

DOI: 10.7652/xjtuxb201805007

负电晕放电对柴油机排气颗粒 Zeta 电位的影响

肖雪, 孙平, 刘军恒, 万垚峰, 范义
(江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 为了解决荷电凝并技术在降低柴油机排气颗粒数量浓度时颗粒荷电量的大小影响凝并过程的问题,对柴油机排气颗粒的荷电特性进行了试验研究。用颗粒的 Zeta 电位表征其荷电状态,计算了单个颗粒在负电晕条件下的荷电量;通过改变荷电电压、荷电区温度以及柴油机负荷,探究了各因素对柴油机排气颗粒荷电量的影响。研究表明:电压的增高可有效提高颗粒的荷电量,颗粒的 Zeta 电位绝对值也相应增加;温度升高时,电晕放电的起晕电压下降,相同放电参数下的颗粒荷电量增加;颗粒荷电量随柴油机负荷的增加而增加,全负荷时的荷电效果最好。此项研究可为提高柴油机排气颗粒的荷电效果、建立荷电凝并的数学模型提供参考。

关键词: 柴油机;电晕放电;颗粒物;Zeta 电位;荷电特性

中图分类号: TK421.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)05-0050-06

Influence of Negative Corona Discharge on Zeta Potential of Diesel Particles

XIAO Xue, SUN Ping, LIU Junheng, WAN Yaofeng, FAN Yi
(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To solve the problem that the charge of particle affects the coagulation process when electrical agglomeration is used to reduce the exhaust particle number concentration in a diesel engine, experiment was carried out to reveal the charging characteristics of diesel particles. Zeta potential of diesel particle was adopted to represent the charged state, and the charge of particles could be calculated according to the value of zeta potential. The influences of various factors on the charge of particle were investigated by changing the charging voltage, the temperature in charging zone and the load of engine. Experimental results show that the increase of charging voltage improves the charge and the absolute value of zeta potential. With the increase of the temperature in charging zone, the corona inception voltage declines and the charge of particle increases. The load of engine has a positive effect on the particle charge, which reaches its peak under full load. This research may facilitate promoting charge of emission particles of diesel and building mathematical model of electrical agglomeration.

Keywords: diesel engine; corona discharge; particles; zeta potential; charging characteristic

柴油机排气颗粒数量多且粒径微小,大部分小于 100 nm,可由呼吸道进入人体体内。研究表明,粒径小于 100 nm 的颗粒可穿透人体细胞壁,引发

血液等多方面的疾病^[1-4]。此外,柴油机排气颗粒不易沉降,悬浮在大气中会对环境造成一定的影响。在国 VI 阶段重型车污染物排放标准中,新增了颗粒

物数量(PN)限值。因此,控制柴油机颗粒排放,尤其是小粒径颗粒排放,具有重要的意义。荷电凝并(electrical agglomeration)是一种比较成熟的技术,已被广泛应用于化工、建材、冶金等领域。荷电凝并技术通过对颗粒物荷电,增强颗粒之间的聚并效应,能促使颗粒直径变大并降低微纳米颗粒的数量^[5]。近年来,国内外学者已将这一技术运用于柴油机排气的治理,开辟了柴油机排气颗粒净化的一个新研究领域。Boichot 等将荷电凝并技术用于柴油机排气颗粒物的净化处理,研究了带电颗粒物在不同流速下凝并前后的粒径分布及数量减少率^[6]。

对颗粒物进行荷电是荷电凝并技术的关键,主要通过气体放电实现,放电形式主要包括电晕放电、辉光放电和介质阻挡放电等^[7]。电晕放电可在高温常压下产生大量自由电子,当电子引起碰撞电离后,电子被驱往远离电极的空间,并形成负离子,这些负离子会与颗粒碰撞,使颗粒带电。曾科等利用线筒式荷电装置,采用电晕放电技术对柴油机排气颗粒进行荷电处理,结果表明,在不同工况下加电后排气颗粒波许烟度值明显降低^[8]。王培清等研究发现,在电晕放电条件下,柴油机排气颗粒的荷质比与极间电压成正比,且负荷对荷质比的影响比转速的影响更为显著^[9]。杜小朋等通过试验,探究了柴油机排气颗粒物荷电效果与排气流速之间的关系^[10]。Okubo 等利用法拉第筒和电量计对电晕荷电后的柴油机排气颗粒进行了收集与测量,结果表明当气体流速为 0.28 m/s 时,颗粒荷质比达到最大值—126 $\mu\text{C}/\text{g}$ ^[11]。上述研究表明,采用电晕放电技术可以有效提高柴油机排气颗粒的带电量。带有电荷的细小颗粒具有更高的扩散系数,与其他颗粒的碰撞概率变大,因此电晕放电技术可加强颗粒间的凝并效应,促进颗粒粒径增大,进而在一定程度上降低柴油机排气细小颗粒的数量浓度。

柴油机排气颗粒在电场中荷电时,颗粒荷电量的大小直接影响其运动、凝并等环节^[12-13]。尽管目前部分学者对电晕放电条件下柴油机排气颗粒的荷电过程做了相关研究,但有关颗粒荷电量方面的研究却鲜有报道。为了进一步对荷电后的柴油机排气颗粒进行动力学分析,并对其运动及凝并过程进行深入研究,有必要探究柴油机排气颗粒在电晕放电条件下的荷电特性。因此,本研究搭建了电晕放电条件下柴油机排气颗粒荷电试验台架,对柴油机排气颗粒进行预荷电处理,并通过分析颗粒的 Zeta 电位来表征颗粒物的荷电状态,探究不同因素对颗粒

荷电量的影响。

1 试验装置及试验方法

1.1 试验装置

试验样机为潍柴动力扬州柴油机有限责任公司的 YZ4DB1-40 型柴油机,主要结构参数及性能如表 1 所示。试验时不改变原机的喷油时刻、喷油压力等控制参数,燃料为市购国 V0 号柴油。

表 1 柴油机主要性能及结构参数

参数	值
机型	四冲程,四缸,涡轮增压
缸径×行程	105 mm×118 mm
喷油压力	160 MPa
工作容积	4.09 L
压缩比	17.5
额定功率	95 kW
额定转速	2 600 r/min
燃烧室类型	直喷式
喷油装置	电控高压共轨

试验系统如图 1 所示,主要由柴油机、温度控制系统、荷电反应器、电源供给装置和颗粒采集装置等组成。首先通过离心风机对冷凝管进行冷却,以去除排气中的水气,并用陶瓷管加热器对排气进行加热升温,以便向荷电装置提供一定温度的排气,再采用 PT100 热电阻传感器监控荷电反应器放电区域内部的温度。荷电反应器为同轴线筒结构,荷电区域为直径 52 mm 的不锈钢管,绝缘介质为内径 3 mm、壁厚 1.5 mm 的陶瓷管,放电电极位于不锈钢管轴心。试验电源为大连泰思科技有限公司的 TE4020 负高压直流电源(测量精度为 1%),在 0~50 kV 范围内连续可调,最大输出电流为 1 mA。在荷电反应器后端配备装有去离子水的洗气瓶用于采集排气颗粒,通过流量计及真空泵对采样气体流量进行控制。

1.2 颗粒物荷电量的测量原理及方法

1.2.1 荷电量的测量原理 通过颗粒的 Zeta 电位来表征颗粒物的荷电状态。Zeta 电位是指位于双电层中的扩散层与固体表面斯特恩层之间的滑动界面上的电位,如图 2 所示。由颗粒在悬浮液中的 Zeta 电位值,可以推断出其表面电荷的密度和电荷的极性等^[14]。分散在去离子水中颗粒的 Zeta 电位通过 Malvern Zetasizer Nano ZS90 型电位仪采用电泳法直接测量,通过检测样品散射光频率的移动

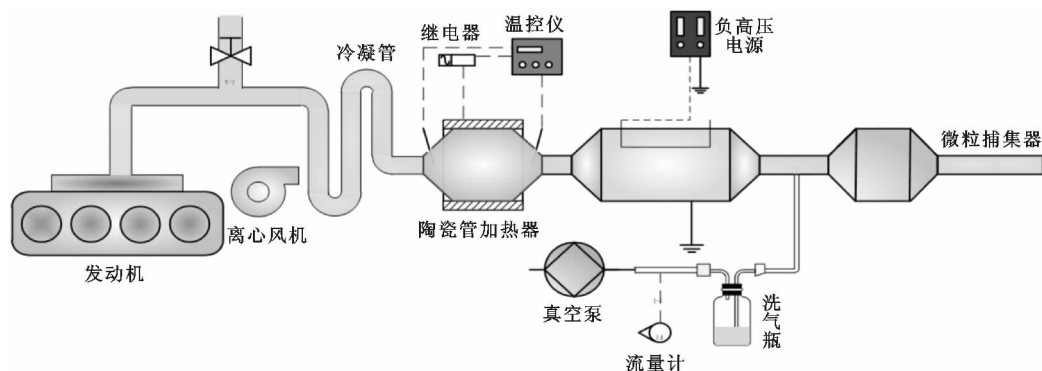


图1 试验系统示意图

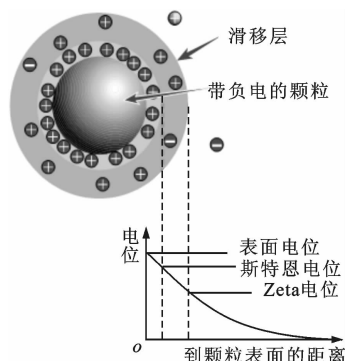


图2 带电颗粒周围粒子分布示意图

得到带电颗粒的电泳运动速度,利用 Herry 方程得到电位^[15]。测试溶剂是浓度为 0.01 mol/L 的 NaCl 溶液,pH 为 6,温度控制在 $(24.5 \pm 1.5)^\circ\text{C}$,测试电场强度为 16 V/cm,重复 3 次测量取平均值。颗粒表面的电荷密度 σ 采用 Gouy-Chapman 公式计算^[16-17]

$$\sigma = \sqrt{8\epsilon_w\epsilon_0\rho k_B T} \sinh\left(\frac{e\xi}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

式中: ξ 为颗粒的 Zeta 电位; ϵ_w 为水在 298 K 时的相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; ρ 为 NaCl 溶液的质量浓度; e 为基本电荷量; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为测试温度。

假定柴油机排气颗粒为球形,颗粒的荷电量 q 由下式计算

$$q = 4\pi(d_p/2)^2\sigma \quad (2)$$

式中: d_p 为颗粒粒径; σ 为颗粒表面的电荷密度。电位仪测得颗粒在不加电和加电时的 Zeta 电位分别为 ξ_0 和 ξ_1 ,代入式(1)和式(2)中可计算出电量 q_0 和 q_1 ,则颗粒因电晕放电而获得的电量

$$q = q_0 - q_1 \quad (3)$$

1.2.2 荷电量的测量方法 电晕放电按起晕电极极性可分为正电晕放电和负电晕放电。正电晕放电时,电子崩由光电离产生,电子到达正电晕线即被中

和,正离子在空间电场中缓慢运动。负电晕放电时,电子崩主要为碰撞电离,在电晕区产生的负离子继续向外扩散^[18]。在相同放电参数下,负电晕放电过程更加稳定,产生的离子浓度也更高^[19],故本研究均在负电晕放电下进行。

试验选取柴油机额定转速 2 600 r/min,将 25%、50% 和 100% 负荷作为工况点。调整柴油机至稳定运行工况,通过陶瓷管加热器将放电区域内部温度分别调节为 300、400 和 500 $^\circ\text{C}$,随后将高压电源的电压分别调节为 0、-5、-10、-15 和 -20 kV。在 0~-20 kV 电压范围内,电极电流的范围为 0~-0.42 mA,荷电装置消耗的功率范围仅为 0~8 W。待荷电装置电压稳定 5 min 后,打开真空泵并将采气流量控制为 10 L/min,采样时间为 5 min。

2 试验及计算结果分析

2.1 荷电电压对颗粒 Zeta 电位的影响

在电晕放电条件下,颗粒的荷电方式分为电场荷电和扩散荷电。粒径大于 500 nm 的颗粒以电场荷电为主,粒径小于 200 nm 的颗粒以扩散荷电为主,粒径在 200~500 nm 之间的颗粒 2 种荷电均有^[20]。柴油机排气颗粒主要集中在小于 100 nm 的粒径范围内,以扩散荷电为主。

在柴油机转速为 2 600 r/min、全负荷、荷电区温度为 500 $^\circ\text{C}$ 时,排气颗粒的 Zeta 电位随荷电电压的变化如图 3a 所示,计算出的颗粒荷电量如图 3b 所示(图中 e 为元电荷)。在未加电时,由于颗粒表面的负电性官能团如 -OH 等的存在,颗粒的 Zeta 电位为 -0.60 mV。随着电压的升高,Zeta 电位绝对值和颗粒荷电量都不断增大,当电压由 -5 kV 上升到 -10 kV 时,Zeta 电位变化明显,绝对值达到 0.80 mV,单个颗粒的荷电量也有显著的增加,此时

电子崩开始发生,颗粒开始浸润在自由电子和负离子中。随着电压不断升高,注入荷电区的能量增加,空气电离程度加剧,空间平均场强和电荷密度增大,导致颗粒荷电量增加。依据 EDLVO 理论,颗粒负电性增强导致颗粒间的静电斥力增加,所以颗粒的 Zeta 电位绝对值增大^[21]。

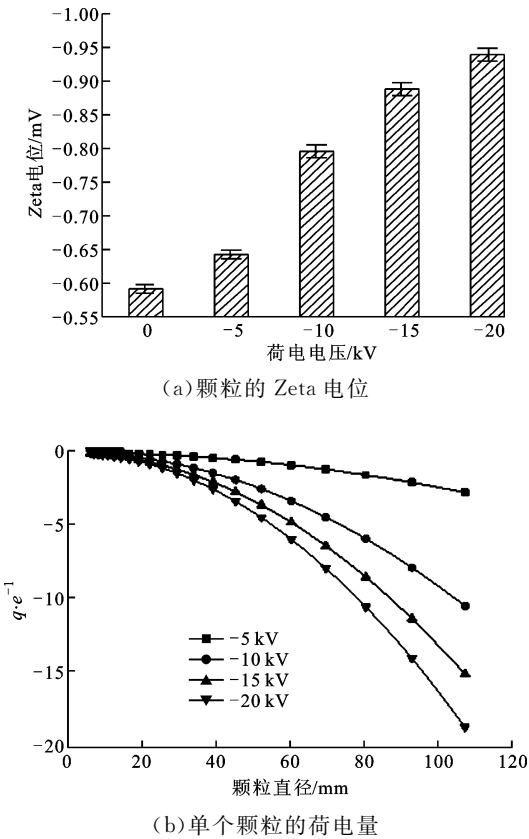


图 3 荷电电压对颗粒 Zeta 电位及荷电量的影响

2.2 荷电区温度对颗粒 Zeta 电位的影响

图 4 所示为 50% 负荷时,荷电区温度对柴油机排气颗粒 Zeta 电位和荷电量的影响。从图 4a 可以看出:随着温度的升高,Zeta 电位对荷电电压的响应速度加快;当荷电区温度为 300 ℃、荷电电压由 0 变为 -10 kV 时,Zeta 电位绝对值的增幅仅为 0.02 mV,而当荷电区温度为 400 ℃时,Zeta 电位绝对值的增幅可达 0.11 mV。这主要是由于高温使气体分子获得了更大的动能,降低了分子电离能,同时电子自由程变大,使电子在电场中的加速距离增加,从而使电子能量提高,所以温度升高时自由电子更容易打开气体分子的外围电子,产生新的自由电子,直至形成电子崩,导致电晕放电^[22-23]。因此,高温可有效降低电晕放电时的起晕电压,使得柴油机排气颗粒迅速带上电荷。图 4b 所示为 50% 负荷、荷电电压为 -15 kV 时,不同温度下单个颗粒荷电量的

计算结果,从中可以看出,当荷电区温度从 300 ℃升高到 400 ℃时,柴油机排气颗粒的荷电量明显增加,这与颗粒 Zeta 电位随温度的变化规律一致;当温度从 400 ℃升高到 500 ℃时,颗粒的荷电量略有增加,主要是因为温度升高使负离子的迁移率变大,因而在相同电场强度下离子运动速度更快,颗粒与离子碰撞的概率增加,所以颗粒的荷电量有所增加。

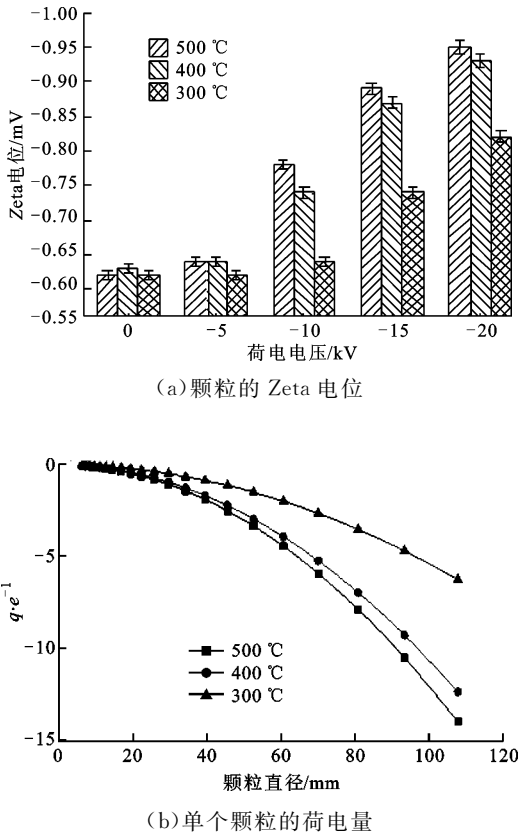


图 4 温度对颗粒 Zeta 电位及荷电量的影响

2.3 发动机负荷对颗粒 Zeta 电位的影响

图 5a 所示是电晕放电时,在 25%、50% 和 100% 负荷下柴油机排气颗粒的 Zeta 电位变化情况,从中可以看出,不加电时颗粒 Zeta 电位的绝对值在低负荷下较大,25% 负荷下为 0.65 mV。这主要是由于低负荷下空燃比较高,已生成碳烟与氧气接触的概率增加,这导致更多的碳层边缘原子与自由羟基结合,并且低负荷下温度较低,碳烟颗粒表面附着的羟基的氧化作用减弱,故低负荷下形成的颗粒表面存在较多的羟基官能团(C—OH),负电性较强,Zeta 电位的绝对值较大;当给放电电极施加负高压电时,各负荷下颗粒 Zeta 电位的绝对值随电压的升高呈增加趋势,且当荷电电压达到 -10 kV 以后,颗粒 Zeta 电位的绝对值随负荷的升高而增大,表明随着电晕放电的进行,高负荷下柴油机排气颗

粒的荷电量更多,其负电性大大增强。图 5b 所示为荷电电压为 15 kV 时,不同负荷下的荷电量计算结果,从中可以看出,随着负荷的增加,颗粒荷电量有所增加,全负荷下的荷电效果最好,与颗粒 Zeta 电位的变化规律相一致。这主要是因为低负荷工况下循环供油量较少,燃烧室内稀燃区域面积增大,且缸内低温增大了燃料的不完全燃烧程度,形成较多未燃 HC 颗粒,颗粒吸附的可溶性有机物(SOF)的质量分数增大,导致颗粒凝聚和粘结现象严重,因此柴油机在低负荷工况下排气颗粒分布紧密,而在全负荷工况下,颗粒形貌多为分散的树杈形状或链状结构^[24]。依据 Chang 提出的理论,在单极扩散荷电条件下,颗粒荷电量与其表面积及电容正相关^[25]。当颗粒迁移直径相同时,分散链状结构颗粒的电容值及表面积更大,因此,全负荷时柴油机排气颗粒由扩散荷电获得的电量更多。

柴油机排气颗粒 Zeta 电位的影响,得出如下结论。

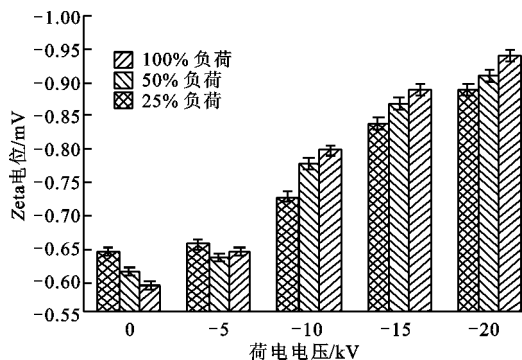
(1)在负电晕放电条件下,随荷电电压升高,荷电区域空间离子密度增加,柴油机排气颗粒与负离子碰撞概率增大,荷电量显著提高。颗粒带有的电荷越多,其负电性增强导致颗粒间的静电斥力就越大,表现为颗粒 Zeta 电位绝对值增大。

(2)高温可有效降低柴油机排气颗粒电晕放电的气晕电压。电晕放电发生后,升高温度有利于负离子迁移率的增加,在一定程度上可以提高颗粒的荷电量。

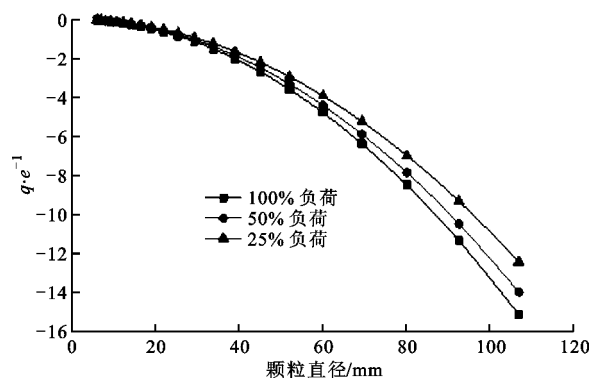
(3)放电参数相同时,增加柴油机负荷可使颗粒的表面积和电容大大增加,从而可增加颗粒的扩散荷电量。

参考文献:

- [1] GENG P, YAO C, WEI L, et al. Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel [J]. Fuel, 2014, 123(1): 1-11.
- [2] AGARWAL A K, DHAR A, GUPTA J G, et al. Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size-number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine [J]. Applied Energy, 2014, 130(5): 212-221.
- [3] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 [J]. 环境科学, 2014(12): 4415-4421.
- GAO Min, QIU Tianlei, JIA Ruizhi, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols at non-haze and haze days in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4415-4421.
- [4] EMA M, NAYA M, HORIMOTO M, et al. Developmental toxicity of diesel exhaust: a review of studies in experimental animals [J]. Reproductive Toxicology, 2013, 42(23): 1-17.
- [5] 李人杰. 双极荷电静电除尘器捕集可吸入颗粒物过程的数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 10-20.
- [6] BOICHOT R, BERNIS A, GONZE E. Agglomeration of diesel particles by an electrostatic agglomerator under positive DC voltage: experimental study [J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(5): 235-245.
- [7] KOIZUMI Y, KAWAMURA M, TOCHIKUBO F, et al. Estimation of the agglomeration coefficient of bipolar-charged aerosol particles [J]. Journal of Electrostatics, 2000, 48(2): 93-101.
- [8] 曾科, 刘兵, 蔡丽红, 等. 脉冲电晕技术降低柴油机微粒排放的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002,



(a) 颗粒的 Zeta 电位



(b) 单个颗粒的荷电量

图 5 负荷对颗粒 Zeta 电位及荷电量的影响

3 结 论

本研究采用负电晕放电的方式,对柴油机排气颗粒进行了预荷电处理,通过分析柴油机排气颗粒的 Zeta 电位,从而表征颗粒物的荷电状态。综合考察了荷电电压、荷电区温度和发动机负荷等参数对

- 36(11): 1111-1113.
- ZENG Ke, LIU Bing, CAI Lihong, et al. Experimental investigation on the removal of particulates in diesel engines by using pulsed corona technology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(11): 1111-1113.
- [9] 王培清. 电晕放电柴油机排气微粒荷电与捕集的实验研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2000: 86-88.
- [10] 杜小鹏, 孙平, 孟建, 等. 柴油机排气颗粒物电晕放电下荷电特性的研究 [J]. 机械设计与制造, 2016(12): 94-97.
- DU Xiaopeng, SUN Ping, MENG Jian, et al. Research on diesel exhaust particulate matter in the situation of charged by high voltage corona discharge [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(12): 94-97.
- [11] OKUBO M, YAMAMOTO T, KUROKI T, et al. Electric air cleaner composed of nonthermal plasma reactor and electrostatic precipitator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1505-1511.
- [12] 张向荣, 王连泽. 外电场对双极荷电颗粒碰撞及凝聚的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(1): 91-94.
- ZHANG Xiangrong, WANG Lianze. Effects of an external electric field on the collision and agglomeration between bipolarly charged particles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(1): 91-94.
- [13] TAN B, WANG L, ZHANG X. The effect of an external DC electric field on bipolar charged aerosol agglomeration [J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(2): 82-86.
- [14] JIANG H, LU L. Measurement of the surface charge of ultrafine particles from laser printers and analysis of their electrostatic force [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(28): 3347-3351.
- [15] BEHRENS S H, BORKOVEC M, SEMMLER M. Aggregation in sulfate latex suspensions: the role of charge for stability predictions [M]//Trends in Colloid and Interface Science: XII. Darmstadt, Germany: Steinkopff, 1998: 66-69.
- [16] 李敏, 宗栋良. 凝液中 Zeta 电位的影响因素 [J]. 环境科技, 2010, 23(3): 9-11.
- LI Min, ZONG Dongliang. Influence factors on zeta potential in coagulation [J]. Environmental Technology, 2010, 23(3): 9-11.
- [17] KISTLER S S. Colloidal dispersions [J]. Journal of Chemical Education, 1982, 28(28): 14185-14192.
- [18] KITTELSON D B. Engines and nanoparticles: a review [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(5/6): 575-588.
- [19] 徐羽贞, 郑超, 黄逸凡, 等. 正、负电晕对大肠杆菌气溶胶收集的影响 [J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2251-2256.
- XU Yuzhen, ZHENG Chao, HUANG Yifan, et al. Positive and negative corona discharge on precipitation of e. coli-aerosols [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2251-2256.
- [20] 骆仲泐, 江建平, 赵磊, 等. 不同电场中细颗粒物的荷电特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3959-3969.
- LUO Zhongyang, JIANG Jianping, ZHAO Lei, et al. Research on the charging of fine particulate in different electric fields [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3959-3969.
- [21] 王婕. 超细粉碎颗粒性质对超净煤分选的影响 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 109-110.
- [22] 李鹏. 线板放电电流体数值模拟与实验研究 [D]. 河北保定: 河北大学, 2010.
- [23] 许希, 徐甸, 严佩, 等. 高温线板式静电除尘器颗粒捕集 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(12): 30-37.
- XU Xi, XU Dian, YAN Pei, et al. Particle collection in wire-plate electrostatic precipitators at high temperature [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(12): 30-37.
- [24] LAPUERTA M, MARTOS F J, HERREROS J M. Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates [J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4): 455-466.
- [25] SHIN W G, WANG J, MERTLER M, et al. The effect of particle morphology on unipolar diffusion charging of nanoparticle agglomerates in the transition regime [J]. Journal of Aerosol Science, 2010, 41(11): 975-986.

(编辑 葛赵青 苗凌)