

DOI: 10.7652/xjtuxb201711003

低乙醇配比的乙醇-柴油混合燃料空化特性试验

高莹, 麻斌, 邓海鹏, 刘宇, 刘洪岐, 王亚娣
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点试验室, 130025, 长春)

摘要: 为了完善乙醇-柴油混合燃料的喷嘴孔内空化现象及近场喷雾特性研究,利用高速摄像机和放大尺寸单孔透明喷嘴观察乙醇体积分数分别为 0%、5% 和 10% 的 3 种乙醇-柴油混合燃料在喷孔中的两相流动及近场喷雾,在喷射压力为 0.26~0.46 MPa 的范围内对空化特征长度、流量系数、空化数、雷诺数等特性参数及喷嘴近场喷雾特性进行了分析。将 3 种混合燃料分别命名为 $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$,其中 E、D、N 分别代表燃料中的乙醇、柴油和助溶剂正丁醇,下标表示各成分的体积分数。试验结果表明:随着燃料中乙醇含量的增加, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 的空化初生及超空化对应的阈值喷射压力依次降低,空化发展期逐渐缩短,超空化期相应延长;在无空化和空化初生期乙醇含量的改变对近场喷雾锥角的影响并不明显,在空化发展期和超空化期,3 种燃料近场喷雾锥角随乙醇含量的提高而增大,在柱塞流阶段,3 种燃料近场喷雾锥角均接近 0°;在同等喷射压力下, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 对应的流量系数和雷诺数依次增大,在柱塞流阶段,3 种燃料对应的流量系数和雷诺数均急剧下降。

关键词: 乙醇-柴油;喷嘴;空化;可视化试验

中图分类号: TK417 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0014-08

Experimental Investigation on the Cavitation Characteristics of Ethanol-Diesel Blended Fuels

GAO Ying, MA Bin, DENG Haipeng, LIU Yu, LIU Hongqi, WANG Yadi
(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To research the nozzle cavitation and near-field spraying characteristics, visualization experiments were carried out using a high-speed camera and a single transparent up-sized nozzle to observe the nozzle cavitation and near-field spraying behavior of three ethanol-diesel blended fuels with the volume fractions of ethanol of 0%, 5%, 10%. The normalized cavitation length, discharge coefficient, cavitation number, Reynolds number and near-field spraying cone angle were analyzed under the injection pressures of 0.16-0.36 MPa. The three ethanol-diesel blended fuels were named $E_0D_{100}N_0$, $E_5D_{90}N_5$ and $E_{10}D_{85}N_5$ respectively, wherein the letters of E, D and N represent ethanol, diesel and n-butanol respectively while the subscripts indicate the volume fraction of each component. The experimental results showed that, with the increase of volume fraction of ethanol, the threshold injection pressures corresponding to original cavitation and super cavitation were decreased, and the periods of developing cavitation were shortened but the periods of supercavitation were extended. During the no-cavitation stage, the change of volume fraction of ethanol had no obvious influence on near-field spraying cone angle; during the

developing cavitation stage, the near-field spraying cone angle increased with the increase of volume fraction of ethanol; and during the hydraulic flip stage, the near-field spraying cone angles of three blended fuels were all close to zero. Under the same injection pressure, the discharge coefficients and the Reynolds numbers of $E_0D_{100}N_0$, $E_5D_{90}N_5$ and $E_{10}D_{85}N_5$ increased in sequence, and when hydraulic flip appeared inside the nozzle, the discharge coefficients and the Reynolds numbers of these three blended fuels were all decreased sharply.

Keywords: ethanol-diesel; nozzle; cavitation; visualization experiment

随着全球石化资源过度开采导致石油供应短缺的问题日益突出,汽车发动机代用燃料的议题受到了国内外学者的广泛关注。考虑到获取途径、清洁燃烧、循环利用等因素,乙醇是目前较为理想的代用燃料之一,它与柴油组成的混合燃料在柴油机上的应用能一定程度缓解全球石油供应短缺和区域供应不稳定的问题^[1-4]。

目前,对于乙醇-柴油混合燃料的研究大都集中于乙醇含量对发动机喷雾特性、燃烧特性、排放特性和经济性等方面的影响^[5-8],有关乙醇-柴油混合燃料的喷嘴孔内空化现象研究较少,而喷嘴孔内空化现象对燃油喷雾特性及喷孔流量系数有显著影响,进而影响乙醇-柴油混合燃料缸内喷射发动机的排放性能和燃油经济性。

喷嘴孔内空化现象指高压燃油由于流道转折、流通截面突缩等原因导致流速急剧升高,静压下降至其饱和蒸气压以下并发生气化,从而在喷孔内出现由燃油蒸气及部分不凝性气体与液态燃油构成的气液两相流现象^[9-12]。仇滔等以柴油为工质通过试验和数值模拟指出随着喷油压力的升高,喷孔内燃料会经历空化初生、空化发展和超空化 3 个阶段^[13]。麻斌等以过滤水为工质通过数值计算研究了相间滑移对喷孔内空化现象的影响^[14]。何志霞等以柴油为工质通过数值模拟得出口喷油压力对空化的影响较大,随着入口喷油压力逐渐升高,流量会相应增大,流动工质黏性越大,空化初生对应的阈值喷油压力越大^[15-16]。

本试验利用高速摄像机和特制的透明单孔喷嘴搭建了可视化试验平台,以体积分数为 5% 的正丁醇作为助溶剂,通过改变燃料中乙醇的含量,对乙醇体积分分数分别为 0%、5% 和 10% 的 3 组燃料(分别记为 $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 、 $E_{10}D_{85}N_5$,其中 E、D、N 分别代表燃料中的乙醇、柴油和助溶剂正丁醇,下标表示各成分的体积分数)在喷孔内的空化现象及近场喷雾进行了研究分析,讨论了乙醇-柴油混合燃料中乙醇含量对空化特征长度、流量系数、雷诺数、空化

数及近场喷雾锥角等参数的影响。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

图 1 为空化特征长度校核试验所采用的可视化台架示意图,试验过程中高压氮气经管路进入气液分离罐对燃油进行加压,输出压力由二级调压阀调节,最大提供 15 MPa 喷射压力,调节精度为 ± 0.005 MPa;液态工质采用低乙醇配比的乙醇-柴油混合燃料,燃油流量由安装于油路中的涡轮流量计测量,测量范围为 $0.2 \sim 2 \text{ m}^3/\text{h}$,测量精度为 $\pm 0.002 \text{ m}^3/\text{h}$;喷射压力由安装于喷嘴前端的压力表测量,测压范围为 $0 \sim 2 \text{ MPa}$,测量精度为 $\pm 0.001 \text{ MPa}$;LED 光源与高速摄像机分置喷嘴两侧,利用液态燃油与燃油蒸气对光的折射率不同来捕捉喷孔内空化现象及近场喷雾的可视化图像。

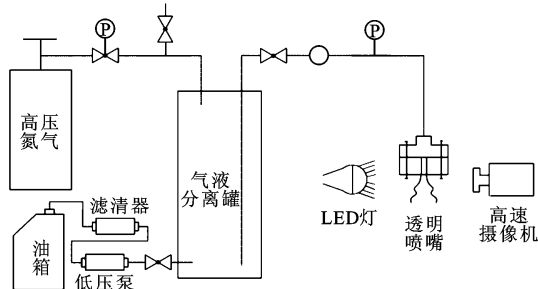


图 1 试验台架布置示意图

针对喷嘴孔内空化现象进行试验研究时所采用的喷嘴大致可分为实际尺寸和放大尺寸 2 种。基于实际尺寸喷嘴(孔径 0.2 mm)进行可视化试验所采用的喷射压力(10~100 MPa 左右)与工业用缸内燃油喷射发动机十分相近,因此试验结果更能反映实际发动机喷嘴孔内发生的空化现象,然而过小的喷孔直径、过高的喷射压力及喷孔内流动状态的高瞬态性均会显著增加可视化试验的困难,包括喷嘴难以加工、喷嘴易被高压入流冲毁及试验图像模糊等问题^[17-20]。基于放大尺寸喷嘴进行可视化试验的理论基础为,不同尺寸喷孔内空化区域分布在雷诺

数和空化数保持一致时具有很高程度的相似性,因此可有效规避基于实际尺寸喷嘴进行可视化试验时所面临的困难,从而可对喷嘴孔内空化现象进行较为详尽细致的试验研究,需要指出的是这种研究方式所得试验结果与实际尺寸喷嘴孔内空化现象不可避免地存在一定程度的差异^[17-18,21]。

本文采用放大尺寸喷嘴进行可视化试验,图 2 为试验所采用的单孔透明喷嘴结构及尺寸示意图,该喷嘴由上部压力室(不锈钢材质)及下部透明喷孔(聚甲基丙烯酸甲酯材质)组合而成,喷孔尺寸经过放大处理,以便于观察喷嘴孔内发生的空化现象,压力室直径为 32 mm、喷孔长度为 16 mm、喷孔直径为 3.8 mm。

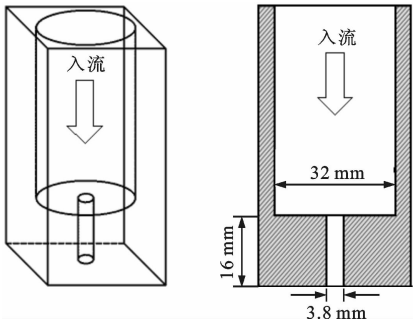


图 2 试验用喷嘴示意图

1.2 试验方案

试验采用的乙醇和正丁醇均为分析纯等级,体积分数分别为 99.9% 和 99.7%,柴油为 0#。表 1 分别列出了乙醇、正丁醇和柴油在试验温度(10℃)下的主要物性参数,其中饱和蒸气压由安托尼方程计算得到^[22]。

表 1 乙醇、正丁醇和柴油的物性参数

燃料	密度 /g·cm ⁻³	运动黏度 /mm ² ·s ⁻¹	表面张力 /N·s ⁻¹	饱和蒸气 压/kPa
乙醇	0.79	1.36	0.021 5	3.13
正丁醇	0.81	3.64	0.025 5	0.25
柴油	0.83	4.55	0.027 5	6.87

由表 1 可以看到,乙醇、正丁醇的密度及运动黏度均小于柴油,这会使乙醇-柴油混合燃料的密度和运动黏度低于纯柴油。乙醇分子中的含氧化学键羟基(—OH)的不亲油特性使其难以大量溶于柴油,需要添加合适的助溶剂(正丁醇)以得到完全互溶的乙醇-柴油混合燃料。试验采用了 3 种不同乙醇配比的燃料 E₀D₁₀₀N₀、E₅D₉₀N₅ 和 E₁₀D₈₅N₅,其中 E₀D₁₀₀N₀ 为柴油。将配置好的混合燃料 E₅D₉₀N₅

和 E₁₀D₈₅N₅ 静置 28 d 后,未出现分层现象,也没有发现凝结物质,说明取体积分数为 5% 的正丁醇作助溶剂可使乙醇与柴油良好互溶,形成均一稳定的混合燃料。

表 2 给出了试验中用到的混合燃料的物性参数,其密度、黏度及表面张力的计算公式分别为^[23]

$$\rho_m = \alpha_E \rho_E + \alpha_D \rho_D + \alpha_N \rho_N \tag{1}$$

$$\nu_m = \frac{\mu_m}{\rho_m} = \frac{\alpha_E \mu_E + \alpha_D \mu_D + \alpha_N \mu_N}{\rho_m} \tag{2}$$

$$\Sigma_m = \alpha_E \Sigma_E + \alpha_D \Sigma_D + \alpha_N \Sigma_N \tag{3}$$

式中: ρ_m 、 μ_m 、 ν_m 和 Σ_m 分别表示混合燃料的密度、动力黏度、运动黏度和表面张力; α_E 、 α_D 、 α_N 分别为乙醇、柴油、正丁醇的体积分数; ρ_E 、 ρ_D 、 ρ_N 分别为乙醇、柴油、正丁醇的密度; μ_E 、 μ_D 、 μ_N 分别为乙醇、柴油、正丁醇的动力黏度; Σ_E 、 Σ_D 、 Σ_N 分别为乙醇、柴油、正丁醇的表面张力。

表 2 混合燃料的物性参数

燃料	密度 /g·cm ⁻³	运动黏度 /mm ² ·s ⁻¹	表面张力 /N·s ⁻¹
E ₀ D ₁₀₀ N ₀	0.830	4.55	0.027 5
E ₅ D ₉₀ N ₅	0.827	4.35	0.027 1
E ₁₀ D ₈₅ N ₅	0.825	4.19	0.026 8

2 试验结果与分析

描述燃料在喷孔内部流动特性和空化特性的评价指标有雷诺数 Re 、空化数 σ 、空化特征长度 L_{CAV^*} 和流量系数 C_d ,下面采用这 4 个指标来评价和比较 E₀D₁₀₀N₀、E₅D₉₀N₅、E₁₀D₈₅N₅ 中乙醇含量对孔内空化现象的影响,计算公式如下

$$Re = \frac{Vd}{\nu_m} \tag{4}$$

$$\sigma = \frac{p_{in} - p_{sat}}{p_{in} - p_{out}} \tag{5}$$

$$L_{CAV^*} = \frac{L_{CAV}}{L_{hole}} \tag{6}$$

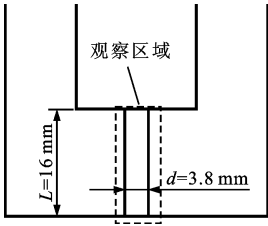
$$C_d = \frac{\dot{m}_{eff}}{A[2\rho_m(p_{in} - p_{out})]^{1/2}} \tag{7}$$

式中: V 为喷孔出口平均流速; d 为喷孔直径; ν_m 为液态工质运动黏度; $\dot{m}_{eff}$ 为瞬时质量流量; A 为喷孔截面积; σ 为空化数; p_{in} 为喷射压力; p_{out} 为背压; p_{sat} 为饱和蒸气压; L_{CAV^*} 为空化特征长度; L_{CAV} 为空化区域长度; L_{hole} 为喷孔长度。

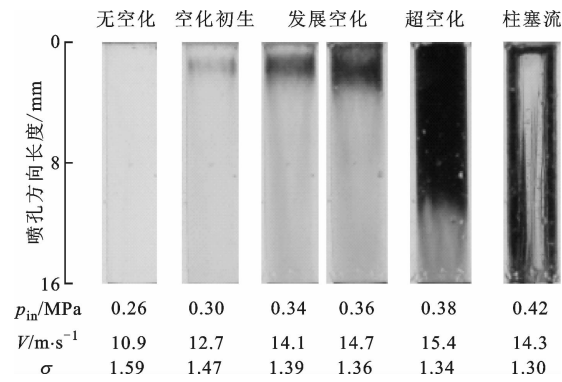
2.1 乙醇含量对空化发展过程的影响分析

用准备好的 E₀D₁₀₀N₀、E₅D₉₀N₅、E₁₀D₈₅N₅ 作为

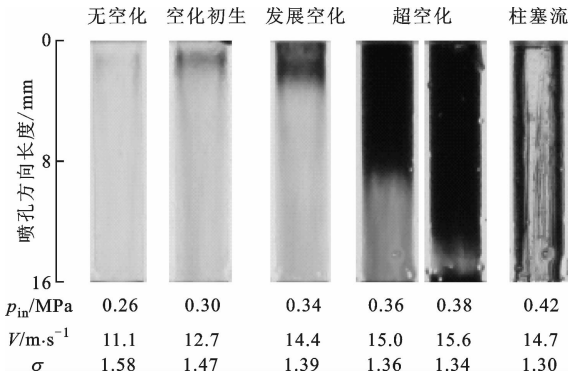
流动介质,通过改变喷射压力开展空化特性试验,试验图片截取的位置如图 3a 所示,获得的喷孔内空化发展情况如图 3b~3d 所示。可以看到,随着喷射压力的提高和空化数的减少,3 种不同乙醇含量的混



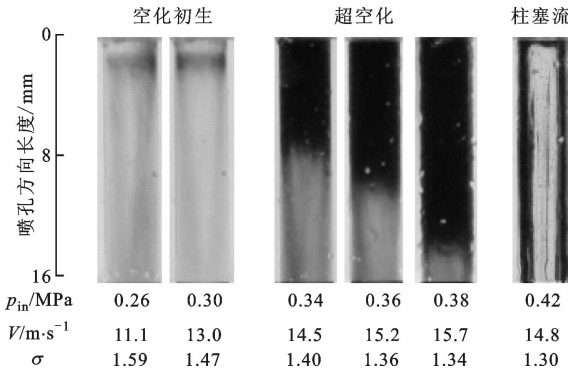
(a)空化现象观察域



(b) $E_0D_{100}N_0$ 试验结果



(c) $E_5D_{90}N_5$ 试验结果



(d) $E_{10}D_{85}N_5$ 试验结果

图 3 喷孔内空化试验结果

合燃料在喷孔内的空化现象均随之加强,对应的燃料平均流速也逐渐增加。对于不含乙醇的柴油燃料 $E_0D_{100}N_0$,当喷射压力在 0.26 MPa 时,喷孔内无空化发生,当喷射压力增加至 0.30 MPa 时,孔内开始观察到空化现象,称之为空化初生。当喷射压力上升至 0.34 和 0.36 MPa 时,空化区域逐渐变暗并向出口方向蔓延,但尚未超过喷孔长度的 1/2 ($L_{CAV^*} < 0.5$),称之为发展空化,其中空化区域暗度逐渐加深是由于空化层随喷射压力的增加而变厚,使得 LED 射光的穿透率降低所致。当喷射压力达到 0.38 MPa 时,喷孔内空化区域长度呈现阶跃式增长,此时空化区域长度超过喷孔长度的 1/2,但未到达喷孔的出口 ($0.5 \leq L_{CAV^*} < 1$),称之为超空化。混合燃料 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 在喷射压力分别为 0.30 和 0.26 MPa 时,喷孔内开始出现初生状态的空化现象,其中 $E_{10}D_{85}N_5$ 空化初生对应的喷射压力更低。混合燃料 $E_5D_{90}N_5$ 在喷射压力为 0.34 MPa 时,喷孔内出现发展空化,在喷射压力增加至 0.36 MPa 时,喷孔内出现超空化现象。相比 $E_0D_{100}N_0$ 和 $E_5D_{90}N_5$,在乙醇体积分数为 10% 的混合燃料 $E_{10}D_{85}N_5$ 中,出现超空化对应的喷射压力最小,仅为 0.34 MPa。当喷射压力升高至 0.42 MPa 时,3 种试验燃料在喷孔内同时发展为柱塞流 ($L_{CAV^*} = 1$)。

不同燃料在空化各阶段对应的孔内平均流速也在图 3 中列出,空化从初生状态至超空化的变化过程中喷孔内燃料的平均流速与喷射压力呈正相关。 $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 、 $E_{10}D_{85}N_5$ 在刚出现超空化时对应的孔内平均流速分别为 15.4、15.0 和 14.5 m/s,即首次出现超空化现象时燃料的平均流速随着乙醇含量的增加而减小。当空化进入柱塞流时,喷孔内平均流速会突然降低,这是因为发生柱塞流时,喷孔下游的背压气体(空气)倒吸入喷孔内部,在液相燃油与壁面之间出现完整的空泡层,使燃料实际流通截面减小,从而导致了孔内平均流速的下降。当 3 种混合燃料处于同一喷射压力时,对应的燃料平均流速随乙醇含量的增加依次递增,如在柱塞流时三者的孔内平均流速分别为 14.3、14.7、14.8 m/s,这是因为乙醇含量的增加降低了燃料的黏度,流动过程中受到的流动阻力较小,从而使流动速度提高。

图 4 为 3 种燃料在空化各阶段对应的喷射压力范围,可以看到,随着乙醇体积分数的增加, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 进入超空化阶段对应的喷射压力依次减小,分别为 0.38、0.36 和 0.34 MPa,喷孔内空化发展期对应的压力范围逐渐缩短,超空化

期对应的压力范围有所延长;在试验喷射压力范围(0.26~0.42 MPa)内, $E_{10}D_{85}N_5$ 中只出现了空化初生和超空化两种空化现象,未观察到发展空化,空化初生现象出现后,喷孔内就基本保持原有的状态,空化区域向喷孔出口方向蔓延缓慢,直至喷射压力增加至 0.34 MPa 时,直接进入超空化阶段。

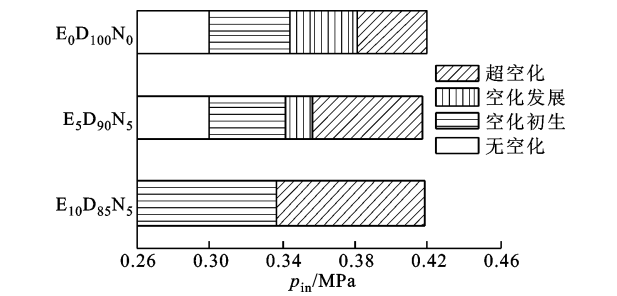


图 4 空化现象与喷射压力的关系

图 5 所示为各燃料空化特征长度随喷射压力的变化曲线,可以看到, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 对应的空化特征长度随喷射压力提高,呈先缓慢增大后急剧增大的变化趋势,而 $E_{10}D_{85}N_5$ 由于未观察到发展阶段的空化现象,因此其空化特征长度随喷射压力提高,呈先保持不变后急剧增大的变化趋势。3 种燃料的空化特征长度均存在一个阶跃式突增过程,该突增时刻随乙醇含量增加而提前,且空化特征长度突增时刻均为各燃料对应的超空化时刻。

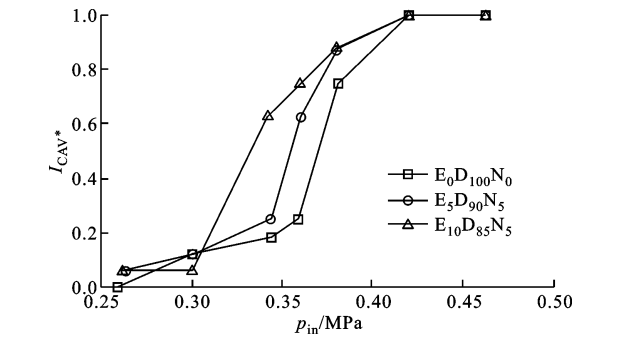
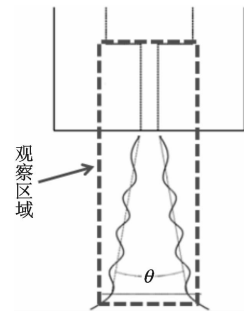
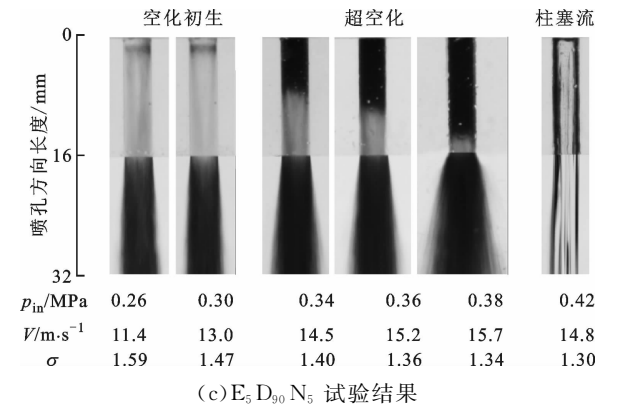
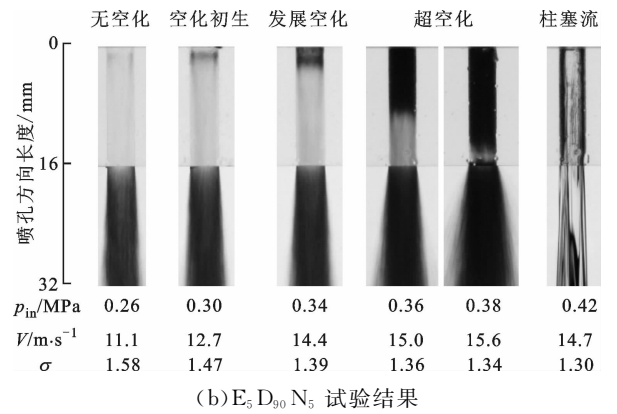
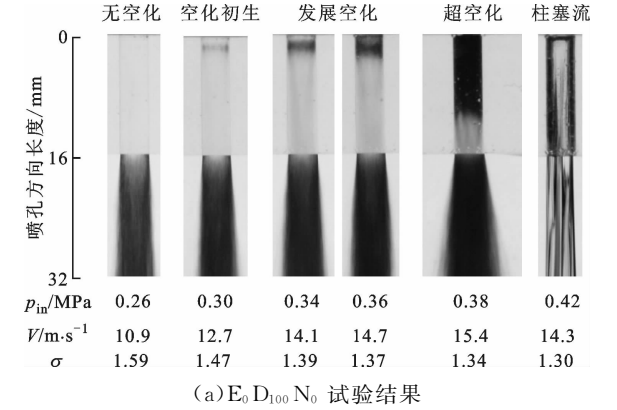


图 5 空化特征长度随喷射压力的变化

2.2 乙醇含量对近场喷雾锥角的影响分析

图 6a~6c 为 3 种燃料在不同喷射压力下近场喷雾的可视化试验图像,其试验图像截取区域及近场喷雾锥角 θ 的测量方法如图 6d 所示,在距喷孔出口 16 mm 处画一条水平线,近场喷雾与这条水平线存在两个交点,分别连接这两个交点与喷孔出口边缘点,得到两条近似表征近场喷雾的直线,这两条直线的夹角即为所采用的近场喷雾锥角^[24](后文简称为喷雾锥角)。



(d) 近场喷雾锥角的定义
图 6 近场喷雾试验结果

由图 6a~6c 可以看到,喷雾锥角受喷孔内空化现象强度的影响十分明显,在无空化阶段至空化发

展阶段,喷雾锥角随空化现象强度增加缓慢增大,当孔内流态进入超空化阶段,即空化特征长度接近 1 时,喷雾突然大幅度向外扩张,喷雾锥角达到最大值,在柱塞流出现后喷雾锥角又突降至近乎于 0°。

无空化至空化发展阶段,喷雾锥角随空化现象加剧而缓慢增大是由于空化现象产生的微小气泡群会在破碎时对射流产生初始扰动,空化现象强度越高,初始扰动越剧烈,喷雾锥角也就随之增大;超空化阶段空化现象产生的微小气泡群在喷孔出口附近破碎,对射流产生初始扰动达到峰值,喷雾锥角随之达到最大值;在柱塞流阶段,背压气体(空气)回流,在孔壁上形成一层无阻力的空泡流,使射流几乎不受任何初始扰动,因此喷雾锥角随之骤降。

图 7 所示为 3 种燃料对应的近场喷雾锥角随喷射压力的变化曲线。在喷射压力达到 0.30 MPa 之前, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 的喷雾锥角相差不大,说明在低喷射压力下,喷雾锥角受燃料中乙醇体积分数的影响并不显著。当喷射压力继续升高时,可以明显地观察到 3 条喷雾锥角曲线先后发生阶跃式突增,且 $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 和 $E_{10}D_{85}N_5$ 的喷雾锥角突增对应的喷射压力随乙醇含量的增加而降低(依次为 0.38、0.36 和 0.34 MPa)。喷射压力为 0.38 MPa(柱塞流发生的前一喷射压力)时, $E_0D_{100}N_0$ 、 $E_5D_{90}N_5$ 、 $E_{10}D_{85}N_5$ 对应的喷雾锥角均达到最大值,分别为 13.4°、22.4°和 26.2°。这是因为随着燃料中乙醇含量的增加各燃料在喷孔内的空化区域长度依次变长,空化现象产生的微小气泡群更多地在喷孔出口附近破碎,从而对射流产生更强的初始扰动,喷雾锥角的最大值随之依次增加。在柱塞流阶段,燃料中乙醇含量的多少不再影响射流的喷雾锥角大小,3 种燃料的喷雾锥角都接近 0°。燃料最大喷雾锥角的增长趋势随着乙醇含量的增加有所减小,从各曲线对应的喷雾锥角峰值可以看出,

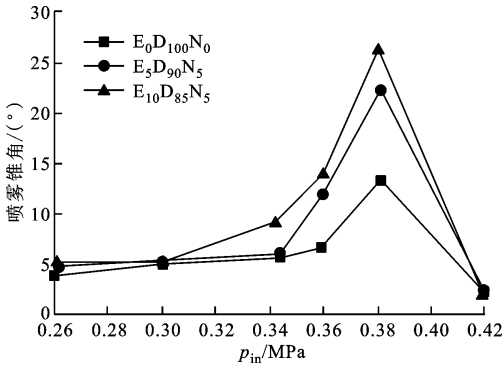


图 7 近场喷雾锥角变化曲线

$E_5D_{90}N_5$ 的喷雾锥角峰值较之 $E_0D_{100}N_0$ 增长了 67.2%,而 $E_{10}D_{85}N_5$ 的喷雾锥角峰值相对于 $E_5D_{90}N_5$ 的增长幅度大大减小,只增长了 17%。

2.3 乙醇含量对孔内流动特性的影响分析

图 8 为 3 种试验燃料对应的流量系数随喷射压力增长的变化曲线,可以看到,当喷射压力从 0.26 MPa 升高至 0.38 MPa 时,流量系数随着喷射压力的增加而缓慢增大。当柱塞流出现,即喷射压力为 0.42 MPa 时,喷孔内的流量系数骤降,并且在这之后随着喷射压力的增加继续缓慢下降。这是由于在低喷射压力时,喷孔内燃料流动速度低,易受到喷嘴结构上局部阻力的影响,在流动过程中产生较大的能量损失,随着喷射压力的增加这种局部损失对流量系数造成的影响逐渐减小,故而流量系数随喷射压力增加缓慢上升,而流量系数之后的突降主要是因为柱塞流阶段工质实际流通截面减小,导致油路中燃料的质量流量降低所致。

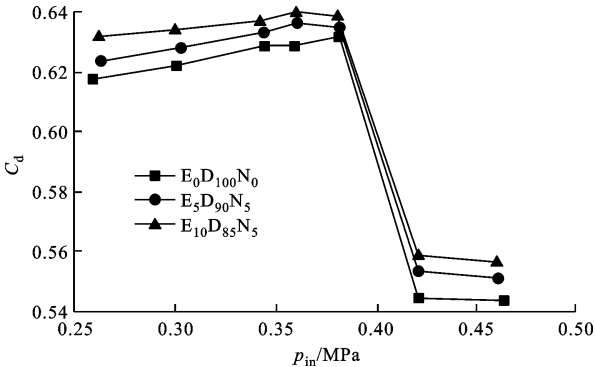


图 8 喷射压力与流量系数的关系

图 9 所示为雷诺数随喷射压力增加的变化曲线,在喷射压力不超过 0.38 MPa 时,雷诺数随着喷射压力提高而增大,当喷射压力提高至喷孔内出现柱塞流(0.42 MPa)时,雷诺数会突然下降,根据式(4)雷诺数的计算公式可知,这是由于柱塞流阶段孔内平均流速减小所致。在相同喷射压力下,高乙醇

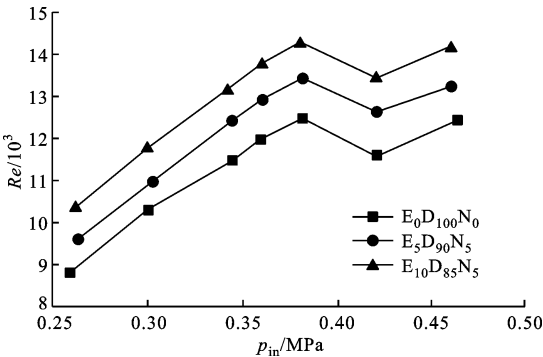


图 9 不同燃料的喷射压力与雷诺数的关系

配比混合燃料的雷诺数明显高于低乙醇配比混合燃料,出现这种情况的原因是乙醇含量的增加会导致混合燃料黏度降低及喷孔内平均流速增大。

图10所示为空化数和雷诺数对不同乙醇含量混合燃料空化特性的影响,图中做了两条辅助线用以辅助分析,分别为 $Re=12\ 200$ 和 $\sigma=1.36$ 。可以看到,在试验数据覆盖范围内,当 $\sigma=1.36$ 时,喷孔内空化现象的强度随雷诺数变化幅度较小,只历经了空化发展和超空化2个阶段;当 $Re=12\ 200$ 时,随着空化数的变化,喷孔内空化现象的强度随空化数变化幅度较大,历经空化初生、发展空化、超空化及柱塞流等4个阶段,且空化数越小,喷孔内空化现象越剧烈。有理由相信,在试验数据点覆盖范围更广时,乙醇-柴油混合燃料的喷孔内空化现象强度受空化数影响大于受雷诺数影响这一特征会更加明显。

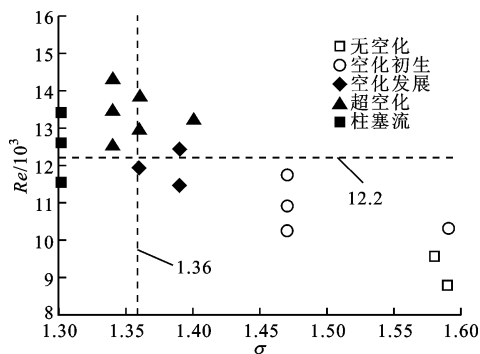


图10 空化数与雷诺数对不同燃料喷孔内空化特性的影响

3 结 论

采用放大尺寸单孔透明喷嘴对乙醇体积分数分别为0%、5%和10%的3种乙醇-柴油混合燃料在喷孔内空化现象及近场喷雾特性进行可视化试验研究,结论如下。

(1)由于理化特性的差异,乙醇和柴油互溶性差,易分层,需要添加合适的助溶剂以保证混合燃料的稳定性;室温(10℃)条件下,当乙醇的体积分数不超过10%时,添加体积分数5%的正丁醇可以使乙醇和柴油完全互溶。

(2)随着燃料中乙醇体积分数的增加, $E_0 D_{100} N_0$ 、 $E_5 D_{90} N_5$ 和 $E_{10} D_{85} N_5$ 在空化初生时对应的喷射压力(分别为0.30、0.30、0.26 MPa)及在出现超空化现象时对应的喷射压力(分别为0.38、0.36、0.34 MPa)呈减小趋势,空化发展期相应缩短,超空化期有所延长。

(3)近场喷雾锥角受喷孔内空化强度的影响十分显著,随着空化从初生阶段过渡到空化发展阶段,近场喷雾锥角逐渐增大,在进入超空化阶段时,近场喷雾锥角达到峰值,当喷孔中出现柱塞流时近场喷雾锥角接近0°;随着燃料中乙醇含量的增加, $E_0 D_{100} N_0$ 、 $E_5 D_{90} N_5$ 和 $E_{10} D_{85} N_5$ 对应的近场喷雾锥角峰值依次增加(分别为13.4°、22.4°、26.2°)。

(4)在同一喷射压力下, $E_0 D_{100} N_0$ 、 $E_5 D_{90} N_5$ 和 $E_{10} D_{85} N_5$ 对应的流量系数依次增加,且均随喷射压力提高呈先缓慢增加后急剧下降的变化趋势。

(5)不同乙醇含量的混合燃料在喷孔内是否发生空化现象以及发生空化现象的强度受空化数影响大于受雷诺数影响。

参考文献:

- [1] 邱兆文,李亚林,邓艳宁.乙醇-柴油车辆排放对空气质量影响分析[J].环境工程,2014,32(9):88-91.
QIU Zhaowen, LI Yalin, DENG Yanning. Impact analysis of ethanol diesel vehicle emission on air quality [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(9): 88-91.
- [2] 张福根.生物质含氧燃料对柴油机能、燃烧过程和排放特性影响的试验研究[D].南宁:广西大学,2005:20-23.
- [3] HE X, MA X, QI Y L, et al. Investigation on the soot character of ethanol-diesel blended fuels by visualization method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(12): 2141-2144.
- [4] ZHANG R, HE H, ZHANG C, et al. Preparation of ethanol-diesel fuel blends and exhausts emission characteristics in diesel engine [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(4): 1-6.
- [5] 郭齐敏,孙平,梅德清,等.助溶剂对乙醇-柴油燃烧和排放特性的影响[J].汽车工程学报,2012,2(5):327-333.
WU Qimin, SUN Ping, MEI Deqing, et al. Effects of co-solvents on combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(5): 327-333.
- [6] CHEN Z B, NI J M, YE N Y, et al. Fuel economy and emissions of ethanol-diesel blends with different proportions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 164-169.
- [7] HU P, SUN P, JI Q, et al. Sensitivity of particulates from diesel engine fueled with ethanol-diesel blends to the cosolvent [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 30(5):

- 861-866.
- [8] YU S, LI L G, ZHENG M, et al. Ethanol/diesel dual fuel combustion for ultra low NO_x and soot emissions in a diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(5): 393-399.
- [9] SOU A, PRATAMA R H, KIBAYASHI Y. String cavitation in fuel injector nozzle [C/OL] // European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. [2017-03-15]. http://www.researchgate.net/publication/26756903_String_Cavitation_in_Fuel_Injector.
- [10] SOU A, MAULANA M I, HOSOKAWA S, et al. Ligament formation induced by cavitation in a cylindrical nozzle [J]. Journal of Fluid Science & Technology, 2008, 3(5): 633-644.
- [11] 李军, 刘立军, 丰镇平. 附着空化流动的模型和算法 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 253-256.
LI Jun, LIU Lijun, FENG Zhenping. Attached cavitation model and algorithms [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 253-256.
- [12] GAVAISES M, ARCOUMANIS C, ROTH H, et al. Effect of multi-injection strategy on cavitation development in diesel injector nozzle holes [J]. Sae International Journal of Engines, 2005, 114(3): 1029-1045.
- [13] 仇滔, 宋鑫, 雷艳, 等. 柴油机喷孔内空化过程与流动特性研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 359-365.
QIU Tao, SONG Xin, LEI Yan, et al. Cavitation process and flow characteristics inside diesel injector nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 359-365.
- [14] 麻斌, 高莹, 刘宇, 等. 相间滑移对喷油器喷孔内空化现象数值模拟研究的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 59-64.
MA Bin, GAO Ying, LIU Yu, et al. Effects of slip velocity on the modeling of cavitation phenomenon in injector nozzle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 59-64.
- [15] HE Z, HUANG Y, ZHONG W, et al. Flow in diesel nozzle holes based on initial cavitation [J]. Journal of Jiangsu University, 2011, 32(6): 672-677.
- [16] HE Z. Visualization experiment and numerical simulation for cavitating flow in a diesel injector nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 6-9.
- [17] ARCOUMANIS C, BADAMI M, GAVAISES M. Cavitation in real-size multi-hole diesel injector nozzles [J]. SAE Transactions, 2000, 109(3): 1485-1500.
- [18] REID B A, HARGRAVE G K, GARNER C P, et al. An investigation of string cavitation in a true-scale fuel injector flow geometry at high pressure [J]. Physics of Fluids, 2010, 22(3): 031703.
- [19] GAVAISES M. Flow in valve covered orifice nozzles with cylindrical and tapered holes and link to cavitation erosion and engine exhaust emissions [J]. International Journal of Engine Research, 2008, 9(6): 435-447.
- [20] MITROGLOU N, MCLORN M, GAVAISES M, et al. Instantaneous and ensemble average cavitation structures in Diesel micro-channel flow orifices [J]. Fuel, 2014, 116(1): 736-742.
- [21] ZHONG W, HE Z, WANG Q, et al. Experimental study of flow regime characteristics in diesel multi-hole nozzles with different structures and enlarged scales [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2014, 59: 1-10.
- [22] 马沛生. 化工热力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 362-375.
- [23] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [24] SOU A, HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(17): 3575-3582.

[本刊相关文献链接]

- 袁超, 洪伟, 苏岩, 等. 直喷汽油机起动过程多环芳烃排放的研究. 2017, 51(9): 54-62. [doi:10.7652/xjtuxb201709008]
- 马志豪, 贾义, 李智博, 等. 单滴燃料高压着火与燃烧特性的试验研究. 2017, 51(5): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201705014]
- 谢萌, 马志杰, 王全红, 等. 聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料发动机燃烧与排放的试验研究. 2017, 51(3): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201703006]
- 汪映, 黄智勇, 柯希春, 等. 液化石油气对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响. 2016, 50(5): 19-23. [doi:10.7652/xjtuxb201605003]
- 瞿磊, 王忠, 李瑞娜, 等. 甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究. 2016, 50(5): 81-86. [doi:10.7652/xjtuxb201605012]
- 陈朝阳, 耿莉敏, 巩静, 等. 掺氢对二甲醚预混层流燃烧特性的影响. 2014, 48(6): 122-126. [doi:10.7652/xjtuxb201406021]

(编辑 荆树蓉)