

Study on Combustion Processes and Emission Characteristics of a DME/Diesel Premixed Charge Compression Ignition Engine

Yuwei Zhao^{1*}, Yuemeng Cheng¹, Weibo E¹, Yijing Xie¹, Ying Wang²

¹Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi

²School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Email: *ervrn@126.com

Received: Oct. 3rd, 2018; accepted: Oct. 22nd, 2018; published: Oct. 29th, 2018

Abstract

Based on a 2105 diesel engine, it was modified into dual-fuel engine which was added DME (dimethyl ether) pre-mixing system for realizing premixed charge compression ignition (PCCI) combustion mode. The combustion processes and emission characteristics of a DME/diesel dual-fuel PCCI engine under different DME pre-mixing ratio were studied deeply. The results show that the combustion process exhibits a three-stage heat release with port DME induction. With an increase in DME pre-mixing ratio, the peak values of in-cylinder pressure and temperature increase and the corresponding phases advance. The crank-angle position corresponding to the DME low-temperature reaction (LTR) stage was almost kept constant, but the crank-angle position corresponding to the DME high-temperature reaction (HTR) and diesel diffusion combustion stage advanced; at the condition of 33% load, NO_x emission was a little lower; at the condition of 66% load, NO_x emission decreased at first and then increased; both HC and CO emission increased; both particle number concentration and mass concentration decreased; the effects of DME introduction on the reduction of particle number concentration and mass concentration were most pronounced for PR = 40%. The results will provide references for the combustion process optimization and emission control of a DME/diesel dual-fuel premixed charge compression ignition engine.

Keywords

Premixed Charge Compression Ignition, DME Pre-Mixing Ratio, Combustion Processes, Emission Characteristics

*通讯作者。

二甲醚-柴油预混压燃柴油机燃烧与排放特性的研究

赵玉伟^{1*}, 程月蒙¹, 鄂卫波¹, 谢一静¹, 汪映²

¹空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安

²西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安

Email: ervrn@126.com

收稿日期: 2018年10月3日; 录用日期: 2018年10月22日; 发布日期: 2018年10月29日

摘要

以一台2105柴油机为原型机, 增加二甲醚(DME)预混合系统, 实现进气道预混二甲醚—缸内直喷柴油预混充量压缩燃烧模式, 对二甲醚-柴油预混压燃柴油机在不同DME预混率下的燃烧过程和排放特性进行深入研究。试验结果表明, 进气道预混DME后, 燃烧过程呈现3阶段放热。随DME预混率的增大, 缸内压力和温度峰值逐渐增大, 对应相位逐渐前移; DME低温反应对应的相位基本不变, DME高温反应和柴油扩散燃烧逐渐前移; 33%负荷工况下 NO_x 排放逐渐减小, 66%负荷工况下 NO_x 排放先减小后增大; HC和CO排放均逐渐增多; 颗粒物的数量浓度和质量浓度均逐渐下降, DME预混率 $\text{PR} = 40\%$ 时降低幅度较大。研究结果为二甲醚-柴油双燃料预混压燃发动机的燃烧过程优化和污染物排放控制提供了参考。

关键词

预混压燃, 二甲醚预混率, 燃烧过程, 排放特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柴油机具有热效率高、动力性强和工作可靠等优点, 现已成为交通运输和军用车辆的主要动力之一。但是, 柴油机废气排放物中碳烟颗粒物排放偏高, 而且氮氧化物(NO_x)和碳烟呈现权衡关系, 同时降低 NO_x 和碳烟非常困难[1]。近年来, 在世界范围内环境污染和能源危机的背景下, 以及在节能减排政策的推动下, 探索新型燃烧模式和清洁替代燃料成为车用发动机重要的研究方向。预混充量压缩着火(PCCI)燃烧模式以其高效率、低排放等特点受到广泛关注[2] [3]。预混压燃模式中预混气体的形成是一个关键问题。二甲醚(DME)具有较高的十六烷值(>55)和含氧量(34.8%), 燃烧性能较好; 分子结构中无C-C键, 能够实现无烟燃烧; 同时DME在常温、常压下能够与空气混合形成均质充量[4] [5]。本研究中, 预混DME在进气道中与空气混合均匀后进入气缸, 压缩行程末期利用发动机原有燃油喷射系统将柴油喷入气缸, 实现了二甲醚/柴油双燃料预混充量压缩着火燃烧模式。

预混压燃发动机的燃烧过程与传统压燃式发动机不同, 其中预混燃料在进入气缸之后发生HCCI燃

烧, 预混燃料的 HCCI 燃烧和直喷燃料的扩散燃烧随预混燃料量的变化可能依次进行或叠加进行[6] [7], 进而影响发动机的污染物排放。本文开展了二甲醚-柴油双燃料预混压燃发动机在不同 DME 预混率下的燃烧过程与排放特性研究。

2. 试验设备及方法

试验用发动机为直列、四冲程、自然吸气式 2105 柴油机, 其主要技术参数如表 1 所示。为了实现预混充量压缩燃烧模式, 本研究中增加了 DME 进气道预混系统。为保证 DME 以气态与空气充分混合, 在 DME 进入进气道之前利用恒温装置(温度保持在 50℃左右)对 DME 进行加热。柴油供油系统不变, 试验台架布置如图 1 所示。

试验中, 采用 Kistler 7061 型水冷式压电晶体传感器连接 Kistler 7061B 型电荷放大器进行缸内燃烧压力数据的测取; 由于燃烧过程存在循环变动, 每个工况采集 100 个循环的缸内压力数据, 然后进行数据平均化及光滑处理, 用于分析计算。试验用柴油为商业用 0#柴油, DME 为纯度为 99.9%的高纯度工业 DME。

Table 1. Main specifications of the experimental engine

表 1. 试验发动机主要技术参数

技术参数	数值
缸径/mm	105
行程/mm	120
排量/L	2.078
压缩比	17
最大扭矩/N·m	120
最大扭矩转速/r·min ⁻¹	1700
喷油压力/MPa	19
喷油时刻/°CA	10
喷孔数 × 喷孔直径/mm	4 × 0.32

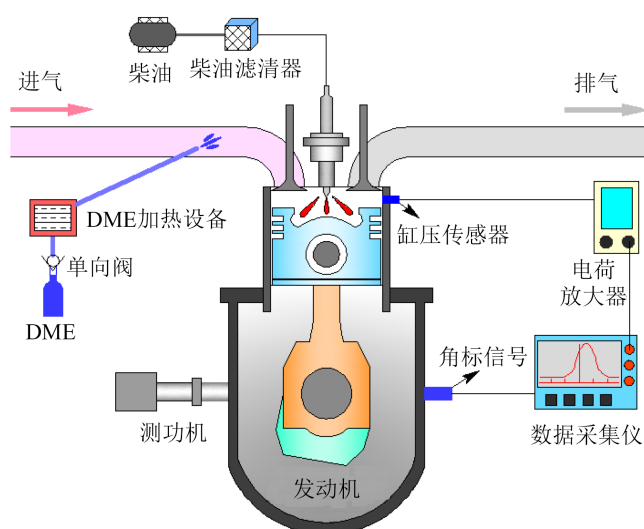


Figure 1. Schematic diagram of the experimental set-up

图 1. 发动机试验台架布置示意

试验研究工况为 $n = 1700 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、33%负荷和 $n = 1700 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、66%负荷，DME 预混率为 0%、10%、20%、30%、40%。DME 预混率(Pre-mixing Ratio, PR)的定义为：消耗 DME 的能量与消耗 DME 和柴油能量之和的比值，其计算公式为：

$$\text{PR} = \frac{b_{\text{DME}} \times H_{\text{u,DME}}}{b_{\text{DME}} \times H_{\text{u,DME}} + b_{\text{diesel}} \times H_{\text{u,diesel}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， b_{DME} 和 b_{diesel} 分别为 DME 和柴油的消耗量($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)， $H_{\text{u,DME}}$ 和 $H_{\text{u,diesel}}$ 分别为 DME 和柴油的低热值($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

3. 试验结果及分析

3.1. 不同 DME 预混率下柴油机的燃烧特性分析

3.1.1. 缸内压力和温度

图 2 所示为不同 DME 预混率下发动机的缸内压力曲线。由图 2 可见，随 DME 预混率的增大，缸内最大爆发压力逐渐升高，压力峰值对应相位逐渐提前：在 33%负荷下，缸内压力峰值由纯柴油工况下的 4.99 MPa 增大到 PR = 40%工况下的 5.79 MPa，其对应相位由上止点后 10.2 °CA 前移至上止点后 6.2 °CA；在 66%负荷下，缸内压力峰值由纯柴油工况下的 5.59 MPa 增大到 PR = 40%工况下的 6.78 MPa，其对应相位由上止点后 11 °CA 前移至上止点后 8.2 °CA。DME 具有较高的十六烷值，预混合 DME 在柴油燃烧之前发生 HCCI 燃烧，提高了缸内压力和温度，柴油滞燃期缩短，压力峰值对应相位前移。由于 DME 发生 HCCI 燃烧，使得一部分热量释放在压缩冲程，而且随 DME 预混率的增大这部分燃烧放热量增加，因此缸内最大爆发压力逐渐升高。

DME 预混率的增大使得发生 HCCI 燃烧的 DME 可燃混合气的量增多，燃烧始点逐渐前移，压力急剧上升的始点依次提前，而该阶段放热量逐渐增多，使得压力曲线逐渐陡峭。此外，相对传统压燃式发动机，二甲醚-柴油双燃料预混压燃发动机的缸内压力曲线在最大爆发压力处的变化更平缓，高压持续时间较长，有利于发动机热效率的提高。

图 3 所示为不同 DME 预混率下发动机的缸内平均温度曲线。由图 3 可见，随 DME 预混率的增大，缸内温度逐渐升高，温度峰值对应相位逐渐提前：在 33%负荷下，缸内温度峰值由纯柴油工况下的 1490 K 增大到 PR = 40%工况下的 1569 K，其对应相位由上止点后 20.4 °CA 前移至上止点后 15.2 °CA；在 66%

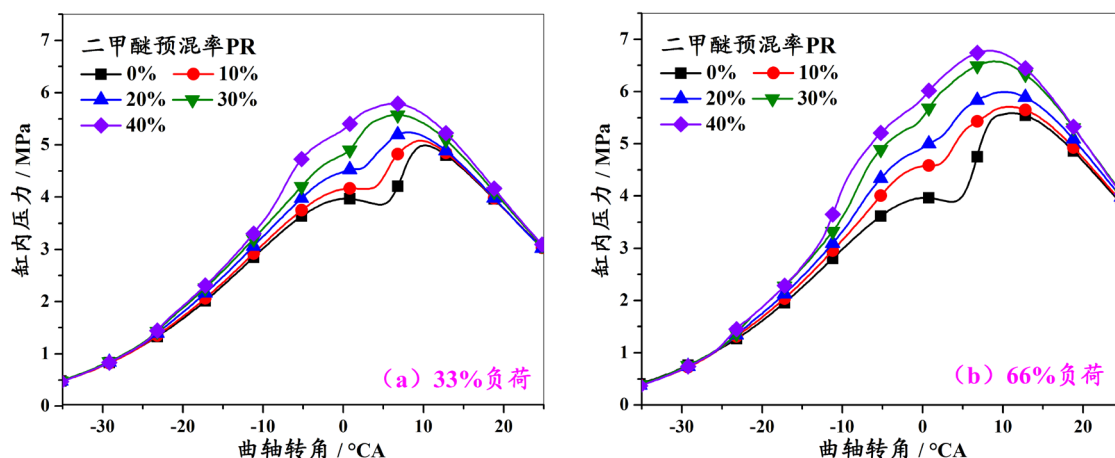


Figure 2. The curves of in-cylinder pressure under different DME pre-mixing ratios

图 2. 不同 DME 预混率下的缸内压力曲线

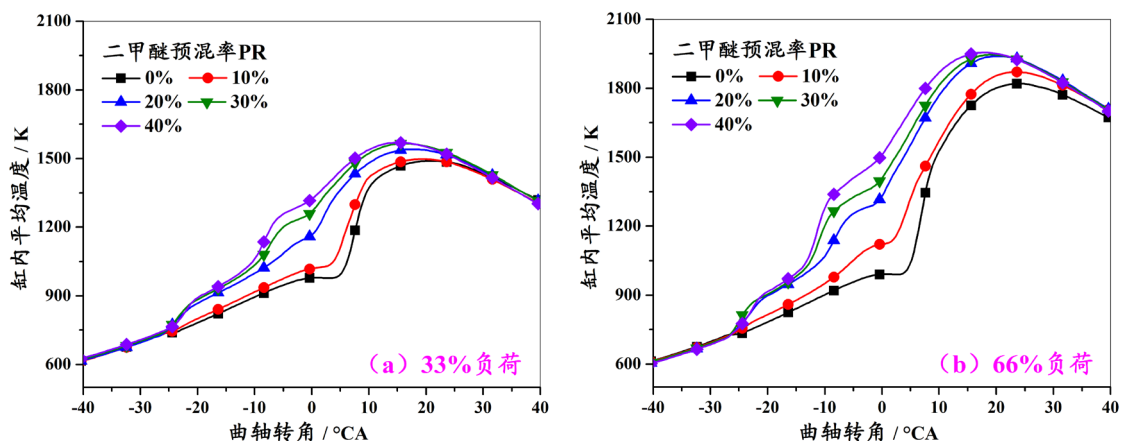


Figure 3. The curves of in-cylinder temperature under different DME pre-mixing ratios

图 3. 不同 DME 预混率下的缸内温度曲线

负荷下, 缸内温度峰值由纯柴油工况下的 1821 K 增大到 PR = 40% 工况下的 1955 K, 其对应相位由上止点后 23.2 °CA 前移至上止点后 18 °CA。由于 DME 发生 HCCI 燃烧, 直喷柴油进入气缸以后可以迅速完成着火前准备, 燃烧更充分, 使得缸内温度峰值逐渐增大; 而 DME 发生 HCCI 燃烧后提高了缸内压力和温度, 缩短了 HCCI 燃烧和扩散燃烧两个阶段的间隔, 因此缸内温度峰值前移。

3.1.2. 放热率

图 4 所示为不同 DME 预混率下发动机的放热率曲线。由图 4 可见, 二甲醚/柴油双燃料预混压燃发动机的放热规律与传统压燃式发动机完全不同, 呈现 3 阶段放热: 当 DME 预混率较小时, HCCI 燃烧阶段放热率较少, 燃烧过程呈现 DME 低温反应、柴油预混燃烧和柴油扩散燃烧 3 阶段放热; 随 DME 预混率的增大, DME 与空气形成的可燃混合气浓度变大, DME 高温反应阶段的放热量较多, 柴油预混燃烧阶段的放热过程变得不明显, 因此呈现 DME 低温反应、DME 高温反应和柴油扩散燃烧 3 阶段放热。

DME 预混率的增大使得 DME 量增多而柴油量减少, 因此 DME 低温反应和高温反应阶段的放热率峰值逐渐增大, 柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值逐渐减小。随 DME 预混率的增大, DME 低温反应阶段对应的相位未发生明显变化(放热率峰值保持在上止点前 24 °CA~25 °CA), 这是因为 DME 低温反应的着火时刻主要与缸内温度有关(低温反应开始的温度为 700 K 左右) [8], 而该阶段缸内温度的升高由活塞压缩缸内工质引起, 因此该阶段的着火时刻与 DME 预混率的关系不大。DME 预混率增大使得发生低温反应的预混燃料逐渐增多, 缸内压力和温度不断升高, 因此 DME 高温反应和柴油扩散燃烧均逐渐前移。

3.2. 不同 DME 预混率下柴油机的排放特性分析

3.2.1. NO_x 排放

图 5 所示为不同 DME 预混率下发动机的 NO_x 排放曲线。从图中可以看出, 在 33% 负荷工况下, NO_x 排放随 DME 预混率的增大逐渐减小; 在 66% 负荷工况下, NO_x 排放随 DME 预混率的增大先减小后增大。在 33% 负荷工况下, 二甲醚-柴油双燃料预混压燃发动机的缸内平均温度均处于 1600 K 以下(图 3(a)), 此时 NO_x 生成速率极低。DME 发生 HCCI 燃烧以后生成的废气形成内部废气再循环, 从而抑制了 NO_x 的生成。同时, 随 DME 预混率的增大, 直喷柴油燃料量逐渐减少, 柴油与空气混合更加均匀, 局部富氧和高温区域减少, 从而抑制了柴油扩散燃烧阶段 NO_x 的生成。在 66% 负荷工况下, 当 DME 预混率为 10% 时, 发动机缸内温度在 1800 K 左右(图 3(b)), 此时由于二甲醚 HCCI 燃烧后废气的内部再循环和直喷柴油量减少, NO_x 排放减少。而当 DME 预混率进一步增大时, 二甲醚 HCCI 燃烧放热量增多, 缸内温度明

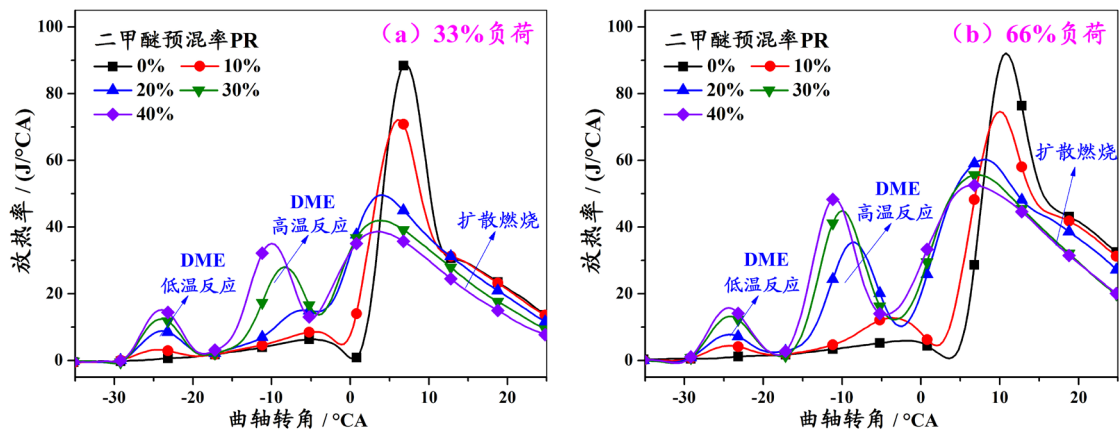


Figure 4. The curves of heat release rate under different DME pre-mixing ratios
 图 4. 不同 DME 预混率下的放热率曲线

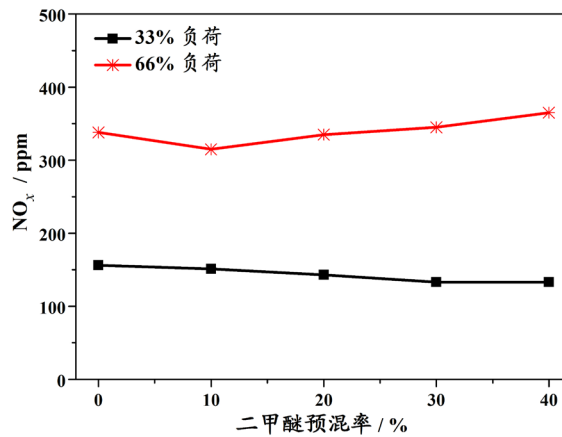


Figure 5. NO_x emission under different DME pre-mixing ratios
 图 5. 不同 DME 预混率下的 NO_x 排放

显升高(缸内温度已经接近 2000 K), 此时 NO_x 生成速率提高。因此, 在高负荷、高二甲醚预混率工况下, NO_x 排放有增长趋势。

3.2.2. HC、CO 排放

图 6 所示为不同 DME 预混率下发动机的 HC 和 CO 排放曲线。从图中可以看出, 二甲醚-柴油双燃料预混压燃发动机的 HC 和 CO 排放的变化趋势基本相同, 且都高于 DI 发动机。二甲醚与空气形成的可燃混合气发生 HCCI 燃烧不完全, 导致未燃 HC 排放增加; 同时, 随着二甲醚预混率的增大, 二甲醚与空气形成的均质混合气浓度增加, 在燃烧室内的狭窄缝隙中存留的二甲醚增多, 这部分燃料燃烧不充分, 也导致 HC 排放增加。未完全燃烧的二甲醚增多会导致 CO 排放升高; 另外, 进气引入的 DME 预混气挤占了进气容积, 缸内氧浓度下降, CO 难以进一步被氧化成 CO₂, 从而导致 CO 排放升高。

3.2.3. 颗粒物排放

图 7 所示为不同二甲醚预混率下, 颗粒物的数量浓度粒径分布图。从图中可以看出颗粒数量浓度呈单峰分布, 发动机的颗粒数量峰值主要集中在 0.055 μm~0.170 μm 之间, 即积聚态。在转速、负荷相同的工作下, 颗粒物的数量浓度随着二甲醚预混率的增大而降低: 在 33% 负荷工况下, 二甲醚预混率 PR = 10%

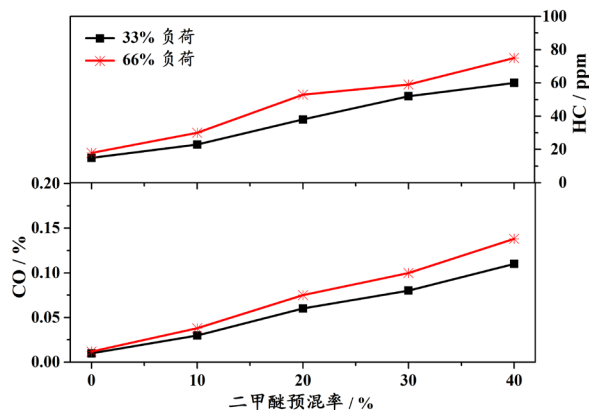


Figure 6. HC and CO emission under different DME pre-mixing ratios

图 6. 不同 DME 预混率下的 HC、CO 排放

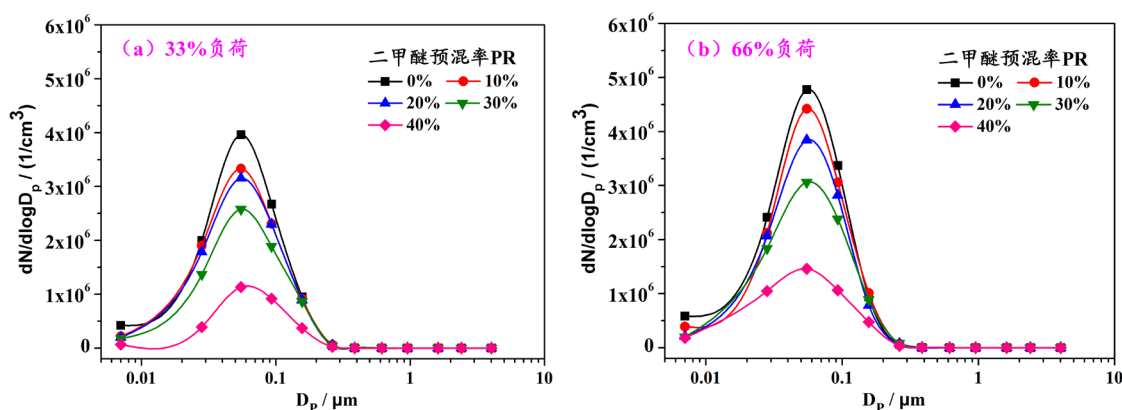


Figure 7. Particle number concentration distribution under different DME pre-mixing ratios

图 7. 不同 DME 预混率下的颗粒物数量浓度粒径分布图

时, 积聚模态颗粒数量浓度峰值下降 15.9%, PR = 20% 时下降 20.5%, PR = 30% 时下降 35.1%, PR = 40% 时下降 71.5%; 在 66% 负荷工况下, 二甲醚预混率 PR = 10% 时, 积聚模态颗粒质量浓度峰值下降 7.3%, PR = 20% 时下降 19.5%, PR = 30% 时下降 35.8%, PR = 40% 时下降 69.4%。这主要是因为: 1) 二甲醚是含氧燃料, 破坏了碳烟生成的缺氧条件, 而且分子中没有生成碳烟的 C-C 键, 因而二甲醚发生 HCCI 燃烧时碳烟排放几乎为零; 2) 二甲醚发生预混燃烧提高了缸内压力和温度, 加快了缸内工质的流动, 促进了柴油扩散燃烧阶段的蒸发, 油气混合更加均匀, 局部缺氧区域减少; 3) 二甲醚预混率的增大使得柴油喷入量减少, 即减少了扩散燃烧阶段柴油的比重。颗粒物排放主要取决于扩散燃烧阶段柴油的量, 因此, 二甲醚预混率较大时颗粒数量浓度显著降低。

此外, 从图 7 中还可以看出, 二甲醚-柴油预混压燃发动机的颗粒数量浓度随负荷的增大而增加。随着负荷的增大, 柴油的喷射量更多, 相对而言空燃比减小, 缸内氧浓度降低。此外, 扩散燃烧阶段的柴油量也相对增加, 导致高温缺氧环境下燃料的不完全燃烧增多, 从而使得颗粒物浓度增加。

图 8 所示为不同二甲醚预混率下, 颗粒物的质量浓度粒径分布图。从图中可以看到颗粒质量浓度呈双峰分布, 颗粒质量主要集中在粒径为 0.090 μm ~0.380 μm 的积聚态和粒径大于 1 μm 的粗颗粒。与图 7 所示颗粒数量浓度粒径分布类似, 随二甲醚预混率的增大, 发动机颗粒质量浓度逐渐降低, 当二甲醚预混率 PR = 40% 时降低幅度较大。二甲醚-柴油预混压燃发动机的颗粒质量浓度也随负荷的增大而增加。

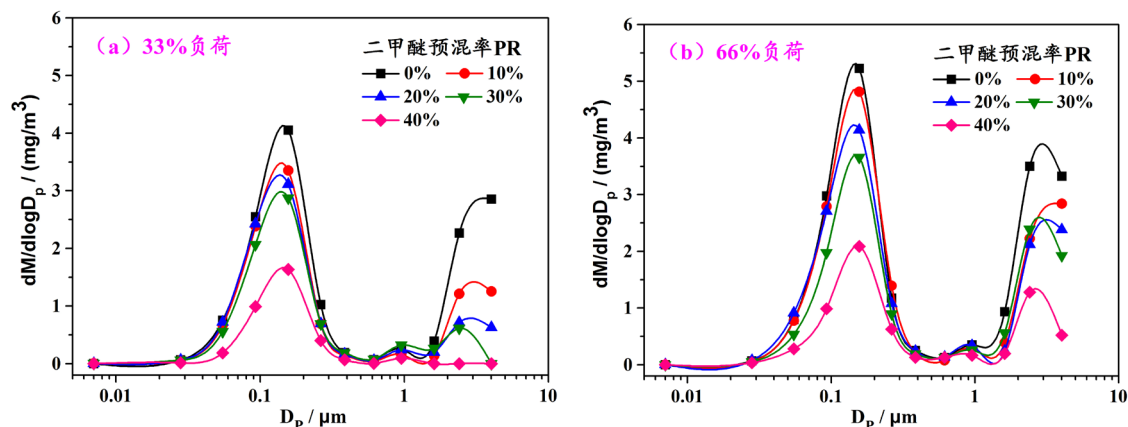


Figure 8. Particle mass concentration distribution under different DME pre-mixing ratios

图 8. 不同 DME 预混率下的颗粒物质量浓度粒径分布图

4. 结论

- 1) 随二甲醚预混率的增大,二甲醚-柴油预混压燃发动机的缸内最大爆发压力和最高燃烧温度逐渐升高,压力和温度峰值对应相位逐渐前移。
- 2) 进气道预混二甲醚后发动机呈现 3 阶段放热,随二甲醚预混率的增大,DME 低温反应对应的相位基本不变(24 °CA BTDC 左右),DME 高温反应和柴油扩散燃烧逐渐前移。
- 3) 随二甲醚预混率的增大,33%负荷工况下 NO_x 排放逐渐减小;66%负荷工况下 NO_x 排放先减小后增大;HC 和 CO 排放均逐渐增多。
- 4) 随二甲醚预混率的增大,颗粒物的数量浓度和质量浓度均逐渐下降,其中当 DME 预混率 PR = 40% 时,积聚模态颗粒数量浓度峰值下降幅度可达 70% 左右。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 91541118)。

参考文献

- [1] Jia, M., Xie, M., Wang, T., *et al.* (2011) The Effect of Injection Timing and Intake Valve Close Timing on Performance and Emissions of Diesel PCCI Engine with a Full Engine Cycle CFD Simulation. *Applied Energy*, **88**, 2967-2975. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.024>
- [2] 贾和坤, 尹必峰, 何建光, 等. 轻型柴油机预混合低温燃烧和排放性能的试验研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(10): 1123-1129.
- [3] Kiplimo, R., Tomita, E., Kawahara, N., *et al.* (2012) Effects of Spray Impingement, Injection Parameters, and EGR on the Combustion and Emission Characteristics of a PCCI Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*, **37**, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.011>
- [4] 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[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 122-126.
- [5] Park, S.H. and Lee, C.S. (2014) Applicability of Dimethyl Ether (DME) in a Compression Ignition Engine as an Alternative Fuel. *Energy Conversion and Management*, **86**, 848-863. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.051>
- [6] Kiplimo, R., Tomita, E., Kawahara, N., *et al.* (2012) Effects of Spray Impingement, Injection Parameters, and EGR on the Combustion and Emission Characteristics of a PCCI Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*, **37**, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.011>
- [7] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [8] Sato, S. and Lida, N. (2003) Analysis of DME Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion. SAE, Detroit, USA.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org