

## 三组元 W/O 乳化液的表面张力和雾化特性

盛宏至, 张宏策, 吴东垠, 魏小林

(中国科学院力学研究所工程科学研究部, 北京 100080)

**摘 要:** 研究了 W/O 型乳化液的表面张力, 压力雾化喷嘴的乳化液雾化特性与乳化液的组分、乳化剂的黏度以及喷油压力的关系. 实验结果表明: 乳化液的表面张力接近柴油, 但喷雾滴径均大于柴油, 而且喷嘴的启喷压力、乳化液组分和乳化剂黏度对乳化液平均滴径均有显著影响. 随着启喷压力升高, 喷雾滴径明显减小; 若启喷压力相同, 随着乳化液中水相含量增加 (不高于 50%), 乳化液喷雾滴径随之增加; 采用高黏度、低 HLB 值乳化剂配制的乳化液的喷雾滴径相对较大; 内相界面特性和界面上的乳化剂会对滴径分布有重要影响.

**关键词:** 乳化液喷雾; 表面张力; 雾化特性

**中图分类号:** TK16      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-8740(2004)02-0097-05

### Study of Surface Tension and Atomization of W/O Emulsions

SHENG Hong-zhi, ZHANG Hong-ce, WU Dong-yin, WEI Xiao-lin

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** This paper studies the surface tension of water/methanol-diesel fuel W/O emulsions, and the relationship between the atomization characteristics of pressurized nozzle and the contents, viscosity of the emulsions with different injection pressures. The experimental results show that the surface tension and viscosity of the emulsions are close to those of the diesel fuel, but the Sauter mean diameter (SMD) of emulsion droplets is larger than that of diesel droplets, and the injection pressure, the content and the viscosity of the emulsions have significant effects on the SMD of the emulsion droplets. For emulsions, when the injection pressure increases, the SMD decreases very much; and the SMD increases when the aqueous phase (water and/or methanol) fraction increases (not more than 50%), if the injection pressure is constant. When a small amount of viscous emulsifying agent with a lower HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) was employed, the SMD of emulsion is much larger. This suggests that, the interfacial condition and the agents between dispersed phase and continuous phase have a very important influence on SMD.

**Key words:** emulsion spray; surface tension; atomization

液体喷雾在工程实际中有多方面的应用, 液体燃料雾化后蒸发速度明显加快, 一般情况下, 理想的雾化特性意味着液滴破碎后所有液滴的直径都达到所需要的尺寸. 但通常喷雾中的液滴尺寸不可能非常均匀, 因而用平均液滴直径和滴径分布描述雾化特性, 一般希望平均滴径较小, 而且滴径分布集中. 半个多世纪以来, 人们对喷雾滴径规律作了许多研究, 提出了许多根据实验得到的分布函数经验公式来描述液滴分布. 由于燃烧速度与液滴总质量与液滴蒸发速度有关, 前者

与所有液滴的体积之和  $\sum D^3$  有关, 而蒸发速度服从  $D^2$  规律, 因此, 常用所有液滴体积之和除以所有液滴表面积之和的平均直径  $D_{32}$  来表征燃烧特性.

在采用压力雾化喷嘴时, 喷嘴出口液体速度一般都达到每秒几百米, 液柱迅速破碎, 成为液滴. 液滴在飞行中受到空气阻力, 使表面变形, 如果空气阻力克服表面张力而使其不断破碎, 直到表面张力使液滴无法继续破碎, 此时韦伯数  $We$  (空气阻力与表面张力之比)

\* 收稿日期: 2003-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19682010).

作者简介: 盛宏至 (1951—), 男, 工学博士, 研究员, hz-sheng@imech.ac.cn.

约为 10. 因此, 最终平均滴径与喷射速度和表面张力有关, 而与黏度等因素无关. 但是, 根据前人有关柴油等单相液体雾化滴径的大量实验结果, 滴径分布与平均滴径不仅与喷射速度、喷嘴直径、液体和环境气体密度、表面张力等有关, 与液体黏度也有一定关系.

## 1 乳化液的配制

本次实验研究中采用超声方法配制了 D80W15M5、D70W20M10、D60W25M15、D50W30M20 和 D50W25M25 等乳化液, 还进行纯柴油对比实验. 名称中 D、W 和 M 分别表示柴油、水和甲醇, 后面的数字表示各成分的质量分数. 乳化剂采用 Span 80 和 Tween 60 配制的复合乳化剂 Y01、Y02 和 Y03, 近似牛顿流体, 其亲水亲油平衡值 HLB 分别为 5.36、4.83 和 4.51, 动力黏度分别为 1.32 Pa·s、1.38 Pa·s 和 1.5 Pa·s, 添加量约 1.2%. 制成的乳化液为牛顿流体, 内相尺寸 1~5  $\mu\text{m}$ , 黏度范围为 0.004~0.008 Pa·s, 比柴油(0.004 Pa·s)略高.

当其它条件相同时, 乳化液的黏度随着乳化剂黏度和含量的增加而增加, 随着水/甲醇的含量增加(不超过 50%)而增加. 流变特性试验指出: 当水相含量高于 30%~40%, 且乳化剂含量高于 4% 时, 乳化液黏度增加明显, 详细研究结果见参考文献 [1].

## 2 乳化液的表面张力

用最大气泡压力法测量乳化液动态表面张力. 均相纯流体的动态表面张力与静态表面张力一致, 而非均相流体中如果存在表面活性剂, 该物质会吸附于界面, 降低界面张力, 也会明显降低表面张力. 但非均相乳化液在高剪切力和高气泡生成率的情况下, 动态表面张力可能远远高于其静态表面张力, 并随表面延伸率的加大而增加. 实验过程中测量了多种乳化液的动态表面张力, 其数值均在 0.032 5 N/m 至 0.10 N/m 之间. 对照水、甲醇和柴油的表面张力, 在 20  $^{\circ}\text{C}$  温度下, 三者分别为 0.072 88 N/m、0.022 5 N/m 和 0.025 N/m 左右.

图 1 为 D50W25M25 乳化液和 Y02 号乳化剂的含量分别为 4%、8% 时表面张力的分布曲线. 由图 1 可见, 随着乳化液表面延伸率  $a$  的提高, 动态表面张力增加. 大量测量结果还表明, 其它条件不变, 随着乳化剂含量的增加, 乳化液的动态表面张力将随之降低.

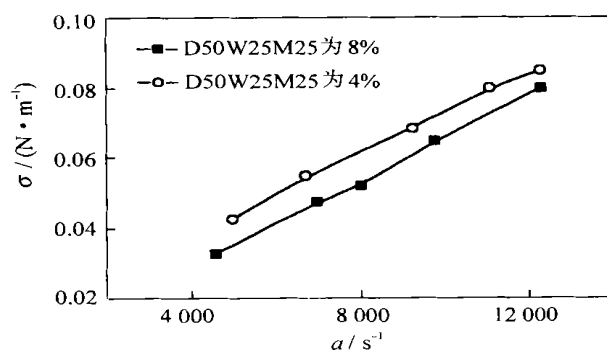


图 1 D50W25M25 乳化液和 Y02 乳化剂表面张力的分布曲线

## 3 喷雾滴径的测量仪器

采用 SERIES 2600 型 Malvern 粒度分析仪(以下简称“粒度仪”)测量喷雾的滴径. 但 Malvern 粒度仪不适用于测量粒子浓度较高的喷雾及高温、高压下的粒度分布. 其原因是: 高环境压力下粒子浓度较高, 氦-氖激光不能有效透过粒子产生衍射; 高温装置安装有一定厚度的石英玻璃窗口, 颗粒衍射的光线经过石英玻璃产生折射, 不能全部达到接收透镜, 导致数据失真. 因此, 本试验的喷雾喷入室温常压的环境, 没有喷入高温高压装置.

根据实验用喷油嘴的雾化特性, 粒度仪选用焦距为 100 mm 的镜头, 滴径测量范围为 1.9~188  $\mu\text{m}$ . 喷油嘴同时喷出四束液雾, 选择其中一束喷雾与测量光束垂直并与 Malvern 粒度仪的接收镜面平行布置. 根据仪器要求, 测量光束的轴心距喷油嘴出口约为 150 mm, 相应物距约为 133 mm. 粒度仪的其它实验参数设定为: 背景光小于 6.6, 遮光度为 0.1~0.4, 拟合模型为独立模型(independent model), 对数误差小于 4.5.

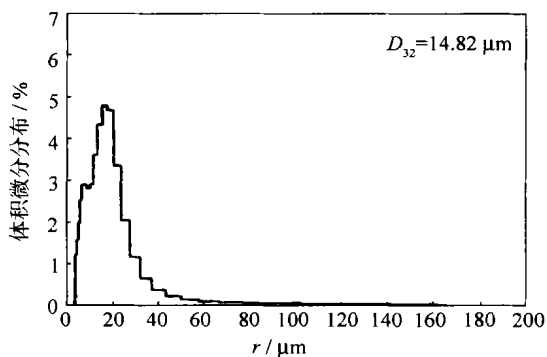
喷油嘴采用上海柴油机股份有限公司的 150435 系列压力雾化喷嘴, 4 孔, 喷孔直径 0.34 mm, 喷油嘴的启喷压力分别设定为 31 MPa、29 MPa、25 MPa 和 22 MPa.

## 4 乳化液滴径的分布特性研究

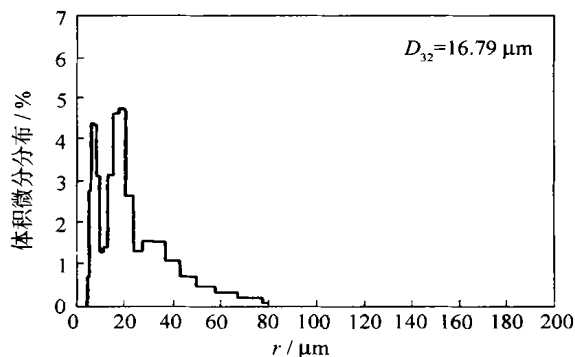
图 2~图 6 为采用不同乳化剂的乳化液喷雾在相应工况下的平均滴径  $r$  及滴径分布的部分数据, 图 7 为平均滴径  $r$  随启喷压力  $p$  和水相含量的变化曲线.

由图可以得出如下结果:

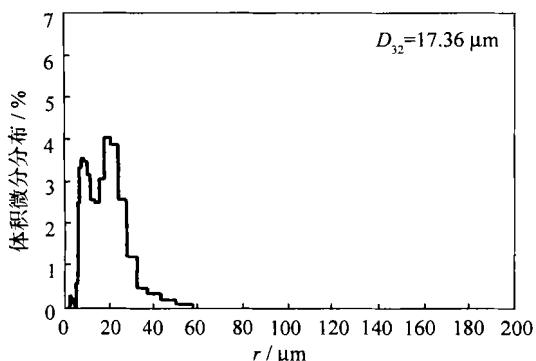
1) 纯柴油的平均滴径明显小于任何一种乳化液. 乳化液的黏度稍高于柴油, 但在同一个数量级, 其雾化后的  $D_{32}$  差异却比较明显.



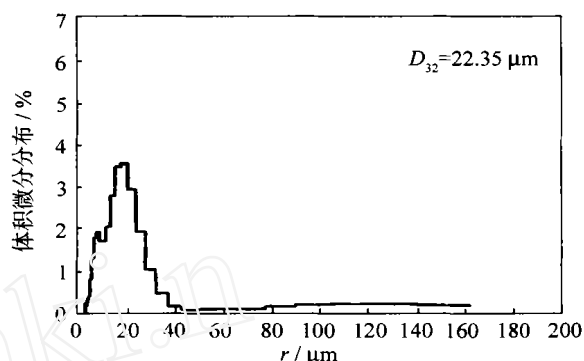
(a)  $p = 31 \text{ MPa}$



(a)  $p = 31 \text{ MPa}$



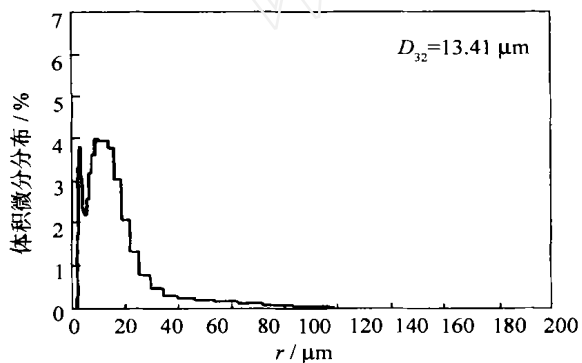
(b)  $p = 25 \text{ MPa}$



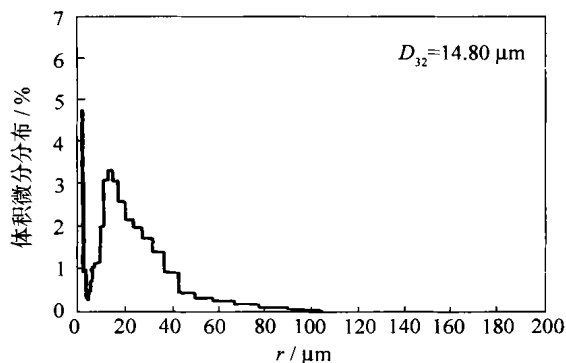
(b)  $p = 25 \text{ MPa}$

图2 D70W20M10 乳化液和 Y03 乳化剂  
的平均滴径分布曲线

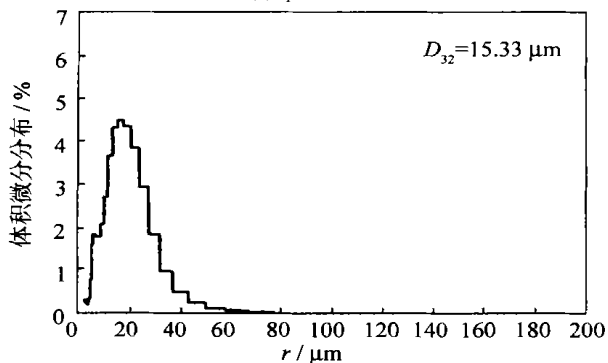
图4 D50W30M20 乳化液和 Y03 乳化剂  
的平均滴径分布曲线



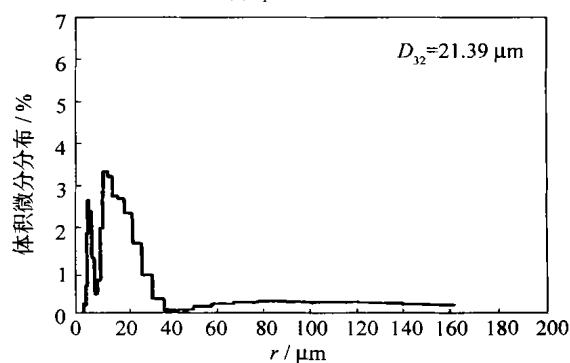
(a)  $p = 31 \text{ MPa}$



(a)  $p = 31 \text{ MPa}$



(b)  $p = 25 \text{ MPa}$



(b)  $p = 25 \text{ MPa}$

图3 D70W20M10 乳化液和 Y01 乳化剂  
的平均滴径分布曲线

图5 D50W30M20 乳化液和 Y01 乳化剂  
的平均滴径分布曲线

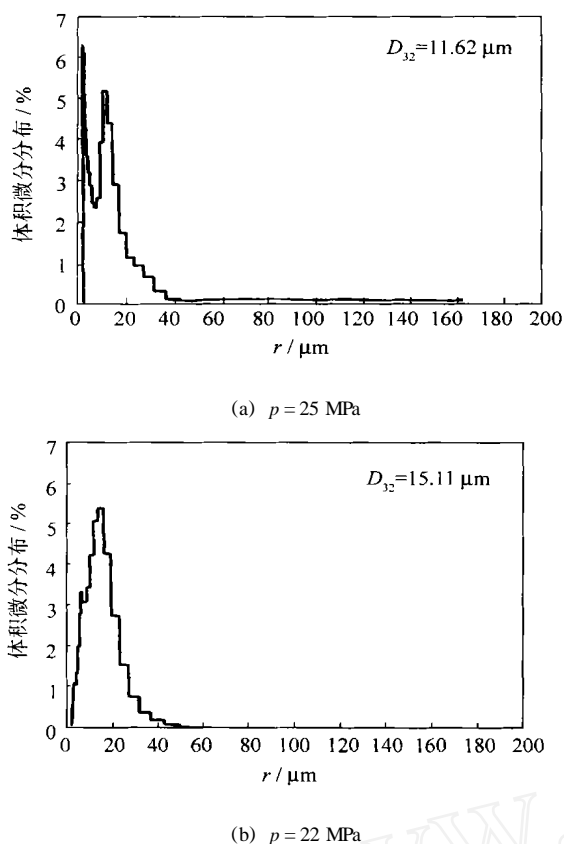


图 6 柴油的平均滴径分布曲线

2) 乳化液的平均滴径随着喷油嘴启喷压力的增大而减小. 采用柴油, 喷油嘴启喷压力在 22 MPa 时就可以达到很好的滴径分布, 原设计的喷油嘴启喷压力可以满足雾化的要求. 但采用乳化液, 要达到与柴油相似的滴径, 启喷压力则要达到 31 MPa 甚至更高. 一般在柴油机中应用乳化液时, 若不对喷油嘴做大的调整, 会使喷雾滴径大大增加, 贯穿距离也会增加, 油束锥角减小. 但是, 由于乳化液在高温高压下可以发生微爆, 即二次雾化, 可以大幅度减小滴径, 并扩大油束区域. 由于乳化液液滴微爆时, 无水层的存在对微爆强度可能有重要影响, 而无水层的存在需要比较大的滴径, 因此, 尽管乳化液喷雾特性较差, 但是, 滴径较大的液滴可能正好满足微爆的要求, 从整体效果看可以改善燃烧过程<sup>[2~4]</sup>. 本试验从侧面可以证实, 应用乳化液改善发动机性能的重要原因是存在乳化液的微爆改善了油气混合. 另外, 该现象还可以解释另外一个实验现象, 即在老式低启喷压力的柴油机 (特别是雾化不良的老旧发动机) 中使用乳化液有明显改进燃烧的作用, 但在具有较高启喷压力的新型柴油机中却没有明显的作用.

3) 喷雾的滴径随水相含量增加而增大. 当启喷压力为 29 MPa 时, DWM 三组元乳化液 D50W30M20

(Y01) 喷雾的最大滴径约为 162  $\mu\text{m}$ , 相应的  $D_{32}$  约为 15.48  $\mu\text{m}$ , D70W20M10 (Y01) 喷雾的最大滴径约为 90  $\mu\text{m}$ , 相应的  $D_{32}$  约为 14.73  $\mu\text{m}$ , 纯柴油喷雾的最大滴径约为 60  $\mu\text{m}$ , 相应的  $D_{32}$  约为 11.02  $\mu\text{m}$ . D70W20M10 乳化液喷雾滴径的变化幅度比 D50W30M20 乳化液喷雾滴径的变化幅度小, 主要是由于 D70W20M10 乳化液的黏度小于 D50W30M20 乳化液的黏度.

4) 乳化液中乳化剂的黏度高、HLB 值低, 其喷雾的平均滴径也大. 实验所用的两种乳化剂黏度仅有 12% 的差异, 但 HLB 值差异较大. 流变特性试验表明, 乳化剂 Y03 配制的乳化液的黏度明显高于乳化剂 Y01 配制的乳化液, 相对差值可达 30%, 因而喷雾的平均滴径和滴径分布也有明显差异, 远高于一般经验公式有关柴油喷雾滴径的黏度影响因子 (如 Knight 的 0.215 次幂关系<sup>[5]</sup>).

由图 7 可以看出, 采用 Y03 号乳化剂配制的乳化液喷雾的滴径均相对较大. 为了进一步分析问题, 采用  $D_{90}$  和  $D_{10}$  数值分析比较.  $D_{90}$  的定义是液滴直径小于  $D_{90}$  的液滴占被检测到的液滴总质量的质量分数为 90%;  $D_{10}$  的定义是液滴直径小于  $D_{10}$  的液滴占被检测到的液滴总质量的质量分数为 10%. 实验结果表明,  $D_{90}$  和  $D_{10}$  的变化趋势与  $D_{32}$  的变化趋势一致, 当喷油压力为 31 MPa 时, DMW 三组元乳化液 D50W30M20 在

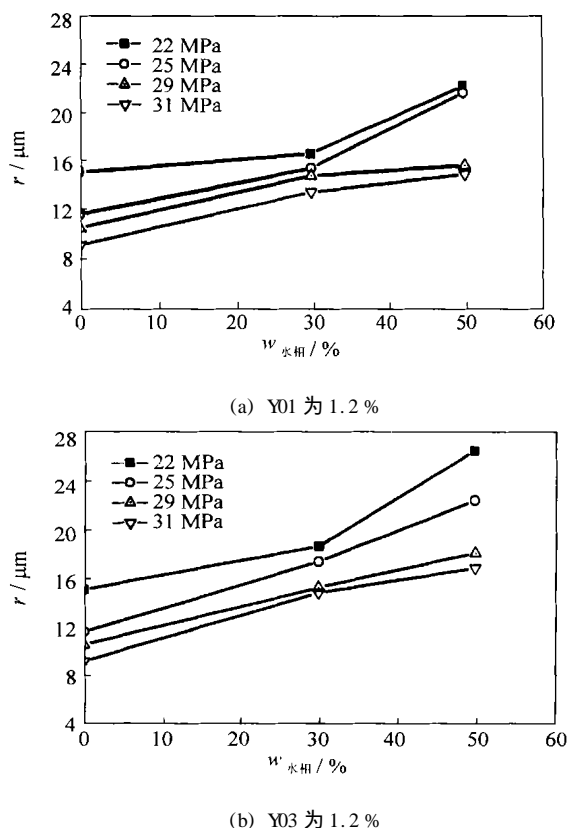


图 7 不同含水率乳化液和柴油的平均滴径分布曲线

应用 Y03 号乳化剂,  $D_{32}$  约为 16.79  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  约为 66.25  $\mu\text{m}$ ,  $D_{10}$  约为 9.56  $\mu\text{m}$ , 而应用 Y01 号乳化剂时, 相应的  $D_{32}$ 、 $D_{90}$  和  $D_{10}$  均比较小, 分别为 14.80  $\mu\text{m}$ 、47.78  $\mu\text{m}$  和 7.88  $\mu\text{m}$ 。

## 5 讨论与分析

液体的黏度和表面张力是最基本的物性参数, 对液体射流的稳定性有着不容忽视的影响。气体与高速运动的液体之间相互作用时, 在其边界层内形成了不稳定的剪切波, 这种剪切波对液体射流的雾化有重要的影响。在整个雾化过程中, 液体的黏度始终对液滴的形成和破碎起主要的阻碍作用, 因而液体黏度越大, 其雾化效果就越差。而液体的表面张力则不然, 在液体射流最初的不稳定波兴起阶段, 表面张力对射流的雾化会起一定的阻碍作用, 但当液体的变形超过一定限度时, 表面张力则成为雾化的驱动力<sup>[6]</sup>。

采用压力雾化喷嘴, 其出口液体速度一般达到每秒几百米, 液柱迅速破碎, 成为液滴。液滴在飞行中受到空气阻力, 使表面变形, 如果空气阻力克服表面张力而使液滴不断破碎, 直到表面张力使液滴无法继续破碎, 此时韦伯数  $We$  约等于 10。由此可见, 液滴的最终平均滴径应当仅与喷射速度和表面张力有关, 与黏度等因素无关。但是, 前人有关柴油等单相液体雾化滴径的大量实验结果表明, 滴径分布与平均滴径不仅与喷射速度、喷孔直径、液体密度、表面张力有关, 与黏度也有一定关系, Lin 和 Kang 的研究结果也肯定了液体黏性在其本身雾化过程中所起的重要作用<sup>[7]</sup>。

乳化液的黏度对雾化起重要作用, 而乳化液的流变特性又与加入的添加剂密切相关, Hansen S 和 Peters G W M 等<sup>[8]</sup>研究了在均相液体中加入添加剂时液丝的破碎机理。有关研究表明, 在均相液体中加入添加剂, 将使乳化液的表面张力小于纯液体, 扰动增长率减小。然而, 添加剂对主导波长的影响不够明显。因此, 乳化液的雾化特性与乳化液组分和乳化剂黏度等有密切的关系。

根据乳化液表面张力的实验结果, 乳化液的表面张力与水、甲醇和柴油差异不大, 因此, 可以认为乳化液的黏度对乳化液的雾化有较大影响。此外, 由于一般乳化燃料的内相尺寸比喷雾滴径小, 但达不到一个数

量级, 因此, 内相界面特性和界面上的乳化剂可能会对滴径分布有重要影响, 因此, 其乳化液喷雾的滴径分布规律不同于柴油等均相液体。

## 6 结 论

- 1) 对于柴油或组分相同的乳化液, 随着启喷压力的升高, 喷雾滴径明显减小;
- 2) 若启喷压力相同, 随着乳化液中水相含量增加 (不高于 50%), 乳化液的喷雾滴径将随之增加;
- 3) 当乳化液的组分固定时, 若乳化剂的黏度和 HLB 值改变, 其相应的喷雾滴径亦随之变化, 即采用高黏度、低 HLB 值乳化剂配制的乳化液, 喷雾滴径要相对较大, 主要原因是乳化液的黏度对其本身雾化起重要作用;
- 4) 内相界面特性和界面上的乳化剂可能会对滴径分布有重要影响, 界面科学理论对乳化液雾化特性可以做出科学的解释。

## 参考文献:

- [1] 吴东根. 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: 中国科学院力学研究所, 2003.
- [2] Sheng H Z, Chen L. Experimental investigation on atomization and evaporation of droplets in spray by ruby laser off-axis holography[A]. In: *The Proc of 4th ICLASS*[C]. The Fuel Society of Japan, 1988:391—396.
- [3] Sheng H Z, Chen L, Zhang Z P, et al. The droplet group microexplosions in water-in-oil emulsion sprays and their effects on diesel engine combustion[A]. In: *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*[C]. The Combustion Institute, 1994, 175—181.
- [4] Masato Mikami, Takashi Yagi, Naoya Kojima. Occurrence probability of micro-explosion in droplet combustion of miscible binary fuels[A]. In: *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*[C]. The Combustion Institute, 1998, 2:1933—1941.
- [5] Knight B E. Communications on the performance of a type of swirl atomizer[J]. *Proc I Mech E*, 1955:581—585.
- [6] Shavit U, Chigier N. The role of dynamic surface tension in air assist atomization[J]. *Phys Fluids*, 1995, 7 (1): 24—33.
- [7] Lin S P, Kang D J. Atomization of a liquid jet, *Physics of Jet*[J]. *Physics of Fluids*, 1982, 25(10): 1730—1742.
- [8] Hansen S, Peters G W M, Meijer H E H. The effect of surfactant on the stability of a fluid filament embedded in a viscous fluid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 382:331—349.