

二甲醚发动机燃料供给系统偶件间隙泄漏测量

高广新¹, 袁竹林², 周阿朋¹, 刘圣华¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安汽车科技职业学院, 710038, 西安)

摘要: 为了精确测量二甲醚发动机燃料供给系统中偶件间隙的燃料泄漏量,设计了一套适用于测量微小流量的测量装置.该装置在活塞压力计基础上通过排除油缸自身泄漏,精确地建立了恒定压力,以实现恒温、恒压下间隙燃料泄漏量的测量,包括三组偶件的泄漏量和柱塞偶件不同位置的泄漏量.通过理论计算验证了测量的精确性,结果表明:偶件泄漏量从大到小依次为柱塞—针阀—出油阀,柱塞偶件不同部位泄漏量从大到小依次为进回油孔—泄油槽—裙部;二甲醚泄漏量几乎为柴油的1.8倍,且随着密封长度的增加该倍数减小.通过实测柴油泄漏量反算获得了间隙高度,再由间隙高度计算得到的二甲醚泄漏量,并与测量结果进行了对比,从而验证了测量装置的精确性.

关键词: 二甲醚;偶件间隙;泄漏;测量

中图分类号: TK42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0012-05

Measurement of Plunger Couples Surface Gap Leakage for DME Engine Fuel Delivery System

GAO Guangxin¹, YUAN Zhulin², ZHOU Apeng¹, LIU Shenghua¹

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

2. Xi'an Autotechnology Vocational College, Xi'an 710038, China)

Abstract: To measure the leakage for couple surface gap of dimethyl ether (DME) engine fuel delivery systems accurately, a test device was developed on the basis of a piston pressure gauge without leakage. The device can establish isopiestic pressure and measure the leakage under the condition of constant temperature and isopiestic pressure. The leakages for couples including five positions of plunger and barrel assembly were measured, and the tested results were compared with those of diesel fuel. Moreover, the measurement accuracy of the device was verified by the theoretical calculation. The results show that the leakages for couples and the plunger piston are in sequence of plunger piston > needle valve > delivery valve and inlet and outlet holes > drain pan > skirt; the leakage of DME is 1.8 times that of diesel fuel and the multiple decreases with an increase in sealing length. In addition, the measured data were compared with the results calculated with the couple surface gap from the leakage of diesel fuel and the calculated results are consistent with the measured data.

Keywords: dimethyl ether; couples surface gap; leakage; measurement

二甲醚作为代用燃料是解决能源短缺和环境污染两大难题的有效途径^[1-4].二甲醚分子结构(CH₃—O—CH₃)简单,分子中没有C—C键且氧的质量分数高达34.8%,与柴油发动机相比,二甲醚发动

机的热效率高,碳烟、颗粒、HC和CO排放低,且NO_x排放可以通过高比例废气再循环率(EGR)进一步降低^[5],因此二甲醚成为世界上最有前景的代用燃料.

二甲醚的分子长度仅为 0.361 nm,远小于偶件表面的粗糙度;二甲醚饱和蒸气压力高,20 ℃时约为 0.5 MPa;二甲醚的运动黏度为 0.15 mm/s²,远小于柴油。但是,这 3 个特点却导致二甲醚在燃料供给系统中的泄漏量大于柴油。20 世纪 80 年代,国外对喷油泵柱塞偶件环形缝隙中燃油流动进行了理论和试验研究^[6],推导出相应的计算公式。国内大量学者对环隙泄露流量进行了研究^[7-10],但主要集中在公式推导和仿真分析方面,没有进行实际测量。为此,本文设计了能够测量偶件间隙泄漏量的装置,实际测量了二甲醚的间隙泄漏量,并与柴油进行了对比,以期对二甲醚燃料供给系统设计和应用提供理论依据。

1 偶件泄漏测量方法和装置

1.1 原有柱塞偶件泄露评价方法

用于评定柱塞偶件径部密封的方法有 3 种:等压测量法、降压测量法和氮气测量法^[11],前 2 种是以液体油为测量介质的,也是国内主要应用的方法,第 3 种在国外比较常用。但是,现有方法均无法直接测量燃料的质量或体积泄漏量,更无法测量柱塞偶件不同部位的泄漏量。由于二甲醚的沸点较低,饱和蒸气压较高,所以原有方法无法应用。相比柴油,二甲醚的泄漏量更大,对燃料供给影响更大,所以需要设计新的泄漏测量装置。

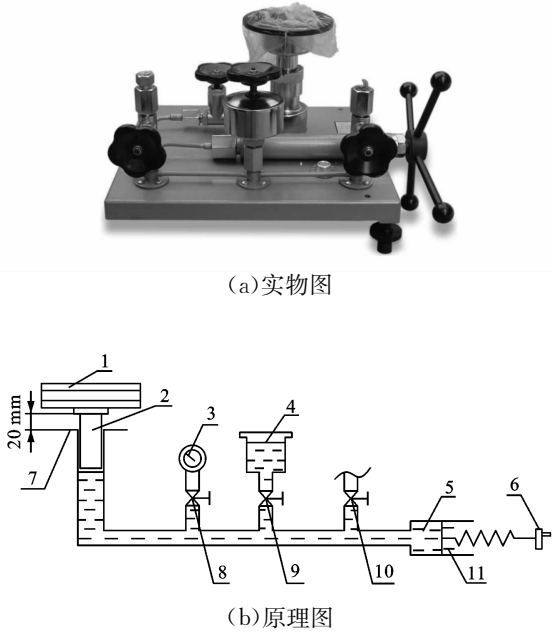
1.2 测量方法和装置

在常用泄漏测量方法的基础上,结合国家标准柴油机喷油泵柱塞偶件性能试验方法,设计了一种二甲醚泄漏测量装置,其原理仍然是等压测量,由西安仪表厂生产,型号为 271.11 的活塞压力计如图 1 所示。

由于本文仅关注泄漏问题,所以在油缸与活塞之后增加了一个阀门,当压力稳定时关闭阀门。管路上增加了一个介质引入管路,这是一个由聚四氟乙烯制成的低压管路。当介质引入管路时,为了将引入的介质保持在管路中,需要用一根高压油管来储存加压后的介质,并将介质引入待测元件。本文测试装置如图 2 所示。

实际操作时,打开油杯的阀门,逆时针转动手轮,活塞右移,当油杯中的蓖麻油进入压力油缸时关闭油杯阀门。在测量柱塞上需放置校验压力砝码,增加一个砝码,压力增加 2.5 MPa。计算压力时要考虑砝码托盘的初始压力,即 0.5 MPa。由于二甲醚发动机的管路残余压力为 5.0 MPa,所以测试压力选择

5.5 MPa 为宜。托盘升至最高位置时开始下降,同时记录托盘下降 20 mm 所用时间。



1~11 分别表示砝码、活塞压力计柱塞、压力表、油杯、油缸、手轮、活塞压力计柱塞套上端面、压力表截止阀、油杯截止阀、旁路截止阀、活塞

图 1 活塞压力计

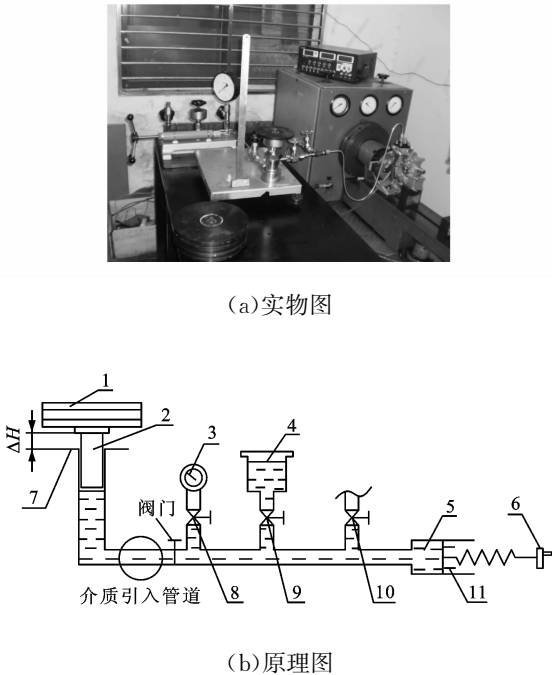


图 2 本文测试装置

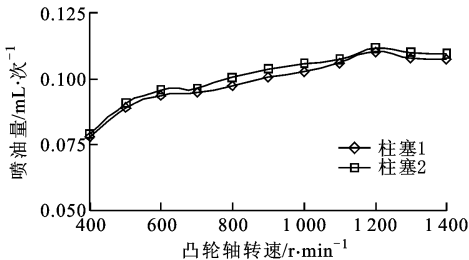
1.3 测量对象

测量对象为山东康达油泵公司生产的两缸 PM 泵,如图 3a 所示,其柱塞直径为 9.5 mm,柱塞有效行程为 11.0 mm,供油外特性如图 3b 所示。在供油

过程中,喷油泵与柱塞偶件相对运动,供油有效行程为有效密封长度,因此在测量过程中需要给定柱塞偶件的相对位置.测量时柱塞位于上止点,从顶部沿垂直方向看,回油槽与吊耳成 45°.



(a)PM 泵



(b)供油特性

图 3 PM 泵及供油特性

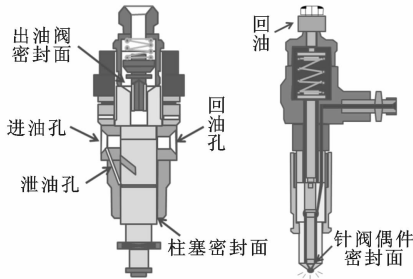
2 试验结果和分析

2.1 泄漏部位分析

柱塞、出油阀和针阀 3 组偶件的泄漏位置如图 4 所示. 不论是进回油孔还是回油槽,柱塞的旋转和上下位置都会影响高压和低压之间的密封长度. 直观地说,柱塞应尽可能位于柱塞套顶端,同时回油槽尽可能远离进回油孔,这样泄漏量最小,也是限定偶件位置的原因. 测量针阀偶件时必须密封回油通道,因为回油通道的流量和针阀偶件的泄漏不为同一数量级. 针阀偶件的间隙很小,燃油的泄漏轨迹十分复杂,为了确定各个泄露位置对总泄露的贡献率,测量时本文采取逐级测量的方法.

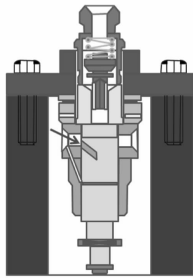
2.2 出油阀泄漏

由 3 组偶件泄漏分析发现,在装配完好的前提下,只有出油阀和出油阀座的密封面存在泄漏. 为了能准确测量出油阀偶件密封情况,活塞需旋转至与进回油孔连通的位置,如图 5a 中箭头所示位置,再将泄漏测量装置与接头连接. 测量结果如图 5b 所示,每个部位的泄漏量是连续 6 次测量结果的平均值. 从图 5 看出,柴油测量所用时间为 64.2 s,二甲醚测量所用时间为 36.32 s.

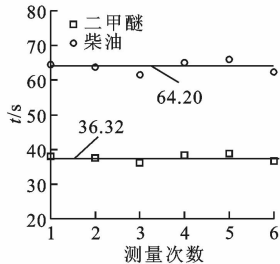


(a)柱塞 (b)喷油泵

图 4 3 组偶件泄漏位置



(a)测量部位

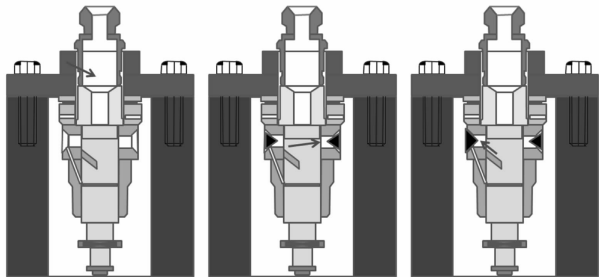


(b)测量结果

图 5 出油阀偶件密封面泄漏测量

2.3 柱塞偶件泄漏

柱塞偶件密封面泄漏位置有 3 处,分别是进回油孔、泄油孔和柱塞尾部,因此测量分 3 步进行. 第 1 步直接测量 3 处泄漏位置的泄漏量,测量前将出油阀取出,活塞位置保持不变;第 2 步是在第 1 步的基础上进行,即测量进回油孔密封后的柱塞偶件密封面的泄漏量;第 3 步是在第 2 步的基础上进行,即测量泄油孔密封后密封面的泄漏量. 测量部位如图 6 所示,测量结果如图 7 所示. 从图 7 看出,柴油的 3 步测量所用时间分别为 3.46 s、99.98 s 和 126.88 s,二甲醚的 3 步测量所用时间分别为 1.97 s、58.23 s 和 73.97 s.



(a)第 1 步 (b)第 2 步 (c)第 3 步

图 6 柱塞偶件密封面泄漏测量部位

2.4 针阀偶件泄漏

针阀偶件密封回油后只有一处出现泄漏,其测

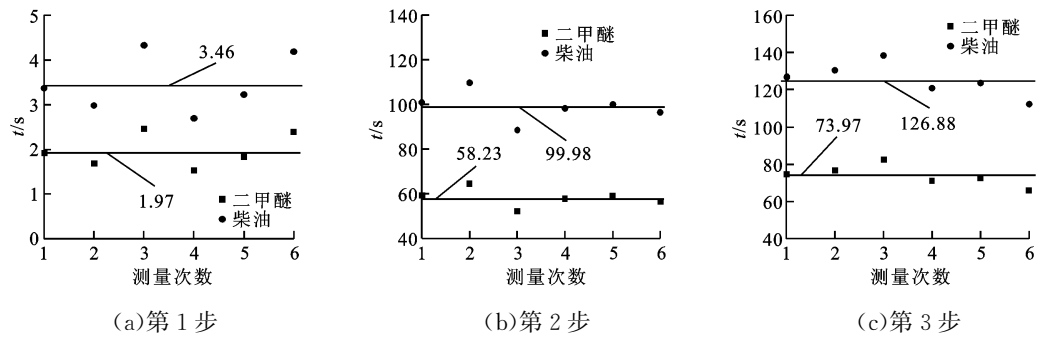


图 7 柱塞偶件密封面泄漏测量结果

量结果如图 8 所示. 柴油泄漏时间为 32.16 s,二甲醚泄漏时间为 18.39 s. 这里之所以没有分析回油泄漏,是因为回油量远大于偶件间隙泄漏量,无法用本文装置测量,且认为回油不属于泄漏.

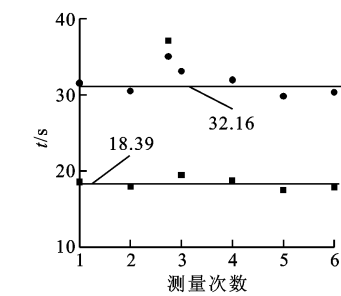


图 8 针阀偶件泄漏测量结果

2.5 柴油和二甲醚泄漏对比

柴油和二甲醚的理化性质不同,但是当压力和温度一定时,它们各自的特性却是不变的,各个密封面的泄漏量比较如图 9 所示. 从图 9 看出:柴油泄漏的时间是二甲醚的 1.7~1.9 倍左右,如果不考虑密度的差异,可以说二甲醚的泄漏量是柴油的 2 倍左右,随着泄漏量的增加,泄漏倍数增大;反之,当泄漏量减少到一定程度时,泄漏倍数趋于稳定.

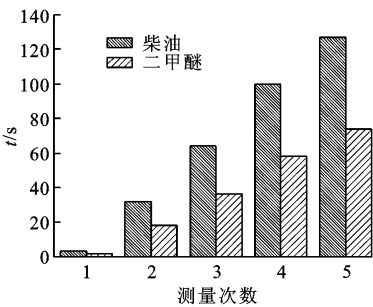


图 9 柴油和二甲醚泄漏量对比

2.6 泄漏换算

在测量过程中,砝码下降是等速的,这是一个非常重要的参数,只有这样才能保证测量过程中柴油和二甲醚是等压的. 测量过程中温度变化很小,可以

看作是等温、等压过程. 活塞压力计柱塞的直径为 3.562 mm,移动 10 mm 排出的燃料体积为 99.6 mm³,由此可以换算出燃料的体积或质量流量. 以柱塞偶件只有一处泄漏为例,当密封时间分别为 126.88 s 和 73.97 s 时,柴油和二甲醚的泄漏量分别为 7.84×10^{-4} mL/s 和 13.48×10^{-4} mL/s,在 23.7 ℃、5.5 MPa 下柴油和二甲醚的密度分别为 0.812 g/mL 和 0.688 g/mL,质量流量分别为 0.636 mg/s 和 0.927 mg/s.

2.7 测量结果验证

本文实际测量了 3 组偶件的泄漏量. 对该泄漏量的测量准确性目前还没有很好的评价方法. 如果确认了柴油泄漏量的精确性,可由理论公式反算出偶件间隙,再通过间隙来计算二甲醚的泄漏量. 如果是压差流或 Poiseuille 流,则泄漏量为

$$Q = \frac{\pi D_1 \delta^3}{12 \mu L} \Delta p \tag{1}$$

式中: D_1 为圆柱面直径; δ 为间隙高度; μ 为流体动力黏度; L 为间隙密封长度; Δp 为间隙两端的压降.

以柱塞偶件只有一处泄漏为例,并且排除其他泄漏位置的干扰,同时已知柱塞直径 D_2 为 9.5 mm, L 为 25 mm,柴油的 μ 为 3 mPa·s,柴油的 Q 为 6.36×10^{-4} mg/s,则有

$$\delta = \left(\frac{12 \mu L Q}{\pi D_2 \Delta p} \right)^{3/2} = \left(\frac{572.4 \times 10^{-18}}{164.065} \right)^{3/2} \text{ m} \approx 1.5 \times 10^{-6} = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$$

通过 Re 可以判断二甲醚在间隙中的流态

$$Re = \frac{2 q \rho}{\pi d \mu} \tag{2}$$

式中: q 为压差流动的泄漏量; ρ 为密度. 代入已知参数,得 $Re=412$. 工程计算中,对于偏心带平衡沟槽的环形缝隙, $Re=400$,表明二甲醚在柱塞偶件间隙中的流态属于紊流,所以 q 可以采用周梓荣等^[8]推导的公式进行计算

$$q = K\pi D_3 \delta \frac{\Delta p^{0.5714}}{L^{0.5714} \mu^{0.143}} \quad (3)$$

式中: D_3 为环形平均直径. 式(3)中的 K 与间隙的关系曲线如图 10 所示. 从图 10 看出, 随着 δ 的减小, K 与 δ 越来越接近. 所以, 本文取 $K=0.0015$, 则 $q=1.18 \times 10^{-4} \text{ L/min}=19.6 \times 10^{-4} \text{ mL/s}$, 该值较实际测量结果 $13.46 \times 10^{-4} \text{ mL/s}$ 略大, 说明实测偶件间隙泄漏量比较精确, 二甲醚在间隙泄漏中的流动接近紊流.

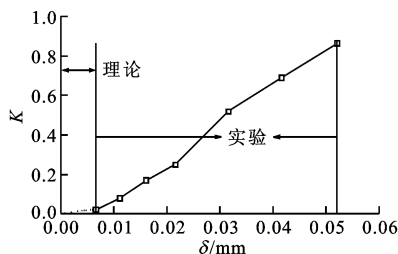


图 10 K 与 δ 的关系曲线

3 结 论

(1) 根据等压测量法, 利用活塞压力计设计了偶件间隙泄漏量测量装置.

(2) 通过分析 3 组偶件的泄露部位, 对柴油和二甲醚泄漏量进行了测量.

(3) 对比柴油和二甲醚在相同部位的泄露量, 二甲醚的泄漏量约为柴油的 1.8 倍.

(4) 本文测量可以看作等压、等温过程, 泄漏量可以换算成体积或质量流量.

(5) 通过理论计算验证了实际测量的准确性.

参考文献:

- [1] ARCOUMANIS C, BAE C, CROOKES R. The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines; a review [J]. Fuel, 2008, 87(7): 1014-1030.
- [2] LIU J, LIU S H. Regulated and nonregulated emissions from a DME powered compression ignition engine [J]. Energy and Fuels, 2010, 24(4): 2465-2469.
- [3] 盛新堂, 高广新. 二甲醚发动机燃料喷射过程及其影响因素研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 9-13.
SHENG Xintang, GAO Guangxin. Investigation of DME injection process and influencing factors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 9-13.

- [4] 谢露, 郑安文. 二甲醚发动机独立润滑喷油器工作特性 [J]. 润滑与密封, 2011, 36(11): 48-62.
XIE Lu, ZHENG Anwen. Study on the characteristics of independent lubrication injector mounted on DME engine [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(11): 48-62.
- [5] SONG Ruizhi, LI Ke, FENG Yang, et al. Performance and emission characteristics of DME engine with high ratio of EGR [J]. Energy and Fuels, 2009, 23(11): 5460-5466.
- [6] ROHL L. 喷油泵柱塞偶件环形缝隙中燃油流动理论和试验研究 [J]. 国外内燃机, 1983(3): 12-19.
RDHL L. Research on fuel flow theory and experiment in plunger pinion clearance of pump [J]. Foreign Internal Combustion Engine, 1983(3): 12-19.
- [7] 谭四喜, 张宗杰, 徐波, 等. 喷油泵柱塞偶件密封与润滑的研究与分析 [J]. 现代车用动力, 2005(8): 17-21.
TAN Sixi, ZHANG Zongjie, XU Bo, et al. Investigation and analysis of sealing and lubrication for pump PMP [J]. Modern Vehicle Power, 2005(8): 17-21.
- [8] 周梓荣, 彭浩舸, 曾曙林. 环形间隙中泄漏流量的影响因素研究 [J]. 润滑与密封, 2005(1): 9-11.
ZHOU Zirong, PENG Haoke, ZENG Shulin. Research on the influence factors of leakage in annular clearance seals [J]. Lubrication Engineering, 2005(1): 9-11.
- [9] 刘胜吉, 王建, 高宗英. 柴油机针阀偶件高压泄漏量的试验与计算分析 [J]. 农机化研究, 2006(12): 218-219.
LIU Shengji, WANG Jian, GAO Zongying. Experiment and calculation analysis on the leakage of the injector needle spouse under the high fuel pressure [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(12): 218-219.
- [10] 张煜盛, 郑瑞, 田威. 低粘度液化燃油在油泵偶件环隙中泄露研究 [J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(12): 105-107.
ZHANG Yusheng, ZHENG Rui, TIAN Wei. Low viscosity-liquefied fuels leakage from the plunger pinion clearance of fuel pumps [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2006, 34(12): 105-107.
- [11] 华弢. 喷油泵柱塞偶件径部密封试验方法及参数的确定 [J]. 现代车用动力, 1999(2): 56-60.

(编辑 苗凌)