

# 电晕放电电离电场强度对其输运项的影响研究

毛程奇 杨波 孙健 白敏葭

大连海事大学物理系 高气压强电场电离放电辽宁省重点实验室

辽宁省大连市甘井子区凌海路1号 116026

[crystal7788@21cn.com](mailto:crystal7788@21cn.com)

**摘要:** 通过电离连续方程及带电粒子的运动方程的研究,分析离子在电离电场受力以及其运动规律,在此基础上研究离子在电场中运动规律,并就电离电场强度对输运项的影响进行实验研究。实验结果表明,在电晕放电的流光、辉光放电区域,电离电场强度对等离子体输运项影响程度约在1个数量级内,是影响输运项的主要参数之一。

**关键词:** 大气压 电晕放电 气体电离 输运特性

## 1. 引言

高气压非平衡等离子体的普遍应用可以有效推动工业及国民经济的其他方面的发展。近期,学者进行了大量的工业上的大气压等离子体应用基础研究<sup>[3-10]</sup>。目前工业上应用最为成功的是电收尘器(EP)<sup>[7, 9, 10]</sup>、臭氧制取<sup>[11, 12]</sup>等领域,然而也存在成本过高、能耗大以及体积庞大等问题。因而,大气压等离子体并没有在工业上多领域中进行大规模的推广应用。其主要原因是没有小型化、低能耗的大气压非平衡等离子体源<sup>[1, 2]</sup>,这是由于离子输运特性的基础研究刚刚起步所致。

目前工业上应用是以电晕放电的大气压非平衡等离子体源研究为主。该电晕放电等离子体的输运项只有 $1.6 \times 10^7 / \text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 左右,约为电晕放电流光通道中输出项计算值的万分之一。通过研究降低离子复合反应的损失项,提高电离占空比等方法,有可能解决大气压非平衡等离子体源的输运项低的问题。而目前尚没有方法解决大气压下空气辉光放电的技术问题,因此通过提高电离占空比的方法,解决其源输运项问题是不可行的。若从降低其损失项进行研究,将会有数量级提高的研究余地。现有的电晕放电技术是把多数的离子束缚在放电通道中进行着复合反应。可见,如何把离子从电场束缚中输运出去,是解决输运项的核心问题,也是高气压下非平衡等离子体输运特性的研究焦点,目前,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<sup>[13]</sup>。

## 2. 带电粒子的运动方程

在忽略重力、压力梯度及电子-离子碰撞条件下,研究外界作用力对等离子体层(电离层)中电离产物运动速度的作用。单个带电粒子在电离电场中的运动方程(Langevin equation)<sup>[14]</sup>

$$m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = q\mathbf{E} - m\nu(\mathbf{V} - \mathbf{U}) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{V}$ 是带电粒子的漂移速度, $\mathbf{U}$ 是气体速度, $\nu$ 是带电粒子与中性粒子的碰撞频率, $q$ 为基本电量,当特征时间尺度 $\tau \gg \nu^{-1}$ 时,则 $\frac{d\mathbf{V}}{dt} = 0$ 。则总驱动力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + m\nu\mathbf{U} \quad (2)$$

气体沿 $y$ 方向运动,如图1所示,其 $\nu = \mathbf{U}$ ,外加电场 $\mathbf{E}$ 平行于 $z$ 方向, $\mathbf{E} = (0, 0, E)$ ,

$\mathbf{F} = (0, F_U, F_E)$ 。矢量方程 (2) 式的三个分量方程分别为

$$\mathbf{F} = \begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = F_U = mvU \\ F_z = F_E = eE \end{cases} \quad (3)$$

从 (3) 式解出  $u$

$$\mathbf{V} = \begin{cases} u = 0 \\ v = U \\ w = \frac{\mathbf{E}}{mv} \end{cases} \quad (4)$$

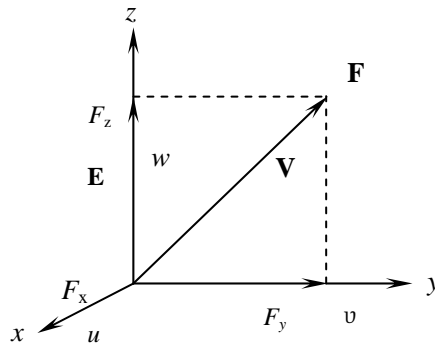


图 1 电场中离子受力坐标

从 (4) 式可见，带电粒子的漂移速度是由风力漂移速度与电力漂移速度的矢量合。由公式 1 建立流体运动方程，对速度空间分布函数的玻尔兹曼方程 (Boltzmann's equation)，再将其空间速度积分后可得连续方程 (粒子数守恒原理) [15]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (N \cdot \mathbf{V}) = g - L(N) \quad (5)$$

式中  $g$  为产生项 (率)，是单位时间、单位体积内电离产物比率 ( $/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ )； $L(N)$  为损失项 (率)，是单位时间、单位体积内复合损失比率 ( $/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ )； $\nabla \cdot (N \cdot \mathbf{V})$  为输运项， $(N \cdot \mathbf{V})$

项代表了输运电离产物的通量，其散度  $\nabla \cdot (N \cdot \mathbf{V})$  表示输运过程引起的电离产物的变化率

( $/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ )。式 (5) 是描述电离层物理过程的基本方程，大致分为两个过程：一是导致电离物产生和消失的电离化学过程；二是引发电离物运动的输运过程。在电离层

中每种带电粒子处于准平衡状态， $\frac{dN}{dt} = 0$ ，则式 (5) 又可写成

$$q = L(N) + \nabla \cdot (N \cdot \mathbf{V}) \quad (6)$$

从带电粒子在电离层中的运动规律可见，要解决目前等离子体源现存问题，应从三个方面进行研究，一是提高电离产物的产生率，应采用强电离放电方法加以解决；二是尽量减少电离产物的复合反应；三是在一和二的基础上把更多的电离产物输运出去。其中关键问题是如何减少电场中电离产物的复合反应。

### 3. 实验装置与方法

研究大气压下电晕放电非平衡等离子体输运特性的实验流程示意如图 2 所示。电晕放电

的等离子体源是由板线形式组成的，异极距为 0.75cm，有效截面积为 17cm×6cm，气道长度为 10cm，共有 4 个气体通道，每通道有 6 根电晕线，直径为 0.1mm。高电压直流电源输出电压调节范围为 0—26kV。用 ABBDrives 调频器调控实验气体流量。用 JOD-05G 型冷冻式压缩空气干燥机，JM-C、F 超精密过滤器等，把空气处理成标准实验气体。本试验是在 0.1016MPa 气压下进行的。

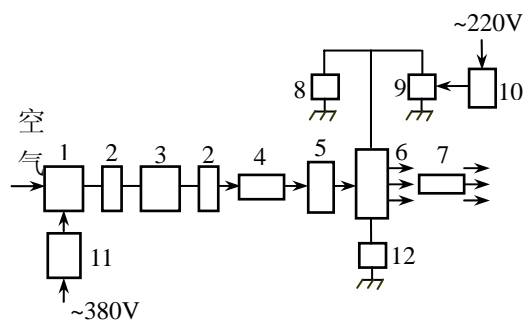


图 2. 实验流程示意

注：1.鼓风机，2.过滤器，3.空气处理设备，4.流量计，5.气体均速装置，6.等离子体源，7.离子浓度测量仪，8.高电压 Q 表，9.高电压发生器，10.控制器，11.调频器，12.nA 电流检测仪

目前大气离子测量仪体积大影响了被测空间的空气动力学及窄小电离通道的气体离子浓度检测问题。为此，采用新研制的 GDLYX-I 型大气离子测量仪检测离子浓度，它的传感器探头为球形，直径仅为 0.5cm，检测气体流速≤60m/s。解决了等离子体检测存在的问题，并用 DLY-3 型大气离子测量仪再进行校核，根据 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 分子粒径选取迁移率为 1cm<sup>2</sup>/V·s。

## 4. 实验结果与讨论

### 4.1 电晕放电伏安特性

激励折合电场强度  $E/n$  (单位 Td, 1Td=10<sup>-17</sup>V·cm<sup>2</sup>) 与电晕电流关系的实验数据如图 3 所示，从图中曲线可见，电晕电离放电分为：1) 电离起始区域，2) 流光放电区域，3) 辉光放电区域；4) 火花击穿区域等。曲线 I 是负电晕放电的伏安特性曲线；曲线 II 是正电晕放电伏安特性曲线，两条曲线在流光放电区域相交。在电离起始阶段 1，负电晕易于起晕；在流光、辉光放电区域里，负电晕电离强度大于正电晕电离强度。当电晕放电的折合电场强度增加到 5Td 时，电晕电流开始逐渐上升，表征电离放电进入电离起始区域 (1)； $E/n$  增加到 15Td 之后，电晕电流开始按指数规律增加，此时电晕电流是由有规的脉冲电流组成的，放电进入流光放电区域 (2)；当  $E/n$  增加到 23Td 之后，曲率变化速率变慢，表明电晕放电过渡到辉光放电区域 (3)，流光消失，在电晕点出现稳定的辉光区域；一旦  $E/n$  增加到 38Td 之后，又导致流光再现，一旦流光延伸到接近接地极时便形成了正流光柱，进入了火花击穿区域 (4)。从图中曲线可知，电晕放电工作点应选在辉光放电区域。

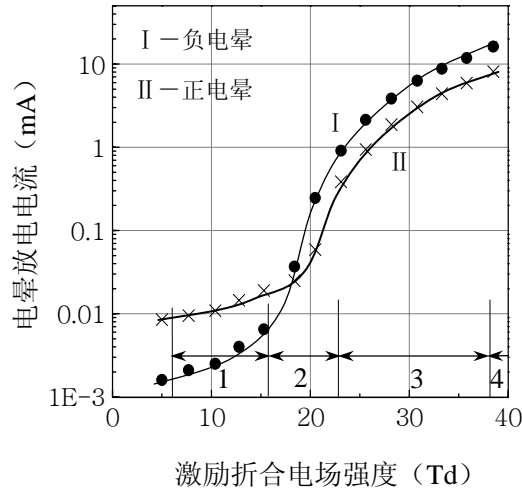


图 3. 激励折合电场强度与电晕放电电流关系曲线

注：1.电离起始区域，2.流光放电区域，  
3.辉光放电区域，4.火花击穿区域。

#### 4.2 电场强度对离子输运项影响

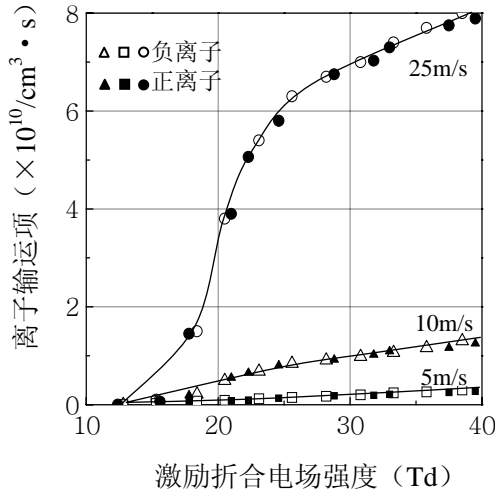


图 4. 离子输运项与激励折合电场强度关系曲线

外加激励电场强度对离子输运项影响的实验结果如图 4 所示。从气体流速为 25m/s 的曲线能清晰看出， $E/n$  对离子输运率影响是相当大的， $E/n$  达到 23Td 之后，进入了辉光放电区域后的曲线变化率趋缓。 $E/n$  达到 20.5Td 时，离子输运项值为  $3.8 \times 10^{10}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ ， $E/n$  为 38.5Td 时，输运率仅增加到  $8 \times 10^{10}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 。总之， $E/n$  值不但是决定离子产生项的关键因素，也是左右输运项主要参数；在流光、辉光放电区域，气体速度对离子输运项影响率远大于放电电场强度的影响。

#### 5. 结束语

目前解决工业用大气压等离子体设备输出离子浓度低问题的普遍方法是增加源的数量，同时也带来了体积庞大，能耗增加，一次投资和运行成本高的问题。从电离物理过程对带电粒子浓度影响规律的连续方程来看，可从提高产生项来解决。但是注入功率的极限使产生项

也存在极限,而电离电场强度的增加也使电离产物复合反应几率提高,从而制约了输出离子浓度。从实验结果中可以看出,电场强度是影响输运项的因素,但相同风速下对输出项的影响在一个数量级内,而风速对输出项的影响要大得多。可见提高带电粒子的动量是解决离子输出浓度和输运项的可取方法。

## 参考文献

1. 莫锦军,刘少斌,袁乃昌.非均匀等离子体覆盖目标隐身研究[J].电波科学学报,2002,17(1):69-73.
2. 孙宗祥.等离子体减阻技术的研究进展[J].力学学报,2003,33(1):87-94.
3. J.R.Roth.Industrial Plasma Engineering [M]. Vol.1: Principles,IOP Publishing Ltd,1995.
4. B Pashaie, R Sankaranarayanan S K Dhali. Experimental Investigation of Microdischarges in a Dielectric-Barrier Discharge [J].IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 1999, 27(1):22-23.
5. K Urashima, J S Chang. The effect of Ammonia Injection Rate and Discharge Power on the Reduction of NOx from a Combustion Flue Gas by Superimposing Barrier Discharge Reactors[J]. J Adv. Oxid. Technol, 1997,2(2):286-293.
6. J Y Park, I Tomicic, G F Round, et al. Simultaneous removal of NOx and SO<sub>2</sub> from NO-SO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> gas mixtures by corona radical shower systems[J]. J. Phys. D:App -I. Phys,1999,(32):1006-1011.
7. E A Eilimonova, R H Amirov,H T kim,etal. Comparative modeling of NOx and SO<sub>2</sub> removal from pollutant gases using pulsed-corona and silent discharges[J].J Phys D:App phys,2000,33:1716-1727.
8. R McAdams. Prospects for non-thermal atmospheric plasmas for pollution abatement[J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2001,(34):2810-2821.
9. 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[J].中国基础科学,2004, 6(4):23-27.
10. Wang XX et al. 2002 Acta Phys. Sin. 51 2778 (in Chinese) [王新新等 2002 物理学报 50 2778 ].
11. 葛本昌树,田火田要一郎,吉沢憲治.100 μ m 級極短ギャップ下における無声放電による高濃度オゾン発生[J].T. IEE Japan, 1996, 116-A (2): 121-127.
12. Baldur Eliasson, Ulrich Kogelschatz. Nonequilibrium volume plasma chemical processing[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 1991, 19(6): 1063-1077.
13. 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[M].北京:科学出版社,2004:165-197.
14. 熊年禄,唐存琛,李行健.电离层物理概论[M].武汉:武汉大学出版社,1999:98-163.
15. 菅井秀郎.张海波等译.等离子体电子工程学[M].北京:科学出版社.2002:12-65