

# 料堆风蚀扬尘排放量的一个估算方法

谢绍东\*,齐丽(北京大学环境科学系,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100871)

**摘要:** 以美国环境保护局(EPA)推荐的计算料堆风蚀扬尘排放因子的方法为基础,探讨料堆风蚀扬尘排放量的估算,包括计算所需参数及其估算方法和计算过程.并估算了北京市石景山地区圆锥或椭圆形煤堆和平坦形煤灰料堆的扬尘排放量.结果表明,北京石景山地区 1999 年 12 月,1 个高度 7.8m,底面直径 21.3m 的圆锥形煤堆可排放 817g PM<sub>10</sub>,1 个平坦的直径 15.6m 的圆形煤灰料堆可排放 1612g PM<sub>10</sub>.

**关键词:** 风蚀扬尘; 颗粒物; 排放因子; PM<sub>10</sub>

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2004)01-0049-04

An estimation method for wind erosion dust emissions from storage piles. XIE Shao-dong, QI Li (State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China). *China Environmental Science*, 2004,24(1): 49~52

**Abstract:** Based on the method of calculating the emission factor of wind erosion dust from storage piles recommended by US EPA, estimation of wind erosion dust emissions from storage piles are explored, including the calculation needed parameters and then estimation method, and calculating procedure. At the same time, wind erosion emissions from the conical or elliptical coal storage piles and flat coal ash piles in Shijingshan District, Beijing City are calculated. PM<sub>10</sub> emissions from a conical coal pile with 7.8m height and 21.3 base diameter and a flat coal ash pile with 15.6m base diameter amounted to 817g and 1612g respectively in December, 1999 in this area.

**Key words:** wind erosion dust; particulate matter; emission factor; PM<sub>10</sub>

大气颗粒物源排放研究对于控制和治理大气颗粒物污染十分重要,但颗粒物排放源清单的建立十分复杂,特别是难于估算不经过排放间无规则排放的无组织尘排放,料堆扬尘就是其中之一.料堆扬尘产生于料堆的装卸、堆放和自然风蚀等过程,作者探讨由自然风蚀引起的扬尘排放.当料堆颗粒的直径小于 100μm 和颗粒之间的凝结力小于颗粒能在外界扰动下克服凝结力的束缚时就能产生扬尘,所谓扰动就是导致料堆暴露新表面的活动或行为,有空气的扰动和人类活动的扰动等.很明显,扰动小引起的扬尘就小.

料堆粒子被风吹起的过程极其复杂,迄今人们对机理的了解甚微<sup>[1]</sup>,很难通过大气现场直接测定其起尘量.通过风洞模拟实验,人们确定了影响该过程的一些因子,如风速、湿度、颗粒粒径等<sup>[2]</sup>,并总结出一些经验规律<sup>[3]</sup>.然而,我国在此领域积累的研究资料较少,作者尝试应用美国环境保护局推荐的方法估算料堆扬尘的排放量.

## 1 料堆风蚀扬尘排放因子的计算方法

料堆表面遭受风扰动后引起颗粒物排放的排放因子可以用下式计算<sup>[4]</sup>:

$$EF_p = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

式中:k 为粒径大小因子,无量纲,它的大小随颗粒物粒径大小的变化而变化,当粒径为 100μm、30μm、<15μm、<10μm、<2.5μm 时,对应的 k 值分别是 2.12、1.0、0.6、0.5、0.2<sup>[4]</sup>;N 为料堆每年受扰动的次数;P<sub>i</sub> 为第 i 次扰动中观察的最大风速的风蚀潜势,g/m<sup>2</sup>.

干燥暴露表面的风蚀潜势可由下式求得:

$$P = 58(u^* - u_{t0}^*)^2 + 25(u^* - u_{t0}^*) \quad (2)$$

$$P = 0 \quad u^* \leq u_{t0}^*$$

收稿日期: 2003-06-20

基金项目: 科技部专项“北京市大气污染控制对策研究”

\* 责任作者,博士, sdxie@ces.pku.edu.cn

式中:  $u^*$  为摩擦风速, m/s;  $u_t^*$  为阈值摩擦风速, 即起尘的临界摩擦风速, 低于此值时就认为不起尘, m/s.

显然, 风蚀潜势函数( $P$ )是非线性的, 因此对每一次侵蚀事件必须分别处理.

方程(2)中的摩擦风速<sup>[5]</sup>( $u^*$ )可参考如下方程计算:

$$u(z) = \frac{u^*}{0.4} \ln \frac{z}{z_0} \quad (z > z_0) \quad (3)$$

式中:  $u$  为地面风速, m/s;  $u^*$  为摩擦风速, m/s;  $z$  为风速检测高度, m;  $z_0$  为地面粗糙度, m; 0.4 为沃卡门常数, 无量纲.

## 2 计算参数的确定

### 2.1 扰动周期和最大风速

在计算排放因子时, 遭受不同扰动频率的可风蚀表面的每一个面积将被分别计算, 因此需要确定扰动周期. 对于每日都扰动的表面,  $N$  为每年 365 次; 而对于每 6 个月扰动一次的表面,  $N$  为每年 2 次. 计算时需要根据料堆实际作业情况确定扰动频率  $N$ .

扰动周期确定后, 就需要获得扰动周期间的风速, 然后找出其中的最大风速. 以此最大风速计算出料堆的颗粒物排放量就是此料堆在该扰动周期的排放量. 可见, 该方法认为受扰动料堆暴露的干燥表面仅起尘 1 次, 如果料堆没有再次被扰动就不会有新的表面暴露, 也不会再次产生风蚀扬尘.

### 2.2 摩擦风速与阈值摩擦风速

知道扰动周期间最大的风速后, 就可以应用方程(3)转化为相对应的地面摩擦风速. 但是, 方程(3)仅适用于较大的相对平坦的料堆或暴露面积仅少量处于地面风速层的料堆. 如果料堆明显穿过地面风速层, 即当料堆的高与底的比率大于 0.2 时, 料堆各个部分受到的风侵蚀程度就有明显差异. 此时需要将料堆表面积划分成为若干个不同程度的风侵蚀的子表面, 然后分别计算其摩擦风速.

Stunder B J B 等人<sup>[5]</sup>通过风洞试验, 研究了圆锥形和带平顶的椭圆形两种典型料堆当高与

底的比率大于 0.2 时料堆各部分受风侵蚀的程度, 并用料堆表面风速( $u_s$ ), 即风过境时在料堆表面产生的实际效果的有效值与逼近目标风速( $u_t$ )的比率表示, 结果见图 1. 图 1 所示的结果相当于实际堆料高度为 11m、10m 高度处风速和堆料表面粗糙高度 0.5cm 的情况, 标准的表面风速相当于地面高度 25cm 处的风速. 表 1 给出了图 1 中每一个子区域所占的面积分数.

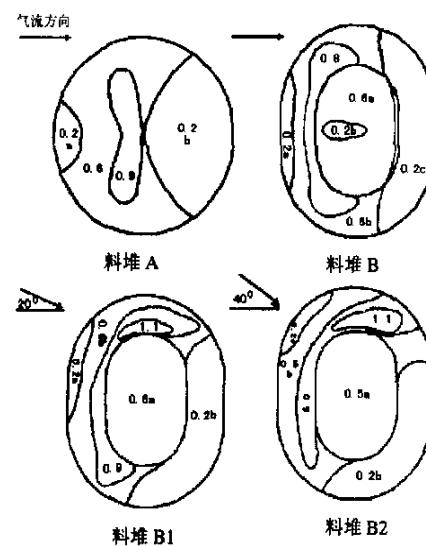


图 1 堆料归一化表面风速( $u_s/u_t$ )的等值线

Fig.1 Contours of normalized surface wind speeds ( $u_s/u_t$ )

表 1 不同  $u_s/u_t$  的子表面积分布

Table 1 Subarea distribution for regimes of  $u_s/u_t$

$u_s/u_t$	占料堆表面积的百分比(%)			
	料堆 A	料堆 B	料堆 B1	料堆 B2
0.2a	5	5	3	3
0.2b	35	2	28	25
0.2c		29		
0.6a	48	26	29	28
0.6b		24	22	26
0.9	12	14	15	14
1.1			3	4

根据堆料的外形和最大风速的方位适当应用图 1 所示的堆料类型确定堆料各个子表面的表面风速  $u_s^*$ :

$$u_s^+ = \frac{u_s}{u_r} \times u_{10}^+ \quad (4)$$

式中:  $u_s^+$  为堆料表面风速, 相当于地面高度 25cm 处的风速, m/s;  $u_{10}^+$  为地面高度 10m 处的实测风速, m/s.

应用方程(3)计算堆料各个子表面对应的摩擦风速  $u^*$ . 此外, 还需要根据当地实际情况确定地面粗糙度.

### 3 计算示例

应用该方法对北京市堆料扬尘的排放因子及其排放量进行了估算, 现给出计算示例.

#### 3.1 圆锥形堆料风蚀扬尘排放量的计算

以一个高度 7.8m 和底的直径为 21.3m 的圆锥形煤堆为例, 该堆料暴露总表面积为:

$$S = \pi r \sqrt{r^2 + h^2} = 3.14 \times 10.65 \sqrt{10.65^2 + 7.8^2} = 441 \text{m}^2.$$

首先, 确定可风蚀材料的阈值摩擦风速. 在缺乏阈值摩擦风速的现场测量数据时, 可参考文献报道值<sup>[6,7]</sup>. 初步研究指出<sup>[8]</sup>, 北京地区煤堆起尘的阈值风速为 5.4m/s, 对应的阈值摩擦风速为 0.57m/s, 地面粗糙度是 0.3m.

确定扰动周期和扰动期间的最大风速. 现场

调查表明, 北京地区煤堆的扰动频率较高, 除靠近煤堆底部的较小区域外, 整个煤堆平均每 3d 受 1 次扰动, 相应的风扰频率为  $N=120$  次/a. 于是, 可根据实测逐时风速确定 3d 扰动期间的最大风速. 为简化计算过程, 这里仅选择北京石景山地区典型的 12 月份计算该煤堆的排放, 表 2 给出了该月扰动期间的最大风速值.

表 2 1999 年 12 月北京石景山区每 3d 最大风速值

Table 2 Fastest miles wind per three days in December 1999, in Beijing Shijingshan District

时间 (年-月-日)	最大风速 (m/s)	时间 (年-月-日)	最大风速 (m/s)
1999-12-02	3.3	1999-12-19	8.2
1999-12-05	6.6	1999-12-21	8.2
1999-12-08	8.4	1999-12-23	7.3
1999-12-10	7.9	1999-12-27	7.3
1999-12-16	7.1	1999-12-30	5.2

将扰动期间的最大风速值应用方程(4)和方程(3)换算成为堆料每一个子区域对应表面风模式( $u_s/u_r$ )下的摩擦风速  $u^*$ . 假设该煤堆堆放形式可用图 1 中堆料 A 的形状描述, 然后便可计算出该堆料各子区域摩擦风速, 结果见表 3.

表 3 煤堆各子区域每个表面风模式下摩擦风速值的计算过程

Table 3 Calculation of friction velocities for each subarea of coal piles in different disturbance period

扰动次数	$u_{10}$ (m/s)	$u_s^+$ (m/s)			$u^*$ (m/s)			$P(0.9)$ (g/m <sup>2</sup> )
		$u_s/u_r:0.2$	$u_s/u_r:0.6$	$u_s/u_r:0.9$	$u_s/u_r:0.2$	$u_s/u_r:0.6$	$u_s/u_r:0.9$	
1	3.3	0.66	1.98	2.97	0.07	0.20	0.30	0
2	6.6	1.32	3.96	5.94	0.13	0.40	0.59	0.633
3	8.4	1.68	5.04	7.56	0.17	0.50	0.76	6.657
4	7.9	1.58	4.74	7.11	0.16	0.47	0.71	4.678
5	7.1	1.42	4.26	6.39	0.14	0.43	0.64	2.001
6	8.2	1.64	4.92	7.38	0.16	0.49	0.74	5.837
7	8.2	1.64	4.92	7.38	0.16	0.49	0.74	5.837
8	7.3	1.46	4.38	6.57	0.15	0.44	0.66	2.614
9	7.3	1.46	4.38	6.57	0.15	0.44	0.66	2.614
10	5.2	1.04	3.12	4.68	0.10	0.31	0.47	0

注:  $u_s^+ = (u_s/u_r) \times u_{10}^+$   $u^* = (u_s^+ \cdot 0.4) / \ln(z/z_0) = (u_s^+ \cdot 0.4) / \ln(25/0.5) = 0.1u_s^+$

应用方程(2)计算出每次扰动时每一个子区域的风蚀潜势, 再应用方程(1)计算出颗粒物的月或年排放因子. 例如, 对于表 3 中第 2 个扰动周期

风蚀潜势可计算为:

$$P(u_s/u_r:0.9) = 58(0.59-0.57)^2 + 25(0.59-0.57) = 0.633 \text{g/m}^2$$

由表3可见,  $u_s/u_r$  分别为 0.2 和 0.6 表面风模式下对应的摩擦风速没有一个超过阈值风速 0.57m/s, 因此这两种情况均不发生风蚀扬尘, 其风蚀潜势为零. 于是, 该月风蚀潜势  $P=\Sigma P(0.2)+\Sigma P(0.6)+\Sigma P(0.9)=0+0+30.87=30.87\text{g/m}^2$ . 然后, 可以计算 1999 年 12 月该煤堆因风蚀扬尘排放  $\text{PM}_{10}$  的月总排放量为:

$$E_{\text{PM}_{10}}=0.5\times(\Sigma P(0.2)\times S_{0.2}+\Sigma P(0.6)\times S_{0.6}+\Sigma P(0.9)\times S_{0.9})=0.5(0\times441\times0.4+0\times441\times0.48+30.87\times441\times0.12)=817\text{g}$$

### 3.2 平坦形堆料风蚀扬尘排放量的计算

假设 1 个平坦的直径为 15.6m 的煤灰圆形堆料, 估算该堆料在北京石景山地区 1999 年 12 月的风蚀扬尘排放量.

该堆料暴露的总表面积可以计算为:

$$S=\frac{\pi}{4}d^2=\frac{3.14}{4}(15.6)^2=191\text{m}^2$$

确定可风蚀材料的阈值摩擦风速, 煤灰的阈值摩擦风速仍然取 0.57m/s, 地面粗糙度取 0.3m.

确定扰动周期和扰动期间的最大风速. 假设形成这样的煤灰每个月搬运 1 次, 也就是整个表面积可以暴露 1 个月, 亦即  $N=12$  次/a. 于是, 由表 2 可见, 12 月扰动期间的最大风速为 8.2m/s.

应用方程(3)将扰动期间的最大风速换算成为相应的摩擦风速.

$$u^*=\frac{u(z)\times 0.4}{\ln \frac{z}{z_0}}=0.935\text{ m/s}$$

应用方程(2)计算风蚀潜势,

$$P=58(u^*-u_r^*)^2+25(u^*-u_r^*)=58(0.935-0.57)^2+25(0.935-0.57)=16.88\text{g/m}^2$$

对于 12 月该煤灰堆料因风蚀排放的  $\text{PM}_{10}$  的排放量为:

$$E_{\text{PM}_{10}}=0.5\times16.88\times191=1612\text{g}$$

### 4 结语

料堆扬尘的排放取决于地面摩擦风速与可风蚀材料阈值摩擦风速之间差值的大小, 以及料

堆的形状和暴露表面积的大小. 计算时假设受扰动料堆暴露的干燥表面仅起尘 1 次, 如果料堆没有再次被扰动就不会产生新的表面暴露, 也就不会再次产生风蚀扬尘. 由于料堆形状的不同, 其表面所受到风侵蚀的程度也不同. 因此, 计算时除需要较准确确定料堆产生新表面的周期, 还需要确定料堆的形状和料堆位于风向的位置, 以及料堆各表面受风侵蚀程度的分布. 地面粗糙度  $z_0$  也是一个重要参数, 应根据实地情况选择值的大小. 计算结果表明, 圆锥或椭圆形料堆底部相对于顶部起尘量较少, 甚至不起尘, 越接近顶部, 扬尘因子越大, 起尘量也越大, 所以应适当注意料堆堆放高度; 对于平坦形料堆, 受风侵蚀的程度较大.

### 参考文献:

- [1] 宣捷. 低层大气中固体粒子运动及其物理模拟 [J]. 环境科学学报, 1998, 18(4):350-355.
- [2] Gillette D A. A wind tunnel simulation of the erosion of soil: effect of soil texture, wind speed and soil consolidation on dust production [J]. Atmospheric Environment, 1978, 12:1735-1743.
- [3] Kato M, Hanafusa T. Wind tunnel simulation of atmospheric turbulent flow over a flat terrain [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30:2853-2858.
- [4] Update of fugitive dust factors in AP-42 section 11.2-wind erosion, MRI No.8985-K [R]. Kansas City, MO: Midwest Research Institute, 1988.
- [5] Stunder B J B, Arya S P S. Windbreak effectiveness for storage pile fugitive dust control: A wind tunnel study [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1988, 38:135-143.
- [6] Axtell K, Cowherd C Jr. Improved emission factors for fugitive dust from surface coal mining sources [R]. EPA-600/7-84-048, U. S. Environmental Protection Agency, 1984.
- [7] G E Muleski. Coal yard wind erosion measurement [R]. Kansas City, MO: Midwest Research Institute, 1985.
- [8] 宣捷. 中国北方地面起尘总量分布 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(4):426-430.

**作者简介:** 谢绍东(1963-), 男, 四川南部人, 北京大学环境科学系副教授, 博士, 主要从事城市与区域大气污染控制. 出版学术专著 1 部, 发表论文 60 余篇.