

文章编号 1004-924X(2015)12-3405-09

利用离子风实现后吸式进样与电离集成的离子源

李 华^{1,2}, 李玉凯¹, 郭超群¹, 陈耀彬¹, 洪夏蕾¹, 李智江¹, 肖文香¹, 陈真诚^{1*}

(1. 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004,

2. 广西信息科学实验中心, 广西 桂林 541004)

摘要:针对现用离子源工作时需外接庞大复杂的供气装置, 不利于便携的不足, 提出了一种基于离子风的敞开式离子源和微型气泵集成系统。设计了一种新型阵列式针-柱放电电极结构, 其可以在大气压下实现敞开式离子源和微型气泵双重功能。选用 0~−20 000 V 的负直流高压供电电源, 10 mm 的针-柱间距, 分别对单排针-单柱, 单排针-双柱, 双排针-双柱 3 种放电电极结构进行电晕放电, 并采用 testo 405-V1 风速计进行风速测量。结果表明, 双排针-双柱产生的风速最大。采用 COMSOL 多物理场仿真软件对 3 种电极结构进行离子风仿真, 并与实验结果对比, 结果吻合良好。以双排针-双柱电极结构进行了离子源和微型气泵集成系统实验。结果显示: 该结构放电产生的离子风最大为 2.11 m/s, 可以将装置后端处的乙酸样品吸入; 电离产生的最大电流信号为−10 nA 左右, 表明该装置实现了电离功能。本文所设计的离子源和微型气泵集成系统, 实现了后吸式进样并电离, 省去了庞大复杂的供气装置, 有望应用于便携式分析仪器中。

关键词:离子源; 微型气泵; 离子风; 后吸式进样; 电离

中图分类号:TH83 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3405

Ion source with posterior suck sampling and ionization by ionic wind

LI Hua^{1,2}, LI Yu-kai¹, GUO Chao-qun¹, CHEN Yao-bin¹,
HONG Xia-lei¹, LI Zhi-jiang¹, XIAO Wen-xiang¹, CHEN Zhen-cheng^{1*}

(1. School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of
Electronic Technology, GuiLin 541004, China;

2. Information Science Experiment Center of Guangxi, GuiLin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: 396270505@qq.com

Abstract: As existing ion source requires a complex external huge gas supply and is not convenient to be carried, this paper proposes a integrated system by an opened ion source and a micro gas pump based on ionic wind. A new needle array-cylinder discharge electrode structure was designed to realize the double functions of the open ion source and the micro air pump in ambient air. When the power supply was served as a negative DC high voltage of 0—−20 000 V, and the distance between the nee-

收稿日期:2015-05-06; **修订日期:**2015-07-01.

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); 广西自然科学基金面上资助项目(No. 2015GXNSFAA139304); 国家级大学生创新项目(No. XY290406); 广西高等教育教学改革工程项目(No. 2014GJJB144); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助项目(No. YQ15114); 广西信息科学实验中心资助项目(No. YB1420); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(No. YJXCS201559)。

dle and the cylinder was 10 mm, the corona discharge was implemented by three types of discharge electrode structures respectively: single-array-needle and single-cylinder, single-array-needle and double-cylinder, double-array-needle and double-cylinder, and the wind velocity was measured by the testo 405-V1 anemometer. The result shows that the maximum wind velocity is produced by the double-array-needle and double-cylinder structure. By using three types of electrode structures, COMSOL multi physic simulation software was applied to simulation of the ion wind and the results show that the simulation is coincided with that of the experimental results well. Based on the double-array-needle and double-cylinder structure, the integrated system experiment of the ion source and the micro air pump was conducted. The results demonstrate that the maximum ion wind generated by the structure discharge is 2.11 m/s, which can suck an acetic acid sample at the bottom into the device. Moreover, the maximum electric current value reaches about -10 nA tested by the Faraday cup, which shows that the device realizes the ionization function. In conclusion, the integrated system of the ion source and the micro air pump in this paper realizes posterior suck sampling and ionization, omits a huge complex external gas supplies, and is expected to be applied to portable analytical instruments.

Key words: ion source; miniature air pump; ionic wind; posterior suck sampling; ionization

1 引 言

近年来,随着工业化程度的不断提高,工业在给人类生活带来便利的同时,产生的有毒化学物质和污染物也对环境产生了严重威胁。另一方面,军事生化武器的发展也非常迅速,其攻击技术日益先进,化学袭击性不断提高^[1-2]。这些现状对有毒污染物和化学战剂的监测设备的应用提出了更高的要求。然而,目前这些设备体积仍然比较庞大,不便携。国内外学者针对微型化的化学分析检测仪器开展了大量研究,微型化的质谱仪、离子迁移谱、高场非对称波形迁移谱等便携式分析仪器相继出现,为分析检测各类化学物质提供了科学手段^[3-4]。这些分析仪器均要有一个稳定的,能够将被测物质充分电离的离子源,以便后续步骤的分析和检测^[5-6]。

目前,离子源主要有⁶³Ni 离子源、电喷雾离子源(ESI)、紫外灯离子源、激光解析电离源、电晕放电离子源和辉光放电电离源等。⁶³Ni 离子源不需外加电源,具有体积小、结构简单、稳定性好等优点,但其线性范围窄,容易产生放射性污染等不足限制了它的应用。紫外灯离子源由紫外灯发出一定能量的光子,将电离能低于光子能量的物质电离,具有结构简单、安装方便、离子碎片少等优点,但其体积较大,不利于微型化和系统集成。电喷雾离子源在质谱仪中得到了广泛的应用,电离

物质很广泛,但其工作离不开溶剂,水分子的存在会对电离产生较大干扰^[7-10]。电晕放电离子源是一种可在大气环境下产生气体放电现象的装置,常发生在极不对称的电场结构下,通过在电极两端施加高压形成不均匀电场将物质电离,其装置易于微型化,是近年来离子源研究的热点。刘坤等采用线-筒电极结构实现电晕放电和辉光放电应用于高场非对称波形离子迁移谱^[11]。檀景辉等采用针-网电极结构应用于离子迁移谱^[12]。刘欣等采用针-网、针-环电极结构应用于离子迁移色谱仪的研究^[13]。然而,这些离子源结构均需要外加一个庞大复杂的供气装置通入气体将样品带入离子源装置中,同时带走电离过程产生的热量,不利于离子源装置的微型化。

针对这一情况,本文提出了一种新型敞开式离子源和微型气泵集成系统,利用放电过程中产生的离子风将放置在装置后端进样口处的样品吸入,电离后进一步驱动离子向后续检测装置运动,省去了外接供气装置,为离子源装置的进一步微型化,实现化学分析仪器的便携式应用打下了基础。

2 实验装置

2.1 仪器与装置

根据电晕放电原理,以阵列式针-柱放电结构为核心的实验装置如图 1 所示。离子源装置由针

电极,柱电极和离子源框架等组成。针-柱电极之间加载 $0 \sim -20\,000\text{ V}$ 可调的负直流高压;针电极选用针尖曲率半径为 $47\ \mu\text{m}$ 的不锈钢针,接入负极性高压;柱电极选用直径为 4 mm ,长度为 60 mm 的紫铜圆柱。不锈钢针固定在两排电路板上,所用电路板为环氧玻璃纤维板,具有良好的绝缘性能。电路板尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,在需要固定针电极的地方打 1 mm 的孔并敷铜,然后将针电极放置在孔中并将导线一起焊接。相邻两针的间距设置为 8 mm ,每排电路板上固定 3 根针,因此两排针电极总共为 6 根针,实现阵列式排列。针-柱间距可通过离子源框架上的圆柱孔设置为 $4, 6, 8, 10$ 和 12 mm 。离子源框架尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 26\text{ mm}$,选用透明有机玻璃材料,便于观察内部的放电现象和实现高压绝缘。

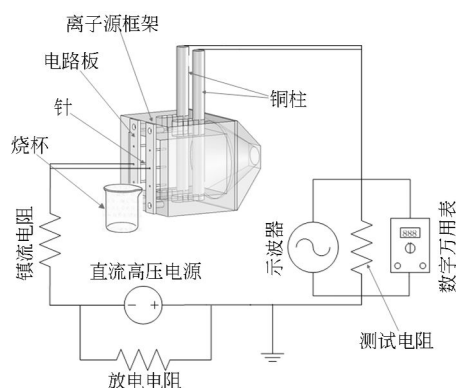


图 1 离子源装置及外围电路图

Fig. 1 Sketch of ion source device and peripheral discharge circuit

放电回路中,在直流高压电源和针电极之间串联一个阻值为 $16\text{ M}\Omega$ 的镇流电阻,用于抑制放电过程中产生的电弧;电源两端并联一个 $12\text{ M}\Omega$ 的放电电阻,用于放电结束后电源电压的快速下调。阻值为 $1\text{ k}\Omega$ 的测试电阻两端分别连接 TDS1002B-SC 泰克示波器和数字万用表,示波器用于观察放电过程中的波形,数字万用表读取测试电阻两端的电压有效值,从而可以间接获取放电回路的放电电流值(电压值除以测试电阻阻值)。将装有挥发性样品的烧杯放置于离子源框架后端,便于进样。离子源框架的出口制成喷嘴状,对产生的离子风起到聚拢作用,同时也便于对风速的测量。testo 405-V1 风速计放置于锥形喷嘴出口的 3 mm 处,用于测量电离过程中产生的

离子风流速。实验现象通过数码相机拍摄记录。

2.2 样品与检测方法

实验检测系统如图 2 所示。样品试剂选用乙酸,乙酸具备挥发性,满足实验要求。将放置乙酸的烧杯置于离子源装置的后端,通过放电形成的离子风吸入离子源装置进行电离。为了检验离子源装置的电离功能,将紫铜材料制作的法拉第杯放置于装置出口来收集离子撞击到法拉第杯上所产生的微弱电流。法拉第杯后面级联一个 Keithley 6487 静电计,实时检测法拉第杯上形成的微弱电流。静电计通过 RS232 串口和装有 Labview 软件的计算机连接,用 Labview 编写的上位机显示和存储静电计采集到的电流数据,并将数据转换为波形实时输出显示。

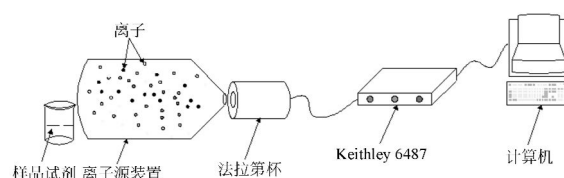


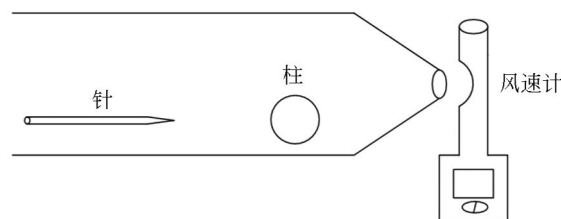
图 2 微弱电流信号检测实验系统

Fig. 2 Experimental system for weak current signal testing

3 实验结果与分析

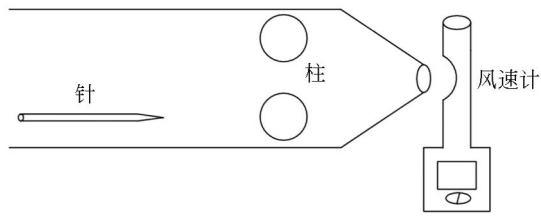
3.1 不同针-柱结构对风速的影响

根据针-柱结构的不同组合,分别设计了单排针-单柱,单排针-双柱,双排针-双柱 3 种放电结构,如图 3 所示。在针-柱间距为 10 mm ,放电阴极针尖曲率半径为 $47\ \mu\text{m}$,阳极柱直径为 4 mm ,镇流电阻阻值为 $16\text{ M}\Omega$,测试电阻阻值为 $1\text{ k}\Omega$,大气压环境,无外界气流通入以及室温条件下,进行了 3 种针-柱结构放电实验,并用 testo 405-V1 风速计测量风速。



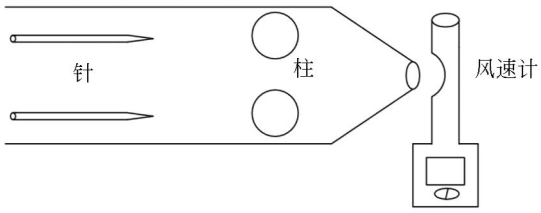
(a) 单排针-单柱

(a) Single-array-needle and single-cylinder



(b)单排针-双柱

(b)Single-array-needle and double-cylinder



(c)双排针-双柱

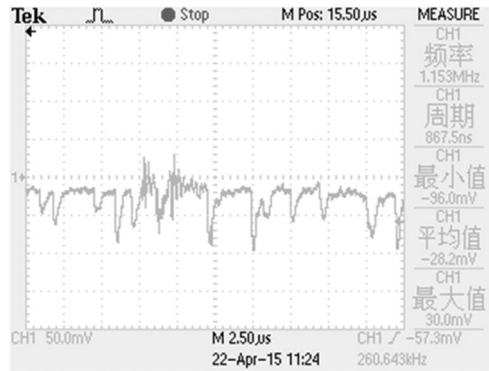
(c)Double-array-needle and double-cylinder

图 3 3 种不同结构放电产生离子风风速测量

Fig. 3 Measurements of ionic wind velocity with three different structures

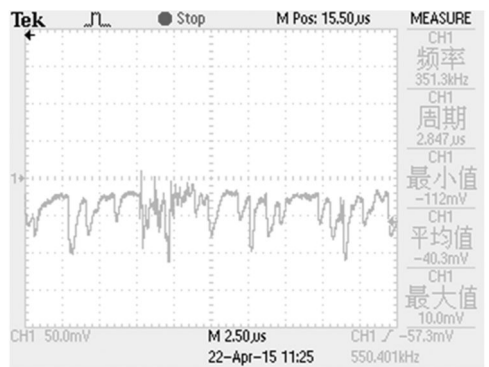
实验过程中,高压直流电源的电压从 0 V 开始逐渐升高。当放电电压增加到 -11 kV 时,示波器观察到的放电波形如图 4 所示。3 种电极结构放电所产生的放电波形都是特里切尔波形,而特里切尔放电波形是电晕放电的典型特征,因此,放电波形说明针-柱电极结构在大气压环境下产生了稳定的电晕放电。由于是多根针对柱放电,因此,图 4 中所示波形为多个特里切尔波形的叠加,且波形中出现直流分量,说明放电正处于由电晕放电向辉光放电和火花放电的过渡阶段。

在与图 3 所示实验同样的条件下,针-柱间的电压-电流关系曲线如图 5(a)所示。放电开始阶段(点 A 以下,即 -7 000 V 以下),在相同电压条件下,3 种结构的放电电流值比较接近;随着电压的继续升高,在相同的放电电压条件下,双排针-双柱放电电流最大,单排针-双柱次之,单排针-单柱放电电流最小。这是由于放电开始阶段,由于放电电压较小,针-柱电极之间相应的电场强度也较小,处于电晕放电的初始阶段,此时放电电流较小,且针只能和正对的柱放电,斜对面的柱由于距离较大,电场强度值达不到起晕电压的要求,不能放电,因此 3 种结构所产生的放电电流值比较接近。随着放电电压的升高,针-柱之间的电场强度



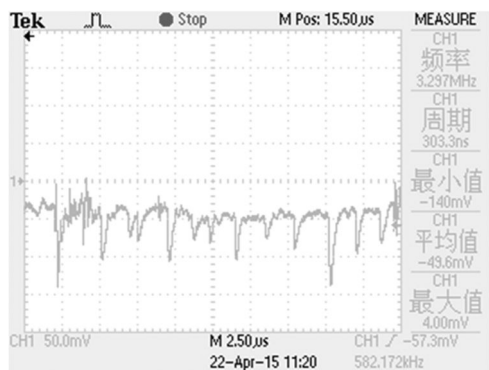
(a)单排针-单柱

(a)Single-array-needle and single-cylinder



(b)单排针-双柱

(b)Single-array-needle and double-cylinder



(c)双排针-双柱

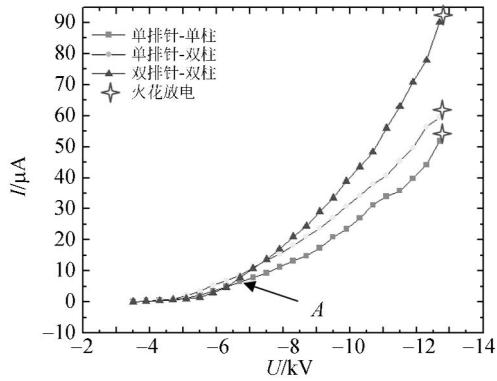
(c)Double-array-needle and double-cylinder

图 4 3 种针-柱电极结构的放电波形

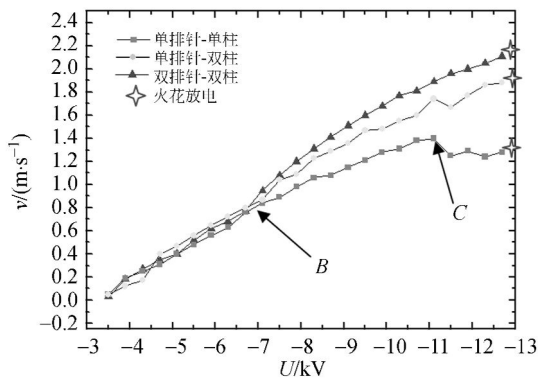
Fig. 4 Discharge waveforms of three kinds of needle-to-cylinder electrodes

不断增大,放电越来越剧烈,针不仅能和正对的柱产生放电,而且能和斜对面的柱产生放电,因此,双排针-双柱放电所产生的放电电流最大,单排针-单柱的电流最小。当放电电压超过 -12 700 V

后,将产生火花放电(如图 5 所示),此时放电回路将产生很大的电流脉冲,对电源、示波器等仪器造成损害,应尽量避免。因此,实验中所加载的电压最大为-12 700 V。



(a)电压-电流关系
(a)U-I



(b)电压-风速关系
(b)U-v

图 5 不同针-柱结构下输出电压及回路电流和风速的关系

Fig. 5 Relationships of loop current and velocity with output voltage

图 5(b)为放电电压和产生离子风流速的关系,表明电晕放电的同时产生了一定流速的离子风。在开始阶段(点 B 以下),3 种结构放电产生的离子风流速比较接近。随着放电电压的增加,双排针-双柱放电产生的风速最大,单排针-双柱次之,单排针-单柱放电产生的风速最小。分析其原因是由于离子风流速与放电电流值成正相关^[14]。在开始阶段,3 种针-柱结构放电产生的放电电流值接近;点 B 以上,双排针-双柱放电电流最大,单排针-双柱次之,单排针-单柱放电电流最

小(与图 5(a)点 A 以上相对应),因此对应的风速双排针-双柱最大,单排针-双柱次之,单排针-单柱最小,理论分析与实验结果相符合。图 5(b)中,点 C 以后随着放电电压的增大风速反而有所减小,这是由于随着放电接近火花放电,风速不断提高,气流发生紊乱,从而使风速减小。

在放电电极针尖曲率半径为 47 μm,阳极柱直径为 4 mm,镇流电阻阻值为 16 MΩ,测试电阻阻值为 1 kΩ,大气压环境,无外界气流通入,室温条件下,分别取双排针-双柱间距为 4,6,8,10 和 12 mm 进行放电实验,直到发生火花放电。采用 testo 405-V1 风速仪测量不同间距的离子风风速,实验结果如图 6 所示。由实验结果可知,随着针-柱间距的增大,发生火花放电的阈值电压也不断提高,对应的最大离子风风速也不断增大。当针-柱间距为 10 mm 时离子风风速达到最大值 2.11 m/s,而间距为 12 mm 时的最大风速为 2.07 m/s,反而小于间距 10 mm 的最大风速。这是由于随着间距的增大,虽然可加载的放电电压值不断增加,但空气阻力也随之增大,相同电压下的电场强度值不断减小,当前者带来的风速增大值等于或者小于后者带来风速减小值时,双排针-双柱间距的增大就不能进一步增大带离子风风速。因此,当双排针-双柱间距为 10 mm 时,离子风风速最大,在以下的仿真和实验中选择间距为 10 mm 的双排针-双柱结构。

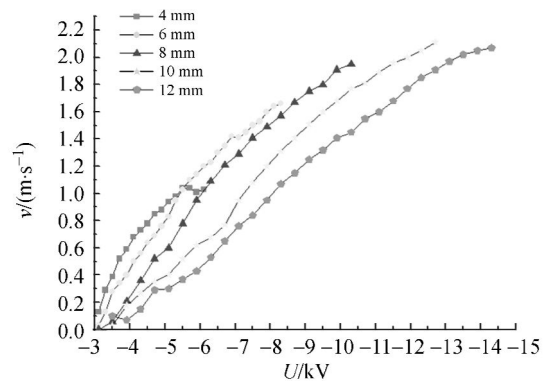


图 6 不同间距双排针-双柱的离子风风速

Fig. 6 Ionic winds with different gaps of double row needles-double cylinders

3.2 COMSOL 软件仿真

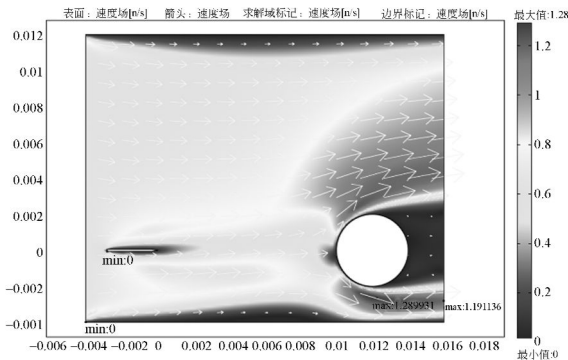
采用 COMSOL Multiphysics 软件对 3 种不同结构的针-柱放电所产生的离子风进行仿真分

析。针-柱电晕放电所产生的离子风涉及电场、流场等多物理场耦合,各个物理过程对应的 3 个控制方程为^[15]:

$$\begin{cases} \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \\ J = \mu_E E \rho + U \rho - D \nabla \rho \\ \rho_{air} U g \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U - \rho \nabla V \end{cases}, (1)$$

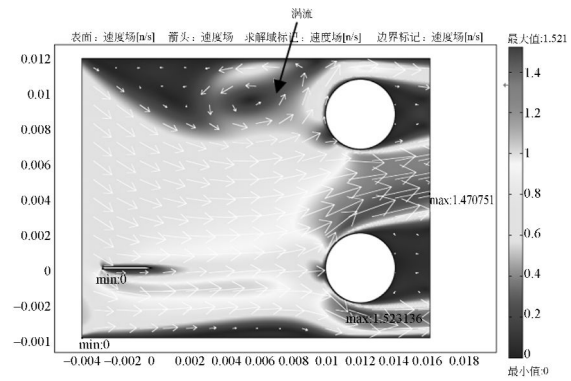
式中 3 个方程由上而下分别为电场分布泊松方程、电荷传输方程和流场分布纳维尔-斯托克斯方程(N-S 方程)。其中: V 为放电电极两端电压, ρ 为空间电荷密度, ϵ_0 为介电常数, J 为电流密度, μ_E 为离子迁移率, E 为电场强度, U 为流速, D 为扩散系数, ρ_{air} 为空气密度, p 为空气压力, μ 为空气黏度系数。

式(1)中 3 个方程分别通过 COMSOL 多物理场仿真软件中的静电(es)模块、PDE 模块、不可压缩 Navier-Stokes(N-S)模块进行耦合求解。仿真相关参数设置为:介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ C/(V·m);离子迁移率 $\mu_E = 2.1 \times 10^{-4}$ m²/(V·s);扩散系数 $D = 5.3 \times 10^{-5}$ m²/s;空气密度 $\rho_{air} = 1.23$ kg/m³;空气黏度系数 $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ N·s/m²。针尖曲率半径为 47 μm,针-柱间距为 10 mm,柱直径为 4 mm。仿真计算结果如图 7 所示。3 种结构的针-柱电极所产生的离子风方向都为由左向右,因此针-柱后端将产生一定的后吸力。单排针-单柱、单排针-双柱、双排针-双柱的最大风速值分别为 1.29, 1.521 和 1.698 m/s,和实验所得到的 1.15, 1.36 和 1.51 m/s 相比,两者基本吻合。其差异是由于仿真忽略了外界温湿度、气流管道黏滞力、管道长度等因素的影响。3 种结构的最大风速值都出现在柱子的两侧,且单排



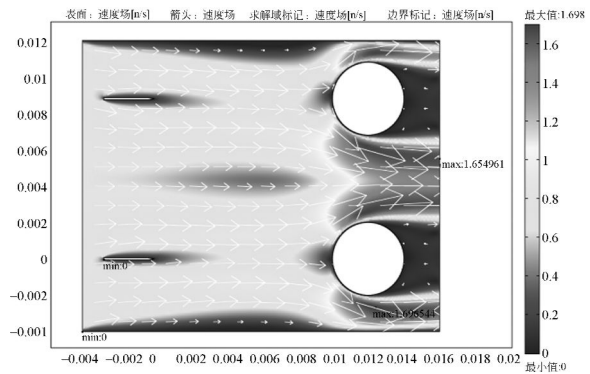
(a)单排针-单柱

(a)Single-array-needle and single-cylinder



(b)单排针-双柱

(b)Single-array-needle and double-cylinder



(c)双排针-双柱

(c)Double-array-needle and double-cylinder

图 7 3 种不同针-柱结构风速场仿真

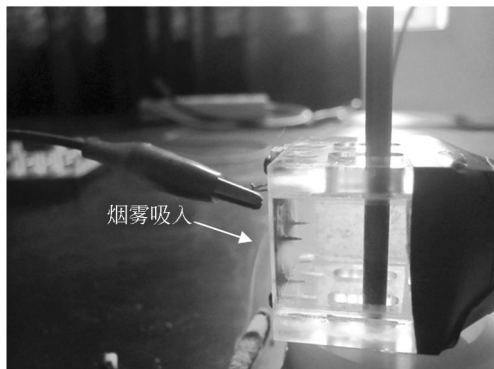
Fig. 7 Simulation of wind fields for three different needle-to-cylinder structures

针-双柱由于电极结构的不对称,流场中出现了涡流现象,不利于气流的稳定。双排针-双柱产生的气体流速方向的分布较为稳定,且产生的气体流速最大,有利于样品的吸入和电离。

3.3 乙酸进样和电离

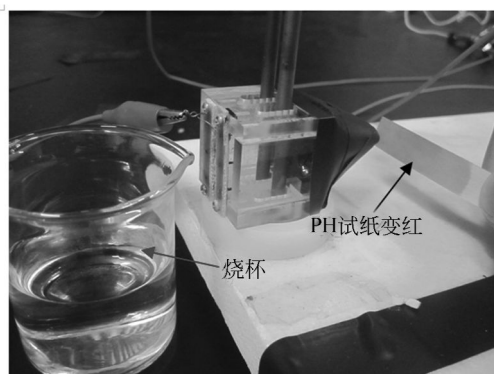
根据上述实验和仿真分析,双排针-双柱、针-柱间距为 10 mm 时放电产生的离子风最大,因此选用此种结构实现样品的进样和电离,其他实验条件不变。

为了更形象观察离子源装置对后端的吸力作用,当电源电压为 -11 000 V 时,将烟雾发生装置放置于离子源装置后端。此时可以观察到烟雾在吸力的作用下进入离子源装置,如图 8(a)所示。该现象表明电晕放电所产生的离子风在后端产生吸力,将烟雾吸入,可以实现后吸式进样。



(a) 烟雾从后端吸入

(a) Smoke entered from back-end



(b) 乙酸吸入和电离

(b) Acetic acid sucking and ionization

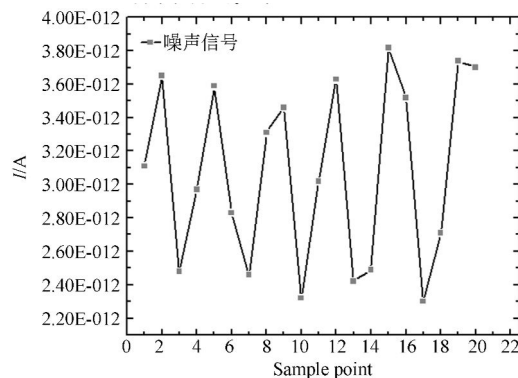
图 8 进样和电离

Fig. 8 Sampling and ionization

将 50 mL 的挥发性有机物乙酸 (CH_3COOH , 广东光华化学厂有限公司) 放置在位于离子源装置后端的烧杯中, 如图 8(b) 所示。在装置锥形喷嘴处夹持一张用蒸馏水湿润的 pH 试纸, 放置 10 min 后 pH 试纸没有变红, 说明仅靠试剂的挥发性, 乙酸分子不足以通过离子源装置。在针-柱间加载负直流电压 $-11\ 000\ \text{V}$, 其他条件不变, 经过 5 s 后 pH 试纸很快变红, 说明离子风将烧杯中挥发出来的乙酸气体吸入装置中, 并进一步驱动乙酸气体分子到达装置出口处, 实现了对乙酸的后吸入进样。

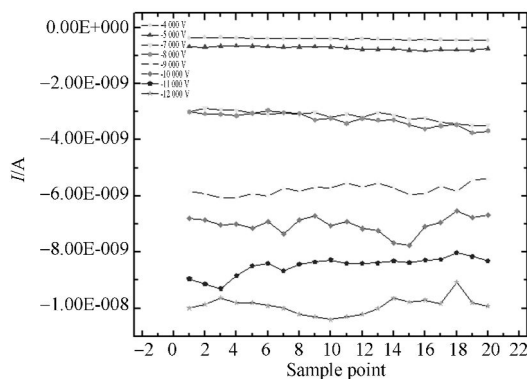
为了验证离子源装置的电离功能, 采用如图 2 所示的微弱电流信号检测系统进行乙酸电离实验。针-柱之间没有加载电压时, 以 0.5 Hz 的采样频率对噪声信号进行采样, 数据曲线如图 9(a) 所示, 此时噪声信号在 pA 量级。保持其他条件不变, 在针-柱间加载负直流高压, 分别在放电电

压为 $-4, -5, -7, -8, -9, -11, -12\ \text{kV}$ 时采样, 结果如图 9(b) 所示。随着放电电压的增大, 电流信号值随之增大。放电电压调到 $-12\ \text{kV}$ 时, 电流信号最大为 $-10\ \text{nA}$ 左右, 远远大于 pA 级别的噪声电流, 验证了离子源装置采用后吸式进样实现了对乙酸的电离, 且产生的电流信号强度和稳定性满足分析仪器对离子源的要求^[6]。



(a) 0 V 噪声信号

(a) Noise signals at 0 V



(b) $-4\ 000 \sim -12\ 000\ \text{V}$ 检测到的电流值

(b) Currents in $-4\ 000 \sim -12\ 000\ \text{V}$

图 9 不同电压值下采集的微弱电流信号

Fig. 9 Weak current signals at different voltage values

4 结 论

本文根据便携式化学分析仪器对离子源和气泵小型化、集成化的要求, 提出了一种基于离子风的新型敞开式离子源和微型气泵集成系统, 介绍了该集成系统的结构和工作原理。然后, 通过仿

真和实验,对比研究了在大气压环境下单排针-单柱,单排针-双柱和双排针-双柱 3 种放电结构,得出双排针-双柱结构放电时产生的离子风最大。最后,完成了微型气泵和离子源电离验证实验。

参考文献:

- [1] CAYGILL J S, DAVIS F, HIGSON P J. Current trends in explosive detection techniques[J]. *Talanta*, 2012, 88:14-29.
- [2] MYLES L, MEYERS T P, ROBINSON L. Atmospheric ammonia measurement with an ion mobility spectrometer[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(30): 5745-5752.
- [3] 张杰,李灵峰,郭大鹏,等. 芯片级高场非对称波形离子迁移谱技术检测危险品[J]. *分析化学*, 2013, 41(7):986-992.
- ZHANG J, LI L F, DUO D P, *et al.*. Determination of hazardous chemicals by microchip-based field asymmetric waveform ion mobility spectrometric technology [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2013,41(7):986-992. (in Chinese)
- [4] LI H, WANG X H, TANG F, *et al.*. Design of biochemical sensor based on high-field asymmetric ion mobility spectrometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2218-2223.
- [5] 刘坤,唐飞,王晓浩,等. 一种用于高场非对称波形离子迁移谱系统的新型敞开式化学离子源[J]. *物理化学学报*,2009,25(8):1662-1670.
- LIU K, TANG F, WANG X H, *et al.*. Novel chemical ion source for a high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometer used under ambient conditions [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2009, 25(8): 1662-1670. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] MILLER R A, NAZAROV E G, EICEMAN G A, *et al.*. A MEMS radio-frequency ion mobility spectrometer for chemical vapor detection[J]. *Sensors*

实验结果证明:放电产生的离子风最大为 2.11 m/s,可以将装置后端处的乙酸样品吸入;电离产生的最大电流信号为-10 nA 左右,基本满足便携式化学分析仪器的要求。

- and Actuators A: Physical*, 2001,91(3): 301-312.
- [8] BRAMWELL C J, COLQRAVE M L, CREASER C S, *et al.*. Development and evaluation of a nano-electrospray ionisation source for atmospheric pressure-ion mobility spectrometry [J]. *Analyst*, 2002, 127(11):1467-1470.
- [9] DAREN S L, PAUL V, RAANAN A M, *et al.*. Characterization of gasphase molecular interactions on differential mobility ion behavior utilizing an electrospray ionization-differential mobility-mass spectrometer system [J]. *Analytical Chemistry*, 2006,78: 96-106.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 刘欣. 用于离子迁移色谱仪的负电晕放电电子源的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- LIU X. *The Negative Corona Discharge Electron Source for Ion Mobility Spectrometry* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012. (in Chinese)
- [14] 李华,韦昌严,曾德查,等. 针-柱结构敞开式离子

源和微型气泵集成系统的放电特性[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1531-1537.

LI H, WEI CH Y, ZENG D CH, *et al.*. Discharge properties of integrated system of ambient ion source and micro air pump based on needle-to-cylinder structure [J]. *Opt. Precision Eng.*,

2014, 22(6):1531-1537. (in Chinese)

[15] ALEXANDRE A M. Simulation of a wire-cylinder-plate positive corona discharge in nitrogen gas at atmospheric pressure [J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19:063502-1-6.

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,目前主要从事微型生化分析仪器和 MEMS 等的研究。
E-mail:lihua@guet.edu.cn



李玉凯(1987—),男,河南洛阳人,硕士研究生,2013 于郑州大学获得学士学位,目前主要从事微型生化分析仪器的研究。E-mail:396270505@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)