

# 焊接气溶胶粒子谱分布特征

施雨湘<sup>1</sup>, 乔亚霞<sup>1</sup>, 雅宏<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 材料工程系, 武汉 430072; 2. 九州大学, 日本 福岡 812-8581)

**摘 要:** 基于电迁移率测试技术, 采用计算机控制的微分型迁移率粒子尺寸测定方法(DMPS方法)和直接采样电泳分析方法, 对常用焊条在焊态下产生的焊接气溶胶粒子的谱分布和形貌进行了实时测定。首次发现焊接气溶胶粒子具有多峰分布特征。采用文中提出的分区间处理方法, 能获得描述焊接气溶胶粒子谱分布特征的分函数, E4303焊条各峰区粒子群各自都基本遵循对数正态分布规律。这对阐明焊接气溶胶粒子产生机理, 揭示焊接气溶胶特性, 及有效控制焊接烟尘等具有重要意义。

**关键词:** 焊接气溶胶粒子; 多峰现象; 分布特征; 分函数; 焊接烟尘

**中图分类号:** TG421 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2003)01-31-04



施雨湘

## 0 序 言

作者曾指出焊接烟尘的气溶胶本质, 即焊接气溶胶是材料(焊接材料和母材)在焊接热源作用下, 在环境气氛中形成的一种人工气溶胶<sup>[1]</sup>。气溶胶粒子的大小及其分布是最基本的气溶胶特性, 是探讨烟尘粒子形核、长大、扩散、凝并、沉降、捕集诸行为的基础。焊接气溶胶粒子的大小及分布不同, 它的物理、化学性质也不同, 对人和环境的影响也不同。在21世纪注重“焊接与环境”问题的今天<sup>[2]</sup>, 人们已不满足于了解焊接烟尘的“量”, 更关注粒子谱分布等“质”的问题。迄今多利用光学显微镜或电子显微镜的分级计数法和利用冲击采样器的分级测重法<sup>[3~5]</sup>等测定焊接烟尘的粒度分布, 这些方法存在测定置信度低, 或难以对细小粒子分级, 且无法实现实时测定等问题。

作者利用电迁移率随粒子尺度减小而增大的特点, 尝试采用微分型迁移率粒子分级器, 即DMPS(Differential mobility particle sizer)方法<sup>[6]</sup>, 探讨提高测定置信度, 获取迄今难以得到的细小粒子的信息, 实现实时测定, 以期对焊接气溶胶粒子谱分布有新的认识, 为揭示焊接气溶胶特性等提供新的途径。

## 1 试验方法

### 1.1 焊接气溶胶粒子谱分布测定方法

焊接气溶胶粒子谱分布的测定在顶部装有抽气罩的1.5 m×1.5 m×1.5 m密闭装置中边施焊边抽气边采样边检测。

粒子谱分布的DMPS测试装置(美国TSI公司制造)如图1所示, 焊接气溶胶样品经静电分级器分级后, 输出单分散气溶胶送入凝结核计数器计数, 即得到粒子浓度, 不同大小粒子与其对应浓度关系的集合, 就是所测焊接气溶胶粒子谱分布。整个系统和测试过程由微型计算机控制, 测定结果以图表

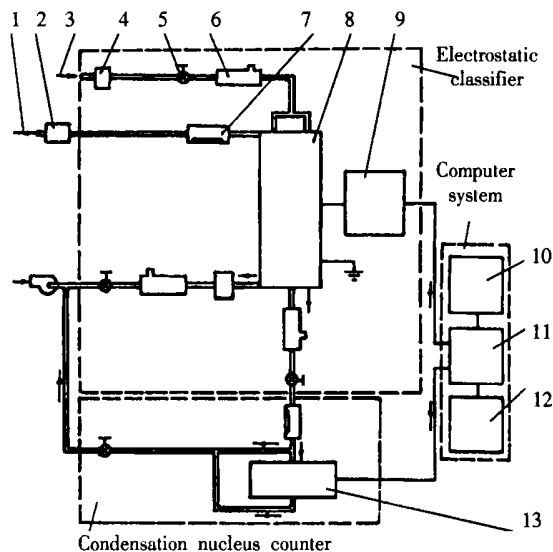


图1 DMPS装置示意图

Fig.1 Schematic drawing of DMPS unit

- 1—Welding aerosol; 2—Impactor; 3—Sheath air inlet;  
4—Filter; 5—Control valve; 6—Flowmeter;  
7—Neutralizer; 8—Differential mobility analyzer;  
9—Negative high voltage supply; 10—Printer;  
11—Computer; 12—Video monitor; 13—CNC

输出,可以同步显示在屏幕上,实现实时测定。

同时用 WY-1 型冲击式尘粒分级仪(中国预防医学科学院卫生研究所制造)测定分级粒子的重量分布。

1.2 焊接气溶胶粒子的电子显微镜观测

焊接气溶胶粒子样品采用直接采样法观测,即用覆有碳支持膜的铜网采集,不经任何处理,直接供 H-800 型透射电子显微镜(日立公司制造)观测。

1.3 供试材料

采用市售  $\phi 4\text{ mm}$  E4303 焊条,直流正接,电流 170~190 A,电压 25~30 V,在普通低碳钢板上连续堆焊。

2 试验结果

2.1 焊接气溶胶粒子的 DMPS 测定结果

图 2 是用 DMPS 方法实时测得焊态下,市售 E4303 焊条焊接气溶胶粒子谱分布的典型一例,大于  $0.9\text{ }\mu\text{m}$  的部分是由表 1 测定结果换算的。图 2 出现  $D_{p1}$ ,  $D_{p2}$ ,  $D_{p3}$  三个粒子群分布峰,小于  $0.9\text{ }\mu\text{m}$  的粒子约占总粒子数的 99.4%。

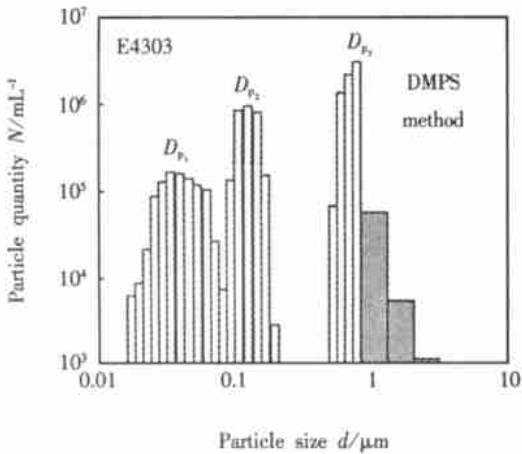


图 2 焊态下焊接气溶胶粒子谱测定结果

Fig.2 Measured result of particle size distribution for welding aerosols during welding

2.2 焊接气溶胶粒子的冲击采样结果

在进行 DMPS 测定的同时,用冲击式分级仪测得焊态下焊接气溶胶粒子的重量分布如表 1 所示,其中粒子尺寸小于  $0.9\text{ }\mu\text{m}$  的粒子重量约占总粒子重量的 91.25%。

2.3 焊接气溶胶粒子的电镜观测结果

用电镜拍摄的焊接气溶胶粒子典型形貌照片的一例如图 3 所示,细小的一次粒子基本为球形。粒子尺寸如图 3a 所示,大致有  $10^{-2}\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10^{-1}\text{ }\mu\text{m}$ 、

表 1 冲击式分级仪测得焊态下焊接气溶胶粒子的质量分布

Table 1 Mass distribution of welding aerosol particle measured by impact classifier during welding

Grade	Size range $\Delta d/\mu\text{m}$	Mass percent $\Delta w(\%)$
1	4.3~6.3	0.47
2	3.2~4.3	0.93
3	2.3~3.2	1.87
4	1.6~2.3	2.04
5	0.9~1.6	3.44
6	< 0.9	91.25

$10^0\text{ }\mu\text{m}$  三个量级,数量上以前两类粒子居多,这与图 2 和表 1 测定结果是一致的。又如图 3b 所示,有些大粒子也是由更细小的粒子构成的。

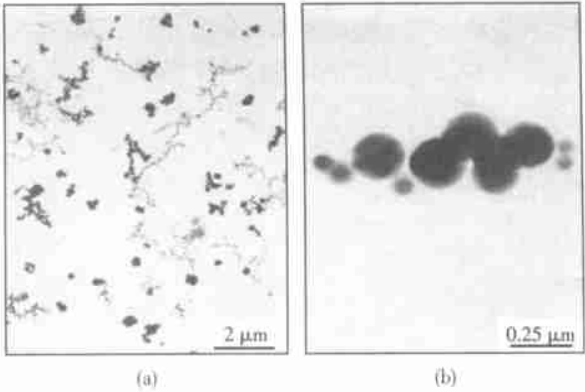


图 3 焊接气溶胶粒子形貌的电镜照片

Fig.3 TEM graphs of welding aerosol particle

3 讨 论

3.1 焊接气溶胶粒子累积分布及特征数

图 2 结果用常用统计方法整理成粒子数量累积百分数与粒子尺寸关系得到图 4,二者不成线性关系。粒子为球形,可以将图 2 结果整理成粒子体积(质量)累积百分数与粒子尺寸关系,即图 4 中的体积分布曲线,也不成线性关系。可见焊态下,用常用统计方法分析焊接气溶胶粒子谱,并不具有对数正态分布规律。常用粒子分布特征数有几何平均径  $d_g$  和标准差  $\sigma$ ,可用常用方法计算<sup>[7]</sup>,即

$$\ln d_g = \frac{\sum_i^k \Delta N \ln d_p}{N}, \tag{1}$$

$$\ln \sigma = \left[ \frac{\sum_i^k \Delta N (\ln d_p - \ln d_g)^2}{N} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中:  $d_p$  是粒子尺寸;  $\Delta N$  是某尺寸粒子浓度;  $N$  是粒子总浓度;  $i, k$  是粒子尺寸分组的起始和终止序号。根据图 2 数据,由式(1)、(2)计算结果如下。

$$\begin{cases} d_{g_Q} = 0.343 \mu\text{m} \\ \sigma_Q = 2.785 \\ d_{g_V} = 0.805 \mu\text{m} \\ \sigma_V = 1.386 \end{cases},$$

式中:下标  $Q, V$  分别表示与数量、体积有关的量。以上测得  $d_g$  等有关体积的量与文献[4]基本一致。有关数量分布特征数的报道却很少。从图 4 及以上特征数可以看到,焊接气溶胶粒子的数量分布与体积分布有差别,前者平均径要小得多,且分散度大。但是,用常用统计方法处理像图 2 这样的焊接气溶胶粒子分布,不能反映其具有多峰分布等重要特征,其特征数也不具有明确的物理意义,因此需要寻找一种更为合适的处理方法。

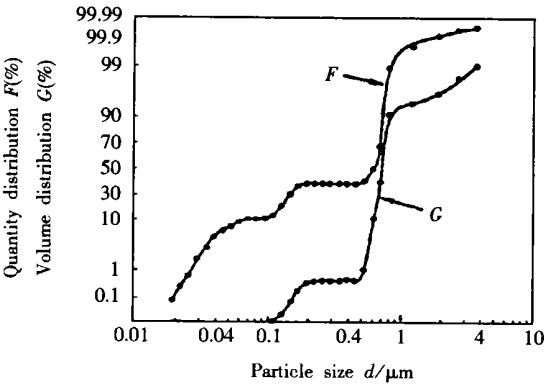


图 4 用常用方法得到的焊接气溶胶粒子累积分布曲线

Fig. 4 Distributive curves of cumulative percent for welding aerosol particle with usual method

3.2 焊接气溶胶粒子谱分布的多峰特征

焊态下焊接气溶胶粒子谱分布的多峰现象是作者采用 DMPS 方法首次观测到的,对 10 多种焊接材料近百次测定中,发现普遍存在这一特征<sup>[1]</sup>,图 2 是一例。图 3 电镜照片也证实存在着三个数量级大小的粒子群。

迄今有关焊接烟尘粒子分布的报道,基本都呈单峰分布<sup>[3,5]</sup>。究其原因与测定方法密切相关。焊接气溶胶粒子的谱分布,易受材料、电弧特性及工艺因素等诸多影响,仅具有统计意义。这类问题要达到一定置信度,所需样品数量随样品中最小与最大粒子的体积比  $K_V$  减小而急剧增大,如置信度要达

到 0.9,当  $K_V=0.01$  时,至少需要测定  $10^4$  个粒子<sup>[7]</sup>。焊接气溶胶粒子一维尺寸分布在三个数量级,而体积比与一维尺寸成 3 次方关系,故其  $K_V$  值远小于 0.01,电镜等分级计数测定法则很难满足对样品数量的要求。冲击式分级仪等测重法,又难以对细小粒子分级;即使能够分级,也因粒子体积呈 3 次方关系,如图 4 所示,细小粒子几乎可以忽略而失去分级意义。所以迄今的计数法从  $0.25 \mu\text{m}$  才开始计数<sup>[3]</sup>,测重法从  $0.43 \mu\text{m}$  才开始分级<sup>[4]</sup>,这势必丧失细小粒子一侧信息,就是图 2 也会只剩下一个单峰,就观察不到多峰分布现象了。可见传统测定方法不利于反映分布特征,而且测试结果均需再收集样品称重或拍照计数等后续处理才能得到,以至难以实现实时测定,且影响数据可靠性。DMPS 方法在细小粒子测定(特别是小于  $1 \mu\text{m}$ )、满足样品数量要求(如图 2 的粒子数超过  $10^7$  个/mL 量级)、保证置信度,以及便于实时测定等方面具有明显特点。

多峰现象揭示出焊接气溶胶粒子具有多种物质混合物独有的复分布特征,它反映出不同大小粒子群可能具有不同发尘源,不同发尘机制等一系列特性(作者另文讨论),因此是焊接气溶胶不容忽视的重要属性之一。

3.3 焊接气溶胶粒子谱分布函数

在充分认识焊接气溶胶粒子谱分布特征的基础上,文中尝试采用分区间处理方法寻求更适合于描述其多峰复分布特征的分布函数。这样处理图 2 结果得到的粒子数量累积分布曲线如图 5 所示,  $D_{p_1}$ ,  $D_{p_2}$  两个分布峰具有很好线性关系,如果忽略  $D_{p_3}$  数

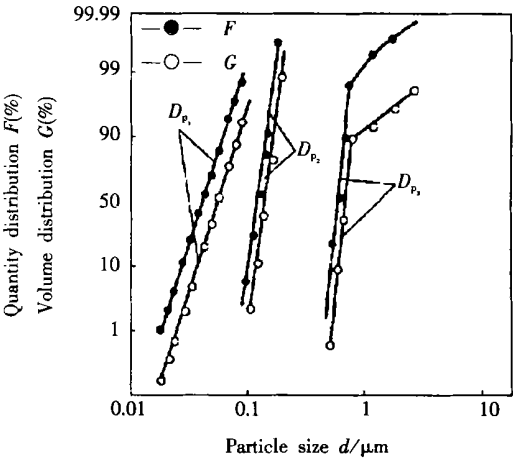


图 5 用分区间处理方法得到的焊接气溶胶粒子累积分布曲线

Fig. 5 Distributive curves of cumulative percent for welding aerosol particle with zoning analysis

量累积百分数 99% 以上部分,也可以近似认为其具有线性关系。这说明三个粒子群,尤其是  $D_{p_1}$ ,  $D_{p_2}$  峰都各自遵循对数正态分布,因此它们的数量密度函数可以表示为

$$f(d_p)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln\sigma}\exp\left[-\frac{(\ln d_p-\ln d_g)^2}{2(\ln\sigma)^2}\right]。(3)$$

数量累积分布函数则为

$$F(d_p)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln\sigma}\int_0^{d_p}\exp\left[-\frac{(\ln d_p-\ln d_g)^2}{2(\ln\sigma)^2}\right]d(\ln d_p)=\Phi\left(\frac{\ln d_p-\ln d_g}{\ln\sigma}\right)。(4)$$

式(4)右边只与特征数  $d_g$ 、 $\sigma$  有关,因此粒子群  $D_p$  服从对数正态分布可以简记为

$$D_p\sim LN(d_g,\sigma)。(5)$$

在图 5 对数概率坐标系中,式(4)为一条直线,很容易确定  $d_g$  和  $\sigma$ 。这样求得  $D_{p_1}$ ,  $D_{p_2}$ ,  $D_{p_3}$  三个峰的数量累积分布函数分别为

$$\begin{cases} D_{p_1}\sim LN_Q(0.042\mu\text{m},1.369) \\ D_{p_2}\sim LN_Q(0.132\mu\text{m},1.155) \\ D_{p_3}\sim LN_Q(0.660\mu\text{m},1.095)。 \end{cases}$$

分区间处理的粒子体积累积分布曲线也绘于图 5,如果忽略  $D_{p_3}$  体积累积百分数 90% 以上部分,可以认为它们也服从对数正态分布,同样可求得其体积分布函数为

$$\begin{cases} D_{p_1}\sim LN_V(0.057\mu\text{m},1.384) \\ D_{p_2}\sim LN_V(0.143\mu\text{m},1.158) \\ D_{p_3}\sim LN_V(0.702\mu\text{m},1.108)。 \end{cases}$$

比较各峰  $LN_Q$  与  $LN_V$  对应的  $\sigma$  值是基本相等的,图 5 中对应直线也大致平行,这正是对数正态分布的显著特点<sup>[8]</sup>,若粒子群的数量服从对数正态分布,则体积(质量)也服从对数正态分布,而且标准差  $\sigma$  相同。

综合以上分区间处理结果,焊接气溶胶等多峰复分布函数可以一般地表示为

$$F(d_p)=\begin{cases} LN_1(d_{g_1},\sigma_1) & A_0\leq d_p<A_1 \\ LN_2(d_{g_2},\sigma_2) & A_1\leq d_p<A_2 \\ \dots & \dots \\ LN_m(d_{g_m},\sigma_m) & A_{m-1}\leq d_p<A_m, \end{cases}$$

式中:  $A_0, A_1, \dots, A_{m-1}, A_m$  为各分区间端点。

这样得到的分布函数能描述焊接气溶胶粒子谱分布特征,其特征数有明确物理意义。

4 结 论

(1) DMPS 方法是能较好揭示焊接气溶胶粒子谱分布特征的测定方法。

(2) 焊态下,焊接气溶胶粒子具有多峰复分布特征。分区间方法适合于多峰复分布的分析处理,获得的分布函数及其特征数具有明确的物理意义。

(3) 焊态下,市售 E4303 焊条焊接气溶胶粒子谱的数量累计分布函数为

$$\begin{cases} D_{p_1}\sim LN_Q(0.042\mu\text{m},1.369) \\ D_{p_2}\sim LN_Q(0.132\mu\text{m},1.155) \\ D_{p_3}\sim LN_Q(0.660\mu\text{m},1.095)。 \end{cases}$$

即存在三个粒子群,各自遵循对数正态分布。

参考文献:

[1] 施雨湘,肖诗祥,杨泗霖,等.焊接安全与烟尘控制研究进展[A].第八次全国焊接会议论文集[C].北京:机械工业出版社,1997.194~198.

[2] Hosoik. Welding and environment[J]. Journal of the Japan Welding Society, 2002, 71(2): 74~78.

[3] Japan Welding Society. Welding and joining handbook[M]. Tokyo: Maluzen Kabushiki Kaisha, 1990.

[4] Matsuda T, Kimura S. To remove locally fume from welding field[J]. Welding Technique, 1979, 27(6): 77~80.

[5] Tandon R K, Crisp P T, Ellis J, et al. Investigation of hardfacing and HSLA steel electrodes[J]. Welding and Metal Fabrication, 1985, 53(2): 47~50.

[6] 施雨湘,肖诗祥,杨世柏,等.焊接气溶胶的 DMPS 测定方法[J].武汉交通科技大学学报,1997,20(4): 436~441.

[7] Japan Powder Technology Society. Powder technology handbook[M]. Tokyo: Nikkan Kougyou Shinbunsha, 1986. 19~20.

[8] 方开泰.统计分布[M].北京:科学出版社,1987.294~298.

作者简介: 施雨湘,男,1946 年出生,教授,博士生导师。主要研究方向为材料焊接性、焊接材料、焊接与环境、材料特种加工。发表论文 60 余篇。

Email: yxshi@public.wh.hb.cn