

性能与排放

基于 CONVERGE 的船用气体机仿真分析

周秀亚, 韩连任, 徐 震

(中船动力研究院有限公司, 上海 200127)

摘 要: 为解决某大型气体燃料发动机燃烧不稳定、燃烧速率慢、热效率下降甚至失火等问题, 采用预燃室式燃烧系统并以预燃室混合气加浓的方式实现点火燃烧。应用三维 CFD 软件 CONVERGE 对该发动机的排气、进气、压缩和燃烧过程进行了三维 CFD 数值模拟分析, 得到了燃烧室压力、温度、放热率曲线及温度场变化过程等参数; 并比较分析了不同点火时刻对燃烧性能的影响。

关键词: 船用气体发动机; 预燃烧室; 燃烧性能

中图分类号: TK431⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)04-0018-06

Simulation Analysis of a Marine Gas Engine Based on CONVERGE Software

Zhou Xiuya, Han Lianren, Xu Zhen

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200127)

Abstract: In order to solve the combustion problems of a large gas engine, such as combustion instability, slow combustion rate, and reduction of thermal efficiency or even misfire, pre-chamber combustion system was employed and the concentration of gas mixture in pre-chamber was increased to realize ignition and combustion. Analysis was carried out using 3-D CFD software package CONVERGE to simulate the engine's exhaust, intake, compression and combustion process. Based on the simulation results, the pressure, the temperature, the heat release rate curve and the change of temperature field of the combustion chamber were obtained, and the influence of different ignition timing on combustion performance were compared and analyzed with each other.

Key words: marine gas engine; pre-chamber; combustion performance

0 引 言

近年来为应对能源、环境和经济问题, 气体燃料发动机已成为国内外学者和生产厂商的研究热点, 并在应用领域占据重要地位。开发出高性能、低排放并与气体燃料相适应的气体发动机是一项综合性研究。采用稀薄燃烧策略^{[1]、[2]}、预燃室火花点火燃烧系统是提高气体发动机性能的先进技术。本文针对某船用预燃式气体机, 采用三维 CFD 软件 CONVERGE 对其全负荷时的排气、进气、压缩和燃烧过程进行三维数值模拟研究, 分析预燃式气体机燃烧特点并探讨不同点火时刻对燃烧性能的影响。

船用气体机缸径较大, 采用火花塞直接点燃气缸内气体很难引燃, 为保证性能稳定可靠, 通常在

缸盖中心增加预燃烧室。火花塞引燃预燃烧室的加浓天然气, 高温火焰通过预燃烧室连接通道传播, 继而点燃主燃烧室燃气。

1 仿真计算

1.1 主机参数

本文以某工程样机为研究对象, 该机型主要参数如下表 1。

表 1 某气体机主要参数

缸径/mm	320
冲程数	4
冲程/mm	420
连杆长度/mm	950
转速/(r·min ⁻¹)	720

1.2 加浓进气过程

为保证预燃烧室易于引燃，根据文献 [4] 说明：点火时刻火花塞附近的当量空燃比保证在 0.8 ~ 1.2 之间；并根据低压天然气进气设计原理，选取如图 1 所示的加浓进气曲线，以保证在设计点火时刻满足燃烧条件。

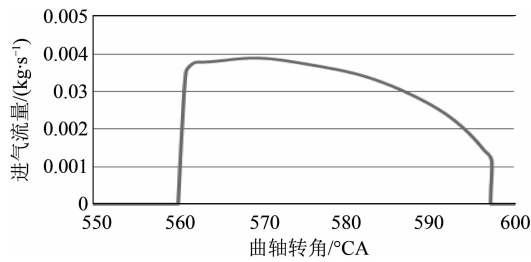


图 1 天然气加浓进气曲线

1.3 初始条件

选取排气阀开启为计算初始时刻，初始条件如表 2 所示。

表 2 计算初始条件

缸内预燃烧室压力/MPa	0.943
缸内预燃烧室温度/K	1 063
进气道压力/MPa	0.34
进气道温度/K	311.2
排气道压力/MPa	0.283
排气道温度/K	812
计算初始时刻/°CA	145.1

1.4 计算网格

CONVERGE 软件具有自动划分网格功能，仅须将计算域的几何模型导入。几何模型如图 2 所示，包括：进气道、排气道、缸内、预燃烧室；按照边界将其分类并定义边界条件。

通常采用自动网格处理技术，但如计算域尺度较大应采用灵活的网格划分方案，在保证计算精度的同时提高运算速度。本文采用的方案为：基本网格尺寸 16 mm；温度和速度梯度自动加密 3 次；火花塞附近加密到 0.25 mm；气阀动作时刻：气阀座圈加密 3 级，加密 2 层；预燃烧室加密到 2 mm。计算过程中，网格数量在 300 000 ~ 1 200 000 之间，并根据温度梯度等条件进行自动加密。一定程度上减小了网格相关性的影响。

1.5 物理模型

在本文的仿真研究中，湍流模型选择 K-Epsilon/RNG 模型；燃烧模型选择 SAGE 模型，并导入 CHEMKIN 格式中的化学反应机理，利用 ISAT 加速计算并与流动过程独立并行；点火模型选择火花塞自动点火模型；NO 排放选择扩展的 Zeldovich 机

理等^[5]。



图 2 计算几何域

2 原机仿真过程

原机设计的火花塞位置在预燃室上平面下 5 mm 处，并设定 16 °CA BTDC 火花点火。本文通过对 720 °CA 一个完整工作循环的模拟进行仿真分析。

2.1 压力值分析

火花塞点燃预燃烧室，燃烧放热情况如图 3 及图 4 所示：预燃烧室压力升高，出现一个峰值，并引燃主燃烧室，主燃烧室燃烧压力开始升高。虽然预燃烧室燃烧结束后压力会有所回落，但后续在主燃烧室的压力传递作用下随之升高。主燃烧室最高燃烧压力达到 16 MPa 左右，说明缸内预混气体具有较好的燃烧效率。

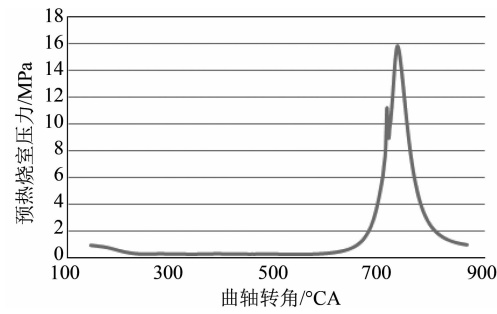


图 3 预燃烧室压力曲线（原机）

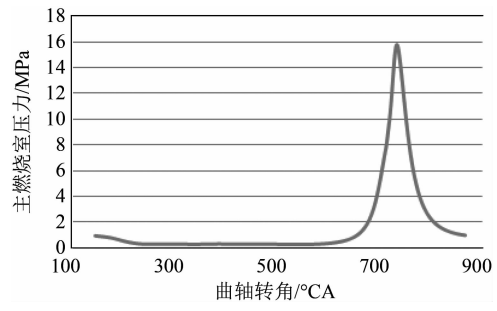


图 4 主燃烧室压力曲线（原机）

2.2 温度值分析

如图 5 中, 预燃烧室燃烧后温度急剧上升, 瞬时温度约为 2 500 K, 高温向主燃烧室传递并引燃主燃烧室, 此后预燃室温度逐渐降低。主燃烧室在燃烧过程中温度逐步升高, 最高温度约为 1 900 K, 如图 6。由于预燃烧室由火花塞引燃, 且内部燃空当量比较高, 瞬时温度较高, 因此须对预燃室加强冷却设计, 并做结构强度仿真验证。

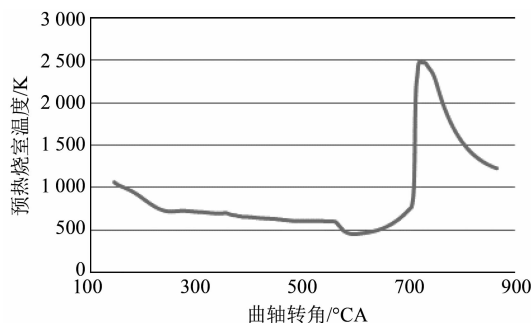


图 5 预燃烧室温度曲线 (原机)

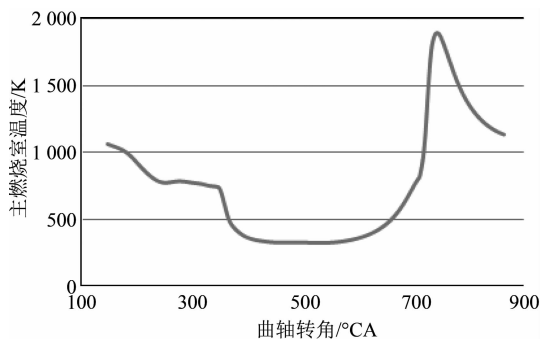


图 6 主燃烧室温度曲线 (原机)

2.3 放热率分析

预燃烧室点火后, 立即开始燃烧放热, 约在放热率最大时刻引燃主燃烧室, 主燃烧室开始放热。燃烧瞬时放热率最大值为 7 500 J (图 7), 而通过燃烧室累计放热率 (图 8) 可大致分析得到: 燃烧持续期约为 715 ~ 750 °CA。

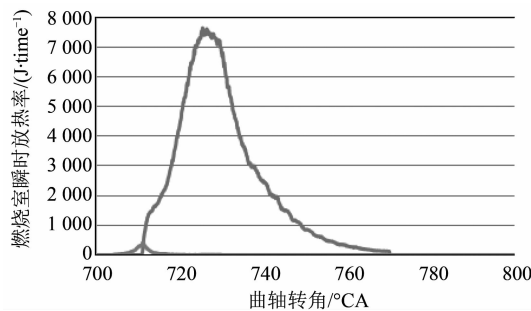


图 7 燃烧室瞬时放热率曲线 (原机)

2.4 气体组分曲线

预燃室内的燃空当量比如图 9 所示: 开始阶段主燃烧室的燃料进入预燃烧室, 预燃烧室内燃空比缓慢增加, 之后由于加浓喷射, 燃空比快速增加; 加浓喷射过程结束后, 缸内气体从主燃烧室经孔道进入预燃室, 预燃室内燃空当量比快速降低; 到达点火时刻时为 1.05, 满足点火要求。点火燃烧后燃空当量比急剧降低, 直到燃料殆尽。主燃烧室内的燃空当量比如图 10 所示: 在进气过程逐渐增大到最大值并保持稳定, 燃烧后消耗殆尽。

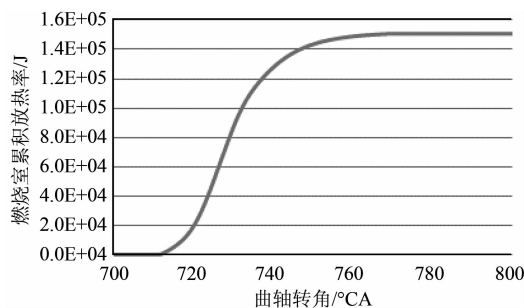


图 8 燃烧室累积放热率曲线 (原机)

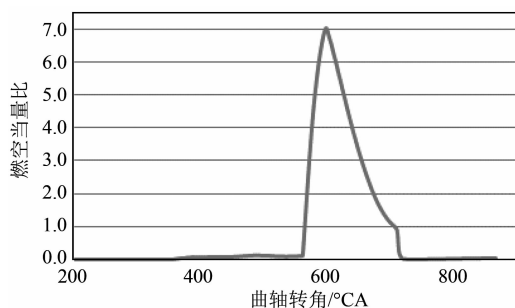


图 9 预燃烧室燃空当量比曲线 (原机)

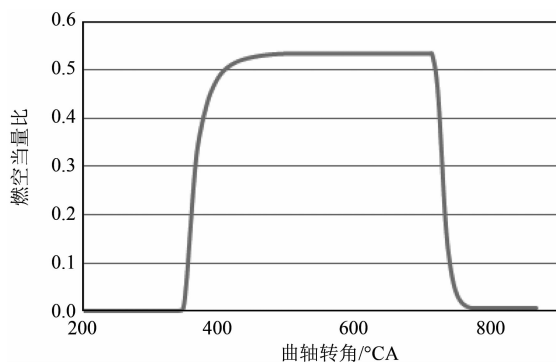
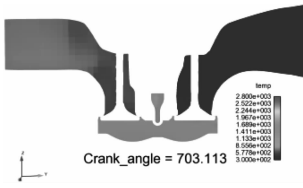
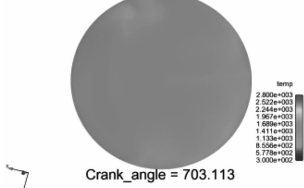
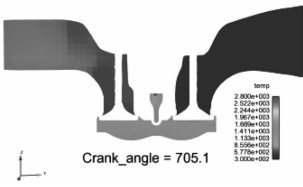
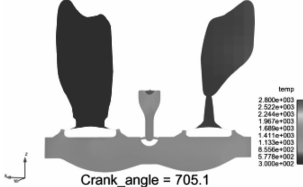
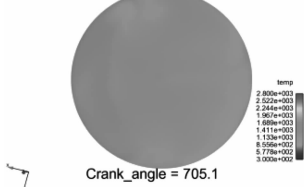
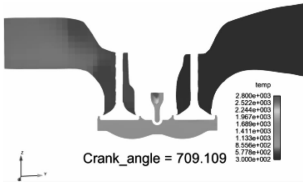
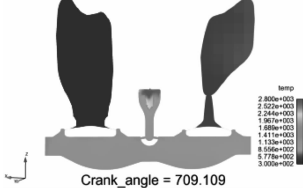
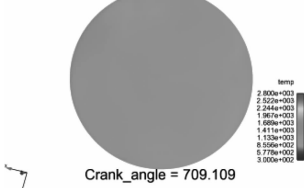
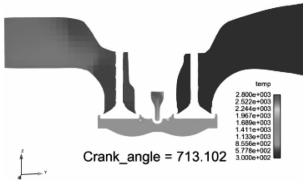
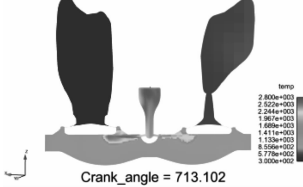
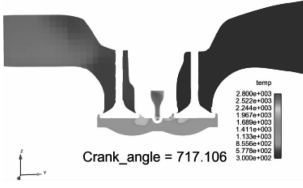
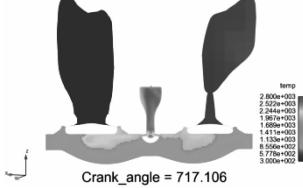
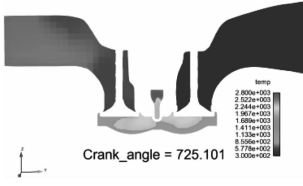
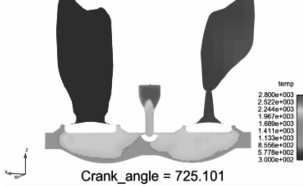
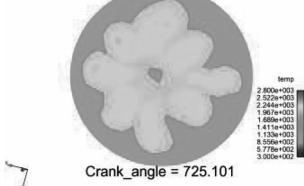
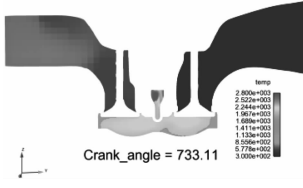
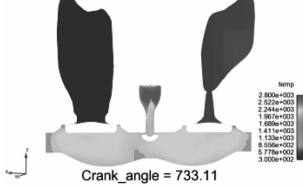
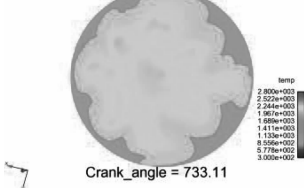
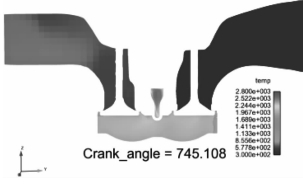
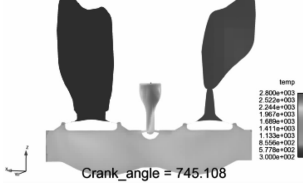
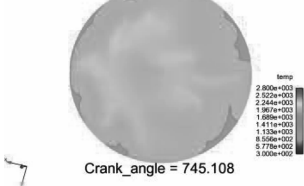


图 10 主燃烧室燃空当量比曲线 (原机)

2.5 燃烧过程分析

为更好地分析燃烧过程的发展, 通常选用某一截面的温度来进行分析。本文抽取缸内计算域截面 1 (切进、排气道面)、截面 2 (切预、主燃室气口面)、截面 3 (Z 方向横截面), 如图 11 所示。分析得到截面温度场分布如表 3。

表 3 截面温度场分布

曲轴角度/°CA	截面 1	截面 2	截面 3
703	 Crank_angle = 703.113	 Crank_angle = 703.113	 Crank_angle = 703.113
705	 Crank_angle = 705.1	 Crank_angle = 705.1	 Crank_angle = 705.1
709	 Crank_angle = 709.109	 Crank_angle = 709.109	 Crank_angle = 709.109
713	 Crank_angle = 713.102	 Crank_angle = 713.102	 Crank_angle = 713.102
717	 Crank_angle = 717.106	 Crank_angle = 717.106	 Crank_angle = 717.106
725	 Crank_angle = 725.101	 Crank_angle = 725.101	 Crank_angle = 725.101
733	 Crank_angle = 733.11	 Crank_angle = 733.11	 Crank_angle = 733.11
745	 Crank_angle = 745.108	 Crank_angle = 745.108	 Crank_angle = 745.108

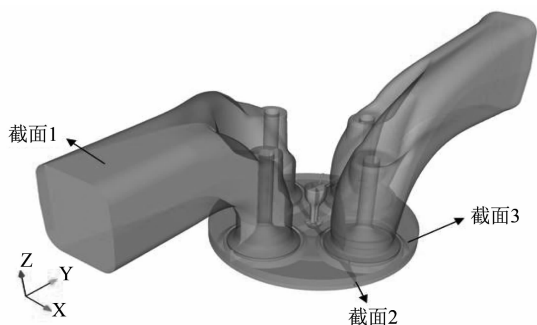


图 11 计算域截面图

从表中可分析: 704 °CA 点火, 705 °CA 在火花塞附件出现局部高温气体, 并在 705 ~ 713 °CA 预燃烧室高温区域逐步扩散, 高温火焰向主燃烧室传递; 713 °CA 主燃烧室燃气被预燃烧室传递的高温气体引燃, 713 ~ 725 °CA 主燃烧室大面积燃烧, 主燃烧室高温区域继续扩大; 725 ~ 745 °CA 燃烧沿着缸壁方向发展, 剩余燃料基本消耗殆尽。

3 点火时刻分析

原机设计采用 -16 °CA BTDC 火花点火, 缸内能够顺利引燃并燃烧。在不改变加浓进气曲线条件下, -17 ~ -15 °CA 均满足点火要求。将点火时刻分别改为 -15、-15.5、-16、-16.5、-17 °CA, 再次进行计算, 不同点火时刻的计算结果如下。

3.1 预燃烧室压力、温度曲线

预燃烧室压力曲线如图 12 所示: 随着点火时刻推后, 预燃烧室第一个峰值曲线逐渐增大, -15 °CA 点火, 预燃烧室第一个峰值压力为 11.7 MPa, 而 -17 °CA 点火, 仅为 10.4 MPa, 但最大压力值是由主燃烧室决定的, 故基本一致。预燃烧室温度曲线如图 13: 随着点火时刻提前温度峰值的曲轴转角提前, 但最高温度差别不大, -17 °CA 点火的温度峰值比 -15 °CA 点火的略大, 约大 20 K。

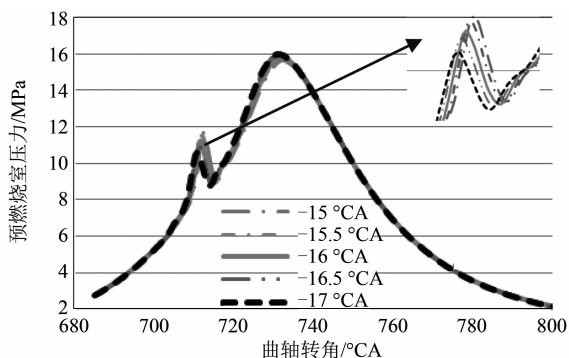


图 12 预燃烧室压力曲线 (不同点火时刻)

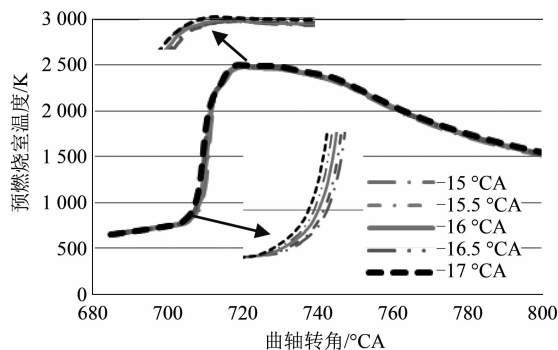


图 13 预燃烧室温度曲线 (不同点火时刻)

3.2 主燃烧室压力、温度曲线

如图 14 所示: 当点火时刻为 -16.5 °CA 时, 在 732 °CA 时刻最高燃烧压力最大达到 16.0 MPa, 而点火时刻为 -15 °CA 时, 在 732.5 °CA 最高燃烧压力仅为 15.6 MPa。如图 15 所示, 当点火时刻为 -16.5 °CA, 在 743 °CA 时刻, 温度最大达到 1905.2 K; 当点火时刻为 -15 °CA 时, 在 744.1 °CA 时刻, 温度最大仅达到 1894.1 K。

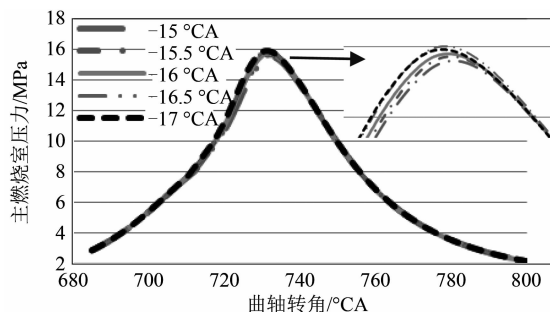


图 14 主燃烧室压力曲线 (不同点火时刻)

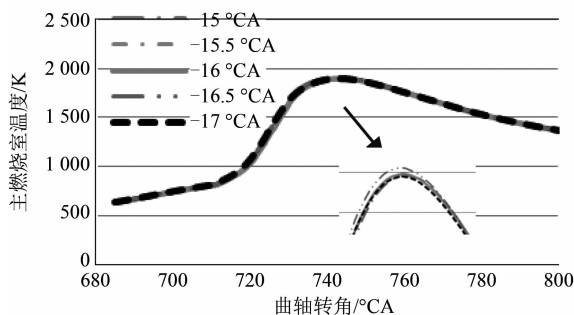


图 15 主燃烧室温度曲线 (不同点火时刻)

3.3 燃烧室放热率曲线

如图 16 所示: 点火时刻提前燃烧放热率也提前; 最终累积放热量如图 17, 各点火时刻总体上基本一致, 但 -16.5 °CA 点火累积放热量最大。

3.4 排放数据比较

排放数据如图 18, 可见: -16.5 °CA 点火时刻的 NO_x 排放最多, HC 排放最少, 这也同 -16.5 °CA 时缸内燃烧过程的缸内温度最高一致。通过多组算

例结果比较可得出: NO_x 与 HC 排放数值此消彼长, 这符合排放产生原理。

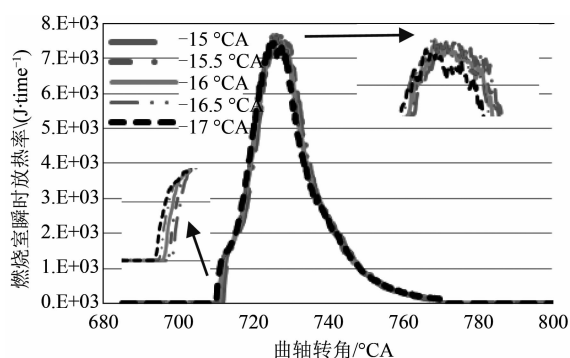


图 16 燃烧室瞬时放热率曲线 (不同点火时刻)

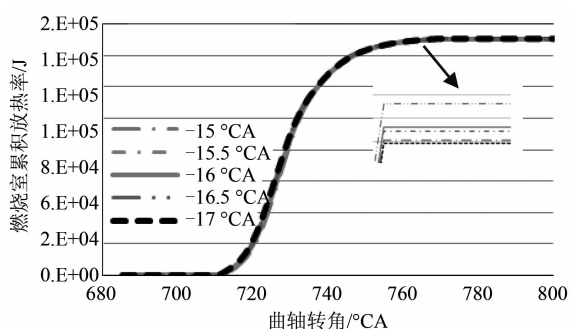


图 17 燃烧室累积放热率曲线 (不同点火时刻)

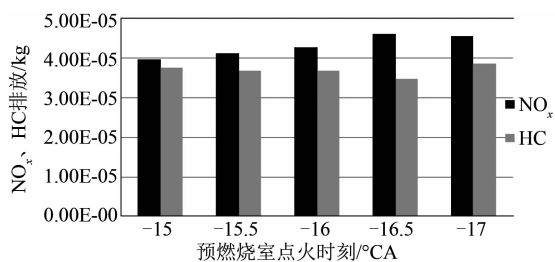


图 18 排放统计值

4 结 论

(1) 通过模拟船用预燃式气体机缸内燃烧工

作过程, 得出原机的缸内压力、温度、空燃比曲线。所设计的预燃室及预燃室通道均满足气体燃料船用主机的工作要求, 火焰射流贯穿主燃室, 燃烧速率快, 热效率高。

(2) 预燃室内加浓喷射后, 在点火时刻预燃室内形成了稍浓混合气, 在火花塞附近燃空当量比为 1.05, 有利于可靠点火和快速火焰传播。

(3) 预燃烧室点火后, 预燃室内工质温度在相当长的持续期内保持在 2 000 K 以上, 考虑到预燃室没有扫气, 预燃室组件会受到高温的极大考验。因此预燃室冷却是该燃烧系统设计中必须考虑的因素。

(4) 比较不同点火时刻的燃烧性能参数表明: 点火时刻对缸内燃烧性能有一定影响, 不同点火时刻的燃烧室缸压、温度及放热率有一定程度的差别。

(5) 预燃室加浓喷射策略及点火时刻配合对发动机性能有更大影响, 因此联合优化将会是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [2] 郭子锐. 气体发动机技术的发展 [J]. 柴油机, 2011, 33 (5): 6-10.
- [3] 冯立岩. 我国气体燃料大型船用主机的发展策略探讨 [J]. 柴油机, 2011, 33 (6): 3-9.
- [4] HERDIN G, GRUBER F, KIAUSNER J, et al. Miller cycle-efficiency potentials for gas engines [C]. CIMAC Paper, No. 197, 2004.
- [5] YAMANAKA K, AHIRAGA Y, NAKAI S, et al. Development of pre-chamber spark plug for gas engine [C]. CIMAC Paper, No. 182, 2010.