

文章编号:1000-582X(2010)11-015-05

燃油乳化液射流的喷雾特性

廖振方, 汪朝晖, 陈德淑

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:分析了燃油乳化液射流的发展模型和游离水的微爆炸特性,提出空化对射流的破坏作用能使射流雾化角发生改变,因此判定乳化燃油雾化效果的一个重要准则是雾化角。在给定容积的容器内充入氮气,采用遮盖式喷嘴,利用高速摄影机分析了无水柴油和具有不同含水量的柴油乳化液射流在高压脉冲喷射气体介质时游离水滴发生微爆炸的喷雾特性。理论和实验研究表明:燃油中含有大量的微小水滴降低了卸载时射流断裂的动力强度,使其具有更强的分散性。柴油乳化液比无水柴油能喷射出更多的体积,射流宽度变大,喷射的雾化角增大,当乳化液中水的含量为10%时,喷射雾化角达到最大值。

关键词:燃油乳化液;射流;喷雾;雾化角**中图分类号:**TK421.4;O521.2**文献标志码:**A

Atomizing properties of emulsified oil jet

LIAO Zhen-fang, WANG Zhao-hui, CHEN De-shu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Development model of emulsified oil jet and micro-explosion properties of water drops are analyzed, cavitation effect can change the jet atomizing angle, therefore, an important guideline to describe oil jet atomization is atomizing angle. Absolute diesel fuel and different moisture content emulsified diesel fuels are researched by high-speed camera system from the experiment for studying the atomizing properties of water drops when high-voltage impulse injects the gas medium. The theory and experimental results show that lots of water drops of emulsified oil reduce jet dynamic strength when the jet unloads, so it has stronger dispersed properties. Emulsified diesel fuel can spray more capacity than absolute diesel fuel, the width of jet is greater and the spraying atomizing angle increases. When the moisture percent of emulsified oil is 10%, the atomizing angle can get to the maximum.

Key words: emulsified diesel fuel; jets; atomization; atomizing angle

柴油机中燃油的喷射、雾化、蒸发及其与空气的混合对发动机的燃烧和排放具有关键性的作用,因此对燃油射流的分散特性和雾化机理的研究具有重要的理论意义。燃油的雾化质量直接影响着发动机缸内的燃烧过程,进而影响着发动机的动力特性,经济性及排放指标^[1-2]。提高发动机燃油的经济性和改善它工作时的雾化质量的根本办法之一是采用燃

油乳化液。目前,就国内外对乳化液研究工作方面: Ibrahim、Armas 等^[3-4]从实用的角度对发动机中乳化油的喷雾燃烧特性及它对柴油机的可靠性、经济性以及排放性能的影响方面进行研究;孙平、Zorba 和 Nadeem 等^[5-7]对单一油滴的蒸发、着火、燃烧过程的基础物理化学现象进行研究,得到了相关结论。尽管做了大量的实验和计算研究,然而这些研究还

收稿日期:2010-06-15**基金项目:**中日国际科技合作项目(2008DFA70300);国家创新研究群体基金资助项目(50621403)**作者简介:**廖振方(1938-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事射流理论及应用的研究,(E-mail)liaozf@263.net。

不能说明发动机内乳化油的雾化机理,因为单个油滴和射流束的油液,无论在粒径尺寸、密度或生成时间,都有较大的区别,尤其是对乳化的燃油-空气混合物的射流发展过程还没有进行全面和系统的分析。基于高压燃油乳化液的自身物理特性,笔者对不同含水量的燃油乳化液喷雾过程中的射流喷雾特性进行深入的研究。

1 理论分析

1.1 高压燃油乳化液的微爆炸特性

水对高压燃油射流轴线上的分散特性具有重大影响,混合后的燃油乳化液不仅改变了燃烧时燃油乳化液中水滴发生的附加分散特性、微小水滴的热力微爆炸的运动学特性和燃烧特性,而且对燃烧初始阶段的混合形成过程也有重大影响。乳化液中的水滴微爆炸是发生在混合液射流的发展过程阶段,其爆破示意图如图 1 所示^[8-10]。

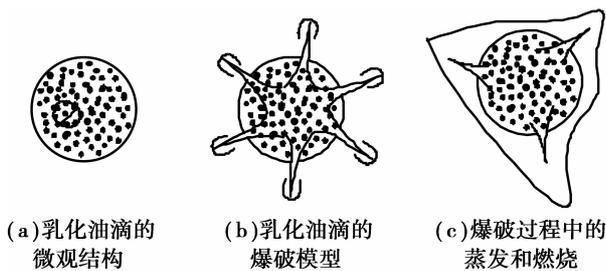


图 1 乳化油爆破的示意图

一方面,当乳化油油滴着火时,水珠被燃油所包围,外围的燃油处于未燃烧或未完全燃烧的状态,内部存在水粒的过热汽化产生空泡爆炸现象。因此,油滴着火时,油滴内部存在较大水粒,水粒的快速过热汽化有利于促成乳化油微爆炸的产生,进而使喷雾束膨胀,雾化角增大,从而使燃油燃烧更迅速,更完全。此时,可以认为释放出来的水粒发生的微爆炸起到惯性散热体的作用。

另一方面,从化学反应的角度看,燃油乳化液中由于高温裂解产生的碳粒,能与水蒸气反应生成 CO 和 H₂,从而使碳粒充分燃烧,提高了燃烧效率,降低了排烟中的烟尘含量。由于射流束的心部缺氧,发生如下反应: $\text{H}_2\text{O} + \text{H} \cdot \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH} \cdot$, 自由基 OH· 的活性很大,在炭烟生成之前,很快与热分解的中间产物相结合,生成新的化合物参与燃烧,减少了聚合和成核率,使烟的生成过程受到抑制,这时释放出来的水粒的微爆炸则又起到了化学反应剂的作用。

1.2 乳化液的射流发展模型

在高喷射压力下,燃油以极高的速度离开喷嘴,在距喷嘴一定距离处发生分裂,形成微小水粒。在燃油的喷射雾化过程中,雾化角度的大小对燃烧有直接影响,关系到喷雾的发散程度,进而影响油滴在进气管壁面上的沉积情况和空燃比的控制精度。一般应根据燃烧室的尺寸和燃料与空气的混合条件来选择。若雾化角较大,可以吸入更多的空气,改善油滴的滴径,但雾化角也不宜太大,以免燃料喷射到燃烧的壁面上,造成积炭和结焦,因此在燃油喷射过程中对雾化角的研究非常重要^[11-13]。

图 2 和图 3 分别描述了无水燃油和燃油乳化液喷射时射流的发展模型,燃油乳化液从喷嘴喷出时它的雾化角增加。通常高压液体喷入气体介质中时,在喷嘴出口截面处要发生卸载和产生空化,射流的核心段(密实段)增长。根据激波理论可知,快速卸载使液体的连续性遭受破坏,这时表层的飞速速度(脱落现象)由混合压力幅值的投影和液体的动力断裂强度之差所确定。在研究时,动力断裂强度(σ_f)与压力相比,它对液体空化的影响更强,例如,纯净水和蒸馏水的 σ_f 可达到 30 MPa,而工业用水的 σ_f 则下降到 0.8 MPa。因此,燃油的乳化,也就是在燃油中人为地引入相间的断裂物质(微小水滴)后,增加了它的径向飞逝速度,相应也就增大了它的雾化角,雾化后的燃油乳化液中含有比无水燃油更多的微小水粒。

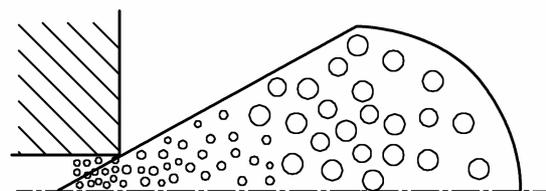


图 2 无水燃油射流的发展模型

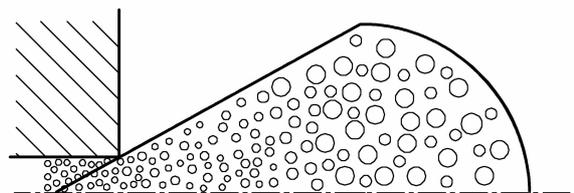


图 3 燃油乳化液射流的发展模型

1.3 空化对射流喷雾特性的影响

在燃油喷射过程中,液体射流束诱使空化发生、长大和溃灭,空泡溃灭能产生瞬时局部的高温和高

压,并形成强烈的冲击波和微射流,空化的存在破坏了射流的连续性,射流喷雾参数示意图如图 4 所示。例如^[14-15],当压力 p_f 为 40 MPa 时,从喷嘴喷出的燃油的纵向运动比动能 $\epsilon_x = \frac{u_x^2}{2} \approx 25 \text{ kJ/kg}$ 。一般柴油机采用的雾化角为 $10^\circ \sim 12^\circ$,由于 $u_r \approx 0.1u_x$,径向速度与射流半径呈线性规律变化,因此径向速度的比动能为 $\epsilon_r = \frac{u_r^2}{4} \approx 0.125 \text{ kJ/kg}$ 。卸载所游离的水粒的比弹性为 $\epsilon_f = \frac{np_f^2}{2\rho_f} \approx 0.8 \text{ kJ/kg}$,式中 n 为燃油的等温压缩系数, $n = -\frac{dv}{dp} = 0.8 \text{ GPa}^{-1}$ 。由此可见,能量发生很小的变化,液体连续性就将遭到破坏,改变 u_r 要比改变 u_x 更能对射流的形成过程产生影响,因此气液混合流的雾化角一般就由径向速度 u_r 来确定。空化对射流的作用就表现在它使雾化角发生改变,故判定燃油雾化效果的一个重要准则就是雾化角。

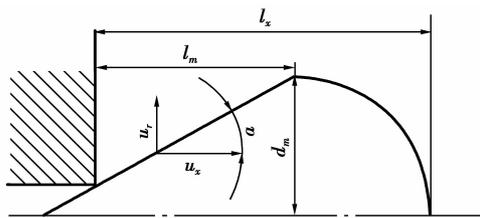


图 4 射流喷雾参数示意图

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

对于大多数已有的液体燃料喷射雾化模型,多数假设射流瞬时全部雾化,基本回避了射流雾化的复杂过程。而笔者利用高速摄影机研究无水燃油和燃油乳化液在高压脉冲喷射气体介质时,在过程的开始阶段(游离水滴发生微爆炸阶段),射流的几何特性发生变化的实验结果。

本实验是以不同含水率的柴油乳化液为研究对象,其实验装置如图 5 所示。所需柴油乳化液由高压泵提供,经高压管流入稳压罐,压力由压力表读出并由调节阀调节,压力乳化液经高压管供给喷嘴进行喷射。用一台安装固定好的高速摄影机对雾化现场进行拍照(喷嘴处后部加有黑色背景,以便拍摄清晰的图片),将所摄图片导入计算机,用图像处理软件测量雾化角。

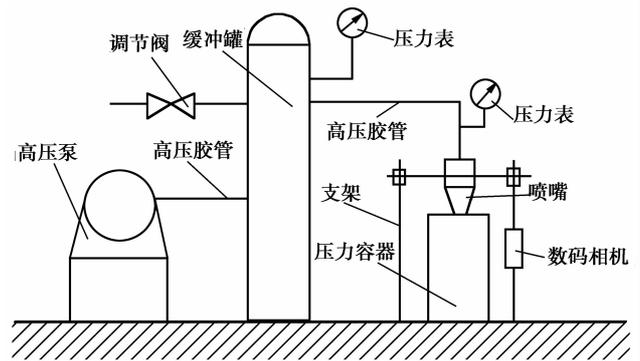


图 5 实验装置流程图

2.2 实验方法

实验是在一个给定容积的容器内充入 $T_0 = 400 \sim 900 \text{ K}$ 的氮气,其初始静压力为 $p_0 = 2 \sim 6 \text{ MPa}$ 。实验采用遮盖式喷嘴,其直径 $d_c = 0.25 \text{ mm}$,向压力容器内单独地脉冲喷入无水柴油或柴油乳化液。

高速摄影机的拍摄速度定为 5000 帧/s ,从所得的照片得到以下参数(如图 4 所示): l_x 为射流的总长度; d_m 为射流最大截面处的直径; l_m 为最大截面距射流出口处的距离。显然射流的雾化角 α 与喷射液体的径向速度 u_r 和纵向速度 u_x 的比值有关,它们由 $d_m/2$ 与 l_m 的比值所确定。考虑到高速摄影机的工作特点和精度,根据图片所测得的雾化角的误差一般不会超过 10% 。为了便于分析,把喷射时所拍的照片取其 $1/4$,即调节时间为 $0.6 \mu\text{s}$,选择这样的调节时间主要是提高它的测量精度(当一幅图片过渡到另一幅图片时,射流的几何参数会产生相对误差)。同时在这段时间内,游离水的微爆炸也还未发生,喷出的燃料质量不超过 2% 。

3 实验结果分析

在喷雾器内安装了一只遮盖式针状阀,从实验现场的喷雾情况和经过处理后的照片可知:在压力达到 25 MPa 时阀门才开始工作,阀门的开启时间为 $0.5 \mu\text{s}$,在喷射持续时间为 $2.5 \mu\text{s}$ 时,压力上升到 45 MPa 达到最大值,其后压力开始下降,燃油也停止了供应。当无水燃油喷射入到充满氮气的压力容器内(容器压力为 4 MPa ,温度为 900 K)时,根据拍摄的照片和肉眼观察可以认为,射流头部大量热力作用所发生的蒸发过程在喷射开始的 $0.8 \sim 1.0 \mu\text{s}$ 范围内最明显,这也在一定程度上证明了选择调节时间的正确性。实验发现:燃油乳化液比无水燃油能喷射出更多的体积,射流宽度变宽,喷射的雾化角增大。

如图 6 所示是当压力容器的 $p_0 = 4 \text{ MPa}$, $T_0 = 900 \text{ K}$ 时,雾化角 α 与燃油中含水量变化的关系。从图中可以看出,当乳化液的含水率从 0 增大到 10% 时,雾化角增大 35%。若继续增大乳化液的含水率,雾化角减小,在燃油含水率达到 25% 时,雾化角趋于稳定,此时燃油乳化液的雾化角要比无水燃油的雾化角大 25% 左右。雾化角与燃油中的含水量成非线性关系,可以认为是由于燃油含水量从 0 增加到 10% 时,增加了相间断裂的数量,从而为液体的分散创造了更有利的条件。在含水量从 20% 增加到 30% 时,射流的有效宽度降低,这是由于液体的流变特性发生了重大的变化。理论研究表明内摩擦系数急剧增加 4~6 倍,损失增加,使喷嘴内部的流动结构发生改变,因此,射流雾化角的增加只与从喷嘴中喷射出的燃油宽度有关。图 7 表示的是射流总长度 l_x ,射流最大截面距射流的出口距离 l_m 与燃油中含水量变化的关系曲线。从 l_x 、 l_m 与燃油含水量的变化关系可以看出:随着燃油含水量的不断增加, l_x 和 l_m 基本上没有发生大的变化。

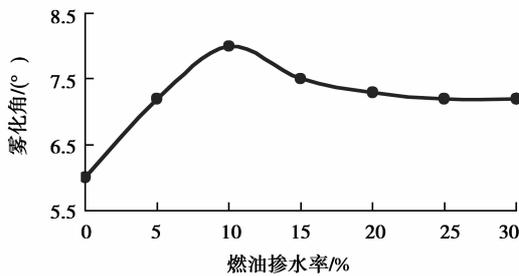


图 6 雾化角与燃油中含水量的关系曲线

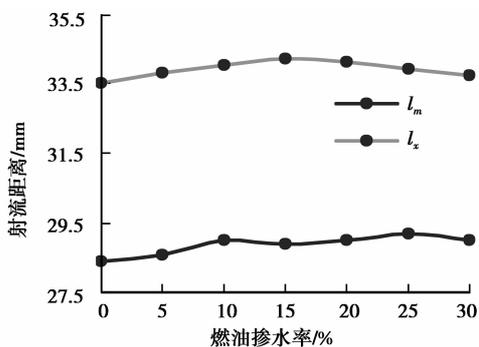


图 7 射流距离与燃油中含水量的关系曲线

图 8 和图 9 分别表示在温度为 $T_0 = 900 \text{ K}$ 时, α 和 l_x 与压力容器内压力变化的关系曲线,实验以无水柴油和柴油乳化液(含水量为 20%)为研究对象。实验结果表明:随着容器内压力的增加,射流雾化角增大,高压燃油乳化液从喷嘴喷出燃油时,它比无水

燃油的雾化角大。同样,随着介质密度的增加,容器内压力增大,射流的有效长度减小。当射流雾化角增加 20% 时,喷射体积将增加 40%,燃料物的平均密度也将降低大约 40%,因为这时部分油已被水取代,从而导致乳化液的自燃特性和燃烧的初始相发生改变。

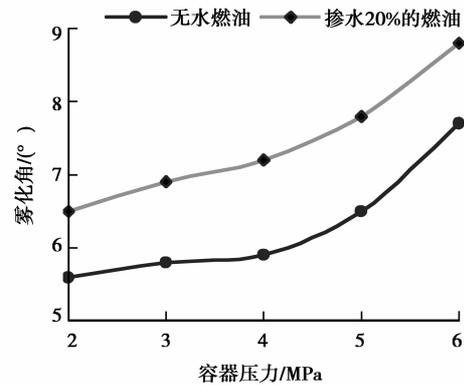


图 8 雾化角与容器压力的关系曲线

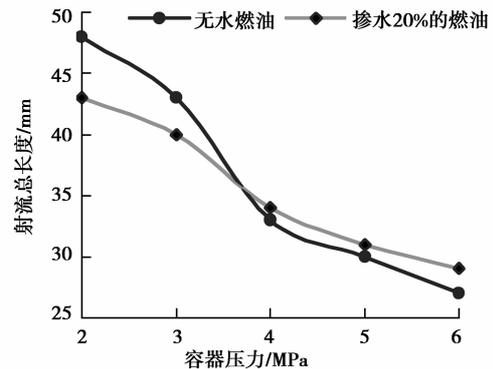


图 9 射流总长度与容器压力的关系曲线

4 结 论

1) 理论上,结合空化对射流分散特性的影响,并由高压燃油乳化液-空气混合物的射流发展模型可知:高压燃油乳化液中含有大量的微小水粒,增加了它的雾化角。空化对射流的破坏作用表现在使其雾化角发生改变,因此判定燃油雾化效果的一个重要准则是雾化角。

2) 燃油乳化液中水滴的微爆炸是发生在混合液射流的发展过程阶段,此时射流的形状发生改变,释放出来的水粒所产生的微爆炸既可起惯性散热体的作用,又可以起化学反应剂的作用。通过降低它在卸载时射流断裂的动力强度,可使乳化液射流具有更强的分散性。

3)在容器的压力和温度一定时,随着乳化液中含水量的增大,雾化角先增大,后逐渐减小趋于稳定。当乳化液中水的含量为 10%时,射流雾化角达到它的最大值,此时雾化角增加 35%。同时,随着容器内压力的增加,射流的雾化角增大,而射流的有效长度减小。

参考文献:

- [1] 吴东垠,盛宏至,张宏策,等. 柴油、甲醇和水三元乳化液滴微爆过程的研究[J]. 西安交通大学学报,2007,41(7):772-775.
WU DONG-YIN, SHENG HONG-ZHI, ZHANG HONG-CE, et al. Study on micro-explosions procedure of diesel/water/methanol emulsions droplet[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7):772-775.
- [2] 楼少敏,许沧粟,魏建勤. 添加乙醇对 W/O、O/W/O 柴油乳化液乳化特性的影响研究[J]. 内燃机工程,2007,28(3):30-34.
LOU SHAO-MIN, XU CANG-SU, WEI JIAN-QIN. Study on effects of ethanol on emulsification characteristics of two-and three-phase diesel oil emulsions [J]. Chinese Internal Combustion Engineering, 2007, 28(3):30-34.
- [3] IBRAHIM S, WANG S, ANG H M. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 49(1):78-83.
- [4] ARMAS O, BALLESTEROS R, MARTOS F J, et al. Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel[J]. Fuel, 2005, 84(7/8):1011-1018.
- [5] 孙平. 乳化油滴着火燃烧现象的实验研究[J]. 动力工程, 2002, 22(2):1719-1723.
SUN PING. An investigation in combustion behavior of single droplet of emulsions [J]. Power Engineering, 2002, 22(2):1719-1723.
- [6] ZORBA Ö. The effects of the amount of emulsified oil on the emulsion stability and viscosity of myofibrillar proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20 (5): 698-702.
- [7] NADEEM M, RANGKUTI C, ANUAR K, et al. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants[J]. Fuel, 2006, 85(14/15):2111-2119.
- [8] 付祥钊,蒋斌,王勇,等. 内混式扇形空气雾化喷嘴参数分析[J]. 重庆大学学报,2010,33(3):87-91.
FU XIANG-ZHAO, JIANG BIN, WANG YONG, et al. Numerical analysis on fan-shaped air-blast atomizer parameters[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3):87-91.
- [9] 康勇烽,廖振方,陈德淑,等. 自激振荡脉冲射流曝气器的实验[J]. 重庆大学学报,2006,29(8):74-76.
KANG YONG-FENG, LIAO ZHEN-FANG, CHEN DE-SHU, et al. Mechanism of self-excited oscillation pulsed jet aerator[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(8):74-76.
- [10] 喻资生. 乳化燃油分散相的平均直径对柴油机燃烧性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报,1986,18(3):41-48.
YU ZI-SHENG. Influence of combustion performance in diesel engine for average diameter about emulsified oil dispersion [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1986, 18(3):41-48.
- [11] TARLET D, BELLETTRE J, TAZEROUT M, et al. Prediction of micro-explosion delay of emulsified fuel droplets[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(2):449-460.
- [12] HAN D M, LI M C, WU B G. Experimental investigation of power micro-emulsification diesel output and soot emission for oil using for vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 15(4):525-527.
- [13] XIE H, YAPA P D, NAKATA K. Modeling emulsification after an oil spill in the sea[J]. Journal of Marine Systems, 2007, 68(3/4):489-506.
- [14] БУЗУКОВ А А, ТИМОШЕНКО Б П. Диспергирование высоконапорной струи водотопливной эмульсии [J]. Прикладная Механика и Техническая Физика, 1995, 36(2):106-111.
- [15] ЛЕБЕДЕВО Н, СОМОВ В А, СИСИН В Л. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях [M]. Судостроение, 1988.

(编辑 张 苹)