

基于高速摄像技术的生物柴油静电雾化研究*

王军锋 黄继伟 王贞涛 王晓英 黄俏梅

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 采用2万帧/s高速数码相机对生物柴油单液滴静电雾化现象进行微距拍摄,对比分析了荷电与非荷电时液滴的变形以及运动情况,获得了不同电压下液滴的雾化模式以及锥射流模式中Taylor-cone的锥长和锥角的变化。结果表明:液滴粒径随着电压增大而减小,下落速度随着电压增大而增大;荷电后同一型号毛细管中生物柴油的变形率大于水,生物柴油小液滴的变形程度大于大液滴;随着电压增大,液滴依次经历滴状模式、过渡阶段、锥射流模式、多股射流模式,在锥射流中Taylor-cone的锥长与电压呈正比,锥角与电压呈反比;电导率对液滴运动有影响,电导率小的液滴基本沿毛细管轴向运动,而电导率大的液滴既有轴向运动又有径向运动。

关键词: 生物柴油 液滴 静电雾化 高速摄像 变形

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0026-05

Electrostatic Atomization of Biodiesel Based on High-speed Camera Technology

Wang Junfeng Huang Jiwei Wang Zhentao Wang Xiaoying Huang Qiaomei

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Electrostatic atomization phenomenon for single droplet was shot based on high-speed video camera with tens of thousands of frames per second. The deformation of the charged and non-charged droplets, as well as their movements were compared and analyzed. The atomization mode at different voltages and the Taylor-cone length and cone angle changes under cone-jet mode were obtained. The results showed that droplet size decreased when the voltage increased, whereas its velocity increased with the voltage increasing. Biodiesel has bigger deformation rate than water under the same capillary, and the small droplet of biodiesel has larger deformation degree than big one. As the voltage increased, droplet went through dripping mode, the transition phase, cone-jet mode and multi-jet mode. In cone-jet mode, the cone length of Taylor-cone became direct ratio to the voltage, whereas the cone angle inversed to it. Conductivity had impact on the droplet movement, droplets with smaller conductivity moved along with the capillary axis, while droplets with bigger conductivity had both axial movement and radial movement.

Key words Biodiesel, Droplet, Electrostatic atomization, High-speed video camera, Deformation

引言

生物柴油及其混合燃料可直接用于发动机而无需改变发动机结构,且能够获得与柴油接近的动力性能和比柴油优越的排放性能,故而被视为最有前

景的替代燃料^[1]。作为液体燃料,生物柴油仍然采用雾化燃烧的方式,研究表明:雾化质量及喷雾流场直接影响着燃烧过程和污染物的生成^[2~3]。

目前,国内外开展了大量针对生物柴油雾化特性的研究^[1,4~6],然而由于其较高的密度与运动粘

收稿日期: 2010-05-27 修回日期: 2010-06-18

* 国家自然科学基金资助项目(51006047)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100905)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2009705)

作者简介: 王军锋,副教授,主要从事两相流体力学、计算流体力学研究,E-mail: wangjunfeng@ujs.edu.cn

度,传统的雾化方法难以达到优良的雾化效果,而且无法实现对其流场的控制。利用静电雾化技术改善燃油雾化质量则是正在进行探索的一个新尝试^[7]。如果使燃油带上一定量的电荷,由于同种电荷间的排斥作用,将导致其表面张力降低和内外压力差增加,从而有助于改善雾化^[8]。其次,静电雾化可控制燃料粒子的产生及其运动,并使燃料充分燃烧^[9]。此外,荷电液滴由于带有同种电荷可得到均匀的气液两相流动。实际运用中的静电雾化通常是指荷电二次雾化,荷电二次雾化是雾滴破碎成为更为细小雾滴的基础。目前国内外已有许多研究者对荷电二次雾化进行了研究^[10~15]。然而以上针对荷电二次雾化进行的分析与研究,尚处于起步阶段。本文采用 2 万帧/s 高数摄像技术进行微距拍摄,并结合图像处理技术分析两种不同的介质(水和生物柴油)液滴的形貌特征以及运动情况,以期为后期开展生物柴油密集喷雾及实际应用打下理论基础。

1 实验装置与实验方法

介质的物性参数见表 1。

表 1 生物柴油和水的物性参数

Tab. 1 Physical parameters of biodiesel and water

参数	水	生物柴油
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	999	880
运动粘度 $\nu/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1.007	6.950
电导率 $\gamma/\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$	0.5	$10^{-10}\sim10^{-12}$
介电常数 ε	81	1.9~2.0
表面张力 $\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.073	0.026

实验装置分为静电雾化装置和拍摄装置。静电雾化装置由储液筒、金属毛细管、电极、高压静电发生器和导线组成。储液筒里的液体流经毛细管形成细小液滴,高压静电发生器通过导线连接电极,最大可提供 150 kV 的电压,毛细管接地,当液滴经过毛细管和电极之间的电场时,会发生变形或者破裂。液滴荷电后发生的变形以及分裂雾化时间很短(亚毫秒至微秒级),捕捉这一过程需借助高数摄像技术。实验采用 2 万帧/s 的高速数码相机(MotionPro X4 plus)配合 NAVITAR 型的 12 倍变焦的微距镜头,用于捕捉液滴在电场作用下的瞬间图片。拍摄光源为 LED 冷光源,放置在高速数码相机的对面,以便能在极短的曝光时间内观察到比较清晰的图像,图像分辨率为 300×412。

实验时,将高速数码相机对准毛细管和电极之间的区域,打开放置在其对面 LED 冷光源,当液滴经过毛细管和电极之间的电场时,高速数码相机记

录液滴在拍摄区间的瞬间特征。实验装置示意图如图 1 所示。

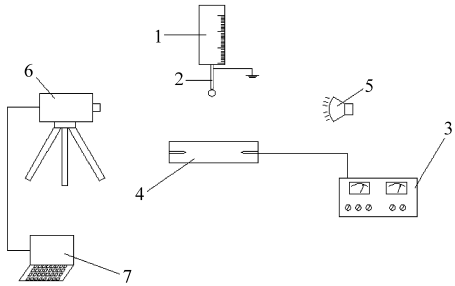


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental devices

1. 储液筒 2. 金属毛细管 3. 高压静电发生器 4. 组合电极
5. 光源 6. 高速数码相机 7. 计算机

2 结果与分析

2.1 液滴的变形

液体在毛细管中自由下落,刚开始会悬浮在毛细管下部,体积不断膨胀,当液体重力超过吸附在管口上液体的表面张力时,吸附状态会被破坏,形成液滴^[16]。理论状态下,一个静止液滴稳定后,若不考虑重力影响,在表面张力作用下将收缩为球形。

电场中运动的液滴在重力、阻力、静电力及自身的表面张力等力的综合作用下,呈不规则的椭球形,且不断脉动。液滴变形率为

$$\varphi = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}} \tag{1}$$

式中 $d_{\max}$ ——变形液滴的长轴直径,mm
 $d_{\min}$ ——变形液滴的短轴直径,mm

图 2 和图 3 显示了荷电与非荷电情况下生物柴油液滴和水滴随时间的变形率以及在两种典型型号毛细管(其中 9 号外径为 0.9 mm,内径为 0.67 mm;5 号外径为 0.5 mm,内径为 0.27 mm)中生物柴油液滴随时间的变形率。

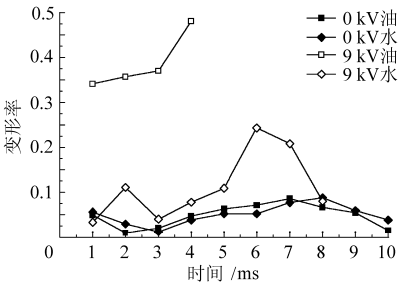


图 2 9 号毛细管中水和生物柴油单液滴随时间的变形率

Fig. 2 Droplet deformation rate with time under the 9-type capillary for water and biodiesel

受电场的作用液滴的表面张力会变小,一个初始表面张力为 σ_0 的液滴,荷电以后,其表面张力减

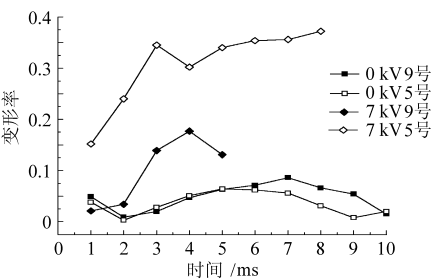


图3 两种不同型号毛细管中生物柴油单液滴随时间的变形率

Fig.3 Droplet deformation rate with time under two types of capillary for biodiesel

小为^[17]

$$\sigma = \sigma_0 - q^2 / (8 \pi^2 \epsilon_a d^3) \tag{2}$$

式中 ϵ_a ——液滴周围介质的介电常数

q ——液滴所带电量,C

d ——液滴粒径,mm

表面张力减小,液滴抵抗变形的能力减弱,更容易变形。

从直径为 d_0 的毛细管中流出的液滴直径为^[16]

$$D = \left(\frac{6 d_0 \sigma}{\rho_l g} \right)^{1/3} \tag{3}$$

式中 g ——重力加速度,m/s²

ρ_l ——液滴密度,kg/m³

σ ——液滴表面张力,N/m

非荷电情况下,9号毛细管中生物柴油和水以及5号和9号毛细管中生物柴油单液滴的变形程度基本一致。荷电后,由于电场力的作用,生物柴油的变形率要大于水,且小粒径的生物柴油液滴的变形率大于大粒径液滴。

2.2 液滴的雾化模式

由式(2)和(3)可知,液滴荷电以后,粒径会减小,且荷电量越多粒径越小,如图4和图5所示,9号和5号毛细管所形成的液滴粒径都是随着电压的增大而减小。电压较小时,液滴的下落频率较自由下落要快,此即为滴状模式。电压增加到一定程度(图4和图5所示的9 kV),液滴时而以滴状模式下落,时而形成连续的射流,此阶段为滴状向锥射流模式的过渡阶段。电压继续增大,静电力克服液滴的表面张力,小液滴由液锥喷射而出^[18],电压越大,液锥就越细,且偏移越来越明显,此为锥射流模式。若再增大电压(图4和图5所示:9号增大到14.5 kV,5号增大到13.5 kV),液滴被分解为许多细细的液丝,液丝由于带有同种电荷而相互排斥分布于毛细管的端部,此即为多股射流模式,是一种不稳定的雾化模式。

由于锥射流产生的液滴粒径小,且分散均匀,故

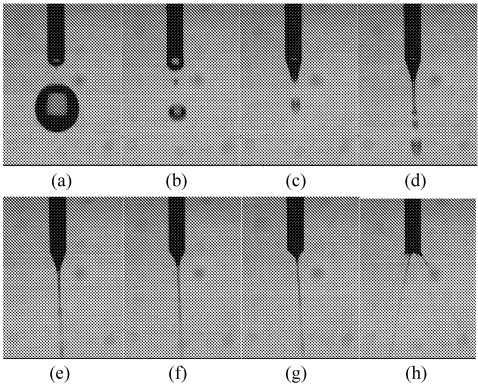


图4 9号毛细管中生物柴油液滴下落形态随电压的变化

Fig.4 Droplet shape of biodiesel change with voltage in 9-type capillary

(a) $V=0$ (b) $V=7\text{ kV}$ (c) $V=9\text{ kV}$ (d) $V=9\text{ kV}$
(e) $V=10\text{ kV}$ (f) $V=11\text{ kV}$ (g) $V=13\text{ kV}$ (h) $V=14.5\text{ kV}$

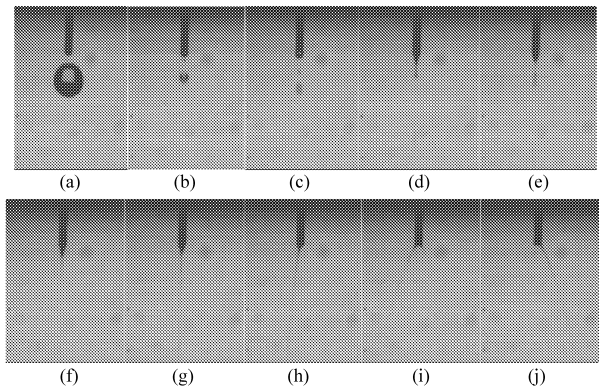


图5 5号毛细管中生物柴油液滴下落形态随电压的变化

Fig.5 Droplet shape of biodiesel change with voltage in 5-type capillary

(a) $V=0$ (b) $V=7\text{ kV}$ (c) $V=7.5\text{ kV}$ (d) $V=9\text{ kV}$
(e) $V=9\text{ kV}$ (f) $V=10\text{ kV}$ (g) $V=11\text{ kV}$
(h) $V=13\text{ kV}$ (i) $V=13.5\text{ kV}$ (j) $V=15\text{ kV}$

而被广泛应用。在锥射流模式中,液滴由液锥喷射而出,此液锥即为Taylor-cone,电压改变,Taylor-cone的锥长和锥角都会发生变化,产生不同尺寸的液滴。图6给出了几组电压下两种典型型号的毛细管中Taylor-cone的锥长和锥角的变化。

由图6可看出,在锥射流模式中,Taylor-cone锥长随着电压增大而减小,锥角随着电压增大而增大。

2.3 液滴的运动情况

静电雾化与传统雾化相比的优点是能够控制液滴的产生和运动,进而控制流场。液滴在电场中需要经历一段时间才能被荷上电,荷上电所需要的时间称之为荷电弛豫时间,为

$$\tau = \frac{\epsilon}{\gamma} \tag{4}$$

式中 τ ——荷电弛豫时间,s

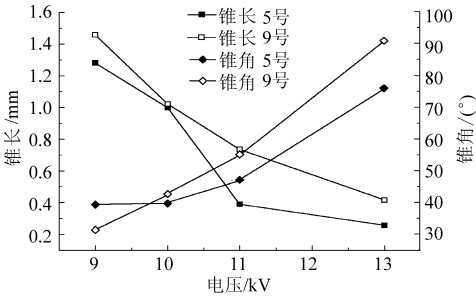


图6 Taylor-cone 锥角和锥长与电压的关系

Fig.6 Cone angle and cone length of Taylor-cone change with the voltage

ϵ ——液体介电常数
 γ ——液体电导率, mS/m

由表1可以看出,生物柴油的电导率较水小很多,属于绝缘性液体。由式(4)可知,其荷电弛豫时间要比电导率较高的水大很多,油滴在金属毛细管和高压电极之间的电场内的运动时间小于荷电弛豫时间,因此,油滴在电场中运动时很难被荷上电或者只能被荷上很少的电量。而水由于电导率较高,在电场中运行时很容易被荷上电。由集肤效应可知,液滴的带电量随着深入距离呈指数衰减,故而可认为电量主要集中于液滴表面,液滴表面的荷电情况会对液滴的运动产生影响。

图7给出了9号毛细管中几组电压下的液滴瞬时速度。电压为0时,大液滴和卫星颗粒在其自身重力作用下自由下落,且卫星颗粒的运动速度大于大液滴,这是由于大液滴不断脉动,阻力作用明显,使得其向下运动的加速度减小,而卫星颗粒粒径较小,脉动作用不明显,其阻力较小,向下运动的加速度较大,因此其运动速度大于大液滴的运动速度。施加7 kV 的电压后,大液滴和卫星颗粒被由于荷上同种电荷而相互排斥,液滴之间的距离很近时,斥力大于卫星颗粒的重力,因此卫星颗粒会向上运动。当二者之间的距离增大到一定程度,排斥力小于重力,卫星颗粒又会向下运动,大液滴在自身重力和斥力的作用下始终向下运动,因此,在一定时间内大液滴的速度大于卫星颗粒的速度。电压为9 kV 时为过渡状态,开始形成均匀的液滴,在电场力和重力的共同作用下,液滴运动速度明显大于自由下落和电压为7 kV 时的速度。

改变毛细管型号,采用5号毛细管,得到不同时刻不同电压下液滴的运动速度如图8所示。从0~7.5 kV,大液滴的运动速度始终大于卫星颗粒的速度,在过渡状态,液滴不再是以大液滴和卫星颗粒的形式下落,而是以液柱的形式下落,且下端长液柱的运动速度大于上端的短液柱。

生物柴油较低的电导率使其在电场中运动只能

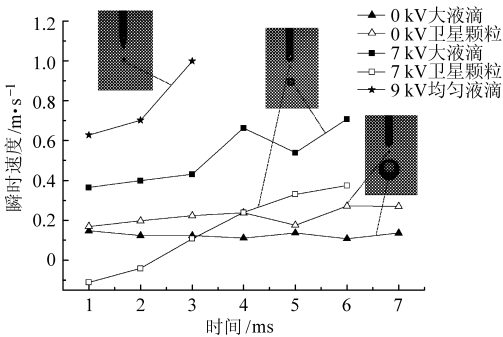


图7 9号毛细管生物柴油液滴在不同电压下的瞬时速度

Fig.7 Droplet instantaneous velocity of biodiesel at different voltages in 9-type capillary

被荷上很少的电量,液滴之间的排斥力作用不明显,故而液滴只是沿着毛细管轴向运动,如图7、8所示。

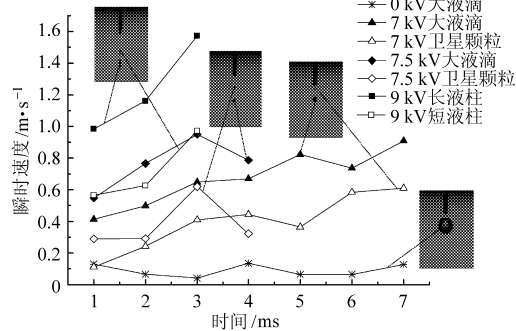


图8 5号毛细管中生物柴油液滴在不同电压下的瞬时速度

Fig.8 Instantaneous velocity of droplet for biodiesel at different voltages in 5-type capillary

水滴在电压较低时,以大液滴形式下落,大液滴的运动速度随电压增大而增大。电压增加到一定值(图9所示的7.5 kV),会出现卫星颗粒,且卫星颗粒会逐渐偏离毛细管的轴向,这是由于水的电导率比较高,在电场中运行时很容易被荷上电,卫星颗粒在运动过程中,受大液滴和毛细管端部液滴的排斥作用,大液滴粒径比毛细管端部的液滴粒径大,所带电量多,其对卫星颗粒的排斥力大于毛细管端部液

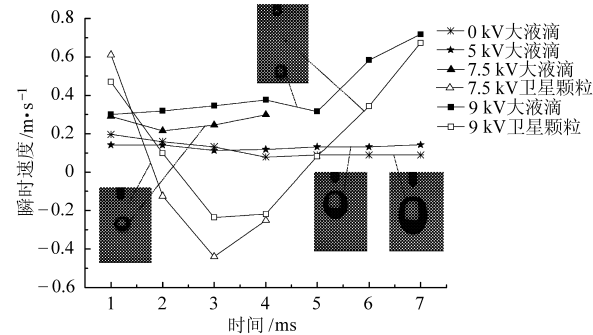


图9 9号毛细管中水滴在不同电压下的的瞬时速度
Fig.9 Instantaneous velocity of droplet for water at different voltages in 9-type capillary

滴的排斥力,因此,在一段时间内,液滴会向上运动。由于大液滴和毛细管端部的液滴不断脉动,使得液滴形状不规则,造成液滴表面的电场不均匀,大液滴和卫星颗粒之间的库仑力不断变化,因而卫星颗粒在运行过程中产生了偏移,既有沿着毛细管轴向的运动,又有径向运动,如图9所示。值得注意的是,卫星颗粒只有在电压增加到一定值时才会出现,这与相同型号毛细管中的生物柴油有所差别,究竟卫星颗粒的形成是和流体的物性、毛细管型号,还是与实验条件有关,需要作进一步研究。

3 结论

(1)随着电压增大,液滴的粒径不断减小,下落

速度逐渐增大。荷电后同一型号毛细管中生物柴油的变形率大于水,且小粒径的生物柴油液滴的变形程度大于大粒径液滴。

(2)随着电压增大,液滴依次经历滴状模式、过渡阶段、锥射流模式、多股射流模式。锥射流模式中,Taylor-cone的锥长随着电压的增大而减小,锥角随着电压的增大而增大。

(3)生物柴油由于电导率低,在电场中运行时只能被荷上很少的电量,电场力作用不明显,其大液滴和卫星颗粒都沿着毛细管轴向运动。水由于电导率较高,电场力作用明显,不稳定液滴产生的不平衡库仑力使卫星颗粒发生偏移,同时具有轴向运动和径向运动。

参 考 文 献

- 1 Park S W, Kim S, Lee C S. Effect of mixing ratio of biodiesel on breakup mechanisms of monodisperse droplets [J]. *Energy & Fuel*, 2006, 20(4): 1 709 ~ 1 715.
- 2 Taylor A M. Science review of internal combustion engines [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12): 4 657 ~ 4 667.
- 3 Myong K J, Suzuki H, Senda J, et al. Spray inner structure of evaporating multi-component fuel [J]. *Fuel*, 2008, 87(2): 202 ~ 210.
- 4 Lee C S, Park S W, Kwon S I. An experimental study on the atomization and combustion of biodiesel-blended fuels [J]. *Energy Fuels*, 2005, 19(5): 2 201 ~ 2 208.
- 5 Park S H, Kim H J, Suh H K, et al. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: surface tension and viscosity effects [J]. *Fuel*, 2007, 86(10 ~ 11): 1 534 ~ 1 544.
- 6 Gao Y, Deng J, Li C W, et al. Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(5): 616 ~ 624.
- 7 李世武,王云鹏,王羽,等. 静电雾化技术在汽车节能降排中的应用[J]. *汽车工程*, 2001, 23(4): 283 ~ 286.
- 8 闻建龙,王军锋,罗惕乾. 荷电改善燃油雾化的实验研究[J]. *中国公路学报*, 2002, 15(3): 108 ~ 110.
Wen J L, Wang J F, Luo T Q. Experimental research on improving atomization quality of liquid fuel by charging [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(3): 108 ~ 110. (in Chinese)
- 9 葛自良,毛骏健,陆汝杰. 液体静电雾化现象及其应用[J]. *自然杂志*, 2003, 22(1): 37 ~ 41.
- 10 Gomez A, Tang K. Charge and fission of droplets in electrostatic sprays [J]. *Physics of Fluids*, 1994, 6(1): 404 ~ 414.
- 11 Davies K, Gerken S. Charging and ignition of sprayed fuel [J]. *Journal of Electrostatics*, 2000, 49(3 ~ 4): 139 ~ 150.
- 12 Shrimpton J S, Yule A J. Characterization of charged hydrocarbon sprays for application in combustion systems [J]. *Experiments in Fluids*, 1999, 26(5): 460 ~ 469.
- 13 Shrimpton J S, Laounal Y. Dynamics of electrically charged transient evaporating sprays [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(8): 1 063 ~ 1 081.
- 14 Shrimpton J S. Dielectric charged drop break-up at sub-rayleigh limit conditions [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 12(3): 573 ~ 578.
- 15 于水,李理光,胡宗杰,等. 静电喷雾液滴破碎的理论边界条件研究[J]. *内燃机学报*, 2005, 23(3): 239 ~ 243.
Yu S, Li L G, Hu Z J, et al. Study on theoretical boundary of charged droplet breakup in electrospray [J]. *Transactions of CSICE*, 2005, 23(3): 239 ~ 243. (in Chinese)
- 16 Lefebvre A H. *Atomization and sprays* [M]. Indiana: Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 311 ~ 333.
- 17 王军锋. 煤油荷电喷雾特性及喷雾流场的试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2002.
Wang J F. Experiment study on charged spray characteristics and spray flow field of kerosene [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2002. (in Chinese)
- 18 Smith J N, Flagan R C, Beauchamp J L. Droplet evaporation and discharge dynamics in electrospray ionization [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2002, 106(42): 9 957 ~ 9 967.