

# 氩气含量对空气介质阻挡放电发射光谱的影响

兰宇丹<sup>1</sup>, 何立明<sup>1</sup>, 丁伟<sup>1</sup>, 杜宏亮<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 俞健<sup>2</sup>

1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038

2. 中海油田服务有限公司, 河北 三河 065200

**摘要** 利用介质阻挡放电实验系统测量了空气介质阻挡放电的发射光谱, 研究了氩气含量对空气介质阻挡放电发射光谱的影响。在 280~500 nm 波长范围内, 发现了氮分子第二正带系  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$  的谱线和氮分子离子的第一负带系  $N_2^+(B^3\Sigma_u^-X^2\Sigma_g^+)$  的谱线。在相同条件下加入 10% 氩气后, 起始放电电压由 26 kV 降低到 23 kV, 介质阻挡放电和发射光谱强度都增强, 谱线的半宽明显加大。随氩气含量的增加, 各个氮分子第二正带系谱线强度的变化趋势不同, 而两条氮分子离子第一负带系谱线 391.44 和 427.81 nm 的光谱强度都是降低的。

**关键词** 介质阻挡放电; 氩气; 光谱; Stark 加宽

中图分类号: O461.2; O433.4 文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-0898-04

## 引言

介质阻挡放电是指将绝缘介质插入放电空间的一种气体放电, 可以在大气压或高于大气压的条件下产生等离子体, 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, 产生特殊的光、热、声、电等物理过程及化学过程<sup>[1]</sup>, 可用作等离子体助燃激励器, 促进燃料与空气的掺混, 增加火焰传播速度, 增强燃烧稳定性和提高燃烧效率, 扩大点火范围、降低排气污染。

介质阻挡放电依据放电气体的气压和放电间隙的乘积  $pd$  值的大小, 放电呈现弥散模式和丝状模式, 当  $pd$  值较高时放电为丝状模式, 放电持续时间短、不均匀, 无法为等离子体助燃提供高密度、均匀分布的活性粒子, 因此均匀、稳定的辉光放电模式成了等离子体助燃研究的热点。

本文等离子体助燃激励器放电光谱实验中采用双介质层平行板结构, 测量了纯空气和氩气/空气混合气介质阻挡放电发射光谱, 研究了氩气含量对空气介质阻挡放电发射光谱的影响, 有助于优化等离子体助燃介质阻挡放电, 为等离子体助燃的实际应用奠定基础。

## 1 实验设备

等离子体助燃激励器放电实验测试系统如图 1 所示, 等

离子体电源的输出电压、放电电流测量分别采用 Tektronix 公司的高压探针 P6015A 和 T CPA300+ T CP312 电流组合探针测得, 使用 Tektronix 公司的数字示波器 DPO4014 记录, 同时使用 Canon 数码相机拍照。光谱测量采用 Ocean Optics 公司生产的四通道 CCD 光谱仪, 发射光谱测试系统包括光谱仪、光纤和计算机数据采集系统。

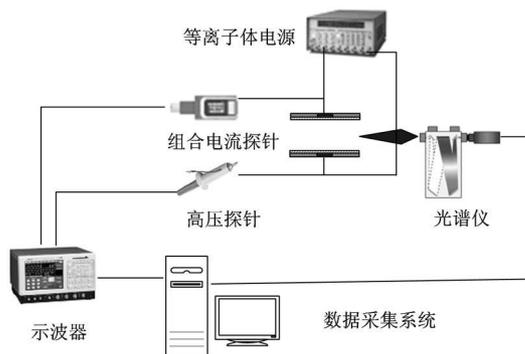


Fig 1 Experiment system of plasma assisted combustion actuator discharge

使用毫秒脉冲等离子体电源 CTP-2000K 进行大间距介质阻挡放电实验, 驱动电压幅值为 27 kV, 频率为 10 kHz。实验以上下一组电极构成的等离子体激励器为研究对象, 电极采用条形结构, 主要参数包括电极长度  $L$  (40 mm), 电极宽度  $d$  (5 mm), 电极头部圆角直径  $D$  (5 mm), 电极厚度  $h$

收稿日期: 2010-06-12, 修订日期: 2010-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776100)和国家(863计划)项目(2008AAJ125)资助

作者简介: 兰宇丹, 1983年生, 空军工程大学工程学院博士研究生, e-mail: lanyudan198305@163.com

(0.018 mm), 绝缘介质介电常数  $\epsilon(3.5)$ , 绝缘硅胶厚度  $h_1(4\text{ mm})$ , 绝缘介质材料为厚 1 mm 的聚四氟乙烯基板。等离子体助燃激励器水平安装在实验台上, 气体放电在两块电极间产生, 可观察到介质阻挡放电。由于等离子体助燃所需的激励电压较大, 而且电极位于电介质外侧, 会在高压电极侧面起晕, 产生沿面放电, 只要电极边缘存在一点空气就会起晕, 甚至形成电弧, 因此将电极表面均匀覆盖一层硅胶涂层, 可更有效的阻碍沿面放电。

## 2 实验结果

### 2.1 空气和空气/氩气混合气光谱强度的对比

在静止的空气中, 放电间隙距离为 10 mm, 驱动电压频率为 10 kHz, 设定 CCD 四通道光谱仪的积分时间为 1 000 ms, 使用纯空气进行介质阻挡放电实验, 实验获得了 280~500 nm 范围内的空气发射光谱如图 2 所示。

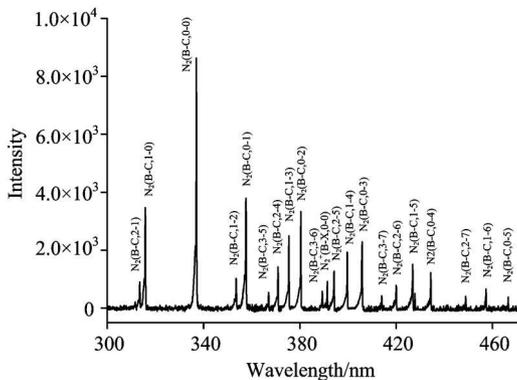


Fig 2 Emission spectra of dielectric barrier discharge in pure air

图 2 中可以看到氮分子第二正带系  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$  的谱线和氮分子离子的第一负带系  $N_2^+(B^3\Sigma_u^+-X^2\Sigma_g^+)$  的谱线, 但是没有发现 N 原子、O 原子谱线、氮气第一正带系  $N_2(B^3\Pi_u-A^3\Sigma_u^+)$  和  $N_2(A^3\Sigma_u^+-X^1\Sigma_g^+)$  和谱线以及氧分子的谱带  $O_2(b^1\Sigma_g^+-X^3\Sigma_g^-)$  和  $O_2(a^1\Delta_g-X^3\Sigma_g^-)$  的谱线。没有发现 N 原子、O 原子谱线是由于解离出的这两种原子寿命短, 很快便复合成  $N_2$  分子, 而氮气第一正带系和氧分子激发态通过发射光谱和碰撞与其他物种交换能量而弛豫, 所以它们有可能在很短的时间内通过与粒子数浓度很大的  $N_2$  分子和  $O_2$  分子的碰撞而猝灭<sup>[2, 3]</sup>。

图 3 为使用空气/氩气混合气进行介质阻挡放电的发射光谱。可以看出, 加入约 10% 的氩气后, 介质阻挡放电的氮分子发射光谱强度明显增强。在纯空气中即使加入少量的氩气, 也可以大幅降低等离子体助燃激励器介质阻挡放电的起始放电电压。在纯空气中, 等离子体助燃激励器介质阻挡放电的起始放电电压为 26 kV, 而在加入 10% 的氩气后, 起始放电电压降为 23 kV。在空气加入氩气后, 氩原子的两个亚稳态可以通过潘宁电离的作用, 使氮分子  $C^3\Pi_u$  激发态粒子数浓度增加, 从而引起氮分子的发射谱线强度的变化。

337.13 谱线的对比图。可以看出, 加入 10% 氩气后介质阻挡放电的发射光谱强度增强, 谱线的半宽增加。由于包括大气压力和环境温度等实验放电条件相同, 所以碰撞效应、多普勒效应和仪器效应的影响不大, 谱线的半宽度增大是因为 Stark 效应。由于 Stark 效应对谱线半宽度与电子数浓度成正比<sup>[4]</sup>, 所以在空气加入约 10% 氩气后, 介质阻挡放电等离子体中的电子数浓度增加。由于放电间隙约化场强不变, 碰撞产生激发态分子的反应速率系数与电子数浓度有关, 所以随着电子数浓度的增加, 电子分子碰撞产生激发分子的反应速率增加, 激发态分子的粒子数浓度增加, 所以激发态分子退激发时的发射光谱强度增强。

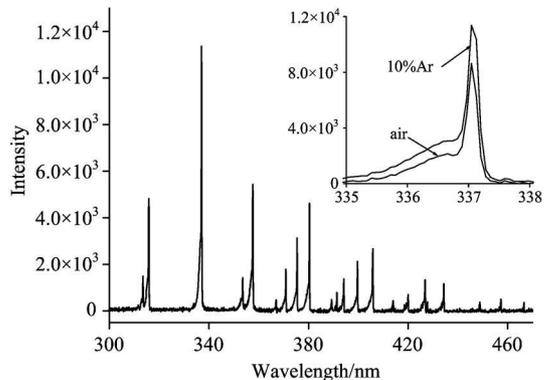


Fig 3 Emission spectra of dielectric barrier discharge in 90% air+ 10% Ar

### 2.2 氩气含量对氮分子第二正带系发射光谱强度的影响

在等离子体助燃激励器介质阻挡放电中氮分子第二正带系的各谱线强度随氩气含量的变化如图 4 所示。

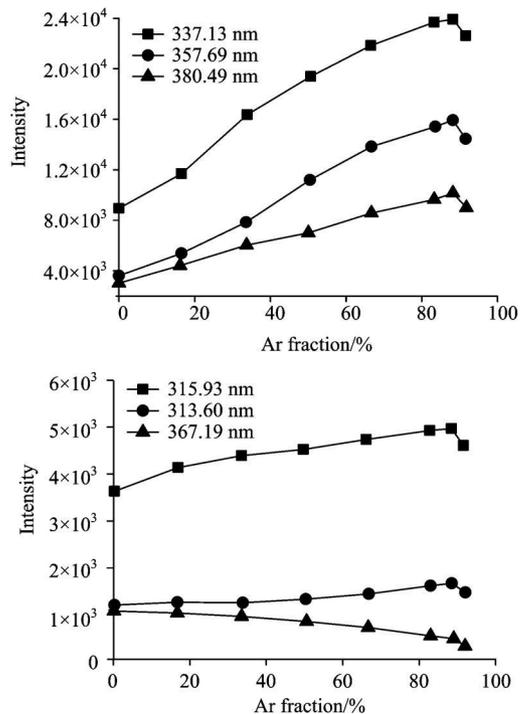


Fig 4 Spectra intensity of the second positive band system of nitrogen molecule changes with Ar fraction

图 3 中右上图为实验得到的氮分子第二正带系的

从图中可以看出,随着氩气含量的增大,氮分子第二正带系中 337.13, 357.69 和 380.49 nm 的谱线强度随氩气含量的增加而快速增加,然后在混合气中氩气达到约 88% 后,由于氮分子粒子数浓度的降低而使得发射光谱强度又迅速降低;而 315.93 nm 谱线的强度与上述三种谱线变化趋势一致,但变化比较缓慢;氮分子第二正带系中的 313.60 nm 谱线,其谱线强度随氩气含量变化不大,只是在空气含量很少后,其强度迅速降低;367.19 nm 谱线强度随氩气含量的升高则是逐步降低的。

由于潘宁电离的作用,在空气加入氩气后,放电发射光谱强度增加,且随着氩气含量的增加,潘宁电离作用更加明显。由于氩气含量的增加会造成氮气含量的降低,氮分子发射光谱强度又有下降的趋势,所以氮分子发射光谱强度会有一个最大值,而且氩气亚稳态对氮分子激发态的增强作用是有选择性的。

### 2.3 氩气含量对氮分子离子第一负带系发射光谱强度的影响

等离子体助燃激励器介质阻挡放电中氮分子离子第一负带系的两条谱线强度随氩气含量的变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,随着氩气含量的增加,氮分子离子第一负带系的两条谱线 391.44 和 427.81 nm 的谱线强度都是降低的,其中波长为 427.81 nm 谱线的强度很快就降到探测不到,被其他杂波所覆盖。这是由于随着氩气含量的增加,混合气中氮气含量降低,而且亚稳态的氩原子可能通过  $N_2^+ + Ar^* \rightarrow N_2 + Ar^+$  对氮分子离子的产生有猝灭作用,通

过电荷转移将氮分子离子转化成氮分子。

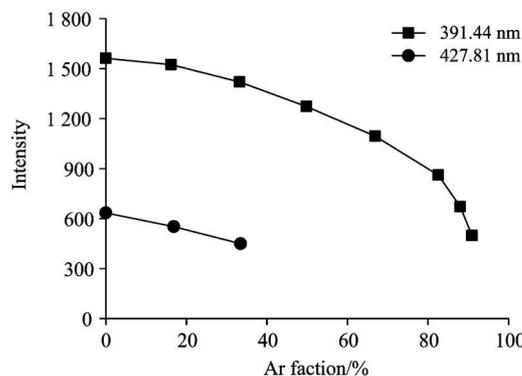


Fig 5 Spectra intensity of the first negative band system of nitrogen ion changes with Ar fraction

## 3 结论

测量了加入氩气对空气介质阻挡放电发射光谱强度的影响,在 300~500 nm 波长范围内,发现了氮分子第二正带系  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$  的谱线和氮分子离子的第一负带系  $N_2^+(B^3\Sigma_u^+-X^2\Sigma_g^-)$  的谱线。在相同激励电压条件下加入 10% 氩气后,起始放电电压由 26 kV 降低到 23 kV,介质阻挡放电和发射光谱强度都增强,谱线的半宽明显加大。随氩气含量的增加,氮分子第二正带系的各个振动态谱线的变化趋势不同,而氮分子离子第一负带系的两条谱线 391.44 和 427.81 nm 的谱线强度都是降低的。

## References

- [1] LIU Yong, HE Xiang-ning, MA Fei (刘勇,何湘宁,马飞). High Voltage Engineering (高电压技术), 2005, 31(6): 55.
- [2] Guerra V, Sa P A, Loureiro J. J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34: 1745.
- [3] Capitelli M, Ferreira C M, Gordiets B F, et al. Plasma Kinetics in Atmosphere Gases. Berlin: Springer Verlag, 2000.
- [4] Mintousov E I, Pancheshnyi S V, Starikovskii A Yu, et al. Propane-Air Flame Control by Non-Equilibrium Low-Temperature Pulsed Nanosecond Barrier Discharge. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004, AIAA 2004.

# The Influence of Argon Fraction on the Emission Spectroscopy of Air Dielectric Barrier Discharge

LAN Yudan<sup>1</sup>, HE Liming<sup>1</sup>, DING Wei<sup>1</sup>, DU Hong-liang<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, YU Jian<sup>2</sup>

1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

2. China Oilfield Services Limited, Sanhe 065200, China

**Abstract** The emission spectra of air dielectric barrier discharge were measured through dielectric barrier discharge experiment system, and the influence of argon fraction on the emission spectra of air dielectric barrier discharge was studied in the present paper. In the wavelength range of 280~500 nm, the second positive band system of nitrogen  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$  and the first negative band system of nitrogen ion  $N_2^+(B^3\Sigma_u^+-X^2\Sigma_g^-)$  were found. Adding 10% argon under the same conditions, initial discharge voltage reduced from 26 to 23 kV, both dielectric barrier discharge and its emission spectra intensity were enhanced, and the full width at half maximum increased. With increasing argon fraction, the trends of each nitrogen second positive band system line were different and two nitrogen ion first negative band system lines (391.44 and 427.81 nm) were reduced.

**Keywords** Dielectric barrier discharge; Argon; Spectroscopy; Stark broadening

(Received Jun. 12, 2010; accepted Sep. 16, 2010)

## 《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行,从2004年起为月刊,大16开本,2011年仍为月刊,每期288页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

### 栏目设置和要求

- 1 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以8000字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。
- 2 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过5000字。
- 3 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过10000字。
- 4 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过5000字。
- 5 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以3000~4000字为宜。

### 稿件要求

- 1 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。
- 2 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以300字为宜,英文摘要以2000字符(相当于300个英文单词)为宜;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。
- 3 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊在2007年7月1日以后,不再接收以邮寄方式或e-mail方式的投稿,只收网上在线投稿。严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。
- 4 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用6号字(另请备一份合格的图附在文章的后边)。
- 5 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关GB标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。
- 6 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。
- 7 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以15~20条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。
- 8 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个e-mail,以便及时联系。

### 稿件处理

- 1 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在30天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。
- 2 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。
- 3 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊1册,本人文章1份当期封面及6份抽页。
- 4 遵照“中华人民共和国著作权法”,投稿作者须明确表示,该版权(含各种媒体的版权)授权给光谱学与光谱分析期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。
- 5 修改稿请寄:100081北京市海淀区学院南路76号,光谱学与光谱分析期刊社(收)

电话:010-62182998 或 62181070

传真:010-62181070

e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com;

修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com

网址: http://www.gpxygpfx.com