

# 柴油、甲醇和水三组元乳化液滴微爆过程的研究

吴东垠<sup>1</sup>, 盛宏至<sup>2</sup>, 张宏策<sup>2</sup>, 魏小林<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国科学院力学研究所, 100080, 北京)

**摘要:** 分别采用激光全息摄影技术和高速数字摄影技术观察了柴油、甲醇和水乳化液喷雾在高温高压(773 K, 3.1 MPa)环境中发生微爆现象的瞬间和全过程,证实了微爆现象的存在. 由于微爆机理的复杂性,尚难以用数学方法准确描述该过程. 实验分析表明:若环境温度处于“最佳温度”范围内,乳化液滴表面首先形成“无水层”,液滴内部形成一个水滴的概率很小,可能形成几个相对较大的水滴,只要其中一个较大水滴的蒸汽压力大于液滴的表面张力和环境压力之和,液滴就有可能发生微爆,微爆不仅与液滴直径、组分的质量分数和组分间的沸点差等乳化液的本身特性有关,而且环境温度和压力的影响也不容忽视. 该研究可以为乳化液喷雾微爆过程的数学模拟提供参考.

**关键词:** 激光全息摄影; 高速数字摄影; 乳化液; 微爆

**中图分类号:** TK429 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0772-04

## Study on Micro-Explosions Procedure of Diesel/ Water/ Methanol Emulsions Droplet

Wu Dongyin<sup>1</sup>, Sheng Hongzhi<sup>2</sup>, Zhang Hongce<sup>2</sup>, Wei Xiaolin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Laser holographic photograph technique and high-speed digital camera were respectively used to observe the instant and entire process of micro-explosion phenomenon, which occurred in the diesel, methanol and water emulsion spray at high temperature and high pressure (3.1 MPa, 773 K). The observation confirms that the micro-explosion exists, but it is difficult to describe the process accurately with the mathematical methods due to the complexity of micro-explosion mechanism. Experimental results show that when the ambient temperature is within the range of “optimum temperature”, the surface of emulsion droplet will form the “no water zone” at first. It might be difficult to form a small water droplet within the liquid droplets, but several relatively large droplets might be formed. If the vapor pressure of one of the large water droplets is greater than the sum of the droplet surface tension and the environment pressure, droplet micro-explosion would occur. This process was not only affected by the droplet diameter, the quality of components, the boiling point difference of components, and the characteristics of the emulsion, but the influence of environmental temperature and pressure should also be considered.

**Keywords:** laser holography shadowgraph technique; high-speed digital shadowgraph; emulsion; micro-explosion

乳化液喷雾在高速加热的过程中可以发生“团状微爆”现象,这种微爆能够有效地改善燃料与气体

的宏观与微观混合,提高燃烧速度,同时降低 NO<sub>x</sub>和碳烟等的排放.而且,柴油、甲醇和水三组元乳化

收稿日期: 2006-10-13. 作者简介: 吴东垠(1966~),男,博士,副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19682010,50576075);中国博士后科学研究基金资助项目(20040350515).

液可以利用甲醇替代石油,特别是甲醇可以由煤炭制得,对我国富煤少油的能源现状具有重要的现实意义。

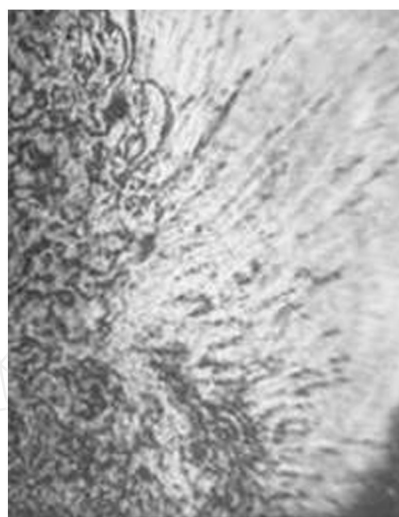
自从乳化液滴的微爆现象被发现以来<sup>[1]</sup>,各国学者对液滴微爆现象一直保持着浓厚的兴趣,不仅进行了大量的实验研究,也进行了相关的理论分析,建立了各种乳化液滴的燃烧微爆模型来分析其燃烧微爆的机理。文献[2]目前正在研究三相乳化液的制备和微爆效应。文献[3]将乳化液的均相成核理论应用于微爆分析,发现较大直径的乳化液滴容易发生微爆。文献[4]采用高速摄影技术观察了微重力情况下乳化液滴的燃烧过程,发现液滴首先从外层开始两相分离,液滴外层逐渐成“壳”,随后内部水加热聚集形成一个水滴,从而导致液滴微爆。文献[5]认为乳化液滴微爆前液滴内部会形成一个水滴,这要比文献[4]的研究结果早。

目前,还没有接近实际过程而且可行的微爆模型,各种结果存在较大的误差,如环境压力等对微爆的影响机理就不统一,文献[6]认为环境压力高有利于微爆,文献[7]认为难以定量描述环境压力对微爆的影响,也有高压抑制微爆之说。此外,环境温度、内相尺寸和含水量等对微爆的影响也需要形成统一的认识。还有学者怀疑乳化液滴特别是乳化液喷雾是否存在微爆现象。因此,本文分别采用红宝石激光全息摄影技术和高速数字摄影技术观察到乳化液喷雾在高温高压(773 K, 3.1 MPa)环境中微爆的瞬间和全过程,证实了微爆现象的存在,同时分析了微爆的机理,可以为进一步的数学描述提供参考。

## 1 实验结果及分析

本文设计了高温高压定容燃烧弹(以下简称“定容弹”)模拟高温高压环境,实验分别在2个实验台上进行,即红宝石激光全息摄影实验和高速摄影实验,以使用2种实验结果相互补充和印证<sup>[8-9]</sup>。在全息摄影实验中,由于柴油机的震动影响全息干涉,因此采用手压式喷油泵(即喷油嘴校验器)替代柴油机,得到的是脉冲喷雾。全息实验的主要设备有多脉冲红宝石激光器、定容弹、同步控制装置、全息光路和全息干板等。采用激光全息摄影技术可以观察乳化液滴微爆的清晰照片,图1选取了实验过程中拍摄的乳化液喷雾微爆区域全息图中有代表性的一幅图片。

由图1可见,全息照片的分辨率较高,微爆核心和微爆后形成粒子的飞溅方向清晰可见,证实了乳



$p = 3.2 \text{ MPa}, J = 773 \text{ K}$

图1 乳化液喷雾微爆区域的全息图

化液喷雾微爆现象的存在。但是,由于红宝石激光器的曝光时间仅为30 ns,全息实验仅得到乳化液喷雾的瞬间图片,而且捕捉乳化液喷雾微爆现象的成功率较低,不能观察乳化液喷雾发展过程中的微爆信息。为了将乳化液喷雾的瞬间与过程相结合,又进行了乳化液喷雾的高速摄影实验。

图2为乳化液喷雾的发展过程,高速摄影机的拍摄速度为2 000 帧/s,环境压力为3.1 MPa,环境温度为773 K,选取了喷雾从视场出现后0.003 5 s内的发展过程,虽然图片的分辨率不高,但可以得到喷雾发展过程的全部信息。从图2可见:喷雾经过一段时间的预热后,边缘开始凸起,而且几乎垂直上升,与图1相互印证,可以确认该凸起系微爆所致;在0.025 s后凸起逐渐增大,可以认为微爆强度也逐渐增大,并且微爆发生在喷雾的四周边缘。由图1和图2相互印证,可以推断乳化液喷雾在不同时刻、不同位置均可以发生微爆现象,只要条件合适,微爆是必然发生的。

## 2 乳化液微爆模型

较多学者认为乳化液滴在微爆前夕液滴内部的易挥发组分会形成一个液滴,本文作者认为液滴内部形成一个水滴的概率似乎很小,在液滴内部可能形成一个或几个相对较大的水滴,只要其中一个较大水滴的蒸汽压力足以克服液滴的表面张力和环境压力之和时,液滴就有可能发生微爆现象。

基于以上分析,作者认为乳化液滴的蒸发微爆

过程可做如下描述(见图3)。

本文所涉及的乳化液为油包水型乳化液,液滴外层为柴油,也称为连续相或“油相”,内层含有若干个小水/甲醇滴,被称为分散相或“水相”。分散相的大小不一,分布也极不均匀,而且在不停地、无规则地运动(即布朗运动),其中某些小粒子可能相互碰撞结合形成相对较大的粒子。该大粒子在运动过程中又可能分裂成几个小粒子,其中粒子碰撞、合成和分裂均具有随机性。对于稳定的乳化液而言,其小粒子合成大粒子的速度和大粒子分裂成小粒子的速度近似相等(见图3a),此时乳化液处于相对平衡状态,其乳化剂的界面亲和作用不容忽视。有关乳化剂对乳化液稳定性和乳化液微爆的影响比较复杂,宜另文讨论。

当外界环境气体加热液滴时,尽管液滴存在温度梯度,但液滴的传热与扩散相比是非常快的过程,随着液滴温度的上升,由于“水相”的沸点低于“油相”的沸点,当液滴表面温度介于“水相”的过热温度和“油相”的过热温度之间时,在接近液滴表面一薄层内的部分“水相”液滴将首先达到过热状态,在液滴表面处蒸发。由于环境中“水相”蒸汽的浓度较低,“水相”蒸汽将向环境扩散,而此时该区域内“油相”的蒸发和扩散则相对较慢,经过短暂而激烈的蒸发之后,只有“油相”停留在接近外表面的薄层内,在外表面形成一薄油层,即“无水层”<sup>[9]</sup>(见图3b)。一旦

“无水层”形成以后,近似认为在该“无水层”内的“水相”已经蒸发完毕,仅剩单一组分——柴油,而被“无水层”包围的液滴内部各组分的温度尚未达到“水相”的过热温度,当然也谈不上过热蒸发,其质量份额与原来乳化液的大致相同。该“无水层”的厚度可能与环境因素(环境温度和压力等)和组分配比等有关。实验观察发现:对于大小不同的液滴,其“无水层”的厚度大致相同。此时,由于液滴内存在温度梯度,“无水层”的温度介于轻组分(水或甲醇)的过热温度和重组分(柴油)的过热温度之间,而被“无水层”包围的液滴内部的各组分温度仍小于“水相”的过热温度。

在“无水层”形成以后,液滴继续吸收热量,一部分热量在提高“无水层”温度的同时,另外一部分热量传向液滴内部。内部的“水相”吸热后运动速度加快,与此同时,“水相”过热后体积膨胀,以上两者均致使水滴碰撞的概率增加,液滴合成的速度将大于液滴分裂的速度,在无水层内将形成若干个大液滴,但该部分大液滴的分布仍然极不均匀(见图3c和图3d),内部液滴(水相)体积膨胀的同时,整个液滴体积增大,“无水层”变薄,此时整个液滴的温度已超过“水相”的过热温度。若一个大粒子或若干个相邻大粒子的体积达到一定值时,整个乳化液滴体积也随之膨胀,“无水层”进一步变薄,液滴的表面张力也随之降低,“水相”液滴的蒸汽压力不断升高直至其饱

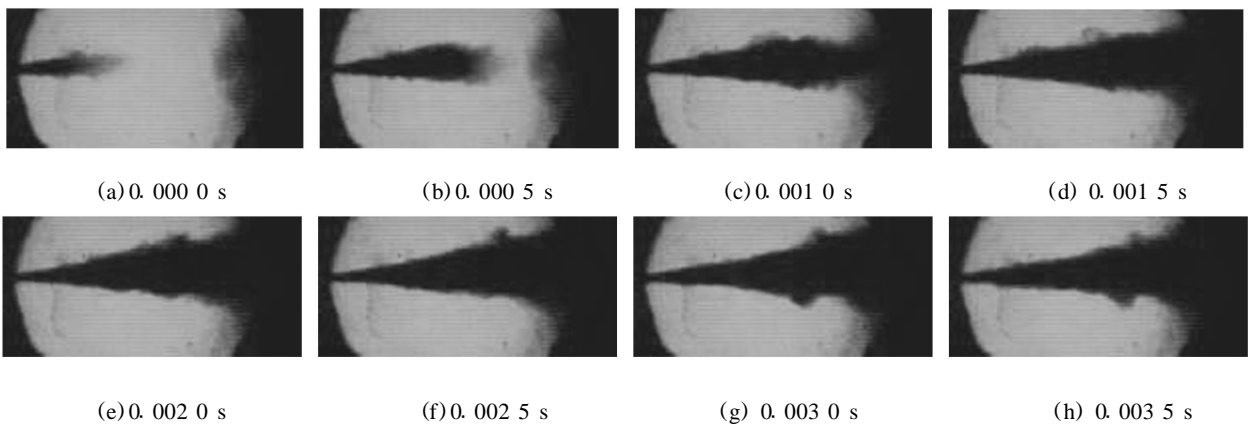


图2 乳化液喷雾的高速摄影阴影图

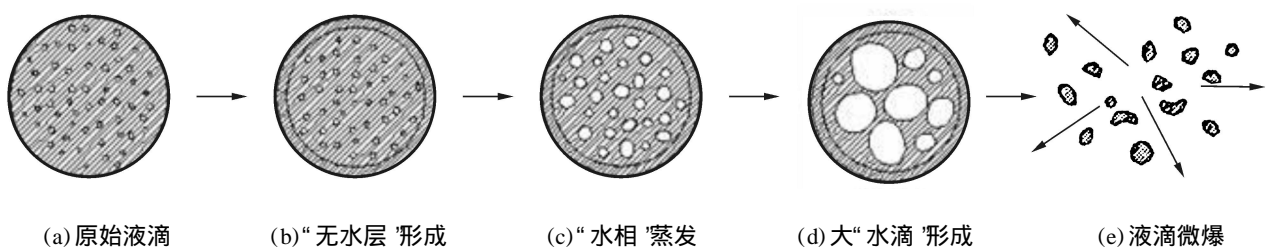


图3 乳化液的蒸发过程示意图

和压力,形成“水相”蒸汽团.最后,“水相”蒸汽团的蒸汽压力将大于整个乳化液液滴的表面张力和环境压力之和,当有外界扰动时,内部“水相”蒸汽团的体积急剧膨胀,大液滴的“无水层”变薄最终不能维持,开始撕碎“无水层”,形成微爆(见图3e).微爆发生以后,可以使液滴进一步细化,达到乳化液喷雾“二次雾化”的目的,这有利于液体与环境气体的宏观和微观混合,取得较好的燃烧效果.

在乳化液中,水和甲醇是吸热因素,而且水和甲醇的气化潜热较大.乳化液的微爆有一定的延迟时间,延迟时间的长短与环境状态及乳化液中水和甲醇的含量直接相关.由于乳化液中的“水”滴分布极不均匀,在加热过程中,如果环境温度过高,液滴内部温度梯度较大,水/甲醇滴在运动过程中形不成较大的液滴,若干个小液滴不可能同时做为过热水存在.当外层水达到过热态时,少量水/甲醇蒸汽不能克服液滴的表面张力从而撕碎液滴,仅可能撕开若干小缺口漏入环境气体之中,因此形不成微爆现象,或者可能仅有部分水/甲醇参与微爆,但强度较弱,体现不到微爆的作用.若环境温度过低,液滴经历缓慢蒸发过程直至最后消失,液滴也不会发生微爆现象,因此液滴发生微爆需要环境温度处于“最佳温度”范围,并非“环境温度越高,微爆越强烈”.当然,针对不同乳化液确定相应的“最佳温度”范围还需要细致的实验和尽量精确的理论分析.同时,乳化液发生微爆要求液滴具有一定的直径,液滴过小则可能快速蒸发,不会发生微爆现象.

### 3 结 论

在液滴加热过程中,液滴内部形成一个水滴的概率似乎很小,在液滴内部可能形成一个或几个相对较大的水滴,只要其中一个较大水滴的蒸汽压力足以克服液滴的表面张力和环境压力之和时,液滴就有可能发生微爆.液滴发生微爆现象需要环境温度处于“最佳温度”范围.当然,针对不同乳化液确定相应的“最佳温度”范围还需要细致的实验和尽量精确的理论分析.同时,乳化液发生微爆要求液滴具有一定的直径,液滴过小则可能快速蒸发,因而形不成微爆现象.

乳化液的微爆包含复杂的物理、化学等问题,虽然已通过实验观察到了乳化液滴和喷雾的微爆现

象,但仍缺乏深入的理论研究.其理论研究亦具有相当的难度,许多基本的物理现象尚未得到合理的解释,这也是乳化液微爆过程的理论分析和数值模拟结果不理想的原因之一.建立接近实际过程的微爆模型,可以为进一步的数学描述提供参考.

### 参考文献:

- [1] Ivanov V M, Nefedov P I. Experimental investigation of the combustion process in natural and emulsified fuels[J]. NASA Tech Briefs Transal, 1965(1):258.
- [2] Lin Chengyuan, Chen Liwei. Engine performance and emission characteristics of three-phase diesel emulsions prepared by an ultrasonic emulsification method[J]. Fuel, 2006, 85(6):593-600.
- [3] Masato M, Takashi Y, Naoya K. Occurrence probability of microexplosion in droplet combustion of miscible binary fuels[C]. The Twenty-Seventh International Symposium on Combustion. Pittsburgh, USA: Combustion Institute, 1998:1933-1941.
- [4] Daisuke S, Hiroshi Y, Toshikazu K, et al. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity[C]. The Twenty-Eighth International Symposium on Combustion. Pittsburgh, USA: Combustion Institute, 2000:985-990.
- [5] 葛阳. 乳化油滴燃烧与微爆的研究以及锅炉燃烧稳定性分析[D]. 北京:清华大学研究生院, 1996.
- [6] Wang C H, Law C K. Microexplosion of fuel droplets under high pressure[J]. Combust and Flame, 1985, 59:53-62.
- [7] 王利坡, 傅维标. 乳化液微爆的统一模型[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(1):6-11.  
Wang Lipo, Fu Weibiao. General model of micro explosion for emulsified oil[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(1):6-11.
- [8] 吴东垠. 醇类、水和柴油多组元乳化液的流变、雾化与微爆特性的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2003.
- [9] Sheng Hongzhi, An C, Chen Liwei, et al. The Droplet group micro-explosions in W/O diesel fuel emulsion sprays and their effects on diesel engine combustion[C]. The Twenty-Fifth International Symposium on Combustion. Pittsburgh, USA: Combustion Institute, 1994.

(编辑 王焕雪)