

# 两力作用下粉尘运移速度变化规律

李艳强

(国家安全生产监督管理总局 信息研究院,北京 100029)

**摘要:**粉尘在气流中的运动受多种力的作用.将粉尘分为水平和垂直方向运动,研究在这2个方向上在重力及流体拖拽阻力作用下粉尘速度变化规律.研究表明,外力作用下,水平方向,在流体拖拽阻力作用下,0.0~0.2 s时间段内,粉尘速度上升很快,基本接近于空气的流速,且粉尘粒径越小,粉尘趋近于风流的速度越快.在垂直方向上,粉尘在重力和阻力作用下具有沉降趋势,粉尘粒径越大,沉降的终速度越大,每一粒径都有对应的沉降终速度,对于5 μm的粉尘颗粒它的沉降终速度为0.5 m/s.研究结果为更深层次研究粉尘运动动力学行为提供了理论基础.

**关键词:**粉尘;受力分析;运移速度;沉降

中图分类号:TD714.2

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2014)03-0021-04

## Research on the variation of dust transport velocity rules under effect of two forces

LI Yanqiang

(National Institute for Occupation Safety, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The dust subjects to several forces when moving in the airflow. This paper divides the dust movement into horizontal/vertical directions, and studies the dust velocity variation rules in these two directions under the effect of gravity and fluid drag resistance force. Results show that in horizontal direction, under the fluid drag resistance force, during 0.0~0.2 s, the dust approaches to air velocity quickly, nearly the velocity of airflow, and the smaller the dust diameter is, the more quickly the dust is close to the air velocity. In the vertical direction, under the effect of gravity and resistance force, the dust has the tendency of sediment, and the bigger the dust diameter is, the bigger the final sediment velocity is. Each dust size has the corresponding final sediment velocity, and the final sediment velocity is 0.5 m/s for 5 μm diameter of dust. The research results have provided theoretic basis for further study of dust transport behavior.

**Key words:** dust; force analysis; transport velocity; sediment

在矿井生产过程中,采掘面是粉尘产生的主要来源,风流通过与粉尘之间的作用力影响着粉尘在运动过程的状态.此外,粉尘自身还受到重力等作用,有发生沉降的趋势.所以,粉尘的运动是由于各种力综合作用的结果.本文从粉尘受力分析为切入点,进而分析粉尘运动动力学过程,研究粉尘在随风

流运动过程速度变化规律.

### 1 粉尘受力分析

粉尘初始飞扬速度很小,由于气流的带动作用,才使得粉尘随着风流运移和扩散,由此可见,风流对于粉尘的扩散和运移是起着推动力作用.

粉尘和气流在共同运动过程中,粉尘与粉尘之间、粉尘与气流之间不断地发生作用,粉尘受到了多个力的作用,由于粉尘属于稀疏相,粉尘颗粒之间的作用可以忽略不计,粉尘所受的力有<sup>[1-4]</sup>重力、浮力、流体的拖拽力、Basset力、Saffman力、附加质量力、压力梯度力、Magnus力和布朗力<sup>[5,6]</sup>,其中,主要作用力为重力和流体的拖拽阻力<sup>[7]</sup>.

### 1.1 重力

粉尘颗粒具有重力,密度越大、相同体积情况下,则重力越大,越易沉降.通常情况下粉尘颗粒的形状是不规则的,但为了方便研究,粉尘颗粒是简化成球体,粉尘所受重力表示为

$$F_G = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g. \quad (1)$$

式中, $d_p$ :粉尘粒径,m; $\rho_p$ :粉尘密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

### 1.2 流体的拖拽阻力

粉尘颗粒做匀速运动时静止的流体对它产生力的作用称为拖拽阻力<sup>[8]</sup>.粉尘颗粒表面会由于流体粘性的存在,导致其表面产生不对称分布的表面压强和剪应力,两力合力均与来流方向一致,它们分别是压差阻力和表面的摩擦剪应力(摩擦阻力).粉尘颗粒在流体中受到的Stokes阻力是颗粒与流体间相互作用的基本形式:

$$F_D = \frac{1}{8} \pi C_d d_p^2 \rho_p |u_f - u_p| (u_f - u_p). \quad (2)$$

式中, $u_f$ :流体的速度,m/s; $u_p$ :粉尘颗粒的速度,m/s; $C_d$ :粉尘颗粒的阻力系数.阻力系数 $C_d$ 与颗粒的雷诺数有关,可表示为

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{R_{e_p}} + \frac{a_3}{R_{e_p}^2}. \quad (3)$$

式中, $R_{e_p}$ :雷诺数; $a_1, a_2, a_3$ :对于外形为球形的颗粒,在一定的雷诺数区间内可视为常数.

## 2 粉尘水平方向受力及速度变化模型

粉尘颗粒在气体中的运动可由随气流一起的水平运动和重力作用下的重力沉降2种运动组合而成.

粉尘在水平方向上运动主要受到的是气流对粉尘的拖拽阻力,由之前的分析,粉尘自产生后受到气流的动力作用才得以扩散和运动,所以气流对

粉尘起的拖拽阻力是动力,粉尘在水平方向的受力:

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{du_{px}}{dt} = \frac{\pi}{8} C_d d_p^2 \rho_g (u_g - u_{px}) (u_g - u_{px}) = \frac{\pi}{8} C_d d_p^2 \rho_g (u_g - u_{px})^2. \quad (4)$$

式中, $u_{px}$ :粉尘在水平方向的分速度,m/s; $\rho_g$ :空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

化简后得:

$$\frac{du_{px}}{(u_g - u_{px})^2} = \frac{3\rho_g}{4d_p\rho_p} C_d dt. \quad (5)$$

1)当粒径为常数,对式(5)两边同时不定积分得:

$$u_{px} = u_g - \frac{4d_p\rho_p u_g}{3\rho_g u_g C_d t + 4d_p\rho_p}. \quad (6)$$

式(6)就是粉尘颗粒在风流中水平方向的速度表达式.

空气的密度为 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,设粉尘的密度为 $2100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,粒径为 $5 \mu\text{m}$ ,根据文献[5]取 $C_d = 0.44$ ,那么式(6)可以简化为

$$u_{px} = u_g - \frac{0.04u_g}{1.7u_g t + 0.042}. \quad (7)$$

那么随着空气流速的不同,在一定时间内粉尘在水平方向的变化规律如图1所示.

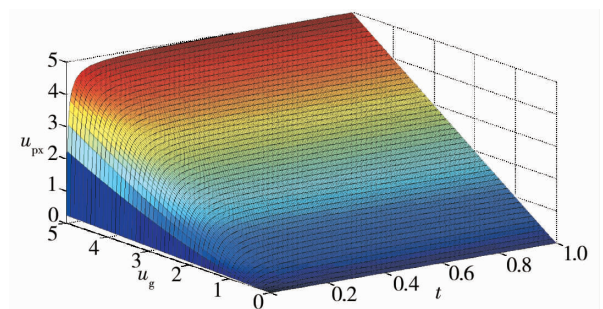


图1 不同空气流速下一定粒径粉尘速度变化规律

从图1可以看到,随着空气流速的增大,粉尘的水平运动速度也随之增大,在 $0.0 \sim 0.2 \text{ s}$ 时间段内,粉尘速度上升很快,基本接近于空气的流速.

当气流的流速为水平 $2.5 \text{ m}/\text{s}$ ,根据文献[9]取 $C_d = 0.44$ ,那么上式可以简化为

$$u_{px} = 2.5 - \frac{0.1}{4.257t + 0.042}. \quad (8)$$

将式(8)生成曲线图2,可以更加直观的体现随时间粉尘水平速度的变化趋势.

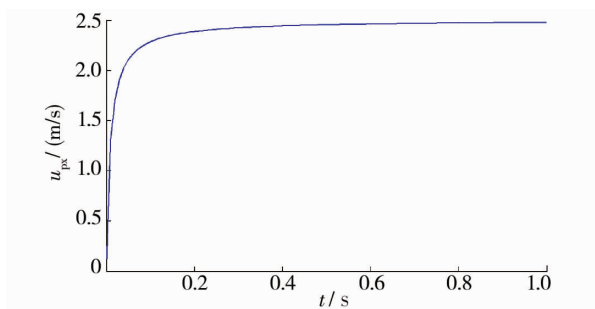


图2 粉尘水平分速度与时间关系图

2) 当气流速度为常数时:

假设空气流速为 2.5 m/s, 那么根据式(6)可得随着时间, 粉尘粒径与其速度的关系:

$$u_{px} = 2.5 - \frac{0.02d_p}{4.257t + 0.008d_p} \quad (9)$$

其变化规律如图3所示.

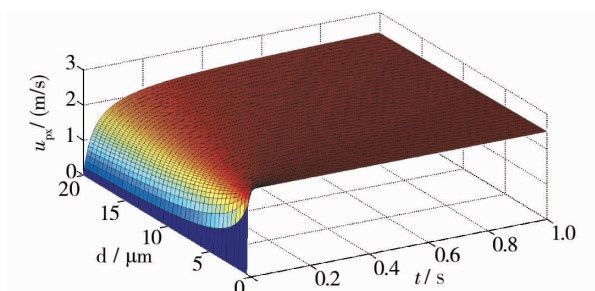


图3 一定流速下不同粒径粉尘速度变化规律

由图3可以看出, 粉尘颗粒受风流的带动作用, 由零开始逐渐增大, 但不可能完全与气流速度相同, 而是速度无穷接近于气流速度; 粒径越小, 粉尘趋近于风流的速度和趋势越快.

### 3 竖直方向上粉尘受力运动速度变化模型

对于粒径较大粉尘, 粉尘自重对粉尘垂直空间上的运动影响大, 同时减少粉尘在空间中的停留时间, 影响其扩散运动的轨迹. 当粉尘颗粒在静止空气中沉降的过程中速度的变化会使得粉尘颗粒受到的阻力也相应的发生变化. 对于在水平气流中运动的粉尘颗粒, 其垂直方向上运动方程为

$$\frac{\pi}{6}d_p^3\rho_p \frac{du_{py}}{dt} = \frac{\pi}{6}d_p^3\rho_p g - \frac{1}{8}\pi C_d d_p^2 \rho_g u_{py}^2 \quad (10)$$

设  $\frac{3\rho_g}{4d_p\rho_p g} C_d = a^2$ , 经化简得到:

$$u_{py} = \frac{e^{2gat} - 1}{ae^{2gat} + a} \quad (11)$$

1) 对于  $\frac{3\rho_g}{4d_p\rho_p g} C_d = a^2$ , 空气的密度为 1.29 kg/m<sup>3</sup>, 设粉尘的密度为 2 100 kg/m<sup>3</sup>, 粒径为 5 μm, 气流的流速为水平 2.5 m/s, 根据文献[9]取  $C_d = 0.44$ , 那么  $a = 2$ , 在垂直方向上粉尘的速度表达式为

$$u_{py} = \frac{e^{40t} - 1}{2e^{40t} + 2} \quad (12)$$

将式(12)绘制为如图4所示图形, 得到垂直方向粉尘分速度与时间关系.

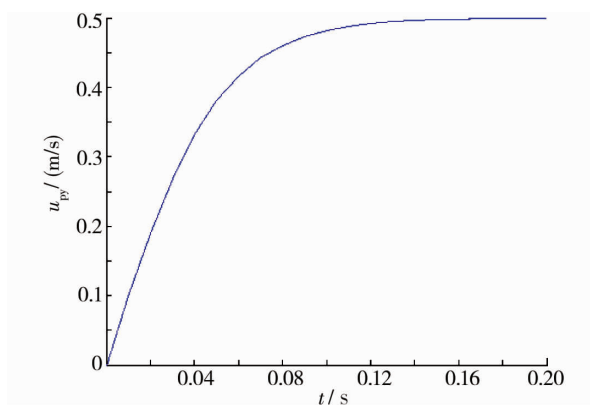


图4 在垂直方向上5 μm 粉尘分速度与时间关系

由式(12)和图4共同分析可知, 对于 5 μm 的粉尘颗粒它的沉降最大速度为 0.5 m/s.

2) 粉尘沉降平衡速度. 在空气中沉降运动的粉尘, 当所受力平衡时, 粉尘颗粒在竖直方向上匀速沉降, 此时的沉降速度称为最终沉降速度  $u_{py}$ , 即式(10)式中  $\frac{du_{py}}{dt} = 0$ , 其表达式为

$$u_{py} = \sqrt{\frac{4\rho_p g d_p}{3\rho_g C_d}} \quad (13)$$

当粉尘的密度为 2 100 kg/m<sup>3</sup>, 空气密度为 1.29 kg/m<sup>3</sup>, 重力加速度为 10 m/s<sup>2</sup>,  $C_d = 0.44$  时, 式(13)变为

$$u_{py} = \sqrt{49\ 331d_p} \quad (14)$$

当粒径不同, 粉尘在垂直方向的最终沉降速度如图5所示.

由图5可知, 不同粒径的粉尘, 随着粒径的增加沉降的终速度越大, 这也说明粉尘颗粒越大在空气中沉降的趋势越大, 最终速度也越大, 这也与粉尘沉降现象符合, 一种粒径粉尘, 它的沉降速度是惟一的, 对于 5 μm 粒径的粉尘, 它的沉降速度为 0.5 m/s, 这也与之前的公式计算结果吻合.

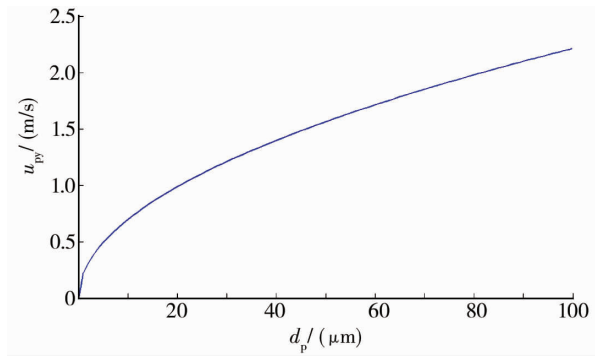


图5 在垂直方向上不同粒径粉尘沉降终速度

球形颗粒的沉降速度与尘粒直径及密度有关,与粒径和密度成正比关系,流体密度对沉降速度也有影响,粒径越小的颗粒在流体中悬浮的时间越长。

#### 4 结论

1) 粉尘在随风流运动过程中主要受力为流体拖拽力和重力。

2) 在水平方向上:随着空气流速的增大,当风速大小和方向不变时,随着空气流速的增大,粉尘的水平运动速度也随之增大,在0.0~0.2 s时间段内,粉尘速度上升很快;在相同风速下粒径越小,粉尘趋近于风流的速度越快。

3) 粉尘颗粒越大在空气中沉降的趋势越大,最终速度也越大。

#### 参考文献:

- [1] 李忠奎. 火电厂输煤系统除尘机理的研究与除尘系统设计[D]. 保定:华北电力大学,2006.
- [2] 上潼具贞. 粉粒体的空气输送[M]. 北京:电力工业出版社,1982.
- [3] 刘大有. 两相流体动力学[M]. 北京:原子能出版社,1991.
- [4] 潘大勇. 掘进巷道中粉尘分布规律的实验室研究和计算机模拟[D]. 北京:北京科技大学,2000.
- [5] 徐文亮. 干熄焦挡板除尘器除尘性能的数值模拟[D]. 北京:北京科技大学,2005.
- [6] 周华. 油气分离器内气液两相流的数值模拟[D]. 上海:上海大学,2005.
- [7] 岑可法,樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州:浙江大学出版社,1990.
- [8] 孔珑主. 两相流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [9] 杨国彦,李怀宇,程学军. 爆破粉尘颗粒物运动过程的力学分析[J]. 河北理工学院学报,1996,18(4):1-5.