

可求得设计裕量 $\Delta t_2 = 2.6d$ 。即需使第二塘停留时间为 $1.6 + 2.8 = 4.4d$ ，使系统总停留时间达到 $12.4 + 2.6 = 15d$ ，才能使出水 BOD₅ 稳定在 10mg/L 左右，最大不超过 15mg/L。

四、小 结

以上讨论了用灵敏度分析方法求污水稳定塘设计裕量的过程。由于充分考虑了几种主要因素的不确定性以及它们对稳定塘处理效果的影响，并通过补充适当的设计裕量来加以补救，可使得设计的串联塘系统运行更为稳定可靠。若稳定塘出水用于养鱼或回用，这种做法尤为必要。

致谢：本文承蒙北京市环保所张忠祥副研究员和清华大学钱易教授指正，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 张能力等, 化工系统工程, 222 页, 化学工业出版社, 北京, 1982 年。
- [2] Reynolds, J. H. et al., Facultative Lagoon Performance, In *Developments in Land Methods of Wastewater Treatment and Utilization*, p. 361. Ed Jenkins, S. H., Pergamon Press, Great Britain, (1979).
- [3] Thirumurthi, D., *J. Water Poll. Control Fed.*, 46, 2094(1974).
- [4] Kilani, J. S. et al., *Water Res.*, 18, 941, (1984).
- [5] Arceivala, S. J., *Wastewater Treatment and Disposal*, p. 577, Marcel Dekker Inc., New York, (1981).

粉尘污染的风洞试验研究

王献孚 刘 琴 汤忠谷

(武汉水运工程学院)

杨 贺 清

(山西省环境保护科学研究所)

一、概 述

露天煤矿开发的实质是剥去岩层取出煤炭。其主要工艺流程是爆破、装卸、破碎、分级、洗选、堆放和搬运。在这些过程中，由于物料(煤或煤矸石)与空气的相对运动，或静止物料堆由于风力作用，使粉尘扬起(此作用称为风蚀扬尘)，对矿区周围环境造成严重污染。特别是物量中小于 $75\mu\text{m}$ 的固体颗粒粉尘会悬浮于大气中，造成矿区周围的大气严重污染，降低大气的环境质量。

在进行露天开采时，长期吸入粉尘很容易引起矽肺病，小于 $10\mu\text{m}$ 的可吸入尘对人体危害更直接。

露天矿大气中过高的粉尘含量使设备零件易受磨损。矿区空气污浊而产生的烟雾又是造成剥离和采矿停产的原因，这将给矿山

企业带来巨大的损失。

粉尘污染是露天煤矿开发前环境质量评价的主要内容之一。鉴于矿区粉尘的重要性，有必要对它在空气中的形成和运动状况作深入的了解。

为了预测贮煤场上煤堆和剥离物煤矸石堆的表面在风力作用下的起尘和扩散、物料装卸作业的起尘和扩散、自卸卡车倾卸物料时的起尘对矿区周围环境造成的污染程度，我们利用环境风洞进行了这方面的试验研究。利用风洞模拟试验来研究露天煤矿的起尘和扩散规律，具有比现场测试更为经济和易于控制的优点。

本课题为国家自然科学基金资助项目。参加本试验工作的还有吴学文、郭如珍、韩久瑞、楼宇娟、陈全友、王坚、俞济清、龚晴、周长城等。

二、相 似 律

试验条件和试验数据的整理均以相似理论作指导。目前有关粉尘污染风洞试验相似理论的文章很少，可借鉴的经验不多。我们提出了粉尘污染风洞试验的相似律如下：

1. 堆料起尘相似律

分析堆料起尘的机理可以认为，当气流作用于堆料表面颗粒上粘性切向力大于颗粒滚动的摩擦力，或气流对堆料表面颗粒的作用力大于颗粒的重量和颗粒上升运动阻力时，颗粒才能离开堆料表面而滚动或飞扬。因此，堆料起尘模拟的相似要求，除堆料几何相似，大气边界层风结构相似外，应要求堆料表面粘性力及压力分布相似（可通过堆料大尺度雷诺数 (R_L) 相等确定）。此外，堆料的起尘还决定于堆料的局部性质——颗粒间摩擦力，实现此项局部特性相似的要求，使模型试验堆料的颗粒等于原型堆料颗粒的方法更为方便。如再采用模型试验风速等于实际风速，由于模型试验缩尺比为 $1/300$ ，试验中大尺度雷诺数不可能相同。我们先后做了堆形阻力试验和压力分布测量，表明雷诺数对压力系数分布影响不大，通常静止堆料的起尘模拟试验是可能实现的。

对于堆料起尘后粉尘扩散的模拟，考虑到大气粉尘一般呈稀态固气流，根据粒子运动无量纲方程：

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_p^*}{dt^{*2}} = \frac{l}{\nu \tau} \left(\mathbf{u}^* - \frac{d\mathbf{x}_p^*}{dt^*} \right) + \frac{l\mathbf{g}}{\nu^2} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{x}_p^* = \mathbf{x}_p/l =$ 无量纲座标； $L =$ 参考长度； $t^* = \nu t/l =$ 无量纲时间； $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}/\nu =$ 无量纲速度矢量； $\nu =$ 参考速度； $\tau = \rho_p U \phi / (18\mu f)$ (τ 为松弛时间)；在稀态气固流中，取 $l = \phi$ (ϕ 为粒子直径)，则有相似准则斯托克斯数 S_t 和粒子佛劳特数 F_d ：

$$S_t = \frac{\rho_p \nu \phi}{18\mu f} \quad (2)$$

$$F_d = \frac{\nu^2}{g\phi} \quad (3)$$

式中： ρ_p 为粒子密度； μ 为空气粘性系数； ν 为粒子速度； x_p 为粒子的座标； u^* 为无量纲速度； f 为粒子阻力修正系数。

如果 ρ_p 不变，则斯托克斯数 (S_t) 退化为粒子雷诺数 (Rd)，故试验中采用 ν 不变 (同原型)， ϕ 不变，则粒子扩散相似准则 R_d 、 F_d 都能同时满足。这样，堆料起尘和扩散规律模型试验便能满意地实现。1983—1985 年武汉水运工程学院粉尘研究课题组前后对秦皇岛港煤码头一、二、三期工程，山西某露天煤矿堆煤场，上海港煤码头、江苏镇江大港港区散货码头堆料所作的试验研究，都是在这样的相似律指导下进行的。实践证明，应用这一相似律安排模型试验所得的结果是合理的。

2. 动态装卸起尘相似律

粉尘物料装卸时存在动壁边界，相似准则除应包括粘性相似准则 R_L 外，还应包含有重力相似准则，即大尺度佛鲁数 (F_L) 相等。但二者不能同时满足，只能择其主要的—个给以满足。根据我们在大小风洞所作的比较验证，认为取 F_L 作动态装卸起尘相似律是比较接近实际。

按 F_L 相似律进行模型试验，试验风速 ν_m 与实际风速 ν_0 由下列缩尺比 λ 的关系缩小，

$$\nu_m = \nu_0 (H_m/H_0)^{\frac{1}{2}} = \lambda^{\frac{1}{2}} \nu_0 \quad (4)$$

式中， $\lambda = H_m/H_0$ 为粉尘物料装卸高度的几何缩尺比。

装卸起尘后的扩散规律，由两相流粒子方程表示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_p u_{pi}) &= 0 \\ \frac{\partial (\alpha_p u_{pi})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_d} (\alpha_p u_{pi} u_{pd}) &= \frac{\alpha_p}{F_d} + \frac{\alpha_p}{S_t} (u_{ti} - u_{pi}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 α_p 是粒子相体积分数。

故还有如下相似律

$$F_d = \frac{v^3}{g\phi}$$

$$St = \frac{\rho_p d^2 v}{18\mu H} \quad (6)$$

通常, F_d 很大, 在扩散中 F_d 这个相似律影响是较小的, 可不考虑, 而为了满足 St 相似律, 对装卸动态模型试验的粒子直径 ϕ_m 应按下列关系式缩小 (假定 ρ_p 、 μ 不变的条件下):

$$\phi_m = \phi_0 (H_m/H_0 \cdot v_0/v_m)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \phi_0 \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

如不改变粒子直径进行装卸动态模型试验, 则试验结果会有较大的误差。

三、试验样品的准备

为保证煤颗粒 F_d 数和 R_d 数相等, 试验中使用的风速及煤和煤矸石可起尘部分的粒径分布与实际一致。可起尘部分的粒径是指粒径小于 2—6mm 的颗粒。为简化试验, 我们将大于 6mm 的颗粒均用 2—6mm 的颗粒代替。混合煤的粒径分布见表 1。煤矸石的粒径分布见表 2。

表 1 混合煤的粒径分布

粒径范围 (mm)	>2-6	2-1.25	1.25-1.0	1.0-0.75	0.75-0.5	0.5-0.1	0.1-0.07	<0.07
平均粒径 (mm)	4	1.625	1.125	0.875	0.625	0.30	0.085	0.035
百分数 (%)	80	0.82	2.18	4.26	2.16	7.72	1.24	1.62
累积百分数 (%)	80	80.82	83.00	87.26	89.42	97.14	98.38	100

表 2 煤矸石的粒径分布

粒径范围 (mm)	>2-6	2-1.25	1.25-1	1.0-0.75	0.75-0.50	0.50-0.10	0.10-0.07	<0.07
平均粒径 (mm)	4	1.625	1.125	0.875	0.625	0.30	0.085	0.035
百分数 (%)	76.5	1.03	2.54	5.24	2.66	8.67	1.15	2.21
累积百分数 (%)	76.5	77.53	80.07	85.31	87.97	96.64	97.79	100

在自然干燥状态下, 煤和煤矸石的含水率按标准方法测定。

四、试验结果

1. 静态试验结果

(1) 煤堆垛起尘风速与颗粒直径的关系能使物料堆表面颗粒起尘的最低风速称为起尘风速, 用 u_0 表示。当风速 $u < u_0$ 时, 物料堆表面颗粒并不起尘, 当风速 $u \geq u_0$ 时, 物料堆表面颗粒即连续起尘。

根据试验测定, 并经回归分析得出启动风速与煤颗粒直径的关系式为:

$$u_0 = 3.23 + 2.28 \times 10^{-3} \rho_p \quad (8)$$

试验表明, 煤堆颗粒的启动风速随粒径的增大而增大。

(2) 混合煤堆垛起尘量与风速的关系

当混合煤含水率为 3.2% 时, 混合煤堆垛起尘量 Q 与风速的关系为:

$$Q = 0.00196u^{3.79} \quad (9)$$

试验表明: 当风速低于启动风速时, 混合煤堆并不起尘 (即起尘量等于零), 当风速等于或大于启动风速时, 其起尘量随风速的增大而呈高次增加。

(3) 混合煤堆起尘量与含水率的关系

假定煤堆垛起尘量与煤的含水率之间有如下关系: $Q = ae^{-b\omega}$, 式中 a 为常数, ω 为物料的含水率, 以 % 表示。

当固定风速时, 测定不同含水率下的起尘量为:

$$Q = 37.83e^{-0.556\omega} (g) \quad (10)$$

试验表明,混合煤堆的起尘量随其含水率的增加而呈负指数衰减。

(4) 混合煤堆起尘量与风速及其含水率的关系为:

$$Q = 0.0118u^{3.79}e^{-0.556w}(g) \quad (11)$$

上式说明:煤堆起尘量随风速的增加而递增,但随其表面含水率的增加而呈负指数衰减。

(5) 煤矸石堆的起尘量与风速的关系

$$Q = 0.724 \times 10^{-5}u^{6.23}(g) \quad (12)$$

矸石堆的起尘量与风速的关系与混合煤堆相类似,即当风速低于启动风速时,煤矸石堆并不起尘;当风速等于或大于启动风速时,其起尘量也随风速的增大而呈高次方增加。但由于煤矸石的比重较混合煤大,故其启动风速比混合煤堆的大。即在相同的起尘风速下,煤矸石堆的起尘量较混合煤堆为小。

在试验中我们还观察到:当用较大的风速 ($u \geq 8.5\text{m/s}$ 左右时) 吹松散的煤矸石堆时,堆顶上的小颗粒起尘,而堆顶上的大颗粒逐渐向下滑动,经一定的吹风时间后,原为圆锥形的尖顶变成圆弧形的锥顶,堆高有所降低,堆底直径稍有增大,此时堆较密实。我们认为煤矸石堆堆形的这种变化是与其比重较大有密切关系。当风速较大时,风将一部分能量传给矸石堆表面的大颗粒,风力不足以克服颗粒本身的重力及粒子间的粘滞力时,颗粒就不能被风力扬起而使其向下滑动。在其向下滑动过程中,又释放一部分能量传给所接触到的颗粒,从而引起整个矸石堆表面颗粒不起尘部分的滑动。

(6) 矸石堆的起尘量与其含水率及风速的关系

根据试验结果得到矸石堆起尘量与其含水率及其风速的数学模式为:

$$Q = 3.1415 \times 10^{-5}u^{6.23} \cdot e^{-0.82w}(g) \quad (13)$$

与混合煤堆一样,矸石堆的起尘量亦随风速的增加而递增,但也随其表面含水率的增加而呈负指数衰减。可见,对煤堆和矸石

堆表面喷雾洒水,其防尘效果是相当明显的,这与现场实际是一致的。但由于煤矸石的比重较混合煤为大,因此,其起尘风速也相应较大,在相同的风速和含水率情况下,矸石堆的起尘量远较混合煤堆为小。

对于比重不同的物料,为防止起尘而在物料堆表面上洒水的量应该是不一样的。比重大的物料洒较少的水(或每天洒水次数不相同)即可达到防尘效果。

以上静止物料堆模型试验的吹风时间分别为 30min,换算到实际时,时间相当于 30/ λ min,起尘量相当于 $Q/\lambda^3(g)$ 。

2. 动态装卸起尘量

模型试验风速按 $v_m = v_0\lambda^{1/2}$ 进行换算,煤流柱装卸时间按斯脱罗哈尔数确定

$$t_m = t_0\lambda^{1/2}$$

(1) 自卸汽车倾卸煤时的起尘量

自卸汽车模型缩尺比 $\lambda = \frac{1}{50}$ 。风洞中自卸汽车倾卸混合煤时的起尘量公式为:

$$Q = 0.1e^{0.01u}(g/\text{次}) \quad (14)$$

换算到 170 吨自卸汽车时的实际起尘量为

$$Q = 12500e^{0.01u}(g/\text{次}) \quad (15)$$

(2) 自卸汽车倾卸煤矸石时的起尘量

风洞中自卸汽车倾斜煤矸石时的起尘量公式为:

$$Q = 0.04e^{0.442u}(g/\text{次}) \quad (16)$$

换算到 170 吨自卸汽车时的实际起尘量为:

$$Q = 5000e^{0.442u}(g/\text{次}) \quad (17)$$

(3) 皮带运输机卸煤时的起尘量

实际皮带运输机卸煤时的起尘量为:

$$Q = c_f \rho u^2 \cdot H^2 \cdot t \quad (18)$$

式中, ρ 为空气密度 (g/m^3); u 为实际风速 (m/s); H 为装卸高度 (m); t 为装卸时间 (s); c_f 为无因次系数,由模型试验求得。本试验中按下式计算:

$$c_f = 4.129 \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.664} \cdot \left(\frac{u}{u_0}\right)^{-0.0391}$$

$$\cdot \left(\frac{x}{H}\right)^{-0.467} \cdot e^{-0.726w} \quad (19)$$

式中, D 为煤炭下落时的当量直径; u_0 为起尘风速, 根据试验 u_0 为 0.21(m/s); x 为为定义起尘量的距离 (m); w 为煤炭的含水率 (%)。

上二式表明, 皮带运输机装卸煤炭时单位时间的起尘量随风速、装卸高度、离尘源的距离以及煤的含水率而变化。

五、结 束 语

本文所介绍的一些试验工作, 虽然已解

决了一些生产上提出的问题, 但对这些问题的研究只能说处于初期阶段, 离开完善和系统的解决尚有一段距离, 特别是我们所做的飘尘浓度扩散试验尚不够精确, 需进一步完善, 有些工作尚有待深入探讨。

参 考 文 献

- [1] Crowe, C. T., ASME Journal of Fluids Engineering, 104(3), 297—303 (1982).
- [2] 王献孚, 武汉水运工程学院学报, (4)51—59(1985).
- [3] [苏] B. C. 尼基金 H. 3. 彼得科洛夫, 露天矿通风, 1—5 页, 煤炭工业出版社, 1981 年。

用植物监测大气二氧化硫污染状态的变化*

郁梦德 张德强 余清发

(中国科学院华南植物研究所)

国内外的研究证明, 植物叶片的含污量与大气污染物浓度有着密切的关系, 因此, 在研究污染物对环境质量的影响时, 测定植物叶片含污量是一项重要的指标。

1980 年茂名市工业污染物排放标准制定前, 曾对该市大气 SO_2 浓度监测点上的植物进行过受害症状调查和叶片含硫量的测定, 并根据植物受害状况及含污量指数将该市的大气 SO_2 污染划分为三个污染区。所划分的污染区与大气 SO_2 浓度分区图基本一致。

1985 年于同一采样季节、同一地点、用同样方法进行植物受害调查和叶片含硫量测定, 通过前后两次调查和含硫量变化, 评价该市工业污染物排放标准制定前后 SO_2 污染状况的变化, 研究证明利用叶片分析评价某一地区环境质量前后的变化是一种比较简便、经济有效而又科学的生物学手段之一。

一、研究 方 法

在 1980 年大气 SO_2 监测点上对生长在自然土壤上的木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 和窿缘桉 (*Eucalyptus exserta*) 两种植物, 进行受害症状的调查。采集 3—5 株面向污染源、高约 3m 处的枝条, 每株 2—3 条, 用自来水冲洗干净, 晾干后剪取成熟叶和老叶(不带叶柄)**, 于 60℃ 烘箱烘干, 用手初步粉碎, 对角线法取样 10g 左右, 用不锈钢剪刀剪至小于 0.5cm, 磨碎过 80 目筛, 装磨口瓶供测试用。

总硫测定: 称取植物样品 (60℃ 烘干) 0.1000g, 用燃烧法提取后, 吸出定量清液, 用

* 本文为中国环境科学院生态研究所和茂名市环境保护局的委托任务。上述单位的黄振管、李煜堂两同志协助采样工作。

** 木麻黄是指小枝和鳞片状退化叶。