

DME 部分预混压燃与缸内直喷复合燃烧的研究

李 维¹, 周龙宝², 汪 映², 马 骏¹

(1. 西京学院 汽车学院, 陕西 西安 710123 2. 西安交通大学 能动学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 在单缸二甲醚发动机上开展了 DME 部分预混压燃与缸内直喷混合燃烧 (PCCIDI) 特性的研究。结果表明: DME PCCIDI 发动机具有较低的最高爆发压力和压力升高率。PCCIDI DME 发动机燃烧过程也表现出明显的两阶段放热特点, 和 HCCIDI DME 发动机相比, 两个放热峰值有所下降, 第 1 个放热峰值位置基本不变, 第 2 个放热峰值后移到上止点略后位置。

关键词: PCCIDI 直喷; 二甲醚; 燃烧特性

中图分类号: TK42

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)03-0480-04

Study on Combustion Characteristics of Partial Premixed Charge Compression Ignition—Direct Injection Engine Fueled with Dimethyl Ether

LI Wei, ZHOU Long-bao, WANG Ying, MA Jun

(1. Department of Automobile Xi Jing College Xi'an 710123, Shaanxi China

2. School of Energy & Power Engineering Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049, Shaanxi China)

Abstract: Experimental investigation on the combustion characteristics of PCCIDI combustion by the partial Pilot DME from the intake pipe is carried out. Results indicate that the engine has lower peak cylinder pressure and lesser rise rate of pressure. PCCIDI DME engine also shows an obvious two stage heat release characteristic. Compared with HCCIDI DME engine, the peak values of two heat release stages are reduced, the position of the first peak has almost no change and the position of the second peak shifts to the position near after TDC.

Key words: partial premixed charge compression ignition (PCCIDI); direct injection; dimethyl ether (DME); combustion characteristics

采用均质充量压缩燃烧 (HCCI) 方式可使发动机在中低负荷具有高的热效率和低的 PM 和 NO_x 排放。但 HCCI 目前还未从根本上解决两个技术难题: 着火时刻和燃烧速度的控制, 因此 HCCI 燃烧技术目前只局限在内燃机的中低负荷范围内应用^[1]。有学者提出采用 HCCIDI 双模式的方法, 但运转模式之间的平稳转换在目前还没有较好的解决办法。

为此, 本文采用在同一循环中使用预混进气和缸内直喷的复合燃烧方式 (PCCIDI, partial premixed charge compression ignition direct ignition) 来减少扩散燃烧部分的油量, 从而获得一部分 HCCI 燃烧方式的优点^[2-3]。

由于二甲醚独特的物理化学性质, 本文在一台单缸二甲醚发动机上, 采用一部分 DME 燃料在发动机进气管与空气预先混合形成预混均质混合气进入

气缸, 另一部分 DME 燃料在压缩行程末期利用压燃式发动机的燃油喷射装置喷入燃烧室来实现 PCCIDI 燃烧。利用 AVL 燃烧分析仪测录 PCCIDI 发动机的示功图。并进行了燃烧特性的研究。

1 发动机试验台架

试验发动机由 TY1100 单缸自然吸气直喷柴油机改装而成, 其主要技术参数见表 1。试验布置如图 1。在本试验中, DME 分装在两个气罐之中, DME 的消耗量采用电子秤测量。为了减小罐内气化造成的测量误差, 两个气罐 DME 的出口均设在燃料罐的底部。小气罐通过单向阀和进气管相通, 少量二甲醚被直接引入到进气管中, 得到预混混合气。为了防止喷射系统低压油路发生气阻, 大气罐的 DME 采用电子泵加压后送到喷油泵。根据前期大量试验, 进气预混量的大小对发动机性能影响较大,

收稿日期: 2009-12-20 修订日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50706038)

作者简介: 李 维 (1965—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事汽车发动机代用清洁燃料方面的研究工作。E-mail: liwe6512@

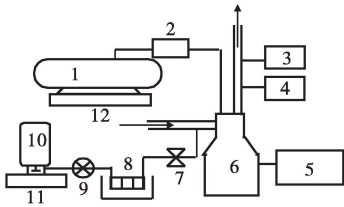
预混进气量太大, 发动机容易出现爆震, 预混进气量太小, 对燃烧的改善效果不明显, 因此试验中采用了 30.4 mg/cyc 和 20.8 mg/cyc 两种 DME 进气预混量^[4]。

因为 DME 对橡胶有腐蚀作用, DME 燃料的供给管路采用铜管。试验中使用的二甲醚纯度为 99.9% 工业用二甲醚, 其密度为 $0.668 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 自燃温度为 235℃。

表 1 发动机的主要技术参数

Tab 1 Main technical parameters of the engine

技术参数	性能指标
气缸直径/mm	100
活塞行程/mm	115
压缩比	18
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 300
额定功率/kW	10



1 大 DME 燃料罐; 2 电子泵; 3 排气分析仪; 4 烟度计; 5 测功机; 6 发动机; 7. 流量调节阀; 8 加热器; 9. 单向节流阀; 10. 小 DME 燃料罐; 11. 小电子称; 12 大电子称

图 1 P 试验台架布置

Fig 1 The arrangement of test bed

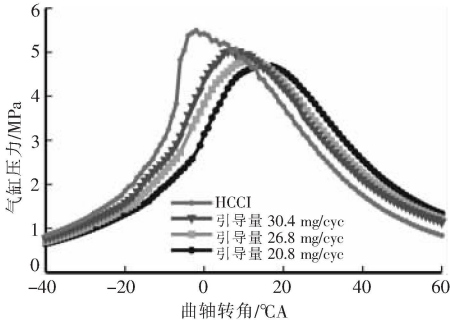
2 示功图及压力升高率

图 2 和图 3 分别为 $n=1\,800 \text{ r/min}$, $p_{me}=0.3 \text{ MPa}$ 时, 不同的 DME 进气引导量下 DME PCCID 发动机的缸内压力及压力升高率曲线。为了便于和 DME HCC 发动机进行比较, 图中同时给出了 DME HCC 发动机的压力及压力升高率曲线。

通过对所测录的示功图进行分析, 可以发现 DME PCCID 发动机的最高爆发压力和最大压力升高率, 无论在数值上还是所对应的曲轴转角位置都与 DME HCC 有较大差别。DME HCC 发动机的最高爆发压力为 5.49 MPa; 对应的曲轴转角在上止点前 2℃A; PCCID 发动机的最高爆发压力在 4.71~5.03 MPa 之间, 比 HCCI 发动机低 0.46~0.78 MPa; 对应的曲轴转角在上止点后 7~16℃A。最高爆发压力发生位置相比 HCC 发动机更为合理。在负荷较大时, 较低的最高爆发压力使得发动机的机械负荷低, 机械效率高, 有利于提高其热效率。

从图 2 可以发现, 在平均有效压力相同的情况下, 随着预混燃油量的减少, PCCID 发动机的缸内最高爆发压力有所下降, 最高爆发压力发生的角度

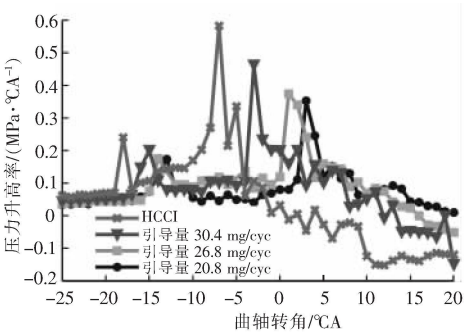
也略有推迟。对于本文所采用的 3 种 DME 进气引导量来说, 在喷油推迟的情况下, PCCID 发动机最高爆发压力发生的角度仍然处于比较合适的位置。



($n=1\,800 \text{ r/min}$, $p_{me}=0.3 \text{ MPa}$)

图 2 不同 DME 引导量的示功图比较

Fig 2 Cylinder pressure comparison of different DME Pilot quantity



($n=1\,800 \text{ r/min}$, $p_{me}=0.3 \text{ MPa}$)

图 3 不同 DME 引导量的压力升高率比较

Fig 3 Rising rate of pressure comparison of different DME Pilot quantity

此外, DME PCCID 发动机气缸压力曲线在最高爆发压力处的变化相对平缓, 高压持续时间长, 也有利于热效率的提高^[5]。

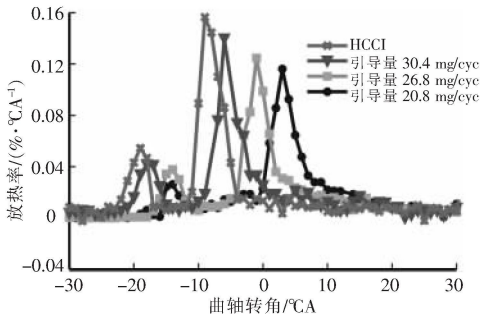
从图 3 的压力升高率曲线来看, DME PCCID 发动机的每一条压力升高率曲线也具有两个波峰, 两个波峰间仍然有一压力升高率接近 0 的间隔区域, 这一点和 HCC 发动机极为相似, 且第 1 个波峰出现的位置差别不大, 主要由于燃烧过程前期仍然是 HCC 燃烧而引起的。压力升高率曲线的主要差别在于 DME PCCID 发动机最大压力升高率较低、曲线上的两个峰值之差较小, 两个波峰之间压力升高率接近 0 的间隔区域较宽, 主要缘于前期以 HCCI 方式燃烧的预混混合气量减少的原因。

从不同 DME 进气引导量下的压力升高率来看, 随着 DME 进气引导量的减少, 虽然第 1 个峰值点的大小和位置变化不大, 但是第 2 个峰值不断减小, 且位置逐渐推后。当 DME 进气引导量从 30.4 mg/cyc 减少到 20.8 mg/cyc 时, 最高压力升高率就由 0.463 MPa/℃A 降低到 0.353 MPa/℃A。最高压力升高率

出现的位置由 3℃ A BTDC 后移至 3℃ A ATDC 但两个波峰间的间隔区域变化不大, 仅由 12℃ A 增加至 15℃ A (表 2)。出现这样结果的原因是, 负荷不变时, 随着引导量的减少, 喷油量增加, 喷油持续期延长, 燃烧相对变缓, 且由于 DME 汽化潜热较大, 喷入气缸的 DME 要吸收较多热量, 因此, 随着 DME 进气引导量的减少, 喷油量增加, 喷油持续期延长, 燃烧相对变缓, 且由于 DME 汽化潜热较大, 喷入气缸的 DME 要吸收较多热量, 因此, 随着 DME 进气引导量的减少, 喷油量增加, 最大压力升高率减小, 最大压力升高率出现的位置也相应推后。但由于影响压力升高率曲线上第一个峰值出现的位置的主要因素是滞燃期的长短^[6], 由于引导量变化不大, 转速不变时, 预混可燃混合气着火前进行物理化学准备的时间以曲轴转角计相差不多, 第 1 个峰值出现的位置变化也不会太大。

3 放热规律

图 4 给出了 DME PCCID 发动机的和 DME HCC 发动机 $n=1800\text{ r/min}$, $p_{me}=0.3\text{ MPa}$ 时的放热率曲线。图中 DME PCCID 发动机的燃烧过程也表现为两个阶段放热过程, 第 1 阶段放热较少, 第 2 阶段放热较多, 为主放热阶段。PCCID 燃烧模式下, 放热曲线整体后移。



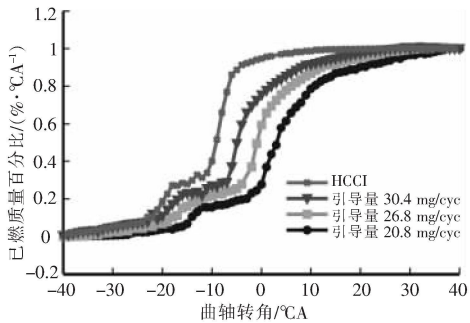
($n=1800\text{ r/min}$, $p_{me}=0.3\text{ MPa}$)

图 4 不同 DME 引导量的放热率比较

Fig 4 Heat releasing rate comparison of different DME Pilot quantity

在转速、负荷不变时, 随着 DME 引导量的减少, 预混合气变稀, 但第 1 阶段开始放热的时刻和放热率峰值并没有发生明显的变化。但第 2 阶段放热率峰值较大, 且位置随着 DME 引导量的增加不断前移, 燃烧持续期缩短。这说明, 在试验所选取的 3 种 DME 引导量下, 由于预混均质混合气的浓度变化不大, 对二甲醚低温反应的影响较小, 但是较浓的预混合气会加速二甲醚高温反应, 从而使二甲醚 HCCI 燃烧的第 2 阶段放热提前, 并且放热速度也略有加快, 燃烧持续期缩短。

为了便于比较不同 DME 进气引导量大小对燃烧过程的影响, 图 5 给出了 HCC 发动机和 PCCID 发动机不同 DME 引导量下的累积放热率 (已燃质量百分比) 曲线。



($n=1800\text{ r/min}$, $p_{me}=0.3\text{ MPa}$)

图 5 不同 DME 引导量的累积放热率比较

Fig 5 Cumulative heat releasing rate curve of different DME Pilot quantity

从图 5 中可以看出: 在累积放热率曲线上均有变化极为缓慢的一段, 这是由于推迟喷油后, PCCID 混合燃烧的前一段是 HCC 的燃烧过程, 在低温放热阶段结束以后, 由于负温度反应系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 效应, 系统温度虽然升高, 但系统总体反应速率不增反降, 因此, 累积放热率增加缓慢^[7]。

在 $n=1800\text{ r/min}$, $p_{me}=0.3\text{ MPa}$ 的工况下, HCC 发动机累积放热率为 10% 时对应的曲轴转角为 22℃ A BTDC 燃烧结束位置 (累积放热 90%) 在 4℃ A BTDC 快速燃烧期持续角度为 18℃ A 燃烧速度快, 但燃烧过于靠前, 造成发动机压缩负功增加, 不利于提高热效率。对于 PCCID 发动机, 当 DME 进气引导量从 30.4 mg/cyc 减少到 20.8 mg/cyc 时, 累积放热 10% 对应的曲轴转角变化不大, 从 20℃ A BTDC 推迟到 14℃ A BTDC 变化 6℃ A; 但燃烧结束点对应的曲轴转角从 8℃ A ATDC 推迟到 20℃ A ATDC 变化 12℃ A。快速燃烧期 (从累积放热 10% 到 90%) 的持续角度变化不大, 在 28~34℃ A 之间。这说明随着 DME PCCID 发动机喷油推迟, 整个燃烧后移, 但燃烧持续时间变化不大。此外, 和 DME 直喷发动机相比, 燃烧并没有推后^[8]。其原因在于 DME PCCID 发动机在上止点附近所喷入的 DME 是直接喷入高温火焰当中, 蒸发扩散快, 滞燃期短, 因此, 燃烧速度较快, 表明 DME PCCID 发动机的燃烧过程具有部分 HCC 燃烧的优点。正是基于这一特点, DME PCCID 发动机完全可以采用适当推迟喷油的方法来降低发动机机械负荷和 NO_x 排放。

表 2 PCCIDI 与 HCC 燃烧过程的比较
Tab 2 Comparison of PCCIDI and HCCI combustion process

		HCCI	引导量 30.4 mg/cyc	引导量 30.4 mg/cyc	引导量 30.4 mg/cyc
压力	最高爆发压力 /MPa	5.49	5.03	4.81	4.71
	最高爆发压力发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-2	7	12	14
	压力升高第 1 峰值 /($\text{MPa}\cdot^{\circ}\text{CA}^{-1}$)	0.240	0.202	0.175	0.173
压力 升高率	压力升高第 1 峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-18	-15	-14	-12
	最大压力升高率 /($\text{MPa}\cdot^{\circ}\text{CA}^{-1}$)	0.583	0.463	0.374	0.353
	最大压力升高率发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-7	-3	1	3
	两个峰值间隔角度 / $^{\circ}$ CA	11	12	15	15
放 热 率	第 1 阶段放热峰值 /%	0.055	0.042	0.037	0.026
	第 1 阶段放热峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-20	-18	-14	-12
	第 2 阶段放热峰值 /%	0.156	0.130	0.122	0.110
	第 2 阶段放热峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-9	-5	-1	3
累积 放热率	累积放热 10% 对应的角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-22	-20	-18	-14
	累积放热 90% 对应的角度 /($^{\circ}$ CA ATDC)	-4	8	12	20
	累积放热 10% 到 90% 时的持续角度 / $^{\circ}$ CA	18	28	30	34

3 结 论

1) DME PCCIDI 发动机具有较低的最高爆发压力和压力升高率, 发动机工作柔和;
2) DME PCCIDI 发动机的燃烧也表现出明显的两阶段放热特点, 主放热阶段靠近上止点, 放热量大, 燃烧迅速, 燃烧持续时间较短, 热效率高;
3) 相对于 DME 直喷发动机, DME PCCIDI 发动机的燃烧持续期短, 燃烧速度较快, 因此, 可以采用推迟喷油的方法来降低 NO_x 排放。

参考文献:

[1] 朱驰, 刘圣华. 二甲醚均质充量压燃发动机排放特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2004 22(1): 51—54.

[2] Gary D N, Shizuo S, Jeffrey A L. Experimental investigation of PCCIDI combustion on emissions in a light-duty diesel engine [J]. SAE transaction 2004 113(4): 197—207.
[3] 蒋德明, 陈常佑, 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: 1—50.
[4] 李维. 二甲醚发动机部分均质压燃与缸内喷射混合燃烧的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
[5] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999 105—110.
[6] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 300—310.
[7] 尧命发, 郑尊清, 汪洋, 等. DME/CNG 双燃料均质压燃发动机性能试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2004 10(2): 61—65.
[8] 王贺武. 直喷柴油机燃用二甲醚时性能和排放的试验与理论研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.

(上接第 449 页)

[8] 尚敏, 易庆林, 王征亮, 等. 三峡库区库岸塌岸机理与防治措施研究[J]. 人民长江, 2008 39(12): 1—2.
[9] 贺可强, 王荣鲁, 李新志, 等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测: 以三峡库区八字门滑坡分析为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008 27(8): 1644—1651.
[10] 唐晓松, 邓楚键, 郑颖人, 等. 三峡库区碎石土地基浸水试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008 4(2): 226—229.
[11] 李邵军, Knappett J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008 27(8): 1586—1593.

[12] 陈韶光, 柳群义. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和渗流分析[J]. 公路工程, 2008 33(6): 55—59.
[13] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
[14] 殷跃平, 胡瑞林. 三峡库区巴东组 (T₂b) 紫红色泥岩工程地质特征研究[J]. 工程地质学报, 2004 12(2): 124—135.
[15] 卫管一, 张长俊. 岩石学简明教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
[16] 刘国钧, 王徽枢, 陈扬杰, 等. 矿物学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993.