

DOI: 10.7652/xjtuxb201605010

柴油、甲醇和水三相乳化液粒径分布 预测模型及实验验证

王武强¹, 吴东垠¹, 程亮^{1,2}, 严俊杰¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国新时代国际工程公司, 710018, 西安)

摘要: 为了研究柴油、甲醇和水三相乳化液在不同启喷压力下的雾化特性,采用最大熵原理和实验相结合的方法分析了喷嘴启喷压力、乳化液配比和乳化剂等对其雾化粒径分布的影响。通过最大熵原理推导了三相乳化液雾化的概率密度函数,建立了三相乳化液的体积积分分布和累积体积分布理论模型,并与实验值进行了比较验证。研究表明:基于最大熵原理确定的理论模型和实际分布趋势基本一致,随着喷嘴启喷压力的增大,Sauter 平均直径随之减小,大液滴份额减少,小液滴份额增加,峰值朝粒径较小的方向移动,并且采用较小分散相含量和亲油性较弱乳化剂的乳化液雾化效果相对较好;雾化后的液滴直径主要分布在 $10\sim 60\ \mu\text{m}$ 之间,峰值在 $30\ \mu\text{m}$ 左右,峰值附近理论值与实验值的相对误差最大,理论值分布较为集中,实验值分布较为分散;在累积体积分布中,随着启喷压力的增大,累积分布曲线变陡,累积体积理论值较实验值更快到达 100%。

关键词: 最大熵原理;乳化液;启喷压力;体积分布

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0065-07

A Predictive Model and Experimental Verification for Droplet Size Distribution of Diesel-Methanol-Water Emulsion in Sprays

WANG Wuqiang¹, WU Dongyin¹, CHENG Liang^{1,2}, YAN Junjie¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China New Era International Engineering Corporation, Xi'an 710018, China)

Abstract: The spraying characteristics of the diesel-methanol-water emulsion were researched at different injection pressures by combining the principle of maximum entropy with experiments. The influences of the injection pressure, dispersed phase content and emulsifier on the spray's droplet size distribution were analyzed. The spray's probability density function of the emulsion was deduced through the principle of maximum entropy. Furthermore, a volume integral distribution model and a cumulative volume distribution model were established, and compared with the experimental results. The research shows that the distribution trend of the theoretical model based on the maximum entropy is consistent with the experimental distribution. With the increase of the injection pressure, the spray's Sauter mean diameter and the content of large droplets are reduced, while the content of small droplets is increased, and the peak of the distribution shifts to the smaller droplet diameter. Smaller dispersed phase content and weaker lipophilicity emulsifier may lead to a better atomization effect. The droplet diameter ranges from

收稿日期: 2015-09-01. 作者简介: 王武强(1986—),男,博士生;吴东垠(通信作者),男,副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376148)。

网络出版时间: 2016-02-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160202.1552.008.html>

10 μm to 60 μm , and the peak value is 30 μm . And near the peak, there is a maximum relative error between the theoretical and experimental diameters, and the distribution of theoretical values is more concentrated than the experimental values. With the increase of the injection pressure, the cumulative volume distribution curve becomes steeper, and the theoretical cumulative volume distribution reaches 100% faster than the experimental one.

Keywords: principle of maximum entropy; emulsion; injection pressure; volume fraction distribution

随着经济的高速发展,世界能源消耗不断增加,能源短缺与环境污染问题日益严重,已成为制约各国经济发展的主要因素,寻找替代燃料、提高能源的利用率已成为近年来研究的主要方向。柴油掺水乳化及微乳化技术具有节能、燃烧效率高、明显减少尾气污染等优点^[1],在不改变现有内燃机供油系统的基础上,柴油掺水乳化液作为替代燃料已经引起学者们的研究兴趣^[2-4]。甲醇作为一种新型清洁燃料,也可加入柴油掺烧。甲醇为含氧燃料,排放清洁,来源比较广泛,特别适用于富煤少油的地区,其中,柴油、甲醇和水三相乳化液近年来颇受研究者的关注^[5-7]。在燃烧过程中,由于水和醇类的吸热作用降低了燃烧区域的烟气温度,从而减少了氮氧化物的排放,另外,醇类燃料在环保和燃烧效率等方面的优势也受到了很多国家的推崇,因此柴油、甲醇和水三相乳化液的相关研究对其应用发展具有重要意义。

液体燃料在内燃机中燃烧先要经过喷雾雾化的过程,雾化效果的好坏直接影响燃料的燃烧效率和尾气的排放,因此作为柴油的替代燃料,首先需要研究柴油、甲醇和水三相乳化液的雾化特性。评价雾化效果的标准有很多,主要有雾化平均粒径、粒径分布、喷雾锥角和贯穿距离等,其中雾化平均粒径应用较多,如 Sauter 平均直径 D_{32} ^[8-9],但进一步的研究需要考虑雾化液滴的尺寸分布等。喷雾混合过程是一个高速瞬变的过程,对这样的瞬态过程进行实际测量有一定的难度,并且实际测量中往往需要结合光学、控制、测量等多方面因素才能得到较为合理的实验数据,而这些测量设备价格都较昂贵,传统实验的方法虽然可以较为直观地得到液滴的尺寸分布,但是耗时耗力。因此,许多学者在大量实验数据的基础上,经过理论推导得到了一些著名的经验分布公式,如 Nukiyama-Tanasawa 分布、Rosin-Rammler 分布、正态分布和最大熵分布等^[10]。

Nukiyama-Tanasawa 分布和 Rosin-Rammler 分布虽然较为准确,但其关键参数需要通过拟合实验数据得到;正态分布基于液滴形成的随机性,分布

函数较为简单,但误差较大;最大熵分布是以喷雾的物理概念为基础,通过数学方法推导出雾化液滴尺寸分布,其以预测准确而受到了学者的广泛关注。本文基于最大熵原理,运用物理数学分析方法,建立了柴油、甲醇和水三相乳化液雾化液滴尺寸分布的数学模型,求解出乳化液粒径分布概率密度函数的解析解,同时将理论模型与实验结果进行对比分析,验证了液滴尺寸分布模型的准确性。

1 最大熵原理

Shannon 提出信息熵的概念^[11]后,学者们对信息熵理论进行了深入的研究,其中 Jaynes 于 1957 年提出了最大熵原理^[12],其主要思想是:对于已知部分信息的未知分布,应该选取符合这些信息而且熵值最大的概率分布。已知信息即未知分布的约束条件,未知分布可能有若干种,而熵定义的本质是随机变量的不确定性,熵最大时,即随机变量的不确定性最大,这时我们确定的分布就是在约束条件下,关于未知分布最合理的推断。

1.1 乳化液滴粒径分布的数学描述

乳化液经过喷嘴雾化后,形成大量直径不均匀的液滴,这些液滴具有一定的粒径分布。 p_i 表示喷雾中体积为 v_i 的液滴的数量分布概率,在一定的约束条件下,系统的信息熵可达到极大值。

根据信息熵的定义,得

$$-\sum p_i \ln p_i = \max \quad (1)$$

约束条件的选取对液滴最终的粒径分布结果具有决定性的影响,在喷雾过程中,满足质量守恒定律,即一次喷雾的质量等于雾化后全体液滴的总质量。根据质量守恒,该约束条件之一为

$$\sum_i p_i v_i \rho n = m \quad (2)$$

式中: n 为一次喷雾所产生的液滴总数; ρ 为液滴的密度; m 为一次喷雾液体的质量。

同时,概率密度函数满足归一化约束条件,在定义域 R 内积分为 1,即为约束条件之二

$$\sum_i p_i = 1 \quad (3)$$

通过上述目标函数和约束条件,对该问题的数学描述为

$$\left. \begin{aligned} -\sum p_i \ln p_i &= \max \\ \sum_i p_i &= 1 \\ \sum_i p_i v_i \rho n &= m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于某一次喷雾过程,等式右边为定值,等式左边为随机变量的三阶原点矩。因此,若给定 m, n, ρ , 则可以确定概率密度函数,从而确定该喷雾的粒径分布特性。

1.2 求解液滴概率密度函数的解析式

采用拉格朗日乘数因子法求最优解,引入拉格朗日乘数因子 α, β , 作目标泛函

$$L = -\sum p_i \ln p_i - \alpha \left(\sum_i p_i - 1 \right) - \beta \left(\sum_i p_i v_i \rho n - m \right) \quad (5)$$

令 L 对 p_i 的变分为 0, 为了方便表示和计算, 将 $\alpha+1$ 替换为 α , 推导可以得到

$$p_i = \exp(-\alpha - \beta \rho v_i n) \quad (6)$$

式(6)就是最大熵分布概率密度函数的解析式,也是式(4)的一个最优解。

已得到最大熵分布概率密度函数的解析式(6), 现在只要确定各因子 α, β , 就可以用最大熵分布表示随机变量的随机特性。液滴在表面张力的作用下聚集成球形, 因此体积 $v = \pi D^3/6$, $dv = \pi D^2/2 dD$, D 为液滴直径。假定 v 和 p 为连续的, 则

$$p\{v_{n-1} < v < v_n\} = p\{D_{n-1} < D < D_n\} = \int_{D_{n-1}}^{D_n} \frac{\pi}{2} D^2 \exp\left(-\alpha - \frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) dD \quad (7)$$

于是可知喷雾液滴尺寸的数量微分分布函数式为

$$\frac{dN}{dD} = \frac{\pi}{2} D^2 \exp\left(-\alpha - \frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) \quad (8)$$

将式(7)代入式(3), 可得

$$\int_R \frac{\pi}{2} D^2 \exp\left(-\alpha - \frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) dD = 1 \quad (9)$$

推导上式可解出

$$\alpha = \ln \int_R \frac{\pi}{2} D^2 \exp\left(-\frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) dD \quad (10)$$

式中: R 为 $f(D)$ 的定义域, 为 $D_{\min} \sim D_{\max}$ 。

同时, 将式(7)代入式(2), 可得

$$\frac{\int_R \frac{\pi}{6} \rho n D^5 \exp\left(-\frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) dD}{\int_R D^2 \exp\left(-\frac{\pi}{6} \beta \rho n D^3\right) dD} = m \quad (11)$$

为便于分析, $f(D)$ 的定义域为 $0 \sim \infty$, 利用 Mathematica 辅助求解式(10)、(11), 可得

$$\beta = \frac{1}{m} \quad (12)$$

$$\alpha = \ln \frac{1}{\beta \rho n} = \ln \frac{m}{\rho n} \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入式(8), 得到喷雾液滴尺寸的数量微分分布模型为

$$\frac{dN}{dD} = \frac{\pi}{2} D^2 \frac{\rho n}{m} \exp\left(-\frac{\pi}{6} \frac{\rho n}{m} D^3\right) \quad (14)$$

1.3 液滴粒径分布的主要模型

为了计算式(14)中的 m, n, ρ , 可采用 D_{32} 来表示, 其定义为

$$D_{32} = \frac{\int_R D^3 dN}{\int_R D^2 dN} = \frac{\int_R D^3 (dN/dD) dD}{\int_R D^2 (dN/dD) dD} \quad (15)$$

将式(14)代入式(15), 解得

$$D_{32} = \frac{1}{\Gamma(5/3)} \left(\frac{\pi \rho n}{6m} \right)^{-1/3} \quad (16)$$

式中: $\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} e^{-x} dx$ 为伽玛函数。

于是, 可以用 D_{32} 来表示 m, n, ρ , 从而简化液滴粒径分布表达式, 推导式(16)得

$$\frac{\rho n}{m} = \frac{6}{\pi} \left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14), 得到喷雾液滴的数量微分分布模型为

$$\frac{dN}{dD} = 3D^2 \left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} \exp\left\{-\left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} D^3\right\} \quad (18)$$

可以发现, 式(18)与 Nukiyama-Tanasawa 分布模型

$$\frac{dN}{dD} = aD^b \exp(-cD^d) \quad (19)$$

具有相同的形式。式中: a, b, c, d 为可调整变量。式(19)与式(18)可以一一对应, 说明本文推导的模型具有一定的代表性。

根据喷雾液滴数量分布模型, 可以得到液滴的几种主要尺寸分布模型如下。

(1) 液滴尺寸的数量微分分布模型

$$\frac{dV}{dD} = \frac{\pi D^3}{6} \frac{dN}{dD} =$$

$$\frac{D^5}{2} \left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} \exp\left\{-\left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} D^3\right\} \quad (20)$$

(2) 液滴尺寸的数量积分分布模型

$$F(D) = \frac{dV}{V_t dD} \tag{21}$$

$$V_t = \int_R \frac{dV}{dD} dD \tag{22}$$

式中:液滴体积积分分布 $F(D)$ 为某一尺寸的液滴体积占液滴总体积的比例; V_t 为一次喷雾液体的总体积。

将式(22)代入式(21),计算可以得到

$$F(D) = 3D^5 \left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-6} \exp \left\{ - \left[D_{32} \Gamma\left(\frac{5}{3}\right) \right]^{-3} D^3 \right\} \tag{23}$$

(3)液滴累积体积分布模型

$$\frac{V}{V_t} = 1 - \exp \left\{ - \left[\Gamma\left(\frac{5}{3}\right) D_{32} \right]^{-3} D^3 \right\} - \left[\Gamma\left(\frac{5}{3}\right) D_{32} \right]^{-3} D^3 \exp \left\{ - \left[\Gamma\left(\frac{5}{3}\right) D_{32} \right]^{-3} D^3 \right\} \tag{24}$$

液滴累积体积分布是某一直径以下的所有液滴体积占总体积的比例,可以由式(23)积分得到。

以上通过理论分析得到了粒径分布的概率密度函数,建立了液滴体积积分分布模型和累积体积分布模型,下面利用本文实验值进行验证分析。

2 理论模型与实验结果的比较分析

为了验证前述雾化液滴理论分析模型的准确性,同时进行了柴油、甲醇和水三相乳化液的雾化特性实验,分别应用两种不同的乳化剂 Y01 和 Y02 配制了 D60M20W20 和 D80M10W10 两种乳化液,D60M20W20 中柴油、甲醇和水的质量分数分别约为 60%、20% 和 20%,D80M10W10 中柴油、甲醇和水的质量分数分别约为 80%、10% 和 10%。首先,将甲醇和水混合形成甲醇水溶液,将乳化剂分散在柴油中,然后通过超声波方式将甲醇水溶液与柴油进行乳化,最后形成柴油、甲醇和水三相乳化液,其中甲醇水溶液为分散相,柴油为连续相。乳化剂的参数及乳化液的特性如表 1 所示,其中乳化剂通过两种表面活性剂 span80 和 tween60 在不同的质量比下配制而成,HLB 值是反映表面活性剂亲水亲油能力的指标。

表 1 乳化剂参数及乳化液的特性

乳化剂 编号	活性剂 质量比	HLB 值	黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	
			D60M20W20	D80M10W10
Y01	98:2	4.51	10.14	4.98
Y02	95:5	4.83	9.65	4.62

本文采用 Malvern 激光粒度分析仪测得 4 种乳化液基于压力雾化喷嘴在不同启喷压力下雾化后的

D_{32} 值及液滴体积分布情况,并与理论值进行了比较分析。

2.1 柴油、甲醇和水三相乳化液的雾化特性

本文采用 Malvern 激光粒度分析仪研究了柴油、甲醇和水三相乳化液的雾化特性,乳化液为 D60M20W20 和 D80M10W10,采用 Y01 和 Y02 两种乳化剂配制而成,测量光束的轴心距喷嘴出口 50 mm,喷嘴启喷压力分别为 14、16、18 MPa,环境温度和压力为常温常压。图 1 所示为 4 种乳化液在不同启喷压力下雾化的 D_{32} 值变化情况,可以看出,随着喷嘴启喷压力的增大, D_{32} 值逐渐减小,雾化效果逐渐变好。其主要原因是:喷嘴启喷压力是影响初始喷雾特性的重要参数,直接影响燃料液滴的碰撞、撕裂和雾化,决定雾化喷射的贯穿距离,为喷雾的发展提供初动能。启喷压力的增加会提高油束的喷射能量,加强气体的扰动及卷吸作用,有助于改善混合气质量,因此喷嘴的启喷压力越大,乳化液滴的粒径就越小。

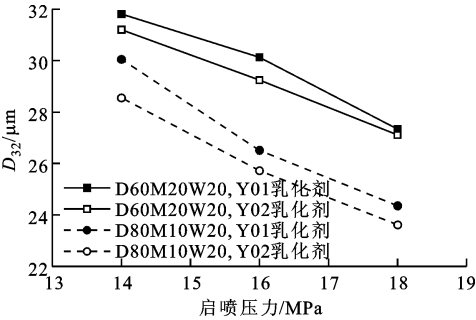


图 1 D_{32} 值随启喷压力的变化情况

由图 1 还可以发现,D60M20W20 乳化液的 D_{32} 值比 D80M10W10 乳化液大。其主要原因是:随着分散相含量的增大,乳化液的黏度也越来越大^[6]。如表 1 所示,同一种乳化剂下,D60M20W20 的黏度比 D80M10W10 大,而黏度是决定雾化特性的重要参数,高黏度通常会阻碍射流的分解,促使雾化发生在低速区域,在其他条件不变或者变化不大的情况下,雾化液滴的大小与黏性力成正比关系^[13],因此随着分散相含量的增大,平均粒径也越大。

同时,采用 Y01 乳化剂的乳化液 D_{32} 值也比采用 Y02 乳化剂的乳化液大,在相同的条件下,采用 Y02 乳化剂的乳化液粒径更小。乳化液液滴的稳定性主要取决于乳化剂的性质和含量,从热力学角度讲,乳化剂吸附在内部界面上,降低了表面张力,除此之外,稳定的界面还可以提供液滴之间的斥力,乳化剂增加到一定程度后就可以很好地维持乳化液的稳定性^[14]。

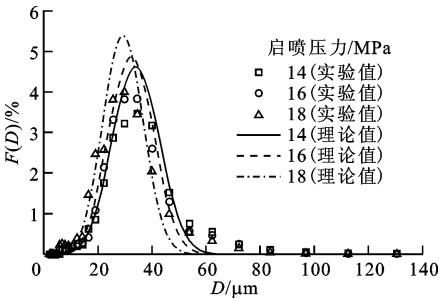
由表 1 可知,采用 Y01 乳化剂配制的乳化液黏度比 Y02 乳化剂的黏度大。本文所配制的乳化液为油包水型,乳化剂的 HLB 值越小,亲油性越强,乳化剂与连续相,即油相的作用力也越强,可以吸附更多的油相在乳化剂的表面,有利于乳化液保持稳定,同时其黏度也相应地有所提高^[6]。因此,HLB 值越小,乳化液黏度越大,雾化的平均粒径也越大。

2.2 液滴体积分分布模型

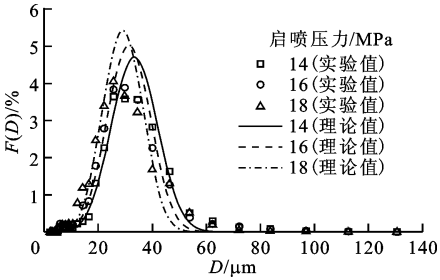
图 2 为采用式(23)计算得到的不同启喷压力下体积分分布随液滴直径的变化情况,同时列出了相关的实验值以便于比较。由图可知,在实验值和理论值中,体积分分布随着液滴粒径的增大先增大后减小,分布曲线有一个峰值,这也与以往的液体燃料雾化特性研究结果类似^[8,15]。同时,随着喷嘴启喷压力的增大,液滴体积分分布朝较小的液滴直径方向移动,并且峰值也越来越大,小液滴的份额随之增大,大液滴的份额随之减少,液滴分布趋于均匀。这是因为随着启喷压力的增大,喷雾液体出口处的起始速度也随之增大,环境气体对液滴的剪切力增强,有利于液滴的破碎,从而使大液滴更容易分裂成较小的液滴。

由图 2 还可以看出,理论值与实验值能够较好地吻合,并且理论模型能很好地反映粒径分布随喷嘴启喷压力的变化趋势。雾化后的液滴主要分布在 10~60 μm 之间,峰值在 30 μm 左右,理论值与实验值比较,峰值附近的误差最大。在图 2a 中,不同启喷压力下峰值附近的最大相对误差分别为 24.8%、18.4%和 25.5%,图 2b 中分别为 23.6%、23.4%和 32.1%,图 2c 中分别为 26.4%、37.5%和 34.5%,图 2d 中分别为 25.3%、32.5%和 29.1%。理论模型的预测分布较实验分布更加集中,峰值附近理论份额比实验份额要多。这是因为最大熵法是从严密的物理、数学的角度出发来预测雾化液滴的数量、体积分布,其理论模型为较理想的分布,而在实际的实验中,由于实验设备的误差以及实验环境等因素会对实验结果产生一定的影响,故实际分布较为分散,但预测模型整体上能够反映不同启喷压力下的液滴粒径分布特性。

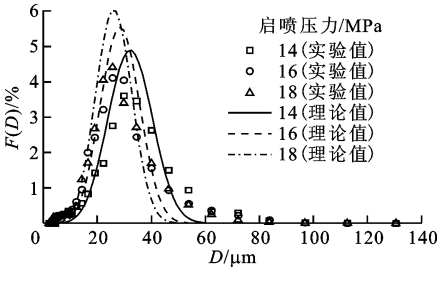
分别比较图 2a 和 2c、图 2b 和 2d,发现在同一种乳化剂下,分散相含量越少,粒径分布越集中,随着分散相含量的增大,雾化效果变差;比较图 2a 和 2b、图 2c 和 2d,发现同一种乳化液配比下,采用 Y02 乳化剂的乳化液体积分分布较采用 Y01 乳化剂的乳化液分布更加靠近较小的粒径范围,这也说明



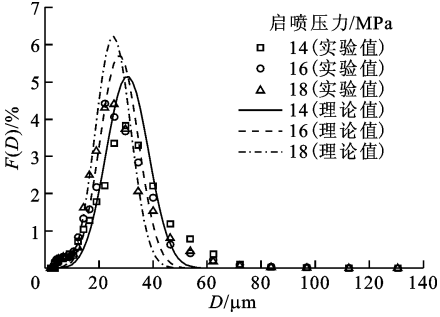
(a) D60M20W20 乳化液 Y01 乳化剂



(b) D60M20W20 乳化液 Y02 乳化剂



(c) D80M10W10 乳化液 Y01 乳化剂



(d) D80M10W10 乳化液 Y02 乳化剂

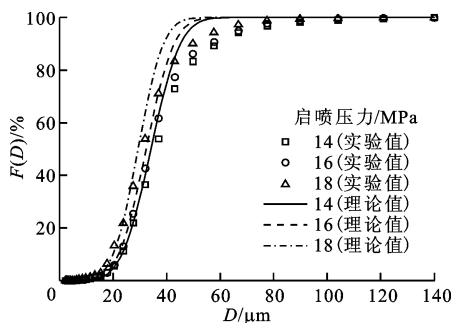
图 2 体积分分布随液滴直径的变化

采用 Y02 乳化剂的乳化液雾化效果更好些,实验值与理论模型均较好地反映了这一趋势。从表 1 可以看出:随着分散相含量的增大,乳化液的黏度也随之增大;乳化剂 HLB 值越小,乳化液的黏度越大,其在喷嘴出口处的流动损失也越大,导致液体出口处的速度降低,从而不利于液滴的破碎;同时,高黏度阻碍射流的分散,促使雾化发生在低速区域,因此较大的分散相含量和较小 HLB 值的乳化剂,都会使

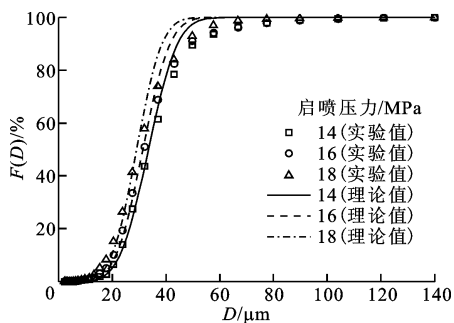
粒径分布朝大液滴方向移动。

2.3 液滴累积体积分布模型

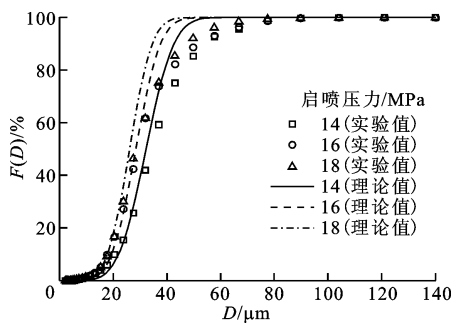
图3为采用式(24)计算得到的不同启喷压力下累积体积分布随液滴直径的变化情况,同时列出了相关的实验值以便于比较。



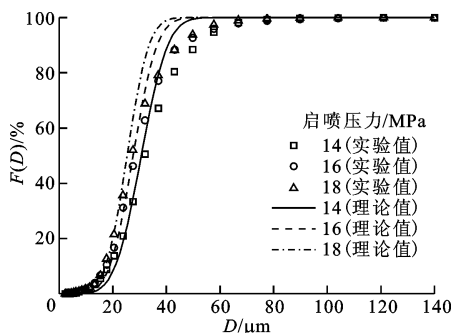
(a) D60M20W20 乳化液 Y01 乳化剂



(b) D60M20W20 乳化液 Y02 乳化剂



(c) D80M10W10 乳化液 Y01 乳化剂



(d) D80M10W10 乳化液 Y02 乳化剂

图3 累积体积分布随液滴直径的变化

比较同一个液滴直径的累积体积分布,可以发现随着喷嘴启喷压力的增大,累积体积越来越大,累积体积分布曲线变陡,累积体积很快达到100%。这说明小液滴的份额随着启喷压力的增大而增大,大液滴的份额随之减少,乳化液雾化成更小的液滴,从而较好地改善了雾化效果。同时,理论分布和实际分布趋势基本一致,但理论模型曲线比实际分布累积体积更快达到100%,说明理论预测的液滴粒径分布比实际的粒径分布更小,而且理论的液滴分布在较小的粒径范围之内,这也与2.2节中的液滴体积分布结论类似,在此不再赘述。

比较D60M20W20乳化液和D80M10W10乳化液的分布曲线可以看出,在同一种乳化剂下,D80M10W10乳化液的小液滴的份额较多,并且累积体积较快到达100%,说明D80M10W10乳化液的雾化效果更好。比较乳化剂的作用发现,采用Y02乳化剂的乳化液在相同的液滴直径下,累积体积较Y01乳化剂的大,理论分布曲线和实际分布曲线都较陡,累积体积很快达到100%。因此,采用Y02乳化剂的乳化液的小液滴的份额较大,大液滴的份额较少,雾化效果更好,这与液滴体积分布模型的预测吻合良好,进一步说明了理论模型的准确性。

3 结 论

基于最大熵原理,在一定的约束条件下建立了柴油、甲醇和水三相乳化液的概率密度函数,并进一步建立了三相乳化液的体积分分布和累积体积分分布模型,同时与实验值进行了比较,分析了喷嘴启喷压力、乳化液配比和乳化剂等对粒径分布的影响机理。

喷嘴启喷压力、分散相含量和乳化剂类型均对柴油、甲醇和水三相乳化液的雾化质量具有重要的影响。启喷压力越大,乳化液小液滴的份额越大,乳化液液滴的 D_{32} 值越小,雾化效果越好;同时,采用较小的分散相含量和较大HLB值乳化剂的乳化液, D_{32} 值更小,雾化效果更好。

采用最大熵原理得到的体积分分布中,分布曲线呈单峰形状,雾化后的液滴主要分布在10~60 μm 之间,峰值在30 μm 左右,小液滴和大液滴体积占总体积的比例较小,且随着喷嘴启喷压力的提高,峰值朝较小的液滴直径方向移动,这与实验值反映的趋势基本一致,但理论值较实验值分布集中;在累积体积分分布中,随着启喷压力的增大,分布曲线变陡,累积体积更快地达到100%,且理论模型曲线比实际分布更快达到100%。

采用最大熵原理得到的体积积分分布和累积体积分布与实验值吻合较好,能够较好地反映粒径分布随启喷压力、乳化液配比和乳化剂等的变化情况,因此可以应用本文建立的分析模型预测相关乳化液的雾化特性,简化实验程序,对乳化液的应用发展起到一定的支撑作用。

参考文献:

- [1] OCHOTERENA R, LIF A, NYDEN M, et al. Optical studies of spray development and combustion of water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels [J]. Fuel, 2010, 89(1): 122-132.
- [2] HUO M, LIN S L, LIU H F, et al. Study on the spray and combustion characteristics of water-emulsified diesel [J]. Fuel, 2014, 123: 218-229.
- [3] BASHA J, SANAND R B. Effects of nanoparticle additive in the water-diesel emulsion fuel on the performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine [J]. International Journal of Vehicle Design, 2012, 59(2/3): 164-181.
- [4] KOBAYASHI D, FUJISAKI S, TAKAHASHI T, et al. Preparation of water-in-diesel oil emulsion fuel using spray blend mixer [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2015, 48(3): 158-162.
- [5] 吴东垠, 仝利娟, 姚季, 等. 乳化剂和分散相含量对乳化液黏度的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 6-11.
WU Dongyin, TONG Lijuan, YAO Ji, et al. Influence of emulsifier and dispersed phase on viscosity of emulsion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11): 6-11.
- [6] SHENG H Z, WU D Y, ZHANG H C, et al. Viscosity, surface tension, and atomization of water-methanol and diesel emulsions [J]. Atomization and Sprays, 2006, 16(1): 1-13.
- [7] 焦纬洲, 刘有智, 祁贵生. 柴油-甲醇-水三元乳化液 W/O 的流变特性 [J]. 石油学报: 石油加工, 2010, 21(2): 214-218.
JIAO Weizhou, LIU Youzhi, QI Guisheng. Rheological characteristics of diesel-methanol-water emulsions [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2010, 21(2): 214-218.
- [8] CHEN P C, WANG W C, ROBERTS W L, et al. Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system [J]. Fuel, 2013, 103: 850-861.
- [9] SALLEVELT J, POZARLIK A, KBREM G. Charac-

terization of viscous biofuel sprays using digital imaging in the near field region [J]. Applied Energy, 2015, 147: 161-175.

- [10] 程亮. 柴油、甲醇和水三相乳化液雾化特性的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- [11] 孟庆生. 信息论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [12] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics [J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [13] OHNESORGE W. Formation of drops by nozzles and the break-up of liquid [J]. Z Angew Math Mech, 1936, 16: 355-358.
- [14] DERKACH S R. Rheology of emulsions [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 151(1/2): 1-23.
- [15] HIROYA S U, HKADOTA T. Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber [J]. Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1976, 19(135): 1064-1072.

[本刊相关文献链接]

- 高忠权, 李春艳, 蔺子雨, 等. 采用离子电流法的甲醇发动机失火诊断. 2015, 49(11): 44-48. [doi:10.7652/xjtuxb201511008]
- 马其然, 郭洋, 王树众, 等. 蓝藻水热液化制取生物油过程优化研究. 2015, 49(3): 56-61. [doi:10.7652/xjtuxb201503010]
- 樊祥山, 孙德魁, 王井山, 等. 利用分子理论估算四氢呋喃的热物理特性参数. 2015, 49(3): 44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201503008]
- 孙璐, 刘亦夫, 曾科. 不同喷油提前角下双燃料发动机的燃烧特性和稳定特性. 2014, 48(7): 29-33. [doi:10.7652/xjtuxb201407006]
- 赵玉伟, 汪映, 雷雄, 等. 预混均质充量压缩燃烧发动机燃烧与排放特性. 2014, 48(7): 23-28. [doi:10.7652/xjtuxb201407005]
- 周磊, 宁小康, 郑瑜, 等. 含氧燃料添加对引燃式天然气发动机细颗粒排放的影响. 2014, 48(1): 19-24. [doi:10.7652/xjtuxb201401004]
- 魏衍举, 汪文瑞, 黄瑾, 等. 柴油机颗粒物可溶有机组分来源研究. 2013, 47(5): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb201305002]
- 李东昌, 汪映, 孟庆斌, 等. 二甲醚预混比对预混压燃发动机性能影响的试验研究. 2013, 47(3): 48-52. [doi:10.7652/xjtuxb201303009]
- 孙璐, 刘亦夫, 周磊, 等. 排气再循环下柴油引燃天然气发动机循环变动特性研究. 2013, 47(3): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201303007]

(编辑 荆树蓉)