

DOI: 10.7652/xjtuxb201605003

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

汪映¹, 黄智勇¹, 柯希春¹, 刘红²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 大连理工大学能源与动力工程学院, 116024, 辽宁大连)

摘要: 为了解决内燃机在抑制二甲醚早燃而导致爆燃的问题, 实验研究了着火抑制剂液化石油气对二甲醚-柴油双燃料预混燃烧发动机燃烧和排放特性的影响。实验所用发动机为缸内直喷柴油机, 并在原机的基础上增加了一套气体燃料预混合系统, 以使发动机同时实现预混和直喷压燃两种燃烧方式。研究表明: 随着二甲醚/液化石油气混合燃料中液化石油气比例的增加, 预混压燃发动机的燃烧始点滞后, 燃烧持续期缩短, 缸内最大爆发压力和平均燃烧温度逐渐降低, 有效热效率略有下降, 但有效热效率仍高于缸内直喷柴油机; 掺混液化石油气可在颗粒排放基本保持不变的情形下减少 NO_x 的排放。该结果可为设计更为节能、环保的汽车发动机提供参考。

关键词: 双燃料; 二甲醚; 液化石油气; 燃烧; 排放

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0019-05

Effects of LPG on the Combustion and Emission Characteristics of DME-Diesel Dual-Fuel Engines

WANG Ying¹, HUANG Zhiyong¹, KE Xichun¹, LIU Hong²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to overcome the combustion knock caused by preignition of DME, the experimental investigation on the effects of liquefied petroleum gas (LPG) on the combustion and emission characteristics of DME-diesel PCCI was carried out. The experiments were conducted on a modified direct injection diesel engine with port injection of DME and LPG. Results showed that by increasing the proportion of LPG in the DME/LPG mixture, the igniting timing was delayed, the combustion duration was shortened, and the maximum cylinder temperature and pressure gradually decreased. The effective thermal efficiency of the engine declined slightly with an increase of LPG proportion in the DME/LPG mixture, but was still higher than that of DI diesel engine. Moreover, the NO_x emissions were reduced to a certain extent and the particulate emission stayed at the same level when blending LPG into DME. These results can provide a reference for designing more energy-efficient and environment-friendly internal combustion engines.

Keywords: dual-fuel; dimethyl-ether; LPG; combustion; emission

内燃机的广泛使用消耗了大量的化石能源并且产生了大量的污染物,为解决该问题,国内外很多学者都在积极寻找新的替代燃料和探索新的燃烧方式^[1-3]。其中,二甲醚-柴油双燃料预混合压缩燃烧(PCCI)发动机以其较好的燃油经济性以及较低的颗粒物排放^[4-5],得到了国内外学者的广泛关注。但是,由于二甲醚(DME)着火点低、滞燃期短,随着发动机转速和负荷的增加,较高的 DME 预混比会使发动机发生爆燃^[6]。为了抑制 DME 早燃导致的爆燃,本文拟在二甲醚中加入辛烷值较高的液化石油气(LPG)作为着火抑制剂,改变进气道预混合气体的理化性质,抑制 DME 的早燃,推迟燃烧。为此,本文拟开展不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响。

1 实验台架及装置

本文所用的发动机由 2105 柴油机改装而成,2105 柴油发动机是直列、水冷、双缸、四冲程、自然吸气式直喷柴油机,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 2105 柴油机主要技术参数

参数	数值
缸径/mm	105
行程/mm	120
额定功率/kW	21.9
额定转速/r·min ⁻¹	1 700
压缩比	17
排量/L	2.078

本文实验台架布置如图 1 所示,整个实验台架包括气体燃料预混合系统、缸内压力测量系统、排放测量及分析系统等。实验所用发动机原机为缸内直喷柴油机,为了使发动机能够同时实现 DICI 和 PCCI 两种燃烧方式,在保留原柴油机直喷燃油系统的基础上增加了一套气体燃料预混合系统。本实验使用水冷式压电晶体传感器(Kistler 7061)来测量发

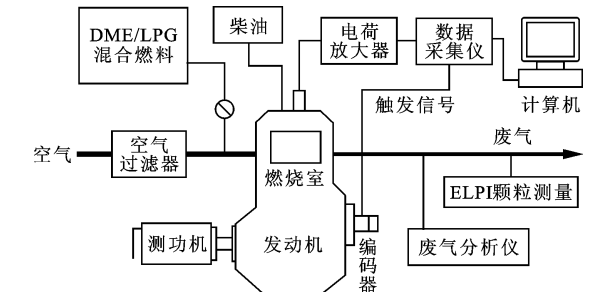


图 1 发动机实验台架布置

动机各时刻的缸内压力,使用 ANSYS 720 测量 NO_x 排放,采用低压电子冲击仪(ELPI)测量颗粒粒径分布。实验所用柴油是商用 0# 柴油,二甲醚的纯度约为 99.9%,LPG 的成分为 60% 丙烷和 40% 丁烷。

实验采用 DME/LPG 的混合燃料来部分替代柴油。为方便分析对比,本实验中定义了预混比,计算公式为

$$r = \frac{B_D H_D + B_L H_L}{B_d H_d + B_D H_D + B_L H_L} \tag{1}$$

式中: B_D 、 B_d 、 B_L 分别为 DME、柴油、LPG 的质量流量(g/s); H_D 、 H_d 和 H_L 分别为 DME、柴油和 LPG 的低热值(J/g)。

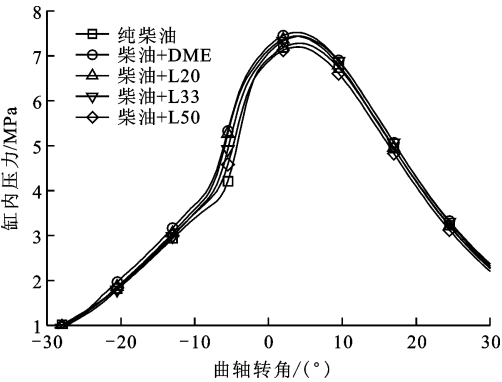
本文研究主要是在供油提前角为上止点前 18°、额定转速为 1 700 r/min、平均指示压力为 0.24 MPa 和额定转速为 1 700 r/min、平均指示压力为 0.48 MPa 两种工况下进行。由于二甲醚预混量较大时会发生明显早燃现象,不利于燃烧和排放的控制,因此着重研究二甲醚预混比较大时($r=40\%$),添加不同比例 LPG 对 PCCI 发动机燃烧和排放特性的影响。本研究中混合燃料 DME/LPG 通过进气道与空气混合以后进入气缸,LPG 和 DME 的 3 种质量比为 1:4、1:2 和 1:1,根据 LPG 所占质量百分比,用代号依次表示为 L20、L33 和 L50。

2 不同比例 LPG 预混燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧特性的影响

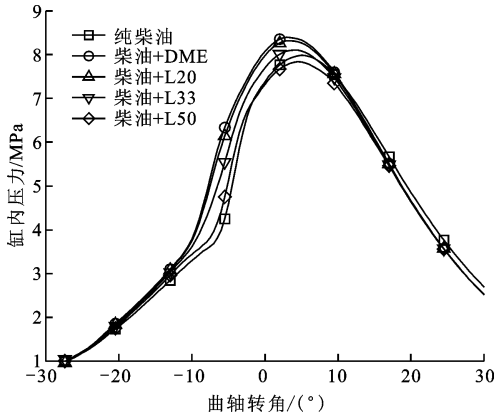
2.1 缸内压力和温度

图 2 所示为添加不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机缸内压力的影响。从图中可以看出,预混燃料中加入 LPG 以后,发动机缸内压力升高的始点与预混纯二甲醚时相比有所推迟,并且随着 LPG 比例的增大,缸内压力曲线依次滞后,在预混燃料为 L50 的情况下,其缸内压力急剧升高的始点与纯柴油缸内直喷基本接近。另外,随着 LPG 比例的增大,PCCI 发动机缸内最大爆发压力逐渐降低,这说明 LPG/DME 混合燃料与空气形成的混合气进入气缸后,二甲醚的早燃现象得到了抑制,LPG 发挥了抑制二甲醚早燃的作用,致使燃烧始点有所滞后,而且随 LPG 比例的增大,上述情况更加明显,因此使得燃烧始点进一步滞后,同时也降低了缸内燃烧的最大爆压力。

图 3 所示为添加不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机缸内温度的影响。从图 3 中可以看

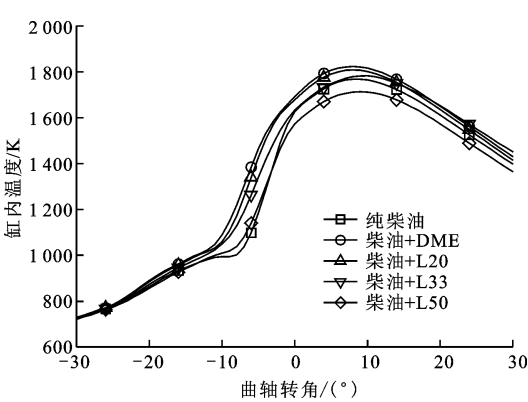


(a)平均指示压力为 0.24 MPa

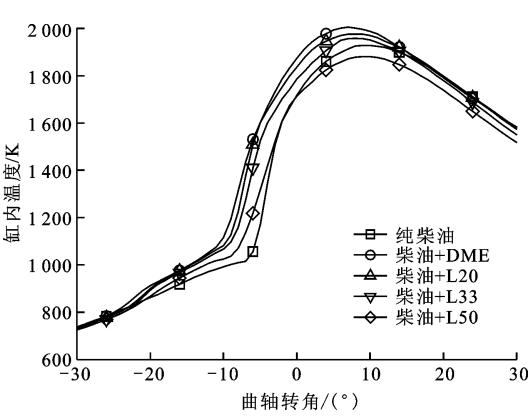


(b)平均指示压力为 0.48 MPa

图 2 不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机缸内压力的影响



(a)平均指示压力为 0.24 MPa



(b)平均指示压力为 0.48 MPa

图 3 不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机缸内温度的影响

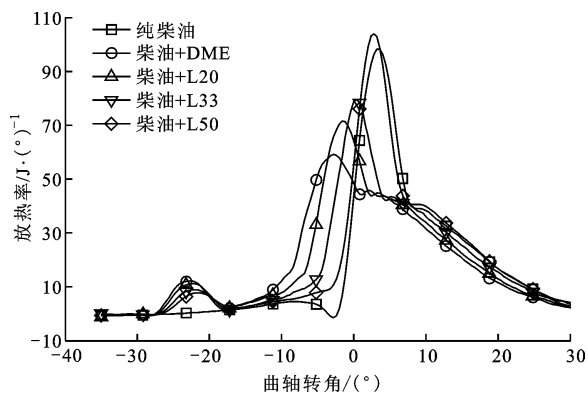
出,随着预混燃料中 LPG 比例的增大,PCCI 发动机的缸内温度逐渐下降,温度峰值对应曲轴转角逐渐滞后。当预混纯二甲醚时,二甲醚的早燃提高了缸内温度,有利于促进柴油的蒸发和混合,燃烧放热过程提前,提高了缸内压力,集中在上止点燃烧,因此温度升高,但是当添加 LPG 以后,LPG 抑制了二甲醚的早燃,相对于预混纯二甲醚时,燃烧滞后,导致缸内压力降低,散热损失增多,因此缸内温度随预混燃料中 LPG 比例的增大而降低。

2.2 燃烧放热率

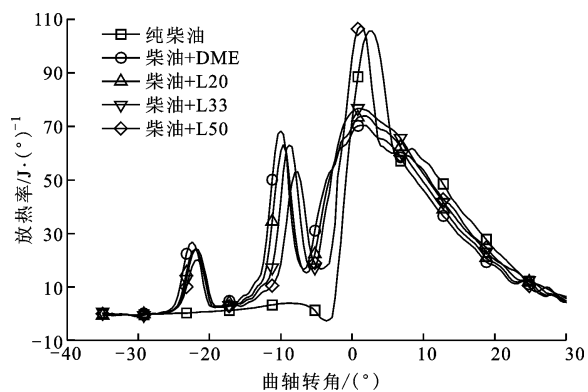
图 4 所示为添加不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机瞬时放热率的影响,从图中可以看出,在平均指示压力为 0.24 MPa 工况下,预混二甲醚的量较少,二甲醚高温 HCCI 燃烧与柴油扩散燃烧同时进行,所以此时 PCCI 发动机的放热过程包括二甲醚低温 HCCI 燃烧和柴油扩散燃烧两阶段。随着预混燃料中 LPG 量的增加,二甲醚低温 HCCI 燃烧阶段的放热率峰值逐渐减小,对应的相位逐渐滞后。这是由于 LPG 辛烷值较高,预混燃料中加入

LPG 后推迟了二甲醚着火时刻,因此二甲醚低温 HCCI 燃烧逐渐推迟,同时随着 LPG 比例的增大,二甲醚的量减少,因此放热率峰值有所减小。随着预混燃料中 LPG 量的增加,柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值逐渐增大,其对应相位逐渐滞后,其中预混 L50 燃料时扩散燃烧阶段的放热率峰值和对应相位与纯柴油发动机十分接近。LPG 比例的增大延长了燃料的滞燃期,因此燃料与空气混合的时间延长,混合气的量增多,使得瞬时放热率曲线的峰值升高。在平均指示压力为 0.48 MPa 工况下,二甲醚量增多,发动机的放热过程分为二甲醚低温 HCCI 燃烧、二甲醚高温 HCCI 燃烧和柴油扩散燃烧 3 个阶段。随着预混燃料中 LPG 量的增加,二甲醚低温 HCCI 燃烧和高温 HCCI 燃烧阶段的放热率峰值逐渐减小,对应相位逐渐后移,柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值逐渐增大,对应相位逐渐滞后。

图 5 所示为添加不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机累积放热率的影响。从图 5 可以看出,发动机的燃烧始点随着 LPG 量的增加而逐渐滞

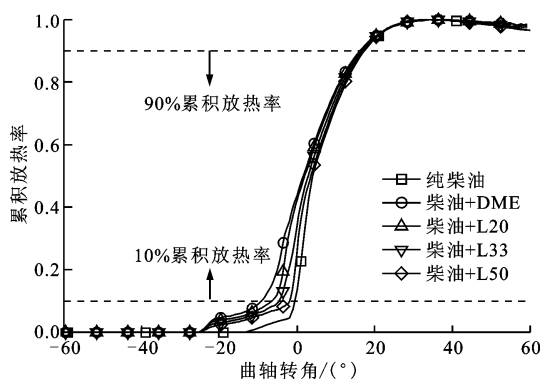


(a) 平均指示压力为 0.24 MPa

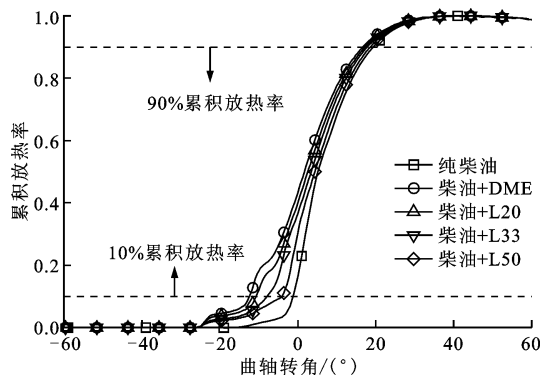


(b) 平均指示压力为 0.48 MPa

图4 不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机瞬时刻放热率的影响



(a) 平均指示压力为 0.24 MPa



(b) 平均指示压力为 0.48 MPa

图5 不同比例 DME/LPG 预混燃料对 PCCI 发动机累积放热率的影响

后:在平均指示压力为 0.24 MPa 工况下,预混 40% 二甲醚时燃烧始点位于上止点前 6.8° ,当 LPG 与 DME 质量比为 1:1 时燃烧始点推迟到上止点前 1.8° ,与纯柴油时的上止点前 0.6° 仅仅相差 1.2° ;在平均指示压力为 0.48 MPa 工况下,预混 40% 二甲醚时燃烧始点位于上止点前 10.6° ,当 LPG 与 DME 质量比为 1:1 时燃烧始点推迟到上止点前 4° ,已经接近纯柴油时的上止点前 1.2° 。这是因为预混燃料中加入 LPG 后,混合气的滞燃期延长,二甲醚 HCCI 燃烧的放热量减小,放热时间推迟,因此燃烧始点逐渐滞后。同时,PCCI 发动机的燃烧终点也随 LPG 量的增大而滞后,但是滞后的幅度明显小于燃烧始点滞后的幅度。因此可以得出,随着预混燃料中 LPG 量的增多,PCCI 发动机的燃烧持续期逐渐缩短。

2.3 有效热效率

图 6 所示为不同比例 DME/LPG 预混燃料对 DI 发动机和二甲醚/柴油双燃料 PCCI 发动机有效热效率 η_{et} 的影响。从图 6 中可以看出,预混燃料中添加 LPG 以后,PCCI 发动机的有效热效率低于预

混纯二甲醚发动机,但是高于 DI 发动机,随着预混燃料中 LPG 比例的增大, η_{et} 略有降低。这是因为 LPG 比例的增大使得燃料滞燃期延长,燃烧推迟,燃烧速率变慢,缸内压力和温度均低于预混纯二甲醚工况,导致发动机当量有效燃油消耗率增加,有效热效率下降,而且在预混燃料 L50 的情况下,由于 LPG 量较多,使得燃料的滞燃期过长,滞燃期内形成较多可燃混合气,导致压力升高率较大,降低了热效率。

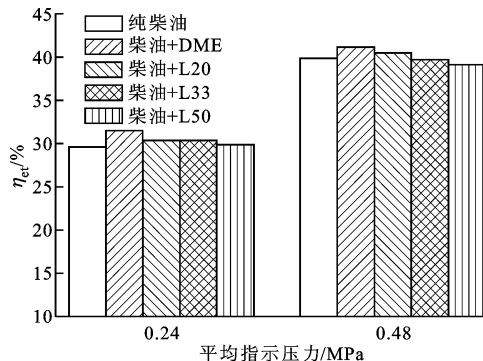


图6 不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机有效热效率的影响

3 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机 NO_x 和颗粒排放特性的影响

图 7 所示为添加不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机 NO_x 排放的影响,从图中可以看出:当预混燃料中 LPG 比例较小时,由于缸内温度相比于预混纯二甲醚工况降低幅度较小,因此 NO_x 排放变化不大;随着预混燃料中 LPG 比例的进一步增大,NO_x 排放呈现下降趋势,但下降幅度并不明显。这是因为 LPG 比例增大后 PCCI 发动机的缸内温度降低比较明显,并且由于燃烧持续期有所缩短,局部高温区域持续时间也缩短,因此 NO_x 排放逐渐降低。图 8 为颗粒物的粒径浓度分布图。图中可以看出,发动机颗粒数量浓度呈单峰分布,颗粒数量浓度峰值主要集中在粒径为 0.055~0.170 μm 的积聚态。对于预混 L20 和 L33 两种燃料的情况,颗粒数量浓度高于预混纯二甲醚工况。这是由于预混纯二甲醚时,二甲醚发生 HCCI 燃烧以后气缸内温度升高,缸内工质的流动加快,从而促进了柴油扩散燃烧阶段的蒸发和混合,减少了局部缺氧区域,降低了颗粒排放。预混燃料中加入 LPG 以后,二甲醚 HCCI 燃烧受到一定抑制,因此相对于预混纯二甲醚时局部缺氧区域有所增多,颗粒排放略微升高,但是随着 LPG 比例的进一步增大,L50 情况下的颗粒排放与预混纯二甲醚时相差不多。这是因为在 L50 情况下,PCCI 发动机的缸内温度大幅度降低,因此破坏了颗粒物生成所需的高温条件,从而降低了颗粒物排放。

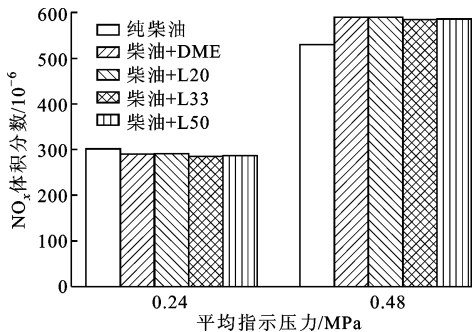
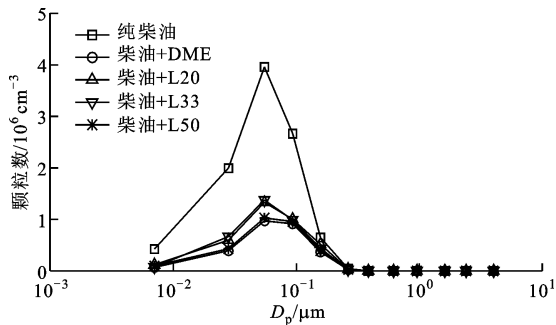


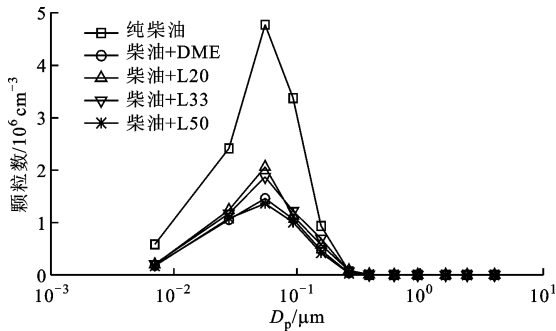
图 7 不同比例 LPG 燃料对二甲醚-柴油双燃料发动机 NO_x 排放的影响

4 结 论

为防止二甲醚-柴油双燃料 PCCI 发动机在二甲醚预混合量较大时发生二甲醚早燃,从而导致燃烧恶化、爆震等情况,可以采用在进气道中添加适量 LPG 的方法来抑制二甲醚的早燃。本文主要研究



(a) 平均指示压力为 0.24 MPa



(b) 平均指示压力为 0.48 MPa

图 8 颗粒物的粒径浓度分布图

添加不同比例 LPG 对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响,获得的主要结论如下。

(1)随着预混燃料中 LPG 比例的增加,二甲醚 HCCI 燃烧阶段的放热率峰值略有下降,对应的相位逐渐滞后;柴油扩散燃烧阶段的放热率峰值逐渐增大,对应相位逐渐滞后。随着燃料中 LPG 比例的增加,二甲醚-柴油双燃料发动机的燃烧始点和终点均逐渐滞后,但是燃烧终点滞后的幅度明显大于燃烧始点滞后的幅度,使得二甲醚-柴油双燃料发动机的燃烧持续期逐渐缩短。

(2)随着预混燃料中 LPG 比例的增加,发动机缸内压力曲线逐渐滞后,缸内压力升高的始点与预混纯二甲醚时相比有所推迟,预混燃料为 L50 时缸内压力急剧升高的始点与纯柴油基本接近;二甲醚-柴油双燃料发动机缸内最大爆发压力和最高温度逐渐降低,缸内压力和温度峰值对应曲的轴转角逐渐滞后。

(3)预混燃料中添加 LPG 以后,二甲醚-柴油双燃料发动机的有效热效率低于预混纯二甲醚发动机,但是高于 DI 发动机,随着预混燃料中 LPG 比例的进一步增大,η_{et}略有降低。

(4)预混燃料中 LPG 比例较小时 NO_x 排放变化
(下转第 80 页)