

文章编号 1004-924X(2014)06-1531-07

针-柱结构敞开式离子源和微型气泵集成系统的放电特性

李 华, 韦昌严, 曾德查, 陈真诚*

(桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要:设计了一种小型针-柱电晕放电结构,实现了敞开式离子源和微型气泵的系统集成。通过数码相机拍摄的针-柱放电图像和示波器记录的特里切尔放电波形,验证了该针-柱结构在没有外界气流、间隙仅 2 mm 的实验条件下实现了稳定的电晕放电。对针-柱结构电晕放电特性进行了研究,讨论了放电电压、镇流电阻、柱直径大小、针-柱间距等参数对针-柱电晕放电的影响,通过伏安特性曲线分析得出在放电电压为 $-3\ 800\ \text{V}$ 、镇流电阻为 $10\ \text{M}\Omega$ 、柱直径为 4 mm、间距为 2 mm 的实验条件下,产生的离子风气体流速最大(采用 testo 405-V1 风速仪测得最大气体流速为 1.15 m/s)。该针-柱结构可采用微机电系统(MEMS)工艺加工实现,有望应用于质谱仪、离子迁移谱、高场非对称波形离子迁移谱等便携式分析仪器中,实现敞开式离子源和微型气泵的双重功能。

关键词:敞开式离子源;微型气泵;针-柱结构;电晕放电;便携式分析仪器

中图分类号:TH83 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1531

Discharge properties of integrated system of ambient ion source and micro air pump based on needle-to-cylinder structure

LI Hua, WEI Chang-yan, ZENG De-cha, CHEN Zhen-cheng*

(School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, GuiLin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: chenzhcheng@163.com

Abstract: A micro needle-to-cylinder corona discharge structure was designed to integrate an ambient ion source and a micro air pump. By needle-to-cylinder discharge photos and Trichel discharge waveform recorded with a digital camera and an oscilloscope respectively, it verified that the stable corona discharge of needle-to-cylinder structure could be realized without external air flows and with only 2 mm distance between need and cylinder. The corona discharge characteristics of the needle-to-cylinder structure were researched and the influence of experimental parameters, like discharge voltages, ballasting resistor, the diameter of cylinder and the distance between the needle and cylinder, on the corona discharge was discussed. By analysis of the volt-ampere characteristic curves, it shows that the max velocity ionic wind can be gotten in a discharge voltage of $-3\ 800\ \text{V}$, a discharge resistor of $10\ \text{M}\Omega$, a cylinder diameter of 4 mm, and the distance between the need and cylinder of 2 mm. Moreo-

收稿日期:2013-12-05;**修订日期:**2014-01-10.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61204120);广西自然科学基金青年基金资助项目(No. 2013GXNSFBA019273);广西高等学校一般资助科研资助项目(No. 201203YB078);广西高校大学生创新资助项目(No. ZCC016359);广西高等教育教学改革工程资助项目(No. 2014JGB144)

ver, the max air flow velocity is 1.15 m/s measured by the test 405-V1 anemometer. The needle-to-cylinder structure can be fabricated by Micro-electro-mechanical System (MEMS) technology, and may be used in the portable analytical instruments to realize the double functions of ambient ion source and micro air pump, such as mass spectrometry, ion mobility spectrometry, and high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry.

Key words: ambient ion source; micro air pump; needle-to-cylinder structure; corona discharge; portable analytical instrument

1 引言

近年来,分析仪器领域对样品进行现场快速检测的要求,促进了对样品无需复杂前处理且在敞开环境下进行离子化方法的研究。2004年,《Science》上介绍了由美国普渡大学 R. Graham Cooks 等提出的在常压下无需进行样品预处理的解吸电喷雾离子源 (DESI)^[1],迅速在学术界掀起了敞开式离子化技术的研究热潮。随后,众多学者都做出了研究或改进,提出了各种离子源,如常压热解吸电离离子源 (APTDI)^[2]、探针电喷雾离子源 (SSP-ESI)^[3]、基质辅助激光解吸电喷雾电离离子源 (MALDESI)^[4]、新型单光子和光电子复合电离源技术 (PEI)^[5]、电喷雾萃取电离离子源 (EESI)^[6]、介质阻挡放电离子源 (DBDI)^[7] 等。

随着微机电系统技术 (Micro Electro-mechanical Systems, MEMS) 在化学分析仪器领域的应用,质谱仪、离子迁移谱、高场非对称波形离子迁移谱等分析仪器正向着微型化、集成化、低功耗、便携式方向发展,而离子源的微型化是其中的关键。

采用极不对称电极结构作为分析仪器的离子源,通过电晕放电实现电离物质的功能,具有结构简单、电离离子碎片少、可在大气压环境下工作、易于微型化等优点,近年来引起了国内外研究者的关注。刘坤等采用线-筒电极结构应用于高场非对称波形离子迁移谱^[8-9]、檀景辉等采用针-网电极结构应用于离子迁移谱^[10]、Kanako Sekimoto 等采用针-板电极结构应用于质谱仪^[11]。在这些研究中,虽然通过电极之间稳定的电晕放电实现了电离物质的功能,但电晕放电过程中需要由外部引入高速气流,一方面用于对放电区域进行散热,抑制电弧的产生,另一方面用于携带检测物质进入电离区域,这就需引入庞大复杂的供气系

统,不利于系统的微型化。

本文提出了一种新型的针-柱电极结构。在敞开式大气压环境、无外界引入气流的条件下,通过在针-柱间加上可控的负直流高压,形成稳定的电晕放电,可实现对物质的电离;同时产生了一定流速的离子风,可用于样品的进样和电离后离子的驱动,实现敞开式离子源和微型气泵的双重功能。对针-柱结构电晕放电特性进行了研究,并基于电晕放电测试了离子风的流速。由于针和圆柱结构都可以用 MEMS 工艺加工实现^[12-13],因此,针-柱结构敞开式离子源和微型气泵集成系统可望应用于离子迁移谱等分析仪器中,为仪器的微型化打下了基础。

2 实验装置

基于大气压气体放电原理,所设计的针-柱电极结构如图 1 所示。采用不锈钢针作为放电阴极,通过 OPTEC TM 光学显微镜放大 40 倍后,经数码显微图像处理系统测量得针尖直径为 626 μm 。实验过程中阴极针保持不变。放电极阳极根

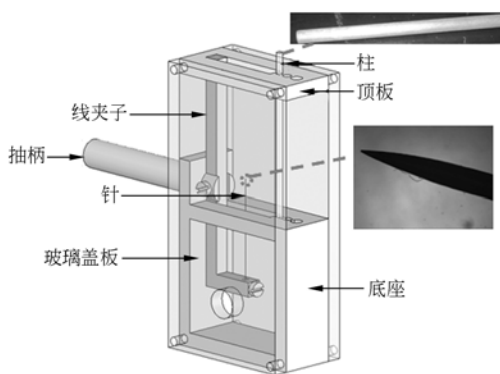


图 1 针-柱电极三维结构示意图

Fig. 1 Sketch of three-dimensional structure of needle-to-cylinder electrodes

据需要可选择采用直径分别是 2、3 和 4 mm、长度为 60 mm 的紫铜圆柱。针穿过线夹子上 1.2 mm 的通孔后,通过螺钉固定在线夹子上。柱通过顶板的通孔和底座上的沉孔固定,保持和针的平行。线夹子固定在抽柄上,抽柄则可通过底座上对应圆孔带动线夹子沿着槽左右移动,从而改变针与柱之间的距离。两侧的玻璃盖板形成矩形的气流通道。实验装置的大小为 100 mm×50 mm×20 mm。

在针-柱结构设计的基础上,采用图 2 所示电路进行放电实验。实验中放电所需电源为可输出 0~−5 000 V、最大输出功率 500 W 的负直流高压电源。镇流电阻用于限流,抑制放电过程中的电弧;放电电阻连接于电源两端,用于电源电压的快速下调;阻值为 1 kΩ 的测试电阻用于将放电电流信号转化为电压信号,并用 TDS1002B-SC 泰克示波器读取测试电阻两端的电压值,用于观察放电波形。佳能数码相机用于拍摄放电过程中的发光现象。实验都是在大气压敞开式环境、室温、无外界通入气流的条件下进行的。

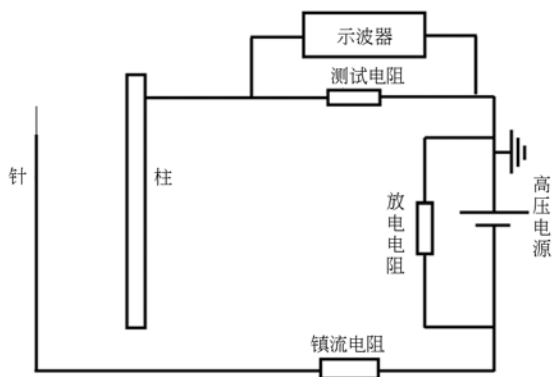


图 2 针-柱结构放电电路

Fig. 2 Discharge circuit of needle-to-cylinder structure

3 电晕放电放电波形及图像

得到稳定的电晕放电,是实现电离物质和产生一定气体流速的前提和基础。实验首先验证了针-柱结构能否实现稳定电晕放电。在柱直径 4 mm、针-柱间距 2 mm、镇流电阻 12 MΩ、放电电阻 10 MΩ 的情况下,采用如图 2 所示的放电电路进行放电实验。通过施加放电电压,可观察到如图 3 所示的放电图像。放电电压在 −3 300 V 以前,针-柱之间没有发光现象。当电压升高到

−3 300 V 时,在针尖处观察到微弱的光,针和柱之间大部分是未电离的迁移区,此时在示波器上观察到典型的特里切尔波形,如图 3(a)所示,说明针-柱之间产生了电晕放电;随着电压继续升高,电离区从针尖不断向外扩展,发光区也从针尖向圆柱处扩展,发蓝紫色光,发光的强度和范围都有所增强,示波器上观察到特里切尔波形出现了直流分量,同时频率不断上升,图 3(b)所示为放电电压为 −4 500 V 时电晕放电发光图像;当放电电压继续增大时,可以观察到针和柱之间产生了明亮曲折且带有树状分支的放电弧线,如图 3(c)所示。放电弧线从针尖出发,穿过放电区域迅速到达圆柱,且很快湮没,又接着产生新的放电弧线,交替往复,呈现断续放电的特征。并发出尖锐的“嗤嗤”声。此时示波器上出现紊乱的放电波形,放电电流急剧增大,由于可能损坏示波器,因此没有对放电波形进行记录。此时放电的现象符合火花放电的特征,说明放电由电晕放电进入了火花放电。

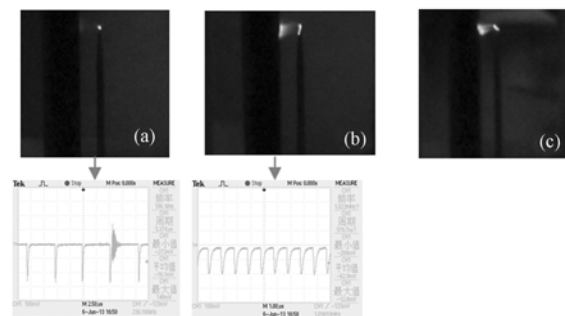


图 3 数码相机拍摄图像及示波器存储的波形

Fig. 3 Photos and waveforms recorded by digital camera and oscilloscope respectively

对于针-柱放电结构,电晕放电是由于针-柱之间加载电压形成的电场强度与空气中氧负离子聚集形成的反向电场总的电场强度周期性的增大和减小,结果是总的电场强度一段时间内大于放电所需的击穿电场,另一段时间内又小于所需击穿电场,从而放电有规律的形成和停止,形成特里切尔波形。当电压继续升高,若针尖附近的电场强度足够大,使氧负离子的运动速度足够快,不会使氧负离子的浓度增加,而总的电场强度总是大于放电所需的击穿电场,则放电不会停止,此时特里切尔波形将消失,放电波形为直流信号,放电将进入辉光放电阶段。若电压继续升高,将击穿针-

柱之间的空气,形成火花放电,从而完成电晕放电、辉光放电到火花放电的完整放电过程。之所以电晕放电阶段结束后直接进入火花放电,没有观察到辉光放电现象,是由于所采用的针尖较粗,针尖附近的电场强度不足以驱动氧负离子的快速运动,氧负离子堆积形成反向电场,从而一直处于具有特里切尔波形特征的电晕放电阶段,直到放电电压增大到将空气击穿,形成火花放电。

通过放电实验的波形图和图像,有效验证了针-柱结构在没有外部气流条件下,能产生稳定的电晕放电。

4 放电参数对电晕放电的影响分析

电晕放电离子风是基于放电过程中电子雪崩引起的高速离子射流运动对周围气体流动产生强大的扰动而产生的,离子风流速与放电电流成正比。因此,要基于针-柱放电结构得到较大气体流速的离子风,须研究各参数对放电电流的影响,以得到最佳放电条件,得到最大电流值,从而实现最大气体流速。

4.1 镇流电阻对电晕放电的影响

在其他条件不变的情况下,只改变镇流电阻来研究其对电晕放电的影响。阴极针采用不锈钢针、阳极柱为直径 4 mm 的紫铜圆柱、针-柱间距为 2 mm、放电电阻为 10 M Ω ,分别用 12、16 和 20 M Ω 镇流电阻进行电晕放电研究,得到各个伏安特性曲线如图 4 所示。

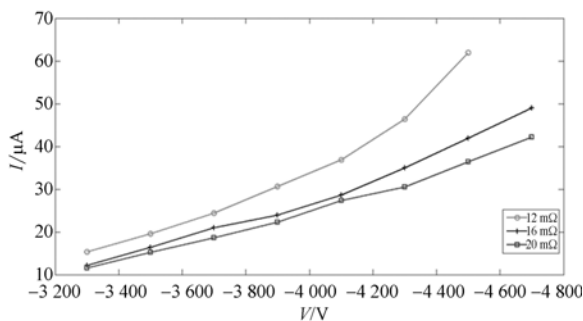


图 4 不同镇流电阻的伏安特性曲线

Fig. 4 Volt-ampere characteristic curves with different ballasting resistors

分析此伏安特性曲线可知:电晕放电的形成由针-柱放电结构本身特性所决定,镇流电阻不影响电晕放电的起始电压,所以当放电电压达到

-3 300 V 时,3 种不同镇流电阻条件下电晕放电都开始形成。由于在放电回路中镇流电阻起限流、抑制电弧的作用,因此平均放电电流随着镇流电阻的增大而减小。

4.2 放电电压与回路平均电流的关系

由图 4 可知,在 12、16 和 20 M Ω 镇流电阻的条件下,随着放电电压的升高,平均放电电流都随之增大,放电也越剧烈(图 3 所示)。因此,放电电压与回路平均电流呈正比的关系。

4.3 柱直径大小对电晕放电的影响

实验在相同的直径 626 μm 不锈钢针、2 mm 间距、镇流电阻 16 M Ω 、放电电阻 10 M Ω 条件下,通过改变柱直径大小来研究其对电晕放电的影响。柱直径分别为 2、3 和 4 mm 时,得到如图 5 所示的伏安特性曲线。分析此伏安特性曲线可知,3 条曲线相交于点 A。在点 A 的左侧,柱直径越大,平均放电电流越大;在点 A 的右侧,则正好相反。

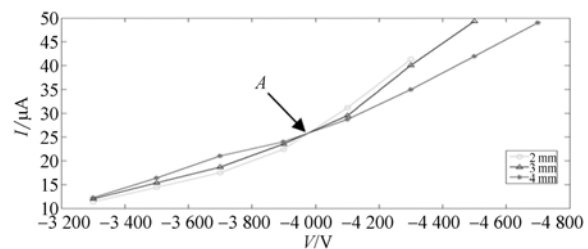


图 5 不同直径圆柱的伏安特性曲线

Fig. 5 Volt-ampere characteristic curves with different diameter cylinders

采用 Comsol 仿真软件对针-柱放电电极进行电场强度分析。设定放电电压为 -3 500 V、针-柱间距为 2 mm、针直径为 626 μm 、柱直径分别为 2、3 和 4 mm 时电场强度分布如图 6 所示。在 3 种情况下,针-柱之间的平均电场强度 E_{ave} 为:

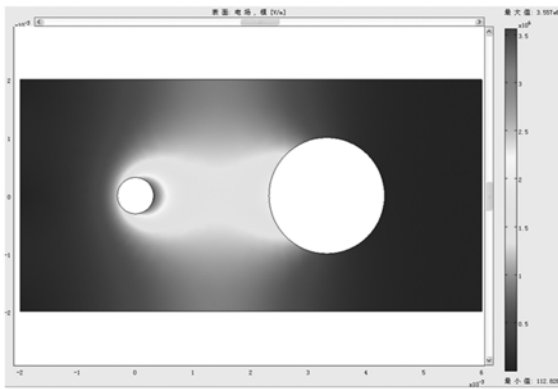
$$E_{\text{ave}} = \frac{U}{d}, \quad (1)$$

其中: U 为放电电压, d 为针柱之间间距。将放电电压 -3 500 V、间距 2 mm 带入式(1)得平均电场强度为 1.75×10^6 V/m。由图 6 可知,柱直径分别为 2、3 和 4 mm 情况下最大电场强度 E_{max} 分别是 3.556×10^6 、 3.648×10^6 和 3.775×10^6 V/m,根据电场不均匀系数 f 的定义^[14]:

$$f = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{ave}}}. \quad (2)$$

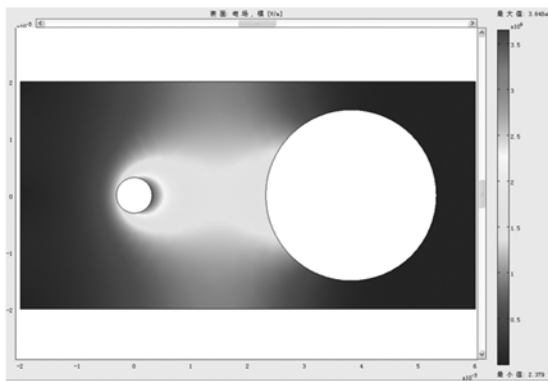
将上述数据带入,可得柱直径分别为 2、3 和 4 mm 情况下电场不均匀系数分别为 2.03、2.08 和 2.16。电场不均匀系数越大,说明针-柱结构不

对称性越大,针尖附近的电场强度越大,电晕放电所产生的平均放电电流越大,因此,在点 A 的左侧,4 mm 直径圆柱放电所产生的平均放电电流越大;虽然 2 mm 直径圆柱情况下针尖附件最大电场强度小,但针-柱之间的区域、特别是柱附近的电场强度大于 3 和 4 mm 情况下的电场强度容易产生火花放电,因此,在点 A 右侧,2 mm 直径圆柱放电最先进入火花放电阶段,放电电流急剧增大,因此比 3 和 4 mm 直径圆柱的放电电流大,但由于 4 mm 直径圆柱产生火花放电的起始电压高,最终还是大于 2 mm 直径圆柱电晕放电所产生的平均放电电流,因此,实验中选择直径为 4 mm 的圆柱能够得到较大放电电流。



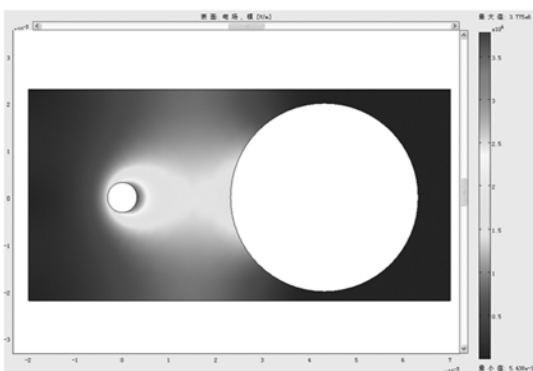
(a) 圆柱直径 2 mm

(a)With cylinder diameter of 2 mm



(b) 圆柱直径 3 mm

(b)With cylinder diameter of 3 mm



(c) 圆柱直径 4 mm

(c)With cylinder diameter of 4 mm

图 6 放电电压-3 500 V 时不同直径圆柱电场强度仿真结果

Fig. 6 Electric field intensity simulation results of different diameter cylinders with discharge voltage of -3 500 V

4.4 针-柱间距大小对电晕放电的影响

实验中针-柱间距分别取 2、3 和 4 mm,放电阴极针为不锈钢针、阳极柱直径为 4 mm、镇流电阻为 16 MΩ、放电电阻为 10 MΩ,实验结果如图 7 所示。分析此伏安特性曲线得到:针-柱之间间距越小,起始电晕所需的放电电压越小,同时,在同样放电电压下,所产生的平均放电电流也越大。另一方面,针-柱间距越小,产生火花放电的起始电压越小,如图 7 中针-柱间距为 2 mm 时,-4 300 V 以后就开始产生火花放电。这是因为间距越小,同样的放电电压条件下电场强度也越大,因此起始的放电电压就越小,所产生的放电电流也越大。实验中选择间距为 2 mm,易于实现较大的放电电流。

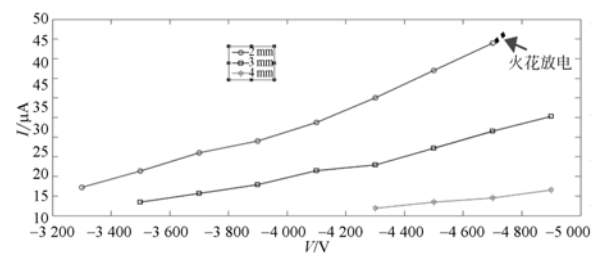


图 7 不同间距的伏安特性曲线

Fig. 7 Volt-ampere characteristic curves with different distances

4.5 实现最大放电电流的放电参数分析

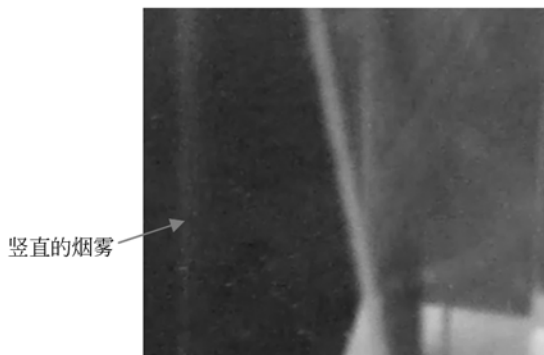
由上述分析可知,镇流电阻、放电电压、柱直径、针-柱间距等参数对放电电流都有较大影响。在确保放电稳定和一定的参数范围内,镇流电阻越小、放电电压越大、柱直径越大、针-柱间距越小,对应的放电电流就越大。通过分析本实验中

针-柱结构各参数对电晕放电影响,得出在 $0 \sim -5\ 000\text{ V}$ 放电电压的实验条件下,选择放电阴极针为不锈钢针、镇流电阻为 $10\text{ M}\Omega$ (为了保护电源,取和放电电阻一样的阻值)、圆柱直径为 4 mm 、针-柱间距为 2 mm ,能够实现最大电晕放电电流,从而实现最大流速离子风。

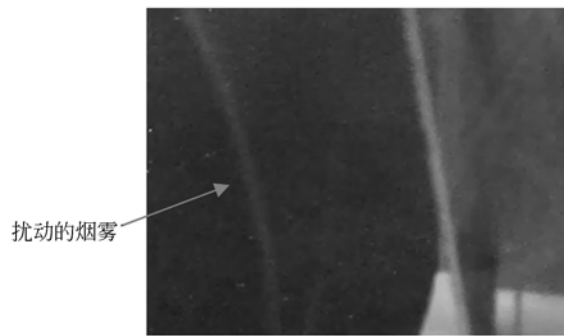
另一方面,实现最大放电电流的放电参数是在一定条件和范围内的最佳。对于针-柱放电结构,决定最佳放电条件的先决条件是放电电压。若放电电压从 $-5\ 000\text{ V}$ 增大到负的几万伏,则可以预见针-柱间距 2 mm 的结构首先将产生火花放电,而间距 4 mm 的结构反而能在较高的电压下才产生火花放电,其电晕放电的最大放电电压较高,由此产生的放电电流反而可能高于间距 2 mm 情况下的放电电流。因此,对于针-柱放电结构,实现最大放电电流的最佳放电参数是在一定放电电压条件下相对的最佳,需要根据放电电压选取各放电参数的最佳值。

5 电晕放电离子风测试

根据最佳放电条件进行电晕放电,采用 testo 405-V1 风速仪在实验装置出口进行风速测量。为了形象地观测到离子风的产生,在针-柱放电装置出口处设置烟雾。没发生电晕放电时,可观测到烟雾竖直向上,没有发生扰动,如图 8(a)所示,说明此时没有离子风产生。升高电压会观察到针尖部位产生了发光,说明此时产生了电晕放电,观察到烟雾开始扰动,电压升高到 $-3\ 800\text{ V}$ 时,风速计测量到最大气体流速为 1.15 m/s ,此时可明显观测到烟雾的扰动,如图 8(b)所示。



(a) 无电晕放电
(a) Discharge of corona free



(b) 产生电晕放电
(b) Discharge of corona



(c) 离子风风速测量
(c) Measurement of ionic wind

图 8 针-柱结构离子风实验

Fig. 8 Ionic wind experiment of needle-to-cylinder structure

由此实验验证了在无外界引入气流的条件下,针-柱放电结构在进行稳定电晕放电的同时,还产生了一定流速的离子风,为下一步实现离子源和微型气泵的双重功能奠定了基础。

6 结 论

本文提出了一种敞开式针-柱结构离子源和微型气泵的集成系统并研究了其放电特性。首先通过发光现象和示波器记录的放电波形,验证了该集成系统在敞开式大气压环境和无外界通入气流的情况下,实现了稳定的电晕放电。研究了放电电压、镇流电阻、柱直径大小、针-柱间距等参数对电晕放电的影响,通过伏安特性曲线分析了各个参数和平均放电电流的关系,确定了实现最大离子风流速的最佳放电参数,并通过实验验证了针-柱放电产生的离子风流速可达 1.15 m/s 。

下一步需要完成的工作包括:(1)在针-柱结构实现稳定电晕放电的基础上,采用静电计和质谱仪对针-柱结构离子源进行物理和化学验证实验,以检验离子源工作的可靠性;(2)进行针-柱阵列式结构设计,以进一步增大气体流速,满足便携

式分析仪器的要求;(3)基于 MEMS 工艺进行设

计加工,实现微型化等。

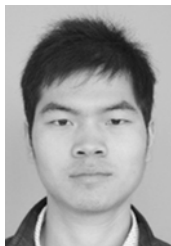
参考文献:

- [1] TAKATS Z, WISEMAN J M, GOLOGAN B, *et al.*. Mass Spectrometry Sampling Under Ambient Conditions with Desorption Electrospray Ionization [J]. *Science*, 2004, 306:471-473.
- [2] LEONARD T D, TIM M B. Ambient pressure thermal desorption ionization mass spectrometry for the analysis of substances of forensic interest [J]. *Analyst*, 2013, 138: 5332-5337.
- [3] MATTHEW J, WALWORTH, JOSEPH J, *et al.*. HPTLC plate blotting for liquid microjunction surface sampling probe mass spectrometric analysis of analytes separated on a wettable phase plate [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2012, 26(1):37-42.
- [4] GUILLAUME R, JEREMY A B, KENNETH P G, *et al.*. Infrared matrix-assisted laser desorption electrospray ionization (IR-MALDESI) imaging source coupled to a FT-ICR mass spectrometer [J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2013, 24:92-100.
- [5] 吴庆浩,花磊,侯可勇,等. 新型单光子电离和光电子电离复合电离源的研究及应用[J]. *分析化学*, 2011,39:1465-1469.
WU Q H, HUA L, HOU K Y, *et al.*. Characterization and applications of combined single photon ionization and photoelectron ionization source [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2011, 39:1465-1469. (in Chinese)
- [6] WANG R, GROHN A J, ZHU L, *et al.*. On the mechanism of extractive electrospray ionization (EESI) in the dual-spray configuration [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 402: 2633-2643.
- [7] NA N, ZHAO M X, ZHANG S C, *et al.*. Development of a dielectric barrier discharge ion source for ambient? mass? spectrometry [J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2007, 18:1859-1862.
- [8] 刘坤,廖峥,侯世英,等. 大气压直流辉光放电装置的实验与分析[J]. *重庆大学学报*,2013, 36(3):71-76.
LIU K, LIAO ZH, HOU SH Y, *et al.*. Experiment and analysis of an atmospheric DC glow discharge device [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(3):71-76. (in Chinese)
- [9] 唐飞,王晓浩,刘坤,等. 敞开式小型线-筒电极负电晕放电离子源[J]. *光学精密工程*,2009, 17(8): 1953-1957.
TANG F, WANG X H, LIU K, *et al.*. Ambient negative corona discharge ion source with small line-cylinder electrodes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1953-1957. (in English)
- [10] 檀景辉. 基于脉冲正电晕放电离子源的离子迁移谱仪研究[D]. 天津:天津大学,2010.
TAN J H. *Research of Ion Mobility Spectrometer Based on Positive Pulse Corona Discharge Ion Source* [D]. Tianjin:Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [11] KANAKO S, MAMI S, MITSUO T. Specific interaction between negative atmospheric ions and organic compounds in atmospheric pressure corona discharge ionization mass spectrometry [J]. *American Society for Mass Spectrometry*, 2012, 23: 1109-1119.
- [12] 赵贵. 基于 AFM 探针的电晕放电初步研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
ZHAO G. *Research on Corona Discharge Based on AFM Probe* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [13] 李华,王晓浩,唐飞,等. 一种微型 FAIMS 传感器芯片的研制[J]. *物理化学学报*,2010, 26(5): 1355-1363.
LI H, WANG X H, TANG F, *et al.*. Design and fabrication of a miniature FAIMS sensor chip [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2010,26(5):1355-1363. (in Chinese)
- [14] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
ZHAO Z D. *The High Voltage Technology* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)

作者简介:



李 华(1978—),男,湖南郴州人,博士,教授,硕士生导师,2001年、2004年于中北大学分别获得学士和硕士学位,2007年于北京理工大学获得博士学位,2010年于清华大学仪器科学与技术博士后流动站出站。主要从事微型生化分析仪器和 MEMS 等的研究。E-mail:lihua@guet.edu.cn



韦昌严(1989—),男,广西河池人,2013年于桂林电子科技大学获学士学位,主要从事分析仪器设计方面的研究。E-mail:554775019@qq.com