

性能与排放

基于试验拟合的低速二冲程柴油机 放热率经验模型研究

刘 博¹, 马天一², 钱跃华¹, 石 磊², 邓康耀²

(1. 中船动力研究院有限公司, 上海 200120;

2. 上海交通大学高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 针对某 Tier III 船用低速二冲程柴油机, 开展了负荷、EGR 率及喷油参数对放热率及其特征参数的影响研究。研究表明: 负荷和轨压是影响燃烧始点的主要因素, 负荷、轨压升高使燃烧始点提前; 轨压升高及喷油正时提前使 CA50 提前, 指示热效率升高; 小 EGR 率对燃烧过程影响不大, EGR 率高于 26% 后会显著推迟 CA50, 增大燃烧持续期, 降低指示热效率。基于实测放热率对三韦伯函数参数进行了研究, 获得了多因素对经验放热模型的作用规律, 得到了适用于低速机的经验放热率模型。

关键词: 低速二冲程柴油机; 放热率; 经验模型; 三韦伯函数

中图分类号: TK421+.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)06-0006-04

Research on Heat Release Rate Empirical Model of the Low-Speed Two-Stroke Engine Based on Experimental Fitting

Liu Bo¹, Ma Tianyi², Qian Yuehua¹, Shi Lei², Deng Kangyao²

(1. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200120; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Based on a Tier III marine low-speed two-stroke diesel engine, the effects of load, EGR rate and fuel injection parameters on the heat release rate and its characteristic parameters are studied. The research shows that the load and rail pressure are the main factors affecting the start of combustion, load and higher rail pressure lead to earlier combustion starting point; higher rail pressure and earlier injection timing lead to earlier CA50 so that the indicated thermal efficiency is increased; small EGR rate has less influence on the combustion process until EGR rate is higher than 26%, at which point CA50 is significantly postponed, the combustion duration is increased, and the indicated thermal efficiency is lowered. Based on measured heat release rates, three-Wiebe function was studied, the influence rule of multi-factors on heat release empirical model was discovered, and the empirical model suitable for low-speed engines was obtained.

Key words: low-speed two-stroke diesel engine; heat release rate; empirical model; three-Wiebe function

0 引言

低速二冲程柴油机性能优良、可靠性高, 是现

代大型商用船的主要推进动力装置^[1]。21 世纪以来低速机新技术发展迅速, 出于对降低排放、提高柴油机动力性和经济型的需求, 电控燃油喷射技术

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-08-07

基金项目: 高技术船舶科研计划——船用低速机工程(一期), 项目编号 CDGC01-KT0104。

作者简介: 刘博(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为船用发动机, liubo_spt@163.com。

和 EGR 技术在低速机上得到广泛应用^[2-4]。EGR 技术能够有效降低 NO_x 排放, 以满足 Tier III 排放法规^[5], 电控燃油喷射技术由于其柔性的喷油率控制使得柴油机在任何负荷下都有合适的喷射压力和喷射油量, 能够有效降低油耗和 NO_x 排放, 实现无烟运行。

从机械控制燃油喷射发展为电控燃油喷射, 以及广泛采用 EGR 技术, 导致柴油机运行过程中控制参数增多, 影响燃烧过程的因素多且复杂。对此还缺乏相关的研究。与此同时, 采用这些新技术后低速机的放热率发生了较大变化, 原有的经验关系式已不能满足新机型的需要^[6-7]。

本文针对某 Tier III 船用低速二冲程柴油机开展负荷、EGR 率、喷油正时、共轨压力等参数对燃烧特征参数的影响研究, 并使用三韦伯函数对放热率进行拟合, 旨在得出适用于低速机的放热率经验模型。

1 试验方案

本文以某 Tier III 排放船用低速二冲程柴油机为研究对象, 该机型主要参数如表 1 所示。

表 1 柴油机基本参数

发动机形式	二冲程、6 缸
缸径/mm	340
冲程/mm	1 600
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	157
额定功率/kW	4 887
压缩比	19.8

试验中调整负荷、喷油正时、轨压、EGR 率及排气正时等参数, 在不同工况下进行示功图测试, 并计算得到放热率。重点分析燃烧始点、燃烧持续期 (燃烧 10% ~ 90% 的燃油所需的曲轴转角)、CA50、放热率峰值及相位等燃烧特征参数的变化规律。

2 放热率影响因素分析

2.1 负荷对放热率的影响

如图 1 所示, 该机型放热率在所有工况下都为单峰形, 其预混合燃烧量很小, 放热较集中, 热量利用效率很高。从 25% 负荷到 100% 负荷, 循环喷油量增长了 9.03 g, 喷油脉宽增长了 11.8 °CA, 释放出的总热量增多, 放热率峰值从低负荷到高负荷增长了 6.77 ($\text{kJ} \cdot (\text{°})^{-1}$)。100% 负荷、75% 负荷、50% 负荷的放热率峰值相位基本一致, 而 25% 放热率峰值相位为 6.75 °CA, 提前了 2 °CA。这是因为低负荷工况循环喷油量减小, 喷油脉宽小

于 6 °CA, 该工况点喷油时刻在上止点附近, 燃烧速率到达峰值时喷油持续期已结束, 因此燃烧速率急剧下降。

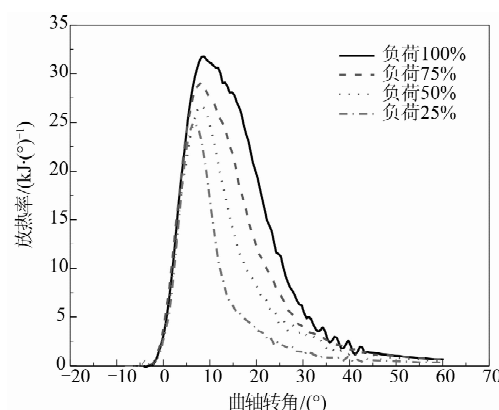


图 1 各负荷放热率

如图 2 所示, 随着负荷的增大, 燃烧始点略有提前, 当负荷从 25% 到 100% 时, 燃烧始点从 3.5 °CA 提前到 2.2 °CA; CA50 从 9.1 °CA 增大到 16.1 °CA; 燃烧持续期从 25.8 °CA 增大到 34.7 °CA; 指示热效率下降了 2.58%。

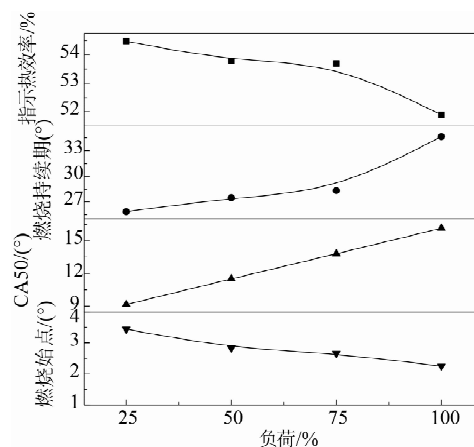


图 2 负荷对燃烧特征参数的影响

2.2 EGR 对放热率的影响

EGR 将涡轮前废气引出一部分, 经中冷后与新鲜空气混合进入扫气箱内, 影响了进气量。EGR 率从 0 到 35%, 过量空气系数从 2.68 减小到 2.5, 使得压缩压力降低。循环废气的掺入使新鲜进气中的 O_2 浓度降低, 导致工质绝热系数下降; 于此同时, 废气中双原子分子比例大, 再循环后进气比热上升, 降低了缸内温度, 使燃烧速率放缓, 最高燃烧压力下降。如图 3 所示, 随着 EGR 率从 0 增大至 35%, 放热率峰值降低了 0.97 ($\text{kJ} \cdot (\text{°})^{-1}$), 峰值相位基本不变。

如图 4 所示, EGR 率从 0 增大到至 35%, 燃烧始点基本不变; CA50 从 12.5 °CA 推迟至 13.4 °CA; 燃烧持续期和指示热效率在 EGR 率较

小时变化不大; EGR 率较大时燃烧持续期急剧增长, 从 27.4°CA 扩大到 32.2°CA , 燃烧过程向后燃偏移; 指示热效率下降 1.87% 。

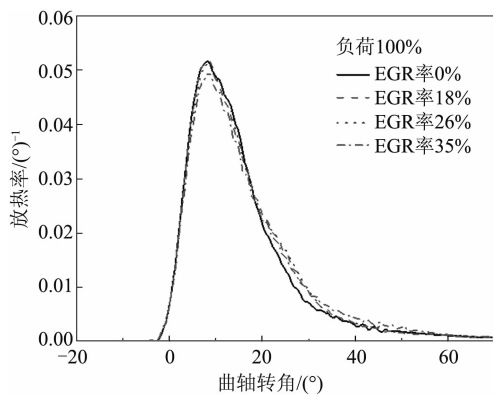


图3 EGR 对放热率影响

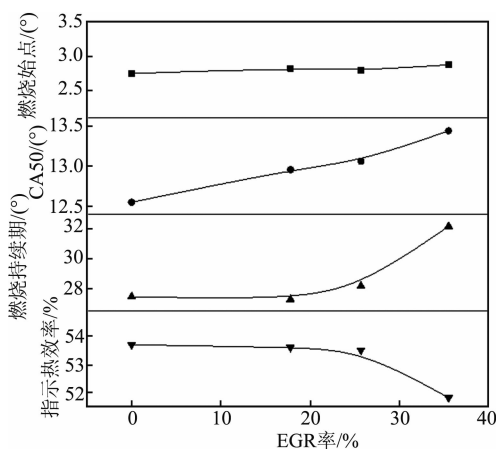


图4 EGR 率对燃烧特征参数影响

2.3 共轨压力对放热率的影响

图5为共轨压力对放热率的影响。共轨压力越高, 燃油的喷射压力越高, 燃油喷射速率提升, 在循环喷油量大致相同的情况下喷油脉宽缩短, 缸内燃烧过程更加集中。于此同时, 空气的摩擦和紊流增强, 使油粒变小, 较细油粒的数目增加, 燃油雾化效果更好, 可燃混合气的均匀性提高, 滞燃期缩短, 燃烧速率上升加快, 同时峰值明显升高, 燃烧品质进一步提高。

如图6所示, 随着共轨压力的升高, 缸内雾化改善, 燃烧始点从 2.66°CA 提前至 1.95°CA ; 放热率峰值提高 $9.4 (\text{kJ} \cdot (^{\circ})^{-1})$, 放热率峰值相位从 9.75°CA 提前至 9.25°CA ; CA50 从 16.5°CA 提前至 12.3°CA ; 燃烧持续期从 31.34°CA 缩短至 25.95°CA , 燃烧更加集中; 指示热效率提高了 2.64% 。

2.4 喷油正时对燃烧放热率的影响

如图7所示, 喷油正时从 -0.8°CA 推迟到

3.2°CA , 放热率曲线峰值变化不大, 相位随着喷油正时延后整体后移。这是因为喷油正时延后, 燃烧过程后移, 导致排气温度升高, 涡轮增压器做功能力增强, 进气量增大, 导致压缩压力增大。

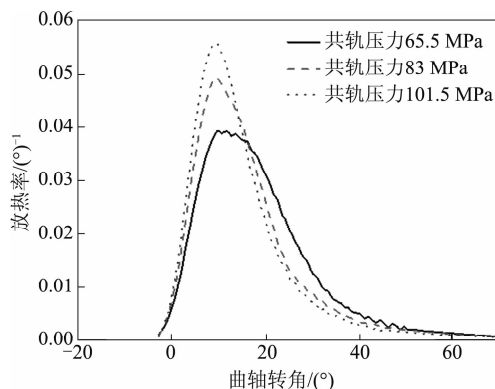


图5 共轨压力对放热率的影响

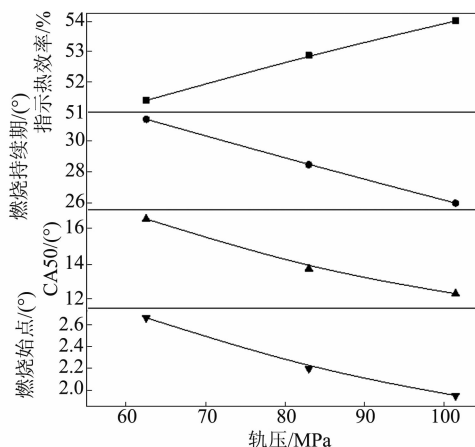


图6 共轨压力对燃烧特征参数的影响

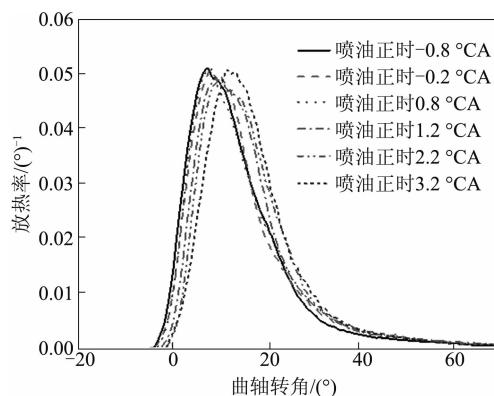


图7 喷油正时对放热率的影响

如图8所示, 燃烧始点受喷油正时影响较大, 随着喷油正时推迟, 燃烧始点推迟。喷油正时从 -0.8°CA 到 3.2°CA 变化时, 燃烧始点从 1°CA 推迟到 4.7°CA ; CA50 增大了 3.72°CA ; 燃烧持续期先增大后缩小; 指示热效率在上止点附近喷油时最高, 随喷油正时推迟下降 1.41% 。

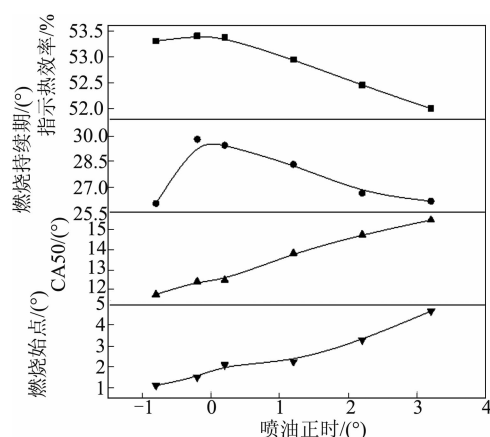


图 8 喷油正时对燃烧特征参数的影响

3 经验放热率模型研究

基于三韦伯函数对试验放热率进行拟合。三条韦伯函数分别代表预混燃烧、扩散燃烧以及尾燃，表达式如下：

$$\frac{dx}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 6.908\beta_i \frac{m_i + 1}{\Delta\varphi_i} \left(\frac{\varphi - \text{SOC}}{\Delta\varphi_i} \right)^{m_i} e^{-6.908 \left(\frac{\varphi - \text{SOC}}{\Delta\varphi_i} \right)^{m_i+1}} \quad (1)$$

式中：SOC 表示燃烧始点； β_i 表示某一燃烧阶段放热量占总放热量的比例； $\Delta\varphi_i$ 表示某一燃烧阶段的燃烧持续期； m_i 表示某一燃烧阶段的燃烧品质系数。

采用 Matlab 中的多元非线性拟合 lsqcurvefit 函数对放热率曲线进行拟合，拟合时初值的选择对结果有较大影响。图 9 为采用三韦伯函数拟合得到的额定工况放热率曲线与试验放热率曲线的对比。可看出拟合效果较好。

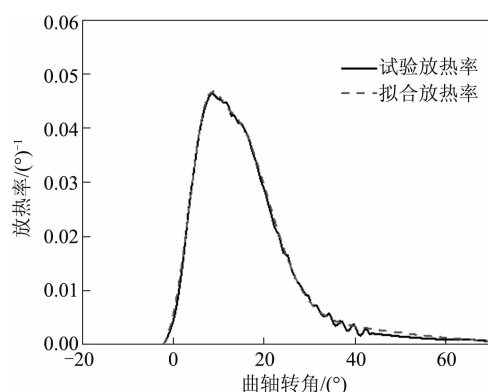


图 9 额定工况下实测与拟合放热率对比

其中：预混燃烧比例 $\beta_1 = 0.0945$ ；扩散燃烧比例 $\beta_2 = 0.704$ ；尾燃比例 $\beta_3 = 1 - \beta_1 - \beta_2$ ；预混燃烧品质系数 $m_1 = 2.56$ ；扩散燃烧品质系数 $m_2 = 1.47$ ；尾燃品质系数 $m_3 = 0.88$ ；预混燃烧持续期 $\Delta\varphi_1 = 16.8$ ；扩散燃烧持续期 $\Delta\varphi_2 = 40.7$ ；尾燃持

续期 $\Delta\varphi_3 = 107.2$ ；

选取转速、循环喷油量、轨压以及过量空气系数 4 个参数，建立与韦伯参数之间的关系。EGR 率对韦伯参数的影响体现在过量空气系数上，低速机按推进特性运行，负荷对模型的影响体现在转速上。选取额定工况作为标定工况，经验关系式如下：

$$\frac{x}{x_0} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^a \left(\frac{m_f}{m_{f0}} \right)^b \left(\frac{n}{n_0} \right)^c \left(\frac{P_{\text{rail}}}{P_{\text{rail0}}} \right)^d \quad (2)$$

式中： x 表示各韦伯参数； α 表示过量空气系数； m_f 表示循环喷油量； n 表示发动机转速； P_{rail} 表示轨压。

采用 lsqcurvefit 函数进行非线性拟合，得出经验模型中的各参数如表 2 所示。各韦伯参数的误差平方和如表 3 所示。

表 2 经验模型中各参数

韦伯参数	a	b	c	d
β_1	-28.41	-0.681	47.860	-2.653
β_2	2.944 6	2.033 7	-4.676 3	0.095 4
m_1	7.771 7	1.557	-14.742	0.516 4
m_2	-0.557	-0.652	1.186	0.124 2
m_3	2.651	1.185 6	-7.246 3	0.098
$\Delta\varphi_1$	-6.681	-1.457	12.849	-0.813
$\Delta\varphi_2$	1.949 7	0.681 6	-3.739 1	-0.273
$\Delta\varphi_3$	-0.525	-0.217	1.727 6	-0.328

表 3 韦伯参数拟合误差

韦伯参数	误差平方和
β_1	3.517 2
β_2	0.884 6
m_1	0.830 8
m_2	0.541
m_3	0.780 1
$\Delta\varphi_1$	2.233 8
$\Delta\varphi_2$	0.555 8
$\Delta\varphi_3$	0.427 6

选取试验中其他的工况点对模型进行验证。图 10 为几个典型工况点经验模型计算和试验实测放热率的对比。其中：工况点 A、B 计算得到的放热率形状、峰值的大小和相位与试验均吻合较好，能够反映试验放热率的特征。工况点 C 计算放热率峰值偏大，较试验放热率约高 $0.003 (\text{°})^{-1}$ ；工况点 D 的放热率峰值基本一致，但计算放热率相位较试验的略有偏差，约延迟 1°CA 。由此可见，本文建立的经验模型的预测结果与试验相比在各个工况都有较好的吻合度。

(下转第 21 页)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 苏万华, 赵华, 王建昕, 等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] KILIC A, SCHULZE L, TSCHOKE H. Influence of nozzle parameters on single jet flow quantities of multi-hole diesel injection nozzles [C]. SAE 2006-01-1983, 2006.
- [4] SATAKE K, MONAKA T, YAMADA S, et al. The rapid development of diesel engine using an optimization of the fuel injection control [R]. Mitsubishi Heavy Industries Limited. Tech Rev, 2008, 45: 6-10.
- [5] PAYRI F, BERMUDEZ V, PAYRI R, et al. The in-

fluence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [J]. Fuel, 2004, 83: 419-431.

- [6] HUANG H Z, SU W H, PEI Y Q. Optimization study on multi-pulse injection parameters of MULINBUMP compound combustion system II: optimization of five-pulse injection parameters [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27 (4): 289-297.
- [7] 阳明盛, 罗长童. 最优化原理、方法及求解软件 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] LEE T, REITZ R D. Response surface method optimization of a HSDI diesel engine equipped with a common rail injection system [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2003, 04, 01.

(上接第 9 页)

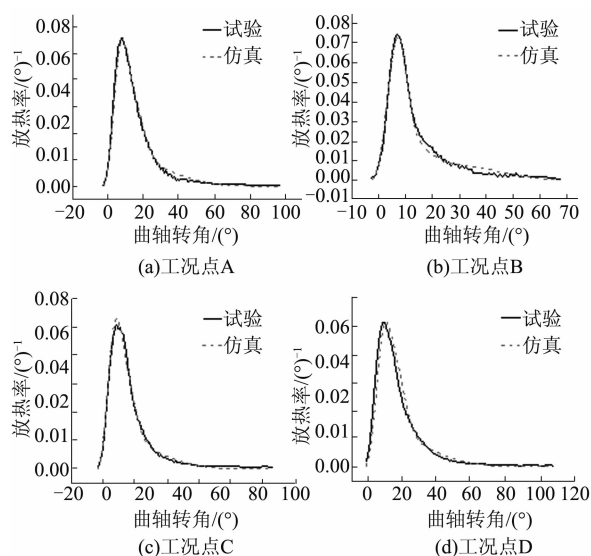


图 10 试验与经验模型计算放热率对比

4 总结

(1) 低速二冲程柴油机放热率受到多参数的影响。燃烧始点受喷油正时影响最大, 随喷油正时推迟, 燃烧始点推迟。发动机负荷和油轨压力对燃烧始点影响较小。

(2) EGR 对燃烧过程影响主要体现在燃烧持续期。小 EGR 率对燃烧过程影响不大, EGR 率高于 26% 后, 燃烧速率降低, 燃烧持续期延展, CA50 推迟, 燃烧过程向后燃偏移, 指示热效率降低。

(3) 喷油正时的提前和共轨压力的上升使 CA50 明显提前, CA50 和指示热效率存在相关性, CA50 提前, 燃烧更加集中, 指示热效率更高。

(4) 本文基于试验数据拟合特征参数获得的三韦伯放热率经验模型在各个工况都有较好的吻合度, 能够用于低速二冲程柴油机的性能模拟研究。

参考文献

- [1] 刘颖. 船舶柴油机原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [2] 文李明. 船用低速二冲程柴油机燃油喷射系统发展概述 [J]. 柴油机, 2016, 38 (1): 24-28.
- [3] 任自中. 国外大功率柴油机电喷电控系统的新进展 [J]. 柴油机, 2008, 30 (5): 7-12.
- [4] KALTOFT J. Tier III EGR for large 2-stroke MAN B&W diesel engine [C]. International Symposium on Marine Engineering, 2001, paper-ISME586.
- [5] ČERNÍK F. Phenomenological combustion modeling for optimization of large 2-stroke marine engines under both diesel and dual fuel operating conditions [D]. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum, 2018.
- [6] 丰琳琳. 二冲程低速柴油机工作过程与增压系统的计算研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] 顾宏中. 涡轮增压柴油机性能研究 [M]. 上海: 上海交通大学出版, 1998.