doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.040

废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响^{*}

赵 洋 王 忠 刘 帅 李瑞娜 瞿 磊 (江苏大学汽车与交通工程学院,镇江 212013)

摘要:为深入了解废气再循环(EGR)对颗粒的作用机理,分析 EGR 中不同废气成分(N₂、CO₂)对颗粒微观结构的 影响规律以及形成原因,采用透射电镜以及图像处理软件(Digital Micrograph)对颗粒的微观形貌以及基本碳粒子 层面间距、微晶尺寸等结构特征参数进行了分析。结果表明,与通入 EGR 废气相比,相同 EGR 率下,只通入 CO₂ 时 的颗粒主要呈链状结构,基本碳粒子的碳层排列无序性增加,外壳石墨晶体结构含量有所降低,内核与外壳的边界 变得模糊;基本碳粒子层面间距有所增大,微晶尺寸有所降低,弯曲度最大,分形维数最小;只通入 N₂ 时的颗粒主 要呈簇状结构,堆积更加明显,各基本碳粒子之间结合更加紧密,基本碳粒子内核更为明显,外壳的石墨晶体结构 有所增加;基本碳粒子层面间距有所减小,微晶尺寸有所增加,弯曲度最小,分形维数最大;说明增加 EGR 废气成 分中的 CO₂ 含量有利于提高颗粒自身的氧化能力,使微晶结构的有序性减弱,石墨化程度降低,只通入 N₂ 时的颗 粒结构更为紧密,只通入 CO₂ 时的颗粒结构较为疏松。

关键词:柴油机 废气再循环 气体成分 颗粒 结构特征 中图分类号:TK421⁺.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)07-0280-06

Effect of Gas Composition in Exhaust Gas Recirculation on Structural Feature of Particulates from Diesel Engine

Zhao Yang Wang Zhong Liu Shuai Li Ruina Qu Lei (School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Morphology and microstructure of particulates with the application of different gas compositions in EGR were analyzed by using transmission electron microscope and image processing software (Digital Micrograph). The results show that the particulates with the application of CO_2 mainly have the chain structure. The disorder degree of carbon layer in elementary particulate is higher and the content of graphitic crystalline structure in shell is less than those particulates with the application of EGR. Besides, the fringe separation distance has a significant increase. The average fringe length has a significant decrease; the tortuosity is the biggest and the fractal dimension is the smallest. The particulates with the application of N_2 mainly have the stone clusters; the elementary particulate integrated more tightly; the core of elementary particulate is more obvious and the content of graphitic crystalline structure in shell is less than those particulate structure in shell is less than those particulate integrated more tightly; the core of elementary particulate is more obvious and the content of graphitic crystalline structure in shell is less than those particulates with the application of EGR. Besides that, the fringe separation distance has a significant decrease; the average fringe length has a significant increase; the tortuosity is the smallest and the fractal dimension is the biggest. Those indicate that the structure of particular with the application of N_2 is more tightness than those with the application of CO_2 , and increasing of the content of CO_2 in EGR can improve the oxidation ability of particulate and decrease the disorder degree of carbon layer.

Key words: Diesel engine Exhaust gas recirculation Gas composition Particulates Structural feature

收稿日期:2014-11-17 修回日期:2014-12-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51376083)、江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJA470001)、江苏省2013年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13-0672)、江苏省2014年度普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX-10635)和2011年江苏高校优势 学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:赵洋,博士生,主要从事内燃机工作过程与代用燃料研究, E-mail: zhaoyangujs@163.com

引言

废气再循环(Exhaust gas recirculation, EGR)是 一种降低柴油机 NO_x排放的有效措施,主要通过降 低缸内燃烧温度和混合气中的氧含量,打破 NO_x的 生成环境,达到降低 NO_x排放的目的,但会对柴油机 的颗粒排放产生不利影响^[1-2]。随着排放法规的日 益严格,有必要进一步开展降低柴油机颗粒排放的 研究。

EGR 的废气中主要包括剩余的空气(主要是 N_2 和 O_2)、完全燃烧产物(CO₂和 H₂O)以及少量的 中间产物,EGR 率的改变实际上是改变了 N2、O, 和 CO2 的比例^[3]。在 CO2 的稀释效应(降低进气氧浓 度)、热效应(进气比热容改变)、化学效应(CO,参 与燃烧)以及 N2 的稀释效应影响下,使颗粒的成 核、生长、团聚、氧化等衍生过程进一步复杂化,形成 具有不同微观结构的颗粒,影响其在缸内燃烧过程 中的流动性、沉降速度、布朗运动、氧化过程等动力 学特性和化学反应特性^[4-5]。Yehliu 等^[6]研究表 明,微观结构与颗粒本身氧化特性具有直接的关系, 无定形微观结构的颗粒,要比呈规则石墨化微观结 构的颗粒更容易被氧化、活化能更低。Lu等^[7]认为 ,颗粒的氧化过程是从位于边缘位置的碳原子开始 的,具有更多边缘位置碳原子、物理缺陷的颗粒在氧 化过程中具有更活跃的氧化特性。Lee 等^[8]依据颗 粒的 TEM 图像,分别对不同型号的柴油机颗粒进行 了分形分析,得出柴油机碳烟的分形维数处于1.3~ 2.3之间。张炜等^[9]研究表明,随着 EGR 率增加, 颗粒的分形维数逐渐减小,结构趋向疏松。

国内外学者关于 EGR 对柴油机排气颗粒的研究主要集中在形成过程^[10-11]、粒径分布^[12]等方面。 为深入了解 EGR 对颗粒的作用机理,有必要对 EGR 以及其中不同废气成分(N₂、CO₂)对颗粒微观结构 的影响规律以及形成原因开展研究。本文通过对不 同 EGR 废气成分下产生的颗粒进行采集,采用透射 电镜以及图像处理软件(Digital Micrograph)对颗粒 的微观形貌以及基本碳粒子层面间距、微晶尺寸等 结构特征参数进行分析,以期为降低柴油机的颗粒 排放提供基础数据和理论依据。

1 试验装置与方法

1.1 颗粒采集

试验用机为一台经过改装的186F型柴油机,标 定转速为3600 r/min,标定功率为6.3 kW,最大扭 矩转速为1800 r/min。废气由排气管引出,经调节 阀引入进气管,通过调节阀门开度控制 EGR 率。通 过控制惰性气罐的阀门开度,改变 CO₂ 或 N₂ 的流 量。试验中采用 AVL 公司的高速数据采集系统对 柴油机的功率、扭矩等性能参数进行采集,采用 MEXA-324F 气体分析仪测量进气氧浓度和废气成 分,采用颗粒分级采样装置 MOUDI(孔径为 0.1 ~ 17.1 mm)对柴油机排气中的颗粒进行采集,试验系 统示意图如图 1 所示。







1. 排气分析仪 2. 烟度计 3. EGR 阀 4. 废气中冷器 5. 惰性 气罐 6. 流量计 7. 稳压罐 8. 测功器 9. 柴油机 10. 光电编 码器 11. 缸压传感器 12. 上压差表 13. 下压差表 14. 流量 调节阀 15. 抽气泵 16. 冲击器

颗粒采集时,柴油机转速稳定在 2 000 r/min,功 率为 2.6 kW,初始进气温度为 17 °C,燃油温度保持 在 42 °C,在转速和功率固定的条件下,控制废气中 冷器温度为 323 K,逐渐调节 EGR 阀开度,采用气体 分析仪分别测量进气和排气中的 CO₂ 体积分数,定 义 EGR 率为进气 CO₂ 与排气 CO₂ 体积分数的比 值,当 EGR 率达到 30% 时,并同时记录进气氧浓 度。通入纯 N₂ 和纯 CO₂ 时,通过控制惰性气罐阀 门开度,采用气体分析仪测量进气氧浓度,当氧浓度 与 30% EGR 率时的氧浓度相同时,对颗粒进行采 集。采集开始前根据上下压差对流量进行标定,在 真空 抽气泵的作用下,稀释后的发动机排气以 30 L/min的恒体积流量进入冲击器,采样时间为 20 min,采样滤纸为 MSP 公司的 ϕ = 47 nm 铝箔 滤纸。

1.2 电镜分析

采用日本精工 JEM - 2100(HR)型高分辨透射 电镜(TEM)对通入不同 EGR 废气成分产生的颗粒 样品的微观结构进行拍摄。JEM - 2100(HR)型放大 倍数为2000倍~150万倍,点分辨率为0.23 nm,晶 格分辨率为0.14 nm。在进行 TEM 试验前,需要对 颗粒样品进行前处理,将采集好的颗粒样品分别取 1~2 mg 置于离心管中,并向离心管中添加8 mL 无 水乙醇,然后进行超声处理,处理时间为20 min,使 颗粒均匀弥散在乙醇中。取一滴离心管中的上清液 滴在 TEM 铜网上(中镜科仪 230 目)并置于烤灯下 烘干。观测时任意选取 20 个视场,获得大量的微粒 投影图像。

2 试验结果分析

2.1 颗粒 TEM 分析

2.1.1 颗粒微观形貌分析

图 2 所示为 30% EGR 率下,不同 EGR 废气成 分的颗粒内部微观形貌图(放大 25 万倍)。可以看 出,在颗粒间液桥和固桥力作用下,不同 EGR 废气 成分产生的颗粒团粒(即次级粒子)均由大小不等 的基本粒子堆积而成,构成颗粒的基本粒子外观近 似于球形,基本粒子相互粘结堆积,形成链状、簇状、 球状、枝状及环状等具有分形结构的微团,并在交界 处呈现不同的致密程度,其中颜色较深的区域是多 个基本粒子相互叠加的结果。从图中还可以看出, 不同 EGR 废气成分产生的颗粒形貌也存在较大差 异,与通入 EGR 废气相比,只通入 CO2 时的颗粒主 要呈链状结构,只通入 N2 时的颗粒主要呈簇状结 构,堆积更加明显,各基本碳粒子之间结合更加紧 密。这主要是因为:一方面 CO₂ 的比热容较大, N₂ 的比热容较低, 通入 CO2 时的滞燃期要长于 N2, 燃 油与空气充分混合,同时 CO2 的稀释作用有效的降 低了燃烧温度,可以起到抑制颗粒生成的作用,另一 方面燃烧过程中 CO, 的化学效应对颗粒的氧化具 有重要作用, Alain Maiboom 等^[13]认为, CO₂通过 CO2 + H == CO + OH 反应形成的 OH 基起到了氧化 颗粒前驱体的作用,张全长[14]通过对吉布斯函数的 计算指出,在燃烧过程中 CO2 通过 C + CO2 == 2CO 反应直接参与了对单质碳粒的氧化,在氧化过程中 颗粒中的有机成分及气相 HC 被部分氧化,使颗粒 黏度有所降低。说明通过增加 EGR 废气中的 CO, 比例,减少了 N2含量,可以加速对颗粒的氧化,降低 柴油机的颗粒排放。





2.1.2 颗粒微观结构分析

柴油机的排气颗粒具有复杂的微观结构特性, 这种复杂的微观结构与其本身氧化特性具有直接的 关系。图 3 为不同 EGR 废气成分产生的颗粒基本 碳粒子的微观结构。可以看出,相同 EGR 率下,不 同 EGR 废气成分产生的颗粒基本碳粒子均由内核 和外核组成(核壳结构),外壳部分主要为石墨微晶 结构,有明显的分层,内核部分呈无序结构,且有一 个或多个涡旋状的球形核心。从图中还可以看出, 与通入 EGR 废气相比,只通入 N₂ 时的基本碳粒子 内核更为明显,外壳的石墨晶体结构含量有所增加, 只通入 CO₂ 时的基本碳粒子的碳层排列无序性增 加,外壳石墨晶体结构含量有所降低,内核与外壳的 边界变得模糊。这主要是由于碳层边缘处的原子活



图 3 不同 EGR 废气成分下的颗粒微观结构 Fig. 3 Microstructure of particles under different gas compositions of EGR by TEM (a) 废气 (b) N₂ (c) CO₂ 性远高于基面处的原子活性, 通入 CO₂ 后, 在上述 反应作用下, 碳层边缘的原子更易发生氧化, 同时氧 化过程中释放的热量对内核加热, 使有机成分发生 脱氢反应, 使得内核无序度增加。

2.2 基本碳粒子层面间距

为定量描述不同 EGR 废气成分对颗粒微观结构的影响,选取基本碳粒子的层面间距、微晶尺寸及弯曲度等参数表征颗粒的微观结构。层面间距是指基本碳粒子微观结构中相邻两个碳层的间距,表现在 TEM 图上指的是相互平行的两条微晶的垂直距离,图 4 为采用 Digital Micrograph 测量得到的颗粒

层面间距统计结果。可以看出,相同 EGR 率时,通 入 EGR 废气时的基本碳粒子层面间距主要分布在 0.37~0.42 nm,只通入 N₂ 时的基本碳粒子层面间 距有所减小,主要分布在 0.34~0.40 nm,只通入 CO₂ 时的基本碳粒子层面间距有所增大,主要分布 在 0.40~0.45 nm。Levy 等^[15]研究表明,基本碳粒 子的层面间距也反映了生成基本碳粒子的氧化活 性,层面间距越小,微晶碳层与氧发生反应的接触面 积减小,氧化难度增加,氧化活性降低。说明增加 EGR 废气成分中的 CO₂ 含量有利于提高颗粒自身 的氧化能力。





2.3 微晶尺寸及弯曲度分析

微晶尺寸和弯曲度是基本碳粒子微观结构中物 理组成的重要参数,表现在 TEM 图像上是一些具有 一定长度和弯曲度的碳层结构。不同 EGR 废气成 分下产生颗粒的微晶尺寸和弯曲度分布规律如图 5 和图 6 所示,可以看出,颗粒微晶尺寸大多分布在 2 nm左右,通入 EGR 废气时的微晶尺寸平均值约为 2.173 nm,只通 N₂时的微晶尺寸有所增加,约为 2.315 nm,只通入 CO₂时的微晶尺寸有所降低,约为 2.031 nm。弯曲度的分布规律与微晶尺寸相反,从 图 6 可以看出,通入 EGR 废气时的弯曲度平均值约 为 1.29 nm,只通 N₂时的弯曲度最小,约为 1.18 nm,只通入 CO₂时弯曲度最大,约为 1.36 nm。 根据 Alfe 等^[16]和 Davis 等^[17]的研究表明,产生这种 变化规律主要是由于,高温环境是导致颗粒石墨层 形成的主要原因,并且高温环境持续时间越长,微晶 结构的有序性越强,石墨化程度越高,而缸内燃烧温 度降低,会抑制多环芳香烃(PAHs)等颗粒前驱体的 石墨化过程,温度对石墨化过程的影响要大于高温 持续时间。相同 EGR 率下,与通入 EGR 废气相比, 通入 N₂ 时的缸内燃烧温度变化不大,通入 CO₂ 时 的缸内燃烧温度有较大幅度降低^[18],并且在 CO₂ 氧 化的综合作用下,导致引起碳层弯曲的五环芳香烃 电子共振稳定性下降,使其结构中键的张力增强,弯 曲处 C—C 键能被削弱。说明 EGR 废气中的 CO₂ 成分会使颗粒微晶结构的有序性减弱,石墨化程度 降低。

2.4 颗粒的分形维数

Lapuerta 等^[19]和 van Gulijk 等^[20]研究表明,呈 链状、团状、枝状等不规则的燃烧颗粒,具有典型的



(a) 废气 (b) N₂ (c) CO₂



Fig. 6 Average fringe tortuosity of particles under different gas compositions of EGR

(a) 废气 (b) N₂ (c) CO₂

分形结构特性。为进一步对颗粒的结构特征进行几 何分析,能够定量地研究颗粒几何结构的疏密程度。 柴油机排气颗粒的分形维数计算公式为

$$\lg N_p = D_f \lg k_g + \lg (R_g / r_g) \tag{1}$$

式中 N_p——颗粒中所含基本碳粒子个数

R_g——颗粒的回转半径

$$k_g$$
——结构系数 D_f ——分形维数

r_g——基本碳粒子的平均半径

其中回转半径可以根据 Brasil 算法计算得到

$$L/(2R_g) = 1.5 \pm 0.05$$
 (2)

式中 L----最大投影长度

凝聚颗粒的基本碳粒子数量 N_p 可通过投影面积 A_a和基本碳粒子的平均面积 A_p来估算,关系式为

$$N_p = k_a \left(A_a / A_p \right)^{\alpha_a} \tag{3}$$

式中 α_a——经验投影面积指数

k_a——常数

最后通过绘制 $\lg N - \lg (R_g/r_g)$ 曲线, 拟合得到 直线段的斜率即为颗粒的分形维数, 具体计算方法 见文献[21]。

按照上述计算方法,得到不同 EGR 废气成分下 颗粒的 $\lg N - \lg (R_a/r_a)$ 散点 拟合图, 如图 7 所示。





通入 EGR 废气、N₂、CO₂ 时得到的颗粒分形维数分 别为 1. 31、1. 57、1. 16,表明与通入 EGR 废气时相 比,只通入 N₂ 时的颗粒结构更为紧密,只通入 CO₂ 时的颗粒结构较为疏松。这是由于 CO₂ 通过 CO₂ + H == CO + OH 反应形成的 OH 基,一方面起到 了氧化颗粒前驱体的作用,另一方面使得颗粒的生 长过程受到抑制,造成部分颗粒生长不完全;由于通 入 CO₂ 时形成颗粒的微晶结构有序性减弱,石墨化 程度降低,更容易被氧化,在氧化过程中易形成大 小、数量不均匀的间隙,颗粒表面的物理缺陷更大。

3 结论

(1) 与通入 EGR 废气相比,相同 EGR 率下,只 通入 CO₂ 时的颗粒主要呈链状结构,基本碳粒子的 碳层排列无序性增加,外壳石墨晶体结构含量有所 降低,内核与外壳的边界变得模糊;只通入 N₂ 时的 颗粒主要呈簇状结构,堆积更加明显,各基本碳粒子 之间结合更加紧密,基本碳粒子内核更为明显,外壳 的石墨晶体结构有所增加。

(2) 与通入 EGR 废气相比,相同 EGR 率下,只 通入 N₂ 时的基本碳粒子层面间距有所减小,只通入 CO₂ 时的基本碳粒子层面间距有所增大,说明增加 EGR 废气成分中的 CO₂ 含量有利于提高颗粒自身 的氧化能力。

(3) 与通入 EGR 废气相比,相同 EGR 率下,只 通入 N₂ 时的基本碳粒子微晶尺寸有所增加,弯曲度 最小;只通入 CO₂ 时的基本碳粒子微晶尺寸有所降 低,弯曲最大,说明 EGR 废气中的 CO₂ 成分会使微 晶结构的有序性减弱,石墨化程度降低。

(4)相同 EGR 率下, 通入 N₂时的颗粒分形维数最大, 通入 CO₂时的颗粒分形维数最小, 通入 EGR 废气时的颗粒分形维数介于两者之间, 表明与 通入 EGR 废气相比, 只通入 N₂时的颗粒结构更为 紧密, 只通入 CO₂时的颗粒结构较为疏松。

文 献



- 1 Maiboom A, Tauzia X, Hétet J F. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine [J]. Energy, 2008, 33(1):22-34.
- 2 Dronniou N, Lejeune M, Balloul I, et al. Combination of high EGR rates and multiple injection strategies to reduce pollutant emissions [C]. SAE Paper 2005 01 3726,2005.
- 3 张军.进气条件对柴油机低温燃烧过程影响的数值模拟研究[D].天津:天津大学, 2012. Zhang Jun. Numerical simulation study on effect of intake conditions on diesel low temperature combustion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- 4 Muller J O, Su D S, Jentoft R E, et al. Morphology-controlled reactivity of carbonaceous materials towards oxidation [J]. Catalysis Today, 2005, 102 103: 259 265.
- 5 Rouzaud J N, Clinard C, Chevallier F, et al. High resolution transmission electron microscopy image analysis of disordered carbons used for electrochemical storage of energy[M]//Barsukov I V, Johnson C S, Doninger J E, et al. New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2006, 229: 411-424.
- 6 Yehliu K, Armas O, Wal R, et al. Impact of engine operating modesand combustion phasing on the reactivity of diesel soot [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(3):682-691.
- 7 Lu T, Cheung C, Huang Z. Effects of engine operating conditions on the size and nanostructure of diesel engine particles [J]. Journal of Aerosol Science, 2012, 47:27 - 38.
- 8 Lee Kyeong Ook, Zhu Jinyu, Stephen Ciatti Sizes. Graphitic structures and fractal geometry of light-duty diesel engine particulates [C]. SAE Paper 2003 - 01 - 3169, 2003.
- 9 张炜,宋崇林,王林,等.柴油机燃烧过程中微粒微观结构的变化规律[J].内燃机学报,2010,28(3):221-227. Zhang Wei, Song Chonglin, Wang Lin, et al. Microstructure histories of in-cylinder particulates from a diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(3):221-227. (in Chinese)
- 10 赵昌普,李小毡,张军,等. EGR 的热效应和稀释效应对柴油机燃烧和排放的影响[J].燃烧科学与技术,2014,20(1): 31-37.

Zhao Changpu, Li Xiaozhan, Zhang Jun, et al. Influences of thermal and dilution effects of EGR on combustion and emissions of diesel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014,20(1):31-37. (in Chinese)

- 11 Kitamura T, Ito T, Senda J, et al. Mechanism of smokeless diesel combustion with oxygenated fuels based on the dependence of the equivalence ratio and temperature on soot particle formation [J]. International Journal of Engine Research, 2002, 3(4): 233-248.
- 12 张全长, 尧命发, 郑尊清, 等. 废气再循环对柴油机氮氧化物和颗粒排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2012, 30(4):310-315.

Zhang Quanchang, Rao Mingfa, Zheng Zunqing, et al. Experimental study on effects of exhaust gas recirculation on diesel nitrogen oxides and particulate emissions [J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(4):310-315. (in Chinese)

- 13 Alain Maiboom, Xavier Tauzia, Jean-FrancoisHe'te. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine [J]. Energy, 2008, 33(1): 22 - 34.
- 14 张全长.柴油机低温燃烧基础理论和燃烧控制策略的试验研究[D].天津:天津大学,2010. Zhang Quanchang. Experimental study on combustion fundamental theory and control strategy of diesel low-temperature combustion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- 15 Levy M, Wong P. The oxidation of pyrolytic graphite at temperatures of 1 400 1 800 °F and at air velocities of 25 100 cm /sec [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1964, 111(9):1088 1091.
- 16 Alfè M, Apicella B, Rouzaud J, et al. The effect of temperature on soot properties in premixed methane fames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(10):1959-1965.
- 17 Davis K, Hurt R, Yang N, et al. Evolution of char chemistry, crystalunity, and ultrafne structure during pulverized-coal combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 100(1-2): 31-40.
- 18 金英爱.不同进气组分发动机燃烧机理及排放特性研究[D].长春:吉林大学,2009. Jin Ying'ai. Combustion and emission characteristics of engines by variable intake-air composition [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 19 Lapuerta M, Ballesteros R, Martos F J. A method to determine the fractal dimension of diesel soot agglomerates [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 303(1): 149 - 158.
- 20 van Gulijk C, Marijnissen J C M, Makkee M, et al. Measuring diesel soot with a scanning mobility particle sizer and an electrical low-pressure impactor: performance assessment with a model for fractal-like agglomerates [J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(5): 633 - 655.
- 21 Brasil A M, Farias T L, Carvalho M G. A recipe for image characterization of fractal-like aggregates [J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(10):1379-1389.