科学通报 2008 年 第 53 卷 第 10 期: 1238 ~ 1240
快 讯
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

高气压非平衡等离子体源的小型化研究

白敏茹, 邱秀梅, 刘栋, 杨波*, 周建刚, 薛晓红, 谷建龙

大连海事大学环境工程研究所, 大连 116026
* 联系人, E-mail: qiuxiumei_1983@163.com

2008-01-31 收稿, 2008-04-20 接受
国家自然科学基金(批准号: 50578020, 50778028)和国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA06Z317)资助项目

摘要 大气压非平衡等离子体源输出的等离子体浓度是电离电场中能耗率、气体粒子动量的的函数. 实验表明, 等离子体源中的能耗率、气体粒子动量增加时, 将大幅度提高其等离子体浓度. 当外加激励电场能耗率为 2.18 W·h/m^3、气体粒子平均动量为 109 ×10^{-22} g·m/s 时, 一个体积仅为 2.5 cm^3 的等离子体源处理气量为 12 m^3/h, 其输出等离子体浓度达到 10^{10} cm^{-3} 以上, 这将为化学工业、环保工程及军事应用提供小型、低能耗的高浓度等离子体源.

关键词
大气压强电场电离放电
非平衡等离子体源
等离子体浓度
气体粒子动量

高活性高浓度的等离子体在国民经济及国防建设上应用的研究, 取得了令人瞩目的进展 [1~10]. 1999 年俄罗斯斯克尔德什研究中心研制用于飞机隐身的等离子体源, 重达 0.1 t, 功耗竟达数十千瓦 [1]. 1992 年Gregoire等人在充有氩气的玻璃真空罩的等离子体源里进行等离子体隐身研究 [2], 这与在飞行器上进行隐身研究要求相差甚大. 工业上应用成功的电除尘器(ESP)本体就是一个庞大的等离子体源, 2006 年陈旺生等人 [3]和 2007 年岳敏等人 [4]分别进行了电除尘器粉尘层反电晕击穿厚度的确定和斜气流分布与粉尘沉降规律的研究, 并没有解决占空比(放电通道总体积/电场总体积)小于 1.8 ×10^{-5}的问题, 一个 30×10^4 kW火力发电机组的电除尘器本体体积高达 1036 m^3. 可见, ESP存在本体体积庞大, 离子浓度低等问题, 阻碍了电除尘器技术的应用研究进展 [5]. 2007 年Kogelschatz进行微等离子体源技术及应用研究, 只进行了微流量(<0.01 L/min)、高能耗率(10 kW/ cm^3)的等离子体源研制及其在硅片刻蚀、薄膜沉积以及小面积的表面改性上的应用研究 [6]. 2007 年Vizir等人 [7]进行了真空空心阴极等离子体源的研究, 离子电流为 1 mA, 用于小规模合成或材料表面改性上. 1999 年Stark等人 [8]、2003 年Barankova等人 [9]分别进行了大气压低功率多个空心阴极非平衡等离子体源研究, 已经用于 20 cm^2 的表面改性上. 2006 年裘亮等人 [10]综述了微空阴极的大气压非平衡等离子体源的研究进展, 并指出大气压微空阴极等离子体源用于大面积(此大面积是指 20 cm^2)上有很多优点, 正受到越来越多的关注和研究. 微空阴极提高了通过微孔的粒子动量, 进而提高了源的等离子体产生率和输运项. 因而在小面积的材料改性应用上显示出优点, 同时也存在微孔的一致性和阻力增加等问题. 只有大产量、高浓度、低能耗的大气压非平衡等离子体源才能满足工业、环保和军事装备的需求.

由于目前产生大气压非平衡态等离子体的机理尚不清楚, 高气压等离子体的输运特性研究刚刚起步等原因 [11], 大气压大流量高浓度小型化等离子体源技术的研究成为热点.

本文通过增加气体粒子动量和气体放电能耗率(单位体积的气体电离所消耗的电能, 单位为 W·h/m^3)来提高源输出的等离子体浓度和减少源体积, 为提高源的输运项、产生率和大幅度降低源的体积而提供技术上的支持, 进而满足化学工业、环保工程及军事装备的需求.

本实验系统如图 1 所示, 采用 ABBDrlves 调频器 4 控制 WW-3.0/10-II 型空气压缩机 3 的气体流量; 用 LZB-40 型流量计 5 检测气体流量; 采用 KA-22 型热式风速计检测风速; 用 DPM100 型智能数字压力表 6 测试压力; 电源为自制 GGDY 型高频(1~20 kHz)高压(2~20 kV)电源 7, 高压经电缆加到电极上, 在放电间隙中建立了电离电场, 电参数检测系

统 10 是由 SSZ40 型脉冲电流传感器、HV-60 型高压脉冲电压传感器、DS-8606A 型数字存储示波器和静电高压电压表 Q4 等组成. 本实验的等离子体浓度测试点设在离源出口 10 cm 的地方. 等离子体浓度测量是采用电容式电场收集气体中粒子所携带的电荷, 并用微电流仪测量收集到电荷所形成的电流. 由于每个离子只带一个元电荷 e, 可用测得电流 I 和取样空气流量 Q 比值来表征等离子体浓度 n_i. 本实验是采用 DLY-3 型大气离子测量仪 11 进行检测的. 可用 $n_i = I/eQ$ 式表述等离子体浓度.

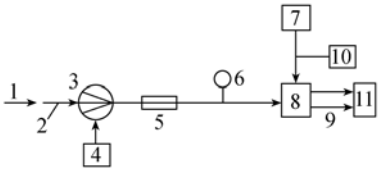

图 1 实验系统示意图

1. 气体; 2. 管道; 3. 空气压缩机; 4. 调频器; 5. 流量计; 6. 压力表; 7. 高频高压电源; 8. 等离子体源; 9. 拖曳离子气体; 10. 电参数检测系统; 11. 等离子体浓度检测仪

最近研究成功的微型等离子体源的结构如图 2 所示, 它是由放电极 5、电介质层 4、接地极 6 和隔片 7 等所组成的介质阻挡放电非平衡等离子体源, 其横断面为 4 mm×14mm, 源有效体积为 2.5 cm^3, 处理气量可达 12 m^3/h, 源的外形如图 2(b) 所示. 采用高频(5 kHz)高压(10 kV)电源 1 供电, 当外加激励折合电场强度 E/n(单位为 Td, 1 Td = 10^{-17} $V\cdot cm^2$)为 380 Td时, 电子具有平均能量达到 10 eV左右, 由于电子能量是麦克斯韦规律分布, 足以把气体中 N_2, O_2 等气体电离成等离子体 [12]. 在此基础上着重研究气体粒子动量、能耗率对等离子体浓度的影响.

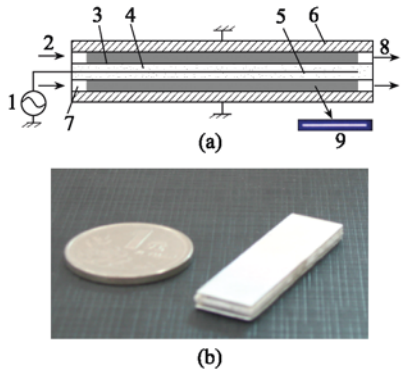

图 2 等离子体源构造示意及放电间隙电离强度照片

(a) 等离子体源正剖视图; (b) 3#等离子体源本体照片. 1. 高频高压电源; 2. 中性气体; 3. 放电间隙中的等离子体; 4. 电介质; 5. 放电极; 6. 接地极; 7. 隔片; 8. 拖曳等离子体的气体; 9. 放电间隙的电离强度照片

在不同能耗率(单位体积电离气体所消耗电能, 单位 $W\cdot h/m^3$)下气体粒子平均动量对等离子体浓度影响的实验结果如图 3 所示. 随着气体粒子平均动量、能耗率的增加, 则等离子平均浓度(正负离子的算术平均值)也在增加, 其变化率近似线性增加. 对不同能耗率值都存在一个最大等离子体浓度值, 当能耗率和电离电场折合电场强度分别是 0.22, 0.35, 0.57 和 1.48 $W\cdot h/m^3$ 及 385, 262, 200 和 154 Td, 它们的最大等离子体浓度分别出现在气体粒子平均动量为 65×10^{-22}, 87×10^{-22}, 109×10^{-22} 和 131×10^{-22} $g\cdot m/s$ 值上, 离子体平均浓度分别达到 1.84×10^7 7.44×10^8, 5.56×10^9 和 1.10×10^{10} cm^{-3}. 从实验结果可知, 等离子体浓度随着能耗率的增加而提高; 对于某一个能耗率都存在一个气体粒子动量的极限值, 一旦超过此极限值将削弱电离放电通道中的本征电场强度, 甚至破坏了已形成雪崩电离放电过程, 致使等离子体浓度大幅度地降低.

在气体粒子动量为 109×10^{-22} $g\cdot cm/s$ 和中性气体压力为 0.138 MPa 条件下, 进行能耗率对等离子体源输出等离子体浓度影响的实验, 实验结果如图 4 所示. 从图中可见, 能耗率在 0.3~0.7 $W\cdot h/m^3$ 之间, 等离子体源输出离子浓度与能耗率的

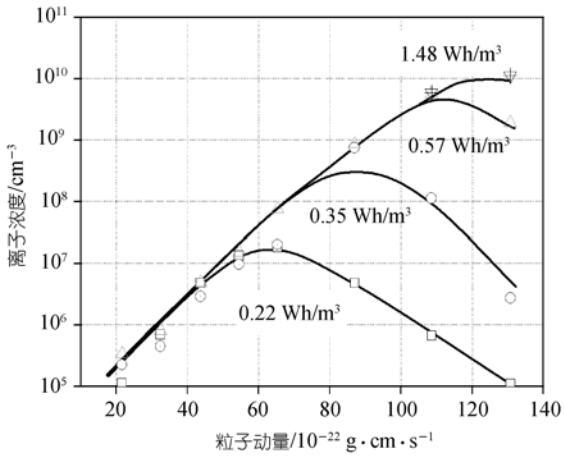

图 3 气体粒子动量对离子浓度影响曲线

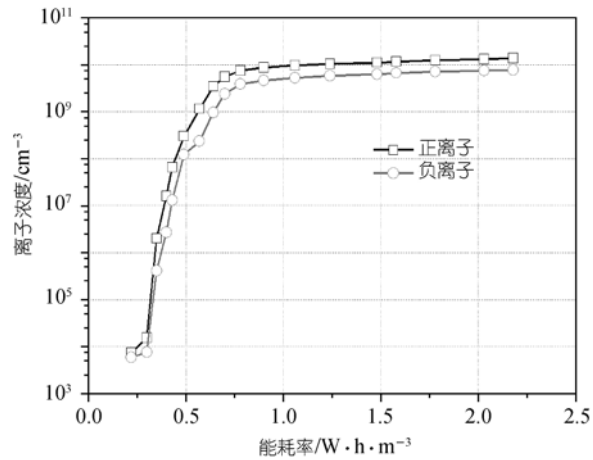

图 4 能耗率对等离子体浓度影响曲线

变化率曲线变得陡直，正离子浓度从 1.56×10^{4} cm^{-3} 突升到 5.57×10^{9} cm^{-3}；而负离子浓度从 7.64×10^{3} cm^{-3} 也突升到 2.38×10^{9} cm^{-3}，能耗率每增加 0.1 $W\cdot h/m^{3}$，离子浓度则增加1个数量级. 当等离子体源的能耗率从 0.9 $W\cdot h/m^{3}$ 增加到 2.18 $W\cdot h/m^{3}$ 时，则正离子浓度从 8.79×10^{9} cm^{-3} 只提高到 1.38×10^{10} cm^{-3}；而负离子浓度从 2.38×10^{9} cm^{-3} 也只提高到 7.78×10^{9} cm^{-3}. 在此高能耗阶段的离子浓度变化十分缓慢，这是由于为了强化电场强度而注入源中的功率接近功率极限值，此时电离电场中的本征电场强度远大于激励电场强度，由于强电场束缚了放电通道中的等离子体进行复合反应，进而冲消了等离子体产生率的增加值. 综上所述，介质阻挡放电的等离子体源的能耗率选在 1~1.4 $W\cdot h/m^{3}$ 为宜.

综合上述实验研究，通过提高等离子体源中的气体电离能耗率方法将大幅度提高源中的等离子体产生率；加大拖曳气体粒子动量将大大地降低源中的等离子体的损失率，并将大幅度提高其输运项，为解决大气压非平衡等离子体源微型化提供技术上的支持.

在外加激励能耗率为 2.18 $W\cdot h/m^{3}$，气体粒子平均动量为 109×10^{-22} $g\cdot m/s$ 和电离气体流量为 12 m^{3}/h 的条件下，可使一个有效体积仅为 2.5 cm^{3} 的大气压非平衡等离子体源输出(离源出口 10 cm)正离子浓度达到 1.38×10^{10} cm^{-3}，负离子浓度达到 7.78×10^{9} cm^{-3}. 通过提高电离电场的能耗率、气体粒子动量的方法，来解决目前等离子体源技术上现存的问题，这有助于高气压非平衡等离子体源在工业、环保及军事装备上推广应用.

参考文献

1 陆红. 飞行器利用等离子体隐身的原理及应用. 飞行导弹, 1999, 6: 22—25
2 Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W. Electromagneic-wave propagation in unmagnetizde plasmas. Air Force Office of Scientific Research, USA, 1992
3 陈旺生, 向晓冬, 陆继冬. 电除尘器粉尘层反电晕击穿厚度理论与实验. 环境科学与技术, 2006, 29(10): 32—34
4 岳敏, 徐国胜, 何剑. 电除尘器气流分布与粉尘沉降规律实验研究. 环境污染与防治, 2007, 29(1): 30—36
5 白敏茹, 依成武, 杨波, 等. 电除尘技术研究现状及趋势. 环境工程学报, 2007, 1(8): 15—19
6 Kogelschatz U. Applications of microplasmas and microreactor technology. Plasma Phys, 2007, 47: 80—88[doi]
7 Vizir A, Oks E M, Salvadori M C, et al. Small plasma source for materials application. Rev Sci Inst, 2007, 78(8): 086103[doi]
8 Stark R H, Schoenback K H. Direct carrent glow discharges in atmospheric air. Appl Phys Lett, 1999, 74(25): 3770—3772[doi]
9 Barankova H, Bardos L. Hollow cathode plasma sources for large area surface treatment. Surf Coat Techol, 2001, 146: 86—490
10 裘亮, 孟月东, 任兆杏, 等. 一种新型微空阴极结构的大气压射频冷等离子体源. 物理学报, 2006, 55(11): 5872—5877
11 等离子体物理学科与发展战略研究组. 核聚变与低温等离子体——面向 21 世纪的挑战和对策. 北京: 科学出版社, 2004
12 白希尧, 张芝涛, 杨波, 等. 强电场放电非平衡等离子体飞行器的隐身方法研究. 航空学报, 2004, 25(1): 51—54