

等离子体射流及其发生器研究进展*

杨欢 刘汝兵 王萌萌 林麒

(福建省等离子体和磁共振重点实验室、厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 等离子体射流是近年来学术界兴起的新型研究领域。文中阐述了等离子体射流的基本概念和分类以及其技术优势, 并从电极结构和驱动电源分类上重点介绍了国内外等离子体射流发生器的研究现状和前景展望。

关键词: 等离子体射流; 发生器; 电极结构; 驱动电源

中图分类号: TP69 O539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2013)05-147-06

大气压等离子体射流是近年来逐渐兴起的一种新等离子体放电技术, 是目前国内外等离子体科学与工程领域的研究热点之一。传统用于材料表面处理的低温等离子体放电系统多采用平行板容性耦合放电装置, 放电间隙通常为毫米至厘米量级, 很大程度上限制了被处理物体的尺寸。同时被处理物体的复杂形状也会对放电模式和稳定性产生影响。为了克服这种不利因素带来的限制, 等离子体射流技术应运而生, 利用气流和电场的作用使放电区域产生的等离子体从喷管或孔口中喷出, 在无约束的外界环境中作定向流动, 形成等离子体射流^[1]。

与传统方法相比, 大气压等离子体射流由于可在大气环境中产生, 具有操作简单、成本低、无废弃物等优点, 尤其在温度敏感材料、复杂形状工件等表面处理上更显示出独特的技术优势。这种方法因气流的喷射可以把放电空间产生的一些活性成分、激发态粒子、甚至荷电粒子导出放电区域, 使放电区域与工作区域分离, 因此更具有实用性。在生物医疗应用方面, 由于等离子体射流的气体温度低、活性高、操作简单、不限制尺寸等优越性越来越受到人们的关注和兴趣^[2]。

1 等离子体射流的分类

等离子体按其电子温度 $10\ 000$ 为界, 分为高温和低温等离子体。高温等离子体如核聚变、太阳核心。因此工业应用的大多数属于低温等离子体范畴。低温等离子体射流进一步又细分为热、冷等离子体射流。热等离子体射流中各种粒子达到热平衡, 电子、离子、中性气体温度接近, 这类具有高温、高速、高能流密度特点的射流, 适用于材料合成、薄膜制备、定向刻蚀、喷涂及熔融焊接等方面; 冷等离子体射流中粒子没有经过

充分碰撞, 系统没有达到热平衡(又称非平衡等离子体射流), 电子温度远远高于离子、中性粒子温度, 这类具有电子能量高、离子能量较低、宏观气体温度仅有几百 K 甚至接近室温特点的冷等离子体射流适用于表面改性、材料处理、生物医疗等方面。

等离子体射流按其产生放电机理可分为 DBD 放电等离子体射流、直流(包括辉光、弧光)放电等离子体射流、火花放电等离子体射流、流柱放电等离子体射流等。由于这些概念和等离子体产生机理分类的概念相同, 故不再赘述。

等离子体射流的分类往往根据其发生器的不同区分较多, 按其电极结构类型分类有针环式、环-环式、悬浮电极式、单针电极式和同轴电极式等; 按其驱动电源类型分类有射频微波等离子体射流、正弦交流高压电源等离子体射流、直流高压电源等离子体射流和脉冲电源等离子体射流等。根据此分类下文详细介绍国内外等离子体射流发生器及其所应用的领域研究情况。

2 等离子体射流发生器及其应用

1992 年, 日本东京工业学院 Koinuma 等人利用 $13.56\ \text{MHz}$ 射频电源发明了一种新的等离子体发生器(如图 1 所示), 并成功产生第一个大气压低温等离子体射流^[3]。这种装置主要由两个同心圆柱构成内外电极, 以惰性气体混合物为工作气体, 利用 DBD 方式获得宏观温度 $200\sim 400$ 范围内的大气压冷等离子体射流, 主要用于硅片刻蚀、硫化橡胶处理、二氧化硅薄膜沉积等方面研究。

1997 年, 美国 Los Alamos 国家实验室研究人员 Selwyn^[4]研制出一种大气压冷等离子体射流发生器(如图 2 所示), 并将其命名为 APPJ(Atmospheric pressure plasma jet)。该装置两电极间没有

*福建省自然科学基金资助项目(2010J01014)

作者简介: 杨欢(1989 -), 男, 硕士研究生, 研究方向: 等离子体放电特性研究。

介质阻挡，是同轴电极利用射频容性耦合激励方式在开放环境下获得温度不高于 250 的等离子体射流发射器。

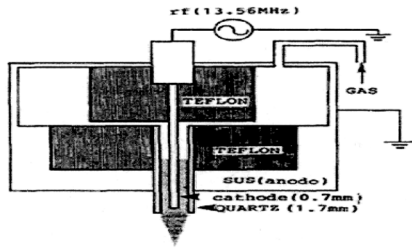


图 1 日本东京工业学院发明的等离子体发生器

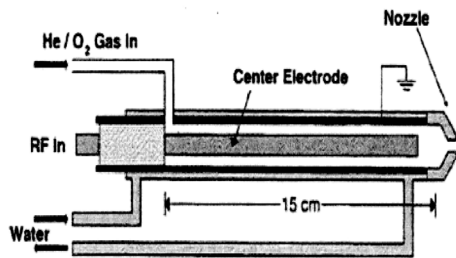
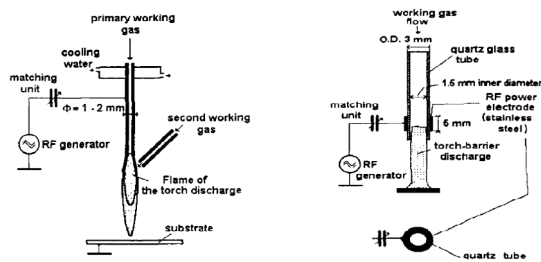


图 2 Los Alamos 研制的 APPJ 发生器

除以上两种比较典型的大气压等离子体射流装置外，捷克、英美等国家的研究人员也研制出了不同种类的等离子体射流发生器。图 3 为捷克研究人员在 2002 年研制出的大气压炬放电和大气压阻挡炬放电发生装置^[5]。其中，图 3a 为大气压炬放电，图 3b 为大气压阻挡炬放电。大气压炬放电主体是由一个内径为 1~2 mm 长度为几个厘米的金属管构成，在金属管上接射频电极(源使之成为一个电极)，金属管的一端通入工作气体，另一端外部放一块金属板作为另一个电极；而大气压阻挡炬放电和大气压炬放电的一个区别就是主体管为玻璃管，玻璃管外壁加上一个金属电极，再在喷口外放一地电极构成一个放电区，这样做的好处是将射频电源所产生的热量利用玻璃隔开，从而可以降低等离子体的气体温度，并同时可以更容易的获得均匀放电。



(a) 大气压炬放电 (b) 大气压阻挡炬放电

图 3 大气压炬放电和大气压阻挡炬放电发生装置

美国德克萨斯大学奥斯汀分校研究人员近年来研制出一种腔体放电产生等离子体射流发生装置(如图 4 所示)。发生器的主体为直径 2.4 mm 的陶瓷圆柱形腔体，两端塞入相对距离可调的电极材料，腔体中间开一直径 1.8 mm 小孔^[6]。驱动电源采用最高频率为 5 kHz 的脉冲电源。这种射流发生器是利用放电使狭小的腔体内气体温度升高，从细小的孔喷射出形成等离子体射流。据实验测量这种高速喷出的脉冲等离子体射流速度可达 250 m/s，主要用于超音速流动控制方面。

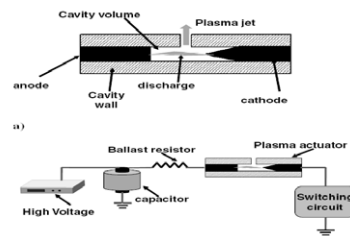


图 4 腔体放电产生等离子体射流发生装置

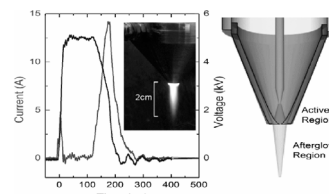


图 5 便携的纳秒脉冲等离子体射流发生器

英国利物浦大学不久前也研制出一种便携的纳秒脉冲等离子体射流发生器(如图 5 所示)^[7]。该装置主体是底部削尖、直径 3 mm 中空金属针头作为电极，外围是接地的锥形金属管。同时使用流量 10 L/min 的惰性气体、频率 5 kHz 的纳秒脉冲电源产生用于生物医疗、表面处理方面的等离子体射流。该发生器的特点是轻巧便携、安全可靠、功耗小。

国内近 10 年对于这种新兴的等离子体产生技术展开了认真的研究，从目前文献查阅来看，我国不同的研究小组如中科院等离子体所^[8]、中科院物理所^[9]、清华大学^[10]、大连理工大学^[11]、中国科技大学^[12]、华中科技大学^[13]等设计和改进了各式各样的等离子体射流发生装置，并对等离子体射流的机理研究、性质诊断和应用等方面做了深入的研究，取得了重要的进展^[14~16]。

国内常见的大气压等离子体射流发生器多以 DBD 放电为主。最早报道这种等离子体射流装置的是北京印刷学院的张广秋^[17]，他们用 26 kHz 的交流电源产生了典型的 DBD 放电型的 APPJ。

此后，国内许多研究单位在 APPJ 的基础上进一步开展了大气压等离子体射流装置的设计与优化工作。

2.1 根据电极结构分类

2.1.1 针-环式电极等离子体射流发生器

针-环电极最早开始用于 DBD 型等离子体射流装置。国内多家研究单位都相继设计出具有自己特点的等离子体射流发生器,如大连理工大学、西安交通大学等。后来,研究人员又在已有工作基础上对发生器结构进行改造,如改用中空针状电极、筒状电极代替环状电极、利用多层介质阻挡等。

潘静^[18]等人研制了一种石英管内插入中空针状电极的等离子体射流发生器(如图 6 所示)。该发生器主体为注射针头作为高压电极插入到石英管内,之间用聚四氟薄膜密封。铜箔缠绕在石英管底部上方 10 mm 左右并接地作为阴极。此装置可以很容易的运输反应气体,并使反应气体充分进入放电区域从而提高放电的稳定性。西安交通大学的马跃^[19]等设计了一种双层介质阻挡等离子体射流发生装置(如图 7 所示)。

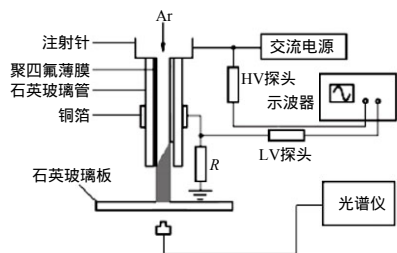


图 6 中空针状电极的等离子体射流发生器

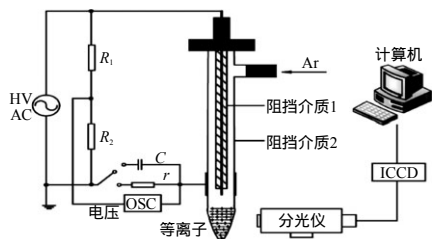


图 7 双层介质阻挡等离子体射流发生装置

2.1.2 环-环式电极等离子体射流发生器

环-环式电极结构也是目前一种比较常见的等离子体射流发生器。由于其整体结构简单,易于实现且运行稳定,因而成为大气压等离子体射流机理研究便利的实验装置。西安交大邵先军^[20]等利用双环电极等离子体射流发生器为研究工具(装置简图如图 8 所示)探究了 APPJ 的产生机理,

考察了 APPJ 长度与 DBD 放电模式的关系。此外,国内外许多实验室分别利用不同的环电极结构的射流发生装置对射流等离子体演化过程现象进行全面的观察和深入的研究。

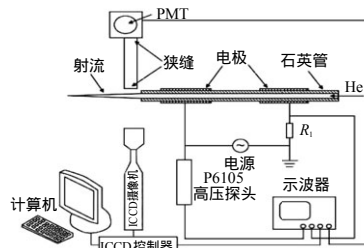


图 8 环-环式电极等离子体射流发生器

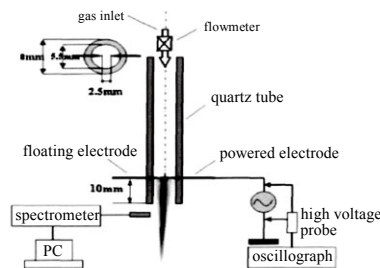


图 9 悬浮电极式大气压等离子体射流发生器

2.1.3 悬浮式电极等离子体射流发生器

大连理工大学聂秋月^[1]等利用针-针电极结构引入悬浮电极,改进成一款如图 9 所示的悬浮电极大气压等离子体射流发生器。该装置主体部分为一根两端开口的毫米量级石英管,一端进气口连接供气源,一端作为等离子体射流出口。距射流出口上方 10 mm 处有一对针电极嵌入石英管内呈镜像对称,一侧针电极为功率电极连交流电源,另一侧电极直接悬浮于周围开放空气中。放电产生等离子体经气体及电场作用喷射出形成射流。实验证明这种结构简单、实用性强的悬浮电极式发生器使得等离子体射流性能得以有效地提高。

2.1.4 单针式电极等离子体射流发生器

单针电极等离子体射流发生器是一种结构简单、使用方便的等离子体发生装置。其典型结构^[21,22]如图 10a、图 b 所示。这种结构的等离子体射流发生器特征在于小小的一根针状电极既连接功率电源,又连接气源,故射流长度较长,温度较低,粒子活性较好,在材料表面改性、杀菌消毒等医疗方面具有应用潜力。华中科技大学卢新培^[23]等人研制出一种可深入牙根管内部处理的毛细管针电极射流装置,如图 10c 所示。实验结果证明该发生器产生的等离子体射流具有温度低、无损伤、可靠性好等特点。

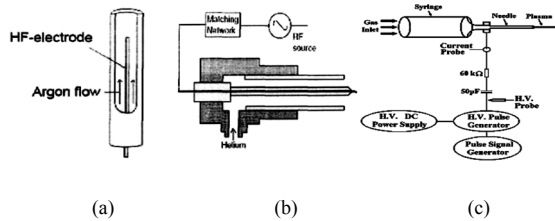


图 10 各种单针电极式等离子体射流发生器

2.1.5 同轴电极等离子体射流发生器

东华大学的史丹丹^[24]等设计建立了一套同轴圆柱介质阻挡放电射流装置(如图 11 所示)。整个装置由同轴的圆柱 DBD 放电腔构成,外面是不锈钢管作为高压电极,并开有一条狭缝,内电极由水电极构成,石英管作为阻挡介质,它与外电极间的间隙为放电产生等离子体区域,间隙为 1 mm。以水作为电极一方面是保证电极与石英介质的紧密均匀接触,另一方面是对放电过程中产生的热量进行冷却。在不锈钢与狭缝相反的方向上,开对称的进气口保证气体均匀性。这个等离子体射流发生器的特点在于它产生的射流呈线状,可以大面积高效率地使用。

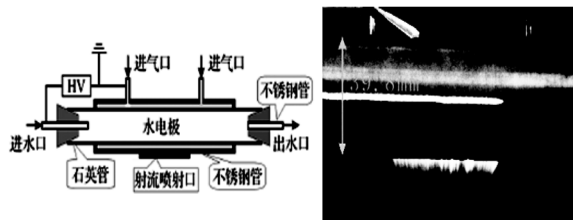


图 11 同轴电极等离子体射流发生器

2.2 根据驱动电源分类

2.2.1 射频微波等离子体射流发生器

射频指工作频率在兆赫兹量级,最常用的频率为 13.56 MHz。在大气压下,用 13.56 MHz 的射频电源产生电容耦合等离子体,能形成稳定均匀的辉光放电。一般采用惰性气体或氮气等作为工作气体,典型的气体温度范围在 25~200 。最早的 Koinuma 等人采用的就是 13.56 MHz 射频电源。自 2003 年开始,我国中科院微电子所先后成功研制出常压射频等离子体喷枪设备用于硅片上清洗光刻胶,其射频等离子体射流装置如图 12^[25]。某些研究单位也有用更高频率的微波源激励产生等离子体射流^[26]。在图 13 装置中,微波源产生高频电场波,经匹配系统进入到波导反应腔中,通过耦合使得电场达到最强激发气体发电产生等离子体射流。

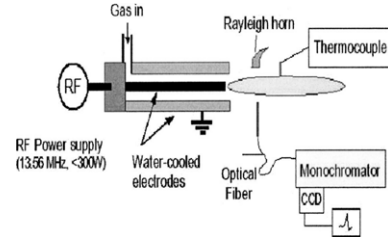


图 12 射频等离子体射流装置

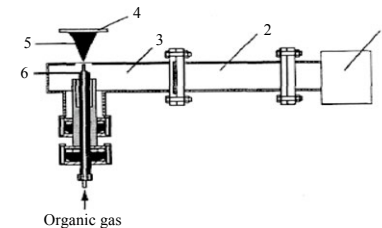


图 13 微波源激励产生等离子体射流的装置

2.2.2 正弦交流高压等离子体射流发生器

交流电源是等离子体射流发生器中最常用的电源。一般说来,此类等离子体常以电弧、电晕或较低气压下的辉光放电形式存在。近几年由于对等离子体射流技术的逐渐关注,人们对能产生稳定射流的电源研制也日益加紧。目前大家选用较多的还是正弦波交流电源,因为正弦波适于计算,适于与理论对照,且能够较好的研究 DBD 放电的特性。以上很多装置中采用的电源是交流电源。上述图 8 中,西安交大的邵先军^[9]等设计的环-环电极结构的等离子体射流装置中使用的电源是 17 kHz 的正弦波电源,0~20 kV 范围的电压,属于中频正弦交流电源。使用正弦交流电源的装置非常普遍,这里不再重复举例。

2.2.3 直流电源等离子体射流发生器

在直流电源驱动下,通常会产生高强度的电弧或电晕放电,而要形成低温等离子体射流需要做相应的改变,如改变电极的构造、在驱动电路中串联镇流电阻以减小电流等措施。中科院精密所的郑培超^[26]等发明了一种结构简单、制作方便的微米量级大气压等离子体射流发生器(如图 14 所示)。这种发生装置采用的就是直流电源驱动,可在多种工作气体中放电,并用于改善打印纸表面亲水性。这个发生器主体装置是采用不锈钢毛细管作为空心阴极,带孔铜板作为阳极。阴极和阳极之间用聚四氟乙烯板绝缘,阳极要经过镇流电阻 R 接到直流电源正极。形成稳定放电时电流为 0.5~10 mA,电压为 150~300 V,射流最长可达 1 cm。

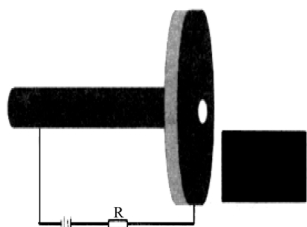


图 14 微米量级大气压等离子体射流发生器

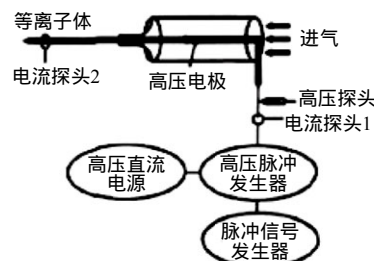
2.2.4 脉冲电源等离子体射流发生器

近几年来用脉冲电源驱动产生低温等离子体射流引起了许多人的注意。短脉宽的脉冲电压能够加速气体反应，使电子能量分布向高能尾部漂移，不仅可以提高等离子体的化学活性，还能降低等离子体的气体温度。脉冲电源通常的脉宽在纳秒量级，快速变化的短脉冲驱动产生的等离子体射流接近室温。卢新培^[27]等研制出一种方便安全易操作的单电极大气压低温等离子体射流装置(如图 15 所示)。这种等离子体射流装置外面有陶瓷管包围，起到绝缘作用，而且产生的等离子体射流峰值电流约为 360 mA，气体温度约为 300 K，对人体不会造成伤害，应用于生物医学安全可靠。

3 前景展望

大气压等离子体射流作为一种新的等离子体发生技术，有着不可比拟的优点，方便快捷又比较经济，在诸多领域都有着广泛的应用和明显的

优势，而且前景非常可观。因此无论在理论层面还是在实验研究层面，对大气压等离子体射流进行深化的研究都是非常必要的，价值也是非常之大。



实验装置示意图，石英管的内径和外径分别为2和4 mm，针筒的内径6 mm，喷嘴的直径1.2 mm，石英管到喷嘴的距离为1 cm

图 15 单电极大气压低温等离子体射流装置

然而对等离子体射流的机理性研究和诊断等理论方面还不够深入，尤其是控制关键等离子体参数、射流等离子体相互作用、射流模式等方面，可以说目前还处在初期阶段。其次更深层次的研究离不开实验装置和驱动电源，将来的发展趋势是研制各种电源或者电源组合，以及寻找适用于不同应用领域的等离子体发生器(包括结构、形状、大小等)，找到最佳的放电条件(电源参数、气体参数、时间参数等)研究和发新型诊断手段，提出有效的控制技术，进一步地丰富和发展等离子体射流理论和应用潜力，这将具有科学的意义和价值。

参考文献：

- [1] 聂秋月.大气压冷等离子体射流实验研究[D].大连:大连理工大学, 2010.
- [2] 熊紫兰,卢新培,鲜于斌,等.大气压低温等离子体射流及其生物医学应用[J].科技导报, 2010,28(15):97-105.
- [3] Koinuma H, Ohkubo H, Hashimoto T, Inomata K, et al. Development and application of a microbeam plasma generator Appl.Phys.Lett.1992,60:816-817.
- [4] Selwyn G.S. Atmospheric pressure plasma jet. U.S.Patent 5-961-772,January23,1997.
- [5] Hubicka Z, et al. Plasma Sources Sci. Technol,2002,11,195.
- [6] Venkateswaran N,Laxminarayan L.Raja, Noel T.Clemens.Characterization of a High Frequency Pulsed Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control. AIAA JOURNAL.2010,48(2):297-305.
- [7] J.L.Walsh, M.G.Kong. Appl.Phys.Lett.99,081501(2011).
- [8] Chen Q,Zhang YF,Han E and Ge YJ.Atmospheric pressure DBD gun and its application in ink printability. Plasma Sources Sci.Technol.2005,14:670-675.
- [9] Xu L,Liu P,Zhan RJ,Wen XH,Ding LL and Nagatsu M.Experimental study and sterilizing application of atmospheric pressure plasma. Thin Solid Films.2006,506-507:400-403.
- [10] Zhang J, Sun J, Wang D and Wang X. A novel cold plasma jet generated by atmospheric dielectric barrier capillary discharge. Thin Solid Films. 2006,506-507:404-408.

