

性能与排放

EGR 率对船用柴油机中低负荷燃烧排放性能影响的仿真及试验研究

魏宇坤, 安士杰, 张志友

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 在船用高压共轨柴油机 TBD234V6 上进行了中低负荷工况下 EGR 率对柴油机燃烧排放性能影响的试验研究。应用 AVL-FIRE 软件建模, 对柴油机缸内燃烧过程进行 CFD 仿真分析。仿真和试验研究表明: 中低负荷工况下采用 EGR 能够有效降低 NO_x 的排放。EGR 率较小时, 对柴油机的性能影响较小; 当 EGR 率较大时, 柴油机的工作性能恶化, soot 排放迅速增多。特定工况下的 CFD 模拟结果显示: 随着 EGR 率的增加, 燃烧过程的最高压力和最高温度降低, 放热速率减小, 燃烧过程变得平缓。

关键词: 船用柴油机; EGR; 燃烧; 排放

中图分类号: TK421. ⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)02-0011-05

Simulation and Experimental Study of the Influence of EGR Rate on the Performances of Combustion and Emission at Low and Normal Loads of Marine Diesel Engine

Wei Yukun, An Shijie, Zhang Zhiyou

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: This study examined the impacts of EGR rate on the performances of combustion and emission at low and normal loads working conditions on a TBD234V6 high pressure common rail marine diesel engine. In addition, the combustion process in cylinders was predicted with CFD simulation using a model established by AVL-FIRE software. Simulation and experimental results showed that EGR rate effectively reduced NO_x emission at low and normal loads working conditions. At low EGR rates, diesel engine working performance was little impaired. But at high EGR rates, the working performance deteriorated, and the soot emission increased rapidly. The simulation results also showed that the increase of EGR rate at specific working condition reduced the maximum pressure, maximum temperature and the heat release rate of the combustion process, which smoothed the combustion process.

Key words: marine diesel engine; EGR; combustion; emission

0 引 言

目前, 海洋污染问题已经成为威胁人类生存的十大问题之一。相应的海洋环境保护公约对船舶柴

油机的污染物排放做出了严格的限制, 使得船舶柴油机制造厂家不得不采取相应的措施来减少污染物的排放^[1]。目前的柴油机排放控制措施一般分为机前预处理、机内净化与尾气后处理三个方面^[2]。

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51379212)。

作者简介: 魏宇坤(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为动力机械及热力系统设计、仿真与优化, E-mail: 1142415070@qq.com。

其中, EGR (Exhaust Gas Recirculation) 技术在众多柴油机排放控制措施中占据着重要的位置^[3]。EGR 技术在汽油机和小型柴油机上的应用已经比较普遍, 但是在重型船舶柴油机上还没有得到成熟的应用^[4]。

本研究通过在船用高压共轨柴油机 TBD234V6 上安装 EGR 系统, 在中低负荷工况下进行 EGR 系统对柴油机燃烧排放性能的试验研究; 并应用 AVL-FIRE 软件对柴油机缸内燃烧过程进行 CFD 模拟计算。将试验研究与 CFD 模拟计算相结合, 研究 EGR 对中低负荷柴油机性能和排放的影响, 以期对船用高压共轨柴油机燃烧排放过程的优化控制提供参考依据。

1 试验装置和试验内容

本试验采用的船用高压共轨柴油机为 TBD234V6 型, 该型号的柴油机可靠性好, 功率范围较广, 油耗率较低。安装 EGR 系统后的 EGR 试验平台如图 1 所示。该机具体参数见表 1, 试验设备如表 2 所示。本试验在发动机两个负荷工况 (转速 1 500 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$), 25% 负荷和 50% 负荷) 进行。EGR 阀为机械式, 中冷器为水冷式。



图 1 柴油机废气再循环试验平台

2 CFD 仿真模型的建立

2.1 网格划分

因为本文重点研究缸内燃烧过程, 所以选择从进气门关 (下止点后 29 °CA) 到排气门开 (下止点前 41 °CA) 为计算区间, 包含了压缩和燃烧膨胀两个过程。本研究在 ESE Diesel 中根据柴油机实际燃烧室几何形状建立活塞型线, 再导入喷油器的模型, 采用组合网格法, 用 ESE 模块自动生成计算网格。设置平均网格尺寸大小为 0.1 mm, 进行二维平面网格的划分, 然后导出 3D 网格。建立计算网格时, 需要包括活塞顶隙的容积。计算网格示意图见图 2。

2.2 计算模型

湍流模型选用标准的 $k-\varepsilon$ 两方程模型, 计算稳

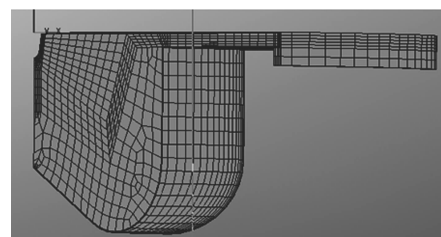
定性好, 所用时间较短。对于喷雾子模型: 湍流扩散模型采用 Enable, 粒子相互作用模型采用 Schmidt-O' Rourke, 碰壁模型采用 Mundo Tropea Sommerfeld 壁面作用模型, 蒸发模型采用 Dukowicz 模型, 破碎模型采用 WAVE 模型。燃烧模型采用相关火焰三区模型 (ECFM-3Z)。对于排放子模型: NO 模型采用 Extended Zeldovic, 而 soot 模型采用 Lund Flamelet Model。

表 1 TBD234V6 发动机参数

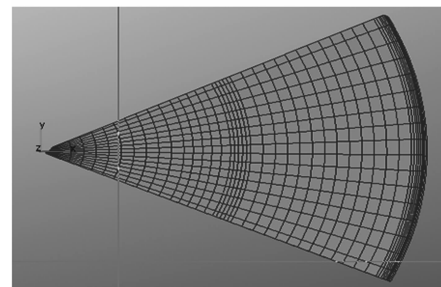
额定功率/kW	186
额定转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
进气方式	增压中冷
缸径 × 冲程/mm × mm	128 × 140
曲柄/连杆比	0.255
燃烧室型式	ω 型
压缩比	15
喷嘴	8 × 0.13
进气门开/°CA	上止点前 10
进气门关/°CA	下止点后 29
排气门开/°CA	下止点前 41
排气门关/°CA	下止点后 7

表 2 试验设备

空气流量计	KLUGB/E 型涡街流量仪表
排放分析仪	DiCom 4000
烟度计	PD-1 型滤纸式烟度计
油耗仪	容积式



(a) 计算网格主视图



(b) 计算网格俯视图

图 2 计算网格示意图

2.3 计算模型验证

为确保 CFD 模拟的准确性, 要对所建立的仿真模型进行验证。本文模型验证时选取的工况为:

转速 $1\,500\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、喷油提前角 25°CA 、共轨压力 $130\ \text{MPa}$ 、负荷 100% 、无 EGR。然后将仿真结果和台架试验结果相比较,通过调整相应参数,保证两者误差在可接受范围内,完成模型的标定。图 3 为本文建立的 CFD 仿真模型计算所得和实测示功图的比较。从图中可以看出实测所得的缸内压力曲线和仿真计算所得缸内压力曲线误差较小,两者基本吻合,说明建立的仿真模型能够模拟特定条件下的燃烧过程。

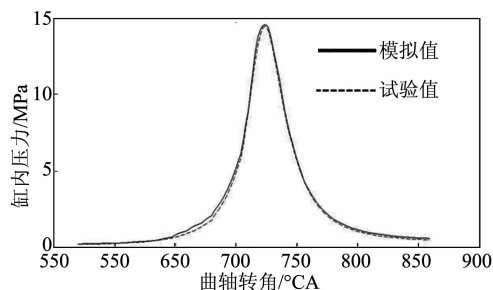


图3 模型验证

3 试验及仿真结果分析

3.1 EGR 率对放热率的影响

为了解不同 EGR 率对燃烧过程的影响,采用 CFD 仿真模型对 50% 负荷条件下不同 EGR 工况进行仿真计算。图 4 为不同 EGR 率下缸内燃烧过程累计放热率曲线,图 5 为不同 EGR 率下瞬时放热率曲线。由图可看出:在一定负荷下,随 EGR 率的增大,燃烧始点有一定的推迟,供油量不变的情况下整个燃烧过程总放热量减少。气缸内温度和混合物浓度是影响着火反应的两个关键因素,而在喷油量和温度相同的条件下,EGR 的比热容、稀释作用和化学作用对着火反应有着较大的影响^[5]。随着 EGR 率增加, H_2O 和 CO_2 等比热容较高的物质增多,新鲜空气减少,使缸内混合气的比热容增大。此外,混合气中引进的循环废气含有大量的燃烧生成物,燃烧产物的浓度增大,有利于逆反应的进行,对燃烧反应起到一定的阻碍作用;EGR 率不断增加时,混合气中的新鲜空气含量不断降低,即总的含氧量不断降低,结果会降低火焰传播速度,影响扩散燃烧过程的进行。这些因素使得缸内燃烧过程的滞燃期延长,放热速率减小,燃烧效率降低,整个燃烧过程的放热量减少,燃烧阶段后移。可见,采用 EGR 在一定程度上可以使高放热率区间变大,改善爆燃现象,使得燃烧过程相对平缓,燃烧持续期延长,有利于燃烧过程产生的 soot 的氧化。

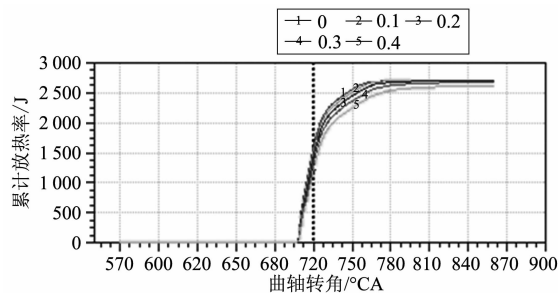


图4 燃烧过程累计放热率曲线

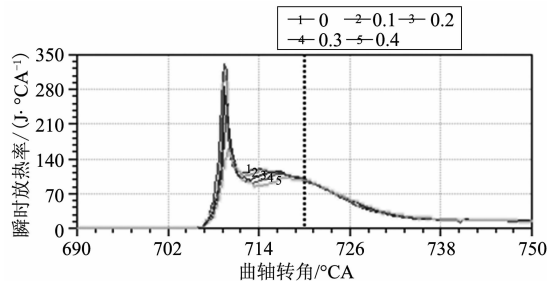


图5 燃烧过程瞬时放热率曲线

3.2 不同 EGR 率对压力和温度的影响

图 6、图 7 为 50% 负荷下不同 EGR 率时的缸内平均压力和平均温度曲线。从图中可以看出,各 EGR 率情况下的缸压曲线、温度曲线类似。压力和温度都成单峰,这是由于喷油提前角较大,在压缩上止点时扩散燃烧已经进行,压缩效应和燃烧效应叠加在一起,缸内的压力和温度急剧升高。随着 EGR 率的增加,缸内温度和压力峰值降低且后移,这是由于 EGR 的阻燃效应使得整个燃烧过程的中心向后推移,这将使有效功率有所降低。

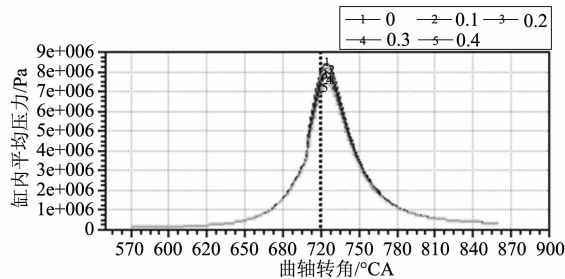


图6 不同 EGR 率下缸内平均压力曲线

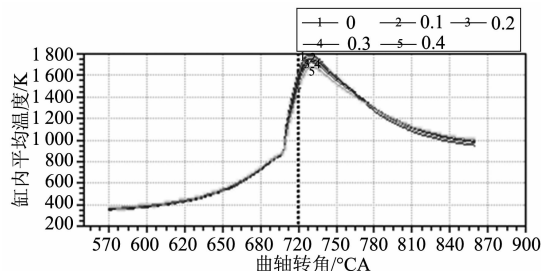


图7 不同 EGR 率下缸内平均温度曲线

3.3 EGR 率对柴油机工作性能的影响

如图 8 至图 11 所示,在采用废气再循环系统时,随着 EGR 率的增加,柴油机的有效功率总体呈下降趋势,柴油机的油耗总体呈上升趋势。柴油机从排气管引出的再循环废气都要进行冷却,但是冷却后的废气仍然有着比新鲜空气较高的温度,使得总体混合气温度升高,即引入废气再循环提高了进气温度,而进气温度的升高会使得燃油喷雾的温度升高,促进燃油蒸发,有利于油气混合过程的进行,在一定程度上可以改善燃烧。但是较高的 EGR 率使得缸内含氧量减少,缸内局部缺氧现象加剧,燃油燃烧不充分,燃烧恶化,使得有效功率降低,达到同样负荷所需的油耗增加。

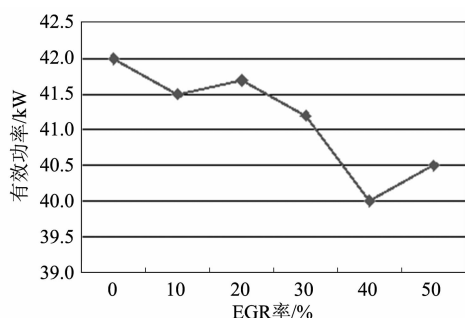


图 8 不同 EGR 率下柴油机的有效功率 (25% 负荷)

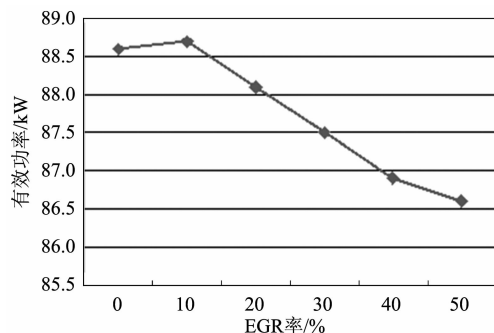


图 9 不同 EGR 率下柴油机的有效功率 (50% 负荷)

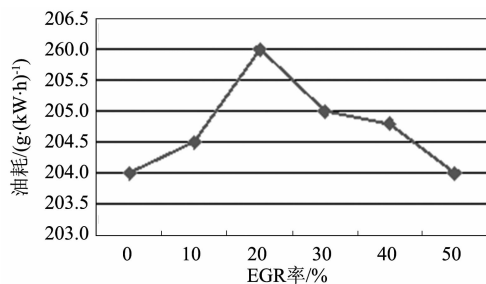


图 10 不同 EGR 率下柴油机的油耗 (25% 负荷)

3.4 EGR 率对排放性能的影响

如图 12、图 13 所示,随着 EGR 的增加,柴油机运行时,NO_x 排放明显降低,但是消光烟度不断增加,并且随着负荷增大时,趋势尤其明显。

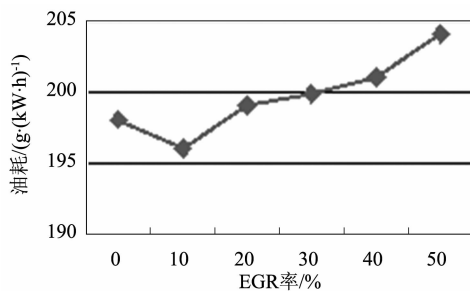


图 11 不同 EGR 率下柴油机的油耗 (50% 负荷)

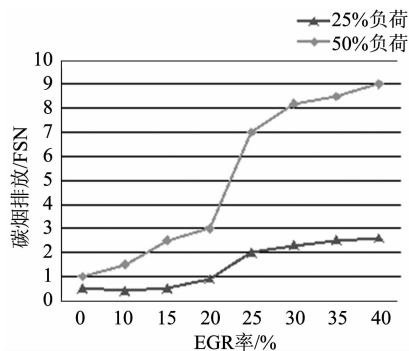


图 12 不同 EGR 率下柴油机碳烟排放

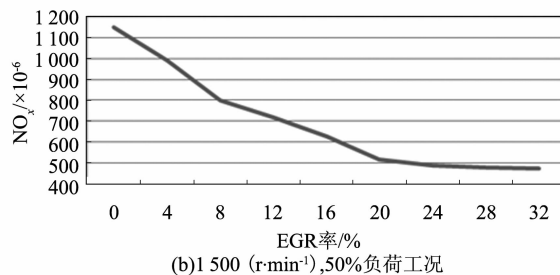
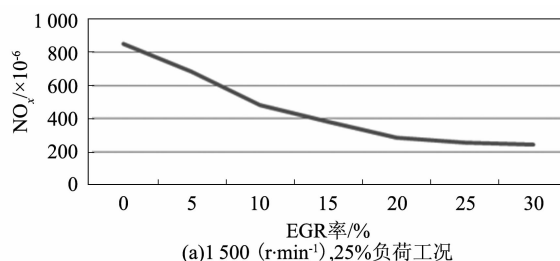


图 13 不同 EGR 率下柴油机 NO_x 排放

由图 12 可以看出,因为废气的引入,使得柴油机的碳烟排放有所恶化,尤其是在较高负荷的情况下。但是在低负荷时,碳烟排放仅略有上升。这是因为虽然废气的引入使得柴油机的空燃比降低,但是在低负荷工况下,柴油机空燃比很大,有足够的氧气量,而且引入的废气使得进气温度有所上升,有利于油气混合,所以废气的引入并没有使得碳烟排放严重恶化。但是在中等负荷工况下,在某个临界点后,当 EGR 率继续增加,碳烟的排放急速恶化。当柴油机自身负荷上升时,碳烟排放的恶化也在加剧。因为柴油机负荷增大时, EGR 率升

高, 燃烧后期的温度也增高, 空燃比减小, 混合气体的氧气浓度降低, 燃烧条件恶化, 从而造成碳烟排放恶化。因此在低负荷工况下采用 EGR 技术, 可以忽略对碳烟排放的影响; 但是在中高负荷工况下, 采用废气再循环技术时, 必须考虑对碳烟排放的影响。

从图 13 可以看出, 随着 EGR 率的增加, NO_x 排放呈单调递减趋势, 当柴油机负荷为 25% 时, NO_x 排放由最高的 907×10^{-6} 降低至 400×10^{-6} 左右。降低比例达到 55%; 当 EGR 率为 31% 左右时, NO_x 排放值维持在最低点。当柴油机负荷为 50% 时, NO_x 排放由最高的 $1\,308 \times 10^{-6}$ 降低至 700×10^{-6} 左右, 降低比例达 45%; NO_x 排放稳定时的 EGR 率为 19.5%。在每个工况下使用 EGR 技术, NO_x 的排放均有不同程度的下降。且随着 EGR 率逐渐升高, NO_x 排放逐渐降低。在低负荷工况下, 气缸内氧气含量高, 需要有相对多的废气才可以有效控制 NO_x 的排放; 在中高负荷工况下, 较少废气的引入便可以有效抑制 NO_x 的排放。

4 结 论

(1) 在船用柴油机上采用 EGR 系统能够有效降低 NO_x 排放。在低负荷工况下可以采用相对较大的 EGR 率以减少 NO_x 的排放; 在较高负荷时, 较小的 EGR 率便能较大程度地减少 NO_x 的排放。

(2) 在柴油机上采用 EGR 技术降低 NO_x 排放

的同时, 会使得碳烟排放增多, 特别是在 EGR 率较大的情况下, 碳烟排放急剧增大。当柴油机负荷增大时, 较大 EGR 率下碳烟排放恶化更加严重, 所以在中等负荷时要采用较小 EGR 率。

(3) 在船用柴油机上引入 EGR 系统对柴油机的有效功率和油耗有一定的影响。在中低负荷条件下, 采用 EGR 技术会降低燃烧过程的放热速率, 导致燃油利用率降低, 相对平缓的放热过程使缸内最大压力和温度减小, 做功能力减弱, 有效功率降低。

参考文献

- [1] 吴国凡, 刘喜元, 周红权. 国际防止船舶污染海洋公约现状及发展趋势 [J]. 船海工程, 2010 (6): 64-67.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] 王许, 尧命发, 郑尊清, 等. 多次喷射与 EGR 耦合控制对柴油机性能和排放的试验研究 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (1): 26-32.
- [4] 陈贵升, 沈颖刚, 郑尊清, 等. 采用 EGR 的重型柴油机低速高负荷性能与排放特性 [J]. 内燃机学报, 2014 (2): 97-103.
- [5] 赵昌普, 李小毡, 张军, 等. EGR 的热效应和稀释效应对柴油机燃烧和排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20 (1): 31-37.

(上接第 4 页)

6 总 结

(1) 广州柴油机厂股份有限公司自主研发的 G26 船用中速柴油机, 技术指标和性能指标均满足项目设计任务书要求。强化系数 $p_{me} \cdot C_m = 25.1$ ($\text{MPa} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$), 在国内类似自主品牌产品中领先, 达到国际同类先进产品的水平。

(2) 6G26 柴油机取得了中国船级社颁发的柴油机国际防止空气污染证书和船用产品型式认可证书, 已经投放市场, 进入实船应用阶段。

(3) G26 系列柴油机以其可靠性高、外形简洁、维护方便和良好的经济性, 受到越来越多新老客户的欢迎, 具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 高德明, 甘海燕, 王峰, 等. G32 系列柴油机的总体设计 [A]. 中国内燃机学会大功率柴油机分会成立二十周年特辑 [C], 2001. 10.
- [2] 顾宏中. 大功率柴油机的技术发展 [J]. 柴油机, 2005, 27 (1): 1-4.
- [3] 华中科技大学能源与动力工程学院. 广柴 G26 型柴油机气缸盖结构强度有限元计算分析报告 [R]. 2010.
- [4] 霍荣康, 孙良艳. G32 系列中速柴油机的设计特点 [A]. 中国造船工程学会优秀论文集 [C]. 2008. 1.
- [5] Stefan Lipp, Roland Schmidt. The new FERROCOMP-piston for high cylinder output [C]. The 23rd CIMAC Congress in Hamburg, 2001.