

文章编号: 1672-9897(2009)02-0036-05

高压静电场中油液射流特性的实验研究

汪朝晖¹, 廖振方¹, 高全杰², 王家青²

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 武汉科技大学机械自动化学院, 武汉 430081)

摘要: 依据静电学和液体荷电的基本原理, 分析了高压静电场中荷电油液在射流区、过渡区和雾化区的特性, 提出射流长度、雾化角和液滴粒径分布是描述液体荷电射流特性的主要指标。通过自行设计和组装实验装置, 分别探讨了不同电压下油液的射流长度和雾化角随电压的变化关系以及液滴粒径在电场中的分布规律。研究表明: 射流长度随着电压的增大, 总趋势是减小的, 但在不同区域, 电压对射流长度的影响不同; 雾化角随电压增大到一定程度后, 逐渐减小, 最后趋于稳定; 液滴的粒径随着电压的升高不断减小, 当电压在 65kV 左右时, 粒径较小且分布最为均匀。

关键词: 射流; 静电场; 雾化; 射流长度; 雾化角; 粒径

中图分类号: O361.4; TM15

文献标识码: A

Experimental study on properties of oil jet in a high voltage electrostatic field

WANG Zhao-hui¹, LIAO Zhen-fang¹, GAO Quan-jie², WANG Jia-qing²

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Based on electrostatics and charged principle of liquid, the properties of jet area, transient area and atomization area were given for charged oil in a high voltage electrostatic field and jet length, atomizing angle and oil particle size distribution were main factors as describing charged jet. The equipment was self-designed and assembled for analyzing variable relation of jet length and atomizing angle when the voltage changed and regularities of distribution for oil particle size in a high voltage electrostatic field. The result shows when the voltage is stronger, jet length become smaller generally, but the effect of jet length for voltage is different in every area. Atomizing angle is reduced after voltage increased to certain voltage and it is stable finally. The oil particle size changes smaller as the voltage increased and its optimal distribution can be got when voltage is 65kV.

Key words: jet; electrostatic fields; atomization; jet length; atomizing angle; particle size

0 引言

油液的射流特性和雾化效果对内燃机的燃烧性能具有非常重要的影响。研究发现^[1], 液体荷电导致其表面张力降低和内外压力差增加有利于液体雾化, 雾滴荷电量达到 Rayleigh 极限时, 表面电荷间的排斥作用使雾滴继续分裂。因此, 静电场可以降低雾滴尺寸, 提高雾滴滴的均匀性、沉积效率和液体的利用效率, 并且能够减少污染, 被广泛地应用在国防工业和民用工业之中。

目前, 国外许多学者对静电场中的荷电射流做了理论分析和数学建模, 结合射流的物理属性和实验数

据给出了射流电流公式、射流半径公式、雾化液滴粒径公式, 建立了静电场作用下射流耦合方程的数学模型, 模拟计算了射流表面的电荷、速度以及电场值^[2-6]。国内许多专家对煤油和柴油等不同液体介质的荷电雾化机理也都做了深入的研究, 得到了液体静电雾化的破碎机理, 雾滴分散特性和液体的流场分布等相关参数^[7-8]。但是由于他们在研究中所采用的实验方法和射流参数范围的选择各不相同, 所以给出的实验结果和物理解释也不尽相同, 尤其是对不同的电压如何影响油液的射流特性没有进行系统和全面的分析。为此, 作者结合静电学和液体荷电的基本原理, 对高压静电场下油液的射流特性进行较为详细的

收稿日期: 2008-03-31; 修订日期: 2008-07-30

基金项目: 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(200811A0020291); 国家创新研究群体基金资助项目(50621403)

作者简介: 汪朝晖(1981-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 研究方向: 荷电液体射流理论和应用研究。

E-mail: wzhuiboy@yahoo.com.cn

研究。

1 荷电射流雾化过程

前期的研究成果表明^[9]:液体荷电后通常要经过射流区、过渡区和雾化区(如图1所示),荷电液体射流特性的主要指标有射流长度,雾化角和液滴的粒径分布。为了更好地从实验中研究射流特性,作者从理论上对液体的荷电射流过程做出了如下分析:

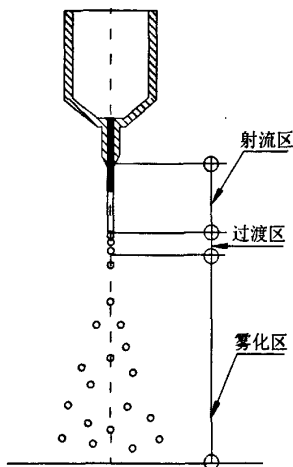


图1 液体的荷电射流雾化过程示意图
Fig.1 Sketch of charged jet atomization for liquid

当电压达到起晕电压时,产生电晕放电,空气电离产生等离子体,从而给雾滴荷电。射流区:充分荷电的液体在静电场、表面电荷的作用下,形成射流并开始散裂。过渡区:荷电液体由于受外界扰动,液体表面张力和射流惯性使射流形成周期性振动波形,由于波纹的曲率半径不同,表面电荷便分布不均,从而加速了雾滴的形成。雾化区:包括雾滴区和雾滴扩散区,荷电射流散裂形成的雾滴,当其表面电荷量达到 Rayleigh 极限时,由于表面电荷间的排斥作用雾滴发生分裂。同时,由于荷电雾滴的变形加速了雾滴分裂的趋势,使雾滴在荷电量小于 Rayleigh 极限也能发生分裂。而且,随着雾滴分裂次数的增加,雾滴的数

量呈级数倍增加,粒径减小很快,增加了两个雾滴处于同一水平的概率,相互作用力的水平分力改变了雾滴的运动方向。因此,越向下落,雾滴分裂越细,雾滴的散布面积也越大。

2 实验装置及实验现象

2.1 实验装置

依静电喷涂原理,以自制的防锈油为实验液体介质,自行设计和组装实验装置,利用 SONY DSCF 717 高级数码照相机和 ATEST-212 激光粒度仪从宏观和微观的角度对油液喷射过程中出现的现象进行观察和分析,研究不同电压下液体射流特性的变化规律。实验表明^[10]:对于像防锈油这样电导率极低的绝缘液体,只有采用针状电极才能使其带上电荷。因此,本实验的喷嘴设计为尖端电极形式,整体设计的实验装置如图2所示。选择的防锈油指标为:油温 45℃,表面张力 $25 \times 10^{-3} \text{ N/m}$,粘度 $11.8 \text{ mm}^2/\text{s}$,电导率 3 s/m 。

将油液的流量调整到一定值,然后将电压调整到最小值(电压变化范围从 20 ~ 75kV),开始拍摄油液从喷嘴流出的图像,之后逐渐增加电压,每隔一段电压将液体介质的雾化状态拍摄下来。实验完毕,将相机里的底片导入计算机,使用图像处理软件对拍摄的照片进行处理。同时,利用信息光学原理,对油液的粒径及其分布采用激光粒度分析仪来进行测量和分析。

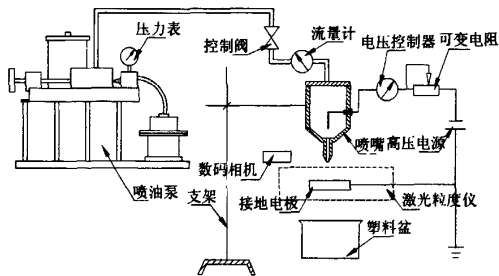
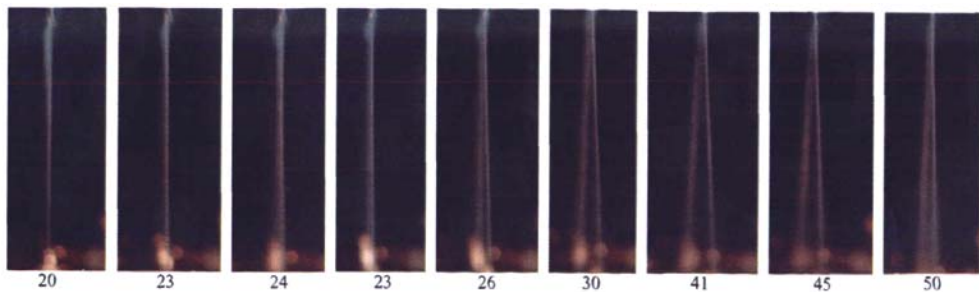


图2 高压静电场中油液射流特性的实验装置示意图
Fig.2 Sketch of experimental equipment for properties of oil jet in a high voltage electrostatic field



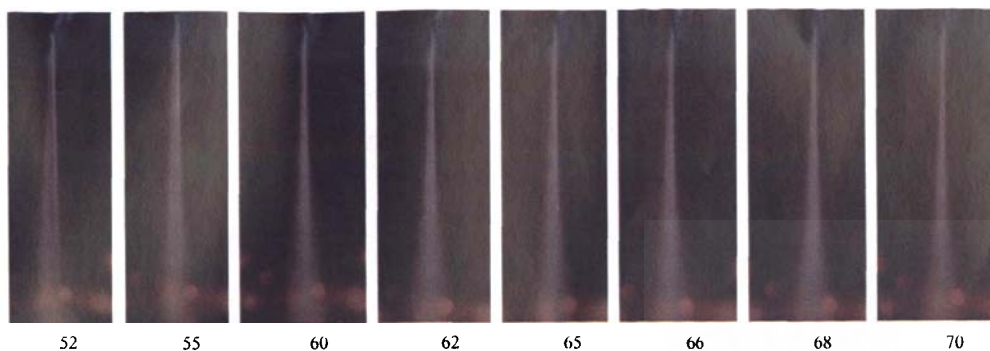


图3 油液在不同电压下的射流形态(单位:kV)

Fig.3 Jet shape of oil under different voltage

2.2 实验现象

受篇幅所限,笔者选取若干幅有代表性的油液在不同电压下射流形态的照片作为研究对象(如图3所示),分析其荷电射流特性的变化规律。

3 实验结果及分析

利用高级数码相机获取的照片,经过 Matlab 处理后,提取射流轮廓线,可以分别得到不同电压下的射流长度及射流雾化角,二者与电压的关系可用如图4和图5所示的曲线表示。

3.1 射流长度随电压的变化

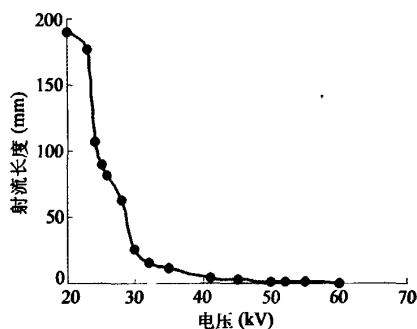


图4 射流长度与电压的关系曲线

Fig.4 Relation curve between jet length and voltage

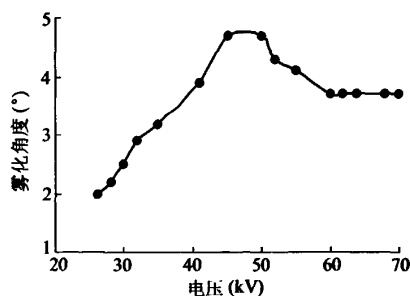


图5 雾化角与电压的关系曲线

Fig.5 Relation curve between atomizing angle and voltage

结合图3和4可以看出随着电压的增大,射流的长度总趋势是减小的。但在不同区域,射流长度对电压的比值不同,具体的分析如下:

电压在0~23 kV时,液滴由滴落状态转变为射流状态。这段过程中,伴随着电压的升高,射流表面受到的电场力增加了射流的速度,使得本来由于速度过低,无法获得稳定射流的滴落状态转化为稳定的射流状态。在此范围内,重力为主的滴落状况逐渐变为静电力逐渐增加并起主导作用的射流状态。

电压在23~26 kV时,射流长度有所缩短。这是因为随着电压的增加,射流表面波频率迅速增加导致破碎频率增加。此时电场力继续增加导致表面张力减小,在临界破碎处的变形增大,导致破碎提前,即射流长度减小。在此过程中,射流破碎后形成的雾滴比较均匀。

电压在26~32 kV时,射流长度随着电压的增大而减小,且射流长度对电压的斜率绝对值也是逐渐减小的,其射流曲线由凸形变为凹形,接壤处为射流表面波频率接近某一临界值。

电压在32~60 kV时,射流长度随着电压的增大缓慢减小,电晕放电现象在此阶段逐步产生。电晕放电使得空间电场发生变化,油液表面荷电量与电压之比增大(与电压较低时比较),同时空间电场强度对电压比值也有所增加,故射流受到的静电力与电压的比值幅度增加。随着射流长度减小,在射流阶段电场强度值足够大,重力对射流的影响开始可以忽略不计,射流所受静电力与空间电场的变化成正比。当外加电场足够高,诱发出足够的射流表面电荷时,此时射流表面变形显著增加,破碎不再发生在射流的轴线上,并且在破碎的瞬间,同时产生一个或者多个液滴。

3.2 雾化角随电压的变化

电压的增减会改变射流表面的荷电量以及空间电场的强度,必将也影响到雾化角的大小。结合图3、4和5可以看出,随着电压增大射流长度减小,导致射流提前破碎。在破碎的初始阶段,横向力(促使雾化角的产生)由电荷液滴间的库仑力产生,当横向距离增大,库仑力显著降低并开始忽略不计时,液滴所处的位置在其电场有横向分量,且横向电场分量与纵向电场分量的比值随着不同纵向位置和横向距离的增大将会发生变化,因此随着电压的增大,雾化角会产生变化。

电压小于26kV时,随着电压的增加油液由滴落状逐渐转为射流状,由于射流根本没有破碎,故射流雾化角为 0° 。电压从26kV到35kV的过程中,雾化角不断增加,因为此过程中射流破碎后产生半径均匀的液滴,液滴间的库仑力促使液滴互相排斥。电压在35~45kV时,随着电压增加,油液射流雾化开始变得不均匀,主次液滴逐渐明显,此时库仑力的作用在起始阶段就开始减小,油液两边的粒子较多,中间粒子较少,故此时由于液滴的不均匀性导致雾化角有所增加。

随着电压的继续增加主次液滴更加明显,电压在45kV时,达到了稳定主次液滴的产生极限。依据电荷射流理论,当主次液滴的大小之比达到一定极限后,继续增加电压,主液滴的半径会减小而同时次液滴半径会增加,故电压在45~50kV时,雾化角总的看来是保持稳定的,同时,该过程中主次液滴质量比稳定也大致发生在这样一个过渡阶段。而当电压在50~62kV期间,是主次液滴开始退化的过程,由于射流速度增加,空间液滴数量增加,主次液滴荷质比不规则,导致油液粒子分布相对逐渐均匀,油液呈细锥状,故此时雾化角逐渐减小。62kV以后,随着射流长度逐渐趋近于零,雾化角也趋于稳定,不再变化,此时射流雾化效果逐渐到达最佳状态。

3.3 液滴粒径及其分布随电压的变化

实验过程中,由于喷嘴的特殊结构,喷油量一般不调节太大。控制流量的伺服马达的转速通常设置为90r/min,借助激光粒度仪,图6清晰地给出了转速为90、120r/min时液滴粒径随电压变化的趋势。当转速为90r/min时,在20~30kV之间,显然为液滴产生的初始阶段,此时电压对液滴粒径大小的影响最为敏感,当电压大于30kV时,液滴粒径随电压的增大均匀而缓慢地下降。而当转速为120r/min时,除了起始电

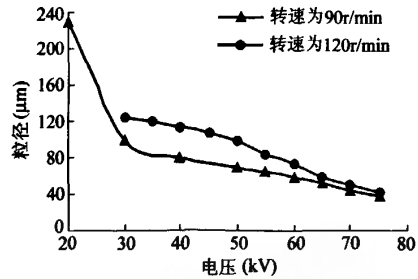


图6 粒径与电压的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between particle size and voltage

压有所增加外,整个液滴粒径变化是比较均匀的。

对于不同电压下粒径的分布情况,依据激光粒度仪的软件分析结果,笔者仅给出几个典型的电压—油滴粒径分布图(如图7所示)。在转速为90r/min时,当电压为30kV,油滴粒径大,分布呈双峰状;当电压升至50kV时,分布呈较好的正态分布;当电压增高至65kV时,可以发现油液粒径继续减小且分布更加均匀;而当电压升至75kV时,尽管粒径继续减小,但是油滴分布均匀程度降低。因此,可以认为油液荷电射流在65kV左右时,基本达到了比较好的雾化效果。

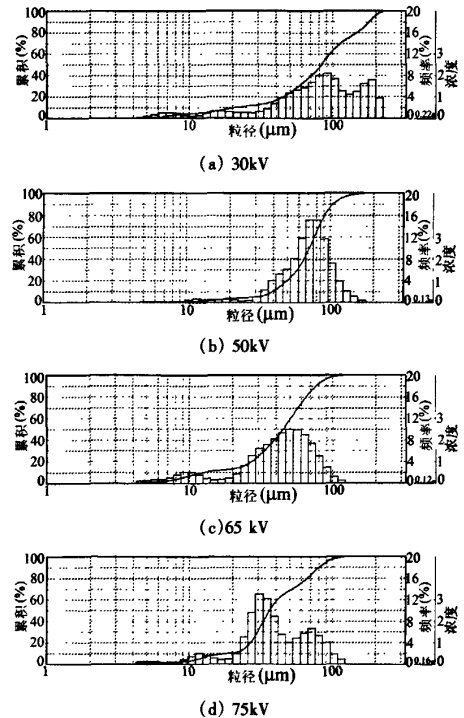


图7 不同电压下油液粒径分布图

Fig. 7 Distribution of oil particle size under different voltages

(下转第44页)

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 electrospraying 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, 冼福生, 高良润. 荷电流射流雾化研究[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.