

文章编号:1671-6833(2007)03-0069-04

微粒羽流自由降落过程特性的探讨

赵永岭, 刘泽勤, 赵敬华, 王亚南, 孙尔雁, 姜胜磊

(天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 根据自由下落微粒羽流的运动特征, 对微粒羽流自由下落过程中卷吸空气的机理进行初步分析, 应用 Tomomi 给出的混合微粒模型及 Ogata 给出的单微粒模型与环境空气卷吸量实验值进行对比分析. 结果表明, 混合微粒模型对环境空气卷吸量的模拟值与实验值有较好的吻合性, 而 Ogata 给出的单微粒模型预测值低于实测值. 实验结果表明, 环境空气卷吸量随着微粒羽流下降高度的延伸而增加, 随着微粒流中微粒的密度及粒径的增大而减小.

关键词: 自由下落微粒流; 微粒羽流; 环境空气卷吸量

中图分类号: TB 131

文献标识码: A

0 引言

随着现代科学技术的不断发展, 环保意识日益增强, 对粉尘与空气污染机理的研究越来越受到科学界的重视. 由于自由下降的粉尘能产生一系列的问题, 如空气污染、职业病、增加火灾和爆炸的危险等^[1], 自由下降微粒在空气中的气固两相流研究成为新的基础研究领域. 在工业生产过程中, 常见到散料微粒的自由下落过程, 如图 1 所示. 微粒在自由下落过程中常会携带环境空气进入到微粒流中, 形成微粒羽状流. 通过对微粒羽流运动状况的研究分析, 可以掌握散料的物理参数和环境参数对散料微粒下降过程中所产生微粒粉尘的影响, 进一步推动该研究领域的工作.

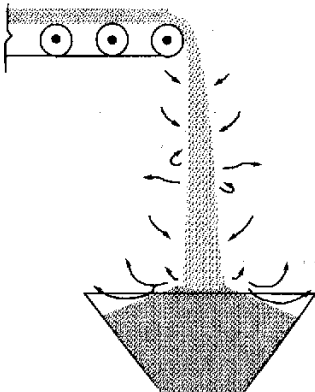


图 1 在传输过程中自由降落的散料微粒羽流

Fig. 1 The free falling bulk particle plume in working process

1 国内外对微粒自由下落过程中卷吸空气研究的发展概况

对自由降落微粒流中产生散射粉尘的研究可以追溯到上世纪初, 当时物理学家 Millikan, Einstein 等应用牛顿经典力学理论, 给出一些较为简单的计算模型; Hemeon 对自由下落微粒流的特性进行研究^[2]; Tooker 等对 Hemeon 的模型进行修正^[3]. 近年, Tomomi Uchiyama 采用二维涡旋模拟的方法分析粒子的自由降落过程中引起的扰动^[4]; Masaaki Naruse 在此基础上提出用二维数学方法研究二相湍流^[5]. 澳大利亚学者进行了微粒与空气关系的基础理论研究, 得出用于分析微粒羽流与空气关系的理论模型^[6-8]. 南开大学提出“二重源解析”技术^[9]; 同济大学采用微粒随轨道模型对尘源表面的粉尘在空气中的运动轨迹进行数值计算, 计算由开放性粉尘造成的空气含尘质量分数^[10]; 郑州大学的学者对大气中颗粒物总量的模拟计算得到较好的结果, 与环境监测数据有较好的一致性^[11].

笔者拟在前人研究的基础上, 通过实验、分析, 探讨微粒羽流自由降落的特性.

2 微粒自由下落过程中卷吸空气的机理分析

粉尘微粒的形状通常可以分为球形和非球形微粒两种. 当分析环境空气中的自由下落微粒流

收稿日期: 2007-03-13; 修订日期: 2007-04-13

基金项目: 天津市科技发展计划资助项目(043114411)

作者简介: 赵永岭(1985-), 男, 江苏扬州人, 天津商业大学研究生, 从事人工环境控制方面的研究工作.

时,需假设微粒间的相互碰撞和传热传质等在本研究中被忽略不计。

当微粒如图 2 所示做自由降落时,以图 2 中左侧的 A_1 、 A_2 和 A_3 为例,微粒流左侧为空气,当微粒在重力 g 的作用下自由降落时,微粒 A_1 、 A_2 和 A_3 左侧受到较其右侧更为明显的空气作用,即绕流阻力 F_D ,同时微粒会受到空气的浮力 F_B 的作用,这时 A_1 、 A_2 和 A_3 在竖直向上的方向上所受的合力为 $F(F = F_D + F_B)$ 。而处于微粒流中间的微粒此时则主要受空气的浮力 F_B 的影响,绕流阻力 F_D 对其作用很小。微粒 A_1 、 A_2 和 A_3 比中间的微粒有着较大的自由度,此时微粒 A_1 、 A_2 和 A_3 的运动就可以从整个微粒流中剥离出来,可视其在浮升力和重力作用下的运动。对于微粒 A_1 、 A_2 和 A_3 ,其左侧由于空气流的相对充分发展而产生的摩擦力比右侧的摩擦力要大得多,使得粒子 A_1 、 A_2 和 A_3 有顺时针旋转的趋势,趋势的大小主要由绕流阻力 F_D 而定。当 F_D 达到一定值时(F_D 主要取决于空气相对微粒的速度),粒子 A_1 、 A_2 和 A_3 就会在阻力的作用下旋转,并脱离微粒的核心,逃逸到环境空气中。这时 A_1 、 A_2 和 A_3 右侧的微粒成为新的边界微粒。同理分析,右侧微粒 B_1 、 B_2 和 B_3 最终也会由于不均匀的 F_D 的作用而从微粒流核心射离^[12]。

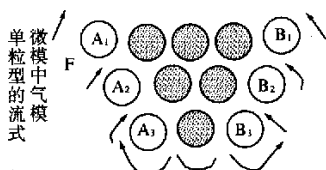


图 2 微粒流理想的单颗粒自由下落模型

Fig. 2 The ideal single particle model of particle plume

在微粒流的自由下落过程中,由于周围环境空气被卷吸到微粒流中,一些微粒,特别是粒径较小的微粒,与卷吸的环境空气混合成环绕着微粒核心的粉尘边界层。粉尘边界层的半径随着下降距离的增加而扩大。当微粒流中的摩擦力大于微粒本身的重力以及任何微粒流内部的相互作用力,散射粉尘将会从微粒流中脱离出来。实际生产中,当微粒流与散料堆或设备装置相碰撞时,微粒流中的卷吸空气就会得到突然的释放,这时气流会对微粒施加侧向压力,当该侧压力大到足以克服微粒自重的时候,微粒将会被空气卷走,成为散射粉尘的一部分,同时微粒之间的碰撞也会引起一些微粒反弹进入环境空气而成为散射粉尘的另万方数据

一部分,并伴随着向四周散射的大量粉尘扩散到环境中去,如图 3 所示。

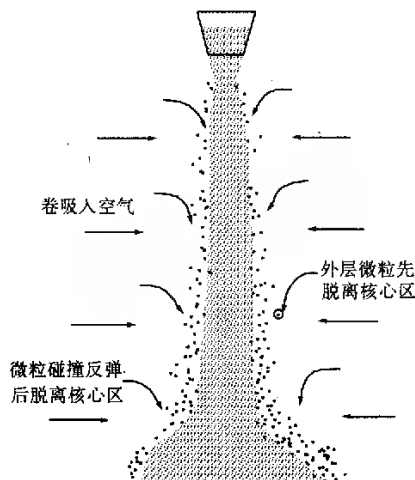


图 3 自由下落散料流的粉尘产生机理

Fig. 3 The dust generation mechanism of the bulk plume during free falling

3 空气卷吸量计算的数学模型

Cooper 和 Arnold^[13] 研究和测量了由粗糙微粒引起的卷吸空气量,提出用羽流模型来模拟卷吸空气量与微粒流的关系。Ogata et al^[14] 则通过使用 $\kappa - \varepsilon$ 紊流公式对稳定流动做了数值分析。他们认为,在单微粒模型中,微粒自由下落时加速周围的环境空气紊流,微粒所受的力最终达到平衡。在 $Re_p \leq 500$ 的条件下,Ogata et al 给出环境卷吸空气量 Q 的计算公式为:

$$Q = \left[\frac{0.149mx^{1.7}A^2}{\rho_p d^{1.6}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: m 为微粒的质量流, kg/s ; x 为沿流束方向距漏斗口的下降距离, m ; A 为距漏斗口 x 处的微粒流截面积, m^2 ; d 为微粒平均直径, m ; ρ_p 为微粒密度, kg/m^3 。

Tomomi Uchiyama^[15] 在 Ogata 的实验基础上对微粒自由下落过程中卷吸空气量进行修正,在涡流理论的基础上分析了气体与微粒的两相紊流。对于混合微粒模型,他认为与自由下落的微粒相比较卷吸空气的动量可以忽略,卷吸空气流量 Q 与相关变量的关系式为:

$$Q = [(u_{p0}^2 + 2gx)^{\frac{1}{2}} - u_{p0}]A_0 \quad (2)$$

式中: u_{p0} 为微粒的初速度, m/s ; A_0 为微粒束在漏斗出口处的特征面, m^2 ; x 为微粒下降高度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

4 实验研究与讨论

图4为研究微粒流自由下落过程特性的实验装置. 实验时, 散料从储料斗装入, 当测量筒和储料筒均装满后, 打开出料口, 同时空气泵开始工作, 调节流量调节阀直至压力感应点的压强差为零, 此时记录下流量计的读数, 此读数即为微粒羽流卷吸入的环境空气量.

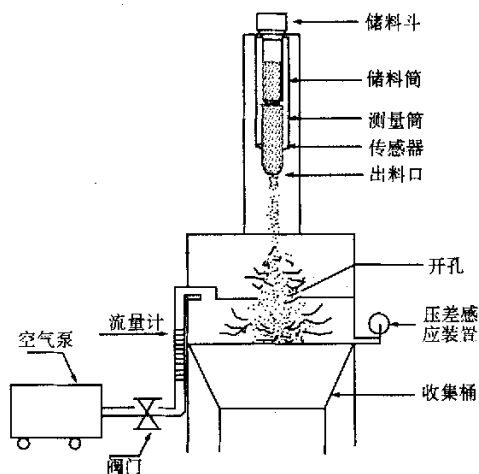
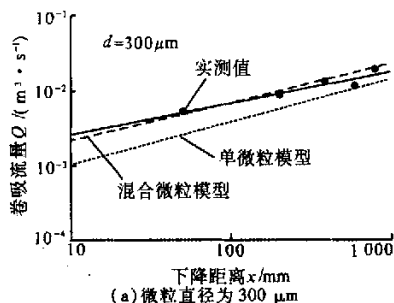


图4 微粒流自由下落过程研究的实验装置图示

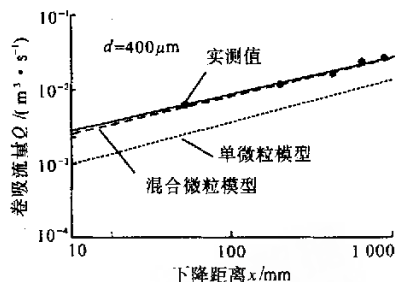
Fig.4 Experimental apparatus for the research of Free-falling particles

由于在微粒羽流自由下落过程中卷吸环境空气受微粒密度 ρ_p 、微粒下降高度 x 、出料口的截面面积 A 、微粒流的质量流量 m 、微粒直径 d 等的影响, 即 $Q = f(\rho_p, x, A, m, d)$. 在实验中采用变量控制参数法进行实验, 获取受环境参数和微粒物理参数影响的空气卷吸量. 对实验数据进行分析, 分别得到微粒羽流自由下落过程中环境空气卷吸量随微粒直径及微粒密度变化的关系曲线, 如图5和图6所示.

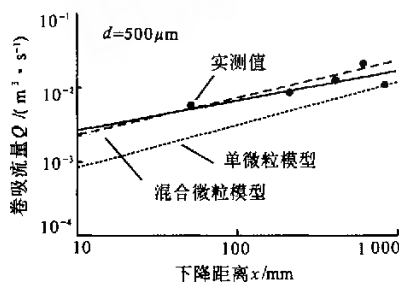
由图6中可以看出, 在相同微粒密度的条件下, 环境空气卷吸量随着下降距离的增大而增加. 微粒直径大的微粒流其卷吸能力小于小粒径的微粒流. 分析图5可以得到, 在相同微粒粒径的前提下, 环境空气卷吸量随着下降距离的延伸而增加,



(a) 微粒直径为 300 μm



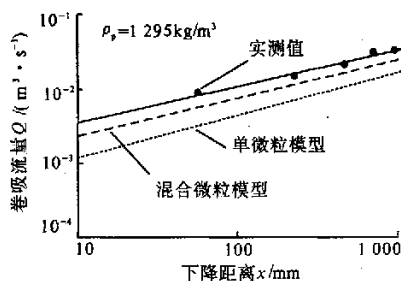
(b) 微粒直径为 400 μm



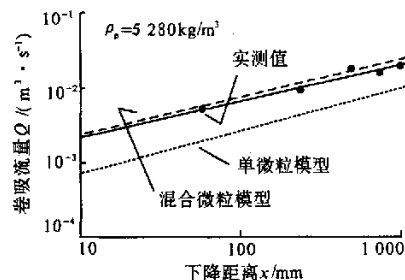
(c) 微粒直径为 500 μm

图5 不同微粒直径下的环境空气卷吸量与下降距离的变化关系

Fig.5 Quantity of entrained air vs. falling particle plume in different particle diameter



(a) 微粒密度为 1295 kg/m^3



(b) 微粒密度为 5280 kg/m^3

图6 不同微粒密度下的环境空气卷吸量与下降距离的变化关系

Fig.6 Quantity of entrained air vs. falling particle plume in different particle diameter

对于微粒密度小的微粒流,其在相同高度下的卷吸空气量要大于微粒密度大的微粒流。

实验结果显示,混和微粒模型环境空气卷吸量的模拟值与实验中获得的环境空气卷吸量数据较为一致,而 Ogata et al 的单微粒模型中的环境空气卷吸量的模拟值均小于实验中得到环境空气卷吸量。主要原因是单微粒模型仅考虑应用牛顿经典力学平衡方程来分析微粒自由下落过程的受力情况。而对于自由下落运动的微粒群,其传递性质不仅与微粒所处流场中浓度、温度、电荷强度,甚至光照等梯度密切相关,更取决于微粒群本体的粒径分布大小及物理性质。通常,单个微粒与微粒群的运输过程深度地耦合在一起,很难将其区分开来研究。

5 结论

(1)单微粒模型中得到的环境空气卷吸量均小于实验中所获得的环境空气卷吸量。

(2)实验中获得的环境空气卷吸量与混合微粒模型的环境空气卷吸量的模拟值能较好地吻合。

(3)环境空气卷吸量 Q 随下降高度 x 的增加而增大,随密度 ρ 的增加而减小。

(4)在相同下降高度时,粒径小的微粒羽流的卷吸能力要大于粒径大的微粒羽流卷吸能力。

参考文献:

- [1] HEITBRINK W A, BARON P A, WILLEKE K. An investigation of dust generation by free falling powders [J]. American Industrial Hygiene Association, 1992, 53(10): 617 - 624.
- [2] HEMEON W C L. Plant and process ventilation [M]. Australia: The Industrial Press, 1963. 71 - 73.
- [3] TOOKER G E. Controlling fugitive dust emissions in material handling operation [J]. Bulk Solids Handling,

1992, 12(2): 227 - 232.

- [4] UCHIYAMA T, NARUSE M. Numerical simulation of gas - particle twophase mixing layer by vortex method [J]. Powder Technol, 2002, 125: 111 - 121.
- [5] UCHIYAMA T, NARUSE M. Vortex simulation of slit nozzle gas - particle, two - phase jet [J]. Powder Technol, 2003(131): 156 - 165.
- [6] LIU Z Q, COOPER P, WYPYCH P. Velocity profile in air entrainment during free - fall of particles [C]. Australia: The Institution of Engineers, 2001, 841 - 849.
- [7] COOPER P, LIU Z Q, WYPYCH P. Plumed driven by free-fall streams of solid particles [C]. Australia: Adelaide University, 2001, 649 - 652.
- [8] LIU Z Q, COOPER P, WYPYCH P. Determination air entrainment in free falling bulk materials [C]. Australia: The Institution of Engineers, 2004, 359 - 364.
- [9] 冯银厂, 建会, 朱坦, 等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM10 来源解析研究 [J]. 环境科学学报, 2004, 17(2): 1 - 5.
- [10] 从晓春, 张旭. 开放性尘源粉尘运动轨迹的数值计算 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 330 - 333.
- [11] 何争光, 曹书霞, 谢丽娜, 等. 乡镇工业大气中颗粒物总量控制研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(1): 98 - 101.
- [12] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学 [M]. 北京: 建筑工业出版社, 2004. 233 - 238.
- [13] COOPER P, ARNOLD P C. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material [C]. KONA, 1995. 125 - 134.
- [14] OGATA K, FUNATUS K, TOMITA Y. Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment [J]. Powder Technol, 2001, 115: 90 - 95.
- [15] UCHIYAMA T. Numerical analysis of particulate jet generated by free falling particles [J]. Powder Technology, 2004, 145: 123 - 131.

Primary Investigation of Air Entrainment in Free Falling Particle Plumes

ZHAO Yong-ling¹, LIU Ze-qin, ZHAO Jing-hua, WANG Ya-nan, SUN Er-yan, JIANG Sheng-lei

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: According to the characteristics of the free falling particle plume, the mechanism of the air entrainment in the process of free falling particles is analyzed preliminarily. The Tomomi miscible particle model and the Ogata non-miscible particle model are discussed in comparison with the experimental data of the quantity of the entrained surrounding air. The results indicate that the simulation of the miscible particle model to predict the volume of air entrainment has a good agreement with the experimental data. But the predicted value from the Ogata's non-miscible particle model is lower than the obtained data in testing. The experimental results indicate that the volume of the ambient air entrainment increases with the drop-height extension of the particle plume and decreases with the increase of the particle diameter and density.

Key words: free falling particle stream; particle plume; volume of ambient air entrainment