

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.051

# 甲醇温度和压力对喷雾特性的影响试验\*

姚春德 陈志方 吴涛阳 胡江涛 杨贤 陈世兴

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了解甲醇自身温度及喷射压力变化对喷雾特性的影响,使用高速摄像机和三维激光相位多普勒颗粒分析仪(PDPA),分别对25、50、60、70、80℃的液态甲醇及喷射压力为0.3、0.4、0.5 MPa时的甲醇喷雾进行了研究。结果表明:随着甲醇温度的升高,喷雾雾化质量提高,甲醇射流液柱减少,液滴索特平均直径(SMD)减小,同时喷雾主射流区向外扩张。另外,喷雾贯穿距和液滴速度均呈先增大后减小的趋势,在70℃时达到最大值。在相同温度下,喷射压力的增加提高了喷雾液滴速度,有助于贯穿距的增大,同时液滴索特平均直径(SMD)明显减小。因此在柴油机进气预混甲醇燃烧的实际应用中,升高液态甲醇温度至70℃左右,并适当增大喷射压力至0.5 MPa,是一种有效提高气道内甲醇雾化效果的方法。

**关键词:** 甲醇 喷雾 温度 压力 激光相位多普勒 高速摄像

**中图分类号:** TK417 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0377-06

## Experiment on Effects of Methanol Temperature and Pressure on Spray

Yao Chunde Chen Zhifang Wu Taoyang Hu Jiangtao Yang Xian Chen Shixing

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to understand the spray characteristics with methanol temperature and spray pressure changes, a high speed camera and 3D laser phase Doppler particle analyzer (PDPA) was used to research the methanol spray as fuel temperature was 25℃, 50℃, 60℃, 70℃ and 80℃ respectively, and methanol injection pressure was 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa respectively. The results show that, with the increase of methanol temperature, the spray atomization quality was improved, the liquid core of methanol jet was reduced, and the spray droplet Sauter mean diameter (SMD) was decreased, meanwhile, the location of main jet zone was expanded from 7 mm to 10 mm. At the same time, spray penetration and the velocity of droplet was first increased and then decreased with the increase of methanol temperature, and when the methanol temperature reached 70℃, they both had the maximum value. When the temperature of methanol remained the same, the increase of injection pressure can improve the velocity of spray droplets, which contributed to the increase of penetration, moreover, the droplet Sauter mean diameter (SMD) decreased obviously. Thus, in the application of methanol fumigated diesel engine, it is an effective measure to improve methanol atomization by increasing methanol temperature and injection pressure to around 70℃ and 0.5 MPa, respectively.

**Key words:** Methanol Spray Temperature Pressure Laser phase Doppler particle analyzer High speed camera

## 引言

甲醇在柴油机上的应用主要有柴油/甲醇乳化

掺混法和进气预混甲醇法<sup>[1-3]</sup>。由于进气预混甲醇法可以大比例使用甲醇<sup>[4-7]</sup>,因而受到了更广泛的关注。本课题组针对柴油机进气预混甲醇燃烧方式

收稿日期: 2015-03-05 修回日期: 2015-03-27

\* 国家自然科学基金重点资助项目(51336005)

作者简介: 姚春德, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机替代燃料及工作过程研究, E-mail: arcdyao@tju.edu.cn

进行了大量的研究,并进行了多批次的实际装车应用<sup>[8-9]</sup>。实践发现,柴油甲醇二元燃料燃烧模式在中高负荷对柴油的替代率可以达到45%<sup>[10-12]</sup>,但在暖车、怠速和低负荷时,由于气道温度低且甲醇汽化潜热大,甲醇喷入后大量吸热,特别是温度低于16℃时,甲醇蒸发相当缓慢<sup>[13]</sup>,易导致发动机失火,另外低温下喷入甲醇可能会造成润滑油早期失效,因此在暖车、怠速和低负荷条件下不能大比例喷入甲醇,这减小了柴油/甲醇组合燃烧的运行范围<sup>[14]</sup>。提高进气温度是解决这一问题的一种有效方法<sup>[15]</sup>,但容易降低发动机进气效率。因此研究提高甲醇雾化质量以实现柴油/甲醇组合燃烧运行范围的扩大成为当前的一个课题。

本研究通过加热进醇管以升高液体甲醇温度,达到减小喷雾液滴粒径的目的,并研究喷醇压力增大后的喷雾特性,以提高甲醇的雾化效果,为扩大甲醇在发动机上的应用范围寻找新的途径。

## 1 试验装置及方法

甲醇喷雾高速摄像试验装置如图1所示,主要包括燃料供给系统、喷嘴、控制用计算机、喷嘴控制器、Photron SA1.1型高速摄像机等。喷嘴控制器控制喷嘴的开启,并通过控制计算机与高速摄像机实现同步触发。通过调节逆流阀开度,改变喷醇压力,并由加热器对甲醇加热,达到试验要求的甲醇温度。试验中高速摄像机的拍摄频率为10 000 帧/s,图像的像素点为768×768。使用Matlab自编程序对所拍摄的喷雾图像去背景处理,二值化后得到灰度图,最后通过阈值取得喷雾边界。

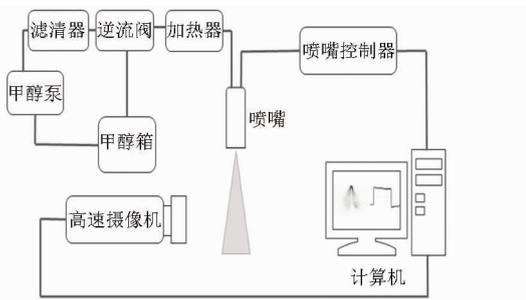


图1 高速摄像机试验台架简图

Fig. 1 Schematic diagram of test bench of high speed camera

图2所示为甲醇喷雾三维激光相位多普勒颗粒分析仪(PDPA)测量试验装置,主要包括氩离子激光发射器、激光分光器、三维FiberFlow发射探头、接收探头、PDPA处理器、控制计算机、喷嘴控制器、喷嘴和燃料供给系统等。燃料供给系统由喷嘴提供甲醇燃料,并对甲醇燃料加热,使其达到试验要求的温度。氩离子激光器发出连续混合光束,经过分光器

后被分成有频移的514.5 nm绿光、488.0 nm蓝光、476.5 nm紫光,及无频移的514.5 nm和488.0 nm的蓝绿混合光、476.5 nm紫光。五光束经过光纤耦合座耦合进入光纤,然后导入三维发射探头,经前透镜后五光束在测量点处发生干涉,当被测粒子经过干涉测量区域后,由接收探头接收被测粒子的折射光信号,再经过PDPA处理器处理得到最终测量结果。

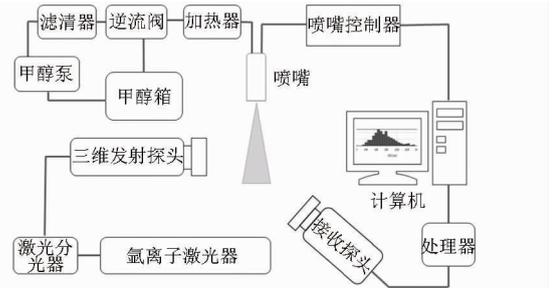


图2 PDPA试验台架简图

Fig. 2 Schematic diagram of test bench of PDPA

试验中使用纯度为99.9%的工业甲醇,测得其密度和粘度随温度的变化如图3所示。甲醇密度和粘度均随温度的升高而减小。甲醇密度由20℃时的791 kg/m<sup>3</sup>减小至100℃时的704 kg/m<sup>3</sup>。粘度由20℃时的0.58 mPa·s减小至100℃时的0.228 mPa·s。另外,甲醇常温常压下的沸点为64.7℃,对应的饱和蒸汽压为0.103 MPa,当温度达到80℃时,对应饱和蒸汽压为0.18 MPa,因此,当甲醇升高至一定温度后,甲醇的喷射极易出现闪沸。

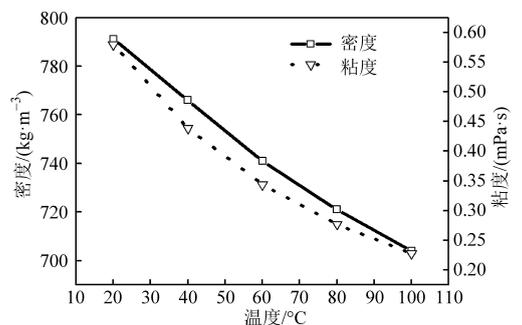


图3 甲醇密度和粘度随温度的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of methanol density and viscosity with temperature

试验中所用喷嘴为四孔低压喷嘴,喷孔截面为椭圆形,长轴0.35 mm,短轴0.31 mm。其外部形态如图4所示,喷射过程中,形成两束呈一定夹角的喷雾。

试验中,由加热器对甲醇进行加热,设置加热温度分别为25、50、60、70、80℃,当温度达到试验要求后,喷嘴控制器发出喷射信号,同时控制计算机对喷雾分别进行高速摄像和粒径及速度测量。在PDPA试验中,测量点如图5所示,分别在喷嘴下端15、25、35、45 mm轴向平面上,径向坐标 $r$ 间隔2 mm选取多个测量点。

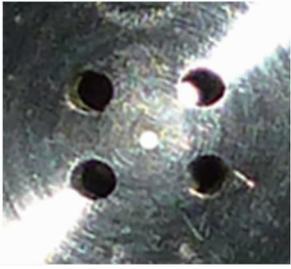


图 4 喷孔外部形态

Fig. 4 External form of nozzle

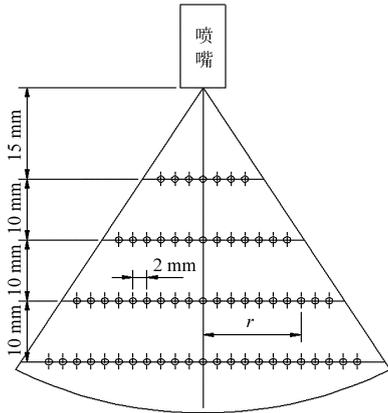


图 5 PDPA 测量点示意图

Fig. 5 Measurement points of PDPA

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同甲醇温度时的喷雾特性

设定喷醇压力为 0.4 MPa, 喷醇脉宽为 2.6 ms, 图 6 所示为不同甲醇温度时, 所拍喷雾结束帧幅的喷雾形态图片。从图中可以看出, 甲醇自喷嘴喷出后, 在喷嘴附近射流以液体形式喷出, 液流以一定的夹角呈两束形态, 随着喷雾的进行, 逐渐破碎成小的液滴。随着甲醇温度升高, 喷雾锥角逐渐增大, 喷雾向外围扩散, 同时在喷孔出口处, 液注随着温度的升高而逐渐减少。这是因为温度的升高加快了液注的雾化, 同时甲醇的粘度和表面张力随温度升高而减小, 使得喷雾更易破碎。

喷雾贯穿距主要受喷雾动量、空气阻力、燃料粘度和表面张力等因素影响, 随温度升高, 甲醇粘度、密度和表面张力均减小。对各温度下的喷雾进行测量, 得到其贯穿距如图 7 所示, 当温度由 25℃ 升高至 70℃, 喷雾贯穿距逐渐增大, 而后在 80℃ 时降低。这是由于温度的升高使甲醇的粘度和表面张力减小, 液滴间相互作用力减小, 促进了喷雾的发展, 贯穿距增大; 而温度继续升高, 又促进了喷雾液滴的蒸

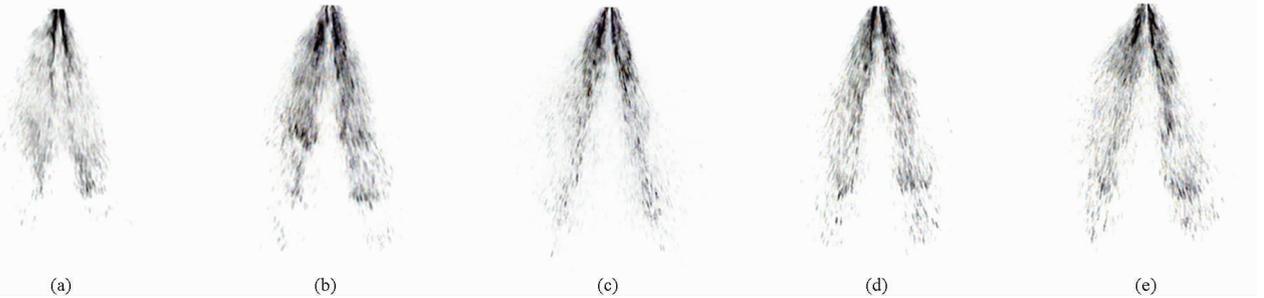


图 6 不同甲醇温度的喷雾形态

Fig. 6 Sprayforms with different methanol temperatures

(a) 25℃ (b) 50℃ (c) 60℃ (d) 70℃ (e) 80℃

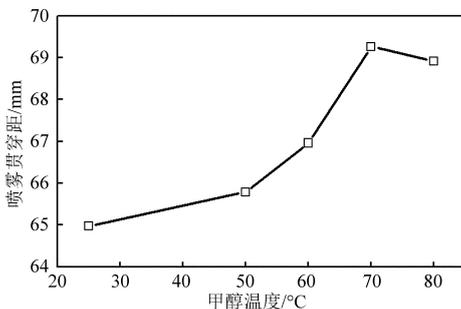


图 7 不同甲醇温度时喷雾贯穿距变化曲线

Fig. 7 Changing curves of spray penetration with different methanol temperatures

发, 同时温度升高造成甲醇饱和蒸汽压增大, 甲醇自喷嘴喷出后出现闪沸, 液滴在喷嘴附近发生微爆, 部分液滴改变射流方向, 从而降低了喷雾整体动量。

对各温度下的甲醇喷雾粒径进行测量, 图 8 所

示为喷嘴下端 15 ~ 45 mm 处喷雾的索特平均直径 (SMD) 等高线图。从图中看出, 甲醇喷雾 SMD 等高线图存在两处明显的大颗粒区域, 此区域即为甲醇主射流区。随着温度的升高, 喷雾主射流区向外扩张, 由  $r = 7$  mm 附近逐渐向  $r = 10$  mm 附近移动, 甲醇喷雾 SMD 的范围在 70 ~ 100  $\mu\text{m}$  之间。随着温度的升高, 甲醇粘度和表面张力减小, 喷雾扩散加剧, 液滴更易破碎, SMD 减小, 这与文献 [16] 中的结论一致, 同时大颗粒区域面积随温度升高而减小。在喷嘴近端, 甲醇 SMD 较小, 而随轴向距离增加, SMD 逐渐增大, 这可能是因为大的液滴具有较大动量, 生命周期更长, 可以更快地运动至喷雾边缘。

图 9 所示为不同甲醇温度时, 所测轴向 45 mm 截面上不同径向位置点的速度。发现随着甲醇温度

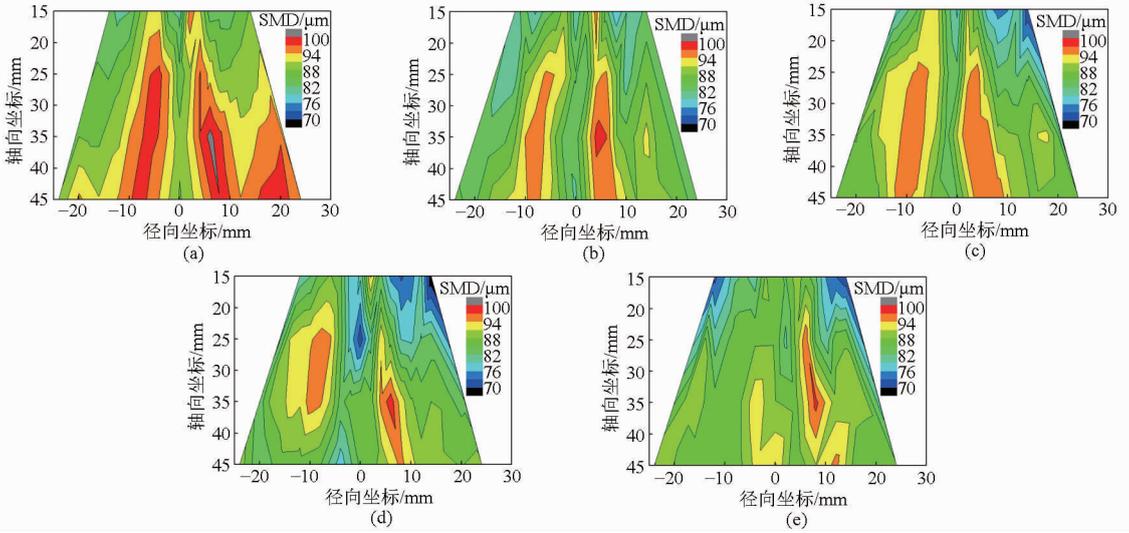


图8 不同甲醇温度时喷雾 SMD 等高线图

Fig. 8 Spray SMD contour map with different methanol temperatures

(a) 25°C (b) 50°C (c) 60°C (d) 70°C (e) 80°C

的升高,  $r$  为 0、4、8 mm 测量点的速度呈先增大后减小的趋势, 通常在  $T_f = 70^\circ\text{C}$  时有最大速度。由于喷雾锥角随温度升高而增大, 喷雾更加扩散, 主射流区向外扩张, 造成  $r = 12$  mm 测量点处的速度持续增大。 $r = 8$  mm 测量点处于甲醇主射流区, 此处射流速度最大, 决定着喷雾贯穿距, 这与图 7 所示的贯穿距随温度的变化趋势一致, 在  $T_f = 70^\circ\text{C}$  时有最大值。在实际应用中, 若甲醇温度过高会加剧供醇系统的老化, 且加热能量消耗增大, 因此选择甲醇温度为  $70^\circ\text{C}$  较为合理。

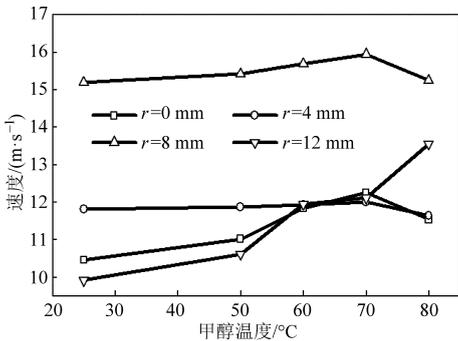


图9 不同甲醇温度时不同径向位置液滴速度

Fig. 9 Radial coordinates droplet velocities with different methanol temperatures

### 2.2 不同喷射压力时的喷雾特性

在甲醇温度为  $25^\circ\text{C}$  时, 保持喷射脉宽 2.6 ms, 调整喷射压力分别为 0.3、0.4、0.5 MPa, 研究喷射压力对甲醇喷雾的影响。图 10 所示为 3 个喷射压力下的甲醇喷雾形态。可以看出, 随着喷射压力的增加, 射流贯穿距明显增长, 喷孔下端的射流液注减少。在较大喷射压力下, 液注惯性力增强, 更易破碎成小的甲醇液滴。在低喷射压力时甲醇液滴较大, 喷雾雾化质量差, 进入气道后, 大的液滴雾化生命周期长, 且易碰

壁形成液膜。因此在实际发动机应用中, 要选择适当的喷射压力, 以提高甲醇的雾化效果。

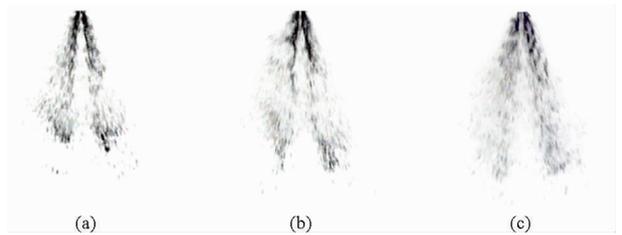


图10 不同喷射压力时喷雾形态图

Fig. 10 Spray structure with different injection pressures

(a) 0.3 MPa (b) 0.4 MPa (c) 0.5 MPa

图 11 所示为测得各喷射压力下, 喷雾的 SMD 等高线图。从图中可以看出, 随着喷射压力的增大, 喷雾 SMD 明显变小。当喷射压力为 0.3 MPa 时, 液滴最大 SMD 接近  $110 \mu\text{m}$ , 在气道和缸内经过气流的作用后, 在燃烧前可能还会以液滴的形式存在。喷射压力增大后, 液滴更易破碎, 雾化进一步增强, 同时在进气过程中, 发动机气道和缸内存在的湍流、涡流、挤流和滚流等复杂的空气运动作用使得液滴进一步蒸发雾化, 液滴在燃烧前会完全以气态形式存在, 这有效提高了发动机的燃烧效率, 动力输出增强, 有害排放降低。

图 12 所示为不同喷射压力下, 在喷嘴轴向 45 mm 截面上, 测得各径向坐标点速度大小。随着径向位置增加, 速度呈先增大后减小趋势。同时, 因  $r = 8$  mm 测量点处于喷雾主射流区, 故在此处喷雾有最大速度。同时随着喷射压力的增加, 各径向位置测量点的速度逐渐增大, 这与图 9 中喷雾所表现出的贯穿距变化相一致。在实际应用中, 考虑供醇系统及发动机结构, 选择 0.5 MPa 的喷射压力较为合适。

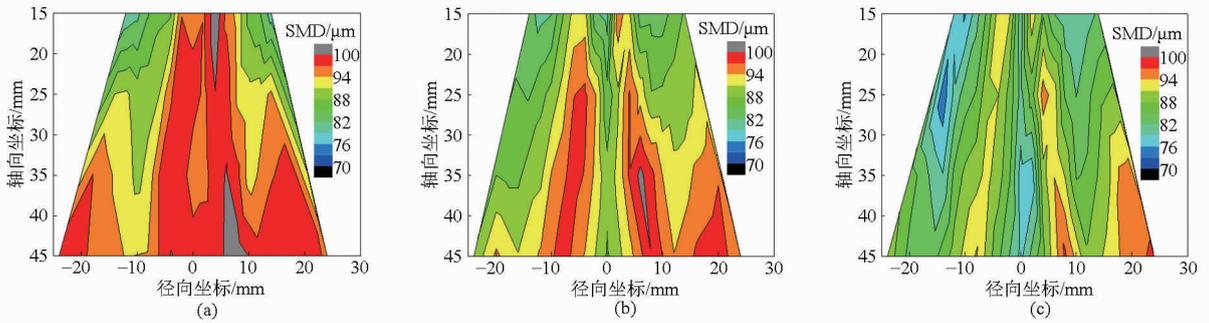


图 11 不同喷醇压力时喷雾 SMD 等高线图

Fig. 11 Spray SMD contour map with different injection pressures

(a) 0.3 MPa (b) 0.4 MPa (c) 0.5 MPa

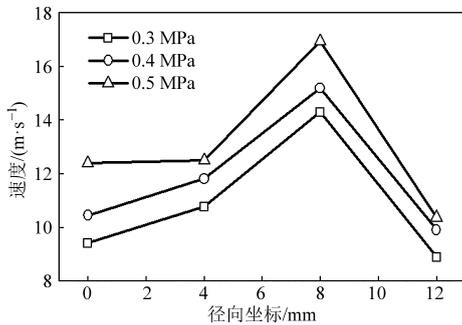


图 12 轴向 45 mm 截面上各测量点的液滴速度

Fig. 12 Droplet velocity of each measurement point in 45 mm cross section

### 3 结论

(1) 随着甲醇温度的升高,喷雾雾化质量提高,

甲醇射流液注减少,液滴索特平均直径减小,同时喷雾主射流区向外扩张。

(2) 随着甲醇温度的升高,喷雾贯穿距和主射流区液滴速度均呈先增大后减小的趋势,两者在 70℃ 时达到最大值。

(3) 在相同温度条件下,喷射压力的增加使喷雾液滴速度、贯穿距增大,同时液滴索特平均直径明显减小,喷醇压力选择 0.5 MPa 较为理想。

(4) 在柴油/甲醇组合燃烧的实际应用中,通过升高液体甲醇温度至 70℃,并适当增大喷醇压力至 0.5 MPa 来提高甲醇在气道内的雾化效果,能够有效增加暖车、怠速和低负荷时甲醇的替代率,并进一步优化中高负荷时甲醇的使用效果,扩大甲醇柴油/甲醇组合燃烧的运行范围。

### 参 考 文 献

- Cheng C H, Cheung C S, Chan T L, et al. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol[J]. Fuel, 2008, 87(10): 1870 - 1879.
- Sayin C, Ilhan M, Canakci M, et al. Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel-methanol blends [J]. Renewable Energy, 2009, 34(5): 1261 - 1269.
- 夏琦,姚春德,魏立江,等. 柴油/甲醇组合发动机燃烧压力特性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(2):6 - 10.  
Xia Qi, Yao Chunde, Wei Lijiang, et al. Investigation of combustion pressure characteristics from diesel engine with DMCC mode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):6 - 10. (in Chinese)
- Imran A, Varman M, Masjuki H H, et al. Review on alcohol fumigation on diesel engine: a viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 739 - 751.
- Abu-Qudais M, Haddad O, Qudaisat M. The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions [J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(4): 389 - 399.
- Saravanan C G, Saravanan B, Sitharthaseelan J, et al. Fumigation of methanol and fuel additives in a diesel engine testing the performance and emission characteristics[C]. SAE Paper 2002-01-2722, 2002.
- Houser K R, Lestz S S, Dukovich M, et al. Methanol fumigation of a light duty automotive diesel engine[C]. SAE Paper 801379, 1980.
- Liu J, Yao A, Yao C. Effects of injection timing on performance and emissions of a HD diesel engine with DMCC [J]. Fuel, 2014, 134: 107 - 113.
- Wei L, Yao C, Wang Q, et al. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel [J]. Fuel, 2015, 140: 156 - 163.
- 魏立江,姚春德,刘军恒,等. 柴油/甲醇组合燃烧特性及道路试验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(5): 877 - 882.  
Wei Lijiang, Yao Chunde, Liu Junheng, et al. Combustion characteristics and road test of diesel/methanol compound combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(5): 877 - 882. (in Chinese)

- 11 Yao C, Cheung C S, Cheng C, et al. Effect of diesel/methanol compound combustion on diesel engine combustion and emissions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(6): 1696 – 1704.
- 12 Cheung C S, Cheng C, Chan T L, et al. Emissions characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel and fumigation methanol [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(2): 906 – 914.
- 13 宫长明,王舒,刘家郡,等. 环境温度对点燃式甲醇发动机冷起动性能的影响[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2009, 39(1): 27 – 32.  
Gong Changming, Wang Shu, Liu Jiajun, et al. Effect of ambient temperature on cold start behavior of S. I. methanol engine [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2009, 39(1): 27 – 32. (in Chinese)
- 14 Wang Q, Wei L, Pan W, et al. Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine [J]. *Fuel*, 2015, 140: 164 – 170.
- 15 姚春德,潘望,魏立江,等. 进气温度对 DMDF 发动机燃烧特性和烟度排放的影响[J]. *天津大学学报:自然科学与工程技术版*, 2015, 48(4): 328 – 333.  
Yao Chunde, Pan Wang, Wei Lijiang, et al. Effect of intake air temperature on combustion and soot emission characteristics of a diesel-methanol dual fuel engine [J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2015, 48(4): 328 – 333. (in Chinese)
- 16 李明,徐斌,许敏,等. 外开环直喷喷油器在不同燃油过热度下的喷雾特性研究[J]. *内燃机工程*, 2014, 35(5): 88 – 94.  
Li Ming, Xu Bin, Xu Min, et al. Spray characteristics of outward-opening nozzle for DISI engine in different fuel superheat degree conditions [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2014, 35(5): 88 – 94. (in Chinese)