

# 燃烧与供油系统参数对二甲醚发动机热效率的影响

汪映<sup>1</sup>, 李维<sup>1,2</sup>, 朱威<sup>1</sup>, 胡铁刚<sup>1,3</sup>, 周龙保<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 空军工程大学导弹学院, 713800, 陕西 三原;  
3. 长安汽车集团, 400023, 重庆)

**摘要:** 采用一部分二甲醚(DME)燃料在发动机进气管与空气预先混合形成均质混合气进入气缸, 另一部分 DME 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实现部分预混充量压缩着火与燃料直接喷射(PCCI-DI)燃烧, 开展了燃烧与供油系统参数对 DME PCCI-DI 发动机热效率影响的试验研究. 结果表明: 在 DME 进气引导量为每循环 31.6 mg 的条件下, 采用 5 孔、 $\varnothing 0.32$  mm 的喷油嘴, 16 MPa 的启喷压力, 较低的涡流比和推迟喷油, 可改善 TY1100 DME PCCI-DI 发动机的热效率, 使发动机在较宽广的转速和负荷范围内稳定运转.

**关键词:** 部分预混充量压缩着火; 燃料直接喷射; 二甲醚

**中图分类号:** TK42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0528-04

## Effect of Parameters of Combustion and Fuel System on Brake Thermal Efficiency of Dimethyl Ether Engine

WANG Ying<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>1</sup>, HU Tiegang<sup>1,3</sup>, ZHOU Longbao<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi, 713800, China; 3. Chang'an Automobile Group, Chongqing 400023, China)

**Abstract:** Partially premixed charge compression ignition-direct injection(PCCI-DI) combustion can be realized by the way in which the partial homogeneous mixture composed of the pilot dimethyl ether (DME) and air enters the cylinder through the intake pipe and other DME fuel is directly injected into the cylinder with fuel injection equipment of the CI engine at the terminal stage of a compression stroke. Experiment investigation on parameters of a combustion and fuel system on the brake thermal efficiency of a DME engine at the PCCI-DI mode was performed. The results show that with a DME pilot quantity of 31.6 mg per cycle, a 5  $\varnothing 0.32$  mm nozzle, a 16 MPa nozzle opening pressure, a lower swirl ratio and a retarded fuel delivery advance angle, the brake thermal efficiency of the TY1100 PCCI-DI DME engine could be improved and the engine could operate at a wider range of speed and load.

**Keywords:** partial premixed charge compression; direct injection; dimethyl ether

均质充量压缩燃烧(HCCI)方式近年来受到普遍关注, 被称为内燃机的第 3 种燃烧方式. 采用 HCCI 燃烧方式可使发动机在中低负荷具有高的热效率和低的  $\text{NO}_x$  和 PM 排放, 但目前它在控制着火定时和放热率上存在较大的困难, 短期内在压燃式发动机上的应用还难以取得突破性进展, 因此采用

部分预混充量压缩着火与燃料直接喷射(PCCI-DI)的混合燃烧方式将成为目前解决压燃式发动机排放问题的有效方法之一<sup>[1-3]</sup>. 本文拟在一台初步实现 PCCI-DI 燃烧的单缸二甲醚(DME)发动机上, 研究发动机燃烧与喷射系统参数对其热效率的影响, 以优化 PCCI-DI 燃烧, 扩大 PCCI-DI 发动机的稳定工

作范围.

1 PCCI-DI 燃烧方式

PCCI-DI 是一种部分预混充量压缩着火和燃料直接喷射燃烧的组合工作方式,预混合燃料可采用进气管喷射或用很早向气缸直喷的办法向气缸供给燃料,燃料供给量(质量分数)在 10%~70%之间,在压缩上止点附近向气缸直接进行主喷射.随着预混燃油量和主喷射定时的变化,HCCI 燃烧和柴油机扩散燃烧可依次进行或叠加进行.本文采用一部分 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 PCCI-DI 燃烧.整个燃烧过程的前期是预混稀薄混合气燃烧,初始燃烧温度低,后期 DME 喷入的时间又较晚,缸内最高燃烧温度也较低,有利于抑制 NO<sub>x</sub> 的生成,加上 DME 是含氧燃料,没有 C—C 键,发动机可实现无烟排放.此外,由于主喷射装置喷入的 DME 滞燃期很短,DME 油束遇到高温燃气后迅速着火并形成多个火焰中心,大大缩短了火焰传遍整个燃烧室的距离,使整个燃烧持续期缩短,发动机燃油经济性也不会恶化<sup>[4-5]</sup>.

2 DME PCCI-DI 发动机试验台架

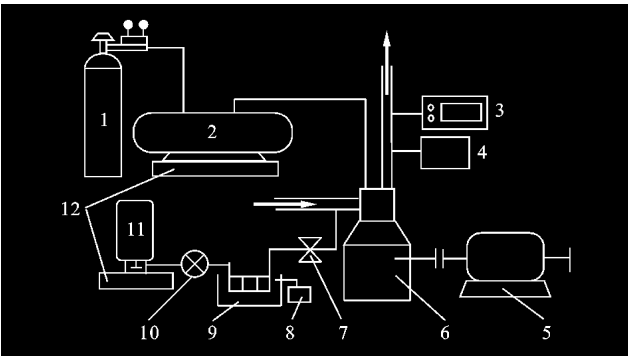
本文在一台 TY1100 单缸自然吸气直喷式压燃 DME 发动机上开展了试验研究,其主要技术参数见表 1.试验布置如图 1 所示.在本试验中,采用小气罐盛装从进气管引入的 DME 燃料(小气罐的容积为 12 L),小气罐放在电子秤(ES-20KA 型,测量精度为 0.1 g)上,可以方便地实现 DME 消耗量的测量.DME 出口设在燃料罐的底部,避免了罐内气化造成的测量误差.小气罐和单向阀之间用耐高压管连接,然后通过单向阀和铜管相连接.由于单向阀具有节流作用,这样少量的 DME 被直接引入到进气管中,得到预混混合气.一个高压氮气瓶被加到燃料供给系统中,用于防止燃油系统中出现气阻.在 DME PCCI-DI 发动机中,由于 DME 进气引导量的大小直接关系到喷射油量的大小,如果引导量过大,发动机极易出现爆震导致性能恶化,但如果引导量过小,对发动机排放的改善又不明显.作者根据前期的试验研究结果,选择了每循环 31.6 mg 的 DME 进气引导量进行试验.

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 DME 是山东久泰

化工科技有限公司生产的纯度(质量分数)为 99.9%的工业用 DME,其十六烷值为 60,密度为  $0.668\times10^3\text{ kg/m}^3$ ,自燃温度为 235 ℃.

表 1 发动机的主要技术参数

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 气缸直径/mm                  | 100   |
| 活塞行程/mm                  | 115   |
| 压缩比                      | 18    |
| 额定转速/r·min <sup>-1</sup> | 2 300 |
| 额定功率/kW                  | 10    |



1:氮气瓶;2:DME 大燃料罐;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:温度仪;  
9:加热器;10:单向节流阀;11:DME 小燃料罐;  
12:电子秤

图 1 DME PCCI-DI 发动机试验台架布置

3 试验结果及分析

试验用发动机原有的燃烧和燃油系统主要参数是为配合高速直喷方式的性能要求而设计的,本试验由于采用了预混与直接喷射结合的燃料供给方式,因此原直喷方式发动机燃烧和燃油系统的主要参数无论是供油提前角  $\theta$ (静态)、喷油器结构参数、涡流强度  $\Omega$ ,还是喷油器启喷压力  $p$  等主要参数都需进行优化.

3.1 供油提前角(静态)对发动机热效率的影响

供油提前角对发动机燃烧过程影响很大,供油提前角的大小取决于燃料喷入气缸的雾化、加热、蒸发、扩散、与空气混合等物理准备过程和氧化放热、着火自燃等化学准备过程.若供油提前角过大,燃料的滞燃期延长,滞燃期形成的预混合气量增多,初期燃烧放热量大,缸内最高爆发压力和温度升高,NO<sub>x</sub> 排放恶化.若供油提前角过小,大部分燃料将在活塞过上止点后喷入,热量利用的有效性下降,在低负荷时排气温度较低,抑制了 HC 和 CO 的氧化,使 HC 和 CO 排放恶化,因此每一个工况下都有一个最佳供油提前角.过早或过迟喷油对燃烧和排放都有一

定影响。

从图2可以看出:在标定转速下,当进气引导量为每循环31.6 mg时,DI DME PCCI发动机的最佳供油提前角 $\theta$ 为上止点前 $11^\circ$ (以下角度均为上止点前),小于原直喷式DME发动机的最佳供油提前角( $19^\circ$ )。这主要是由于采用了DME引导进气后,预混燃烧数量增加,若采用较大的供油提前角会进一步使得燃料在压缩过程中燃烧的量增多,不但增加了压缩负功,使油耗增高、功率下降,而且使压力升高率和最高爆发压力增加,工作粗暴,但如果供油提前角过小,则喷入的燃料不能在上止点附近及时燃烧,后燃增加,油耗、排温升高,发动机过热。

在转速负荷一定的情况下,从进气管进入的DME量的大小直接关系到从喷嘴喷射的燃料量。当转速一定时,从喷嘴喷出油量的多少又决定了喷油持续期的长短,因此对于不同的DME进气引导量,有一个最佳供油提前角。本试验结果表明,在每循环31.6 mg的进气引导量下,推迟喷油可提高DME PCCI-DI发动机的热效率。

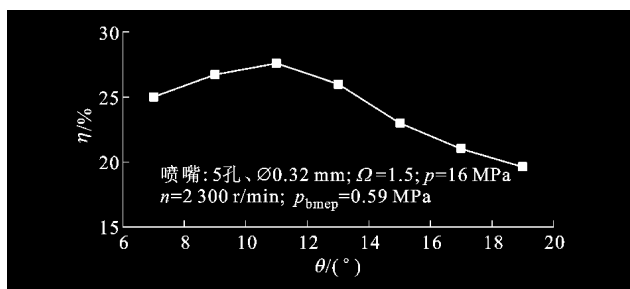


图2 供油提前角对发动机热效率的影响

### 3.2 喷油器型式对发动机热效率的影响

混合气形成及燃烧方式不同,对喷雾质量及油束与燃烧室配合的要求也不同,所要求的喷油器结构也不同。由于DME的物理化学性质不同于柴油,而且PCCI-DI燃烧方式也不同于传统的压燃着火方式,因此它所要求喷油器型式(孔数、喷孔直径)必然也与直喷式发动机所要求的喷油器不同。本文对3种不同型式的喷嘴进行了试验。3种喷油器分别为5孔、 $\varnothing 0.32$  mm,6孔、 $\varnothing 0.28$  mm和原机的4孔、 $\varnothing 0.30$  mm,喷孔总面积分别为原机的142%、130%和100%,启喷压力 $p$ 均为16 MPa。试验工况选择 $n=1\,800$  r/min的中速工况。由图3可以看出,在负荷较低时,采用6孔、 $\varnothing 0.28$  mm的喷油器时,发动机的热效率较高,原因是在每循环DME进气引导量不变时,低负荷工况下喷油器喷油量较小,多孔数、小孔径的喷油器喷雾质量较好,有利于混合气形

成。在负荷比较大时,喷油器喷射的燃油量较多,采用较大的喷孔面积有利于缩短喷油持续期,减小后燃,因此在负荷比较大时,采用5孔、 $\varnothing 0.32$  mm的喷油器可以取得较高的热效率。从图3可以看出,采用5孔、 $\varnothing 0.32$  mm的喷油器,发动机在较大负荷范围内可以具有相对高的热效率。

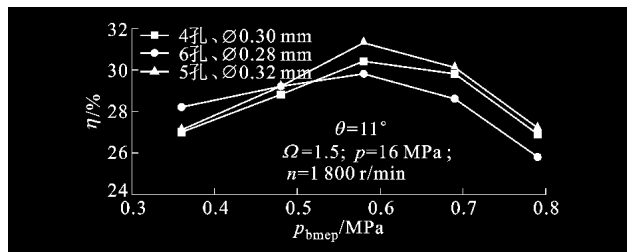


图3 喷油器型式对发动机热效率的影响

### 3.3 喷油器启喷压力对发动机热效率的影响

从图4可以看出:过高和过低的启喷压力均会影响发动机的热效率,喷油器启喷压力为14 MPa时DME PCCI-DI发动机的热效率最高,但不同启喷压力下的DME PCCI-DI发动机的热效率相差不多。另外,试验中还发现,虽然发动机在喷油器启喷压力为14 MPa时可以获得较高的热效率,但在长时间运转后高压油管中会出现气阻现象,导致发动机功率下降。在喷油器启喷压力为16 MPa时,高压油管中的气阻现象基本消失,且发动机的热效率下降很少。因此,试验中DME PCCI-DI发动机的喷油器开启压力选择为16 MPa。

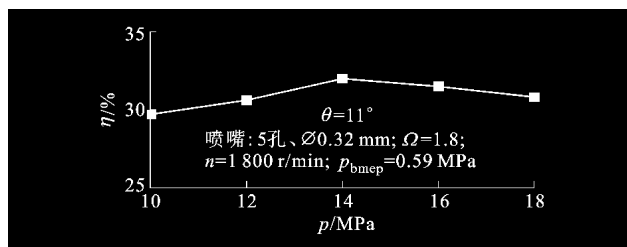


图4 喷油器启喷压力对发动机热效率的影响

### 3.4 涡流比 $\Omega$ 对发动机热效率的影响

组织进气涡流的目的是为了增强燃料与空气的混合。DME PCCI-DI发动机由于一部分燃料是通过喷雾进入燃烧室的,需要一定的进气涡流来帮助其雾化和与空气混合。进气涡流过强,则气缸内的空气扰动加强,燃料不能与空气充分混合,混合气浓度发生变化,致使发动机热效率下降。同时,由于发动机多采用喷孔数目较多的喷油器,过强的涡流一方面会增加热力损失,另一方面会使相邻油束之间发生干涉,即从涡流上游方向吹来的燃烧产物会妨碍

位于下游的油束充分燃烧,使性能下降.相反,如果涡流过弱,混合气浓度分布和燃烧不好,也会使性能下降.因此,存在一个最佳的涡流强度.

本试验采用西安交通大学研究开发的可变涡流进气系统获得不同的涡流比<sup>[6-7]</sup>.从图5可以看出,随着涡流比 $\Omega$ 从0.7增大到1.5,DME PCCI-DI发动机的热效率不断增加,但随着涡流比的进一步增大,发动机的热效率反而有所下降.从图6还可以看出,当进气涡流比小于1.5时,DME PCCI-DI发动机的热效率随进气涡流比的变化较小,进气涡流比大于1.5时,发动机的热效率随进气涡流比的增大下降较快,这说明过强的进气涡流不利于提高DME PCCI-DI发动机的热效率,DME PCCI-DI发动机倾向于使用较小强度的进气涡流.

由于DME PCCI-DI发动机采用一部分DME燃料由进气管导入形成预混混合气,所以由喷油器喷入燃烧室的DME燃油量减少.因此,对应DME PCCI-DI发动机的最大热效率的涡流比相应地也小于直喷式DME发动机最大热效率对应的涡流比1.8.

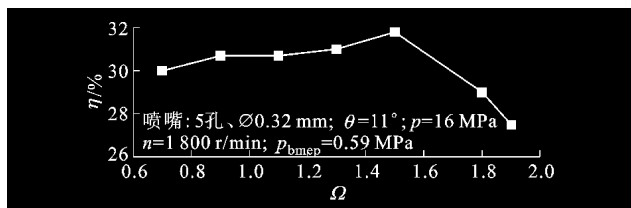


图5 涡流比对发动机热效率的影响

## 4 结 论

(1) DME PCCI-DI发动机的一部分DME燃料是通过进气管预混进入气缸的,气缸内的预混混合气量较大,可以缩短从喷油器喷入缸内燃油的滞燃期,因此采用PCCI-DI工作方式时,可在DME直喷发动机供油提前角的基础上进一步推迟喷油.

(2) 由于DME PCCI-DI发动机采用一部分DME燃料由进气管导入形成预混混合气,这样由喷油器喷入燃烧室的DME燃料量减小,因此DME PCCI-DI发动机达到最大热效率时对应的涡流比为1.6,相应地小于直喷式DME发动机达到最大热效率时对应的涡流比1.8.

(3) 供油提前角、喷油器结构参数及启喷压力等参数均对PCCI-DI DME发动机的热效率有一定影响,其中以供油提前角的影响最大.

(4) 以提高发动机热效率为目标对DME PCCI-

DI发动机的燃烧和燃油系统的主要参数进行优化后,发动机可以在宽广的转速和负荷范围内稳定运转.

## 参考文献:

- [1] 汪映,李维,胡铁刚,等.准均质压燃二甲醚发动机的性能与排放特性研究[J].内燃机工程,2007,28(3):67-70.  
WANG Ying, LI Wei, HU Tiegang, et al. Investigation on performance and emission characteristics of QHCCI DME engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3):67-70.
- [2] SIMESCU S, RYANT W, NEELY G D, et al. A review of experimental and simulation studies on controlled auto-ignition combustion: SAE paper, 2001-01-1890 [R]. Washington, USA: Society of Automotive Engineers Inc., 2001.
- [3] GARY D N, SHIZUO S, JEFFREY A L. Experimental investigation of PCCI-DI combustion on emissions in a light-duty diesel engine: SAE paper, 2004-01-0121 [R]. Washington, USA: Society of Automotive Engineers Inc., 2004.
- [4] TIMOTHY J J, DENNIS N A. The attainment of premixed compression ignition low-temperature combustion in a compression ignition direct injection engine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, (31)2:2913-2920.
- [5] KEIICHI O, KAZUTOSHI M, SHIROH S, et al. Premixed compression ignition (PCI) for simultaneous reduction of  $\text{NO}_x$  and soot in diesel engine: SAE paper, 2004-01-1907 [R]. Washington, USA: Society of Automotive Engineers Inc., 2004.
- [6] 刘圣华,周龙保,李向荣,等.发动机诱导产生进气涡流和可调进气涡流的研究[J].燃烧科学与技术,1999,5(2):218-223.  
LIU Shenghua, ZHOU Longbao, LI Xiangrong, et al. Investigation on induced inlet swirl and variable swirl system for diesel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1999, 5(2):218-233.
- [7] 赵慧,杨延相,冯适,等.可变涡流进气系统及其在直喷式汽油机中的应用[J].内燃机学报,1999,17(1):36-41.  
ZHAO Hui, YANG Yanxiang, FENG Shi, et al. Variable swirl control system and its application in the direct injection gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 1999, 17(1):36-41.

(编辑 王焕雪)