

火灾烟雾颗粒凝并分形特性研究^{*}

疏学明^{1)†} 方俊²⁾ 申世飞¹⁾ 刘勇进¹⁾ 袁宏永^{1)†} 范维澄^{1)‡}

1) 清华大学工程物理系, 公共安全研究中心, 北京 100084

2) 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

(2006 年 2 月 15 日收到, 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

火灾烟雾颗粒因布朗运动由初期的主粒子凝并形成大颗粒的凝团结构, 其外形呈现出分形特征, 根据分形理论对火灾烟雾颗粒凝团结构进行分析研究, 采用场发射扫描电镜对多种材料的烟雾颗粒图像进行测试, 通过对烟雾凝团图像进行处理, 获得了火灾探测中常见的多种材料的分形维数和分形系数, 给出了烟雾颗粒的主粒子粒径, 并对其影响因素进行了对比分析, 为火灾烟雾探测中颗粒凝并分形特性研究提供有益的探索.

关键词: 火灾, 烟雾, 颗粒, 凝并, 分形

PACC: 0555, 8270R, 9265V

1. 引言

火灾烟雾是一种可燃物燃烧产生的气溶胶, 它的主要组分是燃烧产生的气相产物和掺混进来的空气, 并混杂着许多微小的固体颗粒和液滴^[1], 这些微小的固体颗粒和液滴就构成了火灾烟雾颗粒.

感烟探测是火灾早期探测的主要方式, 而烟雾颗粒特性尤其是烟雾颗粒形状和粒径是影响感烟探测器灵敏度的重要参量^[2,3], 而烟雾颗粒的凝并分形特性是烟雾颗粒形状和粒径研究的关键性课题^[4]. 烟雾颗粒因布朗运动由初期的球形主粒子凝并形成链条状非球形颗粒凝团, 其外形呈现出分形特征, 这种不规则形状的烟雾颗粒的光学特性对感烟探测器灵敏度有着较大影响; 另一方面由于凝并现象使颗粒粒径发生变化, 颗粒数浓度也因凝并分形而急剧减少, 因此烟雾颗粒的凝并分形特性对感烟探测器灵敏度产生较大的影响.

国外科研人员利用扫描电镜、透射电镜或原子力学显微镜观察了燃烧烟雾颗粒凝并分形现象^[5], 通过对电镜拍摄的烟雾颗粒图像进行处理, 得到不同燃料燃烧时烟雾颗粒的分形维数和分形系数. 然而, 目前文献报道的研究成果仅局限于比较容易控

制的气体燃料和液体燃料^[6,7], 而对于火灾探测中常见的固体标准火材料烟雾颗粒特性研究较少^[8], 诸如榉木、棉绳和聚氨酯等固体材料的烟雾颗粒凝并分形结构尚未涉足, 主要原因是由于固体燃料燃烧时影响因素较多, 尤其是火灾中不同燃烧状态对烟雾颗粒生成演化过程影响较大, 这种差异对感烟探测器灵敏度产生较大的影响, 烟雾颗粒凝并分形特性正是火灾烟雾探测基础研究中亟待解决的关键性课题.

本文着重研究了火灾探测中常见的标准火材料的烟雾颗粒凝并分形特征, 采用了扫描电镜测试了几种有代表性的早期烟雾凝团图像, 根据分形理论研究了凝团的图像特征, 通过对烟雾颗粒图像处理, 获得了火灾探测中常见材料的分形维数和分形系数, 以及烟雾颗粒凝团的主粒子粒径和回转半径, 并对其影响因素进行了分析探讨, 这些参数对于认识火灾烟雾颗粒的结构、发展烟雾光散射^[9]理论都具有一定科学意义.

2. 烟雾颗粒凝并分形特性

烟雾颗粒由初期的许多微小的单个主粒子凝并而成, 这些主粒子粒径通常在 30—60nm 范围内^[10], 其形态基本上呈球形, 而且粒径变化不大. 这些悬浮

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2001CB409600)、国家自然科学基金(批准号: 50476023)和中国博士后科学基金(批准号: 2005037053)资助的课题.

[†] E-mail: shuxm@tsinghua.edu.cn

颗粒分散于空气中,不断进行着布朗运动,当两个颗粒运动到足够近时,由于布朗碰撞凝并而形成双粒子结构,进一步与更多粒子相熔合,就逐渐形成大的凝团结构,每个凝团中的主粒子数在 20—2000 范围内^[6]。

2.1. 分形幂律函数

烟雾颗粒凝团结构松散开放,呈现出自相似结构,具有分形特征^[11]。数学上的分形理论对这类不光滑、不规则的几何图形研究提供了一个十分有效的研究方法。

分形维数(D_f)能够定量地描述烟雾凝团外形轮廓呈现的不光滑程度,Koylu 和 Faeth 等人^[12]对凝团结构作出如下的假设:球形主粒子具有恒定的直径,主粒子不重叠且相互点接触排列,折射率相同。因此,凝团中主粒子数目和回转半径的关系可用下列分形幂律函数式来描述^[13]:

$$N = k_f (R_g/d_p)^{D_f}, \quad (1)$$

其中 R_g 为凝团回转半径; d_p 为主粒子粒径; N 为凝团中的主粒子数目; k_f 为分形系数; D_f 为分形维数。

将上式的两边同时取对数,可得

$$\ln N = \ln k_f + D_f \ln(R_g/d_p), \quad (2)$$

从(2)式可以看出,只需作出 $\ln N$ 与 $\ln(R_g/d_p)$ 的线性关系,就可以求得 D_f 和 k_f 。

2.2. 回转半径 R_g 计算

准确测量烟雾凝团回转半径 R_g 是解决(2)式的关键步骤,因此采用图像处理方法^[14-16],根据烟雾凝团的自相似性,将凝团图像分割成多个部分,采用主粒子图像边缘提取方法获得每个主粒子的圆心坐标和半径值,采用下列回转半径计算式得到 R_g 、 N 和 d_p 值,

$$m_1 R_g^2 = \sum_{i=1}^N (m_i r_i^2), \quad (3)$$

其中 r_i 为每个主粒子中心到整个凝团中心的距离; m_1 为凝团的总质量; m_i 为凝团中第 i 个主粒子的质量。

由于凝团主粒子粒径 d_p 近似为定值,假设每个主粒子的密度相同,则每个主粒子的质量也近似相同,所以凝团总质量 $m_1 \approx Nm$,代入(3)式后可得简化式

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2}. \quad (4)$$

由于图像显示的凝团结构只是三维凝团在二维平面上的投影,故从二维值转换到三维值时需要添加一个 1.24 的因子^[6],所以三维凝团回转半径 R_g 为

$$R_g = 1.24 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2}. \quad (5)$$

要求出 r_i 需要定出质心和每个主粒子的中心位置,最根本的问题是定出每个主粒子的中心坐标。由于假设主粒子的密度相同,则质心坐标计算公式可简化为

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N R_i^3 x_i}{\sum_{i=1}^N R_i^3}, \quad (6)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N R_i^3 y_i}{\sum_{i=1}^N R_i^3},$$

式中 x_i, y_i 即为每个主粒子的中心坐标,因此将每个主粒子中心坐标投影到 x 轴和 y 轴上,分别计算每个主粒子的质心坐标,就可得到回转半径 R_g 值。

3. 烟雾颗粒图像获取与处理

3.1. 扫描电镜测试

根据对烟雾颗粒凝并分形特性分析,烟雾凝团图像是获得分形维数和分形系数的基础,因此本文采用场发射扫描电镜(SEM)作为实验测量仪器,它采用强电子束依次对被测试样表面上的各点连续进行扫描,通过逐点扫描获得完全反映试样表面特征的粒子图像,采用电镜图像测试可以避免烟炱折射率的影响。本实验中使用的扫描电镜由日本电子公司生产的 JSM-6700F 型场发射扫描电镜,分辨率为 1nm,放大倍数高达 65 万倍。

实验中采用铜网作为收集烟雾颗粒的载体,这种铜网有三层结构,下层为直径 3.05mm 的金属网,网格间距为 200 目;中间层为有机膜,主要起到支撑上层碳膜的作用;最上层是 20nm 厚的碳膜,因为碳膜具有导电性,而且在扫描电镜发射的强电子束下特别稳定,使得 SEM 具有较高的分辨率。

热泳现象较好地解释了铜网收集原理^[17],这种

热泳现象发生在冷的取样表面附近区域内,当铜网插入到烟雾中,由于铜网温度比烟雾场低得多,使铜网附近的烟雾急速冷却,密度增大,热烟气及时补充而形成对流,驱使烟气中的颗粒到达铜网表面,并吸附在铜网的碳膜上.由于铜网既小又薄,采样时间又非常短暂,基本上不会引起对火焰的扰动.

本实验采用了标准火材料如棉绳、榉木、聚氨酯

以及常见的檀香、香烟作为实验材料,还分别测试棉绳在明火和阴燃火下烟雾图像以比较不同燃烧状况下烟雾颗粒的分形特性.在电镜测试时,先在低倍镜下寻找合适视场,再增大放大倍数去拍摄烟雾凝团的图像,得到的凝团图像保存在计算机里,以备后续的图像分析与处理^[18].本实验中获得的烟雾颗粒图像如图 1 所示.

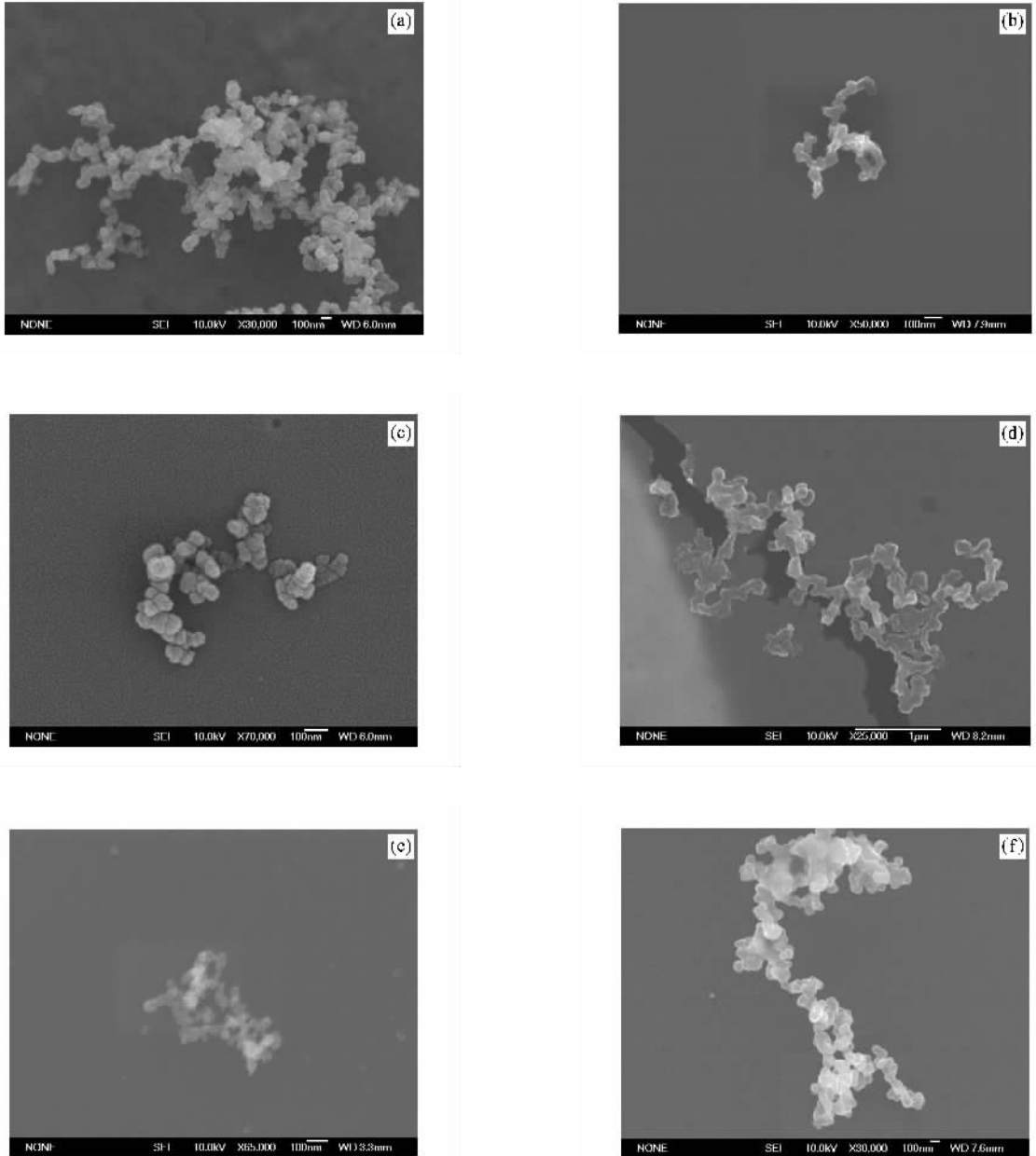


图 1 几种常见烟雾颗粒图像 (a) 棉绳颗粒图像(明火)(b) 棉绳颗粒图像(阴燃)(c) 檀香颗粒图像(明火)(d) 榉木颗粒图像(明火); (e) 聚氨酯颗粒图像(明火)(f) 皖烟颗粒图像(阴燃)

3.2. 烟雾颗粒图像处理

为了获得烟雾凝团的分形维数和分形系数,需

要将电镜测试的烟雾颗粒图像进行分析处理,从中提取各主粒子的位置坐标.为此,首先对烟雾颗粒图像进行数字化处理,再根据(1)~(6)式通过编程计

算,确定数字化图像的质量中心,并以此中心向外作出不同边长的同心正方形,计算不同边长正方形内所覆盖的像素数目。以每张图的左上角为原点,横向为 x 轴,纵向为 y 轴,逐一提取每个方框的位置坐标,确定主粒子的中心坐标。最后以 $\ln(N)$ 为纵坐标,以 $\ln(R_g/d_p)$ 为横坐标,按照最小二乘法得到拟合直线,将其斜率和截距通过数学变换就得到分形维数 D_f 和分形系数 k_f 。

3.3. 烟雾颗粒主粒子粒径

通过对烟雾颗粒图像的分析处理即可得到凝团的主粒子粒径。根据对实验结果的大量统计得到的主粒子粒径的分布范围在 30—60nm 内,而且,主粒子形状基本上呈球形,这与分形理论对烟雾颗粒主粒子的假设相一致。

以棉绳烟雾颗粒为例,在不同燃烧状况下(明火或阴燃火)在火焰上方不同位置上获得的主粒子粒径值如表 1 所示,从表中可以看出:在火焰上方相同高度处,明火烟雾主粒子粒径明显小于阴燃火颗粒粒径。棉绳烟雾的明火主粒子粒径为其阴燃火粒径的 75%—90%,而且,在火焰上方 40mm 处烟雾颗粒主粒子粒径达到最大值。

烟雾颗粒生成动力学演化机理研究表明,早期烟雾颗粒生长经历粒子核化、表面增长、表面氧化和粒子凝并过程^[19],根据颗粒粒径大小将颗粒分为自由分子区、过渡区和连续区,处于自由分子区的一般为纳米级粒径的小颗粒,处于连续区的颗粒粒径为几百纳米到几微米,过渡区颗粒粒径介于两者之间。在自由分子区布朗碰撞凝并是影响颗粒尺寸分布的最重要的颗粒生长过程,Bockhorn 等人^[20]对层流预混火焰烟雾颗粒动力学生长、演化及凝并过程进行了详细的数学模拟,在火焰上方 30—40mm 处数学模拟与实验测量结果符合较好。

表 1 棉绳烟雾颗粒主粒子粒径

火焰上方高度/mm	10	20	40	50	100
d_p /nm					
阴燃火	44.98	52.36	60.27	46.51	40.63
明火	33.33	40.09	56.25	39.77	36.85

3.4. 分形维数 D_f 和分形系数 k_f

根据分形结构的自相似性,将同一幅图分割成很多小的部分后,逐个部分分别计算回转半径 R_g 、

主粒子直径和主粒子数目 N ,于是就得到多组 $\ln(N)$ 和 $\ln(R_g/d_p)$ 数据,利用最小二乘法可以得到拟合曲线,通过数学变换后就得到了凝团的分形维数 D_f 和分形系数 k_f ,采用(2)式作出拟合曲线图(如图 2 所示)。

表 2 实验中采用的几种常见烟雾颗粒分形参数统计表

实验火	R_g /nm	N	$D_f \pm \Delta D_f$	$k_f \pm \Delta k_f$
棉绳	341.4	209	1.54 ± 0.064	6.92 ± 0.08
檀香	353.4	179	1.61 ± 0.09	7.21 ± 0.13
榉木	297.2	102	1.17 ± 0.10	8.98 ± 0.12
聚氨酯	244.9	160	1.61 ± 0.09	5.78 ± 0.15
皖烟	434.0	234	1.68 ± 0.10	7.47 ± 0.15

从表 2 可以看出,分形维数 D_f 受材料种类影响较大,不同燃料产生的烟气凝团的分形维数不相同,但都在 1.1—1.8 的范围内,分形系数 k_f 在 7—9 的范围内,与 Mountain 和 Mulholland 等人^[21]对甲烷、乙烯和乙炔的研究结果符合较好。

4. 结 论

烟雾颗粒凝并分形特性是火灾烟雾探测基础研究的重要内容,本文从早期烟雾颗粒的形成过程出发,根据分形理论初步研究了火灾烟雾颗粒凝并分形特征,采用场发射扫描电镜对多种材料的烟雾颗粒图像进行测试,获得了多种材料的分形维数和分形系数,主要结论如下:

1. 烟雾颗粒凝团由主粒子构成,大多数物质的主粒子粒径分布在 30—60nm 范围内,其形状基本上呈现球形,而由初期的球形主粒子凝并形成的颗粒凝团呈现非球形链条状,具有分形结构特征。
2. 在相同条件下,明火烟雾主粒子粒径明显小于阴燃火颗粒粒径。
3. 通过对烟雾颗粒电镜图像的分析处理,获得了多种火灾探测中常见的固体材料的分形维数 D_f 和分形系数 k_f ,它们与燃料的种类有关,而与燃烧状况关系不大,研究结果与 Mountain 和 Mulholland 等人对甲烷、乙烯和乙炔等气体和液体燃料的研究结果相一致。
4. 烟雾颗粒凝并分形特性研究应与烟雾颗粒粒径表征以及烟雾光散射特性研究结合起来,此项工作有待进一步深入下去。

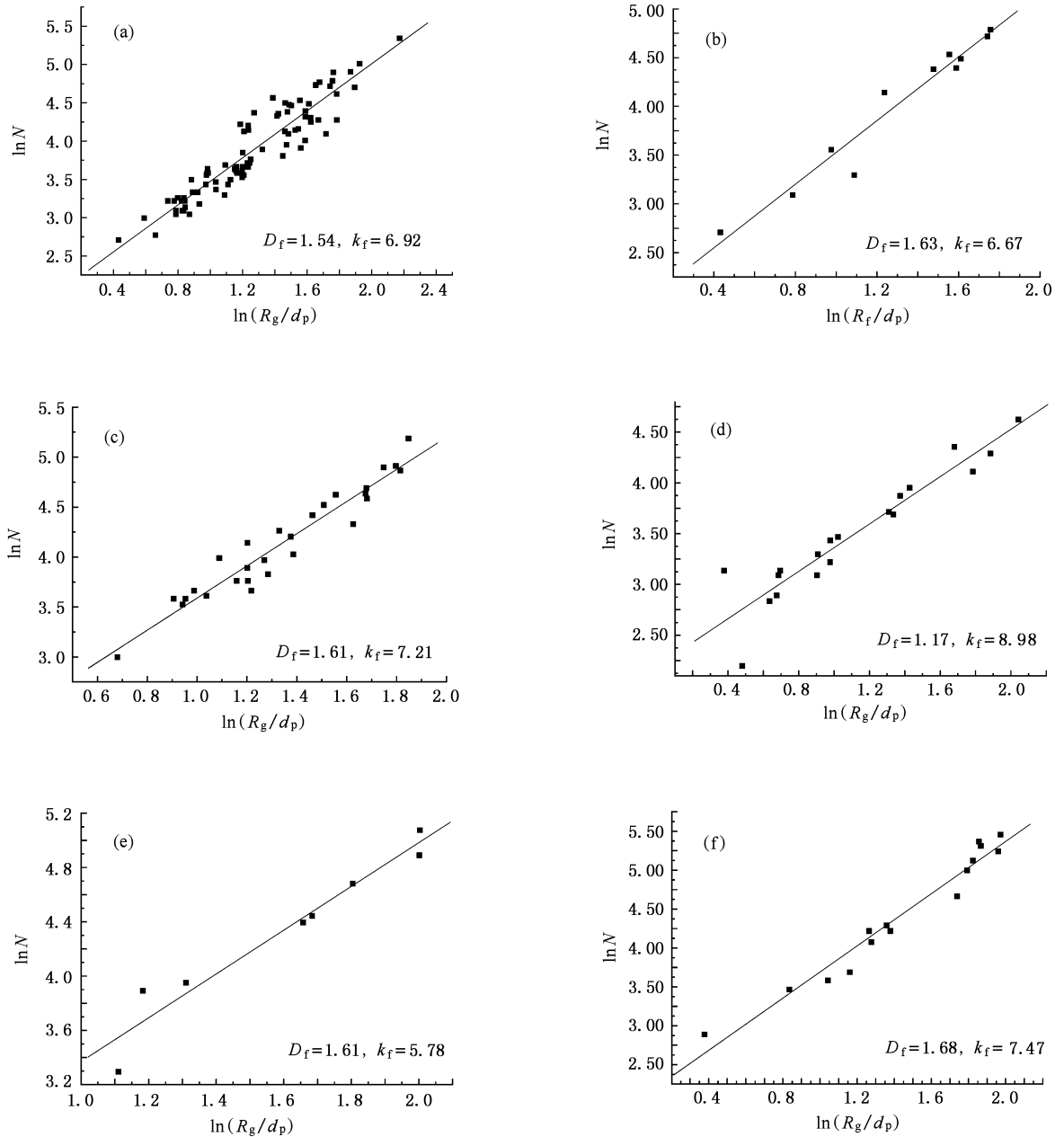


图2 几种常见烟雾颗粒分形结构拟合曲线图 (a) 棉绳烟雾颗粒(明火)(b) 棉绳烟雾颗粒(阴燃)(c) 檀香烟雾颗粒(明火)(d) 榉木烟雾颗粒(明火)(e) 聚氨酯烟雾颗粒(明火)(f) 皖烟烟雾颗粒(阴燃)

[1] Zhao J H, Yuan H Y, Fan W C, Chen T 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 700 (in Chinese) [赵建华、袁宏永、范维澄、陈涛 2002 物理学报 **51** 700]

[2] Shu X M, Fang J, Shao Q, Yuan H Y, Fan W C 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 385

[3] Tao Z M, Zhang Y C, Liu X Q et al 2004 *Chin. Phys.* **13** 409

[4] Fan J, Shu X M, Yuan H Y, Zheng X 2004 *J. Fire Sci.* **22** 53

[5] Colbeck I, Atkinson B, Johar Y 1997 *J. Aerosol Sci.* **28** 715

[6] Samson R J, Mulholland G W, Gentry J W 1987 *Langmuir* **3** 272

[7] Megaridis C M, Dobbins R A 1990 *Comb. Sci. and Tech.* **71** 95

[8] Shu X M, Zheng K, Yuan H Y, Yao B 2005 *Engineering Science* **7** 51 (in Chinese) [疏学明、郑魁、袁宏永、姚斌 2005 中国工程科学 **7** 51]

[9] Zang W P, Tian J G, Liu Z B et al 2005 *Chin. Phys.* **14** 546

- [10] Mulholland G W , Mountain R D 1999 *Comb. and Flame* **119** 56
- [11] Snegirev A Y , Makhviladze G M , Roberts J P 2001 *Fire Safety Journal* **36** 73
- [12] Koylu U O , Faeth G M 1994 *J. Heat Trans.* **116** 152
- [13] Dobbin R A , Megarids C M 1987 *Langmuir* **3** 254
- [14] Wang L , Li J , Yang Y J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 160 (in Chinese) [王 理、黎 坚、杨亚江 2004 物理学报 **53** 160]
- [15] Gao G L , Qian C J , Li H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2600 (in Chinese) [高国良、钱昌吉、李洪等 2005 物理学报 **54** 2600]
- [16] Sun X , Xiong G , Fu Z X , Wu Z Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 854 (in Chinese) [孙 霞、熊 刚、傅竹西、吴自勤 2000 物理学报 **49** 854]
- [17] Chen H Y , Iskander M F , Penner J E 1990 *J. Modern Opt.* **37** 171
- [18] Shu X M 2004 *Doctorate Thesis* (in Chinese) [疏学明 2004 博士论文]
- [19] Hu B , Yang B , Koylu U O 2003 *Comb. and Flame* **134** 93
- [20] Appel J , Bockhorn H , Wulkow M 2001 *Chemosphere* **42** 635
- [21] Mountain R D , Mulholland G M 1988 *Langmuir* **4** 1321

Study on fractal coagulation characteristics of fire smoke particles *

Shu Xue-Ming^{1)†} Fang Jun²⁾ Shen Shi-Fei¹⁾ Liu Yong-Jin¹⁾ Yuan Hong-Yong^{1)†} Fan Wei-Cheng¹⁾²⁾

1) (Department of Engineering Physics , Center for Public Safety Research , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

2) (State Key Laboratory of Fire Science , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China)

(Received 15 February 2006 ; revised manuscript received 27 March 2006)

Abstract

Primary particles produced in the early fire period evolve into bigger aggregates due to Brown coagulation , which take on fractal properties . In this article , smoke particle images were obtained by a field emission scanning electron microscope (SEM) , and the fractal characteristics of the particles were analyzed based on the power law of fractal theory . By using digital image processing technique , more fractal parameters such as the fractal dimension , fractal prefactor , primary particles ' size and radius of gyration were obtained . The results can provide a fundamental basis for fire smoke detection research .

Keywords : fire , smoke , particles , coagulation , fractal

PACC : 0555 , 8270R , 9265V

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2001CB409600) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50476023) , and the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant No. 2005037053) .

† E-mail : shuxm@tsinghua.edu.cn