

自由下落颗粒流流动特性的实验研究

任晓芬^{1,2}, 王 怡², 段梦婕², 初宗坤^{2,3}, 屈欣瑞², 曹莹雪²

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450099)

摘要: 为了更全面细致地阐明工业建筑中生产过程运输物料时的产生机理, 本研究运用实验方法通过改变下落高度及出流口径, 对颗粒流下落过程的轴心速度、颗粒流扩散规律进行了研究, 利用高速摄像仪对下落过程进行拍摄, 后处理软件 PCC2.14 对图片进行分析。结果表明: 自由下落颗粒流由稳定段向过渡段转变时, 轴心速度单调递增由过渡段向扩散段转变时, 轴心速度先增后减; 远离出流口处颗粒流扩散直径与高度之间呈线性规律变化; 颗粒流核心直径与扩散直径比随着高度增大而减小, 随着出流口径增大而增大, 该比值可以定量的分析流态的变化。本研究成果为碰撞过程的研究提供初始条件, 进而可预测并控制颗粒的扩散, 对散装物料输送过程粉尘的治理及保护工作环境提高工作人员健康水平具有重要的意义。

关键词: 实验方法; 自由下落; 颗粒流; 流动特性

中图分类号: TU 834

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0131-04

Experimental study on falling process characteristics of the free falling particle stream

REN Xiaofen^{1,2}, WANG Yi², DUAN Mengjie², CHU Zongkun^{2,3}, QU Xinrui², CAO Yingxue²

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei Univ. of Eng., Handan 056038, China;
2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Zhengzhou 450099, China)

Abstract: To illustrate the mechanism of dust emission during the industrial materials transfer process in industrial buildings, experimental investigation on the particle behavior of free falling particle stream collision process was conducted using a high speed camera. The software PCC2.14 was used to analyze the images. Results indicate that the centerline velocity of the particle stream monotonically increased from stable regime to transitive regime, increasing first and then decreasing from the transitive regime to the dispersive regime. The dimensionless dispersive diameter of the stream has a linear relationship to the dimensionless falling height and the empirical equation is obtained. The ratio between particle stream core diameter and falling disperse diameter decreased as the drop height increased, and increased as the drop outlet increased. The ratio could be used to analyze the variation of flow regimes quantitatively. The research provided initial condition for the collide process study. Thus the particle disperse could be predicted and controlled. It is important for improving the working environment condition and managing the dust from the bulk material transport system.

Key words: experimental method; free falling; granular stream; flow characteristics

在冶金、医药、水泥、化工、食品等行业存在散装物料转运、输送、装料、卸料等过程。此类过程会产生大量的粉尘。粉尘在工业建筑中是主要的污染源之一, 其不仅影响工作环境, 影响设备运行安全而且还威胁工人的身体健康。散装物料一般由大小不一的颗粒物组成, 运输的物料粒径较大时产生的粉尘会很快沉积, 而粒径较小

时粉尘在空气中停留时间较长甚至长时间悬浮。如果悬浮于工作区的粉尘粒径小于 $10\ \mu\text{m}$, 对工人的危害极大, 若颗粒本身具有毒性, 后果则更加严重。物料在运输过程中通常以自由下落、皮带转运、及气力输送等形式为主本文主要以物料自由下落形成的颗粒流为研究对象。

前人对自由下落颗粒流的相关研究主要包括

两个方面. 其一是粉尘量(粉尘率)的确定. Cowherd^[1]开发了一种实验装置对多种物料的产尘量进行分析. Plinke^[2-5]对影响粉尘量的各因素进行了分析得到了计算粉尘量的经验公式. Wypych^[6]认为热物料比冷物料产尘量多一个数量级. Liu^[7]对不同角度的导流板对粉尘量的影响做了研究. Heitbrink^[8]得到了不同碰撞面对粉尘量的影响程度. 其二是卷吸空气量及下落特性的研究. Hemeon^[9]首次利用单粒子运动受力对颗粒流的卷吸空气量进行计算. 随后, Tooker^[10]对压力项进行了修正. Cooper 和 Arnold^[11]对超大粒子和微小粒子的卷吸空气量做了理论分析. Liu^[12]对前人做的研究进行验证, 证明 Cooper 的公式更符合实际情况. 后来 Esmaili^[13]针对粗粒子展开了研究. Li^[14]利用 π 理论得出卷吸空气半经验公式. 随着计算机的快速发展, Uchiyama^[15-17], Liu^[18] 和 Ansart^[19] 分别对颗粒流场量进行分析, 并对卷吸空气量进行了预测, 使计算公式更加准确. 另外还有学者对断面直径^[13,20-21], 速度分布^[13,16,21-23], 破裂及成团^[24-26], 颗粒流表面波动^[27]等进行了研究. Wang^[28]发现颗粒流处于不同流态的流动特性对粉尘扩散特性有显著影响.

在物料自由下落并与接触面碰撞过程中, 固体颗粒与气流存在相互作用. 得到二者的作用规律, 进而对含尘气流进行人工控制是科学研究及工程利用的发展方向. 颗粒流下落过程极大影响碰撞之后粉尘的迁移规律, 为了明晰下落及碰撞过程的产生规律, 首先要明确下落过程颗粒流扩散及运动的特性. 因此本文以颗粒流下落过程为研究对象, 采用实验方法对氟化铝颗粒流下落流动规律进行研究, 借助可视化实验装置并利用高速摄像技术观察颗粒流运动的每一个细节, 通过对大量实验现象的观察和分析, 揭示颗粒流的流动速度及扩散规律. 在文献^[18-19]的研究基础上, 全面阐述下落颗粒流的流动特性, 为碰撞过程提供初始条件, 进而可预测并控制颗粒的扩散, 可对散装物料输送过程的粉尘治理、保护工作环境及提高工作人员健康水平具有一定指导作用.

1 实验原料与实验方法

颗粒流由料筒及与之连接的漏斗中流出, 料筒高度为 10 cm, 直径为 10 cm, 漏斗的锥角为 30°, 出流口径 d_0 从 1~8 mm 变化, 料筒和漏斗

利用导线与地面相连消除静电对颗粒流的影响. 为了防止室内空气流动的干扰, 颗粒流落入一个由有机玻璃制成的收集箱内. 收集箱底面积为 60 cm×60 cm, 高度随着颗粒流下落高度的变化而变化, 取 0.2~1.6 m.

利用 Phantom 公司生产的 Phantom V9.1 型高速摄像仪对颗粒流的流动形态进行连续拍摄, 拍摄速度为 300 帧/秒, 曝光时间为 3.3×10^{-3} s. 图片分辨率为 $1\,632 \times 800$, 实际拍摄的区域尺寸大概为 20 cm×60 cm. 为了得到清晰的图片, 两台 LED 灯光从正面照射拍摄区, 同时使用黑色背景以突出颗粒流的运动状态, 实验装置如图 1 所示. 利用软件 PCC2.14 对拍摄得到的图片进行分析和处理. 该软件的长度精度为 10^{-5} m, 速度精度为 10^{-5} m/s, 测量之前均利用标尺进行标定.

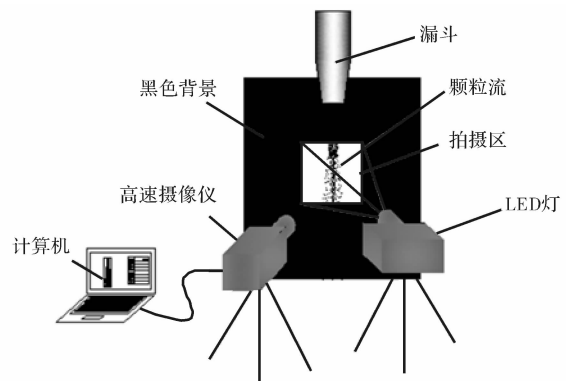


图1 图像采集系统

Fig. 1 Image gathering system

颗粒流由出口处的阀门控制, 开启阀门颗粒流从漏斗流出, 待颗粒流稳定之后进行拍摄. 通过改变下落高度及漏斗出流口径实现多工况测试, 具体参数见表 1 所示.

表1 实验参数及水平

Tab. 1 Experimental parameters and levels

实验参数	水平
下落高度 Z/m	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6
出流口径 d_0/mm	1, 2, 4, 6, 8

实验测试对象采用制铝行业主要原料氟化铝, 该物料是本课题组成员从某铝厂实地采集的制铝原料, 通过实验测得其真密度 ρ_p 为 $2\,838.08 \text{ kg/m}^3$, 堆密度 ρ_b 为 $1\,582.23 \text{ kg/m}^3$. 利用激光粒度分布仪(型号: LS230, 测试范围: $0.04 \sim 2\,000 \mu\text{m}$, 产地: 美国)得到物料的粒度分布规律.

2 实验步骤

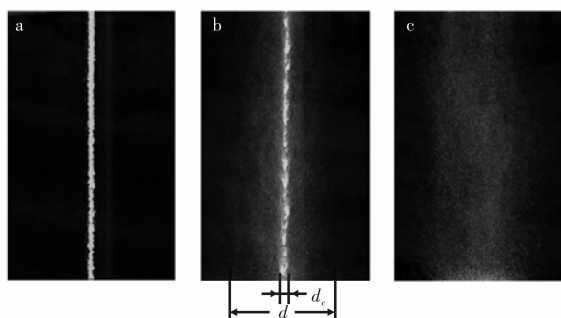
实验装置壁面为有机玻璃材料, 可清晰看见

颗粒流的流动,高速摄像机正对所测高度的颗粒流。每个高度及每个出流口径下拍摄时间为7 s。由于颗粒流下落及碰撞过程存在一定的随机性,我们对相同工况拍摄3次,然后对所得结果求平均。启动 Phantom V9.1 操作系统,设置好工作参数,调整光源及焦距直至标尺刻度清楚地显示在监视器上为止。然后启动实验装置,待颗粒流下落平稳后开始拍摄,将拍摄的图像信息转为.cine格式并存储。最后用 PCC2.14 图片播放软件打开采集的图像文件,通过不断重复使用播放、暂停和回放按钮观察颗粒流下落及碰撞过程的状态,通过两点法测量所需数据,为了保证实验复现性,将三次实验结果进行对比,将每次测量的数据求平均即可得到结果。

3 结果与讨论

3.1 流态变化规律

自由下落颗粒流流动状态可分为三个连续阶段(如图2所示):稳定段、过渡段及扩散段,详细描述可见文献[28]。图2中 d_c 表示核心直径, d 表示扩散直径, $d-d_c$ 即是颗粒边界层直径。下落各段特点与文献[18,20]研究成果相似。



(a: 稳定段, b: 过渡段, c: 扩散段)

图2 流态变化图($d_0=4$ mm)

Fig. 2 Three regimes of the falling particle stream

3.2 轴心处颗粒速度分布规律

从图3可知,当 $d_0=1$ mm时,随下落高度颗粒流轴心速度逐渐降低;当 $d_0=2$ mm和 $d_0=4$ mm时,轴心速度随下落高度先增后减;而当 $d_0=6$ mm和 $d_0=8$ mm时,轴心速度随下落高度逐渐增大,各结果相对误差均小于3%。产生不同现象的原因在于:在所测下落高度范围内,当 $d_0=1$ mm时,颗粒流基本处于扩散段,颗粒运动接近单粒子在空气中的自由下落过程,粒子所受阻力随高度逐渐增大粒子速度逐渐趋向沉降速度。而当 $d_0=2$ mm和 $d_0=4$ mm时,颗粒流几乎由过渡

段逐渐进入扩散段。颗粒流轴心颗粒的运动处于颗粒流向单粒子自由下落运动的过渡阶段;而当 $d_0=6$ mm和 $d_0=8$ mm时,颗粒流由稳定段逐渐进入过渡段,轴心处的颗粒流与空气接触很少,近似为真空中的自由落体运动。此结果与文献[19,25]相似但更全面的揭示了三个流态下颗粒流轴心速度的变化规律。

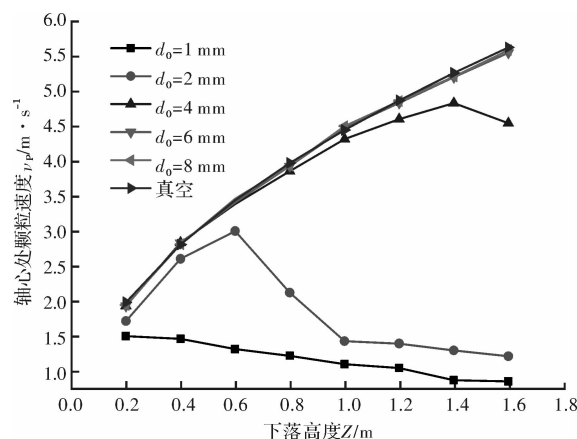


图3 颗粒流轴心速度变化图

Fig. 3 The centerline velocity of the particle flow versus the falling height

3.3 扩散直径(d)变化规律

由于卷吸空气量随高度逐渐增加,因此颗粒流扩散直径随着下落高度逐渐增大。分析实验结果可得 d 值,利用出流口径(d_0)对扩散直径(d)及下落高度(Z)进行无量纲化处理,结果列于图4,将实验结果进行拟合,可知 d/d_0 随着 Z/d_0 呈线性规律变化,得到公式(1):

$$d/d_0 = 0.0442(Z/d_0) + 3.2239 \quad (1)$$

该式使用范围为 $Z \geq 0.02$ m,其中 d_0 是出流口径, Z 是下落高度。

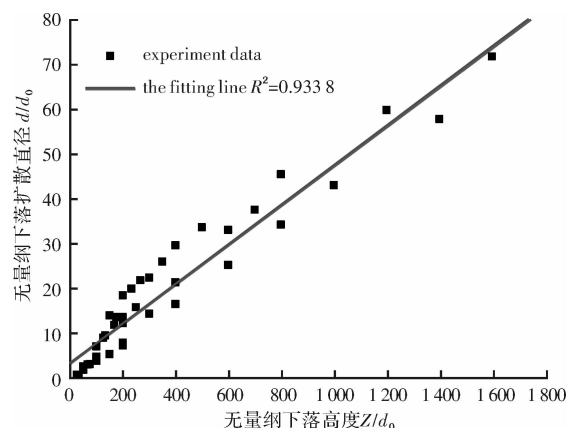


图4 d/d_0 随 Z/d_0 变化规律

Fig. 4 The variation of d/d_0 versus Z/d_0

在液体射流^[29]及射流作用下的颗粒流^[30]中 C 的取值大约为0.2左右,而在本文中该值约小一个数量级为0.0442,表明自由下落颗粒流的扩散程

度较液体射流及射流作用下的颗粒流的扩散程度小的多,与文献[20]中的0.06相比稍小一些。造成此结果的原因可能是本文研究对象的密度较大而粒径较小。

3.4 核心直径与扩散直径之比(d_c/d)变化规律

将实验所得核心直径 d_c 与下落扩散直径 d 之比随 Z 的变化列于图5中。由图可知,随 Z 增大 d_c/d 从1逐渐降低,直至降为0;随着出流口径 d_0 增大 d_c/d 逐渐增加。在所测工况中,仅 $Z=0.2$ m, $d_0=6$ mm和 $d_0=8$ mm时,核心直径与扩散直径之比 $d_c/d=1$ 。此时,颗粒流处在稳定段;而 $Z>0.6$ m, $d_0=2$ mm和 $Z>1.4$ m, $d_0=4$ mm时 $d_c/d=0$,此时二者处于扩散段。其他工况则均处于过渡段。测试相对误差小于10%。

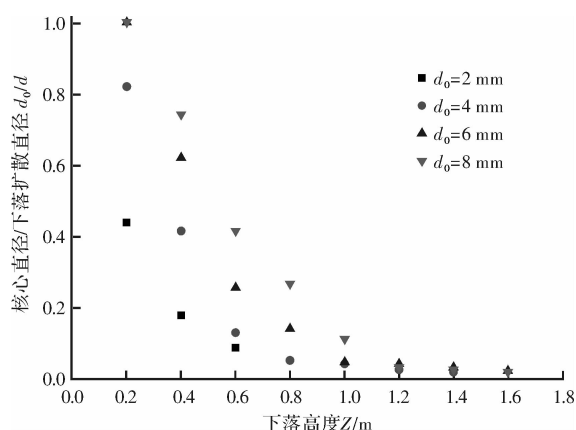


图5 核心直径与下落扩散直径比(d_c/d)随下落高度变化规律

Fig. 5 The variation of d_c/d versus Z

4 结论

本文利用实验方法对自由下落颗粒流下落过程的扩散特性进行了研究,得到了如下结论:

(1) 颗粒流由稳定段转为过渡段时,轴心速度与真空中自由下落颗粒速度相似,随下落高度增大而逐渐增大;从过渡段转为扩散段时,轴心速度介于真空及沉降速度之间,且随下落高度增大先增大后减小;当颗粒流处于扩散段时轴心速度逐渐趋近于沉降速度,且轴心速度逐渐减低。

(2) 远离出流口颗粒流扩散直径随着下落高度逐渐增大,随着出流口径的增大而增大,无量纲扩散直径与无量纲下落高度之间呈线性关系,并得到了经验公式。

(3) 颗粒流核心直径与扩散直径之比随着高度增大而减小,随着出流口径增大而增大,该比值可以定量的分析流态的变化。

参考文献 References

- [1] COWHERD C, GRELINGER M A, ENGLEHART P J, et al. An apparatus and methodology for predicting the dustiness of materials [J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1989, 50 (3): 123-130.
- [2] PLINKE M A E, LEITH D, HOLSTEIN D B, et al. Experimental examination of factors that affect dust generation[J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1991, 52 (12): 521-528.
- [3] PLINKE M A E, MAUS R, LEITH D. Experimental examination of factors that affect dust generation by using Heubach and MRI testers [J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1992, 53 (5): 325-330.
- [4] PLINKE M A E, LEITH D, GOODMAN R G. Particle separation mechanisms in flow of granular material [J]. Part. Sci. Technol., 1994, 12 (1): 71-87.
- [5] PLINKE M A E, LEITH D, BOUNDY M G. Dust generation from handling powders in industry [J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1995, 56: 251-257.
- [6] WYPYCH P, COOK D, COOPER P. Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants [J]. Chem. Eng. Process., 2005, 44: 323-326.
- [7] LIU Z, WU Z, FENG Z. Experimental investigation of dust amount from free falling particle stream affected by deflector curvature of dust suppression [J]. Adv. Mat. Res., 2014, 864: 1789-1792.
- [8] HEITBRINK W A, BARON P A, WILLEKE K. An investigation of dust generation by free falling powders [J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1992, 53 (10): 617-624.
- [9] HEMEON W C L. Plant and Process Ventilation [M]. New York: The Industrial Press. 1963.
- [10] TOOKER G E. Control fugitive dust emissions in material handling operation [J]. Bulk solids handl, 1992, 12 (2): 227-232.
- [11] COOPER P, ARNOLD P C. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material [J]. Kona, 1995, 13: 125-134.
- [12] LIU Z, WYPYCH P, COOPER P. Dust generation and air entrainment in bulk materials handling-a review [J]. Powder Handl. Process., 1999, 4 (4): 421-425.
- [13] ESMALI A A, DONOHUE T J, WHEELER C A, et al. A new approach for calculating the mass flow rate of entrained air in a freefalling material stream [J]. Part. Sci. Technol. Int. J., 2013, 31 (3): 248-255.
- [14] LI X, LI Q, ZHANG D, et al. Model for induced air-flow velocity of falling materials in semi-closed transfer station based on similitude theory [J]. Adv. Powder Technol., 2015, 26: 236-243.
- [15] UCHIYAMA T, NARUSE M. Numerical simulation of gas-particle two phase mixing layer by vortex method [J]. Powder Technol. 2002, 125: 111-121.
- [16] UCHIYAMA T. Numerical analysis of particulate jet generated by free falling particles [J]. Powder Technol., 2004, 145: 123-130.

(下转第144页)

- 23-25.
- [4] MARTIN M, FREESTONE IC, HUNT A, et al. Mass-Produced Mullite Crucibles in Medieval Europe Manufacture and Material Properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008 (6): 2071-2074.
- [5] SHI B P, JOHNSON R, RAO G V N, et al. Thermal anisotropic in sintered cordierite monoliths[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001(7): 140-155.
- [6] IWASAKI T, ABHUIT C. Bactericidal allophonic Materials prepared from allophone soil preparation and characterization of silver/phosphorus-silver loaded allophonic soecimens[J]. Appl. Clay. Sci., 2001(18): 123-134.
- [7] 代刚斌, 李红霞, 杨彬. 化学组成对合成堇青石显微结构和高温性能的影响[J]. 耐火材料, 2003(7): 63-65.
DAI Gangbin, LI Hongxia, YANG Bin. Effect of-chemical composition on microstructure and high temperature properties of cordierite [J]. Refractory Materials, 2003(7): 63-65.
- [8] 陈国华, 刘心宇. Bi_2O_3 对堇青石陶瓷的相组成、微观结构和性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2003 (9): 888-891.
CHEN Guohua, LIU Xinyu. Effect of Bi_2O_3 on phase composition, microstructure and properties of cordierite ceramics [J]. J Chem Ceram Soc, 2003 (9): 888-891.
- [9] 薛群虎, 刘民生, 徐维忠. 叶蜡石合成堇青石工艺研究 [J]. 耐火材料, 1999(33): 265-267.
XUE Qunhu, LIU Mingsheng, XU Weizhong. Research on the synthesis of cordierite with pyrophyllite [J]. Refractory Materials, 1999(33): 265-267.
- [10] SEMBIRING S, WASINTON S, SITUMEANG R, et al, Preparation of refractory cordierite using amorphous rice husk silica for thermal insulation purposes [J]. Ceramics International, 2016(42): 8431-8437.
- [11] BENHAMMOU A, HAFIANE Y E, ABOURRICHE A, et al, Influence of sintering temperature on the Microstructural and mechanical properties of cordierite synthesized from andalusite and talc [J]. Materials Letters, 2016(2): 198-201.

(编辑 桂智刚)

(上接第 134 页)

- [17] UCHIYAMA T, NARUSE M. Three-dimensional vortex simulation for particulate jet generated by free falling particles [J]. Chem. Eng. Sci., 2006, 61: 1913-1921.
- [18] LIU Z. Air entrainment in free falling bulk materials [D]. Wollongong: University of Wollongong, 2001.
- [19] ANSART R, DE RYCK A, DODDS J A, et al. Dust emission by powder handling: Comparison between numerical analysis and experimental results [J]. Powder Technol., 2009, 190: 274-281.
- [20] ANSART R, DE RYCK A, DODDS J A. Dust emission in powder handling: Free falling particle plume characterization [J]. Chem. Eng. J., 2009, 152: 415-420.
- [21] ANSART R, LETOURNEAU J, DE RYCK A, et al. Dust emission by powder handling: Influence of the hopper outlet on the dust plume [J]. Powder Technol., 2011, 212: 418-424.
- [22] OGATA K, FUNATSU K, TOMITA Y. Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment [J]. Powder Technol., 2001, 115: 90-95.
- [23] ZEREN Z, NEAU H, ANSART R, et al. 3D unstationary simulations of a free-falling particle jet using a granular-kinetic hybrid model [J]. Ventilation, 2012: 1-6.
- [24] WAITUKAITIS S R, GRUTJEN H F, ROYER J R, et al. Droplet and cluster formation in freely falling granular streams [J]. Phys. Rev. E. 2011, 83(1): 253-268.
- [25] MÖBIUS M E. Clustering instability in a freely falling granular jet [J]. Phys. Rev. E., 2006, 74 (1): 121-137.
- [26] ROYER J R, EVANS D J, OYARTE L, et al. High-speed tracking of rupture and clustering in freely falling granular streams [J]. Nature, 2009, 459: 1110-1113.
- [27] AMAROUCHENE Y, BOUDET J, KELLAY H. Capillarylike Fluctuations at the Interface of Falling Granular Jets [J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(21): 2539-2541.
- [28] WANG Y, REN X F, ZHAO J P, et al. Experimental study of flow regimes and dust emission in a free falling particle stream [J]. Powder Technol., 2016, 292: 14-22.
- [29] FISCHER H B. Mixing in inland and coastal waters [M]. Uew York: Academic Press, 1979.
- [30] 曹文广. 稠密气固两相射流的实验研究与数值模拟 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
CAO Wenguang. Experimental study and numerical simulation of dense gas-particle jet [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.

(编辑 桂智刚)