

电流体动力学研究进展及其应用

陈效鹏 程久生 尹协振*

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026. *联系人, E-mail: xzyin@ustc.edu.cn)

摘要 电流体动力学及电雾化技术, 适用范围广. 对于当前受到瞩目的纳米技术、生物医药技术、微机械技术以及微重力研究, 有重要的促进作用, 从而得到了广泛的研究, 并取得了很大进展. 对电流体动力学的基本概念和原理作了介绍; 对它在各领域(电流体动力学强化传热、电流体泵、微重力、质谱仪、纳米材料制备等)的应用情况(包括国内的研究水平)做了简要评述; 最后, 对电流体动力学的发展趋势做了展望.

关键字 电流体动力学 电雾化 微重力 传热 电流体泵 质谱仪 纳米材料制备

“电流体动力学(Electrohydrodynamics, EHD)是流体力学的一个分支, 它考虑了电场对流体介质的作用; 同时, 它也可以被看作是在运动电介质中的电动力学. 在流体中, 介质运动对电场的影响, 及电场对运动流体的作用, 两者相互作用会出现很多有趣的电流体现象”^[1]. 现代科学技术, 要求向节能、精密、简便、微型化方向发展, 电流体动力学在这些方面的优势, 正在逐步得到各界认同.

经过数十年的研究, 人们对电流体动力学已经有了比较深刻的认识. Melcher 和 Taylor^[1]研究了液体薄层及液滴, 处在直流电场和交流电场中时, 液体内部的对流现象, 总结了漏电介质模型(Leaky Dielectric)及其在研究中的应用. Castellanos^[2]对二维情况下, 在单极性电荷发射时, 电流体动力学稳定性、湍流以及混沌问题作了总结. 基于漏电介质模型, Saville^[3]结合电介质中电荷产生及分布机理, 对球形和圆柱体两种拓扑结构中的电流体动力学研究做了回顾. 1998 年, Castellanos^[4]从理论的角度, 编写了专著, 对电流体动力学做了详尽总结. Kebabian^[5]总结了基于电雾化(Electrospray)技术的质谱仪研究的进展. Law^[6]则对电雾化在农业中的应用做了回顾.

以上的工作, 都具有很强的针对性. 本文则从实际应用角度出发, 对各领域中电流体动力学的研究现状, 做了较为全面的介绍, 其中包括: 电流体动力学基本原理、流动稳定性; 它在各领域(如强化传热、电流体泵、微重力实验)中的应用; 电雾化在质谱仪、纳米材料制备和农业中的应用. 同时, 本文也论述了电流体动力学在各领域中有待解决的问题.

1 电流体动力学的理论和基本概念

1.1 电流体动力学基本方程组

电流体动力学方程组, 由电磁学方程和流体力学方程两部分组成. 当电荷低速运动(即特征速度远小于光速)时, 对于不可压缩、黏性、电介质流体, 电流体动力学方程组有下述关系式:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{Q}{\epsilon}, \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{E}$ 为电场强度, Q 为电荷体密度, ϵ 为介电常数, ϕ 为电压, $\mathbf{J}$ 为电流密度, t 为时间, $\mathbf{v}$ 为介质速度, ρ 为介质密度, p 为压力, μ 为黏性系数, $\mathbf{f}_e$ 为电场力.

在电介质流体中, 电流密度满足如下关系:

$$\mathbf{J} = K\mathbf{E} - D_Q \nabla Q + Q\mathbf{v}, \quad (6)$$

式中 K 为离子的迁移率, D_Q 为分子扩散系数. 当由外电场作用导致的电荷输运量, 远大于分子热运动导致的电荷输运量, 即工作电压大于热电压时, 分子扩散可以忽略^[3].

根据 Landau^[7]的分析, 连续介质内电场力表达式为

$$\mathbf{f}_e = Q\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[\rho \left(\frac{d\epsilon}{d\rho} \right)_{\Theta} E^2 \right]. \quad (7)$$

方程右边第 1 项为库仑力作用(Dielectric force); 第 2

项为电介质内分子在电场中发生不均匀极化, 诱导出的束缚电荷作用力; 第 3 项为电致伸缩项. 对于一般材料, 介电常数可假定为常数, (7)式右边第 2 项可以忽略. 对于不可压流体, 其密度为常数, 第 3 项也可以忽略. 因而, 库仑力是电场力的最主要部分.

1.2 边界条件

从经典电动力学和流体力学方程的积分形式出发, 电流体动力学所涉及的边界条件可以归纳为下表 1.

表 1	
电动力学边界条件	流体力学边界
$n \times [E] = 0$	$n[p] = n \times [T^m + T^e]$
$n \times [D] = Q_f$	$n \times [v] = 0$
$\frac{\partial Q_f}{\partial t} = n \times \nabla [Q] - n \times [J] - \nabla_\Sigma \times K_e$	$n \times [v] = 0$

表中 $[A] = A^a - A^b$, 即界面两侧介质 a, b 中物理量 A 的变化, n 为界面法线方向, $D = \epsilon E$ 为电位移矢量, Q_f 为界面上的电荷量, K_e 为界面上的电流(电导率与界面材料有关), ∇_Σ 指矢量在界面上的散度. T^m 为应力(包括黏性应力, 表面张力等), T^e 为电应力, 即电场对界面上的电荷的作用力

值得指出的是, 目前 Q_f 仍然很难确定, 这主要是因为是在电极流固边界上, 产生电荷的化学物理过程十分复杂. Denat^[8]的研究表明, 在中等电场强度($10^2 \sim 10^3$ V/mm)下, 界面上的电荷量基本不变, 因而引进表征发射极上电荷密度的无量纲数:

$$C_0 = \frac{Q_f d^2}{\epsilon \phi_0}, \tag{8}$$

式中 d 为电极之间的距离, ϕ_0 为电极之间外加的电压. $C_0 \ll 1$ 和 $C_0 \gg 1$ 两种极端情况, 分别被定义为弱发射和空间电荷极限发射. 至此, 得到了封闭的电流体力学控制方程及边界条件.

1.3 稳定性研究进展

研究在直流电场作用下的硅油薄层, 液体初始处于静止, 当提高电极直流电压, 液体表面会出现包格(图 1), 这是液体内部对流引起的, 该现象类似于 Bénard 对流^[9]. 电流体动力学稳定性问题, 成为人们认识电流体现象的一个重要途径. 它的转捩点, 由无量纲数 $T = \frac{\rho \epsilon \phi}{K \mu}$ 决定. 1970 年, Watson^[10,11]对空间电荷极限发射情况下, 液体薄层转捩与对流, 进行了实验及理论分析. 其研究表明, $T = T_c = 99$ 是临界

状态, 当 T 大于此临界值时, 薄层内液体将不再保持静止. 随着实验条件不同, 如液体种类, 电极几何尺寸, 初始状态与边界条件, 电极发射电荷状况(参数 C_0), T_c 会有不同的值. 由于电荷在介质中的迁移, 不仅取决于电场力的作用, 同时也取决于流体的运动; 因而, 电流体动力学的稳定性, 除了有一个线性临界值, 与 Bénard 对流相对应之外, 还有一个非线性的临界值 T_f , $T_f < T_c$. 在电介质流体实验中, 表现为电压-电流曲线, 在非线性临界值和线性临界值之间有一个回滞区, 即: 当流体初始处于运动状态时, 即使在 T 小于临界值时, 电介质流体仍能保持其运动. Castellanos^[2]在二维流场的前提下, 对平板电极、电极弱发射条件下, 电流体动力学稳定性及其对流形式作了理论分析. 在此基础上, 他进一步对电流体对流中的电荷耗散、湍流、混沌等问题作了阐述.

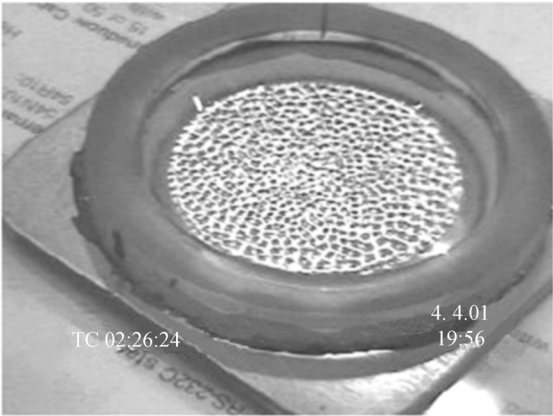


图 1 硅油电流体不稳定现象¹⁾

Atten^[12]用平板电极, 得出对流状态下的对流强弱、电流与电压参数满足下列关系式:

$$w' \propto \phi^2, I \propto \phi^{5/2} \quad Re \ll 10, \tag{9}$$

$$w' \propto (\epsilon/\rho)E, I \propto \phi^2 \quad Re \gg 10, \tag{10}$$

其中 w' 表征了对流速度大小, I 为电流, Re 为流动 Reynolds 数. 轴对称情况下, 流体稳定性问题, 也在其工作中有所论述.

在对电流体动力学领域中, 一些基本问题作了讨论^[13,14]以后, 目前, 人们正结合各种应用, 将电流体稳定性问题的研究, 扩展到更为特殊的领域. Kumaran^[15]在理论上研究了, 以弹性膜作为电极时的电流体的稳定性. Green 等人^[16,17]深入地研究了纳米

1) 罗喜庆. 库仑力驱动介电流体稳定性实验研究和理论分析. 中国科学技术大学学士学位论文, 2001

尺度电极下, 由非均匀交变电场所引起的电流体运动. 同时, 向列液晶中, 电流体稳定性和流动问题也引起了广泛的重视^[18,19]. 电、热相耦合时的稳定性问题, 由于其重要的应用价值, 及其对理论研究的促进意义, 成为目前研究的一个热点, 这在本文后面的论述里将具体提及它们.

2 电流体动力学的应用

2.1 电流体力学发展现状

目前, 对于电流体动力学研究, 除了集中于其机理之外; 人们将研究拓展到了与当前科技发展前沿有关的多个领域. 值得一提的, 首先是电、热耦合的电流体问题^[20~25]. 在能源问题日益突出的今天, 利用电流体动力学的对流效应, 增加流体的传热效率, 无疑给工业技术部门提供了一个新的思路. 当前, 生物技术蓬勃发展, 而细胞分子的运动、生物测试技术都与电场作用有密切的关系, 根据电渗和电流体力学原理, 进行输送液体得到了生物界的关注^[26]. 同时, 根据电流体力学设计出来的这些装置, 由于其结构简单, 便于通过微加工手段进行集成和微型化, 它也得到了其他领域研究者的注目^[27~34]. 自从 Rayleigh^[35]对电场力作用下, 导电液体球的破碎做了研究, 提出了著名的 Rayleigh 极限以来, 研究电场作用下两种不相溶流体界面的稳定性问题, 一直是科学和技术界的热点^[36~41]. 在微重力下, 电场力对于液面作用^[42]更是把此项研究拓展到一个崭新的领域.

2.2 电流体强化传热

在某些领域, 仅靠液体的自然对流来传热不能满足实际要求. 利用电流体对流强化传热, 引起了人们注意^[20]. 该学科, 被命名为电-热流体动力学.

McCluskey^[20]研究了两平板间电介质 EHD 强化传热现象. 根据传热学定义, 流动液体的传热效果, 可以用无量纲 Nusselt 数来表示为

$$Nu = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}, \quad (11)$$

其中 $\bar{H}_0$ 表示没有对流时传递的热流量, $\bar{H}$ 表示在电场作用下液体产生对流所传递的热流量. 其实验结果显示了, 在不同的条件下, 电场作用可以使 Nu 有不同程度的提高, 且提高的程度随电压的升高而提升.

近年来, Paschkewitz^[21]发现, 在低电导率、低黏

性工作介质的情况下, 电流体强化传热具有更明显的效果. Smorodin^[22]在不稳定电场中, 研究了欧姆流体层的电-热对流稳定性问题.

结合前文所述, 对于建立完整的电-热流体理论模型, 以及当有液-液界面存在时, 电-热耦合问题仍有很多工作需要做.

2.3 电流体泵

通过电场力对流体介质中电荷作用, 并驱动液体流动的泵, 称为电流体泵. 这种泵的最大优点是没有任何运动部件, 例如阀、活塞等. 它制造方便, 结构简单. 电流体泵在微机电系统、药物输送, 以及微冷却系统研究中得到重视.

电流体泵的驱动机理分为两种: 一种是利用高压直流电场驱动流体, 这种泵也被称为离子拖曳泵^[29~33]; 另一种是以高压行波驱动流体^[27,28,34,43]. 在这两种泵中, 流体介质中的电荷基本上有两种来源: 高压电极向电介质中发射的单极性离子, 或电介质中的微量电解质分子电离产生的电荷. 另外还有一种“电动泵”, 其电荷主要是由电渗作用产生, 也属于电流体泵^[44], 在此不做讨论.

2.3.1 离子拖曳泵

离子拖曳现象, 在 100 年前就已被发现. 后来, Stuetzer^[32,33]从理论和实验两方面研究了均匀电荷分布, 电荷拖曳现象; Pickard^[30,31]在前者研究的基础上, 分别研究了离子拖曳泵的动态和静态两种特性. 进入 20 世纪 80 年代以来, 由于离子拖曳泵有特殊的优点, 这项研究又蓬勃发展起来. 由于离子拖曳泵的效率较低, 通常不超过 7%; 研究重点侧重于电极的设计, 以提高泵的能量转化效率. Sharbaugh 和 Walker^[45], 以及 Bryan^[46]在理论研究的基础上, 设计了较具实用价值的离子拖曳泵. Sharbaugh 将发射离子的电极外形设计成带针尖的网. Bryan 将发射电极的外形设计为与泵壁成一定夹角的针尖排列, 泵的内径为 7.0 cm. 他们还研究了单级和多级驱动的离子拖曳泵的能量转换效率, 及各物理量对泵的影响. Bologa^[47]采用网状电极, 泵内径为 30 mm. 他研究了在多级泵情况下流量、效率、级数以及电极距离之间的关系. Kojevnikov^[29]设计了“三线”电极系统, 泵内径 12 mm, 并以此研究了流量和电极间距离、工作介质电导率之间的关系. 研究表明, 这些泵的效率大多随电压的升高呈“S”形提升, 但基本不超过 7%.

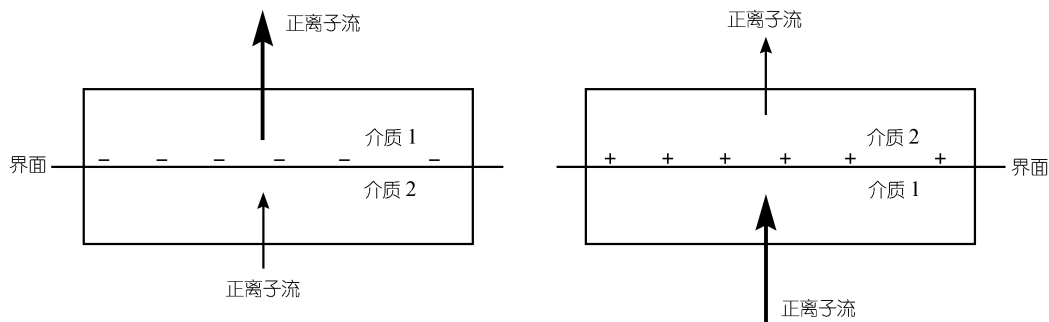


图2 界面电荷扩散原理示意图

2.3.2 电流体行波泵

图2表示在界面上取的某体积微元, 图中, 电极在界面下方, 介质1表示松弛时间短的介质, 介质2表示松弛时间长的介质. 箭头粗细表示离子流的大小. 当松弛时间短时, 离子流速度快, 通过微元边界的离子就多; 反之, 通过边界的离子就少. 当介质内部没有电荷源时, 在两种介质的交界面上, 电荷守恒性决定了电荷积蓄, 其极性如 Melcher^[1]指出的那样:

“在电场作用下, 两种层迭的欧姆流体界面上有电荷产生. 如果在激发电极附近介质的电荷松弛时间($\tau = \epsilon/\sigma$, σ 为电导率), 大于远离电极处介质的电荷松弛时间, 界面上的电荷与激发电极的极性相反, 界面上的剪切力与行波方向相同, 则向前驱动; 如果激发电极附近的电荷松弛时间, 小于较远介质的电荷松弛时间, 那么界面上的电荷与激发电极的极性相同, 剪切力的方向与行波方向相反, 形成向后驱动”.

通常情况下, EHD 泵的工作液为均匀电介质, 介电常数受外界影响较小, 电荷松弛时间主要由电导率决定. 对于低电压或高频率情况, 电极发射的电荷主要聚集在电极附近. 从量级上看, 当电介质带电时, 其电导率要比其不带电时大. 电导率梯度导致了松弛时间自电极向外递增, 泵向后驱动. 当在高电压或低频率时, 在电极极性反向之前, 电极发射的电荷跨越过中线, 形成与前面相反的情况, 从而正向驱动工作液.

目前很多研究者都在实验室研制了体积较小的行波泵, 如 Choi^[43]以光刻技术在耐热玻璃基底上制造的 EHD 泵, 其通道的宽和高分别为: 3 mm 和 300 μm . 同时他们还对泵的流量、压力提升、以及行波频率等参数之间的关系进行了测量, 并在理论上做了分析, 两者显示了很好的一致性.

虽然电流体泵耗能极少(其工作电流一般为微安量级), 但效率低仍是其需要解决的问题. 另外, 电流体泵有失效问题, 也限制了更广泛的应用, 其原因, 特别是其中所包含的电极过程, 及其避免方法还有待研究. 电动泵由于其要求电压低, 流道内速度剖面均匀, 同时也受到研究者的关注.

2.4 电流体在微重力领域的应用

当轴向电场力作用在液体圆柱上时, 它能使液柱稳定性增强, 延迟液柱的破碎. 这使电流体力学与“微重力情况下液桥的稳定性”研究结合了起来. 无电场作用时, 在 Bond 数($B_0 = (g(\rho_l - \rho_o)a^2)/\gamma$)很小的情况下, 当表征液柱几何特征的无量纲 Plateau 数($\beta = l/2a$)大于 π 值时, 液柱将会破碎. 其中 g 为重力加速度, ρ_l, ρ_o 分别为液桥及周围介质的密度, γ 表示液柱的表面张力, l 为液柱的高, a 为液桥初始半径.

Burcham 等^[42]利用航天飞机搭载, 在微重力的条件下, 对硅油中的蓖麻油/丁子香酚液桥, 电介质气体(SF_6)中的蓖麻油液桥, SF_6 中的强化导电率蓖麻油和 SF_6 中的硅油液桥做了稳定性实验. 其结果表明, 在各种情况下, 施加轴向电场能够显著的提高液桥的稳定性, 延缓液桥的破碎.

事实表明, 漏电介质模型能够解释在微重力情况下, 多种由电场引起的液桥形态变化, 如: 蓖麻油液桥在 SF_6 中的震荡现象等. 但还存在着这个模型所无法解释的现象, 如: ①细颈椭圆的方向性问题; ②不同导电率液体所表现出的差别等. 电流体力学在该领域的应用, 还有待进一步开展深入仔细的工作.

正如前文所说, 液面在电场力作用下, 其稳定性问题是相关研究者关注的焦点, 很多基础工作, 如界面上表面波的传播、液柱、液滴的稳定性等, 还需要有更深入的研究.

3 静电雾化的应用

3.1 静电雾化研究进展

电雾化技术, 作为电流体力学的一个重要分支, 在近年来受到了广泛的重视. 电雾化是静电库仑力克服液体表面张力, 导致液体破碎成细小雾滴的一个过程. 相对于其他雾化技术, 电雾化技术具有很多优越的特性: 由于雾化后液滴带电, 库仑斥力阻止了液滴的团聚, 使其更易穿透其周围的气体介质; 同时带电液滴的轨迹理论上是由电场决定的, 可以施加不同的电场, 来控制液滴的轨迹. 而静电雾化最具吸引力的特点是参数调节方便, 可以产生各种不同尺度($1\text{ }\mu\text{m} \sim 1\text{ cm}$)的、单分散(Monodispersity)的液滴. 具备了这些性质, 电雾化技术在质谱仪^[48~51]、纳米材料制备^[52~55]、农业^[6]、喷墨打印、燃油喷射、药物输送等领域被广泛应用.

进行电雾化研究最基本的实验设备, 是将具有一定导电率的液体通向一根金属毛细管, 毛细管和另一金属平板间加直流高电压, 毛细管出口处的流体受到重力、表面张力和电场力的作用. 当电压升高到一定量时, 在毛细管出口处, 液体将形成一个稳定的弧形圆锥, 锥顶处有一股很细的稳定射流, 射流在末端破碎形成细小的带电雾滴(如图 3(c)).

对电雾化定量研究始于 Zeleny. Taylor^[56]给出了毛细管出口处, 圆锥液面的理论半锥角为 49.3° , 该锥也被命名为 Taylor 锥. Cloupeau 和 Prunet-Foch^[58]对锥-射流模型, 液滴的抛射频率、液滴的直径以及工作电压、液体流量、液体电导率对电雾化的影响做了广泛的研究. Fernández^[59]研究了电雾化的雾场对 Taylor 锥锥角的影响. Tang 等^[60]利用 PDA 对庚烷的电雾化场进行了系统的测量, 给出了电雾化场的颗粒空间密度、速度分布及其经验公式. Ganan-Calvo^[61]对锥-射流模式下, 电雾化各参量之间的关系作了量级上的分析, 从而使人们能够从理论上更进一步的了解电雾化. 叶中元和 Gomez^[62]通过 PDA 研究了大流量多股射流的电雾化, 结果显示, 每股射流仍然是锥-射流模式, 并且液滴大小保持较好的单分散性. Peter 等^[63]实验研究了在锥-射流模式和多股射流模式下的电雾化稳定性及其特点. Hartman^[64]通过对锥-射流模式下电场力和表面张力的分析, 从理论和实验上研究了电雾化产生的液滴的尺寸变化. 正是电雾化良好的应用前景, 吸引了众多研究者^[65~68].

3.2 电雾化在质谱仪技术中的作用

质谱仪(Mass spectrometry)是将分子输入真空环境, 跟踪其在电场或磁场中轨迹, 以此确定单个分子质量的通用仪器. 过去由于很难将极性有机大分子转化成气相离子, 因而质谱仪在生物和医药领域的应用受到了限制. 20 世纪中期以后, 在质谱仪研究中, 人们提出了“软”离子化(“Soft” ionization)方法, 但 these 方法所产生的离子流很小, 并随着分析物分子量的增加而很快减小. 当分子很大时, 探测他们的加速电压高到难以实现. 更严重的是分子由于剧烈的内部激励而分解, 从而影响了结果. 随后, 另一种“剧烈”离子化(“Violent” ionization)技术(包括 EHD 离子化), 用强电场将离子分离出溶液, 部分解决了这些问题, 但其需要在真空下雾化的条件仍限制了质谱仪的应用.

当电雾化技术应用到质谱仪, 给质谱仪带来了巨变. 它是在 EHD 离子化的基础上, 将带电液滴射入气流而不是真空. 当带电液滴在电场中经过“热气流”时, 其被蒸发, 液滴半径不断减小, 最终达到 Rayleigh 极限, 形成所谓的“库仑破碎”, 形成气相离子. 对此 Dole^[48]和 Iribarne^[50]分别提出了 CRM (Charge Residue Model)和 IEM(Ion Evaporation Model)模型进行了解释. CRM 模型认为: “库仑破碎”过程不断重复, 当液滴中的溶剂挥发完后, 即得到了气相的离子; IEM 模型认为: 蒸发和库仑破碎不断减小液滴直径, 以致最终液滴自身的电场, 将溶质离子发射到气相中. 不管最终那种理论正确, 电雾化技术的应用, 降低了质谱测量对溶液挥发性的要求; 同时能够使分子携带大量的电荷, 提高了离子的荷质比, 从而提高了仪器灵敏度与测量的精度. 这对于检测生物领域易分解的有机大分子有着极其重要的意义. 目前, 在这方面, 国内研究与国外研究存在着较大的差距.

近年来, 在电雾化原理基础上, 人们对质谱仪测量范围的拓宽, 进行了广泛的研究, 它成为此领域的一个热点^[69~72]. 同时, 电雾化装置和质谱仪中真空部分的衔接需要有更完善的设计; 而“库仑破碎”则对气相离子的生成有极其重要的意义, 该研究除了其突出的理论价值以外, 对于质谱仪性能的提高也至关重要.

3.3 电雾化在纳米材料制备中的应用

作为 21 世纪的新兴产业, 纳米材料制备得到了广泛深入的研究; 同时, 随着微机电系统的兴起, 毫

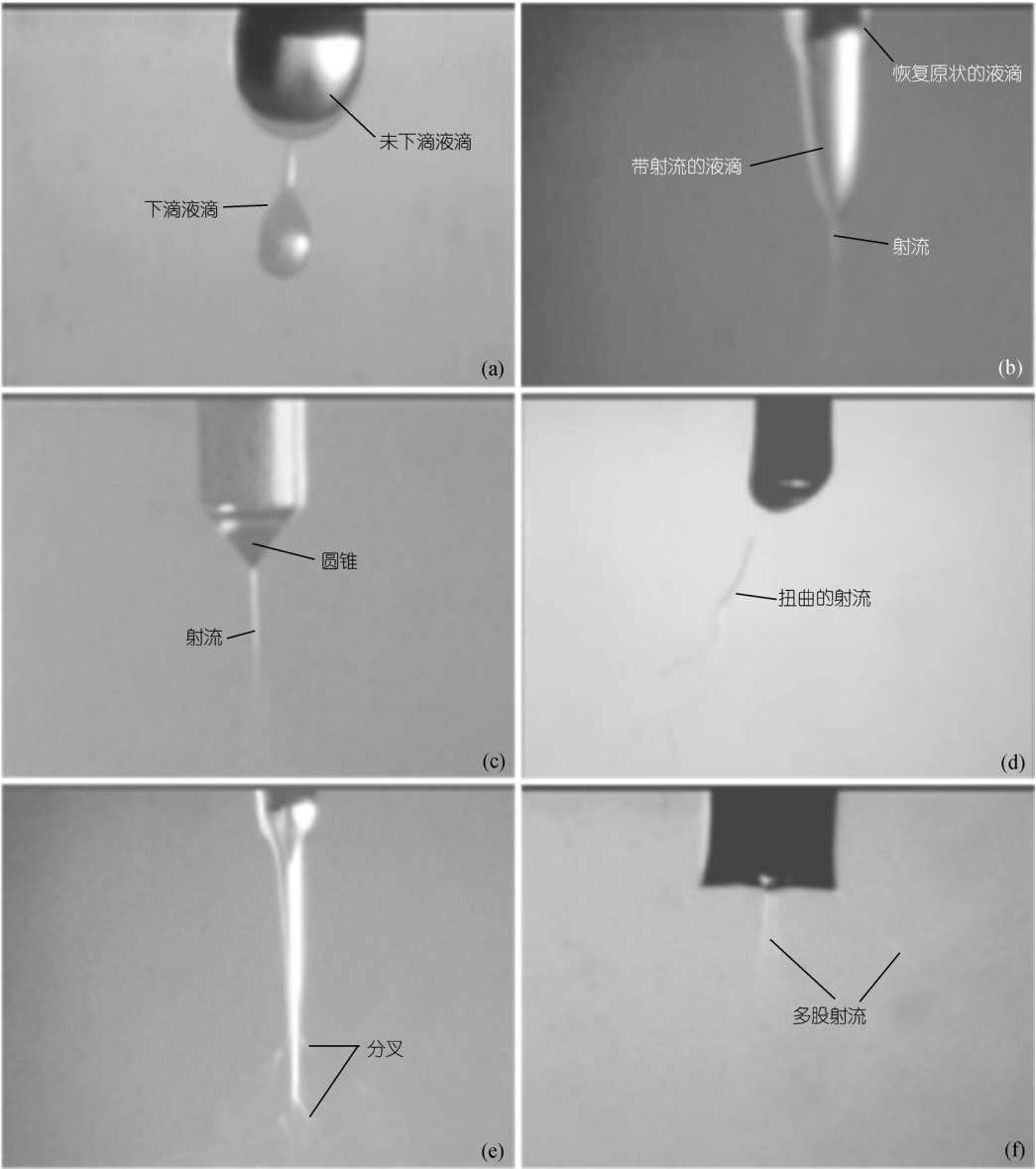


图 3 电雾化模式^[57]
(a) “滴”模式, (b) “脉动”模式, (c) “锥—射流”模式(Taylor 锥), (d)~(f)几种不稳定射流模式

微米级的镀膜技术,也成为目前技术领域研究的热点.由于通过电雾化方法得到的雾滴颗粒直径尺度范围宽(1 μm ~ 1 cm),具有单分散性^[54,58,60,63],且电雾化设备简单,在常温常压下工作,此项技术被应用于纳米材料制备.特别是由于液滴带电,能够很好的吸附在基片上,电雾化更多地用于制备各种纳-微米薄膜.

Gourari 等^[73]用电雾化技术制备了 SnO₂-Mn₂O₃ 多层膜(<10 μm),制成了用于监测易燃、有毒气体的传感器.鉴于 TiO₂ 薄膜具有广泛的应用背景,Chen^[52]

用电雾化方法制备了 TiO₂ 薄膜.对薄膜样品的分析结果显示:以电雾化方法制备的 TiO₂ 薄膜具有任意密度,薄膜均匀等特点. Su^[55]利用电雾化和蒸发沉降(Vapour depositon)技术相结合,制备 CdS 薄膜(<10 μm),他们同时解决了过去化学浴沉降(Chemical bath depositon)法的污染问题和抛洒热解(Spray pyrolysis)法的低效问题. Kim^[74]在普通电雾化装置上附加了“导向加热器”,以此制备了 MgO 薄膜;通过改变导向加热器和基底的温度,他们得到了 34 ~ 87 A/min 的薄膜生长速度. Miao^[75]用电雾化方法对 ZrO₂

和 SiC 陶瓷颗粒($<10\ \mu\text{m}$)的悬浮液进行了电雾化研究. 通过与化学蒸发沉降法(CVD), 物理蒸发沉降法(PVD)和等离子喷洒法(PS)的比较, 他们发现电雾化方法不仅便宜而且具有良好的可控性.

目前, 存在于该领域的主要问题有两点: 电雾化母液的配置, 由于电雾化的效果对雾化溶液性质(如电导率、黏性、表面张力等)极其敏感, 所以要得到特定尺度的单分散雾滴, 就需要对溶液的性质进行必要的设计. 由于薄膜生长和纳米材料的结晶等过程本身对环境要求很特殊, 所以, 在雾化以后, 付产物的去除, 其后处理仍需要研究者付出巨大的努力, 化学反应条件的控制需要与具体工作相结合.

3.4 电雾化在农业中的应用

由于电雾化的液滴带有大量电荷, 这使人们对液滴的播撒、驱动、沉降、团聚以及分选等有了更好的控制. 20 世纪电雾化技术在农业部门得到了广泛的应用. Law^[6]对此做了回顾.

3.4.1 杀虫剂的电雾化技术

将农药喷洒到作物表面, 传统技术存在着严重的低效因素, 60% ~ 70% 的农药会浪费掉; 这样不仅浪费, 而且污染环境. 因此, 为了提高农药喷洒效率和减少污染, 在提高农药沉降 to 农作物上的同时, 还需要调整农药沉降的空间浓度分布, 即将农药同时喷洒到农作物叶子的上、下表面. 对于传统的根据重力和惯性原理设计的喷洒器, 这点很难做到. 由于带电液滴在沉降过程中不仅受到重力、浮力作用, 同时还受到电场力的作用, 在很多情况下, 电场力甚至能超过重力. 由此人们提出了以电雾化代替传统雾化技术, 通过调节药物在喷洒过程中的颗粒数空间分布, 和落在农作物表面的几率来提高农药的使用效率.

Law(2001)在他的论述中提到“在现场操作和实验室中, 由于电场力的作用, (农药)在目标物上的沉降提高了 2~8 成, (农药喷洒的)空间分布也得到了提高.”

3.4.2 食品后加工技术

目前, 很多调味品、佐料、维生素混合物都是用低电导率的液体制备的. 通过电雾化技术, 在小吃食品表面喷洒调料既减少了浪费, 又提高了质量, 具有很好的经济效益.

另外, 在新鲜蔬菜、水果、粮食食品上以电雾化方式喷洒防真菌剂, 可以在运输、储藏过程中减少食物的损失, 并防止了霉变的发生, 提高了食品的安全性. 在这方面, 有数据显示: 经电雾化方法处理的香蕉完好率为 86%, 相对来说, 用普通方法喷涂的香蕉完好率仅有 74%, 而未经处理的只有 36%.

3.4.3 用于授粉的电雾化技术

在农业上, 提高作物的授粉率是提高产量的一个重要方面. 对于虫媒植物, 若以自然方式授粉, 则很大程度上受到气候的影响. 将花粉悬浮液通过电雾化方法给农作物授粉, 可以大大提高种子的发芽率. 相对于普通方法授粉, 用电雾化方法可以使发芽率提高 5 ~ 6 成.

同时, Law(2001)提出了该领域未来的研究任务, 例如: 带电液滴在提高杀虫、防腐、授粉过程中, 效率变化的生化原理等.

4 国内研究现状

目前, 国内开展电流体动力学研究仅为数不多几个单位, 工作还处于起步阶段, 缺乏系统性.

在电流体领域: 周浩生等^[76]在气动雾化的基础上, 通过电晕放电使雾滴带电, 国内的许多喷涂、喷雾除尘研究都是基于这种方法. 他们研究了静电场对气动雾化的影响, 并得到了雾滴滴径——电压关系, 同时他们还对放电电极设计提出了建议. 李瑞阳等^[25]对 EHD 强化水平管外沸腾传热进行了实验研究, 与没有电场时的换热效果相比, EHD 强化传热的 Nusselt 数提高了 8 ~ 9 倍.

在电雾化领域: 程久生等^[57]对电雾化进行了初步研究, 他们以显微摄像技术, 采集到了带电液滴在电场下破碎的图像, 同时对电压-流量、电压-电流关系进行了测量. 陈效鹏等^[77]对电雾化 Taylor 锥状态下的电雾化做了实验研究, 通过显微技术, 他们得到了典型 Taylor 锥图像以及其在不同电压下其他几种液滴下落模式(图 3). 同时, 在以乙醇为工作介质的情况下, 他们得到了稳定 Taylor 锥在电压——流量图中的位置. Chen 等^[1]用 PIV 技术测量分析了电雾化液滴的速度分布, 以及电压流量对速度的影响.

于溪凤等^[78]分析了以电雾化方法, 制备得到的 Sn-Bi 纳米超微细粉的微观结构特征, 其结果表明:

1) Chen X, Cheng J, Yin X. Measurements of Drop Velocity in Electrospray by PIV. Beijing: Optical Technology & Image Processing in Fluids, Solid Diagnostics, SPIE, 2003 (待发表)

“Sn-Bi 由四方结构的 β -Sn 单相过饱, 和固溶体和菱方结构的 Bi 单相过饱和固溶体组成. 这些纳米超微粉, 绝大部分为单晶结构, 极少量为孪晶结构, 小于 10 nm 的颗粒为完整单晶, 10 nm 以上的单晶颗粒中存在着位错.” 程久生等在实验室以电雾化技术制备了纳米级 TiO_2 , 并得到了其 SEM 照片和 X 光衍射图, 纳米超微细粉 TiO_2 粒径不大于 3 nm. Lu^[53]在制造压电材料 $\text{PZT}(\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3)$ 时, 将溶液-溶胶方法与电雾化技术相结合, 制备了多层 PZT 膜, 其中每个子层厚度为 500 μm .

5 研究展望

电流体动力学, 作为一项在多种领域获得广泛应用的学科, 正迅猛发展. 它对传统技术领域的革新具有重大意义; 电雾化研究所要求的设备简单, 在微机电技术、纳米技术、质谱仪等领域又有较大的适用性, 而这些都是 21 世纪倍受瞩目的领域. 目前, 这几个领域的研究所面临的问题可以分为理论和应用两部分.

在理论方面, 由于电流体机理研究涉及力学、电学、化学、物理等多个学科, 物理现象非常复杂, 很多原理性问题还没有解决. 首先是微观机理方面, 各种溶液(包括多相液体的界面上)中的电荷产生运动的规律还有待深入研究, 建立在此基础上的物理模型还有待完善. 其次, 电场力在各传统研究领域中的作用需要重新认识, 其中包括, 表面张力、表面波、传热对流所受电场的影响等.

在应用领域, 能够达到实用标准的电流体强化传热装置, 电流体泵(除在电渗原理基础上制造的泵以外)目前都还处于实验室阶段. 电雾化在制备纳米材料和进行沉降成薄膜方面也还有很多技术细节需要解决.

如前所述, 电流体力学研究意义重大, 但目前国内在这领域所开展的工作却不多. 我们可以预计, 随着经济发展, 电流体动力学必将在经济建设中, 将做出巨大的贡献.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 59576022)和中国科学院研究生科学和社会实践基金资助项目.

参 考 文 献

1 Melcher J R, Taylor G I. Electrohydrodynamics: a review of the role of interfacial shear stresses. *Annu Rev Fluid Mech*, 1969, 1: 111 ~ 146

2 Castellanos A. Coulomb-driven convection in electrohydrodynamics. *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, 1991, 26(6): 1201 ~ 1215

3 Saville D A. Electrohydrodynamics: the taylor-melcher leaky dielectric model. *Annu Rev Fluid Mech*, 1997, 29: 27 ~ 64

4 Castellanos A. *Electrohydrodynamics*. New York: Springer-Verlag Wien, 1998

5 Kebarle P. A brief overview of the present status of the mechanisms involved in electrospray mass spectrometry. *J Mass Spectrometry*, 2000, 35: 804 ~ 817

6 Law S E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century. *J Electrostatics*, 2001, 51-52: 25 ~ 42

7 Landau L D. *Electrodynamics of Continuous Media*. New York: Oxford, 1960

8 Denat A, Gosse B, Gosse J P. Ion injection in hydrocarbons. *J electrostatics*, 1979, 7: 205 ~ 225

9 Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. London: Oxford, 1968

10 Watson P K, Schneider J M, Till H R. Electrohydrodynamic stability of space-charge-limited currents in dielectric liquids, I. Theoretical study. *Phys Fluids*, 1970, 13(8): 1948 ~ 1954

11 Watson P K, Schneider J M, Till H R. Electrohydrodynamic stability of space-charge-limited currents in dielectric liquids, II. experimental study. *Phys Fluids*, 1970, 13(8): 1955 ~ 1961

12 Atten P, Elouadie L. EHD convection in a dielectric liquid subjected to unipolar injection: coaxial wire/cylinder geometry. *J Electrostatics*, 1995, 34: 279 ~ 297

13 Lara J L, Castellanos A, Pontiga F. Influence of unipolar charge injection on the stability of plane poiseuille flow. 12th Int Conf. Conduction and Breakdown In Dielectric Liquids, Roma: IEEE-Dielectric and Electrical Insulation Society, 1996, 15 ~ 19

14 Perez A T, Vazquez P A, Castellanos A. Dynamics and linear stability of charged jets in dielectric liquids. *IEEE Trans IA*. 1995, 31(4): 761 ~ 767

15 Kumanran V. Electrohydrodynamic instability of a charged membrane. *Phys Rev E*, 2001, 64: 011911

16 Green N G, Ramos A, Gonzalez A, et al. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes, I. experimental measurements. *Phys Rev E*, 2000, 61(4): 4011 ~ 4018

17 Green N G, Ramos A, Gonzalez A, et al. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes, II. a linear double-layer analysis. *Phys Rev E*, 2000, 61(4): 4019 ~ 4028

18 Huh J. Prewavy instability of nematic liquid crystals in a high-frequency electric field. *Phys Rev E*, 2000, 66: 031705

19 Zhao H, Kramer L. Zigzag structures and domain walls in electro-

- convection of nematic liquid crystal. *Phys Rev E*, 2000, 62(4): 5092 ~ 5100
- 20 McCluskey F M J, Atten P. Heat transfer enhancement by electroconvection resulting from an injected space charge between parallel plates. *Int J Heat Mass Transfer*, 1991, 34(9): 2237 ~ 2250
- 21 Paschkewitz J S, Pratt D M. The influence of fluid properties on electrohydrodynamic heat transfer enhancement in liquids under viscous an electrically dominated flow conditions. *Exper Therm and Fluid Sci*, 2000, 21: 187 ~ 197
- 22 Smorodin B L, Velarde M G. Electrothermoconvective instability of an ohmic liquid layer in an unsteady electric field. *J Electrostatics*, 2000, 48: 261 ~ 277
- 23 Wawzyniak M, Seyed-Jagoobi J. Electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium in the presence of volumetric and interface electric charges. *IEEE Trans Industry Appl*, 2001, 37(4): 950 ~ 958
- 24 Bryan J E, Seyed-Yagoobi J. Influence of flow regime, heat flux, and mass flux on electrohydrodynamically enhanced convective boiling. *Journal of Heat Transfer*, 2001, 123(2): 355 ~ 367
- 25 李瑞阳, 施伯红, 郁鸿凌, 等. EHD 强化水平管外沸腾传热的试验研究. *工程热物理论*, 2000, 21(1): 97 ~ 100
- 26 严宗毅. 低雷诺数流动理论. 北京: 北京大学出版社. 2002. 505 ~ 521
- 27 Fuhr G, Hagedorn R, Müller T, et al. Microfabricated electrohydrodynamic pumps for liquids of higher conductivity. *J Microelectromechanical Systems*, 1992, 1: 141 ~ 146
- 28 Fuhr G, Schnelle T, Wagner B. Travelling wave-driven microfabricated electrohydrodynamic pumps for liquids. *J Micromech Microeng*, 1994, 4: 217 ~ 226
- 29 Kojevnikov I V, Motorin O V, Bologa M K, et al. The effects of electrical field parameters, medium properties and interelectrode gap geometry on the EHD pump characteristics. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kitchener: IEEE Dielectric and Insulation Society, 2001, 532 ~ 535
- 30 Pickard W F. Ion drag pumping i theory. *J Appl Phys*, 1963, 34: 246 ~ 250
- 31 Pickard W F. Ion Drag Pumping, II. Experiment. *J Appl Phys*, 1963, 34: 251 ~ 258
- 32 Stuetzer O M. Ion-drag pressure generation. *J Appl Phys*, 1959, 30: 984
- 33 Stuetzer O M. Ion-drag pumps. *J Appl Phys*, 1960, 31: 136 ~ 146
- 34 Washabaugh A P, Zahn M, Melcher J R. Electokinetic pumping using traveling wave high voltages. *Proceeding of the IEEE IA Society Annual Meeting*, 1988, 1563 ~ 1569
- 35 Rayleigh L. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. *Philosophical Magazine*, 1882, XIV: 184 ~ 186
- 36 Barbet B, Atten P, Soucemarianadin A. Two mode EHD stimulation of a conducting liquid jet. *J Electrostatics*, 1997, 40-41: 39 ~ 44
- 37 Cebers A, Lemaire E, Lobry L. Electrohydrodynamic instability and orientation of dielectric ellipsoid in low-conducting fluids. *Phys Rev E*, 2000, 63: 016301
- 38 El-Sayed M F. Effect of normal electric fields on kelving-helmholtz instability for porous media with darcian and forchheimer flows. *Physica A*, 1997, 255: 1 ~ 14
- 39 El-sayed M F. Nonlinear EHD stability of the traveling and standing waves of two superposed dielectric bounded fluids in relative motion. *Physca A*, 2001, 291: 211 ~ 228
- 40 Galal M M. Electrohydrodynamic instability of two superposed viscous miscible streaming liquids. *J Electrostatics*, 2001, 12: 1239 ~ 1257
- 41 Koulova-Nenova D. EHD instability of two liquid layer system with deformable interface. *J Electrostatics*. 1997, 40-41: 185 ~ 190
- 42 Burcham C L, Saville D A. The electrohydrodynamic stability of liquid bridge: microgravity experiments on a bridge suspended in a dielectric gas. *J Fluid Mech*, 2000, 405: 37~56
- 43 Choi J, Kim Y. Micro electrohydrodynamic pump driven by traveling electric fields. *Industry Applications Conference*, 1995. 13th IAS Annual Meeting, IAS '95, Orlando: IEEE Ind Appl Soc, 1995, 2: 1480 ~ 1484
- 44 Chen C H, Zeng S, Mikkelsen J C, et al. Development of a planar electrokinetic micropump. *Int. Mech. Eng. Conf. and Expositon*, Orlando: Amer Soc of Mech Eng, 2000, 5 ~ 10
- 45 Sharbaugh A M, Walker G W. The design and evaluation of an ion-drag dielectric pump to enhance cooling in a small oil-filled transformer. *Proc IEEE-IAS Mtg. Orlando: IEEE Ind Appl Soc*, 1983, 1161 ~ 1165
- 46 Bryan J E, Seyed-Yagoobi J. An experimental investigation of ion-drag pump in a vertical and axisymmetric configuration. *IEEE Trans on Industry Appl*, 1992, 28(2): 310 ~ 316
- 47 Bologa M K, Kozhevnikov I V, Kozhukhari I A. Multistage electrohydrodynamical pump. 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria: IEEE Dielectric and Insulation Soc, 2000, 57 ~ 60
- 48 Dole M, Mack L L, Hines R L. Molecular beams of macroions. *J Chem Phys*, 1968, 49(5): 2240 ~ 2249
- 49 Fenn J B, Mann M, Meng C K, et al. Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules. *Science*. 1989, 246: 64 ~ 71
- 50 Iribarne J V, Thomson B A. On the evaporation of small ions from charge droplets. *J Chem Phys*, 1975, 64(6): 2287 ~ 2294
- 51 Traeger J C. Electrospray mass spectrometry of organometallic compounds. *Int J Mass Spectrometry*, 2000, 200(1-3): 387 ~ 401

- 52 Chen C H, Kelder E M, Schoonman J. Electrostatic sol-spray deposition and characterization of nanostructured TiO_2 thin films. *Thin Solid Films*, 1999, 342: 35 ~ 41
- 53 Lu J, Chu J, Huang W, et al. Preparation of thick PZT film by electrostatic spray deposition (ESD) for the application in micro-system technology. 2001 International, Microprocesses and Nanotechnology Conference Shimane: Japan Soc of Appl Phys, 2001, 200 ~ 201
- 54 Sato M, Takahashi H, Masashi A, et al. Production of ultra-uniformly-sized silica particles by applying ac superimposed on dc voltage. *J Electrostatics*, 1999, 46: 171 ~ 176
- 55 Su B, Choy K L. Microstructure and properties of the CdS thin films prepared by electrostatic spray assisted vapour depositon (ESAVD) method. *Thin Solid Films*, 2000, 359: 160 ~ 164
- 56 Taylor G I. Distintegration of water drops in an electric field. *Proc Roy Soc London Ser A*, 1964, 280: 383 ~ 397
- 57 程久生, 周孝南, 郑久仁, 等. 燃料乙醇电雾化. *燃烧科学与技术*, 1999, 5(1): 70 ~ 75
- 58 Cloupeau M, Prunet-Foch B. electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode. *J Electrostatics*, 1989, 22: 135 ~ 159
- 59 Fernández J M. The effect of charge emission from electrified liquid cones. *J Fluid Mech*, 1992, 243: 561 ~ 571
- 60 Tang K, Gomez A. On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplet. *Phy Fluids A*, 1994, 6: 2317 ~ 2332
- 61 Ganán-Calvo A M, Davila J, Barrero A. Current and droplet size in the electrospraying of liquids scaling laws. *J Aerosol Sci*, 1997, 28(2): 249 ~ 275
- 62 叶中元, Gomez A. 大流量时多股射流静电雾化研究. *工程热物理学报*, 1996, 17(1): 59 ~ 63
- 63 Peter D N, Michael G. Stability and atomization characteristics of electrohydrodynamic jets in the cone-jet and multi-jet modes. *J Aerosol Sci*, 2000, 31(10): 1165 ~ 1172
- 64 Hartman R P A, Brunner D J, Camelot D M A, et al. Jet break-up in electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode. *J Aerosol Sci*, 2000, 31(1): 65 ~ 95
- 65 Borra J P, Tombette Y, Ehouarn P. Influence of electric field profile and polarity on the mode of EHDA related to electric discharge regimes. *J Aerosol Sci*, 1998, 30(7): 913 ~ 925
- 66 Cade R. The electrohydrodynamics of quasi-conical sessile meniscus developing into the taylor cone. *J Electrostatics*, 1995, 35: 279 ~ 293
- 67 Noymer P D, Garel M. Stability and atomization characteristics of electrohydrodynamic jets in the cone-jet and multi-jet modes. *J Aerosol Sci*, 2000, 31(10): 1165 ~ 1172
- 68 Jaworek A, Krupa A. Classification of the modes of EHD spraying. *J Aerosol Sci*, 1998, 30(7): 873 ~ 893
- 69 Desaire H, Leary J A. Detection and quantification of the sulfated disaccharides in chondroitin sulfate by electrospray tandem mass spectrometry. *J American Soc Mass Spectrometry*, 2000, 11(10): 916 ~ 920
- 70 Dülcks T, Juraschek R. Electrospray as an ionization method for mass spectrometry. *J Aerosol Sci*, 1999, 30(7): 927 ~ 943
- 71 Gaumet J, Strouse G F. Electrospray mass spectrometry of semiconductor nanoclusters: comparative analysis of positive and negative ion mode. *J American Soc Mass Spectrometry*, 2000, 11(4): 338 ~ 344
- 72 Kim J, Knapp D R. Microfabricated PDMS multichannel emitter for electrospray ionization mass spectrometry. *J American Soc Mass Spectrometry*, 2001, 12(4): 463 ~ 469
- 73 Gourari H, Lumbreras M, Landschoot R V, et al. Elaboration and characterization of $\text{SnO}_2\text{-Mn}_2\text{O}_3$ thin layers prepared by electrostatic spray depositon. *Sensors and Actuators B*, 1998, 47: 189 ~ 193
- 74 Kim S G, Kim J Y, Kim H J. Deposition of MgO thin films by modified electrostatic spray pyrolysis method. *Thin Solid Films*, 2000, 376: 110 ~ 114
- 75 Miao P, Balachandran W, Xiao P. Preparation of ceramic thin films by electrospray of ceramic suspensions. *IEEE Industry Applications Conference*, 2000, 1: 569 ~ 576
- 76 周浩生, 陆继东, 罗惕乾. 静电场对气动喷头雾化性能的影响研究. *华中理工大学学报*, 1998, 26(3): 56 ~ 58
- 77 陈效鹏, 董绍彤, 程久生, 等. 电雾化装置及雾化模型研究. *实验力学*, 2000, 15(1): 97 ~ 103
- 78 于溪凤, 胡火生, 贺礼端, 等. 电流体动力学技术制备的 Sn-Bi 纳米超细粉的细观结构特征. *物理学报*, 1999, 48(6): 1030 ~ 1035

(2002-12-15 收稿)