

基于激光多普勒技术测量研究二甲醚-柴油混合燃料喷雾速度和粒度分布规律

肖进*, 黄震, 乔信起

上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240

* E-mail: xiaojin@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2008-05-14; 接受日期: 2008-10-05

国家自然科学基金(批准号: 50806046)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2007CB210007)项目资助

摘要 利用激光多普勒技术, 对含 15% 和 30% 二甲醚的二甲醚-柴油混合燃料以及纯柴油的稳态喷雾的速度和粒径进行了测试, 得到了相应的速度矢量图、轴向和径向速度以及喷雾索特平均直径的轴向和径向分布的比较曲线。试验结果证实了二甲醚-柴油混合燃料射流存在气爆雾化作用, 且在喷孔附近, 混合燃料喷雾具有较大的径向速度, 在喷嘴远端, 径向速度值的大小和变化率均较纯柴油的喷雾小, 粒径分布范围随着增大, 而粒径分布趋于均匀, 在射流轴线上, 轴向速度的衰减趋势则大致相似。随着燃油内 DME 含量由 15% 增加到 30%, 喷雾锥角和射流出口速度均增加, 喷雾粒径则减小。

关键词

混合燃料
激光多普勒
喷雾

近年来我国汽车工业和汽车保有量迅速增长, 而我国石油储量、产量不多和车用液体燃料必须安全供应的形势下, 煤基醇醚燃料的替代成为我国必然的战略方向^[1]。二甲醚(DME)作为柴油机的理想代用燃料^[2~4], 得到了广泛的研究, 实验研究表明二甲醚(DME)能够实现柴油机高效、超低排放、柔和和无烟燃烧^[5~8]。而作为柴油的添加剂可显著改善柴油机碳烟排放, 而且对 NO_x 的排放没有不良影响^[9~14]。王贺武等人^[15]的研究表明, 添加 10% DME 燃料, 虽然其热值比纯柴油的热值低(为柴油的 96.7%), 但发动机燃用含 10% 二甲醚的柴油混合燃料时动力性功率并没有降低, 在低转速时动力性反而有所升高。DME 燃料对于中国未来能源战略的重要意义, 不仅仅在于它的资源优势 and 环保特性, 可以在保证我国能源安全的同时, 减少有害排放^[1]。

二甲醚在常温常压下是气态, 在 0.5 MPa 压力下保持液态, 二甲醚饱和蒸气压远高于柴油, 在柴油-二甲醚混合燃料喷射过程中, 易发生气爆雾化作用, 使燃料和空气混合质量提高, 有利于提高扩散燃烧速率, 缩短燃烧持续期, 从而降低碳烟的排放。为此, 本文利用激光相位多普勒技术对柴油-二甲醚混合燃料射流的速度特性和粒度特性进行测量, 并与柴油射流喷雾特性比较, 通过深入了解柴油-二甲醚混合燃料喷雾微观结构, 证实了柴油-二甲醚混合燃料射流喷雾存在气爆雾化作用, 为阐明柴油-二甲醚混合燃料的雾化机理提供了试验依据。

1 实验装置

实验装置包括燃油喷射系统和喷雾测试系统, 图 1 是整个系统的实验装置图。

引用格式: 肖进, 黄震, 乔信起. 基于激光多普勒技术测量研究二甲醚-柴油混合燃料喷雾速度和粒度分布规律. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(8): 1448—1456
Xiao J, Huang Z, Qiao X Q. An experimental study on the spray characteristics of diesel-dimethyl ether (DME) blended fuels by phase doppler anemometry. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(4): 928—936, doi: 10.1007/s11431-009-0085-5

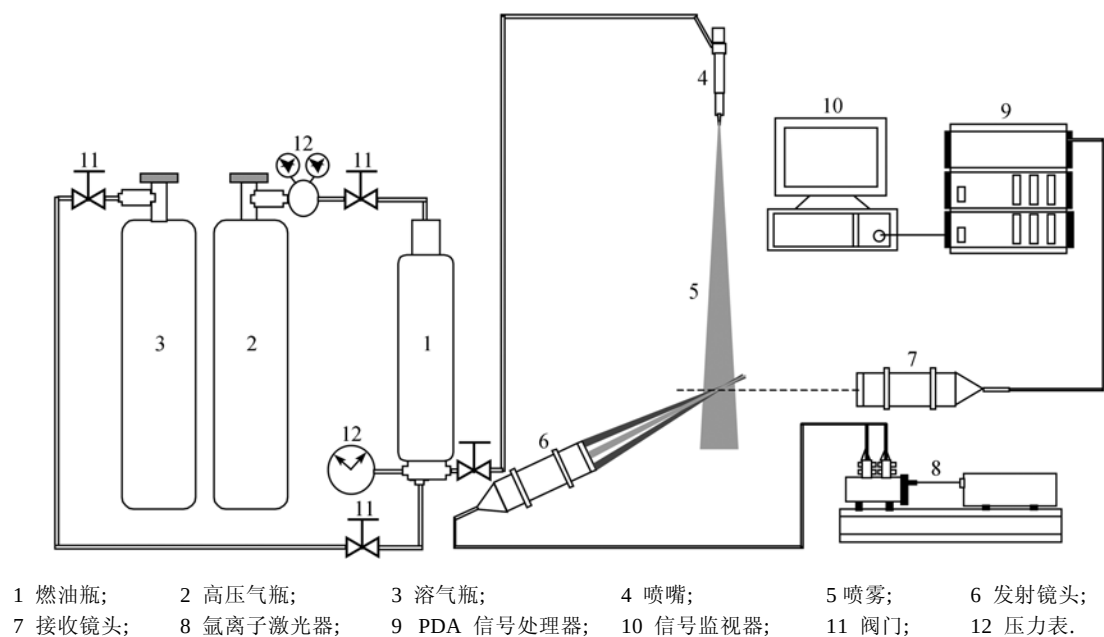


图 1 喷雾实验装置示意图

1.1 燃油喷射系统

燃油喷射系统包括燃油瓶 1、高压气瓶 2、溶气瓶(二氧化碳或二甲醚)3、阀门 11、压力表 12 和喷油器 4 组成, 喷油器为单孔喷嘴, 喷口直径为 0.19 mm. 二甲醚与柴油混合的制备, 则采用先将二甲醚气瓶加压使二甲醚液化, 再从燃油瓶底压入燃油瓶内的方法. 燃油混合制备完成后, 燃油瓶 1 内的燃油在高压空气瓶 2 内的高压空气的作用下, 以恒定的压力(工作压力), 通过喷油器 4 喷入常温常压的大气环境中, 形成稳态喷雾 5. 在实验过程中, 喷出的燃油喷雾扩散后会污染测试仪器的发射和接收镜头, 同时也给喷雾场的测量造成干扰, 因而采用喷雾收集和排除系统来清除喷出后的油雾. 燃料离开喷嘴后垂直向下喷射, 采用一不锈钢喷雾收集器接收油雾. 喷雾收集器底部通过一排风管与轴流风机相连, 将收集到的油雾粒子抽出测量现场.

1.2 喷雾测试系统

喷雾测试系统由 Dantec Dynamics 公司的粒子动态分析系统组成, 包括激光发射镜头 6, 接收镜头 7, 氦离子激光器 8, 信号处理系统 9 和监视器 10. 激光发射镜头和接收镜头则固定在全自动三维坐标系统上, 以保证光路系统的稳定. 实验过程中, 喷射系统

固定不变. 对选定的喷雾场测点进行测量时, 三维坐标系统通过微机自动控制的位移机构移动从而带动发射和接收镜头移动, 实现对不同测点的测量. 位移机构采用步进电机驱动, 步长为 0.01 mm, 从而保证测点的精确定位. 此外, 可通过信号监控系统来实时观察、控制当前测点位置.

图 2 为喷雾场测点布置的网格图, 在 X 方向从

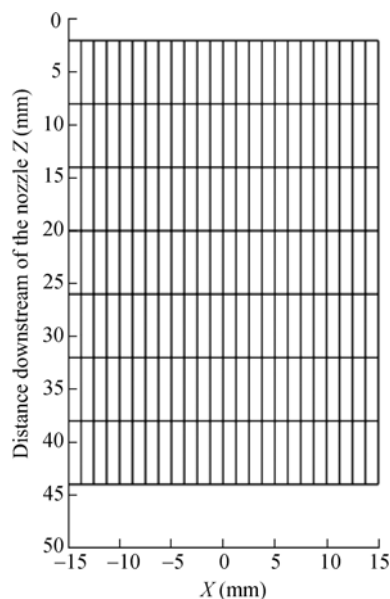


图 2 测点布置网格图

-15 mm 到+15 mm 的范围内每1.25 mm 布置一个测点, 在 Z 方向从 2 mm 至 44 mm 范围内每 6 mm 布置一个测点. 对每个测点, 有效采样点数 n 为 5000, 测量时间为 15 s. 只要满足其中一条, 采样即停止.

2 实验结果与分析

为了研究柴油内二甲醚含量对喷雾特性的影响, 实验测试了含 15% 和 30% 二甲醚的燃油以及纯柴油的稳态喷雾, 喷射压力均为 4 MPa.

喷雾使用的燃油涉及到柴油和二甲醚 2 种成分. 燃料的物性参数如密度、饱和和蒸气压力、粘性、表面张力等对射流雾化有重要的影响, 图 3 给出各成分物性参数的比较曲线, 其中柴油的物性由正十二烷的物性代替, 二甲醚为液态时的物性参数. 由图 3 可知, 在相同温度条件下, DME 较柴油有较高的饱和蒸气压力, 易气化, 因此二甲醚-柴油混合燃料在喷嘴内应是气泡流.

2.1 喷雾速度场分析

图 4 为实验测得的二甲醚-柴油混合燃料喷雾的速度矢量图, 其中图 4(a) 为纯柴油喷雾, 图 4(b) 为含有 15% 的 DME 和 85% 的柴油混合燃料喷雾, 图 4(c) 为含有 30% 的 DME 和 70% 的柴油的混合燃料喷雾. 由图 4 可知, 3 种燃料喷雾速度场均呈轴对称结构. 沿喷雾轴线方向, 喷雾场速度在环境阻力作用下逐渐减小. 在喷雾轴线垂直方向, 喷雾场速度呈喷雾轴线大、喷雾边缘小的单峰分布. 纯柴油喷雾为圆锥型, 含有 30% DME 的混合燃料喷雾呈抛物线型, 含有 15% DME 的混合燃料喷雾形状介于圆锥型与抛物线型之间. 纯柴油喷雾的喷雾锥角为 30° , 含有 15% DME 的混合燃料喷雾的喷雾锥角为 35° , 而含有 30% DME 的混合燃料喷雾的喷雾形状为抛物线型, 将该形状喷雾的喷雾锥角定义为 $\theta = 2\arctan(S/4)$, 其中 S 为距喷嘴 2 mm 处喷雾体的直径, 则喷雾锥角为 100° . 由于含有 15% DME 的混合燃料和含有 30% DME 的

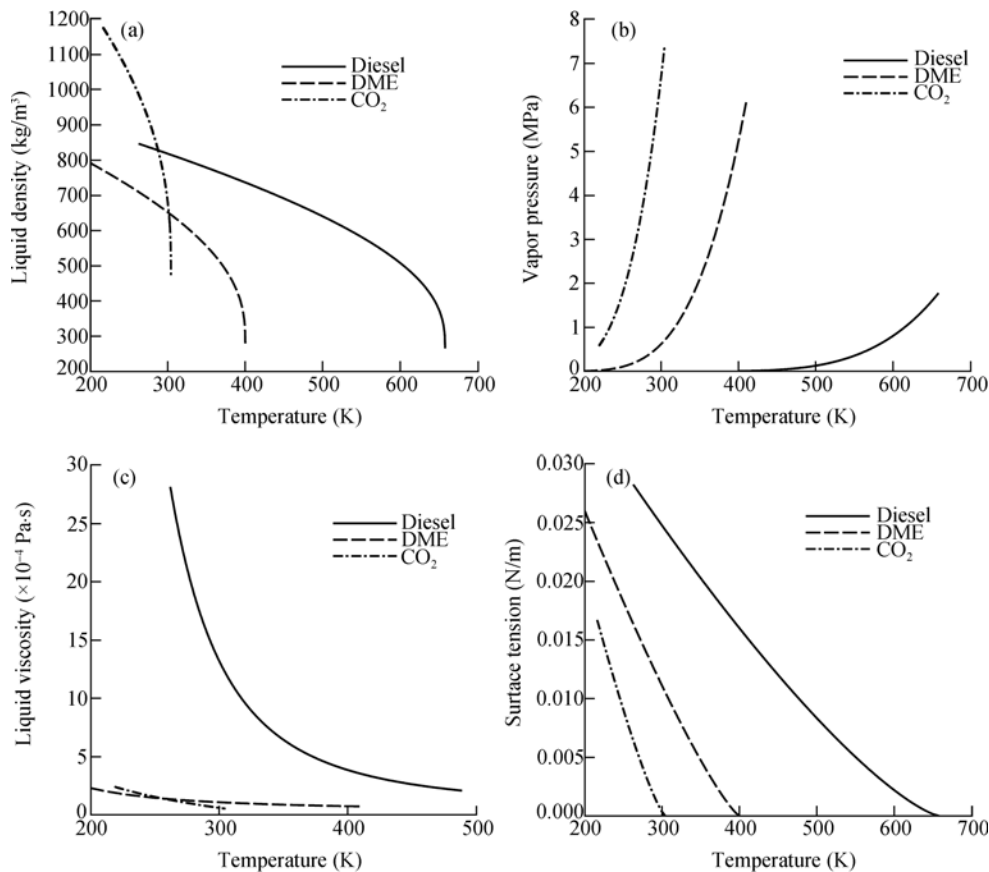


图 3 物性参数

(a) 密度; (b) 饱和和蒸气压力; (c) 粘性; (d) 表面张力

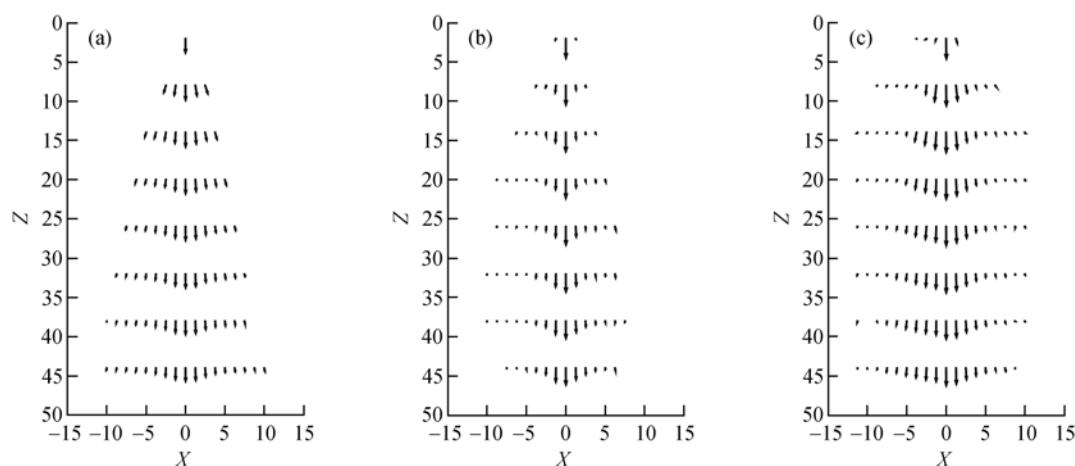


图 4 喷雾速度矢量图

(a) 纯柴油; (b) 15% DME+85%柴油; (c) 30% DME+70%柴油

混合燃料在喷嘴内的流型为环状空泡流, 因此可认为溶有 DME 的混合燃料的喷雾锥角增大是由于在喷嘴外 DME 在射流内表面迅速气化形成气泡并破碎, 使细小的液滴由射流表面脱落所致, DME 含量增加, 则射流内表面 DME 气泡的破碎强度增加, 雾化锥角增大。

图 5 为不同 DME 含量的混合燃料喷雾径向速度轴向分布的比较曲线。由图 5 可知, 喷雾的轴向速度在喷雾轴线上均最大, 且由喷雾轴线向喷雾边缘迅速衰减。随着距喷嘴轴向距离的增加, 喷雾的宽度也随着增加。喷雾的轴向速度从喷雾轴心沿径向向喷雾边缘的衰减幅度, 含有 15% DME 的混合燃料喷雾

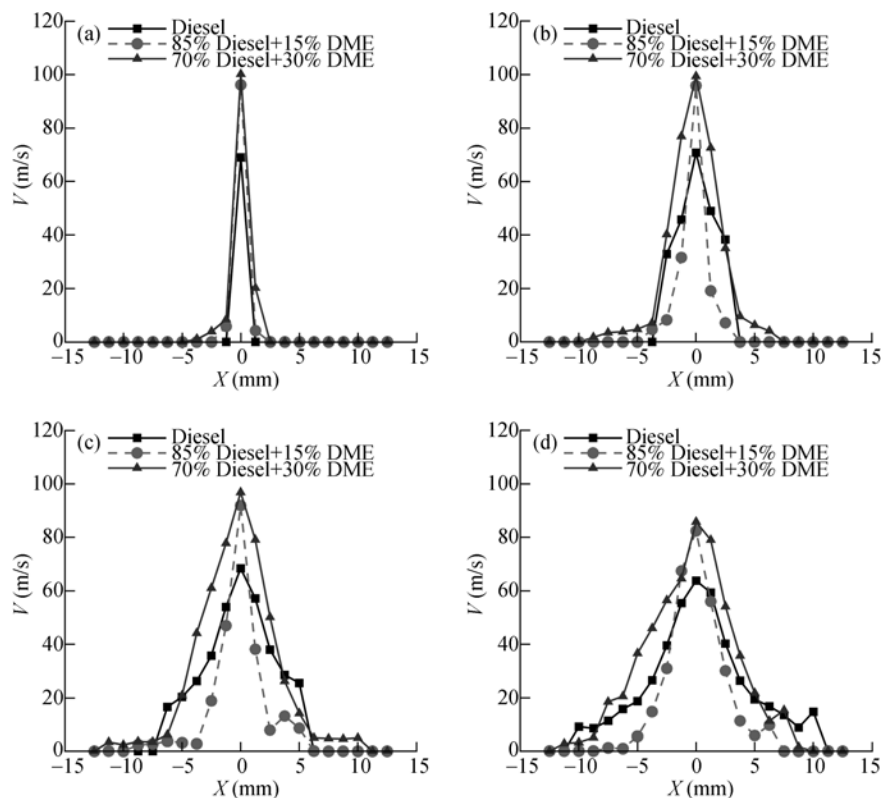


图 5 轴向速度径向分布的比较曲线

(a) $z = 2$ mm; (b) $z = 8$ mm; (c) $z = 20$ mm; (d) $z = 44$ mm

最大, 其次是含有 30% DME 的混合燃料喷雾, 纯柴油喷雾衰减最小. 值得注意的是, DME 含量为 15% 和 30% 的混合燃料喷雾边缘均存在速度较小且变化较平缓的区域.

图 6 为不同 DME 含量的混合燃料喷雾径向速度径向分布的比较曲线. 由图 6 可知, 在喷孔附近, 含有 DME 的混合燃料喷雾具有较大的径向速度, DME 含量越大, 径向速度也越大, 而纯柴油喷雾, 在喷孔附近径向速度很小. 随着距离喷嘴的轴向距离的增加, DME 气泡在射流表面的破碎对喷雾的径向速度影响逐渐减小, 作用在喷雾表面的气体扰动力成为影响喷雾径向速度的主要因素, 而分布在射流液核周围的小液滴则会削弱气体扰动力的作用, 同时喷雾锥角的增大, 使卷吸的空气也较多, 增加了喷雾体内的阻力, 从而使含有 DME 的混合燃料喷雾径向速度值的大小和变化率均较纯柴油的喷雾小.

图 7 为不同 DME 含量混合燃料喷雾轴向速度轴

向分布的比较曲线. 由图 7 可知, 在喷嘴出口附近喷雾的轴向速度随着 DME 含量的增加而增加. 在喷雾轴线上($x=0$), 不同 DME 含量的燃油喷雾的轴向速度由于空气阻力作用均呈递减趋势. 对于柴油以及 DME 含量为 15% 的混合燃料喷雾, 在与喷雾轴线平行的 $x=1.25\text{ mm}$, $x=2.5\text{ mm}$ 平行线上, 其轴向速度表现为递增趋势的分布规律, 但 DME 含量为 15% 的混合燃料轴向速度沿轴向分布在喷嘴附近递增幅度较大, 并有波动; 而在与喷雾轴线平行的 $x=5\text{ mm}$ 的平行线上, 轴向速度则基本保持不变. 对于 DME 含量为 30% 的混合燃料喷雾在与喷雾轴线平行的 $x=1.25\text{ mm}$, $x=2.5\text{ mm}$ 平行线上, 轴向速度分布则呈先增后减趋势; 而在与喷雾轴线平行的 $x=5\text{ mm}$ 的平行线上, 轴向速度呈递增趋势. 基于 DME 混合燃料的速度分布规律, 可推测, 在喷嘴内混合燃料的可能流型为环状流, 在喷嘴出口处发生气爆雾化作用, 但对射流雾化的改善主要在喷嘴外射流的表层, 对射流油束核心

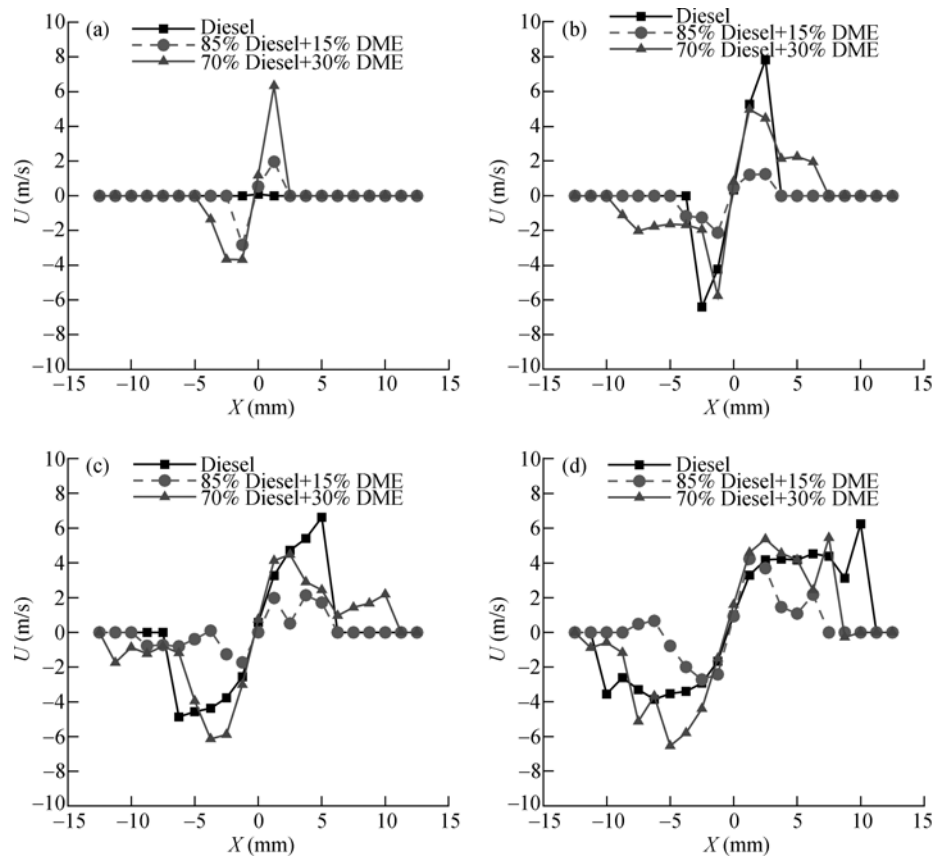


图 6 径向速度径向分布的比较曲线
(a) $z=2\text{ mm}$; (b) $z=8\text{ mm}$; (c) $z=20\text{ mm}$; (d) $z=44\text{ mm}$

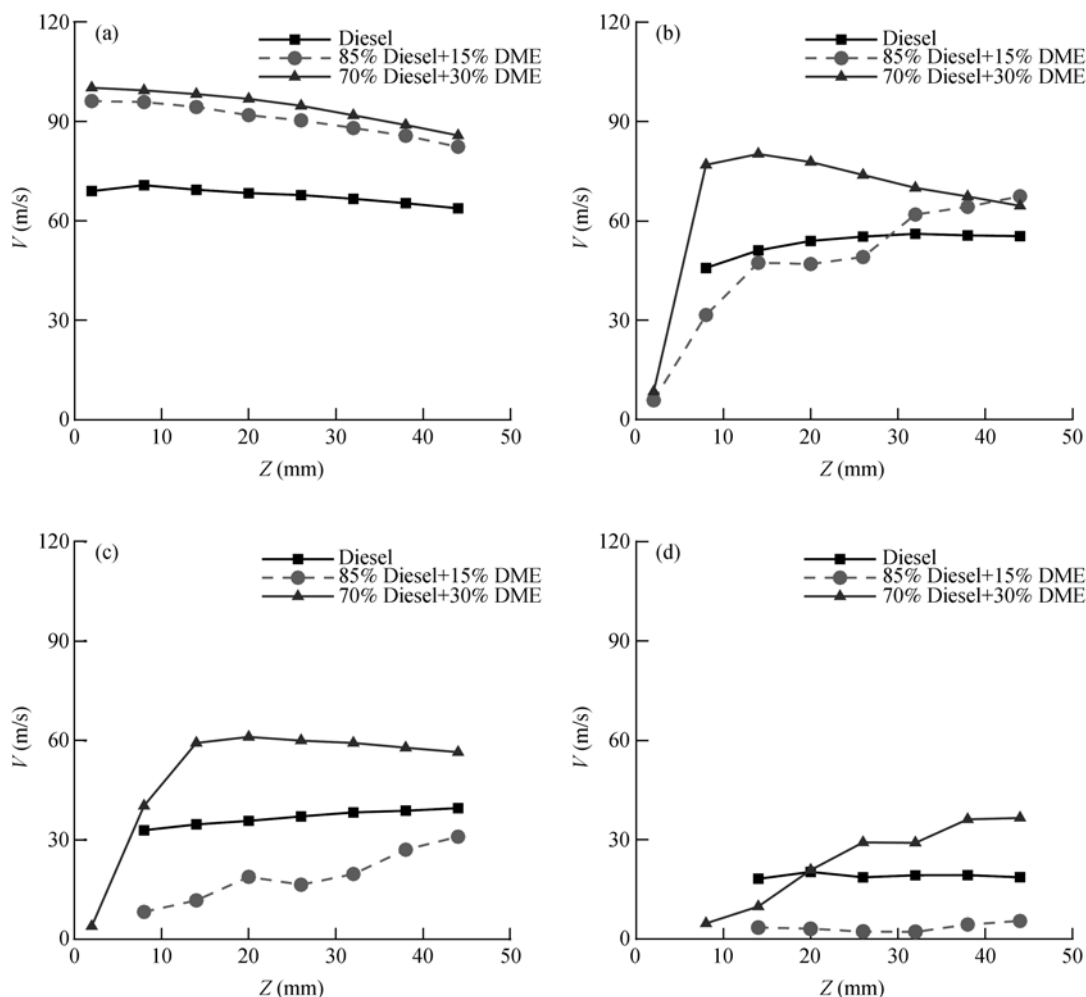


图 7 轴向速度轴向分布的比较曲线

(a) $x = 0$ mm; (b) $x = 1.25$ mm; (c) $x = 2.5$ mm; (d) $x = 5$ mm

速度影响较小,可能的喷雾结构如图 8 所示. 喷雾内部分为稠密喷雾区,过渡区和稀薄喷雾区,稠密喷雾区内,喷雾粒子速度的衰减主要受空气阻力的作用,而在过渡区和稀薄喷雾区的粒子速度的衰减除受空气阻力作用外,还因为在该区的粒子本身是由稠密区的粒子破碎或裂化得到的,在此过程中粒子能量的耗散较大,且靠近喷雾边缘,受喷雾卷吸的空气的扰动力的影响较大.

2.2 喷雾粒度场分析

图 9 为纯柴油喷雾和不同含量 DME 混合燃料喷雾索特平均直径轴向分布的比较曲线. 由图 9 可知,在 $x = 0$ mm 的喷雾轴线上喷雾的索特平均直径随着

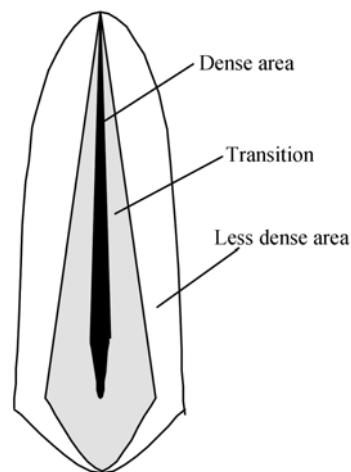


图 8 喷雾结构示意图

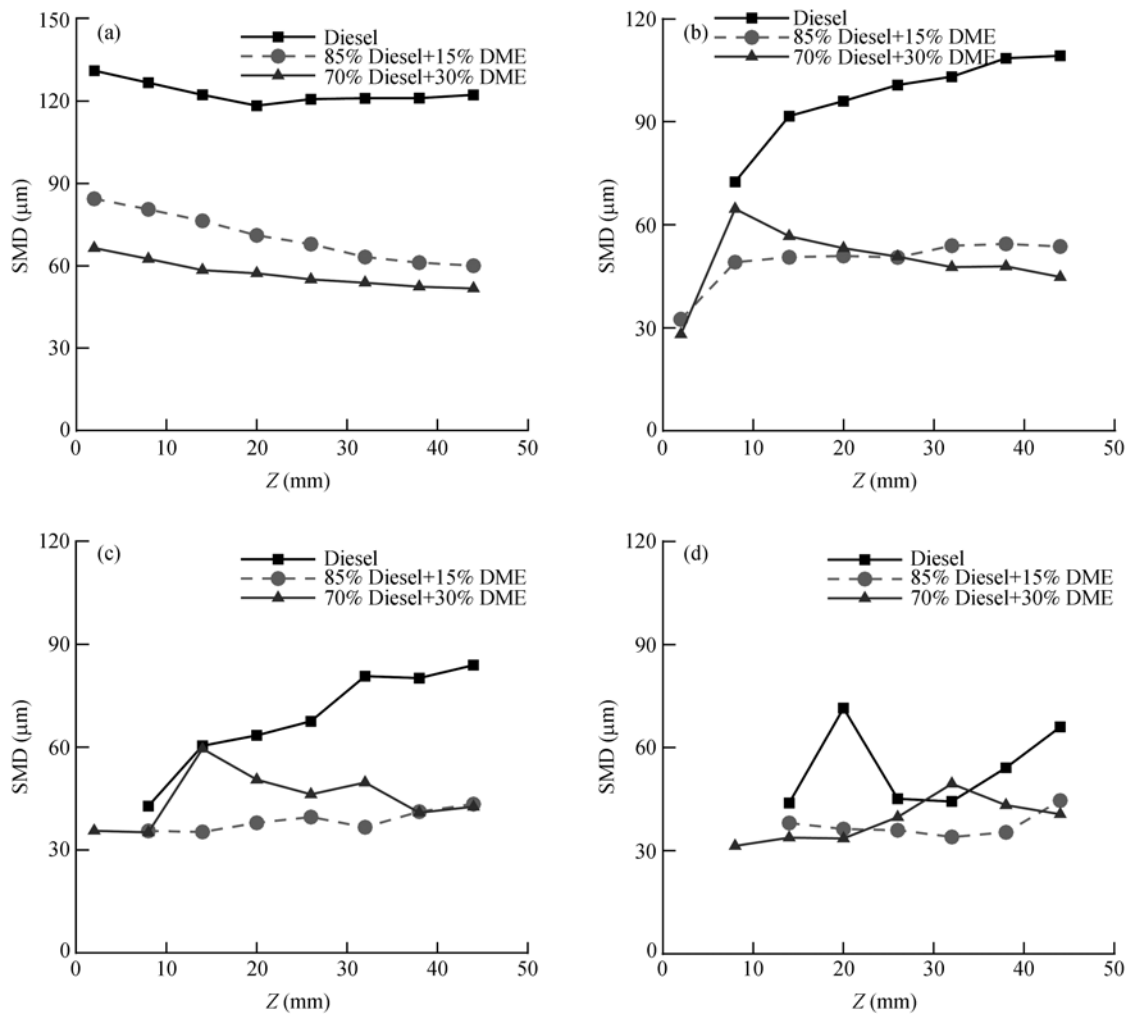


图9 喷雾索特平均直径轴向比较曲线

(a) $x = 0$ mm; (b) $x = 1.25$ mm; (c) $x = 2.5$ mm; (d) $x = 5$ mm

混合燃料内DME含量的增加而减小。纯柴油喷雾索特平均直径在离喷嘴不同的距离处均最大,含有30% DME的混合燃料喷雾索特平均直径在离喷嘴不同的距离处均最小。在 $x = 1.25$ mm的轴线上,对于含有30% DME的混合燃料喷雾,其粒径变化趋势为先增后减,且在 $z = 10$ mm后与喷雾中心线上的变化规律相似,这表明含有30% DME的混合燃料喷雾稠密核心区范围较大;对于纯柴油喷雾和含有15% DME的混合燃料喷雾,其粒径变化趋势为递增。随着径向距离的增加,在 $x = 2.5$ mm和 $x = 5$ mm的轴线上,含有30% DME的混合燃料喷雾的粒径表现为先增后减的变化趋势,但最高粒径点的位置向喷雾远端偏移,含有15% DME的混合燃料喷雾粒径较小(在40 μm左

右),其变化幅度较小,可见含有15% DME的混合燃料喷雾的稀薄区分布范围较大。而纯柴油喷雾在 $x = 2.5$ mm轴线上粒径呈递增趋势变化,在 $x = 5$ mm轴线上粒径变化出现较大波动。

图10为纯柴油喷雾和不同含量DME混合燃料喷雾索特平均直径径向分布的比较曲线。由图10可知,喷雾粒径沿径向呈单峰分布,即喷雾轴线上,粒径最大,且随着距轴线的径向距离的增大而减少。在喷嘴附近,纯柴油喷雾索特平均直径最大,分布范围最小,含有30% DME的混合燃料喷雾索特平均直径最小,分布范围最大,含有15% DME的混合燃料喷雾索特平均直径大小和分布范围介于二者之间。随着轴向距离的增加,喷雾范围逐渐增大,在 $z = 8$ mm和 $z =$

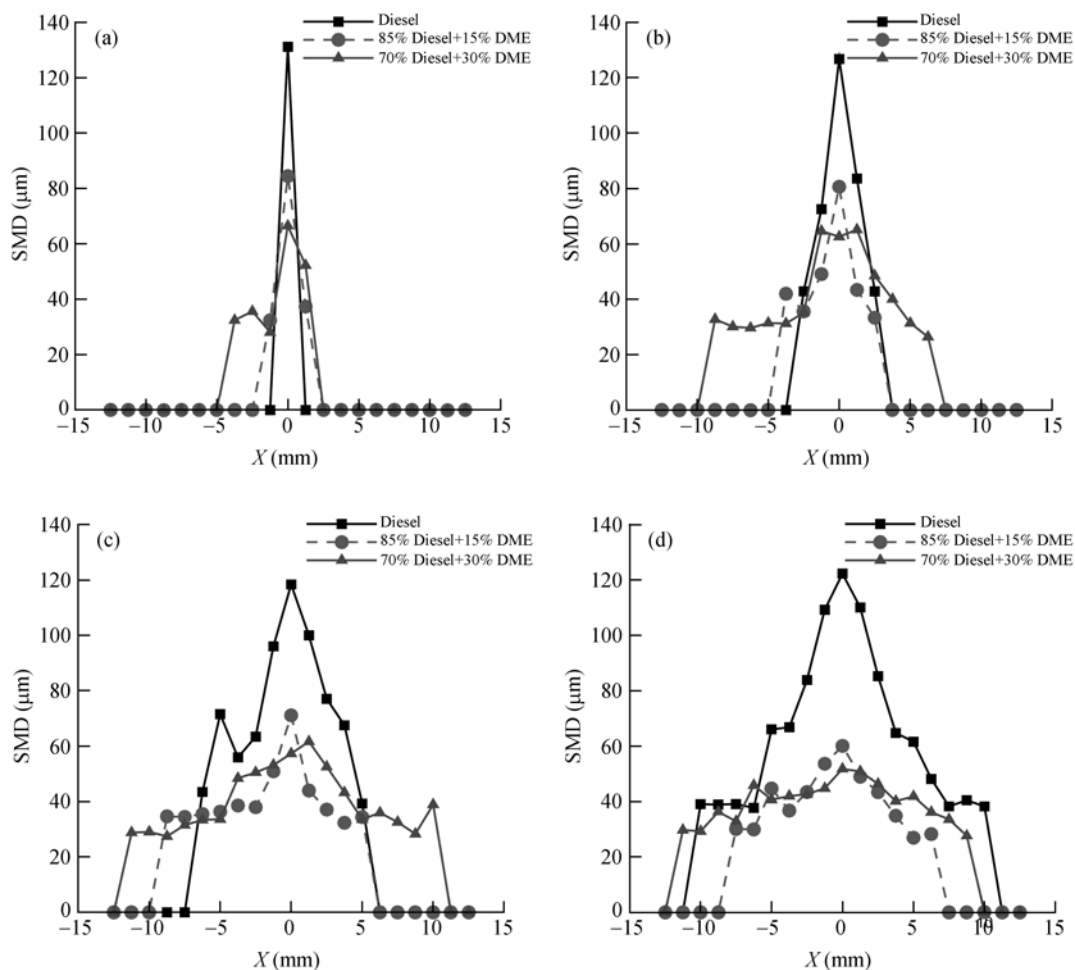


图 10 燃油喷雾索特平均直径径向分布的比较曲线

(a) $z = 2$ mm; (b) $z = 8$ mm; (c) $z = 20$ mm; (d) $z = 44$ mm

20 mm 处, 含有 DME 的混合燃料喷雾呈现出在喷雾稀薄区域粒径变化趋势较平缓, 而喷雾核心区粒径变化幅度较大的特点, 这种特点对于含有 30% DME 的混合燃料喷雾在 $z = 8$ mm 处表现得较明显, 此后随着轴向距离的增加, 径向分布粒径变化趋于平缓; 而对于含有 15% DME 的混合燃料喷雾则在 $z = 20$ mm 处较明显, 这也表明含有 30% DME 的混合燃料喷雾分裂长度较含有 15% DME 的混合燃料喷雾短。

3 结论

本文采用 DANTEC/INVENT 测量技术公司生产的粒子动态分析仪——双相位多普勒测速仪, 对柴油-二甲醚混合燃料喷雾的速度和粒度特性进行了测量, 根据实验结果可以得到如下结论。

柴油-二甲醚混合燃料射流, 在喷孔附近, 喷雾

具有较大的径向速度, 表明存在气爆雾化作用; 在喷嘴远端, 径向速度值的大小和变化率均较纯柴油的喷雾小, 在射流轴线上, 轴向速度的衰减趋势则大致相似。随着燃油内 DME 含量由 15% 增加到 30%, 喷雾锥角和射流出口速度均增加。

因为在相同温度条件下, 二甲醚的饱和蒸气压力远大于柴油的饱和蒸气压力, 柴油-二甲醚混合燃料在喷嘴内的可能流型为环状流, 气爆雾化作用对射流雾化的改善主要在喷嘴外射流的表层, 含有 DME 的混合燃料射流的稠密区和过渡区较小而稀薄区分布较广。喷雾的轴向速度从喷雾轴心沿径向向喷雾边缘的衰减幅度, 含有 15% DME 的混合燃料喷雾最大, 其次是含有 30% DME 的混合燃料喷雾, 纯柴油喷雾衰减最小。DME 含量为 15% 和 30% 的混合燃

料喷雾边缘均存在速度较小且变化较平缓的区域。

在喷雾轴线上, 喷雾的索特平均直径随着混合燃料内 DME 含量的增加而减小; 喷雾粒径沿径向均呈单峰分布, 即喷雾轴线上, 粒径最大, 且随着距轴

线的径向距离的增大而减少; 含有 DME 的混合燃料喷雾在喷雾稀薄区域粒径变化趋势较平缓, 而喷雾核心区粒径变化幅度较大, 含有 30% DME 的混合燃料喷雾分裂长度较含有 15% DME 的混合燃料喷雾短。

参考文献

- 1 倪维斗. 解决我国能源问题的战略对策. 中国煤炭工业, 2007. 7
- 2 Arcoumanis C, Bae C, Crookes R, et al. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. Fuel, 2008, 87(7): 1014—1030[DOI]
- 3 Goto S, Oguma M. Evaluation of medium duty DME truck performances-field test results and PM characteristics. SAE Paper, 2007-01-0032
- 4 Goto S, Watanabe T, Oguma M. Engine performance and emission characteristics of dme diesel engine with inline injection pump developed for dme. SAE Paper, 2004-01-1863
- 5 Sorenson S C, Glensvig M, Abata D L. Dimethyl ether in diesel fuel injection systems. SAE Paper, 981159
- 6 Kajitani S, Chen Z L, Konno M, et al. Engine performance and exhaust characteristics of direct-injection diesel engine operated with DME. SAE Paper, 972973
- 7 Fleisch T, McCarthy C, Basu A, et al. A new clean diesel technology: Demonstration of ULEV emissions on a navistar diesel engine fuelled with dimethyl ether. SAE Paper, 950061
- 8 Sorenson S C, Mikkelsen S E. Performance and emissions of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat dimethyl ether. SAE Paper, 950064
- 9 Wang Y, Zhou L B, Wang H W. Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels. Atmos Environ, 2006, 40(13): 2313—2320
- 10 Dan T, Hashimoto M, Asano I, et al. Improvement of exhaust gas emission in marine diesel engine by blending DME. SAE Paper, 2007-01-2014
- 11 Okamoto T, Nakasato T, Konno M. Fuel properties and engine performance of dimethyl ether-blended biodiesel fuels. SAE Paper, 2007-01-2016
- 12 Boehman A L, Chapman E M, Peter J A T, et al. Emission characteristics of a navistar 7.3l turbodiesel fueled with blends of dimethyl ether and diesel fuel. SAE Paper, 2001-01-3626
- 13 Kajitani S, Oguma M, Mori T. DME fuel blends for low-emission, direct-injection diesel engine. SAE Paper, 2000-01-2004
- 14 Kajitani S. Dimethyl ether as a fuel for automobiles. Ari Res J, 1999, 21(9): 464—470
- 15 王贺武, 边耀璋, 陈世海. 柴油机掺烧二甲醚的性能, 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(3): 72—75