

乳化油燃烧与微爆实验研究的现状

王运财¹,张苍松¹,吴东垠²

(1.七台河市技术监督局锅炉检验所,黑龙江七台河市 154600; 2.中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要:文章介绍了乳化油的蒸发、微爆和燃烧机理的实验研究现状。在乳化油的实验过程中,“微爆”的发现和提出“无水层”的概念来解释“微爆”机理具有重要的意义。鉴于乳化油喷雾的特点,为了进行深入的理论分析,多脉冲激光全息摄影技术是比较有前途的研究方法。

关键词:乳化油;燃烧和蒸发;微爆

中图分类号:TE626 **文献标识码:**B

石油是内燃机及汽车的主要燃料,随着国民经济的发展,城市机动车在不断增加,燃油的排放物已构成城市污染的主要来源,每年空气污染所造成的经济损失以千亿元计算。

实验证明:发动机燃用乳化油可以有效地降低 NO_x 等的排放。所谓乳化油就是将两种不相溶的液体(如水和油)放在一起搅拌时,其中一种液体成为液珠分散在另一种液体中,形成乳状液,这个过程叫乳化,因此,该混合液就称为乳化油。

将两种不相溶的物质放在一起,可以用外力使一相分散于另一相中,一般将从一个相到另一个相的过渡层称为物质相与相的分界面,简称界面。显然,乳化会使相界面的面积增加,使体系的不稳定性增加,一旦停止外力的作用,很快又分成两个不相溶的相。在上述两相体系中加入第三组份(乳化剂),该组份易在两相的界面上吸附、富集,在两相界面形成稳定的吸附层,使分散系的不稳定性降低,以便形成具有一定稳定性的乳状液。

组成乳状液有两相,将小液滴形式存在的相称为分散相或内相,也称为为连续相;把另外的、连成一片的相叫分散相或外相,也称连续相。通常把乳化液分为两种类型。一种是水为连续相,油为分散相,称之为水包油型乳化油(oil in water),简称O/W;一种是水为分散相,油为连续相,称之为油包水型乳化油(water in oil),简称W/O。发动机燃烧的乳化油一般指油包水型乳化油,下文所述的“微爆”即发生于油包水型乳化油,形成“微爆”的基本条件是分散

相沸点低于连续相的沸点。

其次,乳化油本身不易燃烧,若机动车油箱受到挤压或漏油时就不易引起火灾,则有利于机动车的安全运行,作为军事燃料,当油箱被击中时,若泄漏的燃料不易燃烧而烧坏武器,就会增强战斗力,因此,开发乳化油燃烧技术,推广使用乳化油具有重要的现实意义。

1 乳化油燃烧、蒸发和微爆等机理的研究

1.1 乳化油滴燃烧、蒸发和微爆的试验研究

1965年,V. M. Ivanov与P. I. Nefedov在NASA的一篇报告中报道了乳化油滴在蒸发燃烧过程中存在剧烈破碎的现象,首先提出了“微爆”的概念⁽²⁾。乳化油燃烧时“微爆”现象的发生,可以有效改善油气的宏观和微观混合,改进油的燃烧工况,降低碳烟和 NO_x 的生成。因此,这一概念的提出立即引出人们极大的兴趣,并进行大量的实验,试图用实验验证这一现象并用“微爆”理论解释乳化油燃烧特性及节油机理。如F. L. Dryer等人早期的试验大多是采用石英丝或铂丝悬挂乳化油滴,观察单滴乳化油的蒸发和燃烧过程⁽⁴⁾。由于悬挂油滴试验的油滴尺寸较大(一般可达0.5~1mm),而且悬丝还会改变乳化油的内相结构,极易引起内相水滴的凝聚,其工况与实际情况差距较大。因此有的学者改用自由落体或悬浮单滴以及多滴油滴进行试验,其中悬浮试验就是利用粒子发生器或注射器产生较小的油滴,并用上升气流托住油滴,通过高速显微摄影术观察油滴的燃烧过程,S. R. Gölle - halli和J. C. Lasheras等人分别

基金项目:国家自然科学基金资助项目(批准号:19682010)。
收稿日期:2001 - 09 - 10

研究了乳化油的燃烧特性,观察到了单滴或多滴乳化油在蒸发和燃烧过程的微爆现象⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾,试验压力也由最初的常压发展到高压。N. J. Marrone 等人还就内相尺寸对油滴燃烧过程的影响进行了研究⁽⁸⁾,在此基础上提出各种乳化油滴的燃烧模型来分析乳化油滴燃烧微爆的机理,研究微爆发生的极限条件、发生时刻等参数的计算方法,并通过模拟计算研究温度、压力、掺水比、内相尺寸等诸多因素对微爆的影响。C. K. Law 就提出了一个简单的乳化油滴燃烧模型⁽⁹⁾,W. A. Sirignano, M. T. Jacpues 和辛军等人分别采用不同的处理方法提出乳化油单滴燃烧模型分析乳化油燃烧微爆机理⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾,1998年,葛阳等采用挂滴法研究了单滴乳化燃料的微爆模型和微爆规律等⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾,将乳化燃料的蒸发过程分为不稳定阶段、局部混合阶段、过热阶段和微爆阶段,并解释了单滴乳化油的“冷滴”和“无水层生成”等机理,在研究中发现:微爆发生的强弱与油的品质及含水量有关,如挥发性较差的油,其乳化液的微爆强度就大,而易挥发(沸点低)的汽油则无明显的微爆;含水量的影响并不是单调的:存在一个有利于发生微爆的最佳范围,含水量过低或过高都不利于微爆的发生,微爆发生的强弱取决于微爆发生时油滴内剩余水份的多少,含水量越多,膨胀冲破油滴的能力越强。在一定范围内,环境温度越高,微爆延迟时间越短;液滴直径越大,微爆延迟时间越长,而且高的环境温度和压力均对油滴微爆不利。

1.2 发动机燃用乳化油的试验

随着理论分析的深入,人们逐渐对乳化油滴的瞬时加热、传热蒸发及传质过程更加感兴趣,为此也进行较多的研究工作。但这些研究均以单滴为对象,如 Rans W. E. 和 Marshall W. R. 的油滴蒸发理论⁽¹⁵⁾,由于单滴或多滴在油滴直径、滴间相互作用、背压、温度、传热条件、加热历程等方面与柴油机油雾燃烧的实际过程存在一定差距,不能圆满解释发动机中的燃烧与节油现象。

马元骥、辛军等人在一低压(0.4MP_a)、高温(300~400)容弹中用高速纹影法观察乳化油燃烧时油束的发展与消失过程,发现乳化油油束在某个时刻后喷雾锥角急剧增大,油束变粗,而且油束存在的时间明显较纯油喷雾要短,并将产生这些现象的原因用油束中发生微爆加以解释⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾,但是,要从微观上直接证实微爆的存在并得到微爆现象的形态细节还需要做深入细致的工作,另外,F. Ujimoto

等人还采用烟丝法研究油雾周围空气运动及油束碰壁现象⁽¹⁸⁾。

汽油机上也进行了大量的乳化燃油试验。B. D. Peters 等在一台标准单缸试验机(CFR)上进行台架及模拟道路试验,对喷水与乳化方式、抗暴震特性、最小点火能量、指示热效率等进行了系统的测试,并应用双区汽油机燃烧模型进行循环模拟,同时计算循环效率和NO_x排放等指标⁽¹⁹⁾,在计算中,将水油特性分开处理。

柴油机喷雾的研究大多数都在定容燃烧弹内进行,研究内容为不同温度、不同背压下喷雾贯穿度与喷雾外形的宏观试验研究与理论分析,记录方法主要为高速摄影、单次闪光摄影或热线测定,有时也进行气涡流的模拟。近年来,对柴油机喷雾特性的研究已进入对喷雾粒子粒径及粒子分布进行微观研究的阶段,常用方法为传统的印痕法、浸夜法、沉降塔法与直接显微摄影法、激光梅(Mio)散射法、夫琅和费衍射法、背景光散射法、激光全息法等⁽²⁰⁾,还有的学者用激光多普勒方法研究油滴运动速度。P. S. Katsoulakos 等使用放热率分析模型,通过实测示功图对柴油机燃用乳化油的蒸发过程进行分析模拟。

需要说明的是柴油掺水后热值并未提高,如果考虑乳化添加剂的热值,柴油乳化掺水后热值不会有变化,不然就违反了能量守恒定律。内燃机燃用乳化油后燃烧过程发生变化,燃烧速度加快,从而提高了循环效率,具有一定的节油效果。

1.3 乳化油燃烧的工业性试验

奥里乳化油作为一种替代燃料,在国外用于发电已有十多年,其中,英国是最早燃用奥里乳化油的国家之一,英国 Powergen 公司从1987年底开始就在 Ince 电厂进行先期试验。1997年6月,胜利石油管理局胜利发电厂进行奥里乳化油的试烧试验⁽²¹⁾⁽²²⁾,一些重油锅炉如吉林化学工业总公司动力厂等进行了乳化重油的燃烧试验⁽²³⁾,取得了较好的燃烧效果。

2 乳化油研究的主要内容

在柴油机试验中,由于发动机结构尺寸和乳化油掺水率及乳化油滴的内相尺寸不同,所得到的结果相差甚远,难以评价并指导乳化掺水技术的推广应用,因而需要开展乳化柴油燃烧机理的研究。但是,关于乳化油机理的研究基本上是在油滴上进行,无法指导发动机的应用实践,而单纯的发动机试验又过于宏观,许多结构甚至相互矛盾,很难从中分析

燃烧机理,总结燃烧规律用以指导发动机的应用实践。由于检测手段等原因,连接油滴与发动机试验间的乳化油雾蒸发、微爆与燃烧的研究并不深入,而连接油滴燃烧与发动机试验间的若干环节恰好是乳化油燃烧研究发展过程中所必须解决的关键性技术难题。山崎博士等则研究了常压下乳化油体积和掺水率对微爆延迟时间的影响⁽²⁴⁾,试验过程中保持水的过热度为一定值,通过目视观察玻璃管中乳化油被加热过程中发生微爆的延迟时间,得出微爆的平均延迟时间分别与乳化油的体积和掺水率成反比,但未对掺水率的上限进行讨论;1988年,盛宏至(Sheng H Z)等采用多脉冲离轴激光全息技术研究了乳化掺水柴油的微爆及燃烧节油机理⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾,实验是在一可承受高温(600)高压(5.0MPa)的定容弹内模拟一般直喷式柴油机的喷雾状态,容弹上安装两块透明的石英玻璃,试验过程中得到了若干张有价值的全息照片,通过照片再现可以观察到乳化油喷雾在高温高压下会出现较大强度的“团状微爆”,能大大扩大油束区域,改善油气混合过程,提高燃烧速率,而且不同微团的微爆时刻与强度均不相同,其中一个微团内的液滴微爆几乎是同步的,对于一定介质压力和确定直径的液滴,存在一个最佳的“微爆温度”范围,当环境压力升高时(4.0MPa),并未抑制微爆的发生,但由于气体密度上升,使其喷射距离缩短,而喷射压力则对微爆无明显的影响,与此同时,还发现了乳化油滴在雾化和蒸发过程中存在“无水层”现象,即油滴在运动过程中,离散相的水滴集中在液滴中心,外层为连续相,即“无水层”,并对微爆现象产生的条件及“无水层”产生的机理进行了讨论,可见该“无水层”的存在对乳化油是否发生微爆有重要的意义,随后,研究者采用高速摄影技术研究了乳化掺水柴油的燃烧过程,进一步验证了激光全息术的试验结果,证实了乳化油燃烧时存在“团状微爆”现象并详细地比较了纯柴油和乳化油燃烧特征的差别,在此基础上用数值模拟技术进一步研究了发动机燃用乳化柴油的节油机理。

可见,在乳化油燃烧机理研究过程中,主要是“微爆”现象的发现和“无水层”机理的提出,在1965年,V. M. Ivanov与P. I. Nefedov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研究内容,1987年,盛宏至(Sheng H Z)等用多脉冲离轴激光全息技术,实际观察到乳化油喷雾在高温高压下会出现较大强度的“团状微

爆”,并提出了乳化油滴在雾化和蒸发过程中存在“无水层”现象,随后采用高速摄影技术进一步验证了激光全息术的试验结果。

3 乳化油研究的试验方法和技术路线

由于喷雾中的油滴尺寸小(液滴直径为5~50 μm)、速度快(5~300m/s),时间短,在超燃发动机中,液体燃料从喷射、雾化、蒸发、混合及化学反应到燃烧结束的整个过程不足1ms,在高速柴油机内也仅1ms,特别是高温高压状态时,乳化油雾中油滴蒸发与微爆过程的试验资料比较缺乏,比较方便的粒度分布研究的各种方法已不适用于研究油雾燃烧过程,乳化油油雾蒸发微爆与燃烧过程研究工作落后的主要原因之一是实验检测手段的障碍,用于燃油雾化的试验方法多集中粒径与粒度分布的测量,如瞬时显微照相法,光散射法及Fraunhofer衍射法等。上述方法的共同特点是能够取整个油束或某部分油束的平均粒径分布,并不适于研究油雾中油滴的蒸发与微爆过程。高速摄影术能记录事件的过程,高速摄影术适用于观察油雾密度的宏观变化,但是,高速胶片的分辨率仅每毫米几十对线,远不足以研究直径为5~50 μm 微小油滴的微观爆炸,采用显微光路的显微高速摄影术适用于拍摄静止的或运动速度很低的微小油滴的变化过程,如悬挂油滴的微爆现象,显然,由于显微高速摄影的视场相当小,高速运动的油滴瞬间即飞出视场,难以跟踪油滴的运动轨迹并捕捉微爆现象。随着激光技术的发展,激光全息术已较普遍地应用于柴油机喷雾的研究,但一般为单(双)脉冲同轴记录方式,记录的信息量较少,不利于观察蒸发与微爆过程,主要研究一般用于冷态喷射的瞬时粒径测量。完善的观测方法必须具备以下特点:

- 3.1 对系统无干扰;
- 3.2 能记录不同时刻(过程)的变化;
- 3.3 能分辨5 μm 以下的微小颗粒;
- 3.4 有足够的视场。

可见,高速摄影能满足3.1、3.2、3.4的要求,显微高速摄影能满足3.1、3.2、3.3的要求,一般激光全息术能满足3.1、3.3、3.4的要求,多脉冲全息摄影术则能满足全部要求。

综上所述,进行乳化油喷雾研究的试验手段应以全息摄影、高速摄影为主,采用多脉冲高速激光全息摄影技术,这样可以在全视场内得到几十万对线的空间分辨力及几十微秒的时间分辨力,得到一定

数量的图象,研究该高速运动的过程。

试验装置可以用定容燃烧弹、风洞或激波管,其中定容弹相对简单、可靠。由于乳化油的微爆强烈依赖于环境温度并需要较高背压(4.0MPa),要模拟柴油机燃烧室内工质的状态,需要的定容弹应能满足7.0MPa与700 的工况要求,而且定容弹应安装观察窗,油束主要的雾化过程应该能从观察窗中观测,试验中可对纯油和乳化油的雾化和蒸发过程进行对比试验,调节弹内的温度和压力,分别研究温度和压力对微爆的影响,进行本项研究的关键是建立描述物理的合理模型,“无水层”的生成及存在条件可能对群滴微爆有根本的影响,因此物理模型中应当包括表面张力及其它因素,这些因素可能在过程中起重要甚至主导作用,在试验的基础上进行柴油机燃用乳化柴油的循环模拟计算来指导发动机的应用。

该实验手段的合理性已被盛宏至等的研究所证实。难点是实验系统相当复杂、成本高、工作量大,实验系统中保持实验装置的高温(700)高压(7.0MPa),激光器的输出模式,光路系统的布置,保证激光器同步并捕捉到微爆,全息干版的成相及再现等均有相当的难度。特别是喷雾为高温高压容器瞬态过程,重要过程仅几百微秒,只有严格同步才能捕捉到现象,同时实验的一项重要内容是在一定的参数范围内寻找微爆发生的条件,因此,微爆的发生本身就有一定的不确定性,可能上千张实验也得不到几张有用的干版,而且透过石英玻璃拍摄容弹同倍的喷雾,拍摄2至3次镜面就发生污染,需要冷却处理然后再加温加压开始下一次实验,工作量之大是可以想象的。正因为如此,目前鲜有采用激光全息术进行喷雾研究的报道。

4 结语

本文归纳了乳化油燃烧与微爆实验研究的现状,其理论研究将在另文讨论之,对于其实验研究可总结如下:

4.1 柴油掺水乳化后其热值并未提高,仍然遵守能量守恒定律。

4.2 在乳化掺水柴油的燃烧过程中,由于水的吸热降低了燃烧室的温度,从而抑制了 NO_x 的生成,同时,由于微爆的存在,使油气混合趋于均匀,碳烟的排放将明显降低,有利于环境保护。

4.3 如前所述,环境温度和压力对微爆的影响不同的研究者尚有不同的见解,微爆存在“最佳的微爆温度”比较容易接受,研究者对此也进行深入的分析,但环境压力特别是高压对微爆的影响需要进行深入的分析。

4.4 采用离轴高速多脉冲红宝石激光全息摄影技术可以较好的研究高温高压下喷雾中油滴的雾及蒸发过程。

4.5 发动机和重油锅炉虽然进行过燃烧乳化油的若干试验,但因试验条件没有统一的标准,试验结果自然有差别,深入细致的研究乳化掺水柴油节能率的大小及其影响因素具有一定的现实意义。

4.6 在乳化掺水柴油试验的基础上,进行多组元液雾(沸点不同)在高温高压气体中微爆过程的试验研究,进一步弄清其燃烧机理,拓展其应用范围并与工程实际紧密结合。

参考文献:

- [1] Hopkinson B., A new method of cooling gas engines, *proc. Inst. Mech. Engineers*, pp679 ~ 715, 1913.
- [2] Ivanov V. M. and Nefedov P. I., Experimental investigation of the combustion process in natural and emulsified fuels, *NASA Tech. Transl. TIF-258*, 1965.
- [3] Dryer F. L., Water additional to practical combustion system - concepts and applications, *16th International symposium on Combustion*, pp270 ~ 295, 1976.
- [4] Wang C. H. and Law C. K., Microexplosion of fuel droplets under high pressure, *Combustion and Flame*, Vol. 59, pp53 ~ 62, 1985.

(因篇幅限制,参考文献编辑时有删节)

ABSTRACTS AND AUTHORS

Recent experiential advances in combustion and micro - explosion of emulsified oil

WANG Yun - cai , ZHANG Gang - song (Qitaihe City Labor Bureau , Qitaihe 154600 , China) WU Dong - yin (Institute of mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China). ENERGY RESEARCH AND UTILIZATION . - 2002 , no1 , pp7 (ISSN1001 - 5532 ; In Chinese)

ABSTRACT: In this paper , recent experimental advances in a mechanism of vaporization and Micro - explosion and combustion of emulsified oil are reported. In this process , the phenomenon of "Micro - explosion " are discovered , and to explain "Micro - explosion " by "No - water layer " theories is importance to study. Based on the characteristic of spray , multi - pulsed ruby laser holography is a potential method for further research.

KEY WORDS: Emulsified oil , combustion and vaporization , micro - explosion

Water and heat management of methanol - feed proton exchange membrane Fuel Cells

WANG Jiang , SHI Ming - heng (Department of Power Engineering , Southeast University , Nanjing 210096 China). ENERGY RESEARCH AND UTILIZATION . - 2002 , no1 , pp23 (ISSN1001 - 5523 ; In Chinese)

ABSTRACT: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is one of the most hopeful fuel cells in the energy application field. In this paper , the electricity - generating principle of the fuel cells and their category are simply narrated. The porous electrode , the Direct Methanol PEMFC and the Methanol - reformed PEMFC are analysed. The importance and necessity to study develop water and heat management of PEMFC are further discussed.

KEY WORDS: Fuel Cell , Methanol , Proton Exchange Membrane , Porous Electrode , Heat and Mass Transfer

Analysis of innerduct injection desulfurization for coal - fired power plant

YANG Jun , LI Da - ji , FENG Bin (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology , Thermoenergy Engineering Research Institute , Southeast University , Nanjing 210096 , China). ENERGY RESEARCH AND UTILIZATION . - 2002 , no1 , pp28 (ISSN1001 - 5523 ; In Chinese)

ABSTRACT: At present , SO₂ emission has already been one of the most important problems in China. Among various methods of flue gas desulfurization , wet FGD method is holding the leading position because it has high desulfurization efficiency and sorbent utilization. However , it has also several disadvantages in China. Inner duct injection method needs low cost , smaller space and shorter retrofitting period. Its desulfurization efficiency can be 70 % - 95 % under certain condition.

KEY WORDS: SO₂ Emission Control , Desulfurization Efficiency , Inner Duct Injection

Analysis of Power Plant Heat Economy Calculation

FANG Hua - hong , WU Xiao - bin (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology , Thermoenergy Engineering Research Institute , Southeast University , Nanjing 210096 , China). ENERGY RESEARCH AND UTILIZATION . - 2002 , no1 , pp31 (ISSN1001 - 5532 ; In Chinese)

ABSTRACT: The calculation method of matrix structure , according to the principle of mass and energy conservation , analyses power plant heat economy. The effect on the coal loss of unit electric supply is considered. By comparison with the Circular Function Method and analysing the results from different unit heat economy calculation , several tables of small index deviation of the coal loss is presented in this paper.

KEY WORDS: Flux Rate , Matrix Structure , Coal Loss of Electric Supply , Deviation of Coal Loss
