

文章编号: 1672-9897(2009)02-0040-05

TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H₂O 浓度

李 飞, 余西龙, 陈立红, 张新宇

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100190)

摘要:基于可调谐二极管激光器吸收光谱技术(TDLAS)建立了温度和 H₂O 浓度测量系统,利用光谱数据库 Hitran2004 在 1393nm 附近选择了在 500~1300K 有很高测温灵敏度的两条水吸收线:7168.437 cm⁻¹, 7185.597 cm⁻¹。在 1kHz 的扫描频率下,利用直接吸收-扫描波长法对甲烷/空气预混平面火焰进行测量,并进行边界层修正,与热电偶的对比结果显示,在温度区间 1100~1350K,两者最大相差 80K(6.7%);水蒸气组分浓度与计算值平均相差小于 0.02(10%)。

关键词:TDLAS; 温度测量; 浓度测量; 预混平面火焰; 光谱数据库

中图分类号:V231.2 **文献标识码:**A

Temperature and water vapour concentration measurements of CH₄/Air premixed flat flame based on TDLAS

LI Fei, YU Xi-long, CHEN Li-hong, ZHANG Xin-yu

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) was constructed for temperature and water vapor concentration measurement. Absorption lines were selected and analysed using spectrum database Hitran2004. Two fiber-coupled near infrared distributed feedback lasers was used to probe two water vapor absorption features (7168.437 cm⁻¹ and 7185.597 cm⁻¹) near 1393nm which has high sensitivity of temperature measurement in 500~1300K. Successful experiments were performed in a CH₄/Air premixed flat flame burner using direct absorption wavelength scanned method at a 1kHz scan rate. Because of the cooler shear layer in the flat flame, mixing layer theory was applied to correct TDLAS results. Comparison with thermocouple measurements, the max difference of both methods is less than 80K (6.7%). Comparison with calculation, the average water mole fraction difference is less than 0.02(10%).

Key words: TDLAS; temperature measurement; concentration measurement; premixed flat flame; spectrum database

0 引 言

在带有燃烧的流场中,气体温度和组分浓度测量是研究燃烧现象的重要手段。传统的热电偶和采样探针等手段响应慢,并会干扰流场,难以适用于复杂环境。因此需要寻找更有效的测量手段。

可调谐二极管激光器吸收光谱技术(TDLAS)是一种很有潜力的新型测量手段,它以其高灵敏、响应快、造价低廉等优点已引起广泛关注和研究^[1-3]。在国内由于起步较晚, TDLAS 在燃烧测量中的应用,还未见报导。在以氢气或碳氢化合物为燃料的燃烧中,

H₂O 是重要的燃烧产物之一。笔者以 H₂O 为目标组分,设计了一套基于直接吸收-波长扫描法的适合燃烧测量的 TDLAS 系统。

预混平面火焰是一种具有一维特征的稳定的标准火焰,其火焰温度和燃烧产物浓度具有很高的时间和空间均匀性^[4]。为对 TDLAS 测量系统进行验证,建立一套 CH₄/Air 预混平面火焰系统,通过改变当量比和总的质量流量改变平面炉温度。利用该系统进行了 TDLAS 测量并与热电偶进行比较,得到了较为满意的结果。

收稿日期: 2008-04-01; 修订日期: 2008-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(10525212)和(10772188)资助项目

作者简介: 李 飞(1982-),男,江苏徐州人,博士研究生,研究方向:超声速燃烧与光谱诊断技术, E-mail: lifei@imech.ac.cn

1 基本原理

当一束频率为 ν 的激光通过火焰,其出射光强和入射光强满足 Beer-Lambert 关系式

$$(I/I_0)_\nu = \exp(-K_\nu \times L) \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强, I 为出射光强, K_ν 为吸收率, L 为吸收长度。而吸收率是静压 P , 水蒸气组分浓度 $X_{\text{H}_2\text{O}}$, 吸收谱线线强度 $S(T)$, 线型函数 $\phi(\nu)$ 的函数

$$K_\nu = PX_{\text{H}_2\text{O}}S(T)\phi(\nu) \quad (2)$$

其中线型函数满足 $\int \phi(\nu) d\nu \equiv 1$ 。如果采用波长扫描-直接吸收的方法,通过积分整个吸收线型得到的积分吸收率就只是温度和组分浓度的函数。在均匀流场中,静压和组分浓度可以认为是沿光程的不变量,这样就可以选取两个吸收线,列出两个吸收方程解出 T 和 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 这两个未知数。

由(1)式可得

$$K_\nu = -\frac{1}{L} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_\nu \quad (3)$$

根据(3)式可以将实验中探测器得到的光强信号 I , 变换为吸收率随着频率的变化。两条孤立吸收线的积分吸收比 R

$$R = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} PX_{\text{H}_2\text{O}}LS_1(T)\phi_1(\nu - \nu_{01}) d\nu}{\int_{\nu_2}^{\nu_2} PX_{\text{H}_2\text{O}}LS_2(T)\phi_2(\nu - \nu_{02}) d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)}$$

$$\exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E_1'' - E_2'')\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (4)$$

R 是 T 的单值函数,通过测量积分吸收比定出温度,进而由式(2)可以得到组分浓度 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 。

在 1.3~1.5 μm 近红外区,通讯用分布反馈式激光器(DFB)可以以数千赫兹的扫描频率扫过 2~3 个波数的光谱范围,这为扫描波长法奠定了基础。对于很多弱吸收的燃烧环境,TDLAS 需要提高探测信噪比,常用两种方法:平衡探测和二次谐波分析(2f 探测)。而对于较强吸收(>5%),直接吸收测量就足以胜任,并且其结构相对简单,易于实现;特别是对于超燃冲压发动机(Scramjet)这种 H₂O 组分浓度较大的燃烧环境尤为适合。因此直接吸收-波长扫描法仍具有广泛的应用前景。

2 吸收线的选择

吸收线的选择至关重要:选择孤立、吸收率合适的吸收线可以简化计算,提高测量精度。笔者利用实验室现有的中心波长为 1393nm 可调谐二极管激光器,根据光谱数据库 Hitran2004^[5],调谐至中心频率分别为 7168.437 cm^{-1} 和 7185.597 cm^{-1} 的两条吸收线。

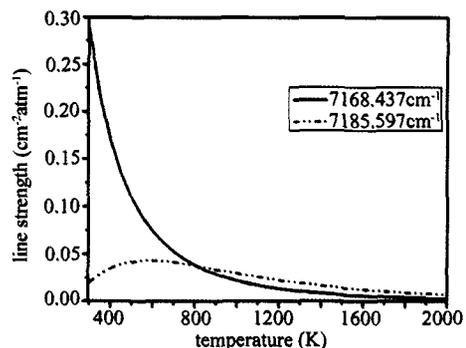


图1 两线线强度随温度的变化

Fig. 1 Linestrengths of line pair vs. temperature

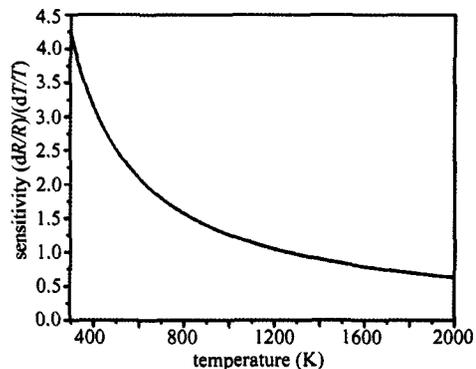


图2 测温灵敏度随温度的变化

Fig. 2 Temperature sensitivity vs. temperature

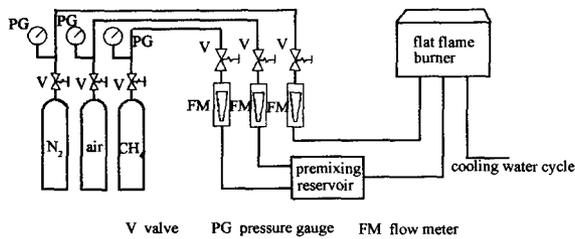
图1为两谱线在 300~2000K 范围内的线强度。在 500~1300K 范围两线均有较强吸收,并且线强度比较接近(2 倍以内)。在 500K 以下,7168.437 cm^{-1} 线吸收远强于 7185.597 cm^{-1} 线,而吸收信号相差太大不适合同光路测温。图2为此吸收线对在 300~2000K 范围的测温灵敏度,可见在 300~1300K 温度范围此线对具有很高的测温灵敏度。因此利用此线对搭建的同光路 TDLAS 测温系统适合测量 500~1300K 温度范围。当然具体的测温区间还需综合考虑吸收长度 L 和水蒸气分压($PX_{\text{H}_2\text{O}}$)。

3 实验装置

3.1 CH₄/Air 预混平面炉系统

图3和4分别为 CH₄/Air 预混平面火焰炉系统

和平面炉结构图。平面炉外径 100mm,高 50mm 的主体由黄铜制成,直径 50mm 的多孔板由直径 $20\mu\text{m}$ 的青铜粉末材料烧结而成。



V valve PG pressure gauge FM flow meter

图3 CH₄/Air 预混平面炉系统示意图

Fig.3 Sketch of the CH₄/Air premixed flat flame burner

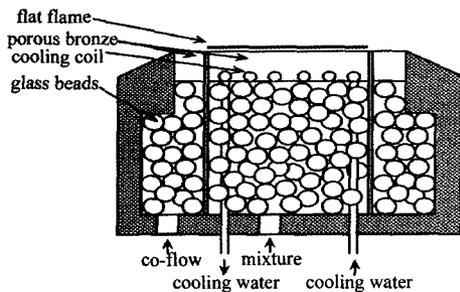


图4 预混平面炉结构示意图

Fig.4 Sectional view of the flat flame burner

腔体中填满直径 3mm 的玻璃球以均匀气流,盘绕在多孔板中的内径 3mm 的冷却水管用于冷却多孔板以稳定火焰^[4]。空气和甲烷在进入燃烧炉前在预混池中充分混合。氮气环绕预混燃气,主要起到隔离环境空气和减少燃烧尾流与空气对流传热的作用。甲烷、空气、氮气均由高压气瓶提供,3种气体的流量分别由流量计读出。

3.2 TDLAS 测量系统

TDLAS 测量系统由两台可调谐二极管激光器和激光控制器 (ILX Lightwave; LDC-3700B)、信号发生器 (Tektronix; AFG3021B)、频响为 10MHz 的 InGaAs 红外探测器和示波器 (Tektronix; TDS 2024B) 组成。激光器控制器通过改变温度和电流来调节激光器输出波长和功率。激光器典型输出功率 10mW,激光谱线半宽小于 20MHz。首先经标定确定所选谱线对应的控制器控制温度,然后通过锯齿波信号发生器输出电压信号调制控制器输出电流以改变激光器输出光频率。

将两台激光器输出激光用一根 50:50 分束比光纤耦合器耦合到一根单模光纤中,此光纤另一端为光纤准直器,输出光束直径小于 1mm,光束中心距离炉面 3.5mm。为保证吸收为较强吸收 (> 5%),应增加吸收长度 L 。于是在对面放置一小面积反射镜将光线返回准直器同侧,如图 5 所示。感光面 $\Phi 2\text{mm}$ 的

InGaAs 探测器位于准直器之后,使用示波器记录探测器输出信号。为使加倍的吸收长度不会改变原定测量区间,反射镜处入射和反射光的夹角应尽可能小,本实验中约为 0.72° 。

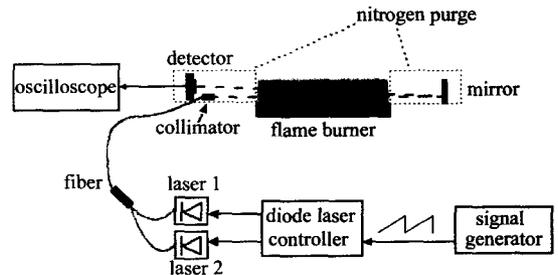


图5 预混平面炉 TDLAS 测量系统示意图

Fig.5 Sketch of the TDLAS system applied to the flame burner

为检验测量结果,每次实验均使用热电偶测量沿光程不同位置处的气体温度。同时为了避免环境空气中水蒸气对吸收测量的影响,反射镜、准直器、探测器用氮气隔离。

4 实验结果及分析

所使用的这种水冷式平面火焰炉,可以通过调节当量比和总流量两种方式改变火焰温度。由于 CH₄/Air 火焰传播速度较低,流量过大时燃烧不稳定,故实验中对流量加以控制:甲烷流量 0.6 ~ 1.5L/min,空气流量 8 ~ 20L/min,当量比 0.6 ~ 1.2。在该条件下获得的温度范围为 1100 ~ 1350K,刚好位于所选线对的高灵敏度范围内。

图 6 为两线原始吸收扫描记录数据。由于信号发生器输出 1kHz,4Vpp 的锯齿波信号扫描波长,图中所示的相对时间对应着不同的激光频率,每 1ms 对应约 0.48nm 的光谱范围。使用示波器记录探测器电压信号,每扫描周期记录多达 2500 个数据点,便于拟合基线。

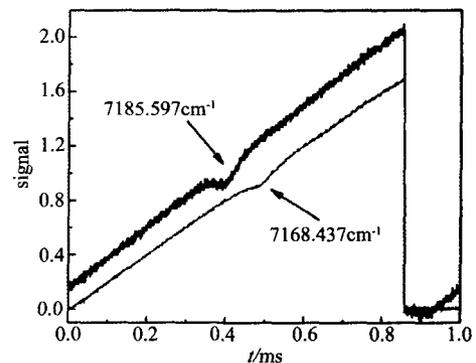


图6 原始吸收数据

Fig.6 A typical absorption scan taken at 1kHz

图 7 为典型的沿光程温度分布图。可以看出,平面炉分为核心区和边界层区两部分,核心区温度几乎相同,边界层区温度沿光程近似线性分布,于是炉面温度分布可以用等腰梯形拟合(见图 7)。边界层对温度测量的影响可以用剪切层理论来分析和修正^[6]。每次实验中,使用热电偶记录沿光程炉面温度分布,以此作为边界层修正的依据。

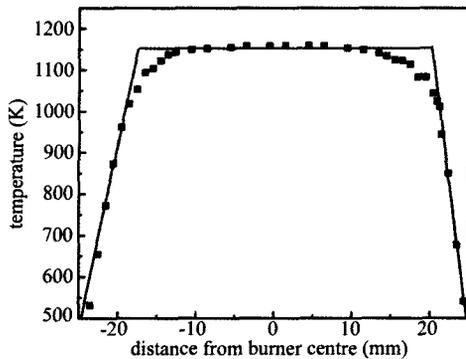
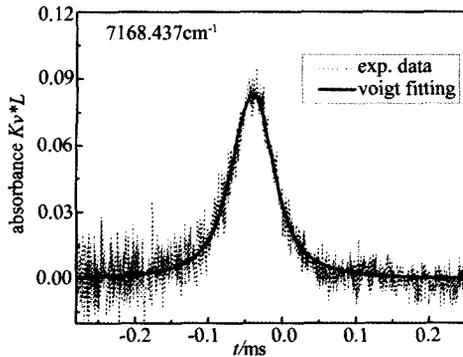
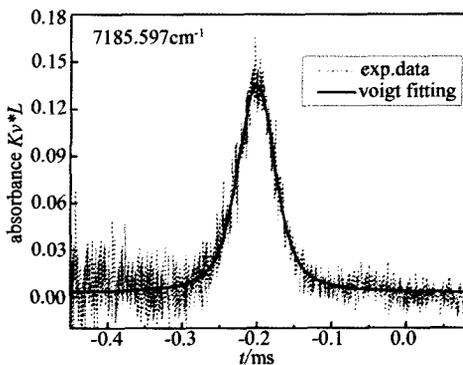


图 7 热电偶测量平面炉沿光程温度
Fig.7 Temperature profile measured by thermocouple and fitted trapezoid profile



(a) 7168.437cm⁻¹ 线



(b) 7185.597cm⁻¹ 线

图 8 典型的吸收信号及其 Voigt 拟合线型
Fig.8 Typical absorption signals and Voigt fitting

在实验对应的 1100 ~ 1350K 温度区间,7185.597cm⁻¹线吸收强度明显大于 7168.437cm⁻¹线。经过直线拟合、反演计算、Voigt 线型拟合等一系列数

据处理过程后,典型吸收线型如图 8 所示。可以看出 7168.437cm⁻¹线峰值吸收约 9%,7185.597cm⁻¹线约 13%。这满足强吸收要求,适合使用直接吸收-波长扫描法。

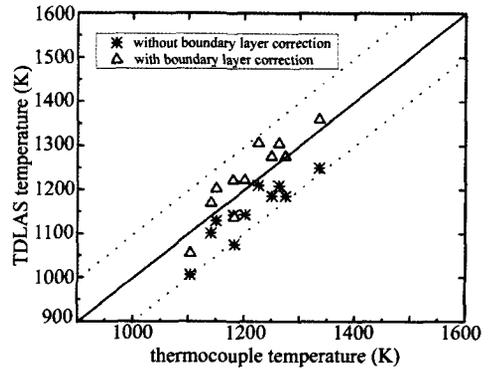


图 9 TDLAS 与热电偶测温结果的比较
Fig.9 Comparison of TDLAS temperature and thermocouple temperature

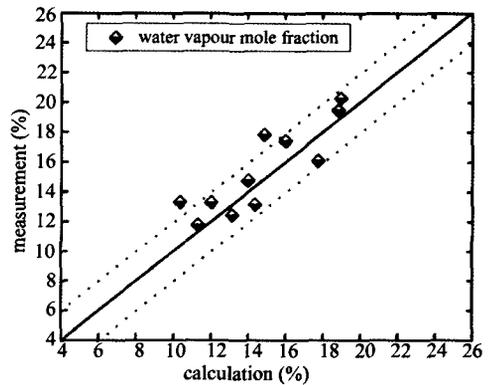


图 10 TDLAS 浓度测量结果与 Gaseq 计算值的比较
Fig.10 Comparison of calculation and TDLAS water concentration

由式(4),通过计算双线的积分吸收比 R 可以得到平均温度 T (见图 9 中 * 数据;横坐标热电偶温度为平面炉核心区温度)。可见 TDLAS 平均温度明显低于热电偶,这个差值正是边界层引起的。经边界层修正后的 TDLAS 温度结果见图 9 中的三角形数据点。在实验对应的 1100 ~ 1350K 温度区间,TDLAS 与热电偶温度的最大偏差为 80K(6.7%),平均相差小于 30K(2.5%)。对于此种直接吸收测量法,基线拟合误差是温度测量的最大误差来源。

TDLAS 温度测定以后,可以由线对中任一吸收线的积分吸收率,结合静压 P 、吸收长度 L 得到火焰中水蒸气的组分分压 PX_{H_2O} 。而由甲烷/空气当量比,根据 TDLAS 所测温度和局部热力学平衡假设,利用软件 Gaseq 可计算得到水蒸气的理论组分分压,实验中实现的水蒸气分压范围 0.1 ~ 0.19 × 10⁵ Pa。图 10 为水蒸气组分浓度测量值和计算值的比较。两者最大

相差 0.03(30%), 平均相差小于 0.02(10%) 以内。由于随预混气和氮气流量比变化, 火焰形状会发生变化, 这就给吸收长度 L 的测量增加了难度。温度测量误差、吸收长度测量误差、流量计读数误差为组分浓度测量的 3 大误差来源。

5 结论

设计建立一套基于直接吸收-波长扫描法的 TD-LAS 测量系统。在 1kHz 的扫描频率下, 对甲烷/空气预混平面火焰炉进行测量, 并进行边界层修正, 与热电偶测量结果进行比较, 两者平均相差小于 30K(2.5%); 水蒸气组分浓度与计算值平均相差小于 0.02(10%)。此实验为下一步利用 TDLAS 测量各种复杂燃烧奠定了基础。当然, 笔者所用的这种吸收光谱法得到的是流场参数的一个沿光程的平均值, 它具有很高的时间分辨率, 但空间分辨率不高, 若要将其应用于非均匀流场诊断, 仍需进一步探索。

致谢:

笔者所使用的平面炉为力学所俞刚研究员提供; 在实验过程和该文写作中, 吴宝根研究员提出很多很

好的建议, 在此表示谢意。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS A D, HOUWING A F P. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6653-6659.
- [2] ZHOU X, LIU X, JEFFRIES J B, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature[J]. *Appl. Phys.* 2006, 82(3): 469-478.
- [3] 涂兴华, 刘文清, 董凤忠, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱技术在线监测机动车尾气排放 CO 和 CO₂ 的方法[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(9): 980-984.
- [4] 杨仕润, 赵建荣, 俞刚, 等. 氢/空气预混平面火焰 CARS 温度测量[J]. *激光技术*, 2000, 24(5): 277-280.
- [5] ROTHMAN L S, JACQUEMART D, BARBE A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 96: 139-204.
- [6] ZHOU X, LIU X, JEFFRIES J B, et al. Development of a sensor for temperature and water vapor concentration in combustion gases using a single tunable diode laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(8): 1459-1468.

(上接第 39 页)

4 结论

(1) 深入分析了高压静电场作用下雾化液滴在射流区、过渡区和雾化区的运动, 并提出将射流长度、雾化角和液滴粒径作为静电场中描述液体射流特性的主要指标, 进一步深化了高压静电场中液体射流特性的实质;

(2) 结合射流理论, 对不同电压下雾化油液的射流长度和雾化角进行了分析, 结果表明: 射流长度随着电压的增大, 总的趋势是减小的, 但在不同区域, 电压对射流长度的作用不同; 雾化角随电压的增加先增大到一定程度后开始减小, 最后逐渐趋于稳定;

(3) 通过对雾化油液粒径及其分布的分析发现, 液滴的粒径随着电压的升高不断减小, 粒径分布在不同电压下呈现不同的分布状态。当电压在 65kV 左右时, 液滴粒径较小且分布最为均匀, 此时油液达到较好的雾化效果。

参考文献:

- [1] 高全杰. 静电涂油机中油液的荷电雾化研究[J]. *中国机*

械工程, 2002, 13(7): 552-554.

- [2] TAYLOR G. Disintegration of water drops in an electric field[J]. *Proc. Roy. Soc.*, 1964, A(280): 383-397.
- [3] GANAN-CALVO A M, DAVLIA J, BARRERO A. Current and droplet size in the electro spraying of liquids[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(2): 249-275.
- [4] LASTOW O, BALACHANDRAM W. The effect of space charge on the performance of an electrostatic induction charging spray nozzle[J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(3): 261-272.
- [5] ZHAO S, CASTLE GSP. A discrete drop let transport model for predicting spray coating patterns of an electrostatic rotary atomizer[J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 64(3): 234-246.
- [6] JAYASINGHE S N, EDIRISINGHE M J. Effect of viscosity on the size of relics produced by electrostatic atomization[J]. *Journal of Aerosol Science*. 2002, 33(10): 1379-1388.
- [7] 王冬, 俞刚. 煤油射流在超声速燃烧室中的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(2): 11-13.
- [8] WANG Z, JIN H H. Numerical simulation of charged gas-liquid two phase jet flow in electrostatic spraying[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 14(3): 266-270.
- [9] 周浩生, 洗福生, 高良润. 荷电射流雾化研究[J]. *江苏理工大学学报(自然科学版)*, 1995, 16(4): 7-10.
- [10] 汪朝晖, 廖振方, 高全杰. 不同液体介质的高压静电雾化实验研究[J]. *电化学*, 2007, 13(3): 320-323.