

知识介绍

乳化燃油静电雾化节能减排的研究与前景

郑捷庆^{1,2}, 张军¹, 张晓明¹, 罗惕乾²

(1. 集美大学能源与动力工程研究所, 福建 厦门 361021;

2. 江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:分析了国内外燃油乳化、燃烧技术以及燃油静电雾化的应用与研究情况。从乳化燃油雾化质量与燃烧特性的角度, 认为限制该技术进一步全面推广使用的原因因为燃油乳化之后的雾化阻力增大引起的雾化质量下降以及固定的掺水比例的乳化燃油无法解决柴油机低负荷不稳定和高负荷高排放的难题。在此基础上首次提出了将静电雾化技术与燃油乳化燃烧技术相结合的构想, 并结合国内外研究情况, 分析了这2种先进的燃烧技术相结合的可行性以及对节能减排的应用价值。

关键词: 乳化燃油; 静电雾化; 节能; 减排

中图分类号: TM89; TK421.71

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)09-0084-04

Study on energy saving and pollution controlling by emulsified fuel electrostatic atomization

ZHENG Jie-qing^{1,2}, ZHANG Jun¹, ZHANG Xiao-ming¹, LUO Ti-qian²

(1. Energy and Power Research Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Energy Resources and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The latest application, research and development of emulsified fuel and different kinds of fuel electrostatic atomization combustion are reviewed respectively. In the view of the characteristics of the atomization and combustion of emulsified fuel, the two causes limiting this technique to further popularize are analyzed. Firstly, the surface tension and viscosity of the fuel are highly increased after the emulsification, as a result, the atomization resistance will increase highly to lower its atomization quality if the atomization configure and operational parameters are kept the same; secondly, the emulsified fuel of fixed ratio of fuel to water makes diesel engines run unstably in case of low workload, and increase exhaust pollution in case of high workload. With the above two troublesome problems in consideration two kinds of advanced combustion techniques is brought forward. The feasibility of the combination and its value in energy saving and emission reduction are analyzed.

Key words: emulsified fuel; electrostatic atomization; energy saving; pollution controlling

乳化燃料油的燃烧技术在世界范围内的研究已持续数十年, 随着环境与发展矛盾日渐明显, 同时石油危机的出现, 具备节能降污双重机能的燃料油掺水乳化技术获得重视。由于其明显的节油效果和环保效益(降低了排烟中的 NO_x 及烟尘含量), 在其机理尚未完全揭示的同时, 各方面的应用已在发达国家及部分发展中国家迅速展开, 这包括燃油锅炉燃用乳化重油、渣油技术和内燃机燃用乳化柴油、汽油、煤油技术等。同其他燃料一样, 乳化燃油不管是应用在内燃机还是外燃机, 它的高效率清洁燃烧取决于燃油良好的雾化质量, 因为雾化特性强烈地影响着乳化燃料的燃烧稳定性、燃烧效率以及污染物的排放。然而, 燃油乳化之后的雾化阻力增大引起

的雾化质量下降以及固定掺水比例的乳化燃油无法解决柴油机低负荷工况不稳定和高负荷工况高排放的难题一直限制着该项技术的进一步推广应用。笔者从近年来国内外燃油乳化、燃烧技术以及燃油静电雾化技术方面的应用与研究情况展开分析, 并首次提出了将静电雾化技术与燃油乳化燃烧技术相结合的构想, 以期开展乳化燃油静电雾化燃烧技术的研究提供参考。

1 燃油乳化、燃烧技术的研究进展

目前对于乳化燃油的研究主要集中在以下3个方面, 即乳化油的燃烧机理研究、乳化油燃烧节能及减排的实验研究、以及乳化燃油的制备。

收稿日期: 2008-05-30

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0410027); 福建省教育厅科研项目(JA04232)

作者简介: 郑捷庆(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电流体动力学的理论与应用研究, zhjieqing@126.com。

1.1 乳化油的燃烧机理

Ivanov 与 Nefedov^[1]首先提出的单滴乳化油“微爆”的概念具有划时代的意义,以后的大部分研究均以“微爆”为主要内容^[2-4],如 Marrone 等^[2]就内相尺寸(即水)对油滴燃烧过程的影响进行研究,提出团状微爆发生的极限条件、时刻参数的计算方法;盛宏至等^[3]利用多脉冲离轴激光全息技术实际观察并验证了乳化油滴在雾化和蒸发过程中存在“无水边界层”现象。到目前为止,“微爆”理论仍仅局限于对单滴油滴的研究上,但由于单滴或多滴在油滴直径、滴间相互作用、背压、传热条件、加热历程等方面与内燃机油雾燃烧的实际过程存在一定差距,并不能令人信服地解释发动机中的燃烧与节油现象^[4]。

1.2 乳化油燃烧节能及减排的实验研究

尽管对其燃烧机理仍未有统一认识,但是乳化油液燃烧更完全,可使内燃机或油炉节能、NO_x 排放量降低是公认的,尤其对于降低 NO_x 及粉尘排放效率极高^[5-7]。近年来国内外的研究较侧重于乳化燃料在外燃机(工业油炉)及内燃机的实际燃烧应用上,通过比较燃用乳化燃油与普通燃油的油耗及排放效果,探索燃烧器的结构、工作条件、负荷等因素以及燃油掺水率对节油和降低 NO_x 与粉尘排放的影响。如文献^[5]将乳化重油实际用于供热燃油锅炉上,运行结果表明,年节油率为 7.57%,综合热效率提高 3%,碳黑减少,排烟温度降低 19℃;Samec 等^[6]在柴油机中燃烧乳化柴油并对燃烧产物进行分

析发现燃烧 10% 和 15% 的柴油乳液可使 NO_x 降低 20%,烟尘的排放降低则高达 50%;大连理工大学内燃机研究所^[7]则利用电控技术对掺水乳化比例进行实时控制,基本实现了掺水比例随负荷变化,达到柴油机小负荷工作稳定,大负荷时大幅度降低 NO_x 和碳烟排放的效果。但是这里面存在 3 个问题:首先,实时掺水则燃油乳化效果差,微爆效应大打折扣;其二,控制系统信号处理以及掺水过程的时间难以达到与负荷变化严格同步;第三,成本较高。因此这项技术离实际应用还有相当长的距离。

1.3 燃油的乳化对物性参数的影响

研发成本低廉,稳定性高,同时又适合于不同燃烧器的乳化技术则是乳化燃料油得以推广应用的另一重要领域。研究表明无论采用何种乳化技术(如超声波乳化、微乳化、三相乳化等)燃油在添加了一定比例的水及乳化剂之后,其物理化学性质将肯定发生改变^[8-9],其中直接与雾化特性有关的物性为乳化燃油的黏度及表面张力,掺水以及掺入乳化添加剂都将引起乳化燃料这 2 个参数不同程度的增加。文献^[8]对不同的乳化燃料的物性进行了物性分析,认为由于在两相液体发生剪切变形时,除液体的内摩擦外,尚有两相间的界面张力存在。而界面张力的大小与相体积浓度有关,掺水量大,则相体积浓度大,内相(水)颗粒多,界面张力随之增大。其实验结果还表明,在同一掺水量工况下,黏度随乳化剂添加量增加而上升,二者几乎成线性关系。这是

(上接第 83 页)

7 对我国生物柴油产业的启示

可以说韩国生物柴油产业的起步和相关政策的实施办法对我国生物柴油产业的发展有很大的启示作用。

(1)企业实力雄厚。可以看到,韩国目前的生物柴油企业都是具有一定实力的大型企业的投资行为,这样一来,企业抵御风险的能力大大加强,技术开发后续力量充足,可以多方面收集原料并培育原料基地;产品市场销售力量大,覆盖面广。这对于长期持久地发展保障国家能源安全的生物质能源是十分有利的。

(2)国家市场规范。通过强制措施采购并销售掺混一定比例的柴油(B2),由于地域较小,所以能做到“全国一盘棋”,从原料到产品都制定了详细的规范,有利于企业实际生产、经营的展开。

(3)废弃油脂统一处理。由于韩国在此之前就已经具有完备的废弃油脂尤其是餐饮废油的回收处理体系,因此面对“突如其来”的生物柴油产业化,在国家的统一布局下,企业很容易就得到了一定的原料保障,另外对于属于一些国家控制进口的废弃油脂,韩国敢于在行业形式明朗的前提下大胆鼓励进口(免除关税),这虽然是一种国家能源供应紧张的不得已行为,但也说明其决策的果断。

以上就韩国生物柴油产业的起步、发展、技术、市场及国家相关政策做了简要评述。总的来说韩国政府及企业在发展生物柴油产业方面有许多好的做法值得我们学习、借鉴,但同时也要充分考虑我国的具体国情,在吸收消化的基础上积极吸取其中的一些做法,推进我国生物柴油行业的健康发展。

(致谢:该文得到了艾慕化工国际贸易(上海)有限公司吴再梁先生的大力协助,提供了宝贵的第一手资料,在此表示感谢!)■

因为随着乳化剂掺入量加大,乳化油稳定性随之增加,内相离散速度减慢直接导致乳化油黏度相应增大。另外文献[10]的实验结果表明为了保证乳化油的稳定性,乳化剂的添加量就不能太少,而太多的掺入乳化剂量则会增加 NO_x 排放。对乳化燃料的表面张力的研究则未见文献报道,但根据常识,水和乳化剂的表面张力均大于燃油,因此燃油乳化后表面张力将肯定增加,这在笔者实验室里测试的结果得到了证实,文中不再冗述。

2 静电雾化理论及应用技术

静电雾化技术(即将静电场引入到液体的喷雾过程,使液体荷电射流破碎成细小雾滴)与常规雾化技术(主要有机械式和双流体式雾化)相比具有如下几个优点:雾化粒径更小(可达到纳米尺度^[11])且可控,雾化流场可控。故此一直倍受关注并已在众多工程领域(燃油燃烧、陶瓷薄膜制备、工业喷涂、药液喷洒灭虫杀菌)得到广泛应用。

2.1 燃油静电雾化的实验研究

对于燃油的静电雾化技术,国外在 20 世纪 80 年代展开研究,国内则由江苏大学、吉林大学等少数几家科研单位在 20 世纪 90 年代末起步。目前对煤油、柴油、航空煤油及液氢等许多低黏度、绝缘液体的充电特性、雾化特性及雾化后的燃烧效率研究较多^[12-18],但对于较高黏度燃料的研究则罕有文献报道^[19]。

如 Gomez 等^[15]对添加抗静电剂的庚烷的静电雾化及雾滴的弥散进行了实验研究,取得了稳定的静电雾化效果,在不同的液体流量及静电压下,获得了 1~100 μm 平均直径的雾滴。其实验还表明液体的静电雾化主要取决于电场强度。雾滴直径分布在一定的电压范围内呈明显的双峰分布。Shrimpton 等^[16]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进行了实验测试。实验表明雾滴直径分布呈双峰特性,雾化芯部为大雾滴,大雾滴惯性较大,比电荷较小,基本沿轴线运动。雾化芯部外围为小雾滴,小雾滴惯性小,比电荷大,在小流量下向四周扩展。

江苏大学针对煤油、柴油的静电雾化燃烧进行了初步的探索,文献[12-13]表明雾滴的索太尔平均直径随充电电压的逐渐增大呈马鞍形变化,即先减少再略有回升然后再减少,荷电后雾滴的粒径分

布变窄,燃油静电雾化燃烧实验表明,荷电后燃烧更充分,有害物排放减少。另外,吉林大学^[17]、上海交通大学^[18]等也分别对汽油和柴油在内燃机的喷射燃烧上的应用进行了一些研究,他们的研究也同样表明,静电雾化可细化雾滴,改善雾化效果,提高燃烧效率及节约燃料。值得一提的是,国内外大多数的文献均对由于荷电雾滴在库仑斥力的作用下产生“二次雾化”从而导致雾滴粒径谱出现双峰分布以及雾滴细化的解释持肯定的意见^[20]。

2.2 静电雾化理论的研究

在理论研究及数值模拟方面,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,使得对荷电流体的破碎的理论描述较为复杂,而液体破碎后形成的荷电两相湍流流场的模拟更困难。因此在这方面的的工作都是在一定的假设及近似的基础上进行的,如或不考虑液体黏性、或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一定出入,仍有待于继续深入^[13,21-22]。如 Yoon 等^[21]亦采用边界元方法并假设电场力均匀且作用充分,提出荷电单股及多股射流的二维、非线性扰动数学模型。Ye 等^[22]忽略了相间作用及颗粒的感应荷电,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,采用全三维湍流进行了计算,解释了荷电颗粒的空间电荷及紊流扩散对颗粒轨迹的影响。江苏大学在这方面也取得了一些进展^[13],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,用 SIMPLE 方法的基本思路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。

3 燃油乳化与静电雾化技术的结合

从以上对燃油的乳化、燃烧技术以及静电雾化 2 个领域的国内外开展的研究表明:

(1)燃油在掺水乳化之后大大提高了其雾化阻力,“一次雾化”质量下降,尤其是重油或渣油未乳化之前就是高黏度液体,雾化原本就非常困难。其次,若无法找到一种低成本、高效率解决乳化燃油燃烧时低负荷平稳与高负荷降低排放矛盾的途径,则燃油乳化技术在内燃机上的推广使用意义不大。

(2)目前的研究均没有涉及到乳化燃料油的静电雾化特性,即便是对燃油的静电雾化研究在国内也仅处于初始阶段,对于高黏度的液体燃料的静电雾化则更罕有研究。

(3)可以设想,静电雾化技术与燃油的乳化燃烧技术相结合将导致乳化燃料在雾化燃烧过程中出现三次雾化过程。这里不妨将前文多次提及的“ n 次雾化”做一次重新定义及排序,即射流剪切力引起的初次雾化(一次雾化或初次雾化),库仑斥力引起的荷电乳化燃油雾滴的库仑分裂(再次雾化或二次雾化),油包水乳化雾滴内相吸热引起的“微爆”(破乳雾化或三次雾化)。

显然,燃油静电雾化过程中由于增加了“二次雾化”的环节,使得雾滴平均直径不但比常规雾化方式可减小 $1/2$ 以上,且雾滴的直径分布更趋于均匀;电场对雾化流场的影响表现出增大雾化扩散角、减小流场贯穿距,增强空气与雾滴的卷吸作用,使燃烧更加充分、排放降低。这些研究结果为提高黏度较高的乳化燃油的雾化质量提供了一个崭新的思路,即在不改变雾化条件下,静电雾化技术能使荷电乳化燃油初次雾化出比常规雾化更细小、直径分布更均匀的雾滴。最为重要的是,可以通过改变电场强度对雾化特性(如滴径、雾化角、贯穿距等)进行同步调控,从而使固定掺水比例的乳化燃油喷雾可用于不同的燃烧场合与不同的负荷工况。

4 结语与展望

综上所述,开展对乳化燃油静电雾化燃烧的基础性研究将有助于探索乳化燃油新的雾化方法,对其三次雾化过程机理的探索具有全新的突破性和极大的挑战性;利用变电场参数对乳化燃油在内燃机上的雾化特性及流场实现高效低成本的同步调控对于推广使用该项技术前景可观;同时,在理论上建立乳化燃油荷电雾化的油气水三相流场与静电场耦合的流动数学模型是对静电雾化理论的一个发展。

参考文献

- [1] Ivanov V M, Nefedov P I. Experimental investigation of the combustion process in nature and emulsified fuels[J]. NASA Time Trial F, 1965, 258:1-8.
- [2] Marrone N J, Kennedy I M, Dryer F L. Short communication: Internal phase size effects on combustion of emulsions[J]. Combustion Science & Technology, 1983, 33(5):299-307.
- [3] 盛宏至,张宏策,吴东垠,等.乳化液喷雾与微爆现象的激光全息实验研究[J].工程热物理学报,2004,25(增刊):213-216.
- [4] 傅维标,龚景松,侯凌云.乳化油柴油机中不存在微爆现象[J].科学通报,2006,51(9):1117-1120.
- [5] 李建国,安增良.重油乳化技术在燃油锅炉上的应用[J].节能,1995,10:42-45.
- [6] Samec N, Kegl B, Dibble R W. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine[J]. Fuel, 2002, 81(16):2035-2044.
- [7] 史得胜,许锋,隆武强,等.可控掺水燃烧降低柴油机排放的燃烧分析[J].内燃机工程,2006,27(1):18-22.
- [8] 吴江霞,孙平,蔡忆昔.乳化燃油的特性及其在内燃机中的应用研究[J].江苏大学学报:自然科学版,2002,23(5):69-73.
- [9] 程华定,徐美玲,杨兴林.乳化燃料的物性研究[J].华东船舶工业学院学报,1994,8(4):81-86.
- [10] 史得胜,许锋,隆武强,等.柴油机掺水燃烧的实验研究[J].车用发动机,2004(6):9-13.
- [11] Jaworeka A. Micro- and nanoparticle production by electrospraying[J]. Powder Technology, 2007, 176(1):18-35.
- [12] 闻建龙,王军锋,张军,等.柴油高压静电雾化燃烧的研究[J].内燃机学报,2003,21(1):31-34.
- [13] 王军锋,闻建龙,罗惕乾.煤油荷电喷雾特性及喷雾流场的实验研究[J].机械工程学报,2002,38(7):37-40.
- [14] Li S, Wang Y, Kui H, et al. An electrostatic atomization to save fuel and reduce emissions[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(4):283-286.
- [15] Gomez A, Tang K A. Atomization and dispersion of quasi-monodisperse electrostatic sprays of heptanes[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray System. Gaithersburg, USA. 1998.
- [16] Shrimpton J S, Yule A J. Drop size and velocity measurements in an electrostatically produced hydrocarbon spray[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(3):580-585.
- [17] 李世武,高延令,徐绍增,等.燃油荷电改善雾化的机理与实验研究[J].农业机械学报,2000,31(3):19-23.
- [18] 于水,胡宗杰,邓俊,等.静电喷雾高压喷射下喷雾特性的研究[J].内燃机学报,2006,24(5):434-439.
- [19] 郑捷庆,张军,罗惕乾,等.水煤浆荷电射流不稳定性的实验研究[J].煤炭学报,2007,32(4):425-428.
- [20] 郑捷庆,张军,刘勇,等.静电雾化液滴直径的双峰分布概率密度模型[J].高电压技术,2007,33(10):88-91.
- [21] Yoon S S, Heister S D, Epperson J T, et al. Modeling multi-jet mode electrostatic atomization using boundary element methods[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 50(2):91-108.
- [22] Ye Q, Steigleder T, Scheibe A, et al. Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun[J]. J Electrostatics, 2002, 54(2):189-205. ■