

基于可变循环的气体发动机 Tier III 排放方案展望

王 民¹, 于洪亮², 温苗苗³, 张 凌⁴(1. 中国船级社, 辽宁 大连 116013; 2. 大连海洋大学, 辽宁 大连 116023;
3. 中国船级社, 上海 200135; 4. 中国船级社, 北京 100007)

摘 要: 根据远洋船舶航行特点, 构想了一种基于可变热力循环, 使气体发动机能够兼具高压气体发动机和低压气体发动机优点的 Tier III 排放方案。希望通过天然气预混合、可变压缩比、引燃优化、燃烧速率控制、空燃比控制等技术的组合应用, 实现均质稀薄燃烧, 降低 NO_x 排放, 使高压气体发动机在不使用 EGR 和后处理技术的情况下, 达到 IMO Tier III 标准。

关键词: 可变热力循环; 气体发动机; 均质稀薄燃烧; 氮氧化物

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)02-0031-05

The Outlook of IMO Tier III Solution for Gas Engine Based on Variable Thermodynamic Cycle

Wang Min¹, Yu Hongliang², Wen Miaomiao³, Zhang Ling⁴(1. China Classification Society, Liaoning Dalian 116013; 2. Dalian Ocean University, Liaoning Dalian 116023;
3. China Classification Society, Shanghai 200135; 4. China Classification Society, Beijing 100007)

Abstract: Based on the characteristics of ocean-going ships, a Tier III compliant scheme that allows gas engines to combine the advantages of high-pressure gas engines and low-pressure gas engines through variable thermodynamic cycle is conceived. Several technologies are combined, including natural gas premixing, variable compression ratio, pilot optimization, combustion rate control and air-fuel ratio control, to achieve homogeneous lean-burn and reduce nitrogen oxide emissions, and enable high-pressure gas engines to achieve IMO Tier III standards without EGR or after-treatment technologies.

Key words: variable thermodynamic cycle; gas engine; homogeneous lean-burn; nitrogen oxide

0 引 言

《国际气体动力船舶规则》(IGF Code) 的生效为气体动力船提供了法规依据。天然气燃料不仅在渡轮、拖轮等短程小船中得到应用, 而且在天然气运输船、集装箱船、油船、大型矿砂船等领域也得以推广。

随着 MAN Diesel & Turbo 推出 ME-GI 系列高压低速双燃料发动机, Winterthur Gas & Diesel 推出 Flex-DF 低压低速双燃料发动机, 低速气体机在远洋船上得到广泛应用。其中, MAN ME-GI

高压双燃料发动机采用 30 MPa 高压天然气缸内直喷技术及迪塞尔 (Diesel) 循环, 具有功率密度大、燃油经济性好、工作可靠、动态性能好的优点^[1]; 但它的缺点是不能直接满足国际海事组织 (IMO) 氮氧化物第三阶段 (NO_x Tier III) 排放标准。而 Flex-DF 低压双燃料发动机使用 1.6 MPa 的低压天然气, 采用奥托 (Otto) 循环, 可实现均质稀薄燃烧, 达到 Tier III 排放标准; 但它的缺点是受爆震限制, 功率下降、燃油消耗大、动态性能差、对燃气质量要求高。

注: 本文使用了上述两公司部分公开资料, 在

此表示感谢。

可见, 高压双燃料发动机的劣势主要在于不能直接满足 Tier III 排放标准, 而目前采用废气再循环 (EGR) 或催化还原后处理 (SCR) 技术都会增加 30% 以上成本。如果能使高压气体发动机直接满足 Tier III 排放要求将非常有意义。

1 高压气体发动机实现 Tier III 排放的构想

目前, 天然气作为一种石油的清洁替代燃料被应用, 但实际上天然气燃料对 NO_x 的减排并无太大作用。决定 NO_x 排放的本质因素在于发动机的燃烧技术, 所以本文认为研究降低高压双燃料发动机 NO_x 排放的可行技术途径是: 分析研究低压燃气发

动机的特点, 然后借鉴应用于高压燃气发动机。

1.1 低压气体发动机低排放机理

1.1.1 热力循环

ME-GI 双燃料发动机采用和柴油机相同的 Diesel 循环, 在活塞接近上止点位置时向燃烧室喷入点火油, 紧跟着喷入 30 MPa 的高压燃气, 完成燃烧过程。而 Flex-DF 发动机则采用 Otto 循环, 在压缩过程向气缸喷入 1.6 MPa 的低压燃气, 混合气在气缸内被压缩但不会点燃, 在活塞接近上止点位置喷入点火油引燃已充分混合的燃气, 完成燃烧过程。由汽油机、柴油机及两种高低压气体发动机的循环特点 (图 1) 的比较可知: Otto 循环本身并不能降低排放, 而是采用均质燃烧技术的结果。

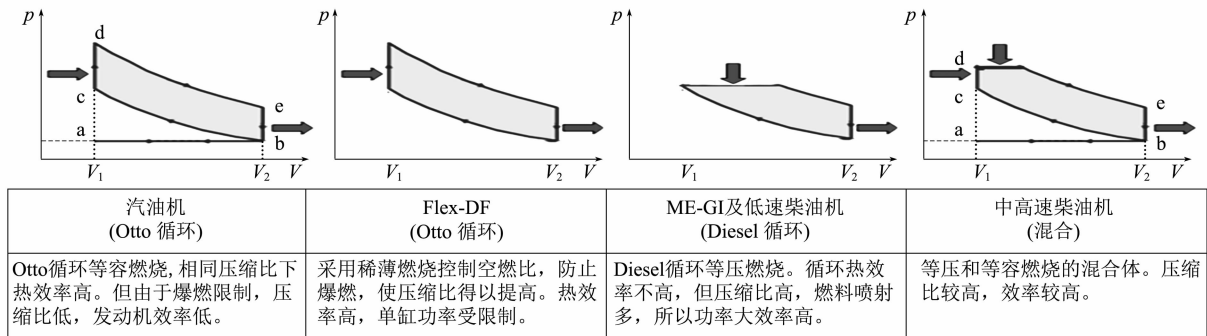


图 1 不同热力循环特点比较

1.1.2 均质燃烧

燃烧技术是内燃机的核心技术之一。高压气体发动机的 NO_x 主要生成于气缸的高温区, 燃烧温度及持续时间是影响 NO_x 形成的最主要因素。但也不能为了追求低排放过分降低燃烧温度, 因为平均燃烧温度的降低会影响循环的热效率和增加油耗。图 2 为 ME-GI 缸内燃烧模拟图。燃烧中的高温点虽然只燃烧了 10% 左右的燃料, 却释放了 80% 的 NO_x 。因此改善发动机缸内燃烧, 防止局部高温点的产生, 是降低排放的有效手段。



图 2 ME-GI 高压发动机缸内扩散燃烧

低压气体发动机之所以能达到 Tier III 排放标

准, 主要借鉴了汽油机所采用的低温均质燃烧技术。20 世纪 90 年代后期, 汽油机涌现出了均质压燃 (HCCI)、预混合分层燃烧 (PSCCI)、低温燃烧 (LTC) 等技术, 其核心就是改变柴油机采用的扩散燃烧方式和汽油机采用的火焰传播燃烧方式, 而采用均质预混合、低温压燃的燃烧方式, 防止产生高温点, 实现内燃机的清洁燃烧^[2]。低压双燃料发动机的燃烧过程近似于均质压燃, 如图 3 所示。

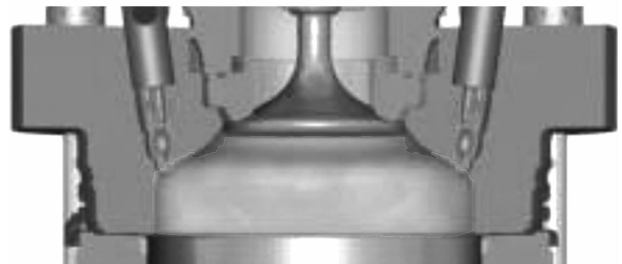


图 3 Flex-DF 低压发动机缸内均质燃烧

1.2 高压气体发动机实现均质稀薄燃烧的可行性

在以 Diesel 循环为基础的高压气体发动机上实

现低温均质燃烧尚无先例。ME-GI 几乎具有和低速柴油机完全相同的工作特点, 因为须在高压状态下喷入燃料, 不得不使用高压气体系统。传统上认为: 高压双燃料发动机因为使用 Diesel 循环而无法利用低温均质燃烧理论, 因此其 NO_x 排放不能满足 Tier III。

因此首先须突破高压气体发动机无法实现均质稀薄燃烧的固有思维。从前述分析可以看出: 为了实现低排放而采用 HCCI 技术, 该燃烧方式决定了放热是一个近似等容过程, 也就构成了 Otto 循环。对于高压气体发动机, 同样设想可以模仿低压气体发动机的气体均质预混合方案和点火方式, 采用类似的进排气定时和增压器匹配及稀薄燃烧理论, 达到同样的减排效果^[3]。总之, 高压气体燃料不应该是构成均质稀薄燃烧的障碍。

1.3 通过可变热力循环实现经济性和低排放统一

高压发动机单纯采用 Otto 循环均质燃烧技术并无实际意义, 将失去高压气体发动机的所有优点。

分析远洋船舶对发动机的使用要求: 远洋船舶大量时间航行在公海, 须保证较低的油耗以提高经济性; 需要好的动态响应以保证恶劣海况下的航行安全, 对此高压双燃料发动机非常有优势。而船舶在排放控制区内航行的时间较短, 可适当牺牲些功率和经济性换来排放性能的提高。

低速发动机空间限制相对小, 控制系统和燃气单元模块化设计使高低压气体发动机技术集成成为可能。基于此, 本文提出以可变热力循环原理为基础, 解决发动机设计中经济性和排放问题。HCCI 在低压气体发动上得以成功应用的经验可用于可变热力循环高压气体发动机。由于可节省尾气后处理装置的高昂投资, 而可变热力循环新增的硬件不多, 在技术经济上存在可行性。

2 高压双燃料发动机可变热力循环方案

本方案以采用 Diesel 循环的高压气体发动机为基础进行改进, 以便实现 Otto 循环, 并在 Otto 循环下通过采用均质燃烧技术降低排放。

气体燃料易实现均质预混合, 预混合气被压缩, 在湍流作用下形成均质混合气, 但实现压燃并不容易。为使均质混合气实现类似于压燃的同时燃烧, 需要较高的能量。通常采用预燃室引燃技术, 燃烧更多呈现一种多点同时点火的状态。对燃烧过程组织还须控制好放热速率, 形成负温度系数区

(这时化学反应速度随缸内温度增加而降低)^[2]; 其次, HCCI 只能在狭窄的工况范围内稳定运行, 须要增大空燃比以形成稀薄燃烧, 而混合气过稀或高辛烷值燃料在小负荷和怠速工况下容易失火, 在大负荷工况下又容易出现爆震现象, 因此增压器匹配显得格外重要。

综上, 为实现低温均质稀薄燃烧, 可通过电控系统调节燃气喷射提前角, 并改变燃气喷射阀结构及布置, 实现均质预混合; 通过可变气门等技术降低压缩比防止爆震; 通过采用改变增压比及废气旁通等方法调节空燃比实现稀薄燃烧, 防止爆震^[4]; 必要时通过加湿技术控制燃烧速率; 适当限制发动机低排放模式的额定功率。燃烧组织所用技术不限于上述方法之一或其组合。由于 ME-GI 发动机是目前世界上唯一应用的船用低速高压气体发动机, 下面结合该机进行说明。

2.1 热力循环转换

图 4 所示的热力循环图中, 当发动机使用油类燃料时, 采用 Diesel 循环; 当使用天然气燃料时, 控制系统转换至气体模式, 仍采用 Diesel 循环; 当在排放控制区航行时, 为达到 Tier III 排放标准, 现有的发动机设计采用了成本很高的废气再循环 (EGR) 系统, 本方案提出在使用天然气燃料时转至 Otto 循环, 通过组织燃烧, 实现低温均质燃烧, 达到 IMO Tier III 排放标准。

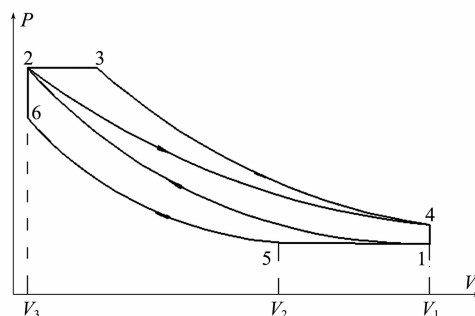


图4 可变热力循环图

针对原 ME-GI 发动机, 本方案增设了 Otto 循环模式下使用的预燃室和燃气喷射阀, 如图 5 所示。发动机电子喷射控制系统的应用是实现可变热力循环模式的基础。高压直喷发动机通常在 Diesel 循环 (图 4, 1-2-3-4-1) 下工作。调整至 Otto 循环 (1-5-6-2-4-1) 仅仅须将等压吸热过程 (2-3) 改变为等容吸热过程 (6-2)。具体实现方式是: 调整控制系统设置, 增大燃气喷射阀喷射提前角, 将燃料在发动机上止点前喷入气缸并和空气预混合; 点火时刻在发动机上止点前, 此时预混合好的燃

气在上止点附近快速燃烧实现等容吸热。

实际上, 由于最大燃烧压力的限制, 须要通过延迟排气阀关闭来降低压缩比。本方案的热力循环包括等压压缩 (1-5)、绝热压缩 (5-6)、等容燃烧 (6-2)、膨胀做功 (2-4), 膨胀比不变, 发动机工作近似米勒 (Miller) 循环。

2.2 均质混合气形成

Otto/Miller 循环的前提是形成均质预混合燃气, 而原 Diesel 循环的燃气喷射阀不利于混合气的形成。本文新喷嘴设置有两种方案: 如图 5, 保持原燃油喷射阀和燃气喷射阀不变, 在缸盖上增加专用的燃气喷射阀, 将燃气喷射至气缸底部。控制高压气体喷射贯穿度和湍流比, 使燃气能够在气缸内均布, 并利用活塞压缩过程形成的涡流进一步使其均质混合。将燃气喷射时间提前至上止点前 $110^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 曲轴转角, 在排气阀关闭后向气缸内喷射高压燃气, 实现均质预混合。

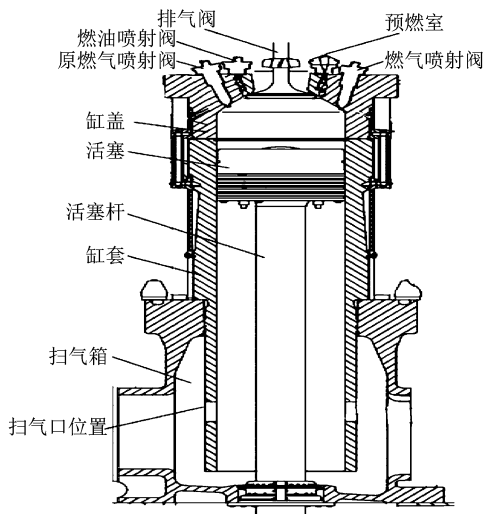


图5 气缸布置剖面图

如上述布置的预混合效果不理想, 可在气缸套扫气口位置布置燃气喷射阀, 将燃气喷射时间提前至扫气口关闭前。燃气通过燃气喷射阀喷射至气缸底部, 并随扫气空气布满气缸, 并利用活塞压缩过程形成的涡流进一步使其均质混合^[5]。燃气喷射角度控制在扫气口被活塞遮住之前尽量短的时间内, 喷射时间过早易造成甲烷逃逸或扩散至扫气箱。

上述两种方案的喷射提前角及喷射量均可通过电喷控制系统调整实现。

2.3 防止爆震

防止爆震是均质预混合燃烧必须解决的问题。天然气本身的着火点较高, 不容易被压燃。但当天然气甲烷值不高时, 容易在发动机压缩过程中自

燃, 有爆震倾向。又由于发动机在排放控制区内航行的时间较短, 对经济性和功率要求不高, 为防止混合气在气缸压缩过程中发生非受控燃烧而导致爆震, 可采用以下一种或几种方案的组合:

(1) 由于仅在排放控制区使用 Otto 循环, 可降低相应的额定功率, 但不得低于船舶要求的最小推进功率, 一般可降低至 Diesel 循环额定功率的 70% ~ 80%。

(2) 延迟排气阀关闭时间。由于允许额定功率下降, 所以可将压缩比降低至不超过 16。压缩比的确定应保证压缩终点的温度不超过混合气着火温度。

(3) 降低平均有效压力至 1.8 MPa 左右。

(4) 选择较高压比的可变喷嘴环增压器 (如 MAN 公司的 VTA 系列) 并结合废气旁通阀, 精确控制空燃比。根据 Wartsila 公司公布的资料: λ 一般在 1.8 ~ 2.3, 保持在稀薄燃烧适宜的区间内, 以防止爆燃和不完全燃烧, 如图 6。

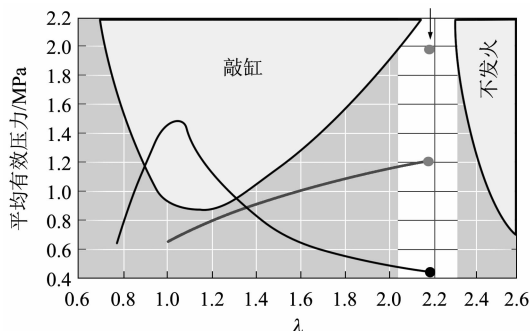


图6 稀薄燃烧工作区 (Wartsila)

2.4 避免火焰扩散燃烧

避免火焰扩散燃烧需具备足够的点火能量, 保证点火油能快速均匀地点燃混合气, 有两种选择方案:

(1) 增设预燃室, 或选配带有预燃室的微引燃油喷射系统。预燃室内有高浓度燃气混合气, 通过微量引燃油压燃。

(2) 采用分层喷射技术, 使原燃气喷射阀周围形成高浓度燃气区, 然后从燃油喷嘴喷入引燃油, 快速充分引燃混合气。

2.5 燃烧速度控制

通过调整点火定时, 控制最大燃烧压力和燃烧温度, 减少 NO_x 形成^[6]。必要时采用喷水加湿、低 EGR 率等技术控制燃烧速率。对于低速发动机, 通常无需额外的降低燃烧速率措施。

2.6 防止天然气逃逸

对燃烧室进行优化^[7], 保证预混合气的均匀

性,避免形成不可燃的过分稀薄的混合气区,防止气体处于死角而不充分燃烧,造成天然气逃逸。

2.7 控制系统的实现

图 7 所示为可变热力循环发动机气缸喷射控制单元,其主要用于确定不同工况下燃油、燃气的喷射量及其正时^[8],该功能由发动机控制系统及气缸控制单元 CCU 实现。ME-GI 发动机的每个气缸设有一个 CCU,控制燃油和燃气阀的喷射以及排气阀的动作。

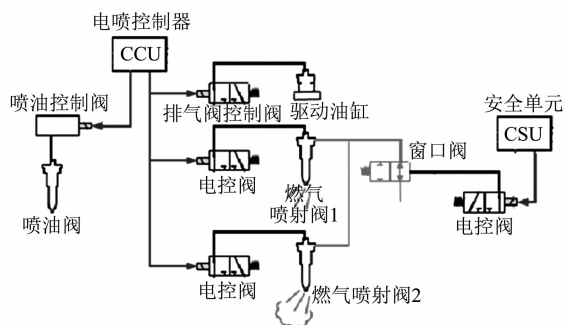


图 7 气缸喷射控制单元

在 Diesel 循环下,CCU 控制燃油在上止点喷入气缸点火,然后在 CCU 和安全单元控制下燃气喷射阀 1 喷入高压燃气,被燃油点燃,实现扩散燃烧。可变热力循环发动机的每个气缸须增加燃气喷射阀 2,同时,加大燃气喷射阀喷射提前角,在上止点前一定曲轴转角时,燃气喷射阀 2 向气缸内喷射高压燃气,实现均质预混合。CCU 控制燃油的喷射提前角,使燃气在上止点附近快速燃烧,完成 Otto 循环的等容放热过程。

3 数值模拟过程

以 S50ME-GI 双燃料发动机为研究对象,采用 AVL Fire 软件,结合有限容积法、湍流模型理论、化学动力学与计算燃烧学进行数值分析。结果如图 8 和图 9 所示。图 8 为发动机缸内压力及温度曲线,可见:双燃料发动机缸内压力和温度均随缸内天然气的大范围燃烧迅速上升,最终达到最高值。缸内最高压力为 16.2 MPa,出现在 14.25 °CA ATDC,缸内最高温度为 1 528 °C,出现在 21.5 °CA ATDC。图 9 为高排放产物的瞬时变化过程。NO 生成位置集中在高温区域,燃烧过程中未燃 CH₄ 从喷嘴上下两侧向近缸壁处移动。

数值模拟结果表明本文的方案已经具有可行性,方案中技术的组合及工作参数的论证将在国家

科技项目中详细研究。

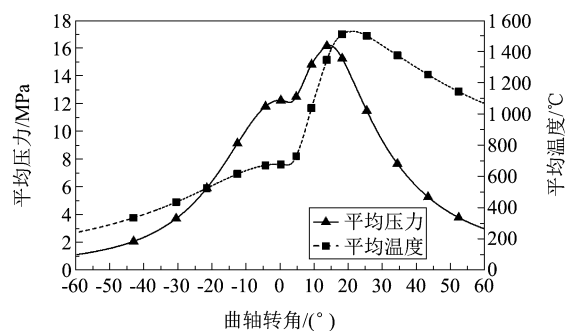


图 8 双燃料模式下缸内压力和温度曲线

	NO质量当量	未燃CH ₄ 当量比
3° CA ATDC		
4° CA ATDC		
5° CA ATDC		
6° CA ATDC		
8° CA ATDC		
10° CA ATDC		
21.5° CA ATDC		

图 9 NO、未燃 CH₄ 缸内瞬时变化过程

4 总结

本文提出通过采用可变热力循环的方案实现发动机节能减排。发动机在运行中可根据不同的排放标准改变热力循环模式,以达到高热效率或低排放的目标。

以高压气体发动机为基础,设计一系列技术组合来实现低温均质稀薄燃烧,初步的数值模拟过程表明本方案具备可行性。方案实施的难点在于:在不更换发动机结构件和增压器的情况下,只通过控制系统改变发动机运行参数、燃烧方式、压缩比和空燃比,实现均质低温燃烧。兼顾两种工作模式有较大技术难度,具体的实施方案及优化仍须做大量论证工作。

(下转第 50 页)

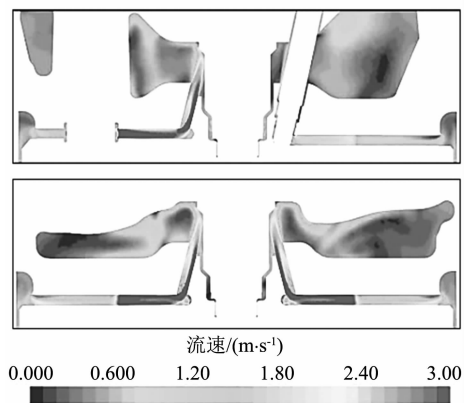


图 15 优化后喷油器附近流体流速

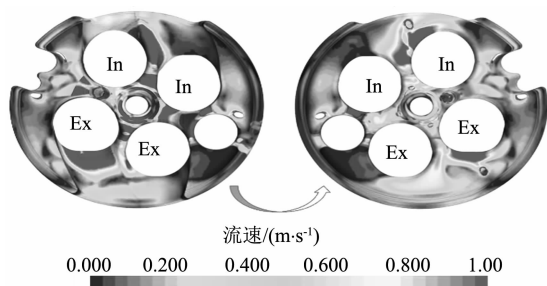


图 16 优化后缸盖下部水套流速分布

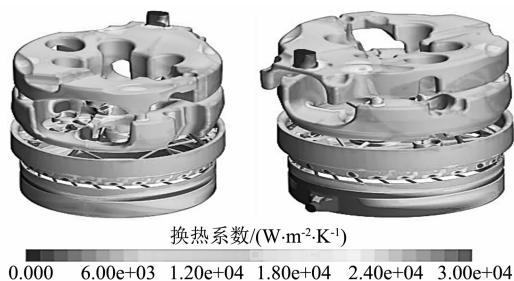


图 17 优化后气缸单元的换热系数分析

4 结论

(1) 通过取消水套钻孔, 改变水套水腔的结构, 实现了均匀合理的流动分布和足够的流动速度。在缸套钻孔孔径增大后, 水流速度得到明显缓解, 降至约 $4 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$, 在可接受的范围内。

(2) 改变水套水腔几何形状, 可以在有效的流动速度和流动状态范围内使压降降低约 0.03 MPa 。优化后的总压降约为 0.048 MPa , 小于 0.05 MPa (设计值), 满足设计要求。

(3) 缸盖水腔局部位置经过优化后流动性能得到改善, 高放热区 (阀门鼻梁区的钻孔, 喷油器周围的间隙) 流动速度合理、流动分布均匀, 下部水腔也维持了良好的冷却状态。

(4) 优化后的模型有效改善了冷却效果, 该优化方法为后续柴油机冷却水腔的设计提供了可靠依据。

参考文献

- [1] 全兴信. 内燃机学 [M]. 李钟福等译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] 李明, 李明高. STAR-CCM+ 与流场计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 刘凯, 姚炜, 张超. 基于 CFD 技术的发动机水套选型及优化设计 [J]. 汽车零部件, 2014 (10).

(上接第 35 页)

参考文献

- [1] 马义平, 曾向明, 魏海军, 等. 国内外船用 LNG 动力发动机发展现状 [J]. 中国航海, 2016, 39 (3): 20-25.
- [2] 冯立岩, 张春焕, 李佳星. 气体燃料大型船用主机燃烧系统分析 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31 (b10): 25-29.
- [3] 马骏, 吕兴才, 吉丽斌, 等. 辛烷值和预混合率对双燃料发动机 SCCI 燃烧与爆震的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2009 (2): 308-313.
- [4] 黄猛, 王国仰, 刘康, 等. 天然气—柴油双燃料船用发动机燃气喷射系统及推进特性研究 [J]. 中国造

船, 2015 (2): 87-94.

- [5] 于洪亮, 段树林, 孙培廷. 主/引定时对船用天然气/柴油双燃料发动机燃烧排放的影响 [J]. 推进技术, 2016, 37 (9): 1735-1741.
- [6] 韩丹, 王谦, 何志霞, 等. 双燃料直喷发动机喷孔几何位置对燃烧排放的影响 [J]. 内燃机学报, 2017 (3): 238-245.
- [7] 李伟峰, 刘忠长, 王忠恕, 等. 引燃柴油量和当量比对双燃料发动机低负荷燃烧的影响 [J]. 内燃机学报, 2015 (6): 481-490.
- [8] 冯立岩, 田江平, 翟君, 等. 气体燃料船用主机工作过程三维数值模拟 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014 (7): 807-813.