

流化床内细长颗粒\惰性物料混合流化特性研究

蔡 杰¹ 李奇贺¹ 袁竹林²

(1. 南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 东南大学 能源研究所, 江苏 南京 210096)

[摘要] 将空气和惰性物料(石英砂)处理成连续相,采用欧拉方法计算,将细长颗粒(秸秆)视作离散相,采用拉格朗日方法追踪其运动轨迹,从而建立起固相分相模型.基于此模型数值研究了流化床内细长颗粒\惰性物料混合流化特性.研究发现,在提升管内,由中心向壁面附近区域,细长颗粒的数量浓度有明显的增加;在充分发展区域,细长颗粒的数量浓度分布与提升管入口处浓度分布相似;细长颗粒的取向分布有明显的趋向性,以近于竖直姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比明显占优势.

[关键词] 细长颗粒(秸秆) 流化特性 细长颗粒\惰性物料混合流化 固相分相模型

[中图分类号] TK16 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)03-0044-06

Research on Fluidization Characteristics of Mixture of Slender Particles and Inert Materials in a Fluidized Bed

Cai Jie¹, Li Qihe¹, Yuan Zhulin²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Thermal-Energy Institute, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, air and inert materials are treated as continuous phases and disposed with Euler method, slender particles of straw are considered as discrete phase whose movement tracks are traced with Lagrange method, and so a model of part phase of solid is found. Afterward, the fluidization behaviors of mixture of slender particles and quartz sands in a fluidized bed were simulated. It is found that there are evident axial increases of number concentration of slender particles from the central regions to the near-wall regions, in the fully-developed regions, the number concentration of slender particles is identical to the initial number concentration of slender particles in entrance of the riser, the orientation distribution of fluidized slender particles has distinct tendency, and the number percent of slender particles with small Nutation angle is dominant.

Key words: slender particle of straw, fluidization characteristics, mixture of slender particles and inert materials, model of part phase of solid

按流化物料分,可以将细长颗粒的流化划分为单一细长颗粒的流化及细长颗粒和惰性物料的混合流化两种形式.发展生物质秸秆流化床燃烧技术对于我国这样煤炭资源相对短缺,生物质资源非常丰富的国家来讲具有非常重要的意义.由于生物质秸秆空隙率大、密度小,因此大多数细长形生物质秸秆较难流化,有些甚至自身不能形成流化,需要选用与燃烧生物质流化特性相匹配的惰性床料,如砂、燃烧炉渣作为流化媒体,即媒体流化床燃烧技术^[1-3].媒体流化床燃烧技术是典型的气-固-固三相流问题,流化床内有空气、惰性床料和细长形的秸秆燃料.由于细长颗粒是典型的非球形颗粒,不仅有位置参数,还有姿态参数,因此其受力运动远较球形颗粒的复杂^[4,5].因此,尽管细长颗粒的两相悬浮流的理论研究很多,但仍需要继续深入^[6].目前细长颗粒两相悬浮流的理论模型全部是单相耦合模型,即仅考虑流场对颗粒相的曳力作用,而颗粒相对流场的反作用被忽略^[7].细长颗粒流化特性的理论研究更是处于起步阶段,在国内外基本处于盲点.现有的多相流模型处理气-固-固三相流问题还非常困难^[8,9],而细长颗粒的三相流理论研究更是复杂.由于混合流化主要考虑的是细长颗粒物料的流化特性,而惰性物料的作用是为了改善细长颗

收稿日期: 2011-04-28.

通讯联系人: 蔡 杰, 博士, 讲师, 研究方向: 气固两相流动的数值研究. E-mail: nnucj@163.com

粒的流化, 因此本文采用将空气和惰性物料都视为连续相, 采用欧拉 - 欧拉方法计算两相混合流场, 采用拉格朗日方法追踪细长颗粒的运动轨迹, 从而建立细长颗粒流化运动的固相分相模型. 并且, 采用此模型研究了细长颗粒和惰性物料的混合流化条件下细长颗粒的流化特性.

1 连续相模型

Mixture 模型允许相之间互相贯穿, 所以对一个控制容积的 i 相的体积分数 α_i 可以是 0 和 1 之间的任意值, 取决于 i 相所占有的空间. Mixture 模型求解的是混合相的连续性方程和动量方程. 混和物模型可用于两相流或多相流(流体或颗粒)的模拟. Mixture 模型的应用包括低负载的粒子负载流、气泡流、沉降以及旋风分离器. Mixture 模型也可用于没有离散相相对速度的均匀多相流. 本文主要研究细长颗粒在空气和石英砂联合作用下的流化特性, 因而需要知道每个控制容积中各相的平均速度. 因此, 本文采用混和物模型计算空气 - 石英砂混合流场. 连续相的模拟由 Fluent6.0 完成, 并采用 segregated solver 进行计算. 计算的初值根据实验实际流化床入口风速确定, 计算初始阶段采用小松弛因子, 之后逐渐加大松弛因子以加快收敛.

1.1 混合物的连续方程^[10]

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m) = 0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{u}_m 是质量平均速度 / (m/s).

$$\mathbf{u}_m = \frac{\sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i}{\rho_m}, \quad (2)$$

式中 ρ_m 是混合密度 / (kg/m³).

$$\rho_m = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i. \quad (3)$$

1.2 混合物的动量方程

Mixture 模型的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得. 它可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{u}_m + \nabla \mathbf{u}_m^T)] + \\ & \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_{dr_i} \mathbf{u}_{dr_i} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 μ 是相数; \mathbf{F} 是体积力 / N; μ_m 是混合粘度 / (Pa · S); $\mu_m = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \mu_i \cdot \mathbf{u}_{dr_i} = \mathbf{u}_i - \mathbf{u}_m$ 其中 \mathbf{u}_{dr_i} 是 i 相的漂移速度 / (m/s).

1.3 体积分数方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_{dr_i}). \quad (5)$$

限于文章篇幅, 细长颗粒的受力、运动及碰撞模型以及具体实验参数在此不再赘述, 详见本人之前发表的文章^[11-13].

2 实验验证

为验证数值计算结果, 本文通过高速摄像手段进行了实验研究. 实验设备系统图如图 1 所示.

本实验所需风量较大, 因此选用 HC 型回转式鼓风机供给空气. 此鼓风机的额定风量为 60 m³/min, 额定压力为 5 000 mm 水柱, 额定功率为 75 kW, 额定转速为 1 050 r/min. 空气由鼓风机送出, 经阀门及浮子流量计控制, 进入床层底部的风室, 经布风板上的小孔, 再由过滤网网孔进入床内.

数字图像采集系统用于实时抓拍细长颗粒在床体内的流化运动姿态. 实验完成后对所拍摄的图像进行数据处理和分析. 数字图像采集设备为快速高分辨率数码相机 Nikon 5000 和 Nikon Coolpix p2, 可实现 3 帧高速连拍、16 帧高速连拍、40 帧高速连拍及 100 帧高速连拍. 为了提高照片的清晰度, 本文还专门在实

验床体后面布置了幕布,在床体侧面布置了 500 W 的夜间摄像专用新闻灯. 本文实验中采用 100 帧高速连拍,每次抓拍一组 100 张照片. 实验照片如图 2 所示.

表 1 实验物料物理特性

Table 1 Characteristics of experimental materials

类型	直径/m	长度 l/m	真实密度/ (kg/m ³)	表观密度/ (kg/m ³)
物粒 1	0.002	0.024	600	450
物粒 2	0.002	0.02	600	450
物粒 3	0.002	0.016	600	450
物粒 4	0.002	0.012	600	450

2.1 两相流场矢量图

图 3 为 5 m/s 入口风速条件下几个不同时刻的空气 - 石英砂两相流场的混合速度场分布图. 从图 3 中可以看出,受石英砂的添加量、石英砂及空气的双向耦合等因素影响,两相流场的混合速度场分布比单相空气流场的速度场分布复杂得多,混合速度场的分布较为不均匀. 在混合流场的某些局部区域,甚至会出现较大的混合速度. 但总体而言,两相流场的速度场分布依旧是近壁区域的流速小于流场中心区域的速度,横向速度梯度比较明显.

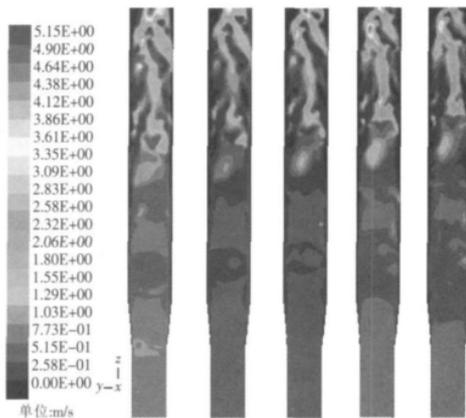
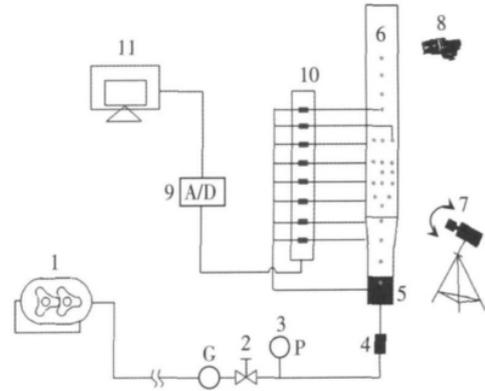


图 2 空气-石英砂两相流速度矢量分布图
Fig.2 Velocity vector chart of air-quartz sand two-phase flow



1. 回转式鼓风机; 2. 截止阀; 3. 流量计; 4. 流量均衡器; 5. 风室; 6. 实验床体; 7. 高速照相机; 8. 夜间摄像新闻灯; 9. A/D 转换器; 10. 差压传感器; 11. 数据采集计算机

图 1 可视化细长颗粒流化特性实验系统图
Fig.1 Schematic diagram of visual experimental system

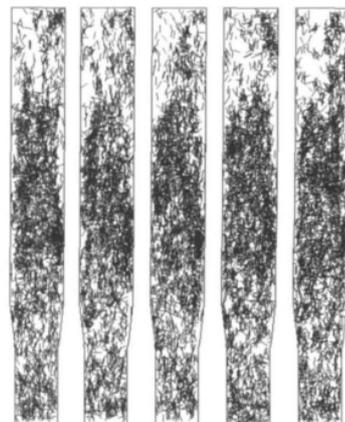


图 3 细长颗粒在混合流化条件下的流化模拟图
Fig.3 Simulated results of mixed fluidization of cylindrical particles and quartz sands

2.2 离散相流化运动模拟图

图 4 和图 5 分别为细长颗粒和石英砂的混合流化条件下细长颗粒的浓度分布的数值模拟效果图及实验照片. 由于提升管较大,高速摄像机无法拍整个管内的流化运动. 但从图 4 和图 5 可以发现,模拟效果图和实验照片中提升管的过渡区域的流化运动非常相似,模拟效果图与实验照片吻合较好,说明采用欧拉 - 欧拉 - 拉格朗日方法建立的固相分相模型能够较好反映细长颗粒和石英砂的混合流化特性,说明采用此方法建立细长颗粒和石英砂的混合流化运动模型具有较大程度的合理性. 另外,从图 4 中可以看出,由于空气 - 石英砂两相流场的不均匀性,导致细长颗粒在床体各径向区域向上运动的不均匀性. 在某瞬间时刻,床体一侧区域的细长颗粒数量浓度会明显大于另外一侧的细长颗粒数量浓度.

3 细长颗粒 \ 惰性物粒混合流化特性

3.1 细长颗粒的径向数量浓度分布

图 6 为不同床高区域细长颗粒的数量浓度沿径向位置变化规律. 由图 6 可知,在细长颗粒和石英砂的混合流化条件下,细长颗粒的径向浓度分布呈中间稀、四周浓分布,由中心向外,数量浓度逐渐增大,并在

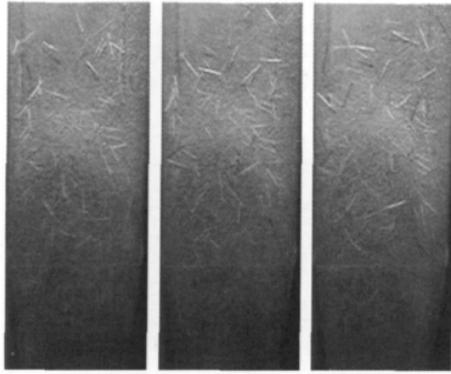


图4 细长颗粒和石英砂的混合流化实验照片

Fig.4 Experimental photos of mixed fluidization of cylindrical particles and quartz sands

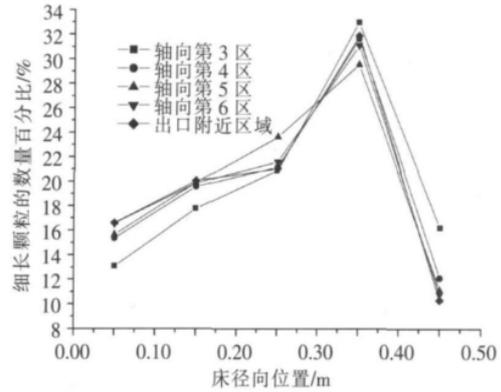


图5 细长颗粒数量浓度分布沿径向位置的变化

Fig.5 Change of number concentration with the radial positions

近壁区域达到最大值. 此颗粒的数量浓度分布特性与球形颗粒的径向数量浓度分布特性非常相似. 并且, 相比细长颗粒单一物料的流化, 在细长颗粒和石英砂的混合流化条件下, 床径向中心区域的细长颗粒数量百分比有所增加, 而近壁区域的细长颗粒的数量百分比有所减少. 不同径向区域之间的数量浓度差有所减小. 分析认为, 由于石英砂对空气场的作用, 混合流场的横向速度梯度发生了一些变化, 从而导致细长颗粒的径向数量浓度分布发生了变化.

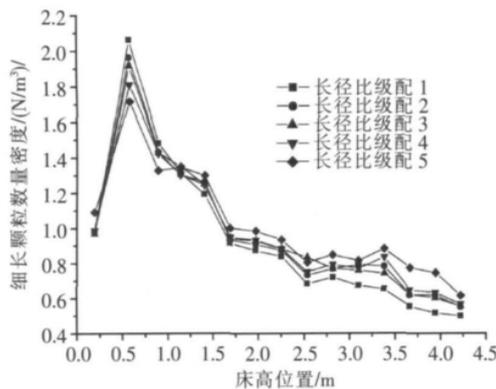


图6 不同床高区域的细长颗粒数量密度

Fig.6 Number density of cylindrical particles in different axial positions

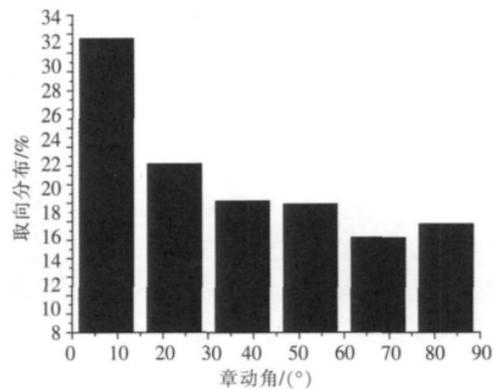


图7 细长颗粒在三相流场中的取向分布

Fig.7 Orientation of cylindrical particles in tri-phase flow field

3.2 细长颗粒的轴向数量浓度分布

本文数值研究了细长颗粒和石英砂的混合流化条件下细长颗粒的数量密度沿床高的变化规律. 将一定数量4种不同长径比的细长颗粒按5种长径比级配送入床体内进行流化, 并统计其中长径比为12的细长颗粒在各个床高区域的数量密度. 图7显示了长径比为12的细长颗粒在不同床高区域的数量密度. 由图7可见, 在不同的床高区域, 细长颗粒的数量浓度变化较大. 由于当地流场风速的减小, 大长径比的细长颗粒会在某个床高区域大量聚集, 导致此处长径比为12细长颗粒的数量密度非常大, 而在其它区域的数量密度较小. 分析认为, 由于轴向数量密度受流化风速影响明显, 并且两相流场的轴向速度梯度与单一气场的轴向速度梯度比较类似, 因此导致两种情况下细长颗粒的数量密度沿床高的变化规律比较相似.

3.3 细长颗粒的取向分布特性

取向分布是指以各种姿态运动的细长颗粒占细长颗粒总量的百分比, 是细长颗粒流化运动特性中非常重要的一个特性参数. 图8为细长颗粒和石英砂的混合流化条件下, 三相流场中细长颗粒的取向分布. 从图8中可以看出, 在三相流场中, 以小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比占有明显的优势. 章动角是指细长颗粒的轴心与竖直方向的夹角, 夹角越小, 则细长颗粒越接近于竖直. 这与细长颗粒-空气两相流场中细长颗粒的取向分布特性总体趋势一致^[14]. 分析可知, 空气-石英砂两相流场中的速度分布尽管有局部的不均匀性, 但从总体上来看, 依旧有明显的沿轴向及径向的速度梯度, 从而导致细长颗粒

的取向分布特性具有明显的选择性,小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比占有明显的优势.

3.4 细长颗粒取向分布沿床高的变化

为获取取向分布沿床高的变化规律,文中沿轴向将提升管划分为 7 个数据统计区域,并对棱台(过渡区)以上各床高区域的取向分布分别进行统计分析.由于床层底部附近区域及棱台区域的流化受初始化影响较大,因此没有统计这两个区域的颗粒取向分布.图 9 为床体各床高区域内细长颗粒取向分布情况.由图 9 中可知,由棱台向上,在不同的床高区域,以 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量一直占明显优势,以大章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比则较小.这说明在各个床高区域,细长颗粒的取向分布的选择性都是比较明显的,均是以小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比占明显优势.随着床高的增加,以小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比一直呈逐渐上升的趋势,并在床的出口附近区域达到最大值.此结论与文献^[9]的结论是一致的.由此结论可知,要想使细长颗粒在床体内以小章动角姿态流化运动,以达到流化效果好的目的,就需要保证床体有足够的高度.

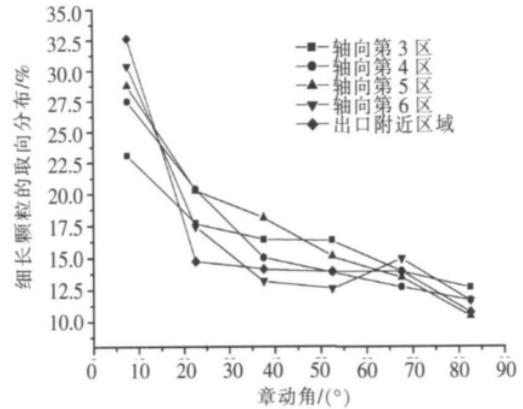


图 8 不同床高区域的细长颗粒取向分布

Fig.8 Orientation of cylindrical particles in different axial positions

4 结论

本章节将空气、石英砂都视为连续相,采用欧拉-欧拉方法计算,将细长颗粒视为离散相,采用拉格朗日方法跟踪计算,从而建立空气-石英砂-细长颗粒固相相模型,并采用此模型研究了细长颗粒和石英砂的混合流化条件下细长颗粒的流化运动特性.研究发现:

(1) 空气-石英砂-细长颗粒三相流场中,由提升管中心径向(水平)向四周,细长颗粒的数量浓度逐渐增大,并在提升管近壁区域达到最大值.这与球形颗粒流化状态下的径向浓度分布特征一致.

(2) 在充分循环流化的三相流场中,不同长径比的细长颗粒,在一定床高(轴向)以上区域,沿床高方向其数量浓度比与初始物料级配趋于一致.

(3) 空气-石英砂-细长颗粒三相流场中,细长颗粒的取向分布有明显的选择性,以小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比占明显的优势.

(4) 空气-石英砂-细长颗粒三相流场中,细长颗粒取向分布随沿床高始终都有明显的选择性,以小章动角姿态流化运动的细长颗粒的数量百分比占有明显优势.并且,随高度增加,这种选择性越加明显.

[参考文献](References)

- [1] 王秀丽. 秸秆发电在我国的发展态势分析[J]. 水利电力机械, 2007, 29(7): 30-32.
Wang Xiuli. Analysis of development prospect of straw power generation in China[J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery, 2007, 29(7): 30-32. (in Chinese)
- [2] 张广全, 董建勋, 肖艳. 秸秆直燃发电技术的特点和工艺探索[J]. 东北电力技术, 2007(8): 38-40.
Zhang Guangquan, Dong Jianxun, Xiao Yan. Exploration of characters and crafts of direct combustion power technology of straw[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007, 28(8): 38-40. (in Chinese)
- [3] 王振江, 周长鲜. 农作物秸秆等燃烧直燃发电技术的几个关键问题[J]. 四川电力技术, 2006, 29(6): 82-85.
Wang Zhenjiang, Zhou Changxian. Some key problems of direct combustion power technology of straw[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2006, 29(6): 82-85. (in Chinese)
- [4] 石兴. 纤维悬浮混合层及柱状粒子运动直接模拟的研究[D]. 杭州: 浙江大学航空航天学院, 2002: 13.
Shi Xing. Research on the mixing layer of fiber suspensions and direct simulation of cylindrical particles[D]. Hangzhou: School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, 2002: 13. (in Chinese)
- [5] 王叶龙, 林建忠, 石兴. 柱状粒子间相互作用对沉降运动的影响[J]. 自然科学进展, 2004, 14(1): 39-45.
Wang Yelong, Lin Jianzhong, Shi Xing. Effects of interaction of cylindrical particles on sedimentation of cylindrical particles

- [J]. Progress in Natural Science ,2004 ,14(1) : 39-45.
- [6] You Z J ,Lin J Z ,Shao X M , et al. Stability and drag reduction in transient channel flow of fiber suspension [J]. Chin J Chem Eng ,2004 ,12(3) : 319-323.
- [7] Zhou K ,Lin J Z. Numerical research on the 3D fiber orientation distribution in arbitrary planar flows [J]. Prog Nat Sci ,2007 ,17(11) : 1 357-1 362.
- [8] 张凌新. 纤维悬浮流中粒子取向分布及其对本构关系的影响 [D] . 杭州: 浙江大学航空航天学院 2005: 9.
Zhang Linxing. The orientation distribution of fiber suspensions and its effect on the constitutive relationship [D]. Hangzhou: School of Aeronautics and Astronautics , Zhejiang University ,2005: 9. (in Chinese)
- [9] 林建忠 游振江 石兴. 混合层中柱状粒子运动的研究 [J]. 工程热物理学报 2003 24(6) :972-975.
Lin Jianzhong ,You Zhenjiang ,Shi Xing. Research on the motion of cylindrical particles in mixing layers [J]. Journal of Engineering Thermalphysics 2003 24(6) :972-975. (in Chinese)
- [10] 蔡杰 徐大勇 吴暄 等. 细长颗粒流化过程取向性的数值模拟研究 [J]. 中国电机工程学报 2007 27(29) : 34-39.
Cai Jie ,Xu Dayong ,Wu Xuan , et al. Numerical simulation on orientation of slender particles during the process of fluidization [J]. Proceedings of the CSEE 2007 27(29) : 34-39. (in Chinese)
- [11] 蔡杰 凡凤仙 吴暄 等. 颗粒间碰撞对气固两相流中细长颗粒流化的取向分布的影响 [J]. 中国电机工程学报 2008 ,28(17) : 66-69.
Cai Jie ,Fan Fengxian , Wu Xuan , et al. Effects of Inter-particle collisions on the orientation distribution of slender particles in gas-solid flows [J]. Proceedings of the CSEE ,2008 ,28(17) : 66-69. (in Chinese)
- [12] 蔡杰 彭正标 吴暄 等. 壁面约束对气固两相流中细长颗粒流化特性影响的数值研究 [J]. 中国电机工程学报 2008 ,28(23) : 71-74.
Cai Jie ,Peng Zhengbiao ,Wu Xuan , et al. Effects of wall on features of fluidization of slender particles in gas-solid flows [J]. Proceedings of the CSEE ,2008 ,28(23) : 71-74. (in Chinese)
- [13] Zak G. Estimation of three-dimensional fiber-orientation distribution in short-fiber composites by a two-section method [J]. Journal of Composite Materials ,2001 ,35(4) : 316-330.

[责任编辑: 刘 健]