DOI: 10.3901/JME.2020.10.257

基于 DEM-CFD 颗粒体积分对深海扬矿电泵工作性能的影响*

刘少军^{1,2} 李渊文^{1,2} 胡小舟^{1,2}

(1. 中南大学机电工程学院 长沙 410083;

2. 中南大学深圳研究院 深圳 518000)

摘要: 在以往的 CFD 研究中很少考虑颗粒在固液两相流流动中的碰撞。为了弥补不足,采用 DEM-CFD 耦合的方法进行数值模拟,充分考虑颗粒的碰撞以及颗粒与流体之间的相互作用,更加接近实际工况。研究结果表明,在泵内随着颗粒体积的增加泵内流动紊乱,碰撞增加,流道中固液两相流混合不均匀,导致泵的扬程,效率下降。试验数据与模拟数据相近,证明了模拟方法的可行性。通过 DEM-CFD 的方法对未来深海采矿固液两相流的研究提供参考。

关键词: 深海采矿; 扬矿电泵; 颗粒; DEM-CFD; 数值模拟

中图分类号: TH311

Effect of Particle Volume Fraction on the Performance of Deep-sea Mining Electric Lifting Pump Based on DEM-CFD

LIU Shaojun^{1,2} LI Yuanwen^{1,2} HU Xiaozhou^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2. Shenzhen Research Institute, Central South University, Shenzhen 518000)

Abstract: Particles' collision in solid liquid two-phase flow has not been taken into consideration in former CFD reserches. To make up for the deficiency, DEM-CFD is adopted for numerical modeling which considers particles' collision and interaciton between particles and the flow. The result shows that enlargement of particles increases flow turbulence, collision and makes the solid liquid two-phase flow uneven. This leads to decrease of lifting and efficiency. The experimental data are close to the modeling data, so the DEM-CFD modeling method is proved to be a feasible way to research solid liquid two-phase flow in deep sea mining.

Key words: deep-sea mining; electric lifting pump; particle; DEM-CFD; numerical simulation

0 前言

深海金属矿产资源被认为是近几十年最重要的矿产资源,作为现阶段尚未开发的区域,已经被各国作为重要的战略目标。世界各国在研发过几种开采系统,其中管道提升法因其优越性被认为是最有发展前景的开采方法。近几年间,韩国对管道提升系统进行了采料试验。同时,韩国科研人员对陆地离心泵进行了分析,研制出了两级混流泵,在水深 100 m 的海域进行了采矿试验。PARK 进行了四级

泵流道的固液两相流的数值模拟,研究了其工作性能。美国与澳大利亚,合作研究了 1.5 km 管道采矿系统。近年来,采用 CFD 方法对离心泵进行固液两相流流动进行研究已成为热点,然而离心式渣浆泵与扬矿泵的结构差别较大,不能满足深海采矿的技术要求,在以往的研究中可以发现离心式渣浆泵扬程低,浆体从泵体的轴线方向流入沿切线方向流出,性能和结构上均不能满足深海采矿的要求。因此,需要开发一种完全不同于目前陆地固液两相管道输送泵的新型高扬程粗颗粒输送电泵^[1-4]。

深海扬矿电泵与一般的固液两相浆体管道输送相比,深海采矿电泵具有如下特点和要求。

- (1) 高扬程: 输送高度为数千米。
- (2) 粗颗粒: 输送固体粒度最大达数十毫米。

* 国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0304103-4)。20190209 收到初稿, 20191203 收到修改稿

(3) 轴向流: 输送泵须串接在输送管线上, 要求泵内粗颗粒浆体流动方向与泵轴方向相同。

(4) 可回流: 为了整个采矿系统的安全, 要求在停泵后, 泵具备排空的功能, 以避免管道系统的堵塞。

然而目前关于深海采矿的研究并不多见, 在国际上, 仅有德国 KSB 公司和日本等进行了相关研究。但由于技术保密原因, 研究成果鲜有报道, 国内的深海采矿的研究也不多。由于扬矿泵在工作过程中, 叶片进行高速旋转运动, 颗粒在叶片流道区域不会发生堵塞; 但是导叶处于静止状态, 颗粒容易在导叶流道区域发生聚集进而出现堵塞流道的问题。本文主要通过 EDEM-FLUENT 耦合, 对深海扬矿电泵进行固液两相流的数值模拟, 在不同的颗粒体积分数下, 研究泵内固体颗粒运动的规律对扬矿泵外特性的影响, 为深海扬矿电泵提高效率, 减少泵内各部件的磨损以及扬矿泵的优化设计等问题提出理论依据^[5-11]。

不同体积分数的颗粒使扬矿泵流道流场发生变化, 对其外特性产生影响。为研究不同及体分数颗粒对于泵内流场的影响, 国内外许多学者对固液两相流进行数值模拟与试验等方法进行了研究^[12]。目前国内外在对固液两相流流动计算时, 大多采用双流体模型进行计算^[13]。这在固体颗粒较小时比较准确, 但是在深海采矿中颗粒的体积效应无法忽略, 利用上述这种方法进行 CFD 数值计算与实际工况相差较大, 无法得到较为精确的结果。

CHAUMEIL 等^[14]利用 EDEM-CFD, 模拟了胶体颗粒的聚集与沉降, 研究了不同速度粒径与浓度的影响, HE 等^[15]的论文中提出了用 EDEM-CFD 对气固两相流进行研究, EBRAHIM 等^[16]通过 EDEM-CFD 对固液两相流湍流动能进行研究, 这些对两相流的研究都得到了较好的成果, 然而将 EDEM-CFD 运用的深海采矿固液两相流的研究较少。

本文利用 EDEM 建立颗粒模型, 通过与 FLUENT 的耦合, 考虑颗粒的在流体中的体积效应, 建立双向数据交换, 模拟颗粒与颗粒, 颗粒与液相之间深海采矿泵中发生的变化, 能够对深海采矿固液两相流的研究提供一种数值模拟方法。

1 粗颗粒在泵流道内的流动

1.1 粗颗粒在泵内的受力

粗颗粒结核在泵叶片中的受力和运动状况极为复杂。结核颗粒在叶轮入口以低于液相的速度进入

叶轮流道, 进入流道后由于其质量大引起的惯性亦大, 其牵连速度的加速过程要落后于液相, 因而引起颗粒向叶片工作面集聚的倾向, 这种落后作用产生的集聚倾向与颗粒直径的大小有一定的关系。颗粒粒径的增大对其运动轨迹的影响也加大, 粗颗粒脱离叶片的工作面, 有向叶片背面靠近的趋势。集聚的固体颗粒在叶片工作面的撞击下, 获得加速而向叶片的背面和出口方向运动, 并将其能量传递给液相。同时叶片流道中液相会产生与叶轮角速度方向相反的轴向旋涡, 结果使靠近叶片工作面相对合成速度减小, 靠近叶片背面的相对合成速度增大, 如图 1 所示。叶片流道速度场的这一变化将使叶片工作面区的静压大于叶片背面区的静压、形成粗颗粒的旋转而产生 Magnus 作用力, 两者都将把固体颗粒由叶片工作面推向叶片背面, 使固体颗粒以较大的合成相对速度从叶片的背面流出。因此, 浆体混合物在叶轮中的流动应属于分离流动: 即固、液两相的速度场不相同。产生这种变化的原因是固体颗粒在泵内受到的牵连运动的离心力、相对运动的离心力、科氏力都与颗粒粒径的三次方成正比。

图 1 叶片中部合成相对速度

固体颗粒在叶轮内的受力十分复杂, 叶轮内固体颗粒的受力分析如图 2 所示。

图 2 颗粒在叶轮内的受力分析

牵连运动的离心力为

$$F_r = m_p r \omega^2 \quad (1)$$

式中, m_p 为颗粒的质量。

相对运动的离心力是由颗粒运动轨迹的弯曲引起

$$F_g = m_p \frac{V_{rs}^2}{R} \quad (2)$$

式中, R 为颗粒运动轨迹的弯曲半径。

科氏力

$$F_k = 2m_p \omega V_{rs} \quad (3)$$

颗粒运动轨迹切线 τ 和法线 n 方向的压力梯度力 $F_{p\tau}$ 、 F_{pn} 分别为

$$F_{p\tau} = c_p \frac{\partial P}{\partial \tau} \quad (4)$$

$$F_{pn} = c_p \frac{\partial P}{\partial n} \quad (5)$$

式中, c_p 为固体颗粒的体积。

摩擦力是由固体颗粒与液相的速度差形成的, 考虑到叶轮内的流动均系紊流, 因此液相流的摩擦力为

$$F_f = \frac{1}{2} C_D a_s \rho_f \Delta V_r^2 \quad (6)$$

式中, a_s 为颗粒的面积。如图 2 所示, 液相的摩擦力在固体颗粒运动轨迹方向 τ 和法线方向 n 的分量分别为

$$F_{f\tau} = \frac{1}{2} C_D \rho_f a_s (V_{rf} \cos \Delta \alpha - V_{rs}) (V_{rs}^2 + V_{rf}^2 - 2V_{rf} \cos \Delta \alpha)^{1/2} \quad (7)$$

$$F_{fn} = \frac{1}{2} C_D \rho_f a_s V_{rf} \sin \Delta \alpha (V_{rs}^2 + V_{rf}^2 - 2V_{rs} V_{rf} \cos \Delta \alpha)^{1/2} \quad (8)$$

1.2 叶轮内粗颗粒-液体两相流动方程

泵作为旋转流体机械, 采用以叶轮的竖直方向旋转轴为 z 轴的旋转坐标系, 在该坐标系下液相相对速度的连续方程和 N-S 方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f u_{fj}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f u_{fj}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f u_{fj} u_{fj}) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[(1 - C_{vc}) p - \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \right] +$$

$$\rho_f g_{fi} + \frac{\partial \tau_{fij}}{\partial x_j} + \frac{\rho_s}{t_p} (u_{fi} - u_{pi}) - 2\varepsilon_{ijk} \omega_j u_{fk} \quad (10)$$

式中, u_{fj} 为液相相对速度; ω 为叶轮旋转角速度; ω_j 为叶轮旋转角速度分量; r 为到旋转轴的直线距离; t_p 为颗粒张弛时间。

粗颗粒-液体两相流中粗颗粒相的方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_s u_{pj}) = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s u_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_s u_{pi} u_{pj}) = \\ & -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(C_{vc} p - \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \right) + \rho_s g_{pi} + \frac{\partial \tau_{pij}}{\partial x_j} + \\ & \frac{\rho_s}{t_p} (u_{pi} - u_{fi}) - 2\varepsilon_{ijk} \omega_j u_{pk} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, u_{pi} 为固相相对速度。

2 数值模拟

2.1 三维建模

本文通过 Bladegen 建立叶轮与空间导叶的三维模型, 并运用 ICEM 进行网格划分, 表 1 为叶片与空间导叶的参数。图 3 为叶轮, 空间导叶的网格图, 网格数约为 2 000 000。将模型导入 EDEM 与 FLUENT 中进行耦合计算, 根据中国大洋多金属结核中试采矿系统的设计要求, 可知过流能力为 420 m³/h。固液两相流固相体积浓度分别设为 6%、8%、10%, 设置叶轮转速为 1 450 r/min, 颗粒粒径为 20 mm。这些值是根据矿冶研究院的进的两级扬矿电泵试验选择的。

表 1 叶轮与空间导叶的参数

	叶片	导叶
个数	3	4
进口内径/mm	105	200
出口内径/mm	200	105
进口外径/mm	240	218
出口外径/mm	390	240
进口叶片宽度/mm	65	56
出口叶片宽度/mm	75	78
进口叶片厚度/mm	8	7
出口叶片厚度/mm	9	7.5
进口安放角度/(°)	28	12

图 3 叶轮、空间导叶的网格图

2.2 EDEM-FLUENT 数值模拟

定义结核密度为 2 040 kg/m³, 设置海水密度为

$1\,031\text{ kg/m}^3$ 在 CFD 模拟计算中, 采用较多的湍流模型有标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型。在相关文献中可以找到这些模型的理论 and 适用范围。研究者普遍认为标准 $k-\varepsilon$ 的模型不适用于小流量工况。而 SST $k-\omega$ 模型考虑了湍流剪切力的逆压梯度边界层的运输, 所以这个模型更适用于求解分离流动的模拟。而且 SST $k-\omega$ 模型综合了 $k-\omega$ 湍流模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型在边界层内外计算的优点, 具有较好的计算准确性, 所以本文选择其作为计算模型。

2.3 计算结果分析

通过 EDEM-FLUENT 进行耦合计算, 采用欧拉-欧拉法, 考虑颗粒在流体中所占体积, 在 EDEM 中计算完成后数据导入 FLUENT 进行流体的计算, 通过这种计算方式将离散元法运用于深海采矿的粗颗粒于流体分析, 使计算更接近实际工况。图 4 为不同颗粒体积分数下流体与颗粒在泵中的运动情况。

由图 4 可以看出在, 颗粒的速度均小于流速, 没有发生超前的现象, 颗粒与流线的最大速度均发生在叶片末端。在颗粒体积分数为 6% 时, 颗粒的最大速度为 21.9 m/s , 流场最大速度为 24.3 m/s , 随着颗粒体积分数的增大, 颗粒与流体的速度增减小。在颗粒体积分数为 8% 时, 颗粒的最大速度达到 18.7 m/s , 流线的速度为 19.9 m/s 。在颗粒体积分数为 6% 与 8% 时, 颗粒能够比较好的通过泵, 在导

(c) 颗粒体积分数: 10%

图 4 颗粒与流线的运动情况

叶中的流线较为规则。随着颗粒体积分数的继续增大, 颗粒的过流能力有明显的下降。在颗粒体积分数达到 10%, 颗粒与流线的速度减小, 在导叶处出现了较大的旋涡导致水力损失。对于这种泵形, 颗粒从叶轮处被甩出后, 会碰到壁面, 造成大量的能量损失, 出口速度在 3 m/s 左右, 这也是深海采矿电泵效率不高的一个原因。

图 5 为叶片表面压力云图。由图 5 可以看出, 在叶片的工作面与非工作面上, 泵内的浆体的总压持续增大, 体现出了叶轮对混合流体做功的有效性, 在不同颗粒体积分数的浆体进入叶片流道后, 颗粒与浆体受到挤压使速度瞬间增大, 随着颗粒体积分数的增大叶片的压力逐渐

(a) 颗粒体积分数: 6%

(b) 颗粒体积分数: 8%

(a) 颗粒体积分数: 6%

(b) 颗粒体积分数: 8%

(c) 颗粒体积分数: 10%

图 5 叶片的总压

增加。在颗粒体积分数为 6% 时, 工作面的最大总压为 535.8 kPa, 非工作面的最大总压为 114.9 kPa, 随着颗粒体积分数增加到 10% 时, 工作面的最大总压为 825.6 kPa, 非工作面的总压为 308.5 kPa, 工作面的总压上升 289.8 kPa, 在非工作面的总压上升 193.5 kPa, 可以看出颗粒体积分数对工作面的影响要大于非工作面。

在颗粒体积分数为 6% 时, 在叶片的工作面及非工作面上, 浆体的总压随叶片径向变化的幅度不大, 而随着颗粒体积分数的增加, 浆体总压上升幅度增加。但是在颗粒体积分数达到 10% 时, 叶片的非工作面也受到较大的压力, 说明颗粒体积分数太大导致颗粒分布混乱, 在颗粒流动时容易造成叶片非工作面的磨损, 造成能量损失, 不利于颗粒的运输。而在颗粒体积分数为 8% 时, 在叶片非工作面上的总压要小于 10% 时, 同时工作面总压分布随着叶片径向方向增大, 可见在颗粒体积分数为 8% 时, 叶片对浆体的做功有效性较好。

图 6 为导叶表面的压力图。片出口处经过高速旋转, 浆体通过空间导叶进入下一级叶轮, 在这个过程中, 浆体的动能转换成压力能。导叶表面浆体总压逐渐下降, 在颗粒体积

(b) 颗粒体积分数: 8%

(c) 颗粒体积分数: 10%

图 6 导叶的总压

分数为 10% 时, 导叶的工作面与非工作面总压相差较大, 说明浆体混合不太均匀, 而随着颗粒体积分数的减小, 工作面与非工作面的总压逐渐减小, 说明浆体的混合较为均匀。

图 7 为不同颗粒体积分数在叶片上的颗粒分布。由图 7 可知, 在叶片的工作面相对位置为 0.3 时, 颗粒的个数最多, 容易造成颗粒的淤积, 随着叶片的径向方向颗粒个数总体呈现减少的趋势, 说明在叶片工作面相对长度在 0.3 处磨损最大。在叶片

(a) 颗粒体积分数: 6%

图7 不同颗粒体积分数在叶片上的颗粒分布

的非工作面上颗粒的个数随着叶片径向减小，在非工作面相对长度 0.9 处颗粒个数极低，因此，磨损较小。随着颗粒体积分数的增加颗粒个数在工作面与非工作面的颗粒个数增加，这种趋势对于工作面的影响要大于非工作面。

图8为不同颗粒体积分数在导叶上的颗粒分布。

图8 不同颗粒体积分数导叶的颗粒分布

由图8可知，在导叶的工作面上颗粒分布整体呈上升趋势，说明导叶设计合理，颗粒的流动比较符合导叶的流线，减小了与导叶工作面的碰撞，从而降低了磨损。然而在颗粒的体积分数为8%与10%时，颗粒个数在导叶工作面分布相差不大，但是在导叶的非工作面颗粒体积为10%时颗粒的个数远大于8%时，说明在颗粒体积较大时混合不均匀，造成颗粒之间的碰撞导致能量损失，不利于颗粒的运输。

图9为泵中各部位存在的颗粒碰撞次数。

图9 泵中各部位存在的颗粒碰撞次数

由图9可知，在叶片与导叶的链接处，由于颗粒与颗粒，颗粒与壁面存在接触，所以颗粒的碰撞次数最大，能量损失最为剧烈。在进入导叶后，颗粒体积分数从6%增加至10%时，颗粒的碰撞次数增加，说明在颗粒体积分数增加时，颗粒运动不规则，增加了颗粒之间的碰撞，这样不利于颗粒的运输，增加堵塞的可能性，减小了颗粒的过流能力。

3 试验验证

试验设备采用中国五矿长沙矿冶研究院的深海采矿试验设备，如图10所示。

图10 扬矿电泵

试验采用颗粒粒径为 20 mm 的锰结核, 流量为 420 m³/h, 分别选取颗粒体积分数为 6%、8%、10% 进行两相流试验。得到泵的扬程与效率, 将试验数据与仿真数据进行对比, 如表 2 所示。

表 2 试验与仿真数据表

体积分数(%)	6	8	10
试验扬程/m	42	39	34
仿真扬程/m	46	42	37
试验效率(%)	44	42	39
仿真效率(%)	52	49	43

由表 2 可知, 在试验过程中, 随着颗粒体积分数的增加, 泵的扬程减小, 同时工作效率减小, 数值模拟结果在扬程与效率上稍高于试验结果, 是因为在数值计算过程中颗粒作为绝对规则的圆球进行处理, 使颗粒之间的摩擦减小, 颗粒与水流之间的阻力减小。数值模拟结果与试验结果相差 10% 以内, 基本吻合, 证明数值模拟的结果是可行的。

4 结论

(1) 采用 EDEM-FLUENT 耦合的方法模拟固液两相流, 相对于一般的 CFD 方法, 考虑了颗粒的碰撞更加接近实际工况。

(2) 随着颗粒体积分数的继续增大, 颗粒的通过能力有明显的下降, 颗粒与流线的速度减小, 在导叶处出现了较大的旋涡导致水力损失。

(3) 在不同的颗粒体积分数下, 可以看出颗粒体积分数的增加对工作面的影响要大于非工作面。颗粒体积分数太大导致颗粒分布混乱, 在颗粒流动时容易造成叶片非工作面的磨损, 造成能量损失, 不利于颗粒的运输。

(4) 颗粒体积分数的增加, 在泵中颗粒运动越加不规则, 增加了颗粒之间的碰撞, 导致了泵扬程与效率的降低。不利于颗粒的运输, 减少了颗粒的过流能力, 在颗粒体积分数达到 10% 以上时可能会产生大量的颗粒淤积, 从而出现堵塞的现象。

(5) 通过 DEM-CFD 的仿真与试验对比, 说明了该方法的可行性, 为深海采矿固液两相流的仿真计算能够提供较好的参考。

参 考 文 献

- [1] 李哲免. 扬矿电泵内流场数值模拟及性能预测[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
LI Zhehuan. Lifting motor pump's internal flow field numerical simulation and performance prediction[D].
- [2] 唐达生, 阳宁, 龚德文, 等. 深海采矿锰结核泵的试验研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(4): 101-107.
TANG Dasheng, YANG Ning, GONG Dewen, et al. Experimental study of manganese nodules pump in deep-sea mining[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(4): 101-107.
- [3] 杨敏官, 王兴宁, 高波, 等. 离心泵内部非定常水力激励特性[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(12): 1023-1028.
YANG Minguan, WANG Xingning, GAO Bo, et al. Unsteady hydrodynamic excitation characteristics in centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(12): 1023-1028.
- [4] 袁建平, 付燕霞, 刘阳, 等. 基于大涡模拟的离心泵蜗壳内压力脉动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 310-314.
YUAN Jianping, FU Yanxia, LIU Yang, et al. Analysis on pressure fluctuation within volute of centrifugal pump based on large eddy simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 310-314.
- [5] 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
WANG Guoqiang. Discrete element method and its practice on EDEM[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.
- [6] 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
WANG Guoqiang. Discrete element method and its practice on EDEM[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.
- [7] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法仿真分析[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
HU Guoming. Discrete element method simulation analysis of particle systems[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010.
- [8] 李映. 离心泵内部固液两相流动数值模拟与磨损特性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
LI Ye. Numerical simulation and wear characteristics of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pumps[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [9] 李亚林. 变曲率流道内固液两相 CFD-DEM 方法及在大型脱硫泵中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
LI Yalin. Solid-liquid two-phase CFD-DEM method in variable curvature flow channels and its application in large desulfurization pumps[D]. Zhenjiang: Jiangsu

- University, 2015.
- [10] 任立波. 稠密颗粒两相流的 CFD-DEM 耦合并行算法及数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- REN Libo. CFD-DEM coupled parallel algorithm and numerical simulation of dense particle two-phase flow[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [11] QIU Liuchao, WU Chuanyu. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19-25.
- [12] 李好婷. 基于 CFD-DEM 阶梯微通道内颗粒流动特性研究[J]. 辽宁化工, 2017, 46(11): 1128-1131.
- LI Haoting. Study on particle flow characteristics in step microchannels based on CFD-DEM[J]. Liaoning Chemical Industry, 2017, 46(11): 1128-1131.
- [13] 张科. 复杂稠密气固两相流动的 CFD-DEM 模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHANG Ke. CFD-DEM simulation of complex dense gas-solid two-phase flow [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [14] CHAUMEIL F, CRAPPER M. Using the DEM-CFD method to predict Brownian particle deposition in a constricted tube[J]. Particuology, 2014, 15(4): 94-106.
- [15] HE Yi, BAYLY A E, HASSANPOUR A. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows[J]. Powder Technology, 2018, 325(1): 620-631.
- [16] EBRAHIMI M, CRAPPER M. CFD-DEM simulation of turbulence modulation in horizontal pneumatic conveying[J]. Particuology, 2017, 31(1): 15-24.
-
- 作者简介: 刘少军, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为深海采矿。
E-mail: csulishaojun@163.com
- 李渊文, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为深海采矿固液两相流。
E-mail: liyuanwen@csu.edu.cn
- 胡小舟(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为深海采矿。
E-mail: csu_huxiaozhou@163.com