

结构与可靠性

某发动机单缸冷却腔室 CFD 优化分析

于 佳, 蒋爱香, 赵建平, 张旭东, 苏展望

(陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105)

摘 要: 对某发动机单缸冷却腔室的流动特性进行 CFD 分析, 得到其流速和导热分布情况。由此对流速与压降异常部位进行优化设计。分析结果表明: 优化后的冷却腔室结构的流动特性得到改善, 保证了气缸单元具有良好的流动状态和较小的压降。

关键词: 发动机; 气缸单元; 冷却腔; CFD

中图分类号: TK421⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)02-0046-05

CFD Simulation and Optimization of the Cooling Chamber of an Engine Cylinder Unit

Yu Jia, Jiang Aixiang, Zhao Jianping, Zhang Xudong, Su Zhanwang

(Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xingping 713105)

Abstract: CFD simulation was carried out on the flow characteristics of the cooling chamber of an engine cylinder unit, and its flow rate and heat conduction were obtained. Based on the analysis results, optimization design was carried out on the position with abnormal flow rate and pressure drop. It shows that the flow characteristics of the optimized cooling chamber structure has been improved, which ensures the cylinder unit to achieve good flow state and smaller pressure drop.

Key words: engine; cylinder unit; cooling chamber; CFD

0 引 言

气缸单元的冷却应该保持在一个合理的范围内, 冷却温度过高或过低都会带来不良影响, 还会导致相关部件出现异常^[1]。为了保证发动机燃烧室有良好的冷却, 重点要对缸盖及水套冷却腔进行设计和优化。在缸套设计阶段, 利用 Star-CCM 软件对其冷却腔进行 CFD 仿真计算, 依据计算结果调整冷却孔布置方式, 优化冷却腔结构, 可以实现缸套和缸盖传热效果和流动特性最优化, 进而保证缸套设计的可靠性。

1 原模型分析

1.1 初始水腔概况

某柴油机的缸套、水套和缸盖设计较为复杂,

这也导致了水腔内部结构比较复杂, 水腔连通多用钻孔形式, 容易造成冷区不均衡。基于此, 本文针对气缸单元内冷却液流动特性进行详细分析, 以找出薄弱环节, 如导致压降增加的高流阻区或者流体停滞区等。

初始水腔模型如图 1 所示。腔体分为缸盖上部水腔、缸盖下部水腔、水套上部水腔、水套下部水腔四个部分。水套下部由 5 个钻孔引导冷却液流向上部腔内, 再由缸套钻孔直接引导冷却液流至缸套顶, 进而到缸盖。通过毛细钻孔引导冷却液经过喷油器和微引喷油器再到缸盖上部水腔。排气阀阀座也是钻孔的一个部位, 并引导冷却液从缸套流向喷油器的下部。

1.2 CFD 仿真流程

对模型的优化仿真按照图 2 的流程图进行。该

流程从 CAD 模型作为 CFD 计算的输入开始，将以 STEP 格式给出的几何形状加载到 Star - CCM + 中，并为划分网格做准备。网格生成后建立边界条件，如流体特性或物理模型等。模型经过预处理后进行首次 CFD 分析。如结果不满足期望，则对模型进行优化并循环计算，直到结果满足设定的要求为止，确定最终模型，并为后续的 FE 分析提供边界条件。

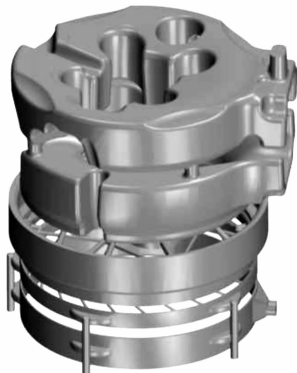


图 1 初始水腔模型

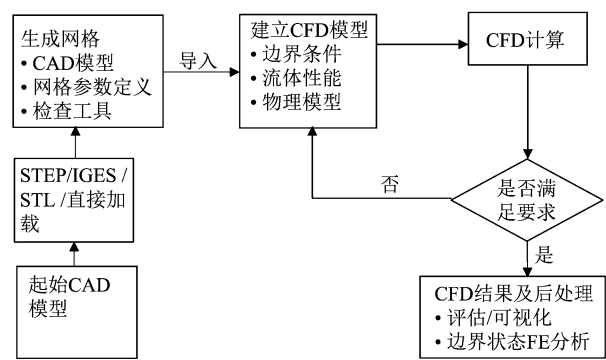


图 2 CFD 分析流程图

湍流模型采用 realizable 双层 K-Epsilon 模型，该模型将 realizable K-Epsilon 模型与双层方法相结合，模型中的系数相同，但模型获得了 all y^+ 壁面处理的灵活性。对于本领域来说，realizable K-Epsilon 模型比 standard K-Epsilon 模型增加了旋转和曲率的有关内容，能够给出更加精确的答案^[2]。

依据冷却剂物理性质和相关参数建立 2-layer K-Epsilon/All y^+ wall treatment 的 CFD 模型，并利用 Star - CCM + 软件，采用迭代法求解连续、动量和湍流方程离散化后所形成的非线性方程组^[3]。

在 CFD 分析中，只计算一个气缸。在预分析的基础上，采用 80 ℃ 水温作为该缸的入口温度；并假设 CFD 模型是一个独立的流体等温模型，温度保持连续稳定，比热变化不会影响 CFD 结果。

网格在 Star - CCM + 内建立，为由两个边界层

组成的多面体网格。对临界区域，如缸套、钻孔、喷油器和微引喷油器通道处进行网格细化，以便得到尽可能精确的仿真结果。最终确定的所有网格大约有 650 万个。

1.3 边界条件及优化要求

1.3.1 边界条件

部分发动机参数及边界条件详见表 1。

表 1 部分发动机参数及边界条件

发动机参数	负荷	100%
	单缸功率/kW	850
	预估废热/轴功率	17%
	预估水温升高值/℃	7
冷却液参数及状态	冷却剂	100% 冷却水
	状态	稳态、恒温、不可压缩、湍流流动
	进口温度/℃	80
	密度/ (kg · m ⁻³)	990.6
	运动黏度/ (Pa · s)	3.0 E - 4
	比热/ (J · kg ⁻¹ · k ⁻¹)	4 205.7
	导热系数/ (W · m ⁻¹ · k ⁻¹)	0.671
	进口流量/ (L · min ⁻¹)	300

1.3.2 优化要求

- (1) 缸套上部区域到上止点 TDC 的第 1 道活塞环的最小流速大于 0.5 (m · s⁻¹)；
- (2) 缸套处流道最小流速大于 0.5 (m · s⁻¹)；
- (3) 排气阀和喷油器间的最小流速大于 1.0 (m · s⁻¹)；
- (4) 节流孔和其它局部收缩区域的最大流速小于 10.0 (m · s⁻¹)；
- (5) 其它区域的最大流速小于 5.0 (m · s⁻¹)；
- (6) 缸头和缸套的总压降目标值（最佳情况）为 0.03 MPa；
- (7) 缸头和缸套的总压降最大容许值（最坏情况）为 0.05 MPa。

1.4 CFD 仿真结果

仿真结果如图 3 ~ 图 9 所示。由图 3 可见：表明压降最大处集中在水套水腔的钻孔部位，总压降达 0.078 MPa，明显超出预设的最高值 0.05 MPa。由图 4 可看出：水套钻孔处流速达到了 6 (m · s⁻¹)，水套下部水腔流速分布不均。图 5 更加详细地展示了水套水腔的流速状况。可以看出：钻孔和缸套毛细管处的流速都偏高，进水口相对侧的低流速区出现在不合理的地方。

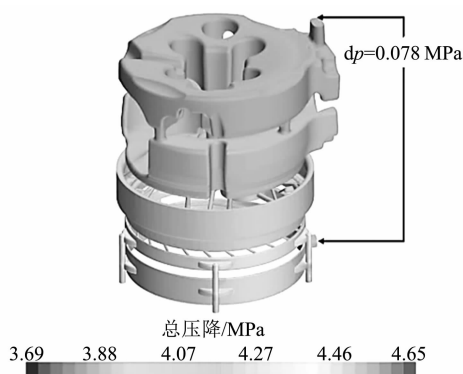


图 3 原气缸单元压力降分布

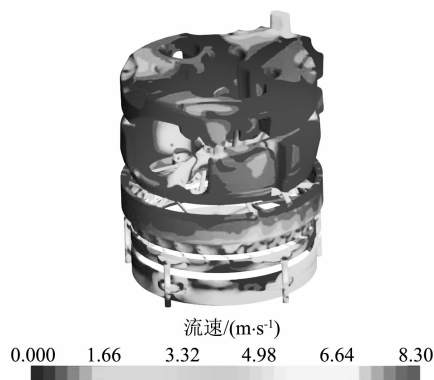


图 4 原气缸单元流体流速分布

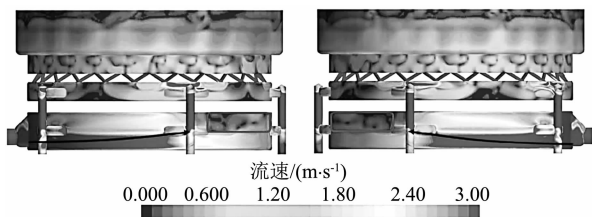


图 5 原缸套部分流速分布

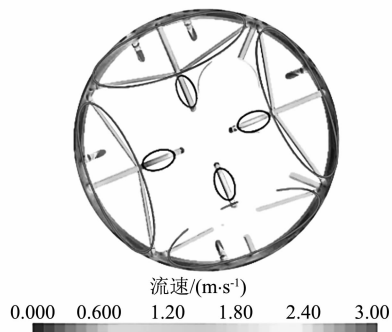


图 6 原缸盖火焰面流体流速分布

缸盖火焰面的毛细孔外流速分布见图 6, 流动基本满足要求。图 7 所示火焰面处的冷却液流速合适, 排气阀座处冷却液流速为 $1.8 \sim 2 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。火焰面中心区域流速较高, 为 $2 \sim 3 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。外围区域的流速在 $1.2 \sim 1.8 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。此外, 由于

体积流量减小, 微喷处的值稍微偏小, 因此在通向微喷的钻孔内的流量值 ($1.6 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$) 比直接钻孔的流量值 ($2.5 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$) 要低。

图 8 详细展示了缸盖下部水腔的流速分布情况, 在排气阀和喷油器之间的冷区孔处有较高的热负荷, 是下部水腔的重要区域。可看出流速基本满足要求 ($0 \sim 1 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$)。

图 9 显示水套下部的换热系数不均衡, 可能导致这些部位产生较大的热应力。

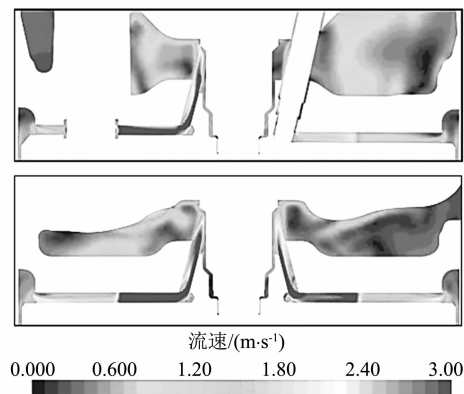


图 7 原喷油器附近流体流速

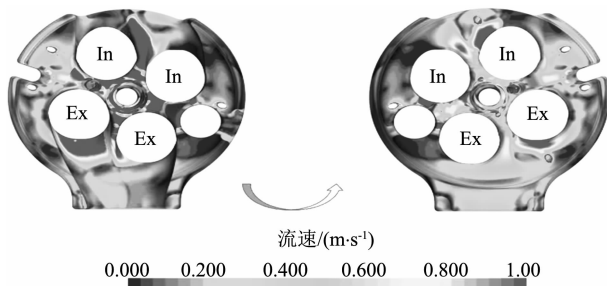


图 8 原缸盖下部水腔流速分布

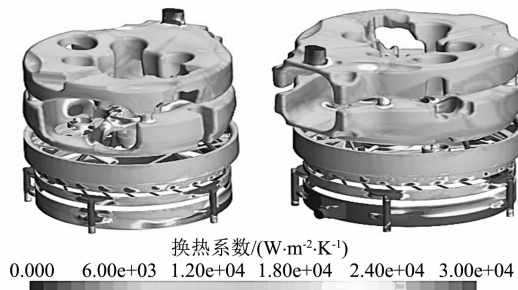


图 9 原气缸单元的导热系数分析图

2 优化方案确定

通过对水套结构的分析, 初步设想二种改进水套下部水腔的方案。

方案 1: 加大水套的钻孔直径, 从而减小流体的流速和压降;

方案2: 改动缸套、水套的结构, 取消水套的钻孔, 使冷却液通过下部水腔直接流向水套上部。

方案1的优点是改动小, 改动成本低, 但效果有限^[4], 水套水腔四周的流体流速分布不均的情况依旧存在; 并须对改动后的水套几何结构做进一步评估。方案2虽然改动较大(须同时改动缸套, 以便和水套配合良好), 但此方案效果明显; 同时, 可以减少水套加工工序, 优化水腔布置结构。

综合考虑优化要求和部件结构, 拟采用方案2进行优化改进。主要优化内容如下:

(1) 取消原水套上的钻孔, 设计水套下部水腔, 使下部水腔直接贯通, 保证冷却液的均匀流动。

(2) 将冷却水通向缸套顶部的钻孔孔径由7 mm增大至8.5 mm。

(3) 优化缸盖下部水腔, 简化排气口侧的凸出水腔, 消除流动死区。

优化后的模型结构如图10所示。

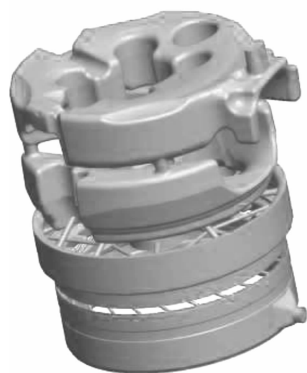


图10 优化后的水腔模型

3 优化后模型验证分析

对优化后的模型进行CFD分析, 结果如图11~图17所示。图11显示: 优化后压力降分布更加均匀合理, 总压降降低至可接受范围。由图12可看出: 整个气缸单元的水流速度分布有明显改善, 尤其是水套下部流速分布均匀合理, 基本在 $1.5 \sim 3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 之间。图13详细展示了优化后水套部位流速情况, 低流速区处于进水口对侧下方, 并清晰地体现出流体流动方向。同时, 随着孔径的增加, 缸套钻孔处高速水流也有所缓解, 流速降至 $4 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 左右, 在可接受的范围内。

图14和图15显示火焰面毛细管道和缸盖鼻梁区的流速依旧保持在很好的状态, 受改动的影响不大; 喷油器处保持了可接受的较高流速 $2.5 \sim$

$3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 保证此处能够获得良好的散热。

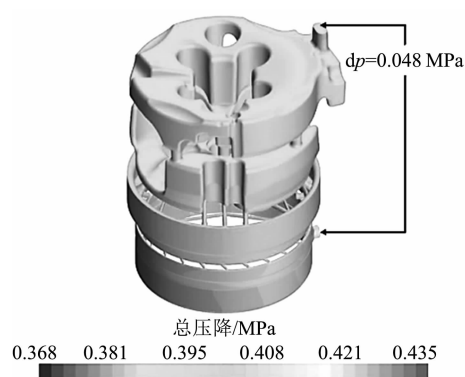


图11 优化后气缸单元压力降分布

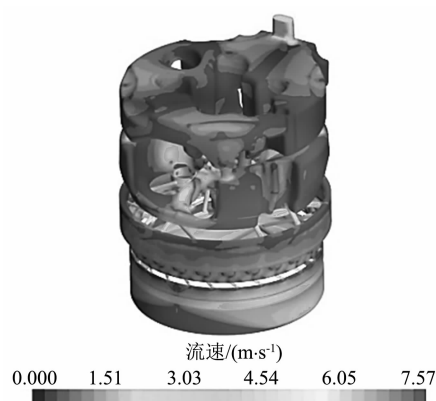


图12 优化后气缸单元流体流速分布

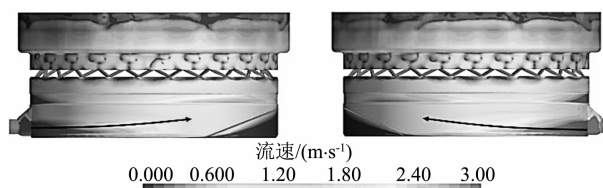


图13 优化后缸套部分流速分布

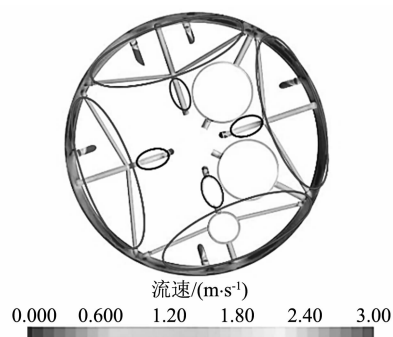


图14 优化后缸盖火焰面流体流速分布

图16是优化后的缸盖下部水腔流速分布, 从图中可以看出: 整体流动良好, 相对原模型流动性能更胜一筹。由图17也能看出优化后水腔整体换热性能更加均衡合理。

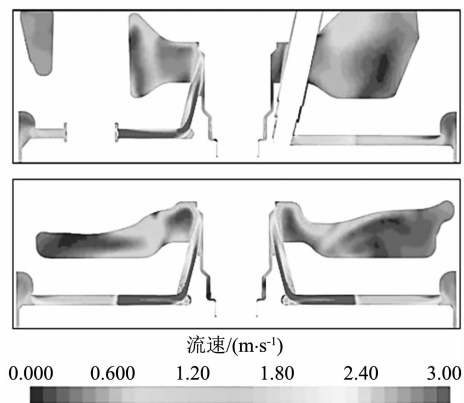


图 15 优化后喷油器附近流体流速

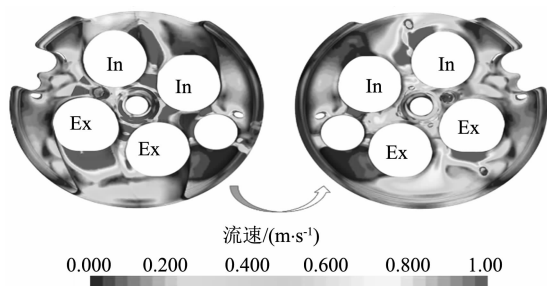


图 16 优化后缸盖下部水套流速分布

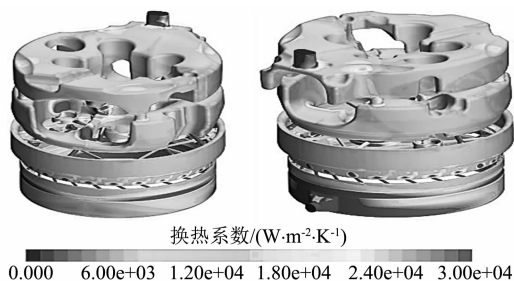


图 17 优化后气缸单元的换热系数分析

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.