

柴油机排气微粒冷却演变特性的实验研究

刘双喜¹, 宁智^{2*}, 付娟², 姜大海²

(1. 中国汽车技术研究中心, 天津 300162; 2. 北京交通大学机电工程学院, 北京 100044)

摘要:对柴油机排气微粒在冷却条件下的演变特性进行了实验研究. 结果表明, 排气的冷却作用对微粒的质量浓度具有重要的影响. 引起微粒质量浓度变化的主要原因是排气中气态碳氢的冷凝, 从而增加了微粒的质量浓度. 排气的冷却促使柴油机微粒增大, 分布在 0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒数量有所减少, 特别是小于 0.1 μm 以下的小微粒, 微粒数量下降的幅度相对较大, 并且冷却温度越低, 变化越明显. 排气冷却后, 0.1 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒体积浓度呈减少的趋势. 此外, 流速对排气冷却条件下的微粒演变特性亦有一定的影响, 随排气流速的降低, 0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒数量浓度和体积浓度减小.

关键词:柴油机; 排气; 微粒; 冷却; 演变

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1193-05

Evolution Characteristics of Diesel Particles Under Cooling Condition

LIU Shuang-xi¹, NING Zhi², FU Juan², JIANG Da-hai²

(1. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Experimental research on the evolution characteristics of diesel particles under the cooling conditions has been carried out. The results showed that the cooling of the exhaust had important effect on the mass concentration of the diesel particles in the exhaust. The main cause that resulted in the change of the particle mass concentration was the condensation of gaseous hydrocarbon on the particle surface or existing in the form of liquid drop. The cooling of the exhaust promoted the increasing of the particle dimension and the decreasing of the particle numbers, especially for the smaller particles below 0.1 μm . The cooling temperature of the exhaust had important effect on the evolution of diesel particles. After exhaust cooling, the volume concentration of diesel particles between 0.1 μm and 1.0 μm exhibited a tendency of decreasing. Moreover, exhaust velocity also had effect on the evolution of the diesel particles. The number concentration and volume concentration of the diesel particles between 0.01 μm and 1.0 μm decreased along with the decreasing of the exhaust velocity.

Key words: diesel engine; exhaust; particle; cooling; evolution

随着大气环境的日益恶化以及城市机动车数量的急剧增加, 汽车尾气排放问题已日益得到人们的重视^[1, 2]. 对于柴油车而言, 微粒是其最为主要的排放污染物.

柴油机微粒在从排气管进入大气的过程中会发生一系列的变化, 而这些变化同微粒本身的特性和排气的状态密切相关^[3-5]. 许多学者在对柴油机微粒研究时已发现微粒的成分、粒径以及浓度等随条件的不同会发生相应的变化^[6-14], 但尚缺乏对柴油机微粒在排气冷却条件下的演变特性和影响因素的系统认识.

本实验对柴油机微粒在排气冷却条件下的演变特性和演变规律进行了研究, 系统地分析了在不同的柴油机工况和冷却条件下, 排气微粒的质量浓度和粒径分布等的变化规律以及排气流速对微粒演变的影响, 以期对柴油机微粒排放控制技术的研究以及排放控制策略的确定提供一定的依据.

1 材料与方法

实验用柴油机为 S195 型柴油机, 其主要性能和

结构参数见表 1.

表 1 柴油机主要参数

Table 1 Main parameters of diesel engine

指标	参数
缸径 × 行程	95 mm × 115 mm
工作容积	0.815 L
额定功率/转速	8.8 kW/2 000 r·min ⁻¹
压缩比	19
燃烧室形式	涡流
冷却方式	自然蒸发水冷

实验时, 让柴油机排气穿过水冷式排气冷却器, 通过控制冷却水的流量对排气温度进行控制.

排气中的微粒质量浓度采用天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室的小型柴油机排气稀释及微粒取样系统进行测定. 测试时, 将部分排气引入稀释通道, 与同时进入通道的洁净空气充分混合. 稀释后的

收稿日期: 2006-08-15; 修订日期: 2006-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40475048); 北京市自然科学基金项目(8042018)

作者简介: 刘双喜(1972~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车排放与控制技术, E-mail: l_shxi2002@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ningzhixx@sina.com

排气经滤纸过滤后排入大气,排气中的微粒物质则留在滤纸上.过滤前后的滤纸在精密天平上进行称重,以确定微粒的质量.

采用美国 TSI 公司的 EAA 亚微米气溶胶粒子分析仪测量排气中的微粒粒径分布.EAA 测量的粒径范围为 $0.0032 \sim 1.0 \mu\text{m}$,基本覆盖了柴油机微粒分布的范围.

2 结果与分析

实验时调节柴油机到稳定工况.通过调节排气冷却器中的冷却水流量,控制排气冷却到规定温度,稳定运行 10 min 后开始进行测量.

图 1 为柴油机 2 种转速下排气冷却至 70℃时,不同柴油机负荷时排气冷却前后微粒质量浓度的测量结果.

从图 1 可以看到,排气冷却后,微粒质量浓度明显增大,且对所有工况均是如此.增加幅度在 $30 \sim 70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右.但从相对量来说,低负荷和高负荷时变化较大,在 32% ~ 38% 之间,而中等负荷时,变化则相对较小.

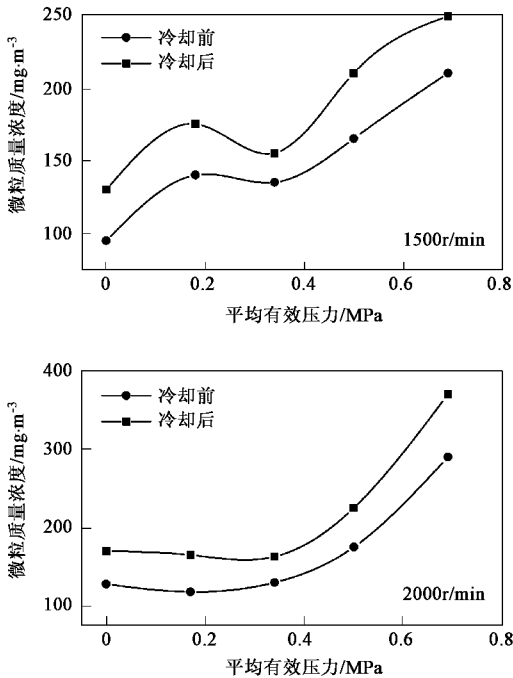


图 1 微粒质量浓度的变化 (冷却至 70℃)

Fig.1 Changes of particle mass concentration (cooling temperature: 70℃)

图 2 为排气温度分别冷却至 50℃、70℃和 90℃时,微粒质量浓度的测量结果.从图 2 可以看到,排气冷却温度直接影响到微粒质量浓度的变化.冷却

温度越低,微粒质量浓度越高.

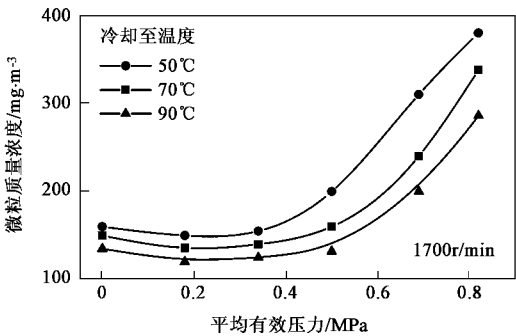


图 2 冷却温度对微粒质量浓度的影响

Fig.2 Effect of cooling temperature on particle mass concentration

排气冷却后微粒质量浓度增加的主要原因应该是排气中气态碳氢的凝结.为证实这一推断,对冷却前后排气中的碳氢浓度进行了测量,测量结果如图 3 所示.从图 3 给出的冷却前后排气中碳氢浓度的变化可以看到,冷却后排气中的碳氢含量大幅度降低,降低量在 $15 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$,下降幅度在 5.6% ~ 30.8%.柴油机低负荷和高负荷时,排气中碳氢成分的减少量相对较大,而中等负荷时则相对较小.

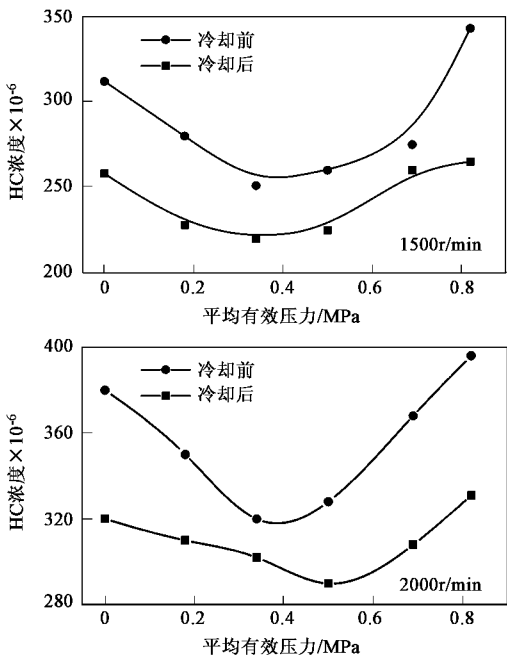


图 3 排气中 HC 浓度的变化 (冷却至 70℃)

Fig.3 Change of HC concentration in exhaust (cooling temperature: 70℃)

排气冷却前后微粒中 SOF 含量的变化同样可以说明这一问题.对收集的微粒进行 SOF 分析,结

果表明,排气冷却后微粒中 SOF 的含量明显增加,其变化趋势与微粒质量浓度的变化大致相同^[15],从而进一步证实了这一推断。

排气的冷却引起微粒质量浓度的增加以及微粒成分的变化,而这些变化也会对排气中微粒的数量分布和体积分布构成影响。

图 4 为 2 种柴油机转速、稳定的柴油机负荷条件下,排气冷却至 70℃ 时,冷却前后排气中微粒数量分布的测量结果。从图 4 可以看到,柴油机微粒基本属于亚微米范畴,大于 1.0 μm 的微粒数量较少,其分布可近似为单峰或双峰分布。

从微粒数量分布上看,排气冷却后,分布在 0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒数量均有所减少,特别是 0.1 μm 以下的微粒,微粒数量下降幅度相对较大,甚至可超过 1 个数量级。大于 0.1 μm 的微粒其数量下降的幅度则相对较小。

排气冷却后微粒数量分布的变化可能有以下 3 个原因:①碳氢成分在微粒表面的凝结可以增大微粒的尺度;②排气的冷却促使了微粒间的碰撞凝并,微粒间的凝并使微粒的尺度增大;③在排气冷却器中,由于冷却壁面附近的排气中存在着较大的温度梯度,在热泳力作用下,小微粒会向管道壁面沉降,从而改变了排气中的微粒数量分布。

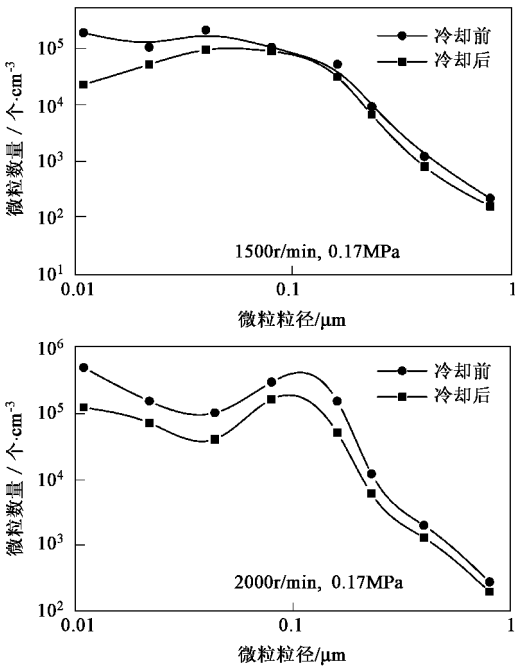


图 4 微粒数量分布的变化 (冷却至 70℃)

Fig.4 Change of particle number distribution (cooling temperature: 70℃)

图 5 为 2 种柴油机负荷、稳定的柴油机转速条件下,排气分别冷却至 50℃、70℃ 和 90℃ 时,冷却前后排气中微粒数量分布的测量结果。从图 5 可以看到,排气冷却温度对微粒的数量分布具有较大的影响;冷却后的排气温度越低,排气中 0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒数量越少。而排气冷却后微粒质量浓度增加的原因应该是大于 1.0 μm 的微粒数量增加的缘故。

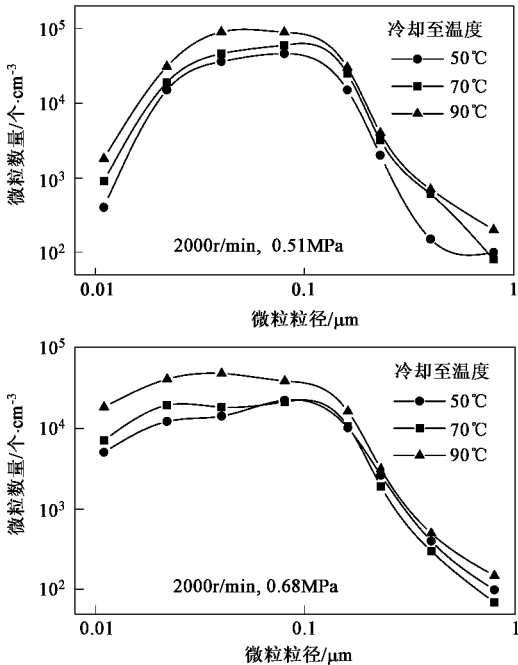


图 5 冷却温度对微粒数量分布的影响

Fig.5 Effect of cooling temperature on the particle number distribution

排气中微粒体积浓度大小可以反映微粒质量浓度的情况。图 6 为 2 种柴油机转速、稳定的柴油机负荷条件下,排气冷却至 70℃ 时,冷却前后排气中微粒体积分布的测量结果。

从图 6 可以看到,排气中的微粒体积分布与数量分布有较大差别。大于 1.0 μm 的微粒也有一定的体积分布。尽管排气中大微粒的数量较少,但对于体积浓度的影响却很大。这也就是排气冷却后 1.0 μm 以内的小微粒数量减少,而排气中微粒质量浓度增加的主要原因。由于本实验所采用的微粒分布测试仪 EAA 的量程所限,因此无法给出大于 1.0 μm 的微粒体积分布的情况。

从图 6 中还可以发现,冷却前后排气中的微粒体积分布在粒径小于 0.1 μm 时变化不明显;粒径大于 0.1 μm 后,微粒的体积分布则发生了较大的变化。排气冷却后,0.1 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒体

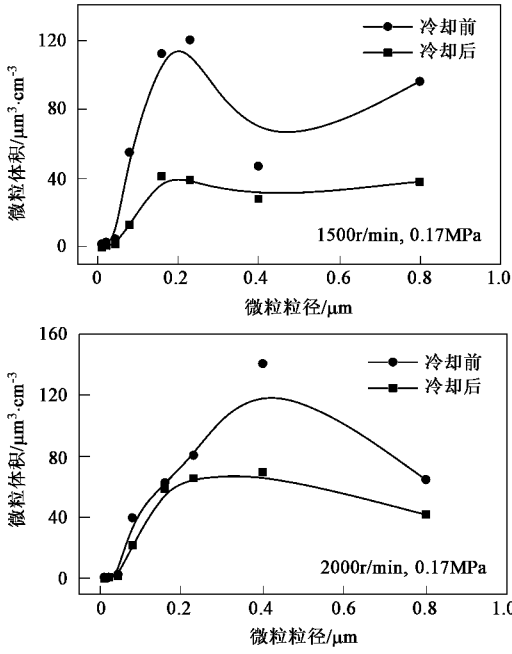


图 6 微粒体积分布的变化 (冷却至 70℃)
Fig.6 Change of particle volume distribution
(cooling temperature: 70℃)

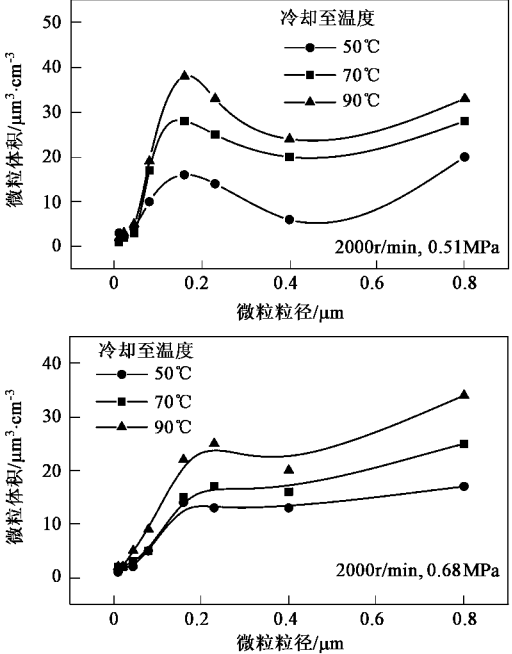


图 7 冷却温度对微粒体积分布的影响
Fig.7 Effect of cooling temperature on the particle volume distribution

积浓度呈减少的趋势,减少幅度在 30% ~ 60% 之间.0.2 μm 以内的小微粒的数量虽然大且排气冷却后变化很大,但对微粒的体积分布及其变化的贡献则不大.

图 7 为 2 种柴油机负荷、稳定的柴油机转速条件下,排气分别冷却至 50℃、70℃和 90℃时,冷却前后排气中微粒体积分布的变化.从图 7 可以看到,排气冷却温度对微粒体积分布的变化具有较大地影响.在 1.0 μm 以内的粒径分布范围内,冷却后的排气温度越低,微粒体积浓度越小.

从图 7 还可以发现,在柴油机负荷为 0.51 MPa 的工况下,冷却后的排气温度由 90℃降低到 70℃时,微粒体积分布变化较大,而冷却后的排气温度从 70℃降低到 50℃时,微粒的体积分布则变化较小;在柴油机负荷为 0.68 MPa 的工况下,变化趋势却相反.说明微粒体积分布的变化与排气冷却后的温度并不是一种线性关系.

通过改变流经排气冷却器的排气流量,可以分析排气流速变化时微粒的演变特性.图 8 和图 9 分别给出的是在确定的柴油机工况以及冷却水流量条件下,排气流速对微粒数量分布和体积分布的影响.这里定义进入排气冷却器的排气流量与柴油机总排气流量之比为流量比.流量比减小,即意味着流经排气冷却器的排气流速的降低.

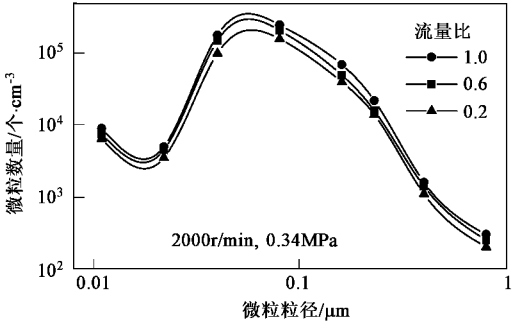


图 8 排气流速对微粒数量分布的影响
Fig.8 Effect of exhaust velocity on the particle number distribution

从图 8 中可以看到,随流量比的减小,即流经排气冷却器的排气流速的降低,在 0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内的微粒数量减少;流速越低,减少的程度越大.

同样,从图 9 可以看到,随流经排气冷却器排气流速的降低,在 0.01 ~ 1.0 μm 的粒径范围内,微粒体积浓度减小,且在分布峰值附近减小的程度最大;体积分布峰值处的微粒体积浓度最高下降达 40% 左右.

随排气流速减小,0.01 ~ 1.0 μm 粒径范围内微粒数量浓度和体积浓度减小的主要原因是,随流经排气冷却器排气流速的降低,排气在冷却器中滞留的时间增加,从而一方面有利于微粒间的碰撞凝并,

另一方面排气可更充分地冷却,排气中的碳氢凝结量增加,从而导致 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内的微粒数量浓度和体积浓度的减小,但大于 $1.0 \mu\text{m}$ 粒径的微粒数量浓度和体积浓度会相应地增加.

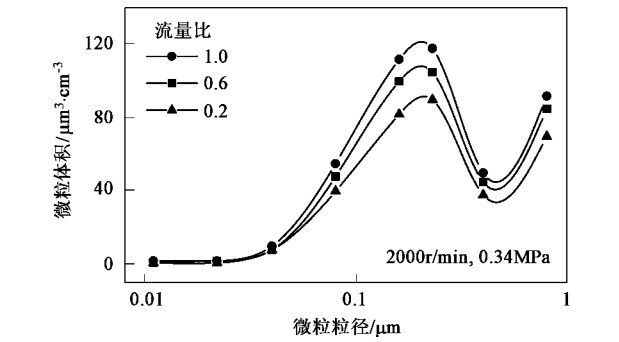


图9 排气流速对微粒体积分布的影响

Fig.9 Effect of exhaust velocity on the particle volume distribution

3 结论

- (1) 排气冷却后,微粒质量浓度明显增大,冷却后的排气温度直接影响到微粒质量浓度的变化.冷却后的排气温度越低,排气中的微粒质量浓度越高.
- (2) 排气冷却后,排气中的碳氢浓度减小,而微粒中的SOF含量会相应地增加.说明排气冷却后微粒质量浓度增加的主要原因是排气中碳氢成分的凝结.
- (3) 排气冷却后,分布在 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内的微粒数量有所减少,特别是 $0.1 \mu\text{m}$ 以下的微粒,微粒数量下降幅度相对较大,甚至可超过1个数量级.冷却后的排气温度越低, $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内的微粒数量越少.
- (4) 排气冷却前后的微粒体积分布在粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时变化不明显;粒径大于 $0.1 \mu\text{m}$ 之后,则发生较大的变化.排气冷却后, $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内的微粒体积浓度呈减少的趋势.
- (5) 随流经排气冷却器的排气流速的降低, $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内的微粒数量浓度和体积浓度减小;流速越低,减小的程度越大.

参考文献:

[1] Ahlvik P. Environmental and health impact from modern cars, a

comparison between two petrol and two diesel cars with varying emission [R]. Report for the Swedish National Road Administration, Stockholm: 2002. 1 ~ 36.

[2] Dockery D W, Pope C A, Xu X, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities [J]. Massachusetts Medical Society Journal of Medicine, 2001, **329**: 1753 ~ 1759.

[3] Bessagnet B, Rosset R. Fractal modeling of carbonaceous aerosols-application to car exhaust plumes [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**: 4751 ~ 4762.

[4] Brown J E, Calyton M J, Harris D B, *et al.* Comparison of the particulate size distribution of heavy-duty diesel exhaust using a dilution tailpipe sampler and an in-plume sampler during on-road operation [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2000, **50**: 1407 ~ 1416.

[5] Mathis U, Kaegi R, Mohr M, *et al.* TEM analysis of volatile nanoparticles from particle trap equipped diesel and direct-injection spark-ignition vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38** (26): 4347 ~ 4355.

[6] Efendiev Y, Zachariah M R. A model for two-component aerosol coagulation and phase separation: a method for changing the growth rate of nanoparticles [J]. Chemical Engineering Science, 2001, **56** (22): 5763 ~ 5769.

[7] Anttila T, Kerminen V M. Condensational growth of atmospheric nuclei by organic vapours [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, **34** (1): 41 ~ 61.

[8] Stefan R, Franz F P. Influence on particles in diluted diesel engine exhaust gas [J]. SAE paper 831333.

[9] Abbass M K. Diesel particulate composition changes along an air cooled exhaust pipe and dilution tunnel [J]. SAE paper 890789.

[10] Abdul-Khalek I S, Kittelson D B, Graskow B R. Diesel exhaust particle size: measurement issues and trends [J]. SAE paper 980525.

[11] Park K, Cao F, Kittelson D B, *et al.* Relationship between particulate mass and mobility for diesel exhaust particulates [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(2): 577 ~ 583.

[12] Kim D, Gautam M, Gera D. Parametric studies on the formation of diesel particulate matter via nucleation and coagulation modes [J]. Journal of Aerosol Science, 2002, **33**(9): 1609 ~ 1621.

[13] Kim D, Gautam M, Gera D. Modeling nucleation and coagulation modes in the formation of particulate matter inside a turbulent exhaust plume of a diesel engine [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, **249**(1): 95 ~ 103.

[14] Bartscher H, Klunzel S, Hlueglin C. Characterization of particulates in combustion engine exhaust [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, **29**(2): 389 ~ 396.

[15] 宁智, 刘双喜, 资新运. 柴油机排气微粒特性的试验研究 [J]. 环境科学学报, 2003, **23**(6): 765 ~ 769.