

文章编号:1671-8879(2008)03-0084-04

LPG/柴油混合燃料喷雾液滴尺寸分布的数值模拟

曹建明,何建

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘要:运用最大熵原理和质量守恒定律,推导出混合燃料喷雾液滴尺寸分布函数,建立了柴油和 LPG/柴油混合燃料的喷雾液滴尺寸分布模型,对纯柴油、LPG 与柴油质量掺混比为 30% 的 L30 混合燃料进行了模拟计算,并与试验结果进行了对比分析。结果表明:由于 LPG 的闪急沸腾效应,LPG/柴油混合燃料的喷雾液滴尺寸分布相对于柴油的尺寸分布向小颗粒方向偏移;计算数据与试验数据拟合很好,柴油中溶入 LPG 有助于改善雾化质量。

关键词:动力工程;LPG/柴油;喷雾;闪急沸腾效应;液滴尺寸分布;数值模拟

中图分类号:U461; TK421 **文献标志码:**A

Numerical simulation of droplet size distribution for LPG/diesel dual fuel in sprays

CAO Jian-ming, HE Jian

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Diesel and LPG/diesel droplet size distribution model in sprays are established by using droplet size distribution function based on the maximum entropy principle and the mass conservation law. The model is computed with numerical simulations for pure diesel and L30 (the mass ratio of LPG to diesel is 30%), the calculated results are compared with the experimental datum. The results show that: because of the influence of flash boiling injection, the droplet size distribution curves of L30 move towards smaller diameters compared with those of diesel; a good agreement is obtained between numerical and experimental results; the diesel mixed with LPG will improve the spray quality. 4 figs, 15 refs.

Key words: power engineering; LPG/diesel dual fuel; spray; effect of flash boiling injection; fuel droplets size distribution; numerical simulation

0 引言

为了评价发动机喷雾质量及表示雾化特性,通常采用液滴平均直径和能够表示不同液滴直径的数量、质量和体积的液滴尺寸分布来表述。对燃烧装置喷雾质量的一般性论述采用索特(Sauter)平均直

径尚可,但详细地论述则必须研究喷雾液滴的尺寸分布^[1]。试验测量液滴的尺寸分布多采用图解法进行分析。作者采用图解法对柴油与 LPG/柴油双燃料喷雾液滴的尺寸分布进行了对比研究,并利用特征直径研究了喷雾液滴尺寸的发散^[2-3]。比较著名的尺寸分布经验公式有:Nukiyama-Tanasawa 分

收稿日期:2007-09-11

基金项目:陕西省自然科学基金项目(99C07)

作者简介:曹建明(1962-),男,山东昌邑人,教授,E-mail:jcao@chd.edu.cn

布^[4]、Rosin-Rammler 分布^[5]、Rosin-Rammler 修正分布^[6]和上限函数分布^[7]等;理论公式有:正态分布、对数正态分布和最大熵分布等^[8]。最大熵分布以其预测准确而受到普遍应用,它最早是由 Sellens 和 Brzustowski 提出的,但只是给出了概念,而没有进行验证^[9];Li 运用最大熵原理和质量守恒定律推导了带有修正系数的喷雾液滴尺寸分布公式,并与水雾的液滴尺寸分布试验数据进行了对比研究^[10];作者应用最大熵原理和质量守恒定律推导出了液滴尺寸分布函数的完全形式和索特平均直径表达式^[11],进一步又将液滴蒸发和碰撞的影响引入模型,还推导出了油束各个轴向横截面处的液滴尺寸分布表达式,使推导的液滴尺寸分布函数能够应用于对实际发动机喷雾质量的评价与预测,与 Levy 等人的试验结果和 KIVA-II 程序计算结果^[12]进行比较,证实了作者理论公式的适用性^[13]。对于 LPG/柴油双燃料混合喷雾液滴尺寸分布的数值模拟,作者曾采用 Jaynes 和 Rosenkrantz 提出的喷雾液滴尺寸经验分布函数^[14]进行过计算^[15]。本文的计算是根据作者先前推导出的喷雾液滴尺寸分布函数,对柴油、LPG/柴油混合燃料的喷雾进行数值模拟计算,得出雾化液滴的尺寸数目积分分布,并与试验结果进行对比分析,以探索一种普遍适合各种燃料的发动机喷雾液滴尺寸分布的评价与预测方法。

1 喷雾液滴尺寸分布的数学模型

根据质量守恒原理,一次喷雾所产生所有液滴的体积总和应等于每循环的喷油体积,因此有

$$\sum_i P_i v_i n = V \quad (1)$$

式中: v_i 为单个液滴的体积(m^3); n 为一次喷雾所形成的液滴总数; V 为一个循环的喷油体积(m^3); P_i 为某一直径液滴数目的概率。

对于条件极值问题,能够应用拉格朗日因子(Lagrangian multipliers)法求解。假设最小液滴直径为0,则液滴尺寸的数目微分分布为

$$\frac{dN(D)}{dD} = \frac{3\alpha n^2}{1 - e^{-\alpha D^3_{\max}}} D^2 e^{-\alpha D^3} \quad (2)$$

式中: D 为液滴直径(m); D_{\max} 为最大液滴直径(m); $N(D)$ 为直径为 D 的液滴数目分布函数; α 为拉格朗日因子。

每个循环的喷油质量为

$$m = \frac{\pi}{6} \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{D_{\max}^3 e^{-\alpha D_{\max}^3}}{1 - e^{-\alpha D_{\max}^3}} n \right] \quad (3)$$

式中: m 为一个循环的喷油质量(kg)。

对式(2)从 $D - \frac{\Delta D}{2}$ 到 $D + \frac{\Delta D}{2}$ 积分,就可得到

液滴尺寸的数目分布函数

$$N(D) = \frac{e^{-\alpha(D-\Delta D/2)^3} - e^{-\alpha(D+\Delta D/2)^3}}{1 - e^{-\alpha D_{\max}^3}} \quad (4)$$

式中: ΔD 为液滴直径的增量,即液滴直径的计算步长(m)。

液滴尺寸数目积分分布函数为

$$I_{\text{PDF}} = \frac{N(D)}{n} = \frac{e^{-\alpha(D-\Delta D/2)^3} - e^{-\alpha(D+\Delta D/2)^3}}{1 - e^{-\alpha D_{\max}^3}} n \quad (5)$$

索特平均直径可以表示为

$$D_{32} = \frac{\int_0^{D_{\max}} D^5 e^{-\alpha D^3} dD}{\int_0^{D_{\max}} D^4 e^{-\alpha D^3} dD} = \frac{1 - (1 + \alpha D_{\max}^3) e^{-\alpha D_{\max}^3}}{(\alpha n)^{1/3} \gamma(5/3, \alpha D_{\max}^3)} \quad (6)$$

式中: γ 为伽玛函数。

2 液滴蒸发和碰撞的影响

对于实际发动机的喷油雾化,燃烧室内液滴的蒸发和碰撞对液滴尺寸的影响至关重要。蒸发使大颗粒液滴变小,小颗粒液滴成为气体,即粒径为0。部分液滴相互碰撞,会粘合成较大的颗粒,并且离喷嘴越远,大颗粒液滴的数目越多。两者都将造成液滴数目的减少、液滴平均直径的变化以及液滴尺寸的重新分布。根据质量、能量守恒定律和质量扩散方程,可以得到经过时间 τ 蒸发之后的液滴直径与蒸发前初始液滴直径之间的关系式为

$$D = \sqrt{d^2 - K_v \tau} \quad (7)$$

式中: d 为喷雾液滴的初始直径(m); τ 为液束的贯穿时间(s); K_v 为无燃烧情况下雾化液滴的蒸发系数,由燃油的性质及燃烧室与周围环境的温差决定,其表达式为

$$K_v = \frac{8\lambda}{\rho C_p} \ln \left[1 + \frac{C_p}{L} (t_f - t_0) + 10^{-6} \right] \quad (8)$$

式中: λ 为燃料的导热率($\text{kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$); ρ 为燃料的密度(kg/m^3); C_p 为混合气的定压比热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$); L 为燃油的汽化潜热质量能(kJ/kg); t_f 为燃烧室内气体的温度($^\circ\text{C}$); t_0 为环境温度($^\circ\text{C}$)。

根据碰撞理论,碰撞后的 D 与 d 的关系式为

$$D = K_c d^{5/3}, K_c = \sqrt[3]{\frac{\tau}{\tau_0} \frac{3n}{H \sin(\theta/2)}} \quad (9)$$

式中: K_c 为碰撞系数; τ_0 为一个循环的喷油时间

(s); H 为液束的贯穿距离(m); θ 为喷雾锥角($^{\circ}$)。

由于蒸发在燃油一喷出喷嘴就会发生,综合蒸发和碰撞的影响,则有

$$D = K_c(d^2 - K_v\tau)^{5/6} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)~式(6)中,可以得到考虑蒸发和碰撞影响后的液滴平均直径和尺寸的重新分布规律。

3 预测结果与试验数据的比较

将理论预测结果与文献[2-3]的试验数据比较。试验用喷油器型号为 PF68S19,启喷压力为 19 MPa,4 孔喷嘴,孔径为 0.32 mm,循环喷油量为 36 mg,单孔喷油量为 9 mg,喷射时间为 5 ms,测得喷雾锥角为 19.3° 。试验用油为商用 0# 柴油,密度为 845 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.5629 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,表面张力为 0.0295 N/m 。试验条件为大气环境。试验使用同步频闪灯和高清晰数码相机,对距喷嘴出口 40 cm 和 60 cm 处的燃油雾化区域进行拍摄,得到高清晰数码照片,液滴尺寸的试验数据由人工进行测量。由于燃用 LPG 质量掺混比为 40% 的混合燃料(L40)冷启动困难,因此试验采用 L30(掺混比为 30%)。

数值模拟采用 Fortran 语言编制程序,计算每次循环雾化的液滴总数 n 和液滴尺寸数目积分分布 I_{PDF} ,并与试验结果进行比较。计算步长 ΔD 为 $6 \mu\text{m}$ 液滴直径,与试验测量的步长一致。最大液滴直径 D_{\max} 的初始预设值为 $75 \mu\text{m}$,为了验证液滴最大直径预设值对计算结果影响的敏感性,也对 D_{\max} 为 $200 \mu\text{m}$ 的初始预设值进行了计算,结果表明与 D_{\max} 为 $75 \mu\text{m}$ 的没有什么差别。

计算条件为大气环境(20°C),与试验条件保持一致。根据先前的研究,在温度不高的情况(20°C)下,柴油液滴数目的减少几乎完全取决于液滴的碰撞。为了解柴油机压缩终了的喷雾情况,还对环境温度为 690°C 的液滴尺寸分布进行了计算,以便考察蒸发对液滴尺寸分布的影响。

计算得到柴油的液滴总数为 1.24×10^6 个,L30 的液滴总数为 2.97×10^6 个,后者所产生的颗粒总数明显多于前者。说明由于 LPG 的闪急沸腾效应,燃油一出喷嘴就迅速汽化的 LPG 具有“微爆”作用,将液滴粉碎得更加细小。

图 1~图 4 为喷雾液滴尺寸分布的计算数据与试验数据的比较曲线。由图 1~图 4 可以看出,理论计算结果与试验结果基本相符,二者的分布变化

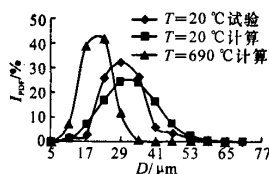


图 1 $H=40 \text{ cm}$ 处柴油的

理论计算与试验结果对比

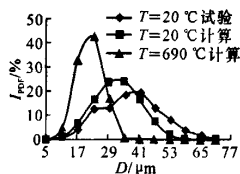


图 2 $H=60 \text{ cm}$ 处柴油的

理论计算与试验结果对比

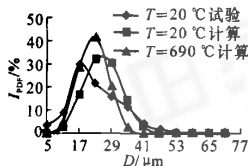


图 3 $H=40 \text{ cm}$ 处 L30 的

理论计算与试验结果对比

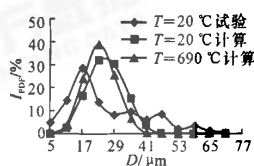


图 4 $H=60 \text{ cm}$ 处 L30 的

理论计算与试验结果对比

趋势是一致的,都是先增大后减小,中间直径的颗粒占多数。曲线峰值差别不大:图 1 中理论计算和试验测量的曲线峰值均位于 $D=29 \mu\text{m}$ 处;图 2~图 4 的曲线峰值略向大颗粒方向偏移,但仅有一个步长的差别。比较环境温度 T 为 20°C 和 690°C 的尺寸分布曲线可以看出, 690°C 的曲线峰值较大,且分布曲线的峰值向小颗粒方向偏移。这表明随着温度的增加,蒸发影响加剧,液滴尺寸变小。比较喷雾贯穿距离 H 为 40 cm 和 60 cm 的情况,可以看出,L30 喷雾液滴尺寸分布随喷射贯穿距离的变化不大;60 cm 处中间直径的柴油液滴明显比 40 cm 处的少,而小颗粒液滴和大颗粒液滴较多。这说明随着液束贯穿时间的加长,蒸发的影响使得柴油液滴颗粒变小,而同时液滴之间相互碰撞的机会也增多,碰撞粘合而形成的大颗粒液滴数目增加。比较柴油与 LPG/柴油混合燃料喷雾液滴尺寸分布的计算数据,可以看出,L30 的分布曲线峰值明显高于纯柴油的峰值,并且曲线峰值相对于柴油的峰值向小颗粒方向偏移,说明受 LPG 闪急沸腾效应的影响,L30 喷雾所产生的小颗粒液滴较纯柴油的多,雾化质量改善。

需要指出的是,拉格朗日因子 α 初始值对计算结果有重要影响,因为整个理论推导过程是建立在利用 α 求解条件极值问题的基础上的。在理论计算中,通过如下公式间接确定 α 初始值

$$\alpha = \pi / (6V\beta) \quad (11)$$

式中: β 为拉格朗日因子变化系数初始值。

经过反复试算,确定纯柴油和 L30 的预设 β 值分别为 1.243 和 1.19,此时 α 可以很好地收敛。

不同的喷射系统和环境条件对应着不同的 β 值,也就对应着不同的 α 初始值。如果能够确定 β

根据不同喷射系统和环境条件的变化规律,也就可以确定 α 初始值的变化规律。但是,由于缺乏足够的不同喷射系统和环境条件下喷雾液滴尺寸分布的试验数据,还无法对其总结出经验规律。因此,对于 β 是如何影响 α 收敛的规律性问题,还有待于收集和大量试验数据,作进一步地深入探讨。

4 结 语

(1)运用最大熵原理和质量守恒定律建立的喷雾液滴尺寸分布模型,对柴油机喷雾液滴尺寸分布进行了模拟数值计算,并与试验结果进行了对比分析,计算结果与试验数据拟合很好。说明该计算模型对于纯柴油和LPG/柴油混合燃料喷雾液滴尺寸分布的计算是可靠的。

(2)计算结果表明,受LPG闪急沸腾效应的影响,LPG/柴油混合燃料的喷雾液滴尺寸分布相对于柴油向小颗粒方向偏移。柴油中溶入LPG,将有助于提高发动机喷雾质量。

(3)该模型中拉格朗日因子的初始值对计算结果的影响十分重要。由于缺乏足够的不同喷射系统和环境条件下喷雾液滴尺寸分布的试验数据,还无法对其总结出经验规律,有待于进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 曹建明. 喷雾学 [M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 曹建明,武涛,程前,等. 柴油与LPG/柴油双燃料喷雾特性的对比 [J]. 交通运输工程学报,2003,3(2):40-44.
CAO Jian-ming, WU Tao, CHENG Qian, et al. Atomization characteristics comparison between diesel and LPG/diesel dual fuel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 40-44.
- [3] Cao J M, Bian Y Z, Qi D H, et al. Comparative investigation of diesel and mixed liquefied petroleum gas/diesel injection engines [J]. Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(5): 557-565.
- [4] Nukiyama S, Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an air stream [J]. Defense Research Board, 1939, (5): 62-67.
- [5] Rosin P, Rammner E. The laws governing the fineness of powdered coal [J]. Fuel, 1933, 7(1): 29-36.
- [6] Rizk N K, Lefebvre A H. Drop-size distribution characteristics of spill-return atomizers [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 1985, 1(1): 16-22.
- [7] Mugele R, Evans H D. Droplet size distributions in sprays [J]. Industrial Engineering of Chemistry, 1951, 43(6): 1317-1324.
- [8] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展 [J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(1): 82-87.
CAO Jian-ming. Review of international evolvement on spray investigation [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 82-87.
- [9] Sellens R W, Brzustowski T A. A prediction of the drop size distribution in a spray from first principle [J]. Atomization and Spray Technology, 1985, 23(1): 89-102.
- [10] Li X, Tankin R S. Droplet size distribution; A derivation of a Nukiyama-Tanasawa type distribution function [J]. Combustion Science and Technology, 1987, 56(2): 65-76.
- [11] 曹建明. Nukiyama-Tanasawa 型雾化液滴尺寸分布函数的引申 [J]. 中国公路学报, 1999, 12(增刊): 106-111.
CAO Jian-ming. An extension of the Nukiyama-Tanasawa droplet size distribution function in sprays [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(S): 106-111.
- [12] Levy N, Amara S, Champoussin J C, et al. Non-reactive diesel spray computations supported by PDA measurements [J]. SAE Paper, 1997, 970049.
- [13] Cao J M. On the theoretical prediction of fuel droplet size distribution in nonreactive diesel sprays [J]. Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME, 2002, 124(1): 182-185.
- [14] Jaynes E T, Rosenkrantz R D. Papers on probability, statistics and statistical physics [J]. Journal of the American Statistical Association, 1985, 80: 771-772.
- [15] 曹建明,武涛. 柴油喷雾与LPG/柴油混合喷雾的对比研究 [J]. 车用发动机, 2007, (1): 13-18.
CAO Jian-ming, WU Tao. Comparative investigation between diesel and mixed liquefied petroleum gas/diesel sprays [J]. Vehicle Engine, 2007, (1): 13-18.