

常压微波等离子体炬装置的研究及应用进展

刘 繁^{1,2}, 翁 俊², 孙 祁², 汪建华², 王秋良¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080;

2. 武汉工程大学材料科学与工程学院 等离子体化学与新材料重点实验室, 武汉 430073)

摘要:常压微波等离子体炬有着优异的性能,具有广泛的应用前景,常压微波等离子体炬装置的研究受到研究人员和工业界的广泛关注。文章对常压微波等离子体炬的性质、装置及应用等方面的研究成果进行了简要概述,着重阐述了常压微波等离子体炬装置的基本原理,对各种装置的优、缺点进行了分析。最后详细讨论了常压微波等离子体炬装置的应用和今后研究方向。

关键词:常压;微波等离子体炬;装置;应用

中图分类号:O539

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2016)01-0001-05

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2016.01.001

RESEARCH AND APPLICATION OF ATMOSPHERIC PRESSURE MICROWAVE PLASMA TORCH DEVICE

LIU Fan^{1,2}, WENG Jun², SUN Qi², WANG Jian-hua², WANG Qiu-liang¹

(1. Institute of electrical engineering chinese academy of sciences, Beijing 100080, China;

2. Province Key Lab of Plasma Chemistry and Advanced Materials, School of Material Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: Atmospheric pressure microwave plasma torch has excellent performance and a wide application prospect, the study of atmospheric pressure microwave plasma torch device received extensive attention of the researchers and industry. In this paper, the nature, installation and application of the atmospheric pressure microwave plasma torch, were explained briefly. The basic principle of atmospheric pressure microwave plasma torch device was emphatically elaborated, and the advantages and disadvantages of various devices were analyzed. Finally, the application of atmospheric pressure microwave plasma torch device and the research direction in the future were discussed in detail.

Key words: atmospheric pressure; microwave plasma torch; device; application

0 引言

常压等离子体炬具有较高的电子密度和温度,设备成本低、操作简单、不需要昂贵的真空设备等优点^[1-2],自1933年Engel等^[3]首次在常压下利用氢气和空气放电激发以来,常压等离子体炬在材料、环保等领域有着极其广阔的应用前景^[4]。然而直流辉光放电等离子体炬是有极放电,并且密度和电离度都较低,使其应用范围受到了一定的限制。而随之发展的射频等离子体炬虽然是无极放电,解决了内部电极污染的问题,但其密度和电离度仍较低。随着微波等离子体技术的不断发展,常压微波等离子

体炬因其具有更高的能量利用率、没有高电压鞘层及其伴随的离子壁溅射等优点,越来越接近和满足工业生产和实际应用要求。

1 常压微波等离子体炬装置

微波放电是在高频电磁场的作用下将气体激发而产生等离子体。活性强、激发的亚稳态原子多是微波等离子体的特点^[5]。常压微波等离子体炬是将电磁场能量传输并压缩到喷嘴处激发产生,喷嘴处的电场强度对激发等离子体炬起着至关重要的作用,因此,增强喷嘴处电场强度是不同结构常压微波等离子体炬装置的优化及设计的基础依据之

收稿日期:2015-11-30

基金项目:湖北省教育厅项目(Q20151517)

作者简介:刘繁(1983-),女,湖北仙桃人,讲师,从事微波电磁场的计算模拟及等离子体应用领域研究。E-mail:liufan9441@163.com。

一。自从对常压微波等离子体炬进行研究以来,到目前已经开发出很多种激发常压微波等离子体炬的装置,根据装置的结构特点,可将微波等离子体炬装置分为两类:对矩形波导进行特殊设计的装置和采用特殊喷嘴结构的装置。

1.1 特殊矩形波导的常压微波等离子体炬装置

常压微波等离子体炬矩形波导腔装置的研制过程中,常采用压缩矩形波导窄边尺寸的方式来达到增加喷嘴处电场强度的目的,常见的窄边压缩方式有渐变式压缩和阶梯式压缩两种。

图 1 为韩国亚洲大学 Hong 等^[6-7]设计的一套常压微波等离子体炬装置及等离子体炬的激发示意图。该系统主要 2.45 GHz 的微波等离子体炬和由质量流量控制器控制的气路两部分组成。型号为 SM745 的 Richardson 磁控管提供的微波能经环形器,在矩形波导内以 TE_{10} 模式传输,并由三螺钉调节阻抗,同时此装置采用阶梯型矩形波导来对窄边进行压缩的方式,使位于谐振腔短路面 $\lambda g/4$ 处的驻波位置的电场强度增强,来达到激发等离子体炬的目的。实验放电过程中,输入的微波功率为 1 000 W,而反射功率几乎为 0 W。Hong 等在此装置上进行了微波等离子体炬及碳氢燃料火焰的性能研究工作,发现碳氢燃料燃烧的火焰体积是等离子体炬的 30 ~ 50 倍。

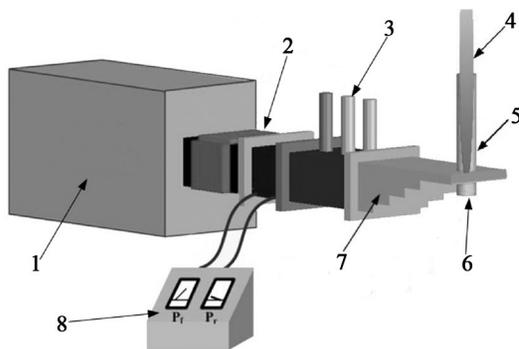


图 1 阶梯型矩形波导常压微波等离子体炬装置图

1.微波源;2.环形器;3.三螺钉阻抗调配器;4.等离子体炬;5.石英管;6.气路;7.阶梯波导;8.能量监测仪

理论计算及实验研究中发现,压缩窄边能够达到增强喷嘴处电场强度的目的,因此研究者设计了多种不同的结构压缩方式。图 2 为日本爱之工业大学设计的压缩矩形波导常压微波等离子体炬装置示意图^[8],其特点是渐变式波导从图两个窄边面同时向波导中心压缩。频率为 2.45 GHz 的磁控管将 1 kW 的微波能量通过能量耦合器输出到微波传输系统,同时选用 E-H 阻抗调配器和短路活塞对整个

系统进行阻抗调节,最终在喷嘴尖端激发出等离子体炬。与韩国亚洲大学的等离子体炬装置相比,其渐缩式矩形波导由五个渐变的台阶代替了单一的斜面,完成波导截面从宽到窄的过渡。Takamura 等^[8]在此装置上进行了氩/氮微波等离子体炬的形成以及衰减过程的机理研究,发现微波等离子体炬的衰减速度受到气体湍流流速和复合率的影响。美国麻省理工学院(MIT)等离子体科学与核聚变中心同样也采用同时压缩矩形波导窄边的方式设计出 1 台常压微波等离子体炬装置,并利用此装置来进行了监测环境中金属元素的研究工作。

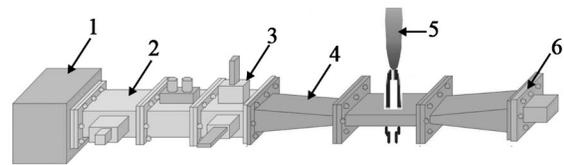


图 2 压缩波导式常压微波等离子体炬装置图

1.微波源;2.环形器;3.E-H 阻抗调配器;4.压缩波导;5.等离子体炬;6.短路活塞

1.2 特殊喷嘴结构的常压微波等离子体装置

除了对矩形波导结构进行优化以外,科研工作者常选取对常压微波等离子体装置内的喷嘴结构进行改进来达到增强喷嘴处电场强度的目的。

英国利物浦大学 Al-Shamma'a 等^[9]通过对常压微波等离子体炬装置的矩形谐振腔内喷嘴结构进行优化设计来增强等离子体炬。图 3 为研制的具有特殊阶梯型喷嘴结构的常压微波等离子体炬装置的结构示意图。

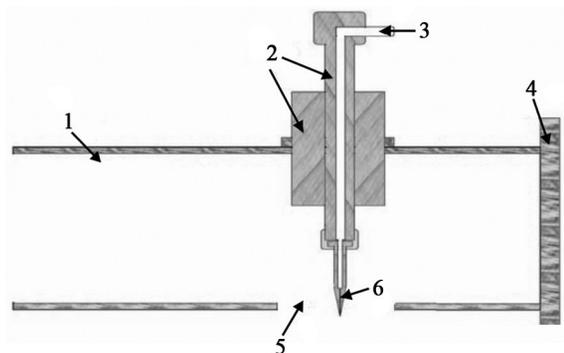


图 3 利物浦大学常压微波等离子体炬装置结构图

1.矩形波导;2.调节螺母;3.气路;4.短路活塞;5.波导孔;6.喷嘴

目前投入使用的微波等离子体炬系统主要有 3 套,分别为用于切割和减少汽车尾气排放实验的功率为 1 kW、频率 2.45 GHz 的等离子体炬装置,用于高温测试的功率 6 kW、频率 2.45 GHz 的等离子体炬装置,以及用于切割、焊接的功率 10 kW、频率

896 MHz的等离子体炬装置。这种渐缩式喷嘴可以解释为数个台阶的特殊梯形波导结构,在最后一级台阶,即波导窄边压缩最大处插入喷嘴,可击穿气体产生等离子体炬。

渐变式喷嘴常压微波等离子体炬装置的基本原理:可长时间连续工作的磁控管将直流电场中取得的直流能量最大限度的转换成微波能量,并通过能量耦合器输出到微波传输系统。微波经过环形器和波导管,在三螺钉阻抗调配器和波导短路活塞的调节下,最大限度的耦合到矩形谐振腔内,并在喷嘴尖端处激发微波等离子体炬。

图4为湖北省等离子体化学与新材料重点实验室研制的具有特殊渐变过渡喷嘴结构的常压微波等离子体炬装置示意图。该装置与一般的微波等离子体激发装置一致,主要由微波功率和总控制系统、微波传输系统、微波反应器及附属系统和多参数测控系统四部分组成^[10]。功率1 kW,工作频率2.45 GHz的微波将微波能量以主模 TE_{10} 模式通过WR340矩形波导传输到等离子体耦合腔中,在腔体电场最强处插入喷嘴,激发出常压微波等离子体炬。



图4 阶梯喷嘴结构的常压微波等离子体装置实物图

图5为常压微波等离子体装置的喷嘴结构示意图。喷嘴的作用是最大限度的将微波能量耦合到矩形谐振腔腔中,并尽量减小反射。喷嘴由三个独立的部分构成。喷嘴底部为一个焊接在波导腔壁上的圆台形结构,喷嘴中间部分的下半段为一圆柱形结构,上半段为一圆台形结构,喷嘴的顶部也为一圆台形结构。除了底部固定在波导壁上,喷嘴的中间部分和顶部可以任意调进和调出。分别对喷嘴各部分的长度进行调节使喷嘴长度达到理想值,同时从喷嘴的另一端通入工作气体,微波等离子体炬很容易就会被激发出来。

2 常压微波等离子体炬的应用

由于常压微波等离子体炬自身独特的优势,使得微波等离子体炬被广泛的应用于材料制备、医

疗、军事、废气处理等许多领域,特别是目前在广受关注的能源及环境领域,常压微波等离子体炬具有不可替代的地位。

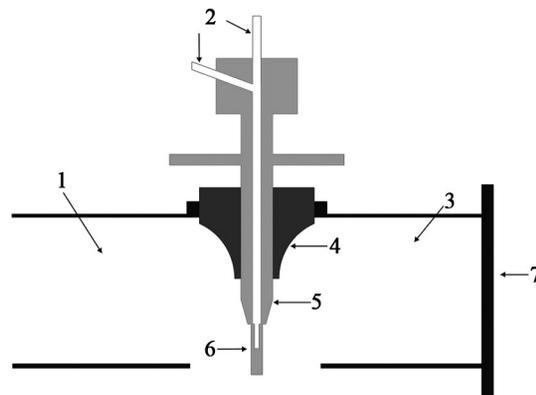


图5 常压微波等离子体装置阶梯喷嘴结构示意图

1. 矩形波导; 2. 气路; 3. 谐振腔; 4. 喷嘴底部; 5. 喷嘴中部;
6. 喷嘴尖端; 7. 短路活塞

2.1 等离子体光谱诊断及分析

早在1958年,就有学者把微波耦合等离子体用于光谱化学分析。等离子体中存在大量的带电粒子,粒子之间相互作用辐射出的电磁波频率范围较广,等离子体诊断的重要一点就是对这些辐射进行测量,并通过图像获得重要参数,如:电子和离子的温度与密度、等离子体的成分与分布、电磁场的时间和空间分布以及各种不稳定性等^[11-13]。

目前普遍使用的感应耦合等离子体(ICP)光谱源需要在高真空下,同时配备大功率电源及耦合线圈进行工作,此种设备不适合野外便携式检测操作^[14]。微波等离子体炬元素光谱分析法具有电容耦合微波等离子体(CMP)和微波诱导等离子体(MIP)所不具备的一系列优势,如:可用He作为工作气体来测定包括卤族元素在内的几乎所有元素,操作简单、仪器成本低及避免等离子体污染等。随着微波能应用的不断深入,微波等离子体炬不仅用于原子光谱分析,还应用于质谱法的离子化源、气相色谱、离子色谱、超临界流体色谱的检测器等。

Attila等^[15]设计了一台基底材料是蓝宝石的常压微波等离子体源。装置利用微带传输线在狭缝间产生等离子体,运行过程中He的流量控制在50~1 000 ml/min。该等离子体源可对非金属如卤族、硫族元素的特征谱进行检测分析,其灵敏度高且便于携带。辽宁石油化工大学的李丽华等^[16]采用微波等离子体炬原子发射光谱法(MPT-AES)测定了钢中镍、铬的含量,测定过程简单、快速,测定结果与国家标准方法测定结果吻合。

2.2 等离子体表面改性技术

等离子体表面处理技术作为一种新兴的改性手段,具有无污染、快速、经济、高效的改变各种材料的表面性能^[17]等优点,在材料的表面改性处理方法上有着巨大的优势和潜能,被广泛应用于高分子材料和金属材料等固体的表面改性。等离子体表面处理技术本质上是通过激发气体形成的等离子体与材料表面进行相互作用,让材料表面获得某些物理或化学性能,例如光电性能、气密性、疏水性、亲水性及材料稳定性等^[18-19]。

用于材料加工的常压微波等离子体炬通常属于局部非平衡等离子体。利物浦大学的 Ahmed 等^[20]设计了基于矩形波导的 2.45 GHz 低成本常压微波等离子体炬反应器,在选择合适的微波功率、气体类型及流量等工艺参数情况下,可以利用等离子体进行焊接、切割、加工石英和陶瓷等。另外对亲水性改性的研究和应用也十分普遍,如纺织品的亲水性改性以提高印染性能,金属表面亲水性的提高有利于附着力的提高。Dong 等^[21]通过提高微波处理频率和功率可以降低铝金属表面的接触角。实验结果表明,接触角可从 72.35° 减小到 36.47°。亲水性的提高有利于金属表面油漆涂层的黏附力的提高,同时通过对材料进行改性可使其适应复杂的工作环境,提高材料使用寿命。

2.3 材料制备与合成

常压微波等离子体技术在材料的制备与合成方面应用最为广泛,尤其是在纳米材料及薄膜的制备领域。在纳米材料的制备方面,常压微波等离子体炬能制备单晶类聚四氟乙烯纳米管^[22]、纳米铝粉^[23]、纳米 V_2O_5 ^[24],具有可见光催化性的单分散纳米 TiO_2 ^[25] 等纳米级的高纯颗粒。如韩国亚洲大学 Dong 等在 $O_2/Ar/H_2$ 气氛下利用常压微波等离子体炬进行了分解气相 $VOCl_3$ 制备纳米级五氧化二钒粉末的研究。Jašek 等^[26]利用常压微波等离子体炬在硅衬底上合成了长为 50 μm 、直径为 15 nm 的碳纳米管。

在薄膜材料的制备方面,陈飞等^[27]利用常压微波等离子体枪在钛合金表面成功的制备了一层厚度为 1.0 μm 的类金刚石膜。林江等^[28]以氮气为载气,在四乙氧基硅烷的硅基底上沉积了一层平整致密的氧化硅薄膜。

2.4 废物处理与环境保护

随着社会的进步,低碳经济绿色环境已经成为一种共识,常压微波等离子体炬技术因其独特优势在废气处理、污水处理及固体废物处理等方面受到

了广泛关注与研究,并显示出了广阔的应用前景。

常压等离子体炬高温热解炉处理垃圾在持续的研究和应用中逐渐趋于成熟,对城市生活垃圾和工业垃圾有广泛的适用性^[29-31]。上世纪 90 年代,该项技术仅被用于一些公司如威尔顿的 Startech 环境公司和美国 Westinghouse 公司处理垃圾,随后日本 Eco Valley Utashinai 公司进一步证明了该项技术的应用前景,公司利用常压等离子体炬技术处理城市垃圾,每年可输出 30 亿瓦特的电能,处理后的垃圾混合物可以作为建筑材料,同时处理垃圾过程中的副产品可转换为像天然气一样的能源。亚特兰大的 Geoplasma 公司也筹建了 10 倍于日本 Eco Valley Utashinai 公司的垃圾处理厂,日均垃圾处理达 2.7×10^5 kg,每天输出电量 1.6 亿瓦特^[32]。

工业废气对环境污染不断加重,严重威胁着人类的健康。解宏端^[33]利用常压微波等离子体炬对含甲苯的空气进行了净化处理实验,发现常压微波等离子体炬除了可直接有效的对这些废气进行处理,还能间接的减少废气的排放。解宏瑞利用常压微波等离子体炬进行了四氟化碳处理研究,其分解率可高达 99% 以上。

2.5 等离子体武器

除了上述应用之外,常压微波等离子体炬技术在其他军事领域也起着重要的作用。等离子体武器使发射到空中的超高频电磁能束或激光束在大气中聚焦,形成密度和电离度非常高的等离子体区,空袭兵器一旦进入该区域就会在 0.1 s 内被撕成碎片^[34]。等离子体防空武器因有着简单、拦截率高、容易在瞬间击中大量目标以及便于运输等优点,在军事上具有重要地位。

3 总结

常压微波等离子体炬技术发展至今,装置设计及应用发展已取得了很大的进步,然而想要在各领域更好的发挥其优异性能,获得更好的发展,还必须解决很多相关等离子体源理论和工程实践问题。如在微波等离子体源的理论设计中如何使获得高效稳定的微波等离子体炬,进一步提高等离子体的电离密度,使等离子体炬更符合工程要求等;在工程实践中如何进一步实现利用常压微波等离子体炬制备、合成及表面处理材料的工业化应用,更有效的利用等离子体改善保护环境等都是常压微波等离子体炬工业化应用所需要解决的主要问题。但作为一种等离子体源—常压微波等离子体炬,必将对生产、环境产生更加积极地推动作用。

参考文献:

- [1] Koretzky E, Kuo S P. Characterization of an atmospheric pressure plasma generated by a plasma torch array[J]. *Phys Plasmas*, 1998, 5(10):3775-3780.
- [2] 熊亮萍, 胡胜, 侯京伟, 等. 等离子体排灰气处理技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1):244-249.
- [3] Von Engle A, Seeliger R, Steenback M. On the glow discharge at high pressure[J]. *Zeit fur Physik*, 1933, 85(144):144-160.
- [4] 张一鸣. 等离子体废物处理技术的工业研究[J]. *真空与低温*, 1995(1):30-36.
- [5] 潘应君, 周磊, 王蕾, 等. 等离子体技术在材料中的应用[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2003:24-32.
- [6] Uhm H S, Hong Y C, Shin D H. A microwave plasma torch and its applications[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2006, 15(2):S26-S34(9).
- [7] Hong Y C, Han S U. Abatement of CF₄ by atmospheric-pressure microwave plasma torch[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(8):3410-3414.
- [8] Takamura S, Amano S, Kurata T, et al. Formation and decay processes of Ar/He microwave plasma jet at atmospheric gas pressure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(4):1-8.
- [9] Al-Shamma'a A I, Wylie S R, Lucas J, et al. Design and construction of a 2.45 GHz waveguide-based microwave plasma jet at atmospheric pressure for material processing[J]. *Journal of Physics D*, 2001, 34(1):2734-2741.
- [10] 刘繁, 汪建华, 王秋良, 等. 常压微波等离子体炬装置的模拟与设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6):1504-1508.
- [11] Kuo S P, Tarasenko O, Popovic S, et al. Killing of bacterial spores contained in a paper envelope by a microwave plasma torch[J]. *IEEE Transactions on plasma science*, 2006, 34(4):1275-1280.
- [12] Davis W C, Marcus R K. An atmospheric pressure glow discharge optical emission source for the direct sampling of liquid media[J]. *J Anal At Spectrom*, 2001, 16(9):931-937.
- [13] Guevremont R R E. Source for atomic and molecular mass spectrometry[J]. *J Anal At Spectrom*, 2000, 15:37-42.
- [14] Jin Z, Su Y, Duan Y. A Low-Power, Atmospheric Pressure, Pulsed Plasma Source for Molecular Emission Spectrometry[J]. *Anal Chem*, 2001, 73(2):360-365.
- [15] Attila M B, Edgar V, Ulrich E, et al. A low-power 2.45 GHz microwave induced helium plasma source at atmospheric pressure based on microstrip technology[J]. *Journal of analytical atomic spectrometry*, 2000, 15(6):579-580.
- [16] 李丽华, 高辉, 张金生, 等. 微波等离子体炬原子发射光谱法测定钢中镍和铬[J]. *冶金分析*, 2007, 27(6):41-44.
- [17] 许根慧, 姜恩永, 盛京. 等离子体技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:106-108.
- [18] 廖斌, 安同一, 王源身, 等. 微波等离子体用于橡胶表面改性处理的研究[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2003(2):40-45.
- [19] Yang S, Gupta M C. Surface modification of polyethyleneterephthalate by an atmospheric-pressure plasma source[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 187(2-3):172-176.
- [20] Ahmed I A, Stephen R W, Jim L, et al. Atmospheric microwave plasma jet for material processing[J]. *Ieee transactions on plasma science*, 2002, 30(5):1863-1871.
- [21] Dong H S, Chan U B, Jong H K, et al. Modification of metal surfaces by microwave plasma at atmospheric pressure[J]. *Surface & coatings technology*, 2007, 201(9-11):4934-4942.
- [22] Zhang J, Guo Y, Xu J Z, et al. Single-crystalline polytetrafluoroethylene-like nanotubes prepared from atmospheric plasma discharge[J]. *Appl Phy Lett*, 2005, 86(131501):1-3.
- [23] Weigle J C, Luhrs C C, Chen C K, et al. Generation of aluminum nanoparticles using an atmospheric pressure plasma torch[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(48):601-607.
- [24] Shin D H, Bang C U, Hong Y C, et al. Preparation of vanadium pentoxide powders by microwave plasma-torch at atmospheric pressure[J]. *Materials chemistry and physics*, 2006, 99(2):269-275.
- [25] Bai H, Chen C, Lin C, et al. Monodisperse nanoparticle synthesis by an atmospheric pressure plasma process: An example of a visible light photocatalyst[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2004, 43(22):7200-7203.
- [26] Jašek O, Eliáš M, Zajíčková L, et al. Carbon nanotubes synthesis in microwave plasma torch at atmospheric pressure[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2006, 26(5-7):1189-1193.
- [27] 陈飞, 周海, 张跃飞, 等. 钛合金表面大气压等离子体枪制备类金刚石薄膜[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(1):124-128.
- [28] 林江, 张溪文, 韩高荣. 大气压非平衡等离子体沉积氧化硅薄膜[J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(2):241-244.
- [29] Rae D R M. Plasma arc process systems, reactors, and applications[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1989, 9(1):85S-118S.
- [30] 王建伟, 杨建, 李荣先. 采用热等离子体系统处理医疗垃圾[J]. *锅炉技术*, 2006, 37(1):64-66.
- [31] Karoly Z, Mohai I, Toth M, et al. Production of glass-ceramics from fly ash using arc plasma[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27:1721-1725.
- [32] David C. Waste management: one man's trash[J]. *Nature*, 2006, 444(1):262-3.
- [33] 解宏端. 常压下微波等离子体处理四氟化碳的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2009.
- [34] 王永生, 粟华南. 等离子体未来防空保护伞[J]. *当代军事文摘*, 2007, 8:52-53.