

静电雾化理论及应用技术研究进展

王贞涛,闻建龙,陈燕,王正

(江苏大学能源与动力工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:以丰富的国内外资料为基础,结合作者所在的课题组近年的研究情况,分析与评述了国内外在静电雾化理论及应用技术上的研究进展。采用先进的实验仪器及技术的研究表明:静电雾化可以有效地提高雾化质量、喷雾流场特性。两相湍流理论及数值模拟的研究成果,对静电雾化理论起到很大的推动作用。静电雾化目前已扩展至燃烧、静电喷涂、纳米、薄膜制备等前沿研究领域。

关键词:静电;雾化理论;应用技术;进展

中图分类号:O359

文献标识码:A

文章编号:1005-6254(2004)06-0041-04

液体雾化是由于外界干扰引起的液体表面不稳定,导致分裂、细化而形成雾滴。雾化过程实际是气体-液滴的两相流动问题。静电雾化由于静电电场的参与,具有许多优于常规雾化的特点,故倍受人们的关注。

大量的研究表明,荷电能够降低液体表面张力及雾化阻力,且雾滴带有同性电荷,在电场力作用下会破碎成更小的雾滴,雾滴的直径分布更趋均匀。静电增加了雾化流场的控制参数,即在流量、压力、喷嘴直径等参数一定的情况下,通过改变电场参数能对雾化流场(例如雾滴大小、雾化角、射程、雾滴运行轨迹等)起到一定的调控作用。

静电雾化目前已广泛应用于农药喷洒、工业喷涂、材料制备、燃油燃烧、工业除尘及脱硫、颗粒聚并及分离等许多方面。本文对国内外近年来静电雾化的机理及应用技术研究、尤其是静电喷涂的研究情况进行介绍、分析及评述。

1 静电喷雾技术的实验研究

不同的应用场合,对喷雾流场有不同的要求。雾化效果的好坏直接影响到静电雾化技术的应用,因此对静电喷雾中液体的破碎及破碎后形成的荷电雾化两相湍流流场的研究极为重要。两相湍流是一种复杂的流动现象,而荷电两相湍流

又涉及电场与流场的耦合作用,使得问题更为复杂,这方面的研究处于起步阶段,尚未形成系统的理论,目前主要以实验研究为主。随着测量技术和试验手段的发展,相继取得了一定的进展。

由于高压静电场的存在和雾滴带电的原因,为避免测量仪器和流场间的相互干扰,荷电两相流场的测量只能采用非接触测量方法。目前主要使用颗粒动态分析仪(PDA)、相激光多普勒测速仪(PDPA)及粒子图像速度场仪(PIV)、数字摄像技术等测试仪器对射流液芯的波动、雾滴的形成及破碎过程、雾滴大小及直径分布、速度分布以及滴径-速度关系等进行实验测试,以揭示荷电雾化流动的一些本质特征。

Gomez(美国 Yale 大学)^[1]采用 PDPA 对低流量、高电荷密度的甲醇静电雾化产生的雾滴大小及速度分布进行了详细的测试,用脉冲透视成像技术获得了雾滴破碎过程的全部信息。在电压为 106 V/m 时,实验获得了平均直径 2 μm(直径分布很窄)的雾滴。雾滴速度及电场强度随距喷嘴(此处场强最高)距离的增大而逐渐减小。速度-雾滴直径关系表明,荷质比近似与雾滴直径的平方成反比。Gomez 还对添加抗静电剂的庚烷的静电雾化及弥散进行了实验研究。获得了稳定的静电雾化效果。在不同的液体流量及静电电压下,获得了 1~100 μm 平均直径的雾滴,雾滴直径分

基金项目:江苏大学高级人才基金项目(04JDG013);江苏省高校自然科学基金项目(02KJD470002)

作者简介:王贞涛(1978—),男,山东德州人,江苏大学硕士研究生。

布呈现明显的双峰特性。

Rosell-Llompart(Yale 大学)^[2]通过一个加有高电压的锥形喷嘴,对高导电率的液体进行了雾化实验,并采用粒度分析仪对雾滴进行测试。测试结果表明可获得 0.3~4 μm 的雾滴,且雾滴直径呈现单分散性。

英国 Imperial College^[3]采用 PDA 系统及摄影方法对煤油荷电雾化的雾滴大小及速度分布也进行了实验测试。实验表明雾滴直径分布也呈双峰特性。且雾化芯部外围的小雾滴,其惯性小,比电荷大,在小流量下向四周扩展。

Jeong Heon Kim(日本)等^[4]对加有抗静电剂的庚烷静电雾化中气流的影响进行了实验研究。实验中雾滴直径、速度采用 PDA 系统测试,荷电射流的破碎过程通过可视化观察。实验也表明,液体的静电雾化主要取决于充电电压。在一定电压下,雾滴直径分布呈现双峰特性。随着充电电压的提高,气流对雾化的影响逐渐减弱。雾滴直径-速度关系反映了液体静电雾化的动力特性。

以上学者的实验研究均表明,静电雾化过程中,静电电压、场强及分布对雾化过程有强烈的影响。静电雾化可获得直径更小、直径分布更均匀的雾滴,并且在一定电压及喷嘴结构下,雾滴直径呈现明显的双峰特性。

2 静电雾化的理论及数值模拟研究

在静电雾化的理论及数值模拟研究方面,由于空间非均匀电场的复杂性及电场与流场的耦合等因素,使得对荷电液体的破碎理论描述较为复杂,而后形成的荷电两相湍流流场的模拟更见难度。近 10 年来,国内外研究者们虽做了一些工作,但尚属起步阶段。

在静电作用下液体的破碎机理上,Incult (加拿大)^[5]对静电场中的水滴在微重力条件下的破碎动力学进行了理论研究及数值模拟。在假设液体为完全导体,忽略粘性,不考虑液体和气体相对运动时的相互作用情况下,根据质量及动量守衡及高斯定理建立了一个描述液滴在外加电场作用下的变形及破碎过程的数学模型,并进行了数值计算,但计算结果与实验有较大偏差。

P.H.Son(日本)^[6]对针(毛细管)-板电极的静电雾化的射流的稳定性进行了理论研究。在忽略粘性,假设射流扰动为小扰动的情况下,通过静电场理论及拉格朗日运动方程获得一个线性化

的射流扰动方程(扰动增长速度与扰动波长的关系式),并用该方程对射流曲张及扭曲两种模式的不稳定性进行了计算及分析。分析表明,随着静电场强的提高,射流发生不稳定时(即射流将要破碎为液滴)的临界波长减小。其计算结果对不稳定性波长的预测与实际基本相符。

Lopez^[7]建立了静电射流不稳定的非线性理论模型,并对不同荷电及扰动波长下的雾滴大小进行了预测。他的预测结果与某些研究者的实验数据较为相符。Ye Q 在考虑静电力、气动力等情况下,根据拉格朗日法,对喷粉颗粒轨迹进行了模拟,进行全三维湍流的数值计算,解释了荷电颗粒的空间电荷及湍流流扩散对颗粒轨迹的影响。计算没有考虑相间作用及颗粒的感应荷电。Soltani 等还研究了带电颗粒在管道湍流时的壁面沉积,通过对 N-S 方程的直接数值模拟,求得湍流速度场。并对颗粒大小和场强对颗粒弥散及在管壁的沉积的影响进行了研究。但计算时是假设颗粒足够小、且不考虑颗粒间的相互作用、也没有考虑颗粒对连续相的作用的。

其他研究人员也进行了一些理论模拟或数值计算,但同样作了大量的假设及近似,例如不考虑液体粘性、只考虑电极诱导的空间电场而不考虑雾滴感应荷电而形成的电场,或只考虑雾滴电场而不考虑电极诱导的空间电场等等。故理论描述及计算与实际情况均有很大出入。

江苏大学^[8]近几年做了不少工作,取得了一些进展。在分析荷电颗粒受力情况的基础上,用颗粒拟流体方法建立了荷电气液两相湍流的数学模型,对荷电气液两相湍流射流流场中两相速度场、两相湍流度场和雾滴浓度进行了全面的数值模拟并与实验结果进行了对比分析,具有较高的精度。这一模型不但考虑了相间滑移、扩散的耦合作用及两相相间作用,并且还考虑了颗粒自身的湍流扩散作用,还考虑了电场和流场间的相互作用,尤其是电场对湍流特性的影响。

建立电场作用下的荷电流体湍流模型,进一步完善荷电两相湍流理论并在数值模拟方面探讨电场作用项的模拟方法,是荷电两相湍流射流研究的发展方向。此外将最新的两相湍流理论应用到荷电两相流场的描述中,将对荷电两相流的研究起到很大的推动作用。

综上所述,在静电雾化理论及应用技术的研究中,由于静电场及流场的耦合、空间电场分布

的不均匀性及雾滴受力的复杂性。目前主要依靠PDA、PDPA、PIV、粒度分析仪、数字摄像技术等测试仪器,对雾滴大小及分布、速度分布、雾滴荷电量、射流不稳定性等进行实验研究,且已揭示喷雾过程中的一些信息。而对荷电气液两相湍流射流的系统研究开展不多,但各相关领域的研究进展为荷电气液两相湍流的系统研究提供了良好的基础。在现有基础上进一步深化对荷电气液两相湍流的研究,并将之应用于生产实践之中,具有重要的现实意义。

3 静电喷雾燃烧技术研究

国外在上个世纪 80 年代开始对静电雾化燃烧技术进行研究。主要的研究机构有美国的 Yale 大学、NASA、英国的 Manchester 大学、美国的 Surrey 大学、Purdue 大学等。

Miller(美国)^[9]曾对现有涡轮发动机的雾化燃烧采用静电雾化的可行性进行了初步的实验研究。实验结果表明,在火花塞上施加高电压后,雾化特性有明显的改善。平均雾滴直径减小、雾化锥角增大,扩大了发动机燃烧器最优设计性能的使用范围。Bankston, C. P.对柴油的喷射静电雾化燃烧进行实验研究。实验中流量为 0.25–1 cm³/s,喷射压力为 100–400 kPa,流体电荷密度为 5–20 C/m³,燃油喷射在室温、环境压力的条件下。实验表明,在实际流量下,静电喷射能够产生连续、稳定的燃油喷雾,并能实现点火及稳燃。这说明静电雾化技术用于燃烧系统,实现射流破碎及弥散,进而改善燃烧效果有巨大的潜力。

Yale 大学还通过测试两个燃烧火焰的雾滴大小、速度及气相温度等参数,对庚烷静电雾化燃烧的二次雾化进行了研究。实验表明,如果雾滴在与火焰接触之前出现大量蒸发,则雾滴直径分布由初始的单分散性分布变为双峰分布。其中第二个峰值要小于整个雾滴的平均值。他们认为,当雾滴大量蒸发时,雾滴表面的电荷密度增大,而液滴收缩,直到达到瑞利极限,雾滴会破碎为更小的液滴,导致出现上述现象。而雾滴蒸发量不足,则双峰特性不明显。

Manchester 大学^[10]采用相多普勒测速仪及流动可视化技术测试了由带电喷嘴产生的液体烃燃料的静电雾化结构。实验测试表明,荷电的绝缘液体雾化后产生大量的小雾滴,由于雾化芯区的场强较高,这些小雾滴被排斥到外侧,雾化芯

区则为较大雾滴,它们基本沿轴线运动。在径向方向,雾滴平均直径呈层状分布。雾滴大小的这种分布有助于燃烧火焰的稳定性。

Uwe Leuteri^[11]对静电雾化技术用于发动机燃烧的直喷系统进行了实验研究。实验采用柴油,喷射压力为 30 MPa。实验表明静电场对雾化有显著影响。静电力作用于射流的液芯,使液芯表面产生表面波,引起射流较早破碎,即射流长度显著缩短。射流长度的缩短导致平均滴径减小,雾化角增大,雾化与周围空气的卷吸作用增强,这使得燃烧效率提高,油耗降低,污染物的排放降低。该文还用一个理论模型解释了静电场对雾化燃烧流场的影响。

Imperial College^[12] 的研究人员还对荷电液烃的雾化、燃烧及控制进行了进一步的研究。研究进一步表明将静电雾化技术用于燃料的雾化燃烧是有效的。在较宽流量范围内,液体射流在气动力及电场力的双重作用下,雾化质量得到提高。实验表明,在中等荷电条件下,加有抗静电剂的绝缘燃料(变为半导体),雾滴大小为双峰特性。在较高的荷电强度下,雾滴更加均匀,在实际流量范围内,煤油、柴油燃烧可获得稳定的火焰。

Jido 对锥状和环状组合电极的液体燃料荷电雾化进行了试验研究,以电极锥角、电极间距、电极直径和电极形式为参数,发现锥状电极电晕放电可以有效地使液滴荷电,实验研究中采用 60° 的锥状电极,电极间距为 1.5 cm, 喷嘴直径为 0.5 mm, 获得了平均粒径 50 μm 雾滴, 火焰的温度比普通雾化燃烧提高,而雾化所提供的动力却降低。

Weinberg, F.J.等^[13]对微重力条件下的静电雾化燃烧的火焰电控制进行了初步的实验室研究。在微重力条件下用火焰来加热特定物体时必须依靠强迫对流来传热。用常规方法来实现强迫对流则会增加重量。使用静电力来实现空气的输送,可使强迫对流强度达到重力条件下的 800 倍,从而产生较大的热流传输,而且结构紧凑、重量轻。这在氧消耗较大的情况下尤其重要。研究表明,液体的静电雾化提供了一个附加的控制参数,由于它不仅能控制液滴大小,而且能控制液滴轨迹(通过施加电场),这使得它用于微重力条件下的液体燃料的化油及控制其燃烧过程更有优势,这对空间技术是极其诱人的。

从有关燃料荷电喷雾燃烧的基础研究来看,

由于其涉及的复杂问题较多,因而研究的难度较大,目前尚处于探讨阶段。除江苏大学进行的柴油荷电喷雾燃烧研究外^[14],实验研究也大多限于实验室所建立的微喷实验装置,以及对发动机(主要是汽车发动机)喷雾燃烧、燃油锅炉燃烧等方面的应用探讨。因此系统地对非极性液体燃料的荷电特性、有效充电方法及雾化机理进行探讨,研制模拟接近实际喷雾燃烧流场的有关非极性燃料的荷电喷雾装置、从试验和理论两方面深入开展荷电两相湍流流场的研究,尤其是荷电喷雾燃烧在其他各工业领域的应用研究是该领域研究进一步的发展方向。

主要参考文献:

- [1] Gomez A, Tang K. Atomization and dispersion of quasi-monodisperse electrostatic sprays of heptane. Proceedings of the 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Gaithersburg, USA. 1998.
- [2] Rosell-Llompart J. Generation of monodisperse droplets 0.3 to 4 μm in diameter from electrified cone-jets of highly conducting and viscous liquids, Journal of Aerosol Science, Vol. 25, No. 6, 1994.8.
- [3] Shrimpton J S, Yule A J. Drop size and velocity measurements in an electrostatically produced hydrocarbon spray. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 120, No.3: 580–585. 1998.9.
- [4] Jeong Heon Kim, Tsuyoshi Nakajima, Aerodynamic influences on droplet atomization in an electrostatic spray, JSME International Journal. Vol.42, No.2:224–229. 2000.
- [5] Ion I. Inculet, Dynamics of water droplets breakup in electric field, IEE Transactions on industry applications, Vol.28, No.5, 2002.9.
- [6] P H son, K. ohba, Theoretical and experimental investigations on instability of an electrically charged liquid jet. Multiphase Flow, Vol.24, No.4: 605–615. 2001.5.
- [7] Setiawan E R, Heister S D. Nonlinear modeling of an infinite electrified jet. Journal of Electrostatics, Vol. 42, No.3: 243–257. 1997.12.
- [8] Wang-Ze, Jin-Hanhui. Numerical simulation of charged gas–liquid two phase jet flow in electrostatic spraying. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), Vol.14, No.3: 266–270. 2001.9.
- [9] Miller J A, Biblarz O. Electrostatic spray modification in gas turbine combustion. Journal of Propulsion and Power, Vol. 3, No. 2: 187–192. 1997.4.
- [10] Shrimpton J S, Yule A J. Characterization of charged hydrocarbon sprays for application in combustion systems. Experiments in Fluids, Vol. 26, No. 5: 460–469. 1999.4.
- [11] Uwe Leuteritz, Amin Velji. A novel injection system for combustion engines based on electrostatic fuel atomization, SAE International Spring Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Paris, 2000.
- [12] Shrimpton J S, Yule A J. Atomization, combustion, and control of charged hydrocarbon sprays. Journal of the International Institutions for Liquid Atomization and Spray Systems, Vol.11, No. 4: 365–396. 2001.9.
- [13] Jido, Morio. Burning characteristics of electrostatically sprayed liquid fuel and formation of combined droplets of different fuels, Conference Record–IAS Annual Meeting 1999.
- [14] 闻建龙,王军锋,陈松山. 荷电喷雾燃烧的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5):5–8.

Advances and Application Improvement of Electrostatic Atomization Technology

WANG Zhen-tao, WEN Jian-long, CHEN Yan, WANG Zheng

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

Abstract: In the present paper, investigation is carried out based on abundant domestic and international data and combined with the author's work. Domestic and international improvement of electrostatic atomization and application technology are analysed and described. Experiment of advanced apparatus and technology indicates that electrostatic atomization can improve the quality and the field properties of liquid atomization efficiently. The research results of two-phase turbulence flow and numerical modeling have greatly promoted electrostatic atomization research. Electrostatic atomization has been expanded into foreland research fields such as combustion, spray coating, preparation of anomalous film and so on.

Key words: Electrostatic; Atomization theory; Application technology; Improvement