

# 滞燃期对柴油机性能影响的试验研究

游维华

(江苏江动股份有限公司, 江苏 盐城 224000)

**摘要:** 利用试验手段研究了滞燃期对直喷式柴油机工作过程及性能的影响。分析结果表明: 滞燃期的长短决定了速燃期内的放热速度和加速度的大小, 从而决定了缸内压力的变化; 适当调整滞燃期可以提高柴油机的动力性、经济性, 降低排放。

**关键词:** 柴油机; 燃烧; 滞燃期

**中图分类号:** TK421+.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)06-0006-03

## Research on the Impact of Delay Period on the Performance of Diesel Engine

You Weihua

(Jiangsu Jiangdong Co. Ltd., Jiangsu Yancheng 224000)

**Abstract:** Based on the data from experiments the impact of delay period on the working condition and performance of direct injection diesel engine is analyzed. The results show that the delay period determines rate of heat release and acceleration and thus determines the changing of pressure in cylinder. By proper controlling of delay period, the dynamic behavior and economical efficiency of diesel engines could be improved and emissions be reduced.

**Keywords:** diesel engine; combustion; delay period

## 0 引言

燃烧过程是柴油机工作的中心环节, 燃烧质量的好坏直接决定了柴油机的动力性、经济性以及排放特性。滞燃期是柴油机燃烧过程的重要阶段, 其长短对整个燃烧过程和柴油机各方面的技术经济指标都有直接的影响<sup>[1]</sup>, 因此深入分析滞燃期对柴油机工作特性的影响对改善燃烧质量有着重要作用。国内外学者对此作了广泛的研究, 一些学者还利用光电变化元件设计了柴油机燃烧火焰光强传感器, 研制了滞燃期检测系统, 为深入研究滞燃期提供了测试装置<sup>[2]</sup>。

本文用测功台架对一四缸直喷式柴油机的主要技术指标如功率、燃油消耗率、烟度、排气温度、进气量、水温、机油温度等参数进行了测量, 并测

量了该柴油机工作过程的主要技术参数, 如气缸压力、喷油压力、针阀升程、喷油提前角、上止点等, 研究了滞燃期对直喷式柴油机燃烧过程及其性能的影响。试验方法如下:

(1) 将直喷式柴油机安装在测功台架上测量功率, 利用油耗仪测量燃油消耗率, 滤纸式烟度计测量烟度, 转速传感器测量柴油机的速度, 进气流量计测量进气流量, 并利用温度传感器、压力传感器测量排气温度、机油温度、冷却水温、进气温度和机油压力、大气压力等信号。

(2) 在柴油机缸盖上加气缸压力测量孔, 并安装气缸压力传感器, 在高压油管上安装油管压力传感器, 在喷油器上装针阀升程传感器, 并在曲轴前端安装转角信号发生器, 滞燃期由针阀升程和气缸压力着火始点确定。

收稿日期: 2014-08-16

作者简介: 游维华(1967-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机排放性能, E-mail: syzywh@163.com。

## 1 滞燃期对柴油机燃烧过程的影响

在滞燃期内，喷入气缸的燃料经过一系列的物理化学变化过程，这些过程包括燃料的雾化、加热、蒸发、扩散等与空气混合的物理过程以及着火前的高分子裂化、分解和氧化的化学反应阶段。因此，滞燃期的长短决定了燃烧初期喷入气缸的燃油量及其与空气的混合程度，从而决定了柴油机的工作性能。

### 1.1 滞燃期对缸内压力变化的影响

滞燃期的长短与气缸内压缩终了的温度和压力有着如下关系<sup>[3]</sup>：

$$\tau_i = \frac{1.44}{p} e^{\frac{4650}{T}} \quad (1)$$

式中： $\tau_i$ 为滞燃期长度； $p$ 为燃烧室内的压缩压力； $T$ 为燃烧室内的空气温度。

由式中关系可知，缸内压缩终了，温度和压力增高，则加速燃油燃烧前的物理化学准备，滞燃期相应缩短，集中燃烧的燃油减少，柴油机工作平稳。当滞燃期延长时，集中燃烧的可燃混合气量增加，缸内压力会急剧增大，柴油机工作粗暴。

图1给出了柴油机标定点( $n=3\ 200$  (r·min<sup>-1</sup>),  $p_{me}=0.672$  MPa)最高燃烧压力 $p_z$ 和最大压力升高率 $\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_p$ 随滞燃期的变化情况。由该图可以看出，随着滞燃期的延长，缸内最大压力升高率 $\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_p$ 会超过产生燃烧压力振荡的临界值—— $0.88$  (MPa·°CA<sup>-1</sup>)<sup>[4-6]</sup>；同时由于最高燃烧压力的升高，运动零部件受到的冲击负荷增大，发动机运行趋于粗暴，从而影响发动机的使用寿命。

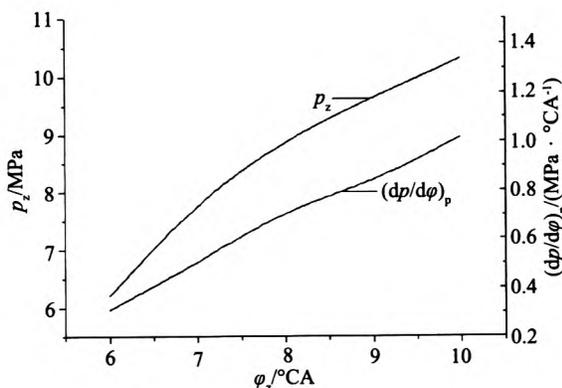


图1 滞燃期对最高燃烧压力 $p_z$ 和最大压力升高率 $\left(\frac{dp}{d\phi}\right)_p$ 的影响

图2给出了柴油机标定点不同滞燃期下缸内压

力及其升高率随曲轴转角的变化情况。由该图可以看出，随着滞燃期由 $0.55$  ms延长到 $0.61$  ms，缸内最高压力由 $8.64$  MPa增加到 $10.14$  MPa，示功图的顶端(最高压力点附近)出现了明显的毛刺，柴油机零部件所受的冲击负荷明显加大；同时缸内最大压力升高率也由 $0.68$  (MPa·°CA<sup>-1</sup>)增加到 $1.13$  (MPa·°CA<sup>-1</sup>)，超过了产生燃烧压力振荡的临界值 $0.88$  (MPa·°CA<sup>-1</sup>)。此外，随着滞燃期的延长，压力上升段的压力升高率的斜率也明显增大。

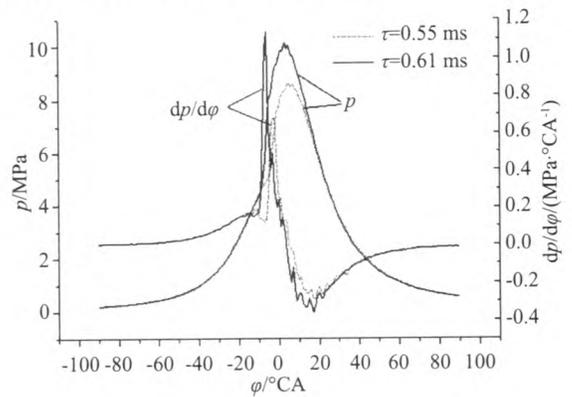


图2 缸内压力及其升高率

图3给出了柴油机标定点不同滞燃期下缸内压力升高加速度随曲轴转角的变化情况。由该图可以看出，滞燃期增大 $0.06$  ms，缸内最大压力升高加速度由 $0.22$  (MPa·°CA<sup>-2</sup>)增加到 $0.41$  (MPa·°CA<sup>-2</sup>)。由此可见，压力升高加速度过大是产生压力振荡的原因。

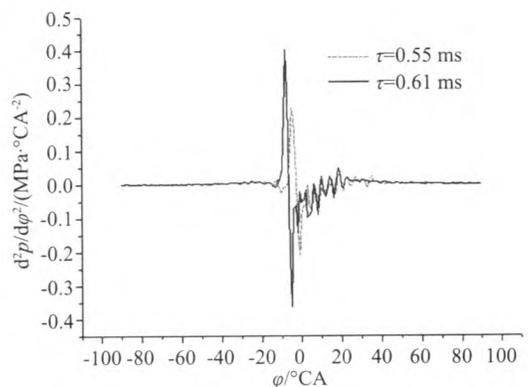


图3 滞燃期对缸内压力升高加速度的影响

### 1.2 滞燃期对放热规律的影响

根据图2中缸内压力变化计算了放热规律，并经过处理取得了不同曲轴转角所对应的放热加速度(见图4)。由图4可以看出，随着滞燃期的延长，第一放热峰值相应提高，第二峰值有所下降；第一峰值附近的放热加速度也明显增加，而且曲线的波动程度也有所增强。由于滞燃期的延长，在滞燃期

内喷入气缸内的燃油量不断增加, 燃油在着火前所经历的物理化学准备过程延长, 导致气缸内积累起来的达到可燃程度的燃料量增多, 从而使在速燃期<sup>[1]</sup>一爆而起的预混合燃烧的燃油量增多, 随之而来的是这一时期的放热量增加, 放热速度和放热加速度也随之增加; 同时由于滞燃期的延长, 大部分燃油在速燃期内燃烧, 在缓燃期和后燃期的放热量也相应减少, 放热速度、加速度有所下降。

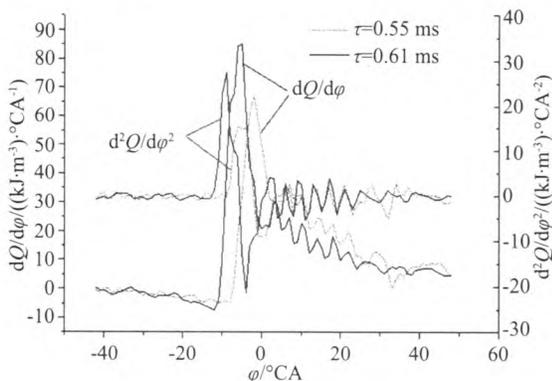


图 4 滞燃期对放热率及放热加速度的影响

对比图 2、图 3 和图 4 可知, 由于滞燃期的延长, 速燃期内放热速度和加速度的提高, 缸内最大压力升高率以及压力升高加速度波形的幅值显著增加, 从而导致缸内最高燃烧压力、最高压力升高率以及最高压力升高加速度随  $\tau_i$  的增加而升高; 同时由于缓燃期和后燃期的放热量也相应减少, 放热速度、加速度有所下降, 缸内压力升高率也随之下降。可见, 适当控制滞燃期可以有效控制燃烧质量, 降低缸内压力升高率及压力升高加速度, 使发动机工作趋于柔和, 同时提高发动机的动力性。

## 2 滞燃期对柴油机性能的影响

### 2.1 滞燃期对平均有效压力的影响

平均有效压力  $p_{me}$  是衡量柴油机动力性能的重要参数<sup>[4][5]</sup>, 它与有效功率  $P_e$  (发动机的输出功率) 的关系如下式所示:

$$p_{me} = \frac{30\tau P_e}{iV_s n} \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为冲程数;  $V_s$  为气缸有效工作容积,  $m^3$ ;  $i$  为柴油机的缸数。

图 5 给出了由试验数据计算所得的平均有效压力随滞燃期变化的关系曲线。由该图可以看出, 对一定环境条件和一定工况来说, 柴油机有一最佳滞燃期  $\tau_{io}$ , 长于或短于这一滞燃期时平均有效压力均会降低。当  $\tau_i < \tau_{io}$  时, 由于滞燃期过短, 最高燃烧压力会过早出现, 从而压缩过程中消耗的负功过

大, 使  $p_{me}$  下降; 反之, 当  $\tau_i > \tau_{io}$  时, 则最高燃烧压力会出现过迟, 燃烧过程推迟, 此时气缸工作容积迅速增大, 热效率降低,  $p_{me}$  也会下降。在转速一定时, 柴油机的功率与平均有效压力成正比。因此, 图 5 也表示滞燃期对功率的影响。

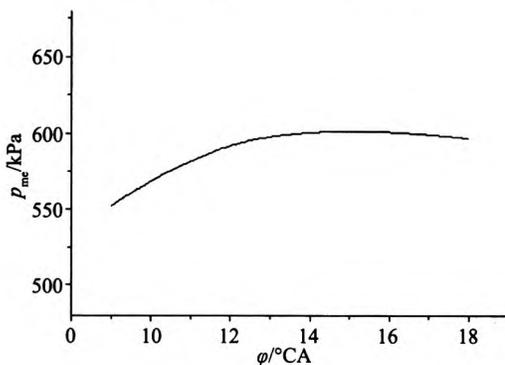


图 5 滞燃期对平均有效压力的影响

### 2.2 滞燃期对排温、油耗的影响

柴油机在不同工况下都存在一个最佳滞燃期与最佳油耗点相对应, 当滞燃期长于或短于最佳滞燃期时, 燃油消耗率均会上升<sup>[1]</sup>。

表 1 给出了实测四缸直喷式柴油机在不同滞燃期时的性能参数。由表 1 可看出, 当转速和负荷不变时, 滞燃期过长, 柴油机的经济性有所下降。滞燃期过长时, 由于着火延迟, 后燃期内燃油量增加, 排温增加; 而当滞燃期过短时, 燃油与空气混合不充分, 直接燃烧, 导致烟度增加<sup>[1][4][5]</sup>。因此, 必须综合考虑柴油机的性能及排放, 根据需要选择最佳滞燃期。

表 1 不同滞燃期所对应柴油机性能参数

滞燃期 /ms	转速 /( $r \cdot \min^{-1}$ )	功率 /kW	油耗率 /( $g \cdot (kWh)^{-1}$ )	排温 / $^{\circ}C$
0.50	3 000	27.33	267.6	571
0.55	3 000	27.33	265.3	547
0.56	3 000	27.33	264.8	579
0.61	3 000	27.33	271.7	584

## 3 结 论

(1) 滞燃期的长短直接影响燃烧组织的好坏, 滞燃期过长, 则速燃期内可燃混合气量增大, 导致放热速度及加速度过大, 缸内压力升高率及其加速度也随之增大, 产生燃烧压力振荡, 导致燃烧噪声增大。

(2) 在一定环境和温度下柴油机均有一最佳滞燃期, 通过调整滞燃期的长短可有效地提高柴油机的动力性、经济性, 降低排放。

(下转第 25 页)

然气。主机在不同负荷下运行时,天然气流量需求会发生变化,但汽化后温度基本保持不变,因此要求供气系统的LNG汽化换热量应跟随主机的负荷变化而相应变化。其主要技术难点如下:汽化换热平衡测算;汽化模块设计温度控制;不同供热需求下的燃烧单元响应匹配;汽化模块汽化过程安全监测及防护;测试和验证技术等。

### (3) 监控安保系统设计

供气系统的设计遵循安全第一原则,安全保护既包括系统运行的安全可靠,也包括危险事故的安全防护,主要技术难点如下:天然气泄漏监测报警;低温、可燃介质防护;天然气泄漏时的紧急切断和安全吹扫集成及控制;供气系统各组成设备的控制;供气系统外围危险点监测和控制集成;安全事故应急管理。

## 3 国内外供气系统发展现状

WCH-DF主机低压供气系统,其供气压力较低,系统中的主要设备在国内外均有一定数量的供应商,使得其系统集成技术相对简单。但是由于双燃料低速机推出时间较晚,国内外已成功开发和集成的供气系统案例较少。WCH已在其意大利建成一套50DF主机供气系统试验台;另外日本DU公司和珠海玉柴正在建设其试车台供气系统。

MDT-ME-GI主机高压供气系统,由于其供气压力高,关键设备仅在国外有较少的设备供应商,使得其系统集成技术相对要求较高。不过ME-GI主机推出时间较早,国外已成功开发和集成了较多的供气系统案例,目前也有较多的船舶配置了ME-GI的双燃料低速柴油机作为主动力,占据着双燃

料低速发动机及其供气系统的主要市场。韩国现代、斗山重工、日本三井、MDT等企业已相继建成了自己的ME-GI主机试车台天然气供气系统,并通过试车台天然气供气系统的建设,形成了船用天然气供气系统的系统集成能力;此外,部分系统集成商如TGE、MHI等通过与主机厂的合作,也具备了天然气供气系统的系统集成能力。以上各企业通过早期布局,已抢占了该领域的前期市场。

国内由于市场起步晚,目前还没有企业完成ME-GI主机高压供气系统的开发;但随着天然气动力系统绿色船舶在国内市场上的增加,国内船厂对ME-GI主机及供气系统的需求也将逐步增加,国内正有越来越多的厂商投身到供气系统的开发中。目前沪东重机依靠自己在柴油机领域的优势,已走在了国内各厂商的前列,公司已于2013年组建了供气系统研发团队,已开始了详细的开发和设计工作,预计其ME-GI主机试车台供气系统将于2015年年中投入使用。另外,大连柴油机厂、宜昌柴油机厂等几家国内船用柴油机生产企业也正在尝试进入该领域。

随着世界能源结构的调整,以天然气为燃料的双燃料发动机将逐步成为未来发动机技术发展的一个主流趋势。伴随各国对天然气动力系统船舶技术的推广应用,双燃料低速发动机及其供气系统技术将具有广阔的前景。我国在该领域由于起步较晚,因此目前无论从天然气动力船舶,还是双燃料低速机及其供气系统技术的发展,均已落后于日韩等造船强国;但随着中国国内造船企业对天然气动力等绿色船舶的推广,双燃料发动机及其供气系统将会迎来一个较快的发展机遇期。

(上接第8页)

### 参考文献

- [1] 何学良,李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,1990,191-344.
- [2] 魏荣年,王贺武. 柴油机着火滞燃期检测装置[J]. 内燃机工程,1992(2):50-65.
- [3] 郭志忠. 浅析运行条件对柴油机燃烧的影响[J]. 天津航海,2001(1):10-12.
- [4] 续晗,姚安仁,姚春德,等. 基于柴油机 $\omega$ 型燃烧室缸内激波的活塞破坏研究[J]. 工程热物理学报,2014(3):586-592.
- [5] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,1999,114-124.
- [6] Stefan Ortmann, Matthias Rychetsky. Engine knock estimation using neural networks based on a real-world database[C]. SAE 980513:628-635.