

电除尘技术研究现状及趋势

白敏茵¹ 依成武² 杨波¹ 储金字² 吴春笃² 白希尧^{1,2}

(1. 大连海事大学物理系, 大连 116026; 2. 江苏大学环境学院, 镇江 212013)

摘要 详细介绍了电除尘技术研究现状、现存问题及其发展趋势。论述了烟尘荷电凝聚机制及其输运特性等, 以便解决除尘电场中的电离占空比、输运项甚低等问题; 又着重研究了烟尘的荷电、凝聚的物理过程, 将有助于解决电除尘器存在的捕集微细烟尘效率低的问题。

关键词 电除尘技术 电离放电 电离占空比 输运特性 电凝聚

中图分类号 X505 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2007)08-0015-05

Research situation and tendency of electrostatic precipitation technology

Bai Mindi¹ Yi Chengwu² Yang Bo¹ Chu Jinyu² Wu Chundu² Bai Xi Yao^{1,2}

(1. Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026;

2. College of Environmental Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract In this paper, the present research situation, problems and development tendency of electrostatic precipitation technology are described in detail. The mechanism of dust particles charging and transportation characteristics are discussed in order to solve the problems such as low of fractional active volume in electric filed and transportation rate of charged particles. The physical processes of charging and agglomerating of dust particles are also studied to solve the problem of the low efficiency electrostatic precipitator trap fine dust.

Key words electrostatic precipitation technology; ionization discharge; fractional active volume; transportation characteristic; electric agglomerating

从大气压(等离子体物理又称为高气压)非平衡(非热、冷)等离子体物理观点来看,电除尘器是一个巨大的等离子体源和反应室的组合体。然而,2004年我国等离子体物理学科发展战略组研究报告指出“目前产生大气压非平衡态等离子体的机理尚不清楚。”“在高气压下等离子体的输运特性研究也刚刚起步,但是正在形成新的研究热点”^[1]。由于大气压等离子体物理研究的滞后,从而制约了电除尘技术的基础理论研究。到目前为止,世界各国电除尘技术的理论尚不完备,基本上还处于20世纪60年代水平上,仍属于经验工程的学科^[2],所以电除尘器性能的优劣常常取决于设计的命中率、制造精度、安装质量、供电特性以及维护管理等因素,并存在一次投资高,体积庞大,钢材用量过多以及捕集微细烟尘的效率较低等问题。

目前电除尘器的数量占国内市场总量的75%,中国已成为世界电除尘器生产、应用大国^[3]。2004年我国实施新的火电厂国家允许排放标准(50 mg/

Nm³)颁布,将使现有的新、老电除尘器中绝大多数难以达到新的烟尘允许排放标准,其主要原因是后级电场中微细烟尘捕集效率低的问题,这是对现有电除尘理论和技术的一种挑战。要使电除尘器达到新的标准,必须加大研究力度,以使电除尘器性能取得突破性进展。

早在20世纪50年代,我国从前苏联引进卧、立式电除尘器,20世纪80年代又分别从德国 Ruthmble、瑞典 Flakt、美国的 GE 及 Lodge-Cottrell、日本住友重机、新日铁等公司引进电除尘器设备及制造技术,并已国产化。电除尘的理论与技术涉及气体电离放电物理学、高气压非平衡等离子体物理学及气体动力学等多学科。近来,气体电离放电物理^[4~6]、

基金项目:国家自然科学基金面上项目(60471036,50578020)

收稿日期:2006-10-12; **修订日期:**2007-04-20

作者简介:白敏茵(1968~),女,副教授,主要从事大气压非平衡等离子体物理、离子源设计及尘粒荷电凝聚机制等研究工作。
E-mail: lengbaiyu9@163.com

高气压非平衡等离子体物理^[7,8]等领域研究取得了令人瞩目的进展,为我国电除尘技术及设备的发展,由多年来跟踪研仿为主走向自主创新的新阶段,提供基础理论及方法的支持。

1 电除尘技术的研究进展

从1955年以来,采用电除尘技术处理工业烟尘及空气净化的工程数量成倍增加,各国企业界、学术界对电除尘理论与技术进行了大量研究工作。1980年Masuda等^[9],1990年与川慎太郎等^[10]以及2001年王海宁等^[11]分别进行了用高电压窄脉冲供电方法,对烟尘进行脉冲直流电场的同极性离子荷电凝聚,增大了烟尘荷电量及粒径,提高了烟尘的荷电凝聚性能,改善了电除尘器的反(逆)电晕问题,使捕集高比电阻烟尘的效率有所提高。1990年白希尧等^[12]进行了直流电场的同极性烟尘荷电凝聚技术的研究工作,提高了粉尘的荷电凝聚特性,烟尘驱进速度可提高2~6倍,改善了电除尘器的收尘性能。1992年阪本清等^[13]采用间歇供电方法改善了高比电阻烟尘的荷电凝聚性能,解决了烧结烟气的除尘疑难问题。1995年Watababe等^[14]和Hautanen等^[15],1997年许德玄^[16]以及2000年向晓东等^[17]分别进行了离子荷电机理或荷电、凝聚、收尘的三段式电除尘器的试验研究工作。在电除尘器前面设置了比电除尘器体积略小的荷电区(器)凝聚区(器)。对0.06~12 μm烟尘的除尘效率提高了3%左右。2001年刘功智等^[18]以及2002年王连泽等^[19]分别进行了静电荷电凝聚除尘研究,除尘效率均提高了3%。2003年Coghe等^[20]、2004年Zamankhan等^[21]进行了离子荷电粉尘的流体动力学研究。从上述实验研究表明,在直流、交变电场中的同极性、异性离子对烟尘具有荷电凝聚作用。目前应用于电除尘器的烟尘预荷电设置大多是电除尘器稍加改变而成,通常是靠增加几个变形电场来实现的,实质上是电除尘电场的延伸。近几十年电除尘技术在工艺上有了改进^[22,23],并在烟尘荷电凝聚机理及方法上也进行了不少探索性的研究。

众所周知,烟尘荷电量、驱进速度与电晕电离电场强度分别成1次方、2次方函数关系^[24]。由于电晕电离电场强度存在着临界击穿电场强度的极限值(板线型,≤7.5 kV/cm),进而烟尘的荷电量、驱进速度也相应存在极限值。所以目前电除尘器均采用自动火花跟踪临界击穿电场强度的供电方法,使电

除尘器运行在现有技术的最佳临界极限值上。

2 电除尘器现存的关键问题与解决途径

从高气压非平衡等离子体物理、气体电离放电物理学观点来分析,目前电除尘器存在电离占空比、输运项等均低下的问题。也是造成电除尘器体积大、耗能高及后级电场中微细灰尘的除尘效率低等问题的主要原因。

2.1 解决电离占空比低的研究途径

目前电除尘器中的计算直流高电压电晕放电电离占空比(电晕电离放电通道总体积/电除尘电场总体积)约为 1.8×10^{-5} ^[25];采用强电场电离放电方法能把电离占空比提高到 2×10^{-2} ,如图1所示。可见电除尘器的电离占空比存在着成数量级提高的研究余地。也预示存在大幅度减少电除尘器体积、重量及能耗的研究空间。现在的电晕放电的流光通道中电子浓度约为 1.3×10^{14} 个/cm³,微放电的流光通道中电子浓度约为 1.8×10^{14} 个/cm³^[26],它们差异不大。但是它们的电离占空比的差异却高达3个数量级左右。由此可见,电除尘器中的离子浓度大小将主要取决于电离占空比的大小。从图1可见,采用强电离放电方法,可解决目前电除尘器中的电离占空比低下问题,也是解决电除尘器中的带电粒子浓度低下问题的方法之一。

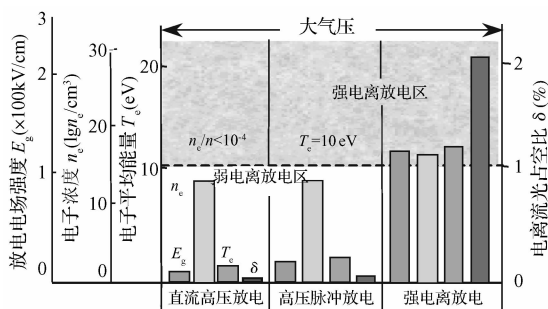


图1 大气压气体电离放电主要参数的对比

Fig. 1 Comparison of the main parameters of gas discharge at atmospheric pressure ionization

2.2 输运项过低

描述控制电离放电通道物理过程的电离连续性方式是^[27]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = c - L(N) - \nabla \cdot (NV) \quad (1)$$

式中: c 、 $L(N)$ 分别为产生率、损失率,它们分别表示单位时间单位体积中由电离产生的离子-电子对,由

复合而湮灭的比率,单位均是 $\text{个}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$; $\nabla \cdot (NV)$ 为输运项,是通量(NV)的散度,表示单位时间单位体积内由输运过程引起带电粒子浓度变化的迁移率。在平衡情况下 $\frac{\partial N}{\partial t} = 0$,则:

$$\nabla \cdot (NV) = c - L(N) \quad (2)$$

由于电晕放电存在一个临界击穿电场强度值,所以电晕电离放电的注入功率密度也就相应存在一极限值,产生率也相应存在一个极限值。当注入电离电场中能量密度为 $3.3 \text{ mJ}/\text{cm}^3$ 时,电离区域流光放电通道中的电子浓度可达到 $1.3 \times 10^{14} \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。如果不考虑电离区域内的电子与离子、离子与离子复合反应,计算电除尘器电场的电离占空比约为 1.8×10^{-5} ,此时除尘电场中离子浓度应为 $2.3 \times 10^9 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 左右。实际上,由于电场力作用,电子、离子被束缚在电离放电通道中进行复合反应,其损失率在2个数量级以上,所以目前电除尘器电场中平均离子浓度仅为 $10^6 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 左右。从带电粒子的运动规律可知,离子在输运过程中,需要克服电离电场对带电粒子的束缚力,方能解决除尘电场离子浓度低下的问题。从实验研究结果图2表明^[28],可以通过提高带电粒子动量的方法加以解决,电除尘器的离子动量在 $5 \times 10^{-23} \text{ g} \cdot \text{m}/\text{s}$ 左右,其输运项约在 $10^7 \text{ 个}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 。当离子动量增加 $100 \times 10^{-23} \text{ g} \cdot \text{m}/\text{s}$ 时,离子输运项达到 $10^{10} \text{ 个}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 左右。从图2可见,当离子动量每增加1个数量级时,则相应的离子浓度及其输运项也将相应的增加2个数量左右。这表明了可以通过提高带电粒子动量方法来解决电除尘器离子输运项低下的问题,同样也预示着能使目前的电除

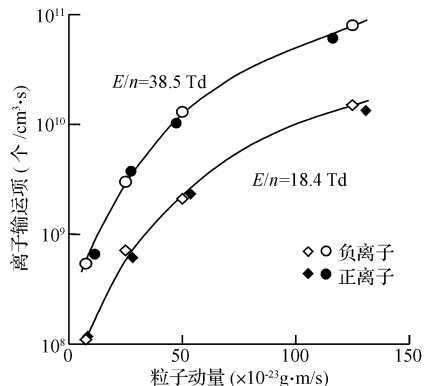


图2 离子输运项与其动量关系的曲线

Fig. 2 Ion transport projects and curves of the momentum relations

尘器的体积、能耗、投资及运行费用等将会相应的大幅度降低。总之,解决了电离占空比和运输项过高的技术难题,将会使目前的电除尘方法、除尘器结构等发生很大的变化。

3 烟尘的电晕荷电物理机制

3.1 电晕放电的物理过程

通常电除尘器运行在负电晕放电过程。当外加稳定电场作用到非均匀放电间隙上时,由于空间电荷的积累,会出现新的电场分布和电晕模式。逐渐增加放电电场强度达到一定时,将在电晕点上出现一个电晕电流相对稳定的辉光放电。辉光放电的起始电压存在一个较宽的调控范围,通常电除尘器就工作在辉光放电区域内。

最大电场将出现在放电电极电晕点附近,当雪崩头部空间电荷形成的本征电场 E_r 与外加电场 E_0 的大小在同一数量级时,或者雪崩产生的电子数达到临界值时,就会在电晕点上发生辉光放电(负电晕)。并在负电晕雪崩头部形成了正电荷积累^[29],形成了本征电场,它加强了正电荷和放电极之间的电场强度,并减弱了指向接地极的电场强度。在电晕放电空间任意一点的总电场强度为 $E = E_0 + E_r$ 。当外加激励电场强度 E_0 增大时,将会强化了电离放电过程。此时本征电场强度甚至可达 $100 \sim 400 \text{ kV}/\text{cm}$,比电除尘器中的外加激励电晕电场强度(通常为 $5 \text{ kV}/\text{cm}$ 左右)高出20倍左右。

由于汤生第一电离系数 α 是折合电场强度 E/n (E 为电离电场强度, n 为气体浓度,单位Td, $1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$)的函数。本征电场强度将大大地强化了电离放电的强度,一个雪崩产生的电子总数、或者正离子总数将按指数规律增加。所以在任何瞬间,任何电晕点上,电离强度将是折合电场强度的函数。

3.2 烟尘荷电机理

电除尘器对烟尘捕集主要是通过荷电的烟尘颗粒在电场作用下完成的。烟气在物理条件一定的情况下,荷电尘粒的驱进速度 ω 与尘粒的荷电量 q 、除尘区域的电场强度 E_0 成正比,与尘粒的斯托克斯粒径 d_s 成反比。

从除尘效率方程可知,驱进速度是除尘效率的关键参数,也是提高除尘效率唯一可行的途径。烟尘驱进速度增加多少倍时,则电除尘器集尘面积也将相应减少多少倍,或者烟气处理量增加多少倍,从驱进速度公式可知,烟尘的驱进速度取决于它的荷

电量,所以说,增加烟尘荷电量的方法将成为今后电除尘技术急待研究解决的问题。

尘粒荷电是通过与带电粒子碰撞实现的,尘粒碰撞荷电主要有2种机制:一种是气体中带电粒子在电场力作用下与尘粒有规则碰撞荷电,称为电场荷电;另一种是带电粒子随气体无规则运动与尘粒碰撞荷电,称为扩散荷电。在电除尘过程中,这2种机制同时存在的。烟尘粒径是非均匀的,通常电除尘器前部电场中烟尘(大于 $1\mu\text{m}$)是以电场电荷为主;其后部电场中尘粒($0.4\mu\text{m}$ 左右)是以扩散荷电为主的;在电除尘器中部电场中存在2种同时荷电机制。烟尘荷电量是^[30]:

$$q = q_d + q_k = \frac{3\varepsilon\varepsilon_0\pi d^2 E_0}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4\varepsilon_0}{Nekt}} + \frac{2\pi\varepsilon_0 dkT}{e} \ln\left(1 + \frac{d\bar{u}Ne^2 t}{8\varepsilon_0 kT}\right) \quad (3)$$

式中: q_d 为尘粒的电场荷电量; q_k 为尘粒的扩散荷电量; ε_0 为真空介电常数; ε 为尘粒的相对介电常数; d 为尘粒直径; N 为带电粒子个数; k 为波兹曼常数; t 为尘粒进入电场时间; T 为气体热力学温度;离子的算术平均速度 $\bar{u} = (8kT/m\pi)^{0.5}$ 。从公式(3)可知,烟尘的荷电量受 N 、 d 制约着,由于电凝聚作用,烟尘粒径也将受气体的带电粒子浓度制约着。随着荷电量增加,则粒径也在凝聚过程中增粗。可见,除尘电场的带电粒子浓度是影响烟尘荷电量的主要因素。

3.3 荷电粒子电凝聚的数学模型

从除尘效率方程和尘粒驱进速度公式可知,烟尘的荷电量、粒径大小决定了以除尘效率表征为主的电除尘性能。如能采用电凝聚方法将尘粒凝聚成大粒径的颗粒,并将得到更多的电量,不但它能提高电除尘器的除尘效率,同时又可解决电除尘器后级电场中微细烟尘除尘效率低下的问题,又利于捕集微细烟尘。近期研究表明亚微米粒子的电凝聚速率比中性粒子的热凝聚速率提高了 10^2 至 10^4 ^[31];对于 $1\mu\text{m}$ 的尘粒的电凝聚系数 K 可达到 10^{-13} ~ $10^{-14}\text{m}^3/\text{s}$ ^[32],这一研究结果引起从事烟尘净化科学界的广泛关注,也为研究解决电除尘器现存问题提供了一个有效的可供选择的解决方法。

确定凝聚速率近似解的关键是求电凝聚系数。可通过离子在库仑力作用下的扩散方程求出^[33]。

$$K = \frac{q_1 q_2}{kT\varepsilon_0} (D_1 + D_2) \left[\exp \frac{q_1 q_2}{4\pi kT\varepsilon_0 (a_1 + a_2)} - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

式中: q_1 、 q_2 分别是半径 a_1 、 a_2 的尘粒的带电量; D_1 、 D_2 分别为半径 a_1 、 a_2 的尘粒扩散系数。根据凝聚前后质量守恒及单分散性粉尘的凝聚公式,来近似计算多分散性烟尘在 t 时的计数浓度 $n(t) = n_0 \left(1 + \frac{1}{2}Kn_0 t\right)^{-1}$,式中 n_0 为凝聚前气体中烟尘的计数浓度; t 为凝聚时间。根据凝聚前后质量可求得凝聚后粉尘的中位径 $d(t)$ 是:

$$d(t) = \left[1 + \frac{1}{2}Kn_0 t\right]^{1/3} d_0 \quad (5)$$

式中: d_0 为凝聚前尘粒中位径; n_0 为初始尘粒计算浓度。从(4)式可见,烟尘的荷电量是电凝聚系数的主要参量,而电凝聚速率、凝聚后尘粒粒径均是电凝聚系数的函数。如果采用强电离放电、高气压非平衡等离子体物理等新成果,可大幅度增加等离子体浓度、尘粒荷电量,进而提高了烟尘的电凝聚速率、尘粒粒径,反过来又促使已增粗的尘粒荷电量大幅度的增加。可见,在除尘过程中电凝聚对除尘性能起着叠加倍增效果。

4 结束语

目前电除尘技术尚属经验工程学科,电除尘性能常常取决于设计的命中率。因此有必要把气体电离放电、大气压等离子体物理学科在电离占空比、输运特性方面研究的新进展,用于解决粉尘粒子荷电凝聚及电除尘电场占空比低的问题。将使烟尘粒径大幅度增粗,荷更多的电荷,有助于提高电除尘效率及捕集微细烟尘,由于占空比的增加,将有助于降低电除尘器的体积和能耗。

参考文献

- [1] 等离子体物理学科与发展战略研究课题组. 核聚变与低温等离子体——面向21世纪挑战和对策. 北京:科学出版社, 2004
- [2] 唐国山,唐复磊. 水泥厂电除尘器应用技术. 北京:化学工业出版社, 2005
- [3] 原永涛,林国鑫,宣伟桥,等. 火力发电厂电除尘技术. 北京:化学工业出版社, 2004
- [4] 白希尧,白敏冬,杨波,等. 强电场中离子运动规律及应用基础研究进展. 中国基础科学, 2004, 6(4): 23~27
- [5] 张芝涛,鲜于泽,许波,等. 强电离放电研究. 东北大学

- 学报, **2002**, 23(5):507~510
- [6] 白敏苒,谷建龙,张芝涛,等. 高气压强电场电离过程中的离子浓度分布规律. 核聚变与等离子体物理, **2005**, 25(3):218~222
- [7] 白希尧,张芝涛,白敏冬,等. 非平衡等离子体化学研究现状与展望. 科学通报, **2002**, 47(5):321~322
- [8] 白希尧,张芝涛,白敏冬. 高气压强电场电离放电等离子体学科的形成与应用展望. 自然杂志, **2000**, 23(3):56~161
- [9] Masuda S., Nonogaki Y. Detection of Back Discharge in Electrostatic Precipitators. Record of IEE/IAS Annual Meeting, **1980**. 912~917
- [10] 与川慎太郎, 龜島忠, 田中修. パルス荷電による電器集塵装置の性能向上. 静電気学会志, **1990**, 14(6):459~466
- [11] 王海宁,阮金良,余汉民. 电除尘器脉冲供电电源及其应用研究. 电力环境保护, **2001**, 17(1):13~15
- [12] 白希尧,朱克明. 预荷电宽极距静电收尘器应用的研究. 工业安全与防尘, **1990**, (6):6~11
- [13] 阪本清,等. 净化烧结高比电阻烟尘电收尘器研究. 环境工程, **1992**, 9(3):16~20
- [14] Watababe T., et al. Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator. J. Electrostatics, **1995**, 34:367~383
- [15] Hautanen J., et al. Electrical agglomeration of aerosol particles in an alternating electric field. Aerosol Sci. and Techn., **1995**, 22:181~189
- [16] 许德玄. 静电除尘荷电的研究. 环境工程, **1997**, 15(6):25~27
- [17] 向晓东,陈旺生,幸福堂,等. 交变电场中电凝并收尘理论与试验研究. 环境科学学报, **2000**, 20(2):187~191
- [18] 刘功智,荣伟东,李传贵,等. 双极不对称预荷电静电增强过滤除尘技术的应用. 中国安全科学学报, **2001**, 11(6):62~65
- [19] 王连泽,贺美陆,孟亚力. 双极荷电粉尘颗粒凝聚的初步研究. 环境工程, **2002**, 20(3):31~33
- [20] Coghe Aldo, Mantegna Michele, Sotgia Giorgio. Fluid dynamic aspects of electrostatic precipitators: Turbulence characteristics in scale models. J. Fluids Eng., **2003**, 125:694~700
- [21] Zamankhan Parsa, Ahmadi Goodarz, Fan Fa-Gung. Coupling effects of the flow and electric fields in electrostatic precipitators. J. Appl. Phys., **2004**, 96:7002~7010
- [22] 赵华华,林澄波. 燃煤机组的电除尘器改造. 电力环境保护, **2002**, 18(4):57~59
- [23] 张设计,姚选智. 水泥厂电除尘效率及其影响因素的分析. 矿业安全与环保, **2000**, 27(4):43~46
- [24] H. J. 怀特,王成汉译. 工业电收尘. 北京:冶金工业出版社, **1984**
- [25] 胡传鼎. 通风除尘设备设计手册. 北京:化学工业出版社, **2003**
- [26] Eilimonova E. A., Amirov R. H., Kim H. T., et al. Comparative modeling of NO_x and SO₂ removal from pollutant gases using pulsed-corona and silent discharges. J. Phys. D: Appl. Phys., **2000**, 33:1716~1727
- [27] 营井秀郎(日)著,张海波,张丹,译. 等离子体电子工程学. 北京:科学出版社, **2002**
- [28] 白敏苒,杨波,周建纲,等. 大气压下电晕电离层离子运动规律实验研究. 核聚变与等离子体物理, **2005**, 25(4):311~314
- [29] 徐学基,诸定昌. 气体放电物理. 上海:复旦大学出版, **1996**
- [30] Martin C. Air Pollution Control Theory. McGraw-Hill, **1976**
- [31] Eliasson B., et al. Coagulation of bipolarly charged aerosols in a stack coagulator. J. Aerosol. Sci., **1987**, 18:869~872
- [32] Kildes J., et al. An experimental investigation for agglomeration of aerosols in alternating electric field. Aerosol. Sci. and Techn., **1995**, 23:603~610
- [33] Williams M. M. R., Loyalka S. K. Aerosol Science Theory and Practice. Pergamon Press, New York, **1991**