

密闭式电喷雾离子源中流场的分布特征

高方园^{1,3} 张庆合³ 黄兆亮² 王伯良² 张维冰^{*1}

¹ (上海市功能性材料化学重点实验室, 华东理工大学化学与分子工程学院, 上海 200237)

² (南京理工大学化工学院, 南京 210094) ³ (中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘 要 利用流体力学模拟软件 Fluent 构建了电喷雾离子源的二维模型, 并基于所构建的模型探讨了离子源构型、辅助气引入方式、气体流速对源内流场分布的影响。结果表明, 相比于其它两种结构, 矩形结构的离子源能够提供较为稳定的流场。通入同轴辅助气和正交方向辅助气都能够起到聚集样品喷雾的效果, 但作用效果却并不相同。提高同轴辅助气流速, 能够增大喷口处混返区域, 改变气流驻点位置。而增大正交方向辅助气流速, 虽然同样能够提高源内各处气体流速, 但并不会改变喷口处混返区域的大小。以 Turbo V 离子源为研究对象, 考察了喷针位置、辅助气流速对溶液总离子流的影响, 实验趋势与模拟结果基本吻合。

关键词 电喷雾离子源; 气体流场分布; Fluent 模拟软件

1 引言

电喷雾离子源是液相色谱-质谱联用中最常见的离子源之一。作为一种软电离方式, 电喷雾离子源能够形成样品的多电荷离子, 适用于热不稳定、极性化合物的分析, 在蛋白组学^[1]、代谢组学^[2]、食品科学^[3]等领域有广泛的应用。离子化机理的研究, 对于优化离子源构型、操作参数, 并最终提高仪器检测的灵敏度有重要意义。

为得到电喷雾离子源中样品离子化的各种信息, 除了充分利用离子淌度质谱 (IM-MS)^[4]、傅里叶变换-离子回旋共振质谱 (FT-ICR-MS)^[5]、飞行时间质谱^[6]等高分辨率质量分析器之外, 各种成像和模拟技术也逐渐得以应用。例如, 离子源中液滴的粒径分布等信息可以通过多普勒相位仪 (PDA) 直接得到^[7~9], 这也是目前使用最为广泛的技术之一。但是由于 PDA 精度有限, 难以捕捉到直径较小的液滴, 因此更精细的研究还需要借助其它高精度的成像技术。Gomez 等^[10]采用缩影成像技术得到电喷雾离子源中带电液滴的产生过程, 证明母液滴通过非均匀爆裂可产生大约 20 个子液滴。Nemes 等^[11]利用快速成像技术, 成功得到不同喷雾模式中泰勒锥和带电液滴的图像。将分子动力学模拟的方法用于离子化过程中中球状蛋白质和链状分子的分子构型的模拟, 形象说明两种不同构型的分子离子化过程的差异^[12~14]。

Fluent 软件是进行计算流体动力学模拟常用的软件之一, 具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能, 可用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动, 在气体动力学^[15]、流体扩散模拟^[16]、热传递^[17]和化学反应^[18]等方面均有广泛应用。目前, Fluent 软件已被用于电喷雾离子源中样品带电过程^[19]、样品溶液流型^[20]、离子传输^[21]等的模拟。本研究将 Fluent 软件用于电喷雾离子源中气体流场分布的模拟, 详细考察了离子源结构、辅助气体的通入方式、流速对源内流场分布的影响, 进一步以 Turbo V 离子源为研究对象, 对模拟结果进行实验验证。

2 实验部分

2.1 离子源模型的建立

电喷雾离子源为三维轴对称结构, 是关于喷针中心轴所在直线的轴对称体。该结构类型的流体动力学问题可以简化为二维轴对称模型。采用 Fluent 14.5 构建了 3 种离子源模型 (图 1)。模型 (a) 计算

2016-04-23 收稿, 2016-07-20 接受

本文系国家自然科学基金 (No. 21235005) 和国家重大仪器设备开发专项 (No. 2012YQ120044) 资助。

* E-mail: weibingzhang@ecust.edu.cn

区域大小为 $52 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 共计 101250 个网格。中心的无厚度管状通道表示毛细管喷嘴, 管长 16.5 mm , 内管径为 0.1 mm 。辅助气有两种通入方式: 同轴方向 (1 号进气口) 和正交方向 (2 号进气口)。模型 (b) 的计算区域为 $46 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$, 区域内计算网格为 210000 个。中心的无厚度管状通道表示液体进入的管道, 内管径为 1 mm 。模型 (c) 的计算区域为 $31 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 计算网格为 298901 个。为得到更精确的驻点附近气流状况, 计算模型采用分区域划分网格法, 在喷管喷口附近进行了网格加密, 往外围网格逐渐变得稀疏。辅助气为氮气, 喷嘴中的液体为水。

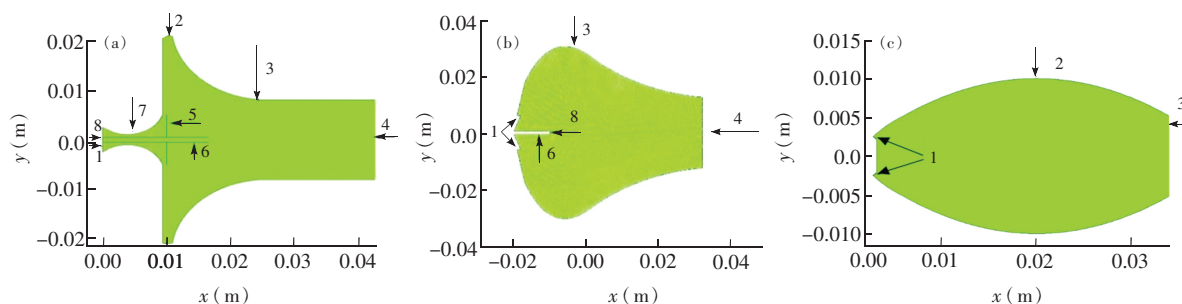


图1 矩形离子源的二维几何模型

图中 1 和 2 为辅助气入口; 3 和 7 表示模型边界; 4 表示压力出口, 出口表压为 0; 5 表示阻挡空气流动的挡板; 6 表示毛细管, 管道为无厚度壁面; 8 表示液体入口

Fig. 1 Two-dimension models of ESI source

1 and 2 are entrances of auxiliary gas; 3 and 7 are boundary; 4 is pressure outlet; 5 is orifice plate; 6 is capillary with zero-thickness; 8 is entrance of solvent.

模型中用到的方程如下所示^[22]:

气相控制方程采用基于雷诺平均的纳维-斯托克斯方程, 使用 SIMPLE 算法对气相流场进行求解, 其中方程组具体形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度 (kg/m^3), v 为流体运动速度矢量。

连续相的动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \right] + \Delta \rho g_i + \sum \rho_k (v_{ki} - v_i) / \tau_{rk} + v_i S + F_{Mi} \quad (2)$$

采用湍流模型的 $k-\varepsilon$ 模型, 其输运方程形式如下:

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - Y_M + S_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\sigma_k}{\sigma_\varepsilon} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能产生, G_b 为由于浮力引起的湍动能, Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响, S_k, S_ε 为自定义源项, μ_t 为湍流粘度, 其中 $\mu_t = C_\mu \rho K^2 / \varepsilon$ 。在 Fluent 中默认常数值为 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, 湍流动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为: $\sigma_k = 1.3$, $\sigma_\varepsilon = 1.0$ 。

二维多相流控制方程为:

$$\frac{\partial (\rho \varphi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v \varphi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + S \quad (5)$$

式中: φ 为通用变量, v 为速度分量, Γ 为广义扩散系数, S 为广义源项。

2.2 仪器与试剂

相关实验在配有 Turbo V™电喷雾离子源的 QTrap 5500 (Applied Biosystems /MDS SCIEX ,美国)上进行。乙腈(色谱纯,美国 Fisher 公司)。实验用水均为 Milli-Q (美国 Millipore 公司)超纯水。样品溶液为乙腈-水(50:50, V/V)。

2.3 质谱条件

溶液以 20 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的流速由注射泵直接通入质谱。采用 Scan 模式对溶液的总离子流进行扫描,质量范围 m/z 50 ~ 500。毛细管电压 5000 V,离子源温度 300℃,帘气流速 20 psi (137.900 kPa),GS1 雾化气(同轴气)30 psi (206.850 kPa),GS2 辅助加热气(非同轴气)35 psi (241.325 kPa),去簇电压 80 V。

3 结果与讨论

3.1 离子源结构对流场分布的影响

为模拟离子源结构对气体流场分布的影响,分别在图 1 所示的 3 种结构源中通入流速为 10 m/s 的同轴气。结果如图 2 所示,3 种离子源中均存在明显的气流混返(漩涡位置)和驻点(辅助气流速近似为零),其中,结构(a)中的混返区域大小约为 $2 \times 0.006 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}$,结构(b)中混返区域约为 $2 \times 0.035 \text{ m} \times 0.020 \text{ m}$,结构(c)中混返区域约为 $2 \times 0.020 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}$ 。3 种结构中的气体流场分布存在明显差异,其中结构(a)中的混返区明显小于其它两种结构,流场分布更加均匀、稳定。基于以上模拟结果,后续模拟及实验均采用结构(a)型离子源。

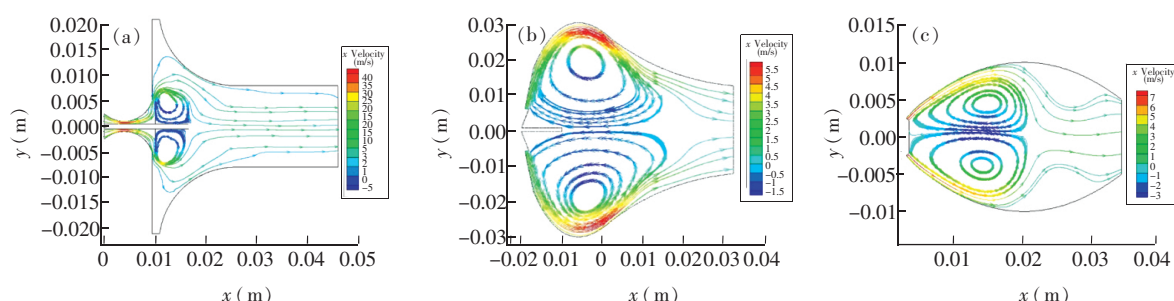


图 2 3 种离子源结构中气体流场分布(同轴气流速均为 10 m/s)

Fig. 2 Gas flow distribution in three ESI sources (flow rate of coaxial gas :10 m/s)

3.2 辅助气对流场分布的影响

模拟了辅助气对电喷雾离子源中液体流场分布的影响。在模型(a)中连续通入流速为 5 m/s 的水(约 23.8 $\mu\text{L}/\text{min}$),分别针对无辅助气和通入不同方向的辅助气时,源内气体和液体的流场分布情况进行模拟(图 3)。由图 3a 可知,当无辅助气时,喷口处产生的液体喷雾扩散明显(浅蓝色部分),几乎没有喷雾能够传输进入质量分析器;而当在模型中分别通入 20 m/s 同轴辅助气(图 3b)或正交辅助气(图 3c)时,两种给气方式均能在喷口的轴向提供均匀、稳定的气体流场,从而聚集喷雾,提高喷雾的传输效率。

比较图 3a 和 3b 可知,不同的辅助气引入方式能够导致源内气体流场的不同。另外,气体流速的变化也有可能引起离子源内气体流场分布的差异。

3.3 辅助气的通入方式和辅助气流速对流场分布的影响

模型(a)中同时通入流速为 5 m/s 的同轴辅助气和正交辅助气时,源内的气体轨迹图如图 4 所示。喷针两侧产生明显气流混返(与喷雾喷出的方向相反),喷口处存在驻点,沿喷针轴向,辅助气所形成的气体轨迹线均匀,气流稳定(稳定域)。假设喷口位于混返区域,由于反方向气流的作用,喷雾的传输效率可能严重降低;若喷口位于驻点前方的稳定区域,虽然轴向气流能够对喷雾产生较好的聚集,但同时喷雾可能受气流干扰产生波动,最终影响质谱信号的稳定性。由此推断,当喷口位于驻点位置时,源内气流既能较好地聚集喷雾,也能保证喷雾的稳定性,此时采集的质谱信号最佳。

3.3.1 同轴辅助气流速对流场分布的影响

模拟了不同流速的同轴辅助气对源内气体流场分布的影响。

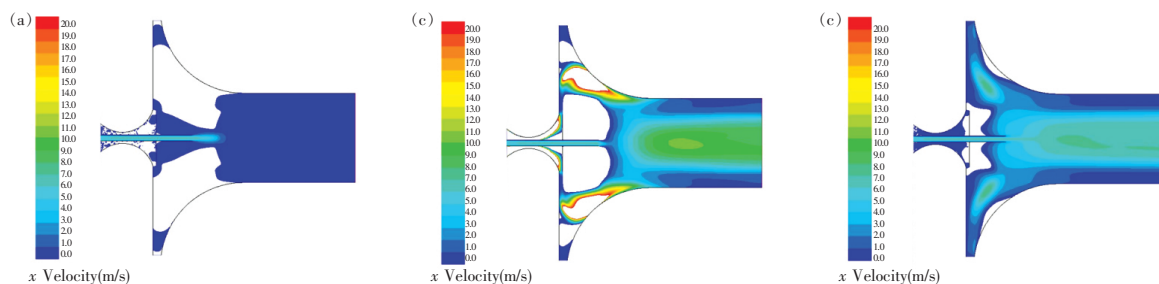


图3 无辅助气 (a)、通入同轴辅助气 (b) 和正交方向辅助气 (c) 时源内的流场分布 喷针中液体流速为 5 m/s ,同轴辅助气 (b) 和正交方向辅助气 (c) 均为 20 m/s

Fig. 3 Velocity distribution in ESI without auxiliary gas (a), with coaxial gas (b) and with orthogonal gas liquid flow rate in spray needle :5 m/s , flow rate of coaxial gas and orthogonal gas :20 m/s

响。将正交气的流速设置为 5 m/s , 当同轴辅助气流速为 5、10、20 和 30 m/s 时 , 源内气体的所形成的气体轨迹线均与图 4 类似。分别比较了同轴气流速对喷口径向 (图 5a) 和轴向 (图 5b) 的气体流速的影响。如图 5a 所示 , 当同轴气流速由 5 m/s 增至 30 m/s 时 , 喷口径向的混返区和非混返区的气体流速均明显增大 ; 当同轴气流速为 5 m/s 时 , 喷口径向混返 ; 10 m/s 时 , 喷口附近产生气流混返 (y 分别在 -0.0064 ~ -0.0020 m 和 0.0020 ~ 0.0064 m 之间) ; 进一步提高流速至 30 m/s , 混返区域为 $y = -0.0076 \sim 0.0076$ m 之间。提高同轴气流速 , 喷口处混返区域增大。

同轴气流速对喷针轴向气流的影响如图 5b 所示。当同轴气流速为 5 和 10 m/s 时 , 喷针轴向气流无混返 ; 流速增至 20 m/s 时 , 喷口处气流产生混返 ; 流速进一步增至 30 m/s , 混返区域进一步增大。

由此可知 , 提高同轴气体流速 , 能够增大喷口附近气流的混返区域 , 从而改变源内的驻点位置。

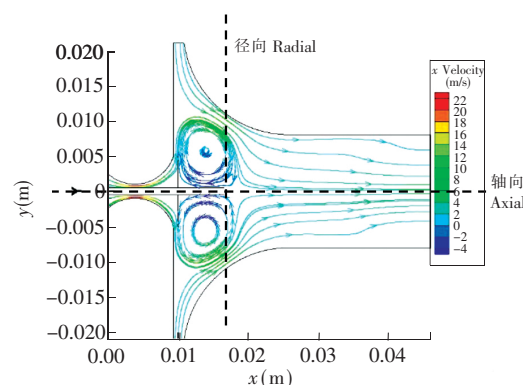


图4 两种辅助气所形成的气体轨迹图 (图中同轴气和正交气的流速均为 5 m/s)

Fig. 4 Trajectory diagram of coaxial gas and orthogonal gas (The flow rates of coaxial gas and orthogonal gas : 5 m/s)

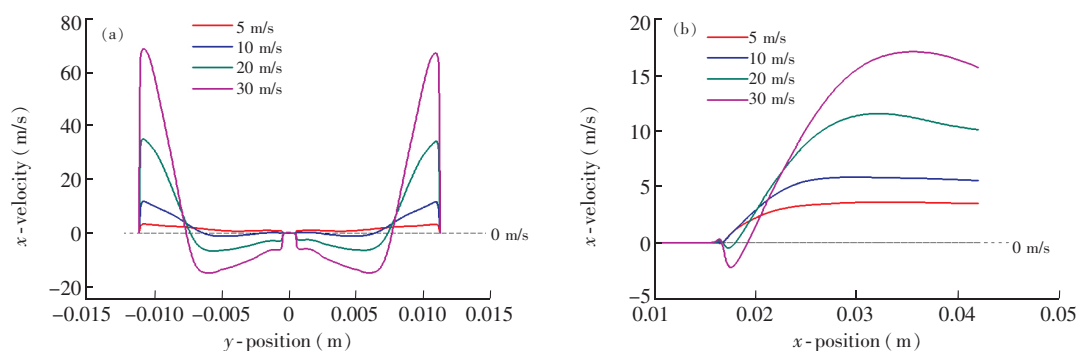


图5 同轴气流速分别为 5、10、20 和 30 m/s 时 , 喷口径向 (a) 和喷针轴向方向 (b) 上气体流速随距离的变化情况 (采用矩形模型 , 正交气的流速为 5 m/s)

Fig. 5 Radial gas velocity (a) and axial gas velocity (b) along with y-position when the flow rate of coaxial auxiliary gas was 5 , 10 , 20 and 30 m/s (The model (a) was applied , the flow rates of orthogonal gas was 5 m/s)

3.3.2 正交辅助气流速对流场分布的影响 除同轴气以外 , 商用离子源中常通入非同轴辅助气 , 用于促进溶剂蒸发。图 1a 模型中的 2 号进气口即用于考察正交辅助气对离子源内气体流场分布的影响。同样模拟了同轴辅助气为 5 m/s , 正交辅助气流速分别为 5 , 10 , 20 和 30 m/s 时喷口附近的气体流场分

布,结果如图 6 所示,改变正交气流速,喷口径向始终无混返区域出现(图 6a);当正交气流速由 5 m/s 增至 10 m/s 时,轴向气流产生混返;增大流速,混返区域无明显变化,但气流混返程度有所增加(图 6b)。与图 5 中同轴气的模拟结果对比发现,同轴气对于离子源内气体流速、混返区域的影响明显强于正交气,证明不同的气体引入方式能够直接影响源内的气体流场分布。

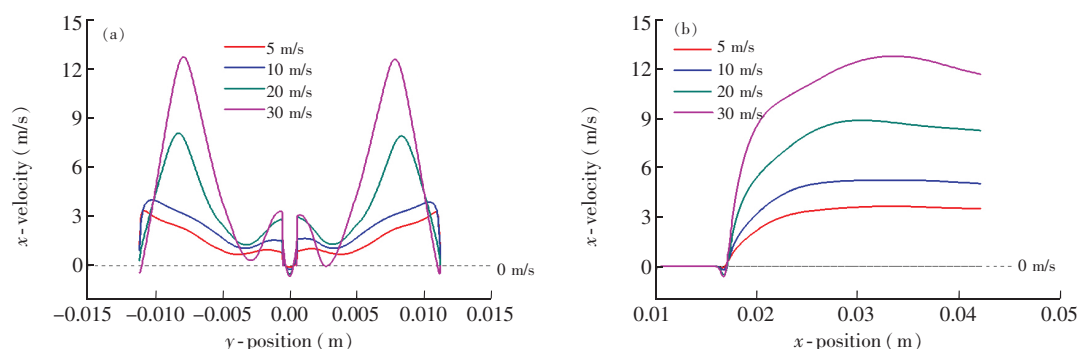


图 6 正交辅助气流速分别为 5, 10, 20 和 30 m/s 时,喷口径向 (a) 和喷针轴向方向 (b) 上气体流速随距离的变化情况 (采用矩形模型,同轴气的流速为 5 m/s)

Fig. 6 Radial gas velocity (a) and axial gas velocity (b) along with y -position when the flow rate of orthogonal auxiliary gas was 5, 10, 20 and 30 m/s (The model (a) was applied, the flow rates of coaxial gas was 5 m/s)

3.4 喷针位置与辅助气流速对 MS 信号影响的实验验证

相关实验在配有 Turbo VTM 电喷雾离子源的 QTrap 5500 上进行。该离子源既包括同轴辅助气,也包括两侧 60° 方向通入的非同轴辅助气(图 7),与模型 (a) 的结构类似。

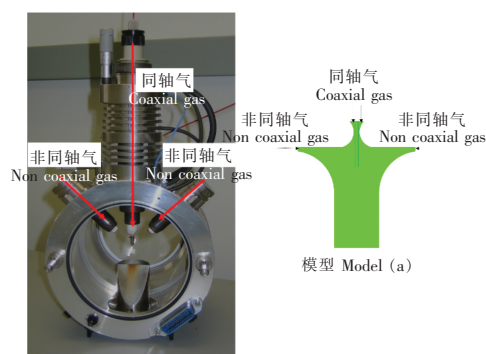


图 7 AB SCIEX 公司的 Turbo V 离子源示意图

Fig. 7 Diagram of Turbo V ion source (AB SCIEX)

3.4.1 喷针垂直位置对总离子流的影响 由源内气体轨迹线(图 4)可知,喷针轴向的不同位置,气流的方向和大小均有明显差异,能够对喷雾产生不同的影响,因此喷针垂直位置的改变可能影响样品的质谱响应。喷雾针垂直位置对乙腈-水溶液响应

强度的影响如图 8 所示。当喷雾针位置由 2 mm 调节至 4 和 6 mm 时,溶液的响应强度呈现略微降低的趋势,信号波动变大;至 7 mm 时,溶液的响应强度由 2.2×10^9 降至 1.9×10^9 ,变化趋势明显;至 8 mm 时,溶液的响应强度降至 1.5×10^9 。如图 8 右上角示意图所示,当喷口位于驻点位置时,源内气流既能较好的聚集喷雾,也能保证喷雾的稳定性,此时采集的质谱信号应当最佳,该区域可能对应图 8 中的 2 mm

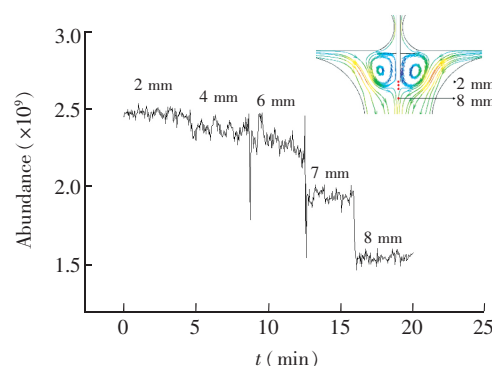


图 8 喷针垂直方向不同位置的质谱响应总离子流图
样品溶液为乙腈-水 (50:50, V/V), 流速 20 $\mu\text{L}/\text{min}$, 采集模式 scan, 质量范围 m/z 50 ~ 500。毛细管电压 5000 V, 离子源温度 300℃, 帘气流速 137.900 kPa, GS1 雾化气 (同轴气) 206.850 kPa, GS2 辅助加热气 (非同轴气) 241.325 kPa, 去簇电压 80 V

Fig. 8 Total ion chromatogram (TIC) of different vertical position of spray needle

The mixed solution of acetonitrile-water (50:50, V/V) was infused directly into ESI-MS at the flow rate of 20 $\mu\text{L}/\text{min}$ in scan mode, 50-500 m/z . The capillary voltage was 5000 V, the inlet temperature was 300℃, the curtain gas, GS1 and GS2 were 137.900 kPa, 206.850 kPa and 241.325 kPa respectively, the declustering potential was 80 V.

处;当调节喷针垂直位置,喷针增长,喷口将逐渐离开驻点,进入稳定区域。此时受气流扰动,信号产生明显波动,响应强度有所降低。

3.4.2 喷针水平位置对总离子流的影响 分别将喷针水平位置设置为1,3,5,7,9和11 mm,此时溶液的响应强度变化如图9所示。当喷针调节至3 mm时,溶液的响应强度最高,喷针左右位置的变化,均能引起样品信号的明显降低。结合图4模拟结果,当离子源中同时通入同轴辅助气和非同轴辅助气时,喷针两侧均存在气流混返,喷针偏左或偏右都将进入该区域,在反方向气流的带动下,喷雾的传输效率降低,最终导致响应强度的明显减弱。

3.4.3 同轴气体流速对总离子流的影响 由模拟结果可知,同轴气能够严重影响喷针附近气体流场的分布。如图5所示,在一定范围内提高同轴气流速,喷针轴向辅助气流速增大,对喷雾的聚集效果增强,有利于增强样品的质谱响应;但当同轴气流速过高时,源内气流的驻点发生变化,此时喷口可能偏离驻点位置,所产生的喷雾将受到气流混返的影响,传输效率降低,最终降低样品的响应强度。在所使用的电喷雾离子源中,样品流速为20 $\mu\text{L}/\text{min}$ 时,同轴气的推荐数值为15~20 psi (103.425~137.900 kPa)。参考此值,考察同轴气分别为5 psi (34.475 kPa), 10 psi (68.950 kPa), 20 psi (137.900 kPa), 40 psi (275.800 kPa)和60 psi (413.700 kPa)时溶液的总离子流图。如图10所示,当同轴气流速由5 psi (34.475 kPa)增至20 psi (137.900 kPa)时,溶液总离子流的强度由 1.2×10^8 增至 2.4×10^9 以上,流速增至40 psi (275.800 kPa),溶液的质谱响应产生较大波动,质谱响应强度有所降低,流速为60 psi (413.700 kPa),溶液响应强度降至 1.8×10^9 以下。随同轴气流速增大,样品的质谱响应呈现先增大后减小的趋势,与模拟结果相吻合。

3.4.4 非同轴气体流速对总离子流图的影响 比较图5和图6可知,非同轴气与同轴气影响效果不同。增大非同轴气流速,几乎不会改变喷口处驻点与混返区域大小,只能增大喷针轴向辅助气流速,有利于聚集喷雾,增强样品的响应强度。实验考察了非同轴气为5 psi (34.475 kPa), 10 psi (68.950 kPa), 20 psi (137.900 kPa), 40 psi (275.800 kPa)和60 psi (413.700 kPa)时,溶液的总离子流变化情况。如图11所示,随非同轴气流速由5 psi (34.475 kPa)增至60 psi (413.700 kPa),溶液的响应强度由 8×10^8 逐渐增至 1.8×10^9 。在仪器所能承受的操作范围内,样品响应强度随非同轴气流速的增大而增强,与图6模拟结果一致。

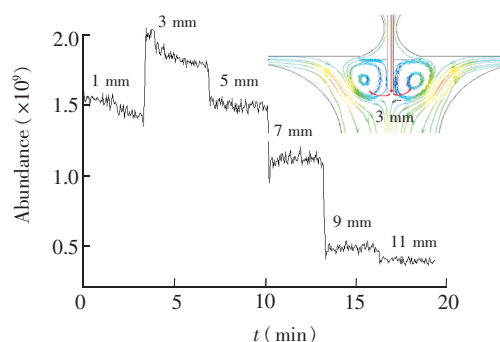


图9 喷针垂直方向不同位置的质谱响应总离子流图 (实验条件同图8)

Fig. 9 TIC of different horizontal position of spray needle (The experimental conditions were the same as in Fig. 8)

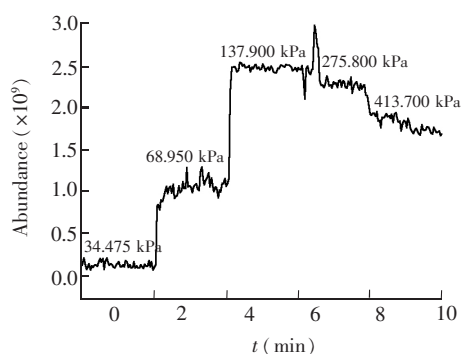


图10 不同的同轴气流速条件下,质谱响应总离子流图 (实验条件同图8)

Fig. 10 TIC of different velocity of coaxial gas (The experimental conditions were the same as in Fig. 8)

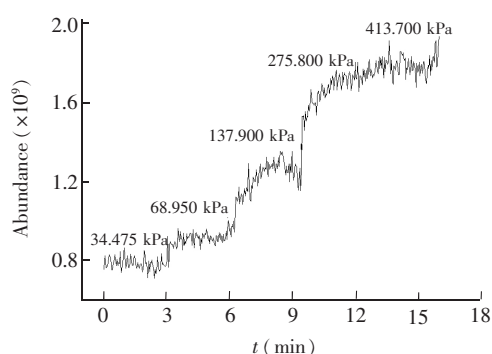


图11 不同的非同轴气流速条件下,质谱响应总离子流图 (实验条件同图8)

Fig. 11 TIC of different velocity of non-coaxial gas (The experimental conditions were the same as in Fig. 8)

4 结 论

通过 Fluent 模拟软件构建了密闭式电喷雾离子源的二维模型,并模拟了离子源构型、不同气体引入方式条件下的流场分布,推测其对检测结果的影响,并通过实验进行验证。模拟结果表明在离子源中通入轴向和正交方向辅助气,所形成的气体流场均能有效聚集喷雾;由于辅助气能够在源内不同位置产生混返、驻点等特征流场,因此喷针位置的改变能够影响信号稳定性和响应强度。一定范围内增大同轴气的流速,不会改变驻点位置;同轴气流速较大时,改变气流能够使喷口处混返区域的大小和驻点位置发生变化,影响喷雾的稳定性和传输效率;改变正交辅助气不会影响混返区域的大小,增大正交辅助气流速有利于聚集喷雾,能够提高传输效率,增强样品的响应。实验证实了当喷口位于源内某一位置时,质谱响应强度最大,信号最稳定;增大同轴气流速,样品的质谱响应呈现先增大后减小的趋势;增大非同轴气流速,样品的质谱响应增强。实验趋势与模拟结果取得了良好的一致性。所建立的模型为进一步了解离子化过程、改进离子源构型、优化仪器参数等提供了指导意义,从而得到具有更高离子化效率和传输效率的离子源结构。

References

- 1 Liuni P, Wilson D J. *Expert Rev. Proteomic.*, **2011**, 8 (2):197-209
 - 2 Draper J, Lloyd A J, Goodacre R, Beckmann M. *Metabolomics*, **2012**, 9 (1):24-29
 - 3 Xu D M, Deng X J, Fang E H, Zheng X H, Zhou Y, Lin L Y, Chen L P, Wu M, Huang Z H. *J. Chromatogr. A*, **2014**, 1324:49-56
 - 4 Hogan C J, de la Mora J F. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2009**, 11 (36):8079-8090
 - 5 Altieri K E, Turpin B J, Seitzinger S P. *Atmos. Chem. Phys.*, **2009**, 9 (7):2533-2542
 - 6 March R E, Miao X S. *Int. J. Mass Spectrom.*, **2004**, 231 (2-3):157-167
 - 7 Agathou M S, Kyritsis D C. *Energy Convers. Manage*, **2012**, 60:10-17
 - 8 Naqwi A A, Hartman R P A, Marijnissen J C M. *B. Part. Part. Syst. Char.*, **1996**, 13 (2):143-149
 - 9 Ryce S A, Patriarche D A. *Can. J. Phys.*, **1965**, 43 (12):2192-2199
 - 10 Gomez A, Tang K. *Phys. Fluids*, **1994**, 6 (1):404-414
 - 11 Nemes P, Marginean I, Vertes A. *Anal. Chem.*, **2007**, 79 (8):3105-3116
 - 12 Ahadi E, Konermann L. *J. Phys. Chem. B*, **2012**, 116 (1):104-112
 - 13 Konermann L, Rodriguez A D, Liu J. *Anal. Chem.*, **2012**, 84 (15):6798-6804
 - 14 Chung J K, Consta S. *J. Phys. Chem. B*, **2012**, 116 (19):5777-5785
 - 15 Wang X, Gidwani A, Girshick S L, McMurphy P H. *Aerosol Sci. Technol.*, **2005**, 39 (7):624-636
 - 16 Dutta S, Shimpalee S, Van Zee J W. *J. Appl. Electrochem.*, **2000**, 30 (2):135-146
 - 17 Yuan L, Zhu J, Li T, Fan H, Lu X. *Appl. Therm. Eng.*, **2015**, 87:98-105
 - 18 Halama S, Spliethoff H. *Fuel Process. Technol.*, **2015**, 138:314-324
 - 19 Forbes T P, Levent Degertekin F, Fedorov A G. *J. Electroanal. Chem.*, **2010**, 645 (2):167-173
 - 20 Bulovich S V, Bazhenov A N, Gall N R. *Tech. Phys. Lett.*, **2012**, 38 (5):463-465
 - 21 Jurčíček P, Liu L, Zou H. *Int. J. Ion Mobil. Spec.*, **2014**, 17 (3):157-166
 - 22 HUANG Zhao-Liang, GAO Fang-Yuan, WANG Bo-Liang, ZHANG Wei-Bing. *Chem. J. Chinese Universities*, **2016**, 37 (4):633-637
- 黄兆亮,高方园,王伯良,张维冰. 高等学校化学学报, **2016**, 37 (4):633-637

