统的缺陷改进评价方法,即基于 CFD-DEM 双向耦合对负压成型系统在不同出口 压力大小下进行模拟分析,得到成型面在负压作用下的速度和压力分布;以不均匀系数和最终筛面物料分布作为反映成型质 量的重要评价指标,针对成型缺陷区域出现速度/压力数值集中的现象,对成型面的速度、压力均匀性进行参数优化以提高成 型质量。最后将该方法应用于某面向纸尿裤棉芯层的负压成型系统中,结果表明,成型面的速度分布对棉芯层的成型缺陷现 象有显著影响;在配风仓出口处设置环形挡圈可显著改善成型质量;当挡圈厚度 *s*=140 mm、内径 *d*=1000 mm 及相对位置 *l*= 0 mm 时,速度不均匀系数最大可下降 44.2%,经仿真及实验验证成型质量得到了显著提升。

关键词 负压成型系统 缺陷改进 优化验证 评价方法 纸尿裤 中图分类号: TH162+.1 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202208016

吸送式气力输送又称负压气力输送,是现代生 产中的一种常见物料运输方式。该方式供料简单, 且物料不会飞扬外逸,是目前清洁高效气力输送技 术的发展趋势和研究热点。 负压成型是负压气力输送的一种典型应用,基 于负压原理的成型机构已广泛应用于纺织品等轻 工业制造领域。不少学者结合数值模拟方法对类 似过程进行过大量研究。在固相积聚方面,Yuan J

收稿日期:2022-08-21

基金项目: 2020 年安徽省科技重大专项项目 (202003a05020041)

^{*}联系人: Tel:15357406579; E-mail: gdzhuhfut@163.com

等^[1]研究了稻谷脱粒混合物在筛网作用下的轴向流 动和径向分层现象。Zhou L等^[2]和 Zhou H等^[3]探 讨了不同变量对流化床和侧向喷射填充床内颗粒 流动的影响。Nian T等^[4]和 Ma C等^[5]分别对河流 和预充填砾石筛管中的堵塞演变过程进行了数值 模拟。在负压流动方面, Zhang H等^[6]探讨了钻杆 旋转对煤层含气量负压采样的影响。Wang Z等^[7] 分析了不同负压下煤层瓦斯抽放的漏风过程。 Tang Z等^[8]和 Peng H等^[9]基于负压原理分别开发 了螺旋进料装置和除尘水幕。Bang J等^[10]和 Zhang Y等^[11]揭示了杀菌系统位置和通风方式对负压隔 离病房中灭菌效果的影响。

综上,国内外学者主要将研究重点聚焦于流场 中固相积聚过程分析和负压环境下的颗粒运移问 题,关于面向物料成型的负压气力输送过程的相关 研究还鲜有报道。同时在实际生产过程中,由于机 构的不合理性等因素导致产品出现局部缺陷问题 (图1),针对其改进措施还缺乏系统的评估方案。



图1 缺陷示意图。(a) 纸尿裤成型缺陷, (b) 土工布成型裂缝 Fig. 1 Schematic diagram of local molding defect. (a) Diaper forming defects, (b) geotextile forming cracks

基于上述分析,本文提出了一种面向负压成型 系统的缺陷改进评价方法。以不均匀系数和缺陷 区域物料分布作为评估指标,通过 CFD-DEM 双向 耦合对成型面的速度及压力分布进行模拟分析与 参数优化。最后通过应用实例对本方法进行了验证。

1 理论模型

1.1 气相模型

气相流动要满足基本的守恒定律,包括质量守 恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[12]。考虑到 固相对气体流动的影响,在原连续性方程中添加颗 粒的体积分数ε_s,气相的控制方程^[13] 为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{g} \rho_{g}) + \nabla (\varepsilon_{g} \rho_{g} u_{g}) = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{g} \rho_{g} u_{g}) + \nabla (\varepsilon_{g} \rho_{g} u_{g}) =$$

$$-\varepsilon_{g} \nabla p + \nabla (\varepsilon_{g} \tau_{g}) + \varepsilon_{g} \rho_{g} g - S \qquad (2)$$

式中, pg、 ug 分别为气相密度及流速; S 为流体单元

内流体的平均作用力;p为气相压力。

由于流动过程中存在湍流扩散现象,故选择 Realizable *k-c* 模型来描述湍流动能方程和湍流耗散 率,其模型为^[14]

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{(\rho_{g}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{x_{i}} (\rho_{g}ku_{gi}) = \frac{\partial}{x_{j}} \left[\left(\mu_{g} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{x_{j}} \right] + G_{k} - \rho_{g}\varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{g}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{x_{i}} (\rho_{g}\varepsilon u_{gi}) =$$

$$\frac{\partial}{x_{j}} \left[\left(\mu_{g} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{x_{j}} \right] + \rho_{g}C_{k1}E_{a}\varepsilon - \rho_{g}C_{k2}\frac{\varepsilon^{2}}{k + \sqrt{\varepsilon v_{a}}} \quad (4)$$

式中,k、 ε 、 μ_g 、 μ_t 和 v_a 分别表示湍流能、湍流耗散 率、空气动力黏度、湍流黏度和运动黏度; u_{ai} 为空 气在坐标系中三个方向上的速度分量; σ_s 、 σ_k 、 G_k 、 E_a 、 C_{k1} 和 C_{k2} 均为模型常数。

1.2 固相模型

JKR 模型考虑了离散元间的范德华力影响,可以很好的模拟离散元间因静电或含水分而产生粘附团聚现象,因此选择具有 JKR 接触的 HertzMindlin 接触模型。

其中固相离散元的法向弹性力 *F*_{JKR} 和重叠量 δ 如式 (5), (6) 所示^[15]

$$F_{\rm JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma Y}a'^{\frac{3}{2}} + \frac{4Y}{3R}a'^{3} \qquad (5)$$

$$\delta = \frac{{a'}^2}{R} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma a'}{Y}} \tag{6}$$

式中, y 为表面能, a'为重叠粒子间的接触半径, Y 为 有效杨氏模量, R 为当量半径。有效杨氏模量和当 量半径定义为

$$\frac{1}{Y} = \frac{1 - \lambda_i^2}{E_i} + \frac{1 - \lambda_j^2}{E_j}$$
(7)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{8}$$

式中 $E_{i,j}, \lambda_{i,j}, R_{i,j}$ 分别为两颗粒的弹性模量、泊松比和半径。

2 评价方法

近些年来, CFD-DEM 耦合模拟被广泛应用于 气固两相流问题的分析之中^[16-18]。CFD(Computational Fluid Dynamics),即计算流体力学;DEM (Discrete Element Method),即离散单元法。为了研 究物料在成型过程中的动态特性,选用离散元软件 EDEM 和有限元软件 FLUENT 进行耦合数值模拟。

2.1 负压成型原理

在常见的负压成型机构中,物料在负压风机产 生的压差作用下随气流运动,粒径较小的颗粒通过 筛网,粒径大于筛孔的颗粒和部分粒径接近筛网孔 尺寸的颗粒会被筛网截留并堆积成床,最终成型出 所需要的产品。其原理如图2所示。



Fig. 2 Negative pressure forming principle

2.2 CFD-DEM 耦合分析

气固两相流有两种计算方法,即欧拉-拉格朗日 法和欧拉-欧拉法^[19]。欧拉-拉格朗日法计算速度较 快,但没有考虑固相体积分数的影响;欧拉-欧拉法 考虑了固相与气相的相互作用,但会占用较高的计 算机资源。由于负压成型过程中涉及到固相堆积, 局部体积分数明显超过10%,因此选择欧拉-欧拉耦 合方法。

同时考虑到成型机构中筛网目数一般较大,可 结合实际工况在保持物料和筛网尺寸保持不变的 情况下,将机构其余组件缩小一定倍数后再进行成 型验证。

颗粒粒径分布参考筛孔尺寸按比例设置为多 种类粒径混合,具体数值分布如表1所示。其中 *d* 为颗粒粒径,*a*为筛网孔径。

表1 粒径分布

		Tab. 1	Size dist	ribution		
类型	易透筛颗粒		难透筛颗粒		不透筛颗粒	
	<i>d/a</i> =0.4~0.7		<i>d/a</i> =0.7~1.0		<i>d/a</i> =1.0~3.0	
数值	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
比率/%	4	6	10	10	40	30

基于上述参数,采用UDF 接口程序建立 FLUENT-EDEM 的双向耦合,采用基于压力求解器的瞬态计 算,控制方程选择有限体积法求解,采用 SIMPLE 方 法进行压力-速度耦合,壁面选择无滑移边界条件。 阻力模型采用 Ergun、Wen 和 Yu 阻力模型,升力模 型采用 Saffman 升力模型和 Magnus 升力模型^[20]。 在 FLUENT 中时间步长设置为 EDEM 的 100 倍。

2.3 成型质量参数化评估

考虑到物理模型及边界条件等诸多因素,不同 成型机构中的气固两相流过程复杂多样。一般来 说,计算流域中固相的流动特性受所处位置截面的 速度及压力分布影响较大。针对成型缺陷问题,物 料成型区域(筛网表面)的速度和压力分布即成为分 析重点。

为更加准确的判别筛网表面压力、速度的数值 分布,针对成型面建立参数化评估模型。通过结合 统计学和 ANSYS 仿真手段,在成型面缺陷区域建 立监测点,分别求解速度和压力不均匀系数,从而 对成型面的速度和压力分布进行判别。不均匀系 数公式如下

$$K_{\rm V} = \frac{\sigma}{\left| \overline{k} \right|} \tag{9}$$

式中, *σ*为监测点速度/压力标准差, *k*为监测点速度/ 压力平均值。

不均匀系数是一个无量纲参数,不均匀系数越小,速度和压力分布越均匀。因此,在成型缺陷问题中,可将不均匀系数作为评估标准,通过降低不均匀系数以改善成型缺陷处的速度/压力分布,从而提高成型质量。同时,随着所有物料在筛网处成型完毕后,可直观对比改进前后原缺陷区域的物料分布,从而判别改进的合理性。

3 应用实例

将上述方法应用于某面向纸尿裤棉芯层的负 压成型系统中,其结构如图 3 所示。该负压成型系 统通过负压风机产生负压环境,利用模轮内外压差 将粉碎系统产生的絮状木浆物料(图 4(a))吸附成型 于筛网表面。

在实际生产过程中,该系统生产出来的纸尿裤 棉芯层在靠近出口一侧的边缘部分,会出现成型厚 度不均匀、边缘参差不齐等质量问题,如图 4(b) 所示。

3.1 流场计算与讨论

3.1.1 网格划分

在气固耦合模拟中,基于实际设备模型进行简



图3 成型装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of negative pressure forming system



图4 成型实物。(a) 絮状团聚物,(b) 缺陷示意图

Fig. 4 Material object. (a) Flocculent agglomerate,(b) defect diagram

化,将原机构尺寸缩小至原 1/25,如图 5(a)所示。 在成型箱区域、筛网和棉芯成型区域采用六面体网 格划分, 配风仓区域采用四面体网格划分, 相临区 域交界面设置为 interface, 流体网格尺寸设置为颗 粒尺寸的 3~5 倍, 如图 5(b) 所示。最差网格 skewness 值为 0.78(<0.8), 有利于模型的收敛。

在正式计算前对计算模型进行网格无关性验证,除网格数量不同,其边界条件及数学模型均相同。监测出口处质量流量,如表2所示。当网格数量取到120万量级后相对误差较小,考虑到计算效率,最终取网格数量为1289571。



Fig. 5 Computational model and grid generation. (a) Equipment modal, (b) mesh

3.1.2 流场分析

图 6 为不同出口压力大小下筛网表面的速度 与压力分布。在不同出口条件下,原成型缺陷区域 均出现显著速度和压力数值集中;随着出口压力值 的减小,进出口压差随之增大,成型面的速度大小 基本保持不变,而压力大小则随之减小。然而,成 型曲面的速度及压力数值集中区域范围没有发生 明显变化。

	表	2	出口质量流量
Tab	2	м	loss flow at the outlet

	140.2	widss now at th	le outlet
序号	网格数量	节点数量	出口质量流量 (kg/s)
1	549710	263020	-3.261
2	646110	337811	-3.226
3	826803	364743	-3.183
4	1169809	489952	-3.098
5	1289571	700614	-3.072
6	1817512	853462	-3.073
7	4004504	1513023	-3.072



Fig. 6 Velocity and pressure distribution on forming surface. (a) -2000 Pa, (b) -4000 Pa, (c) -6000 Pa, (d) -8000 Pa

3.1.3 均匀性分析

在成型面插入若干监测点,其分布如图7所示。 采集监测点的速度及压力值,并计算其标准差和平 均值,得到不同出口条件下的速度和压力不均匀系



图7 监测点分布

Fig. 7 Distribution of monitoring points

数如图8所示。

由图 8 可知,随着出口压力值的减小,成型面的速度均值保持在 8.35 m/s 左右,速度不均匀系数 在 8.25-8.5 之间波动;压力均值与出口处压力值成 线性关系,压力不均匀系数随着出口压力的减小而 减小。

对比速度和压力不均匀系数,两者存在显著差异。数值上速度不均匀系数明显大于压力不均匀 系数,相比于速度,成型面压力分布更为均匀。因 此棉芯层边缘成型质量问题与速度有较大关系。

3.2 优化计算与讨论

结合实际工程经验,在配风仓出口处加一环形 挡圈以改善成型缺陷,其位置形状如图9所示。





Fig. 8 Analysis of flow field distribution uniformity. (a) Analysis of velocity uniformity, (b) analysis of pressure uniformity







3.2.1 结构优化

为进一步改善成型质量,针对挡圈结构参数进 行探究。研究参数包括挡圈厚度 s、内径 d,每个参 数结合配风仓尺寸确定五个值如表 3 所示。分别建 模进行模拟,探究各参数对速度场的影响。

	表 3	挡圈结构参数值
Tab. 3	Structur	al parameters of retaining ring

参数			数值		
厚度/mm	110	120	130	140	150
内径/mm	1080	1060	1040	1020	1000
相对位置/mm	0	5	10	15	20

挡圈厚度对速度场均匀性的影响如图 10(a) 所示。当 s=140 mm 时不均匀系数最小,不同出口条件下变化范围为 0.48~0.55;对比原结构(图 10(c)),在出口压力为-10000 Pa 时, s=140 mm 不均匀系数减小幅度最大,为 41.5%;在出口压力为-6000 Pa 时减小幅度最小,为 34.1%。

挡圈内径对速度场均匀性的影响如图 10(b) 所示。在内径为 1020 mm 和 1000 mm 时不均匀系数 整体最小,但 *d*=1000 mm 时变化幅度较小;对比原 结构(图 10(c)),在出口压力为-6000 Pa时,*d*= 1000 mm 不均匀系数减小幅度最大,为 21.4%;在出口压力为-2000 Pa 时减小幅度最小,为 13.2%。

挡圈位置对速度场均匀性的影响如图 10(c) 所示。当 *l*=0 mm,即挡圈与配风仓出口内侧紧贴时,速度不均匀系数最小,该位置速度场均匀性相比于其余位置较优。

3.2.2 优化对比分析

通过上述分析,选择挡圈厚度 s=140 mm、内径 d=1000 mm 及相对位置 l=0 mm,改进后不同出口压 力大小下成型表面的速度分布云图如图 11 所示。 对比图 6,成型缺陷区域的速度数值集中已明显 改善。



图10 挡圈参数对速度场均匀性的影响。(a) 厚度对均匀性的影响,(b) 内径对均匀性的影响,(c) 相对位置对均匀性的影响,(d) 速度均匀性对比

Fig. 10 Influence of retaining ring parameters on the uniformity of velocity field. (a) Effect of thickness on uniformity, (b) effect of inner diameter on uniformity, (c) effect of position on uniformity, (d) velocity field uniformity comparison



图11 改进后成型面速度分布。(a) -2000 Pa, (b) -4000 Pa, (c) -6000 Pa, (d) -8000 Pa Fig. 11 Velocity distribution of improved forming surface. (a) -2000 Pa, (b) -4000 Pa, (c) -6000 Pa, (d) -8000 Pa

3.3 CFD-DEM 耦合分析

在 EDEM 中于入口处创建颗粒工厂,尺寸设置为 303 mm×440 mm。模拟产生颗粒总质量为 100 g, 生成速率为 0.1 kg/s,设置时间步长为 4×10⁻⁵ s。 FLUENT 中设置出口压力值为-8000 Pa,时间步长 设置为 0.004 s。迭代计算 300 步,总计算时间为 1.2 s。木浆的相关参数如表 4 所示。

表 4 参数汇总

Tab. 4 Parameter statistic

参数	数值
颗粒表面能	0.03
粒子间碰撞恢复系数	0.3
颗粒与钢板之间的碰撞恢复系数	0.2
颗粒间静摩擦系数	0.6
颗粒与钢板之间的静摩擦系数	0.65
颗粒间滚动摩擦系数	0.225
颗粒与钢板之间的滚动摩擦系数	0.15

T=1.2 s 时负压系统成型完毕,此时改进前后筛 网表面物料分布如图 12 所示。对比仿真结果, 图 12(a) 所示的成品边缘出现成型缺陷, 与实际情 况相吻合; 在物料质量及工作时间一致的前提下, 图 12(b) 所示的原缺陷区域的成型质量得到明显 改善。

3.4 实验验证

基于浙江某公司卫品生产线上的负压成型装置搭建实验平台,如图 13 所示。实验采用 60 目与 8 目的两层筛网组合方式,选择木浆(密度 750 kg/m³) 与高分子颗粒(聚丙烯、SAP 高吸水树脂,直径为 250~400 目)作为物料,混合比例为 9:1。

实验成品如图 13 所示。可以看出到经优化后的成型机构产出的成品边缘处质量较好,相对于原



图12 筛网表面物料分布。(a) 改进前,(b) 改进后



始装置得到了显著提升。与图 12(b) 所示 CFD-DEM 耦合数值模拟结果吻合良好。由此,进一步表明本 方法可准确再现负压成型机构中的气力输送过程, 可用于其产品成型缺陷问题的改进验证分析。

4 结论

本文提出了一种面向负压成型系统的缺陷改 进评价方法,并结合实际生产案例进行了验证。得 到如下结论

(1)在面向细微离散元的复杂机构成型缺陷问题中,可首先针对其气相在成型面的速度与压力分布进行研究。在缺陷区域建立监测点,结合不均匀系数对成型面的速度和压力均匀性进行判别,以此





为改进措施提供评估基础;

(2) 基于 FLUENT-EDEM 联合仿真结果, 通过 对比成型面缺陷区域的物料分布进一步评价改进 措施的可行性;

(3)将该方法应用于某纸尿裤棉芯层的负压成 型缺陷问题中,采用单因素法对改进措施进行综合 评价,讨论了挡圈厚度和内径对评价指标的影响规 律。当挡圈厚度 *s*=140 mm、内径 *d*=1000 mm 及相 对位置 *l*=0 mm 时,速度不均匀系数最大下降了 44.2%。经气固两相流仿真及实验验证,成型质量 得到了显著提升。

参考文献

- [1] Yuan J, Wu C, Li H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 320–329
- [2] Zhou L, Lv W, Bai L, et al. CFD-DEM study of gas-solid flow characteristics in a fluidized bed with different diameter of coarse particles[J]. Energy Reports, 2022, 8: 2376-2388
- [3] Zhou H, Tian X, Kou M, et al. Numerical study of fine particles behaviors in a packed bed with lateral injection using CFD-DEM[J]. Powder Technology, 2021, 392: 317–324
- [4] Nian T, Wu H, Takara K, et al. Numerical investigation on the evolution of landslide-induced river blocking using coupled DEM-CFD[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 104101
- [5] Ma C, Feng Y, Lin H, et al. CFD-DEM investigation of blocking mechanism in pre-packed gravel screen[J]. Engi-

neering Analysis with Boundary Elements, 2021, 132: 416-426

- [6] Hongtu Z, Ouya Z, Botao L, et al. Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation[J]. Powder Technology, 2021, 387: 48–60
- [7] Wang Z, Hurter S, You Z, et al. Influences of negative pressure on air-leakage of coal seam gas extraction: laboratory and CFD-DEM simulations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107731
- [8] Tang Z, Li X, Chen X, et al. Design of negative pressure spiral feeding device for tangential and longitudinal axial intersection of combine harvester[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 1–12
- [9] Peng H, Nie W, Zhang S, et al. Research on negative pressure jet dust-removal water curtain technology for coal mine cleaner production[J]. Fuel, 2022, 310: 122378
- [10] Bang J I, Park J, Choi A, et al. Evaluation of UR-UVGI system for sterilization effect on microorganism contamination in negative pressure isolation ward[J]. Sustainability, 2018, 10(9): 3192
- [11] Zhang Y, Han O, Li A, et al. Adaptive wall-based attachment ventilation: a comparative study on its effectiveness in airborne infection isolation rooms with negative pressure[J]. Engineering, 2022, 8: 130–137
- [12] Chen H. Dust generation mechanism and suppression method of spiral hopper in bulk discharging process based on CFD-DEM[D]. Wuhan University of Technology, 2019 (陈活枝. 基于CFD-DEM的散货卸料过程粉尘产 生机理及螺旋料斗抑尘方法[D]. 武汉理工大学, 2019.(in chinese))
- [13] Ji S, Ge J, Gao T, et al. Study on machinability of surface-

constrained softness abrasive flow based on CFD-DEM coupled method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(05): 129–141 (计时鸣, 葛江勤, 高涛, 等. 基于 CFD-DEM耦合的面约束软性磨粒流加工特性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(05): 129–141(in chinese))

- [14] Zhou J, Shangguan L, Xu L, et al. Mechanism and characteristics of light medium mixed flow pneumatic conveying for coarse particle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 308-319 (周甲伟, 上盲林建, 许兰贵, 等. 粗重颗粒轻介共流气力输送机理及特性[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 308-319(in chinese))
- [15] Chen L, Sun Z, Ma H, et al. Flow characteristics of pneumatic conveying of stiff shotcrete based on CFD-DEM method[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117109
- [16] Li T, Zhang H, Kuang S, et al. Experimental and numerical study of coarse particle conveying in the small absorber sphere system: overview and some recent CFD-

DEM simulations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 357: 110420

- [17] Zhang H, Li T, Huang Z, et al. Investigation on vertical plug formation of coarse particles in a non-mechanical feeder by CFD-DEM coupling method[J]. Powder Technology, 2018, 332: 79–89
- [18] Zhou J, Shangguan L, Gao K, et al. Pickup characteristics of lump non-spherical particles in an oscillating airflow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(31): 14145–14156
- [19] Du F, Guo Y, Wang L, et al. EDEM-FLUENT coupled simulation of coal-gas outburst two-phase flow[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2021, 39(5): 1786–1802
- [20] Ji Y, Liu S, Li J. Experimental and numerical studies on dense-phase pneumatic conveying of spraying material in venturi[J]. Powder Technology, 2018, 339: 419–433