

- 7 徐晓春,杨维慎,刘杰等.微波场中NaA型分子筛膜的快速合成.科学通报,2000;45(8):835-837
- 8 Zhang Zhansia, Xiong Guohua, *al et.* Sample pretreatment with microwave-assisted techniques. *Analytical Science*, 2000;16:221
- 9 Strauss C. R., Trainor R. W. Developments in microwave assisted organic chemistry. *Aust J. Chem.*, 1995;48:1165-1692
- 10 赵良举,曾丹苓等.汽液两相混合物的加速与激波的热力学分析.工程热物理学报,2001;22(3):284-286
- 11 李瑞阳,施伯红,郁鸿凌等.EHD强化水平管外沸腾传热的实验研究.工程热物理学报,2000;21(1):97-100
- 12 曾丹苓.工程非平衡热力学.北京:科学出版社,1991
- 13 王松平,华贲.寂态热力学发展的新趋势.自然杂志,1998;20(2):79
- 14 韩光泽,华贲,陈清林等.热力学中 ζ 的普遍化表达式.中国科学(A辑),2001;31(10):934-938
- 15 Han Guangze, Hua Ben, Chen Qinglin *et al.* Generalized expression of exergy in the thermodynamics. *Science in China (Series A)*, 2002;45(1):70-75
- 16 Haken H. *Synergetics —An Introduction*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1977

A New Approach of Transfer Process Enhancement — Field Synergy

Han Guangze, Hua Ben, Wei Yao-dong

Doctor, Associate Professor, Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640

Professor, Supervisor of Ph. D. Student, Doctor, Associate Professor, the Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640

Key words transfer process enhancement, physic field, field synergy

DBD 等离子体及其应用技术的发展

王 燕 赵艳辉 白希尧 张芝涛 (大连海事大学环境工程研究所)

* 国家自然科学基金资助项目(69871002)

关键词 介质阻挡放电 等离子体

采用介质阻挡放电方法可以在高压条件下获得低温非平衡等离子体.它可以应用于等离子体化学、紫外光源、环境工程、高功率 CO₂ 气体激光器等许多领域.本文将对 DBD 等离子体的历史发展概况、基本特性、应用领域及现状、存在问题与发展趋势进行简要的介绍.

一、前 言

等离子体是由大量相互作用的但仍处于非束缚状态下的带电粒子组成的宏观体系,是和固态、液态、气态处于同一层次物质第四态,自然界的物质主要以这些状态出现^[1,2].一些研究者预言,在科学技术领域,紧跟着“纳米热”的将是“等离子体热”.这里的等离子体主要是指低温等离子体,而“热”就热在低温等离子体的工业应用上.介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体是一种高压低温非平衡等离子体,由于它可以在大气压或高于大气压的条件下产生,不需要真空设备就能在较低的温度下获得化学反应所需的活性粒子,具有特殊的光、热、声、电等物理过程及化学过程,因此已经在臭氧合成、紫外光源、高功率 CO₂ 激光器等领域获得了广泛的应用.近年来,由于 DBD 等离子体独特的作用机制及其在半导体刻蚀、材料表面改性、环境工程等高科技领域具有潜在的应用价值,已经引起了许多研究

者的高度关注.

二、DBD 等离子体的发展历史概况

“等离子体(plasma)”一词是在 19 世纪 30 年代由 Langmuir 引入到物理文献中去的^[3].用它来表示气体放电中正负电荷相等而呈电中性的区域.人类也是从这时开始对等离子体进行研究的.针对 DBD 等离子体的产生与应用研究也是在此后的十几年时间里开始的,这主要得益于臭氧的发现.1839 年德国科学家 Schönbein 发现,雷电过后大气中会产生一种具有腥味的物质,并将它命名为臭氧(ozone)^[4,5].从此人们开始了对臭氧发生及其应用技术的研究.1857 年, Siemens 研制的玻璃管式臭氧发生器成为现代工业臭氧发生器的雏形.他在两个同轴的玻璃管之间留有一个环形气隙,并在内外玻璃管间安装了电极,空气或氧气由环形气隙通过后产生臭氧^[6,7].这一装置也是最早的 DBD 等离子体发生装置.到 20 世纪 70 年代,等离子体物理特别是高温等离子体

物理得以发展并成熟起来,成为物理界公认的一个独立的分支学科^[11].在此期间,尽管以气体放电和电弧技术为基础的低温等离子体物理和工艺取得了一些发展,但作为低温等离子体一部分的 DBD 等离子体物理和工艺却没有得到发展.其主要原因是在这—期间臭氧发生装置的效率十分低下致使获得臭氧的成本非常高.而就在这—时期,可替代臭氧的氯的价格却十分低廉^[4].因此限制了臭氧应用技术的发展,从而也限制了 DBD 等离子体技术的发展.近 20 年来,由于材料科学和电力电子技术等相关学科取得了较大的发展^[8-10],促进了对 DBD 等离子体理化特性及应用技术的研究,并成为低温等离子体研究的一个热点.不仅在臭氧发生理论与应用方面取得了巨大的进步^[4,5,11-15],而且在基础工业和高科技领域中,DBD 低温等离子体也获得了广泛的应用^[16-18],有力地推动了等离子体同其他学科和技术领域的相互渗透、相互促进和相互发展.

三、DBD 等离子体的基本特性

DBD 是将绝缘介质插入放电空间的一种气体放电.介质可以覆盖在电极上,也可以悬挂在放电空间里^[19].当在放电电极间施加一定频率(50 MHz 至几兆赫兹)的足够高的交流电压时,电极间的气体就会被击穿产生介质阻挡气体放电.在大气压或高于大气压条件下,间隙内的气体放电由许多在时间上和空间上随机分布的微放电构成,这些微放电的持续时间很短,一般为纳秒量级^[20].由实验观察,微放电通常呈现一些相当均匀的圆柱型微通道(见图 1),每一个微通道就是一个强烈的流光放电击穿过程,带电粒子的输运过程及等离子体化学反应就发生在这些微放电通道内.因此一些研究者将微放电作为 DBD 等离子体的主要特性,并通过研究微放电的性质来研究 DBD 等离子体的整体特性^[5,11,21].典型 DBD 中微放电的主要参数列于表 1 中.

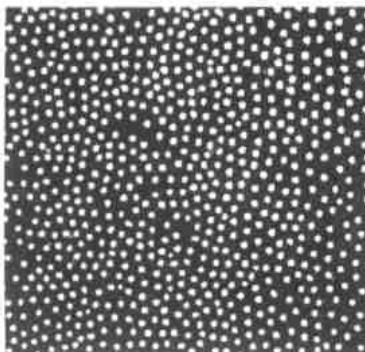


图 1 氮气中微放电的 CCD 照片(40 mm × 40 mm)

表 1 DBD 中微放电主要参数

参数名称	参数值
气体压强 p	0.01 MPa
电场强度 E_g	0.1 ~ 300 kV/cm
折合电场强度 E_g/n	100 ~ 600 Td
微放电寿命	1 ~ 10 ns
微放电通道半径 r	0.1 ~ 0.2 mm
单个微放电输运电荷量 q	100 ~ 1 000 $\times 10^{-12}$ C
电流密度 j	100 ~ 1 000 A/cm ²
能量密度 J	10^{-4} ~ 10^{-2} J/cm ³
电子浓度 n_e	10^{14} ~ 10^{15} /cm ³
电子平均能量 T_e	1 ~ 30 eV
电离度 X	$> 10^{-4}$
气体温度 T_g	300 K

从 DBD 的物理过程来看,电源电压通过电介质电容耦合到放电间隙形成电场,空间电子在这一电场作用下获得能量,与周围气体发生非弹性碰撞,电子从外加电场取得能量转移给气体分子.气体被激励后,发生电子雪崩,出现了相当数量的空间电荷.它们聚集在雪崩头部,形成本征电,再与外加电场叠加起来形成很高的局部电场,在新形成的局部电场作用下,雪崩中的电子得到进一步加速,使放电间隙的电子形成空间电荷的速度比电子迁移速度更快,形成了往返两个电场波,电场波向阴极方向返回时更强,这样一个导电通道能非常快地通过放电间隙形成大量微细丝状的脉冲流光微放电.它们很均匀、漫散和稳定,彼此孤立地随机发生在不同地点.当微放电通道形成以后,空间电荷就在通道内输送并累积在电介质表面产生反向电场而使放电熄灭,形成微放电脉冲.在一定范围内,微放电的数量随供电电压及频率的增加而增加.可见电介质的分布电容对于微放电的形成起着十分重要的镇流作用.一方面,由于电介质的存在,有效地限制了带电粒子的运动,防止了放电电流的无限制增长,从而避免了在放电间隙内形成火花放电或弧光放电;另一方面,电介质的存在可以使微放电均匀稳定地分布在整个放电空间内,便于在高气压条件下获得大体积的低温非平衡等离子体,是其能在工业上获得广泛应用的前提.

然而,近期的研究表明微放电并不是 DBD 的惟一特性,在不同的条件下它能够向其他放电形式转化.1998 年 Françoise Massines 等人^[22]证实大气压力条件下能够获得辉光放电;1999 年 I. M. Üler 等人^[23]在实验中观察到了氩气中 DBD 的自组细丝现象;2000 年 E. E. Kunhardt^[24]通过改变电介质的几何结构发现了一种新的 DBD 放电形式——毛细管等离子体电极放电(capillary-plasma-electrode discharge, CPED)^[24];笔者在近期的研究中也发现在大气压条件下,氢氮按 3:1 混合,利用强电

场可以产生辉光放电,并成功地合成出了氨气^[25].

在 DBD 中获得哪种形式的放电主要决定于放电敏感参量之间的匹配,这些放电敏感参量主要有三个方面:电介质材料与结构因素,主要有电介质材料的性质、介电常数、厚度、几何形状及放电间隙的距离等;供电电源因素,主要有电源电压、频率、波形及控制方式等;外部因素,主要有工作气体的成分、压强、气体的流速及 DBD 等离子体发生器的工作温度等.目前,尽管对 DBD 特性的研究取得了一些进展,但由于人们对 DBD 特性的研究时间不长并缺乏有效的诊断与测量手段,因此对 DBD 相关参量的作用机理、相互关系以及对 DBD 等离子体放电形式演化的影响还缺乏了解,有待在理论与实验两个方面进行进一步的研究.

四、DBD 技术的应用与发展

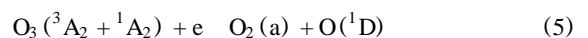
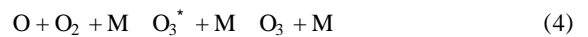
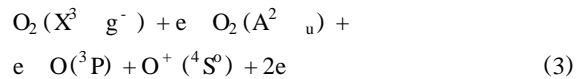
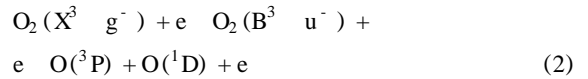
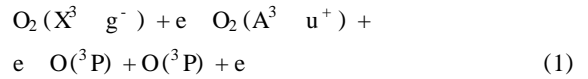
1. 臭氧的合成与应用

臭氧是强氧化剂、杀菌消毒剂、催化剂、脱色剂和除臭剂.可广泛应用于上下水深度处理,造纸纸浆漂白,水产养殖、食品工业、饮料工业、化学工业、环境保护及医疗系统的杀菌灭毒等^[26-28],应用前景十分广阔. DBD 是产生高浓度高产量臭氧的一种十分有效的技术手段,从臭氧发生装置的几何结构来看,它可分为三种基本型式.圆管式臭氧发生器:这种发生器一般使用长度为 1~2 m 的圆形玻璃管作为电介质阻挡层,在玻璃管的内外两侧安装同心的环状电极,玻璃管外侧与外电极之间留有 1~4 mm 的环型气隙,电极间通常施加频率 3~50 kHz、电压 5~20 kV 的交流电,臭氧的合成就在这个环型气隙内进行,这也是目前工业臭氧发生器的主要型式.

平板式臭氧发生器:与圆管式臭氧发生器不同,该发生器采用平板电极替代了管式电极,在电极的一侧或两侧用喷涂或冶贴的方法插入厚度为 0.2~1.0 mm 的非玻璃(通常为 Al₂O₃ 陶瓷)电介质薄层,并留有 0.1~0.5 mm 的气隙,电极间通常施加的电压为 1~10 kV,电压频率为 5~10 kHz,臭氧的合成同样在气隙内完成.由于这种形式的臭氧发生器能够获得高浓度臭氧,同时又具有较高的效率,目前已成为一个研究热点.沿面臭氧发生器:该发生器分为圆管式和平板式两种,其特点是两电极分别涂覆在电介质的两个表面,电介质的厚度一般为 1.0 mm,材料通常为陶瓷.电源电压一般为 5~10 kV,频率为 5~15 kHz,臭氧的合成发生在高压电极的表面.该发生器的结构较简单,便于散热,但存在金属电极损耗,一般只在小型臭氧发生器中使用.当然还有一些

其他种形式的 DBD 臭氧发生器,但基本都是这三种形式的几何演变或组合.

无论哪一种型式的 DBD 臭氧发生器,其在高频率强电场作用下的氧分子、臭氧分子的分解、分解电离和复合的等离子体反应过程都为:



氧分子在高频交流电场里被电子激励后发生跃迁,如图 2 氧分子能级跃迁曲线所示^[35].加速电子与氧原子碰撞的激励过程时间极短,几乎是垂直激励过程.从 O₂(X³g⁻)基态激励到 O₂(A³u⁺)、O₂(C³u)、O₂(C¹u⁻)状态.它的垂直激励能量为 6.1 eV,是禁阻跃迁.当激励能量达到 8.4 eV 以上时,跃迁到 O₂(B³u⁻)状态.只有电子从放电电场取得能量大于 8.4 eV 时,才有可能使氧分子分解、分解电离、分解附着成 O(^3P)、O(^1D)、O⁻(^2P⁰)、O⁺(^4S⁰)、O⁺(^1S⁰)等.电子从外加电场取得能量大小将决定氧分子的分解、分解电离、分解附着的强度,也决定了臭氧产生浓度的大小.

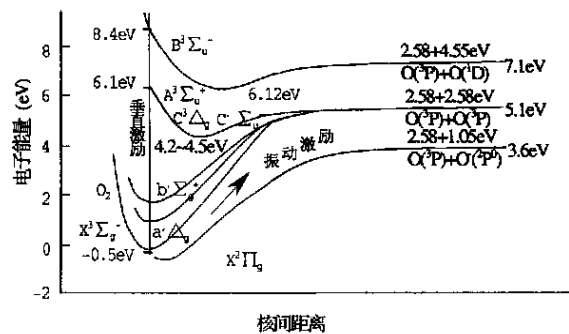


图 2 氧分子能级跃迁曲线

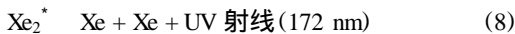
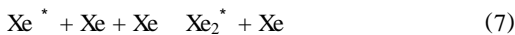
我们知道,目前工业用臭氧发生器的浓度、产生效率都偏低,电介质易损,一次造价和运行成本偏高.要获得高浓度臭氧,改善 DBD 臭氧发生装置的效率,就必须提高高能电子(8.4 eV)的占据数,必须提高放电间隙的电场强度.因此必须在发生装置的几何参量、电介质材料、供电电源及电极冷却等方面进行深入的研究,解决相关问题.今后臭氧发生器的发展趋势是采用窄间隙(<0.5 mm)、高介电常数且较薄的电介质薄层,采用高频高电压幅值电源供电,装置结构小型化模块化.目前

国内外许多研究者采用窄间隙 DBD 进行臭氧合成取得了一定的进展,臭氧浓度大于 200 g/m^3 ,产生效率大于 $100 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ 的臭氧发生系统不久将获得实际应用。

2. DBD 在紫外光源和高功率 CO_2 激光器方面的应用

紫外辐射在电磁辐射波谱中的波长范围为 $400 \sim 10 \text{ nm}$.按波长不同可分为近紫外辐射(UV - A 波段, $400 \sim 320 \text{ nm}$)、中紫外辐射(UV - B 波段, $320 \sim 280 \text{ nm}$)、远紫外辐射(UV - C 波段, $280 \sim 200 \text{ nm}$)和极远紫外辐射(UV - D 波段, $200 \sim 10 \text{ nm}$)四种.波长在 200 nm 以上的辐射在大气中会被氧气吸收,大多数在真空中使用,故又称为真空紫外.随着波长的变化,紫外辐射会呈现出不同的物理特性和效应,如紫外切割、沉积、刻蚀、老化、生物效应、荧光效应、光化学效应和光电效应等等.因此紫外辐射技术在医疗卫生、工业、农牧业、环境保护、国防军事及许多科研部门的应用越来越广泛,紫外辐射光源已成为一个蓬勃发展的技术领域^[30-32].

紫外辐射是由准分子的衰变产生的.所谓准分子,实际上就是一种不稳定的分子,它在纳秒期间内就可以衰变到基态,而基态是排斥态,其激发能就以紫外和真空紫外辐射的方式释放.常见的准分子有惰性气体准分子(He_2^* 、 Ne_2^* 、 Ar_2^* 、 Kr_2^* 、 Xe_2^*)、惰性气体和卤素元素组成的双原子分子或三原子分子(ArF^* 、 KrF^* 、 XeF^* 、 XeCl^* 、 Hg_2^* 、 Hg_3^*).准分子的形成是一种三体碰撞过程(以 Xe 为例):



应用不同成分的气体,获得的波长范围也是不同的.例如 Ar_2^* 是 127 nm 、 Kr_2^* 是 147 nm 、 ArCl^* 是 175 nm 、 KrCl^* 是 222 nm 、 XeCl^* 是 308 nm .可见,通过气体成分的调整可以获得整个紫外区任何波长的紫外光源。

准分子三体碰撞一般要在高气压放电条件下形成,传统常用的激励方法是快脉冲放电和电子束放电等.这些激励方法在应用过程中出现了曝光处理作用面积小、电光转换效率低(只有 $1\% \sim 2\%$)、体积大、工作寿命短等缺点.将 DBD 技术应用于紫外光源中不但可以有效地解决这些问题,而且可以使获得的紫外辐射强度更高、均匀性更好。

DBD 紫外光源的结构同平板式臭氧发生器相类似,电介质通常采用硼硅酸盐玻璃,放电间隙通常为 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$,在原理上也是利用 DBD 的微放电特性.B. Gellert 等

人利用这一结构在充气压力为 0.1 MPa 、电源电压为 20 kV 、频率为 1 kHz 、间隙充以纯 Xe 的条件下,获得了 172 nm 的紫外辐射,其工作效率接近 10% ,谱线宽度为 14 nm ^[33].

DBD 用于高功率 CO_2 激光器的激励是其电光效应的另一重要应用.目前应用直流(DC)激励的 CO_2 激光器存在以下几个方面的问题^[34]: 由于放电的不稳定性,限制了注入功率密度的提高,一般只有 $\sim 12 \text{ W/cm}^2$; 在时间上是无法控制的,不能满足连续-脉冲运行转换的要求; 阴极溅射容易污染工作气体; 存在一个阴极位降区,在此区域内无粒子数反转; 需要占总量 $1/3 \sim 1/4$ 的镇流电阻.我们知道,在 DBD 中电极的表面需要覆盖一定厚度的电介质,由于电介质具有镇流效应,避免了放电向火花放电和弧光放电的过渡,从而使电极间的微放电均匀而强烈,不但有效地提高了功率密度,得到了更好的均匀性与稳定性,使光束输出质量得到提高,而且省去了镇流电阻,降低了能耗,提高了激光器的运行效率.同时电介质层也避免了阴极溅射污染工作气体,提高了激光器的寿命.再者,DBD 通常采用高频电源供电,因此不但使激光器的功率调制可以通过调整高频时控开关器件进行,而且减小了装置的体积,使激光器结构更加紧凑,便于应用。

近年来,用 DBD 激励的 CO_2 激光器已有许多报道,其电极结构通常用方形或圆形金属管,并覆盖一定厚度的电介质层,放电气隙为 $20 \sim 50 \text{ mm}$,电源频率为 $50 \sim 200 \text{ kHz}$.以葛本昌树等研制的 CO_2 激光器为例,它的电极结构为方形金属管,表面用 0.8 mm 厚的硼硅酸盐玻璃覆盖,管内通入去离子水以冷却阴极,放电区尺寸为 $1500 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$,气体由 $\text{CO}_2 - \text{CO} - \text{N}_2 - \text{Ne}$ 组成,混合比为 $8:4:60:28$,气体压力为 9.3 kPa ,采用 100 kHz 电源驱动,得到直径为 21 mm 最大光束的基模输出。

由于 DBD 激励大功率 CO_2 激光器具有传统 CO_2 激光器无可比拟的优点,目前已形成一种明显的发展趋势,目前存在的问题是 DBD 中的微放电是随机发生的,尽管在宏观上具有均匀性,但仍会影响其在准分子激光器中的应用,因此如何使微放电同步发生成为一个重要的课题。

3. 等离子体平板显示器

在今天人们所接触的各种便携式电子设备中,平板显示器已经成为不可缺少的关键部件.而最近出现的彩色等离子体显示器(PDP, plasma display panel)就是利用 DBD 技术实现的.它主要利用了 DBD 气体放电原理.单

色 PDP 是直接利用惰性气体放电产生可见光;彩色 PDP 则是利用气体放电激发出紫外线,紫外线照射到红、绿、蓝三色光敏荧光粉上,再产生彩色可见光。这种等离子体显示器的主要优点是:容易获得大面积显示,重量轻,体积小,视角大,一般可达 160° ;拥有比较好的图像稳定度,能够抵抗恶劣的环境;相对于液晶显示器,PDP 的制造工艺也较简单^[35]。目前彩色 PDP 在亮度、图像质量上还有很大的改进空间,驱动电路十分复杂,成本较高,但随着高新技术的不断发展和突破,PDP 在器件设计、专用生产设备、制造工艺以及规模化生产方面都将得到改进,这些问题将能得到较好的解决^[36]。

4. DBD 用于合成新物质的应用研究

臭氧的合成及其在工业规模上的应用是 DBD 技术的一个成功范例。正因为如此,许多研究者试图将它用于其他物质的合成,并希望能获得工业规模的应用。因此利用 DBD 合成新物质已成为新的研究热点之一。1974 年 Luk Yanov 等人采用 DBD 方法,在高气压下把 CO_2 和 CH_4 合成含氧的 CH 化合物醇、醛,其含量为 $1.083 \mu\text{mol}/\text{min}$ ^[37]。1987 年 Finlayson 等人也采用 DBD 方法合成了含氧的 CH 化合物醛等^[38]。1999 年 Bai Mindong 等人在 0.1 MPa 条件下,采用 DBD 强电场电离放电方法成功地把 N_2 加 H_2 合成 NH_3 ,其浓度达到 $3.795 \text{ mg}/\text{m}^3$ ^[22],还有许多研究者在这方面进行了研究,并取得一定的进展。

尽管当前的研究成果预示其进入工业应用具有一定可行性,但目前合成物质的浓度还偏低,产量还偏小,效率还不高,即使合成臭氧其效率也仅为 10% 左右,要实现工业应用还需要逐步解决三个方面的问题:一是如何在高压条件下向反应体系里的高密度气体传递足够大的能量,以满足其化学反应过程气体分子化学键断裂形成新物质所需要的活化能,从而提高合成物质的产率;二是如何大幅度提高化学反应速率,简化工艺流程以及减少化学反应条件;三是如何实现用物理参数控制其化学反应方向和反应产物,降低能耗,从而提高合成物质的效率。白希尧等人近期关于介质阻挡实现强电离放电的研究结果为解决这些问题提供了一条有效的途径^[16,39]。

5. DBD 在环境保护方面的应用研究

环境问题是影响可持续发展的重要因素。近年来, NO_x 、 SO_2 引起的酸雨、 CO_2 引起的温室效应、氟利昂等引起的臭氧层破坏已成为影响人类生存与发展的全球性问题。因此寻找能够有效解决这些问题的方法成为科

学工作者面临的一个十分严峻的课题。

石灰法是吸收烟气中 SO_2 的传统方法,但这种方法在脱除效果上并不十分理想,且会产生大量的二次污染物,因此研究者一直在努力寻找其他新的解决方法。早在 20 世纪 60 年代美国科学工作者开始了采用外加 NH_3 的高气压非平衡等离子体化学方法脱除烟气中 SO_2 的研究。20 世纪 80 年代初, Masuda 等人^[40]采用窄脉冲高电压电晕放电非平衡等离子体化学法(外加 NH_3)的烟气脱硫研究;后来又有不少科学工作者也进行了大量跟踪研究^[41-44]。但这种方法回收的是亚铵盐 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$,它在 54 $^\circ\text{C}$ 以上时是气态,无法回收,又极不稳定,增加 NH_3 新的污染^[45]。近几年来,日本学者用电子束多端照射法解决了 SO_2 氧化和回收问题,并进行了 $620 \text{ km}^3/\text{h}$ 的工业试验,但这种技术成本及运行费用相当高,而且电子束的激励会产生对人体有害的 X 射线,限制了这一技术的进一步发展。

随着利用 DBD 技术合成臭氧和紫外辐射光源技术的日益成熟,一些研究者也开始了利用 DBD 技术进行烟气的脱硝脱硫、分解有害气体及净化汽车尾气等方面的研究工作。1989 年 S. K. Dhall 等^[46]报道了采用与合成臭氧相仿的装置在 60 Hz、15 kV 放电条件下脱出 SO_2 的效率达 44%;1991 年报道了利用 DBD 处理 SO_2 的效率超过 75%,并进行了数值模拟^[47];同年 Moo Been Chang 等人^[48]报道了利用 DBD 并结合紫外照射技术在模拟烟气条件下同时脱除 SO_2 的效率高于 80%;1992 年 Manabu Higashi 等人^[49]利用 DBD 与动态喷油的协同作用在柴油机上同时实现了 SO_2 脱除率为 70%、 NO_x 的脱除率为 20%、烟尘脱除率几乎为 100% 的效果;1993 年 Moo Been Chang 等人^[50]又报道了利用相同方法同时脱除 SO_2 和 NO 的效率分别达到了 29% 和 79%;1997 年高泰荫等人^[51]报道了在无声电场作用下碳烟氧化率大于 54%;1998 年 Hans R. Snyder 等^[52]报道了利用 DBD 对氯苯分解的研究结果;同年侯键等报道了在常压条件下利用 DBD 降解 CF_2ClBr 的研究,在 CF_2ClBr 体积分数为 0.6% 的空气放电 10 s 的条件下,达到了 95% 的降解率;2001 年 Zhitao Zhang 等人^[53]报道了利用 DBD 脱出 SO_2 时铵盐回收达到了 88%。

尽管 DBD 法进行烟气的脱硝脱硫、分解有害气体及净化汽车尾气还处于研究阶段,但由于 DBD 可以在大气压条件下实现强电离放电,可以将放电能量直接作用于有害气体,因此具有很好的发展前景。

此外,臭氧、臭氧水及紫外辐射技术可以广泛应用于各个行业的消毒灭菌、污水处理等方面,并已取得了

很好的应用效果,它实际是 DBD 技术的间接应用。

五、结束语

可以看出,近 20 年来 DBD 及其应用技术研究取得了飞速发展,正是由于 DBD 可以在大气压或高于大气压条件下实现大体积宏观均匀而强烈的微放电,使 DBD 技术可广泛应用于等离子体化学、紫外光源、环境工程、高功率气体激光器等许多领域,具有深远的发展前景。

尽管对 DBD 的宏观放电特性及应用研究取得了一定的进展,但对于其微观放电形成机理、气体间的相互作用机理及其动力学过程还缺乏了解,还缺乏有效的 DBD 等离子体诊断方法,对电介质的材料特性、DBD 的结构特性、电源的供电特性及其相互作用的研究还有待深入。一旦在理论、诊断及相互作用机理上有所突破,必将推动 DBD 在工业领域的应用,具有重大的实用价值及科学研究价值。

(2002 年 4 月 8 日收到)

王 燕 研究生,大连海事大学环境工程研究所,大连 116026

赵艳辉 研究生,大连海事大学环境工程研究所,大连 116026

白希尧 教授,大连海事大学环境工程研究所,大连 116026

张芝涛 副教授,大连海事大学环境工程研究所,大连 116026

- 1 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科发展战略研究报告之十四: 等离子体物理学. 科技导报, 1994; (5): 16-19
- 2 马振国. 等离子体工业的崛起与发展. 科技导报, 1995; (2): 14-17
- 3 Kunhardt E. E. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000; **28**(1): 189-199
- 4 Blaich L., Friedrich M., Shadi Akhy A. H. *Ozone Science and Engineering*, 203-216
- 5 Eliasson B., Kogelschatz U. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991; **19**(2): 309-323
- 6 Kogelschatz U. *XVI Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XVI)*, Germany: Düsseldorf, 1983: 240-250
- 7 Kogelschatz U. *Process Technologies for Water Treatment*. New York and London: S. Stucki, 1988: 87-120
- 8 徐传骧, 刘辅宜. 电气电子教学学报, 2000; (4): 14-16
- 9 张芝涛等. 电力电子技术, 2001; **35**(5): 10
- 10 Ohe K., Kamiya K., Kimura T. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999; **27**(6): 1582-1587
- 11 Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987; **20**: 1421-1437
- 12 D'áz R., Menéndez D., Tabares F. *Ozone Science and Engineering*, 2001; **23**: 171-176
- 13 张芝涛等. 环境科学, 2001; **22**(2): 126
- 14 白希尧等. 物理, 2000; **29**(10): 615-619
- 15 白敏斌等. 核聚变与等离子体物理, 2001; **21**(3): 183
- 16 白希尧等. 自然杂志, 2000; **22**(3): 156-160
- 17 凌一明, 许一波等. 中国激光, 2000; **27**(5): 385-38
- 18 Kim H. H., Wu C. et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*,

- 2001; **37**(2): 480-487
- 19 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 309-335
- 20 徐学基, 王伟奉. 复旦学报, 1995; **34**(1): 78-86
- 21 Pashaie B., Sankaranarayanan R., Dhali S. K. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999; **27**(1): 22-23
- 22 Massines F., Rabehi A. et al. *J. Appl. Phys.*, 1998; **83**(6): 2950-2957
- 23 Punset M. C. et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999; **27**(1): 20-21
- 24 Kunhardt E. E. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000; **28**(1): 189-199
- 25 Bai Mindong, Zhang Zhitao. *IEEE Industry Applications Conference 36th IAS Annual Meeting*, 2001
- 26 白希尧等. 自然杂志, 2000; **22**(6): 347-354
- 27 白希尧等. 中国环境科学, 2000; **20**(4): 309-312
- 28 宗官功. エネルギー 资源, 1999; **20**(5): 26-28
- 29 山本克治, 设乐和弘, 濂宏树. 石川岛播磨岛报, 1996; **26**(3): 153-158
- 30 孙鼎文. 现代计量测试, 1999; (3): 12-16
- 31 孙鼎文. 现代计量测试, 1999; (4): 7-10
- 32 刘榴娣等. 光学技术, 1998; (2): 87-90
- 33 Gellert B., Kogelschatz U. *Appl. Phys. B*, 1991; **B52**(1): 14-21
- 34 丘军林. 中国激光, 1994; **A21**(5): 377-381
- 35 郭宝峰等. 西安电子科技大学学报, 1996; **3**(26)
- 36 周玉滨, 孙智峰. 息技信术, 2000; (4): 42-43
- 37 Luk 'yanov V. B., Eremeev A. P., Nesmeyanov A. N. *Russian. J. of Phys. Chem.*, 1974; **48**(4): 531-533
- 38 Finlayson D., Geoffrey J. *US Patent*, 1987; (1): 986-885
- 39 白希尧等. 科学通报, 2002; **47**(1)
- 40 Masuda S. *Pure Appl. Chem.*, 1988; **60**(5): 727-731
- 41 Mok Y. S., Ham S. W., Nam I. S. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1998; **18**(4): 535-550
- 42 Van Veldhuizen E. M., Zhou L. M., Rutgers W. R. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1998; **18**(1): 91-111
- 43 刘书海. 环境科学, 1996; **17**(2): 86-89
- 44 朱爱民, 宫为民等. 中国环境科学, 1997; **17**(1): 37-40
- 45 白希尧, 冷宏等. 工业安全与防尘, 1998; (7): 28-31
- 46 Dhall S. K., Sardja. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1989
- 47 Dhall S. K., Sardja. *J. Appl. Phys.* 1991; **69**(9): 6319-6324
- 48 Chang M. B. et al. *J. Appl. Phys.* 1991; **69**(8): 4409-4417
- 49 Higashi M. et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1992; **20**(1): 1-11
- 50 Chang M. B. et al. *Journal of Environmental Engineering*, 1993; **119**: 414-423
- 51 高泰荫等. 东北大学学报, 1997; **18**(1): 86-89
- 52 Snyder H. R., Anderson G. K. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998; **26**(6): 1695-1699
- 53 Zhang Zhitao et al. *Proceedings of the 2001 IEEE Industry Applications Conference 36th IAS Annual Meeting*, 2001

DBD Plasma and the Development of Its Application

Wang Yan, Zhao Yan-hui, Bai Xi-yao, Zhang Zhi-tao

Graduate Student, Dalian Maritime University, Dalian 116026

Professor, Dalian Maritime University, Dalian 116026

Associate Professor, Dalian Maritime University, Dalian 116026

Key words dielectric barrier discharge, plasma