

# 煤粉起动速度与粒径及湿度的关系

林多敏 蔡树棠

(上海市应用数学和力学研究所, (中国科学技术大学, 上海市应用  
上海工业大学) 数学和力学研究所)

(1990年5月9日收到)

## 摘 要

在煤码头和车站的煤堆积场上, 煤粉的扬起是污染环境的主要原因之一。作者根据力学的基本原理, 考虑颗粒和液滴重力、煤粉颗粒尺寸和湿度的影响, 利用煤粉颗粒起动时的力平衡条件, 推导出在风的作用下, 具有一定湿度的煤粉颗粒开始扬起的起动风速的理论表达式。最后, 根据煤粉起动速度与煤粉颗粒粒径及湿度的关系, 将理论公式和风洞实验结果进行了比较, 理论和实验结果符合得相当好。

**关键词** 大气污染 煤粉起动速度 扬尘污染 扬尘规律

## 一、引 言

环境保护是现代人类所碰到的重要课题之一。在我国, 能源交通是国家建设事业中的关键部分, 而煤的装卸和堆放则是我国能源和交通问题中的关键问题之一。对于港口码头和车站, 煤的堆放场地经常是环境的重要污染源。煤炭装卸工艺的每个环节都将产生大量的煤尘。因此, 研究煤粉堆料起尘和扩散规律是十分必要的。

早在1941年R. A. Bagnold<sup>[1]</sup>在风沙物理学的理论中, 曾通过计算流体经过疏松颗粒所组成的平整床面上的力矩平衡, 得出了雷诺数 $V_*d/\nu > 3.5$ 时流体在移动任何床面颗粒以前所必须达到的起动流速 $V_{*c}$ 遵循下面的公式:

$$V_{*c} = A\sqrt{((\rho_s - \rho_l)/\rho_l)gd} \quad (1.1)$$

其中 $A$ 为系数,  $\rho_s$ 为颗粒密度,  $\rho_l$ 为流体密度,  $d$ 为颗粒粒径。

近些年来, 人们对煤炭装卸、堆放起尘规律及煤尘扩散规律进行了许多理论和试验方面的研究, 取得了很大进展。目前, 在环境风洞中模拟煤炭堆放和装卸条件, 研究其起尘和扩散规律, 是很重要的方法。王宝章<sup>[2]</sup>、杨贺清<sup>[3,4]</sup>、刘琴<sup>[5]</sup>和朱景韩<sup>[6,7]</sup>等人分别利用环境风洞, 在不同风速下, 对各种湿度各种粒径的煤堆进行了起尘和扩散的试验考察, 并对所得试验数据进行回归分析和一般分析, 提出了计算煤粉颗粒起尘风速的经验公式:

$$V = Ad^a e^{bw} + B \quad (1.2)$$

式中 $A, a, b, B$ 为常数,  $d$ (mm)为试验用煤的颗粒平均直径,  $w$ (%)为煤堆表面的湿度(以

百分数表示),  $V(\text{m/s})$ 为特定的风梯度下煤堆为自然堆积、堆堆表面湿度为 $w$ 时, 粒径为 $d$ 的颗粒的起动速度。武汉水运工程学院煤粉尘运动规律研究课题组<sup>[8]</sup>利用空气中的颗粒受有推力和上升力的空气动力学原理分析了煤粉尘起动条件, 得出了起动速度的表达式为

$$V = A\sqrt{gd(\rho_s/\rho_a - 1)} \quad (1.3)$$

式中 $A$ 是综合系数, 可通过实验测定,  $\rho_s$ 为煤粉密度,  $\rho_a$ 为空气密度。王献孚<sup>[9]</sup>从建立气固两相流基本方程出发, 讨论了理论求解的一些途径, 提出了进行煤堆起尘和扩散规律模型试验研究的相似律。国外发表的利用风洞研究煤炭起尘和扩散规律的文献见得较少。总之, 煤粉扬起规律的研究需要进一步的理论探讨。

本文讨论了煤码头或车站的煤堆积场上具有一定湿度的煤粉扬起的条件。根据力学中动量和力的关系以及一些辅助条件, 考虑了颗粒和液滴重力、煤粉颗粒尺寸和湿度的影响, 利用煤粉颗粒起动时的扬起力、重力和表面张力等力的平衡, 推导出在风的作用下, 具有一定湿度的煤粉颗粒开始扬起的起动风速的理论表达式。最后, 根据煤粉起动速度与煤粉颗粒粒径及湿度的关系, 将理论公式和风洞模拟实验进行了比较, 理论和实验结果符合得相当好。

## 二、煤粉起动速度与粒径及湿度的关系

### 2.1 煤粉起动速度和力分析

在风速的作用下, 何时煤粉颗粒开始从静止状态进入运动状态, 这是一个十分重要的临界条件。当风速逐步加强到超过一定限度以后, 煤粉颗粒开始脱离静止状态而进入运动, 决定这一临界状况的风速条件称为煤粉颗粒的起尘条件, 而这一风速称为煤粉颗粒的起动速度。

煤粉颗粒在风的作用下扬起时, 风对煤粉的起动作用力应该大于带水颗粒的重力和表面张力等力的总和。在接近煤粉颗粒表面处, 风的流态无疑将是层流运动, 这时煤粉所受的扬起力将以粘性应力为主。在煤粉上所受的力, 除了粘性应力之外, 还有煤粉颗粒的重力、煤粉所带水滴的重力和水的表面张力等作用力。我们现在来考虑各种力的表达式。以下设风速为 $U$ , 煤粉粒径为 $d$ , 煤粉含水率为 $w$ , 煤粉密度 $\rho_s$ , 水滴密度为 $\rho_l$ , 水的表面张力系数为 $\sigma$ , 空气粘性系数为 $\mu$ 。由于空气密度 $\rho$ 远小于煤粉和水的密度, 所以空气浮力可以略去。

### 2.2 煤粉颗粒的扬起力

我们现在考虑一个煤粉颗粒上所受的作用力, 并且设煤粉为球状颗粒。首先考虑风扬起煤粉颗粒的粘性应力。我们用 $\mu U/d$ 来表征单位面积上作用在煤粉颗粒上的粘性应力, 而煤粉颗粒受力的有效面积为 $\pi d^2$ , 所以, 作用在煤粉颗粒上风扬起力可表示为

$$c_1 \mu \pi d^2 U/d = c_1 \pi \mu d U \quad (2.1)$$

式中 $c_1$ 为无量纲系数。

### 2.3 重力

其次, 我们来考虑煤粉颗粒重力和水滴的重力。煤粉颗粒的重力为

$$\pi d^3 \rho_s g/6 \quad (2.2)$$

以下再考虑液滴的重量。煤粉中液滴是大小不一的。在煤粉含水率小的时候, 小的水滴数量较多; 随着煤粉湿度的逐渐增加, 较大的水滴数目也逐渐增加。煤粉中特别大和特别小的水

滴数量也是相对较少的。因此，我们可假定水滴在煤粉中的分布函数为

$$f(m) = (K_1^2/m_0^2) m \exp[-K_1 m/m_0] \quad (2.3)$$

式中  $f(m)$  为质量从  $m$  到  $m+dm$  范围内的水滴数目几率， $m$  为水滴质量， $m_0$  为某一常数质量， $K_1$  为无量纲常数。我们有归一化条件

$$\int_0^{\infty} f(m) dm = 1 \quad (2.4)$$

由(2.3)我们可以求出水滴数目几率  $f(m)$  最大时的水滴质量  $M$  为

$$K_1 M/m_0 = 1$$

$$\text{即 } M = m_0/K_1 \quad (2.5)$$

考虑水滴质量与含水量有一定的关系，且含水量小的时候，最大几率下水滴质量也较小。因此，我们可以假定  $K_1$  反比于含水量  $w^2$ ，即

$$K_1 = c_2'/w^2 \quad (2.6)$$

其中  $c_2'$  为无量纲系数。把式(2.6)代入式(2.5)，可得

$$M = m_0 w^2 / c_2' \quad (2.7)$$

我们取参考质量  $m_0$  为

$$m_0 = \pi d^3 \rho_s / 6 \quad (2.8)$$

$$\text{则 } M = c_2 d^3 \rho_l w^2 \quad (2.9)$$

$$\text{式中 } c_2 = \frac{1}{c_2'} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l} \quad (2.10)$$

这时附加的水滴重量为

$$Mg = c_2 d^3 \rho_l w^2 g \quad (2.11)$$

## 2.4 表面张力

接下来我们考虑水滴对煤粉颗粒产生的表面张力。所谓干的煤粉总是存在有一部分的水，这一部分水在单个煤粉颗粒上所产生的表面张力的总效果可用

$$\pi d^2 \sigma / d = \pi d \sigma \quad (2.12)$$

来表征。在煤粉含水量多的时候，煤粉颗粒周围水的表面积将按水体积的三分之二方增加，也就是和  $w^{2/3}$  成正比。这时单个煤粉颗粒上表面张力的总效果将正比于

$$w^{2/3} \pi d^2 \sigma / d \quad (2.13)$$

所以，(2.12)和(2.13)两项的表面张力对单个颗粒所产生的总效果将为

$$c_3 d \sigma + c_4 w^{2/3} d \sigma \quad (2.14)$$

其中  $c_3$ 、 $c_4$  为无量纲常数。

## 2.5 煤粉颗粒起动风速的表达式

煤粉颗粒在开始扬起的条件下，风的扬起力将要和煤粉颗粒及水滴的重力，和水作用在煤粉颗粒上的表面张力互相平衡。于是，根据式(2.1)、(2.2)、(2.11)和(2.14)，我们有

$$c_1 \pi \mu d U = \pi d^3 \rho_s g / 6 + c_2 d^3 \rho_l w^2 g + c_3 d \sigma + c_4 w^{2/3} d \sigma \quad (2.15)$$

化简上式，我们就得到煤粉颗粒的起动速度表达式，即

$$U = c_1^* \frac{\sigma}{\mu} + c_2^* w^{2/3} \frac{\sigma}{\mu} + c_3^* \frac{\rho_s g}{\mu} d^2 + c_4^* \frac{\rho_l g}{\mu} d^2 w^2 \quad (2.16)$$

式中

$$c_1^* = \frac{c_3}{\pi c_1}, \quad c_2^* = \frac{c_4}{\pi c_1}, \quad c_3^* = \frac{1}{6c_1}, \quad c_4^* = \frac{c_2}{\pi c_1}$$

### 三、理论和实验的比较

为将煤粉颗粒起动风速的表达式(2.16)和由风洞模拟实验所得数据相比较,我们可取  $\sigma=73\text{g/s}^2$ ,  $g=980\text{cm/s}^2$ ,  $\mu=1.79 \times 10^{-4}\text{g/cm}\cdot\text{s}$ ,  $\rho_s=1.5\text{g/cm}^3$ ,  $\rho_l=1\text{g/cm}^3$ , 此时若取  $c_1^*=4.90 \times 10^{-4}$ ,  $c_2^*=2.64 \times 10^{-4}$ ,  $c_3^*=1.22 \times 10^{-4}$ ,  $c_4^*=6.09$ , 则(2.16)式可写成

$$U = 200 + 1077.2w^{2/3} + (1000 + 5 \times 10^7 w^2)d^2 \tag{3.1}$$

为使式(3.1)同实验和经验公式方便比较,我们需要将  $U$  以  $\text{m/s}$  为单位,  $w$  取百分数值,  $d$  取  $\text{mm}$  为单位, 即令

$$U = 100U_1, \quad w = w_1/100, \quad d = d_1/10$$

则式(3.1)变为

$$U_1 = (2 + 0.5w_1^{2/3}) + (0.1 + 0.5w_1^2)d_1^2 \tag{3.2}$$

这样有关起动速度的理论公式与风洞模拟实验及经验公式的比较可见图1(a)、(b)、(c), 图2(a)、(b)、(c)和图3。如图所示, 理论结果和实验数据吻合得相当好。

最后, 在CGS单位制下, 我们得出煤粉颗粒起动速度与煤粉粒径及湿度的关系为

$$U = 4.9 \times 10^{-4} \frac{\sigma}{\mu} + 2.64 \times 10^{-3} \frac{\sigma}{\mu} w^{2/3} + 1.22 \times 10^{-4} \frac{\rho_s g}{\mu} d^2 + 6.09 \frac{\rho_l g}{\mu} d^2 \tag{3.3}$$

### 四、结 束 语

本文运用力学的基本原理, 考虑了扬起力、重力、颗粒尺寸和湿度对煤粉颗粒起动速度的影响, 推导出具有一定湿度和一定粒径的煤粉颗粒的起动速度的理论表达式, 理论结果和实验数据符合得相当好。当煤粉颗粒尺度  $d$  小于  $75\mu\text{m}$  时, 由于微小煤粉颗粒之间存在着较大的化学的和静电的内聚力, 从而使得煤粉颗粒的起动速度随着粒径的减小而增加, 这种情形不属于本文理论公式的讨论范畴。对于较大粒径的煤粉颗粒, 我们可略去表面张力等作用力, 而仅考虑在煤堆附近较大风所产生的上卷力以及颗粒重力, 于是我们可以近似得到煤粉

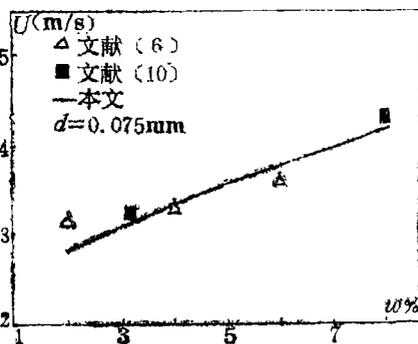


图 1a

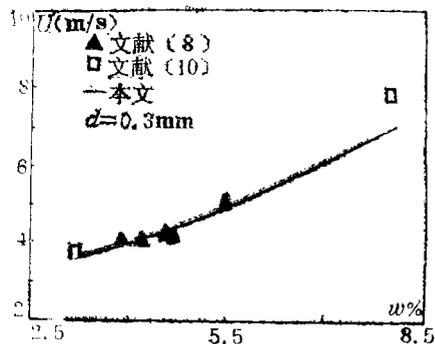


图 1b

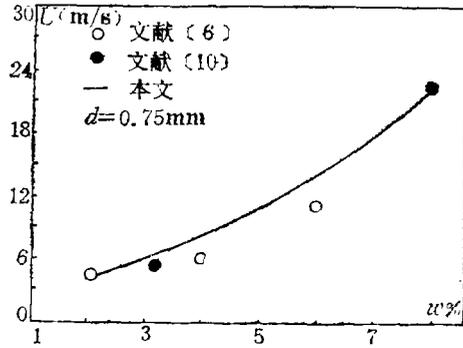


图 1c

图1a,b,c 煤粉起动速度与湿度的关系

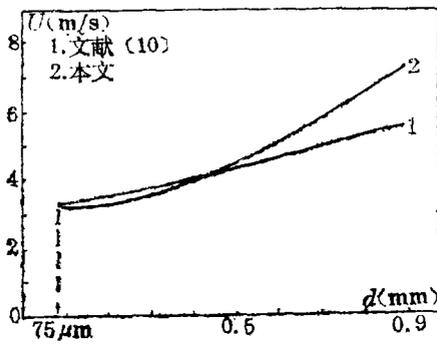


图2a 曲线1的经验公式(1.2)中

$A=0.59, a=1.25, b=0.5, B=3.1, w=3.2\%$

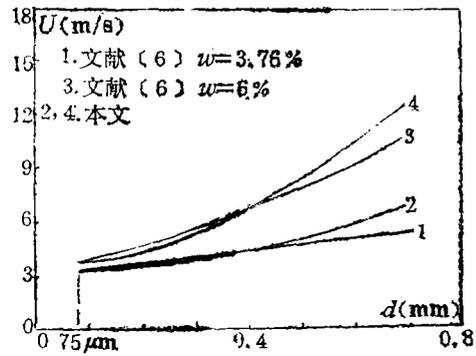


图2b 曲线1和3的经验公式(1.2)中

$A=0.56, a=1.25, b=0.5, B=3.1$

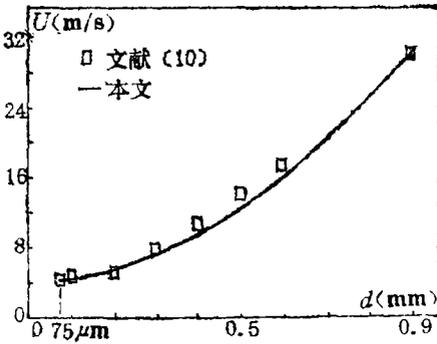


图2c  $w=8\%$

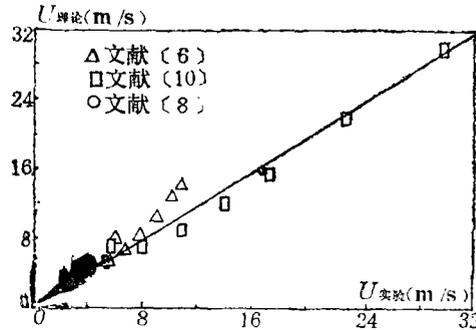


图3 理论公式与实验值的对比

颗粒起动时的力平衡表达式

$$c_1 \rho U^2 \pi d^2 \approx \pi d^3 \rho_s g / 6 \tag{4.1}$$

这样，我们可以认为在粒径较大时，煤粉颗粒的起动速度  $U \propto \sqrt{d}$ 。

参 考 文 献

- [1] Bagnold, R. A., *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen & Co. Ltd, London (1941).
- [2] 王宝章等, 煤炭装卸、堆放起尘规律及煤尘扩散规律的研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 1-9.

- [ 3 ] 杨贺清, 煤矿粉尘污染的风洞试验研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 10—17.
- [ 4 ] 杨贺清等, 煤炭装卸时起尘规律的试验研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 47—58.
- [ 5 ] 刘琴等, 露天煤矿堆和矸石堆的起尘规律的研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 88—96.
- [ 6 ] 朱景韩等, 煤堆垛起尘风速的试验研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 71—76.
- [ 7 ] 朱景韩等, 静止煤贮存堆场的粉尘扩散规律研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 77—80.
- [ 8 ] 煤粉尘运动规律研究课题组, 煤粉尘运动问题的试验研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 39—46.
- [ 9 ] 王献孚, 堆料起尘和扩散规律的一些问题的研究, 交通环保(水运版), 2-3 (1986), 26—38.
- [ 10 ] 江家骅等, 朱家门煤码头环保对策研究, 上海市环境保护研究所研究报告 (1987).

## The Relation of the Threshold Velocity of Coal Dust to Its Size and Humidity

Lin Duo-min

(*Shanghai Inst. of Appl. Math. Mech., Shanghai Univ. of Tech., Shanghai*)

Tsai Shu-tang

(*Dept. of Modern Mechanics, Univ. of Science & Tech. of China, Hefei; Shanghai Inst. of Appl. Math. Mech., Shanghai*)

### Abstract

On the ground of a wharf and a station where coal is piled up, the sources polluting the atmosphere are mainly the raised coal dust. According to the principle of mechanics, with the consideration of the gravities of coal dust particles and liquid droplets, coal dust size and humidity, under the condition of force balance when the coal dust was raised, the authors obtained a theoretical formula for the threshold velocity of coal dust with humidity. Finally, the theoretical values from the formula gave a good agreement with the experimental data from some wind tunnels.

**Key words** atmosphere pollution, coal dust threshold velocity, raised dust pollution, dust raising pattern