

结构与可靠性

基于流固耦合的气缸盖温度场仿真研究

司东亚, 骆清国, 许晋豪, 尹洪涛

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: 以某高速大功率柴油机气缸盖为研究对象, 建立了由气缸盖、气缸体、气缸套以及气缸盖内冷却水道组成的流固耦合系统; 通过合理施加流体域及固体域边界条件, 利用 CFX 进行流动与传热计算, 得到了冷却水速度场、温度场以及气缸盖温度场, 为气缸盖热机耦合的进一步研究提供依据。

关键词: 气缸盖; 流固耦合; 流场; 温度场

中图分类号: TK421⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)02-0038-04

Simulation Study on Temperature Field of Cylinder Head Based on Fluid-Structure Interaction

Si Dongya, Luo Qinguo, Xu Jinhao, Yin Hongtao

(Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: A high-speed large power diesel engine was studied with respect to its cylinder head, and the fluid-structure interaction system consisted of cylinder head, cylinder block, cylinder liner, and cooling water gallery in cylinder head was built up. Boundary conditions of fluid and solid domain were rationally set, and flow and heat-transfer calculations were carried out using CFX software, and the velocity field and temperature field of cooling water, as well as the temperature field of cylinder head were obtained, which offered reference for further study of cylinder head actual interaction.

Key words: cylinder head; fluid-structure interaction; temperature field

0 引言

气缸盖是柴油机最易损坏的部件之一, 对气缸盖流场和温度场的研究越来越受到人们的重视^[1-3]。仿真计算可以降低研究费用, 缩短研制周期, 且能够获得试验难以测量的数据, 已逐渐成为现代设计方法的发展方向^[4]。仿真计算时, 气缸盖边界条件的确定是难点, 尤其是气缸盖冷却水腔壁面的换热边界。采用流固耦合的方法将气缸盖的外边界转变为耦合系统内边界, 不仅可使仿真难度降低、精度提高, 还可以使气缸盖温度场及其内部冷却水流场的计算在同一模型中实现^[5-6]。本文以某高速大功率柴油机气缸盖为研究对象, 建立局部

流固耦合系统进行流动与传热计算, 得到气缸盖温度场及其内部流场情况, 为后续气缸盖热机耦合研究奠定基础。

1 耦合传热系统建模

把缸内流动、燃烧、对流传热、辐射传热模型与燃烧室部件整体耦合, 进行整体模型仿真的全仿真模拟是内燃机传热研究的一个重要方向^[4]。但是全仿真模拟的实施还存在很多难点, 大部分模拟还是选取局部系统进行。本文选择气缸盖以及与气缸盖相关联的气缸体、气缸套、冷却水组成局部系统, 采用全场离散、全场求解的方法进行耦合传热分析。耦合几何模型如图 1 所示。

收稿日期: 2016-08-01

作者简介: 司东亚(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为装甲车辆动力系统理论与技术, E-mail: sdy873@163.com。

气缸盖内部包含进排气道、冷却水道等，形状不规则，利用 ICEM，采用混合四面体网格对其进行网格划分，最大网格尺寸 8 mm，最小 1 mm；对局部（如气缸盖火力面）适当加密。划分后的网格如图 2 所示，网格节点数约为 2 200 万，网格单元数约 1 500 万。

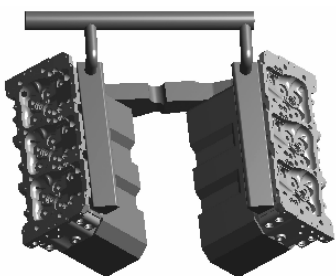


图 1 耦合系统几何模型

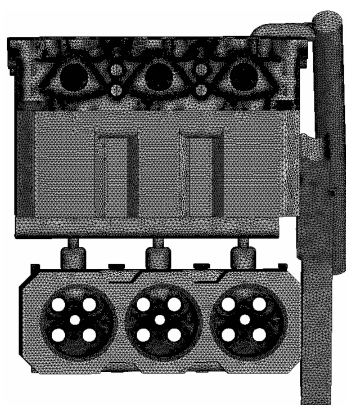


图 2 耦合系统网格划分

2 边界条件施加

边界条件是影响计算结果的一个重要因素，只有边界条件施加得正确合理才能得到比较准确的计算结果^[7]。耦合系统边界条件包括流体边界条件和固体域边界条件，流体边界条件指流体进出口边界条件，固体域边界条件是指对固体壁面施加的换热边界。

2.1 固体域边界条件

2.1.1 气缸盖火力面热边界施加

对发动机一个工作循环而言，不论其温度、压力和流动状况发生怎样的变化，只要发动机在稳定工况下运转，则每一个循环中燃气传给燃烧室壁面的平均热流密度就是恒量。根据这个特性，采用时间积分求平均的方法，得到气缸内平均等效循环的平均燃气温度和平均换热系数为：

$$\bar{T}_g = \frac{\int_0^{4\pi} h_g T_g d\theta}{\int_0^{4\pi} h_g d\theta} \quad (1)$$

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\theta \quad (2)$$

式中： θ 为曲轴转角； $\bar{T}_g$ 为当量循环平均燃气温度； $\bar{h}_g$ 为当量循环平均换热系数； T_g 为缸内瞬时燃气温度； h_g 为缸内瞬时燃气换热系数。

2.1.2 气缸套热边界施加

气缸套由于受到活塞周期性覆盖的影响，轴向不同位置在不同时刻其换热系数也不同。根据文献[4]，气缸套内表面燃气、润滑油以及活塞环加热的综合作用的当量温度及当量传热系数计算公式为：

$$h(l) = h(0)f(l) \quad (3)$$

$$T(l) = \bar{T}_g (1 + 0.827 \, 2l/s) e^{-\sqrt{l/s}} \quad (4)$$

$$h(0) = 1.8 p_e^{0.7} n^{\frac{1}{3}} D_e^{-0.2} (1 + \sqrt{D/S}) \quad (6)$$

$$f(l) = [1 + 0.573(S/D)^{0.24} (l/s)] e^{-\frac{3}{\sqrt{l/s}}} \quad (7)$$

$$D_e = \frac{2DS}{2D + S} \quad (8)$$

式中： s 为活塞冲程； l 为距缸套顶面的坐标高度； n 为柴油机转速； p_e 为柴油机有效功； D 为气缸直径。

额定工况时，气缸盖、气缸体及气缸套不同位置的温度及换热系数如表 1 所示。

表 1 固体域壁面温度及换热系数

结构	位置	温度/K	换热系数/ (W · (m ² · K) ⁻¹)
气缸盖	火力面	公式 1	公式 2
	进气道	333	580
	排气道（上/下）	423/473	690
	进气门导管	324	165
	排气门导管（上/下）	413/463	650/750
气缸体	与外界空气接触部分	295	15
气缸套	与燃气接触部分	1 618.6	807
	与活塞接触部位	公式 4	公式 3

2.2 流体域边界条件

气缸体与气缸盖内的流体区域以及其它流体区域是作为一个整体进行网格划分的，流体区域的边界只有一个进口和一个出口，因而，流动边界条件的确定相对简单。在 CFX 中设定耦合系统各部位的边界条件：额定工况下，冷却水入口温度为 353 K，入口流量 30 (m³ · h⁻¹)；冷却水出口采用出流边界条件，无须定义任何内容。该边界条件适用于出口处的流动是充分发展的情况，出流面上的流动情况可由区域内部外推得到，对上游流动没有影响。

3 流体域仿真结果分析

3.1 流体域速度场计算结果分析

水腔中冷却水的流动速度分布应尽量均匀,避免出现流动死区。如果气缸盖的冷却水腔内存在流动死区,会出现散热恶化现象,造成局部过热。图3为整体冷却水腔近壁面速度矢量图,图4为冷却水流动迹线图。从图中可以看出,整个流体区域内流体流速最高约为 $11.626 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$,位于气缸盖水上孔附近。气缸体水套冷却液的流速分布比较均匀,流动死区较少。

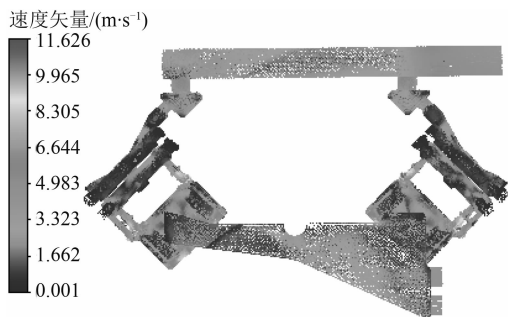


图3 冷却水腔近壁面速度矢量分布

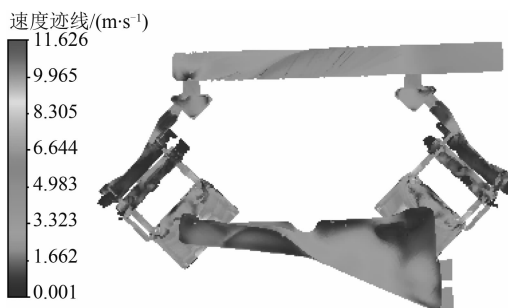


图4 冷却水流动迹线

在对发动机冷却时须着重考虑对气缸盖的冷却,尤其是对气缸盖火力面“鼻梁”区的冷却。由于“鼻梁”区热负荷很大,要求这个区域冷却水流速不能太低。气缸盖内冷却水道的结构复杂,使其具有合理的流场分布很困难。研究表明:在火力面等热负荷较高的区域,冷却液的流速在 $0.5 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 以上即可满足冷却要求,防止形成膜状沸腾。图5为气缸盖内冷却水流动迹线,由图可知,处于两排气门之间“鼻梁”区的流体流速较低,约为 $0.5 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$;进气门和排气门之间的两个“鼻梁”区的局部区域流体流速达到 $1 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 左右,流速较快。

3.2 流体域温度场计算结果分析

使用CFX进行流固耦合仿真计算,在得到冷却水腔流场的同时,还能够获得冷却水腔的温度场,如图6所示。由图可以看出:总体上整个冷却水温度分布比较均匀,靠近气缸盖火力面侧以及气缸套上部的冷却水温度比较高。温度过高,冷却水

会发生沸腾,对气缸盖造成气蚀,降低缸盖的使用寿命。冷却水腔壁面其它位置温度分布较均匀,平均温度在 $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

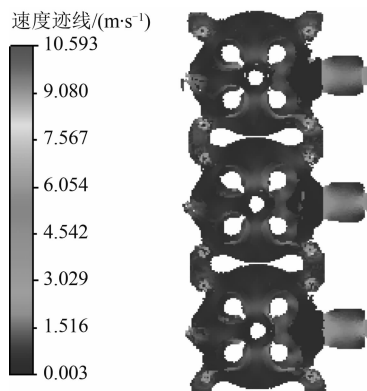


图5 气缸盖内冷却水流动迹线

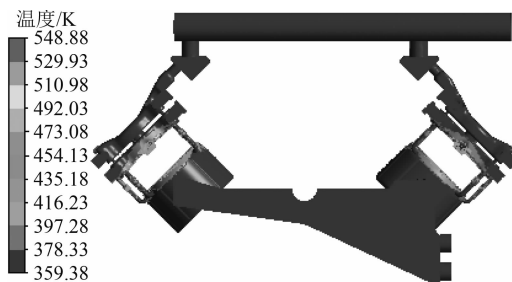


图6 冷却水腔温度分布

评价冷却水腔冷却效果的主要指标,除了冷却水腔的温度分布,更重要的是冷却水腔壁面的换热系数。冷却水与壁面之间的换热系数主要取决于冷却水的流速及速度梯度。图7为冷却水腔壁面换热系数,可以看出冷却水腔壁面各部位的换热系数分布很不均匀。图8为气缸盖内冷却水腔壁面换热系数,可以看出:进排气门之间“鼻梁”区的换热系数较大,达到了 $10\,000 \text{ (W} \cdot \text{(m}^2 \cdot \text{K)}^{-1})$ 以上。通常冷却水腔中热负荷较高区域的换热系数达到 $5\,000 \text{ (W} \cdot \text{(m}^2 \cdot \text{K)}^{-1})$ 时即可满足冷却需求。故该气缸盖冷却水腔结构的换热能力符合要求。

4 气缸盖温度场计算结果分析

图9为气缸盖温度分布,可以看出:气缸盖的温度分布很不均匀。气缸盖火力面以及排气道表面温度较高,而其它位置温度则相对较低,从火力面到气缸盖顶部温度逐渐降低,整体温差约为 $145 \text{ }^{\circ}\text{C}$,会产生较大的热应力。由于排气道受到高温废气的加热,而进气道受到低温进气充量的冷却,导致排气道表面温度高于进气道表面。气缸盖的最高温度位于两排气门之间“鼻梁”区以及排气门和喷油孔之间的区域,该区域直接受到高温燃气的冲

击, 造成局部高温, 火力面最高温度达到约 536.6 K, 但低于材料的温度极限, 符合要求。该气缸盖温度场数据可以为进一步热机耦合分析提供依据。

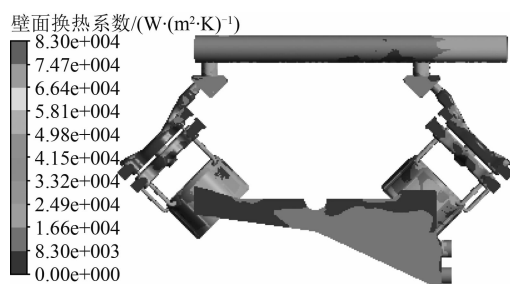


图7 冷却水腔壁面换热系数分布

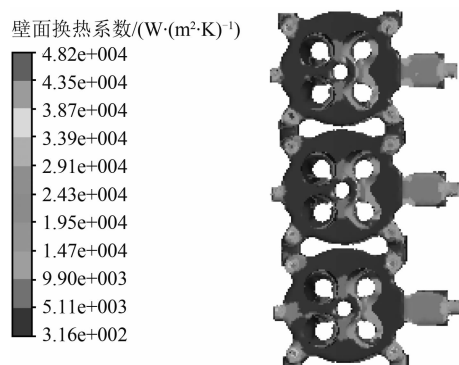


图8 气缸盖内冷却水腔壁面换热系数

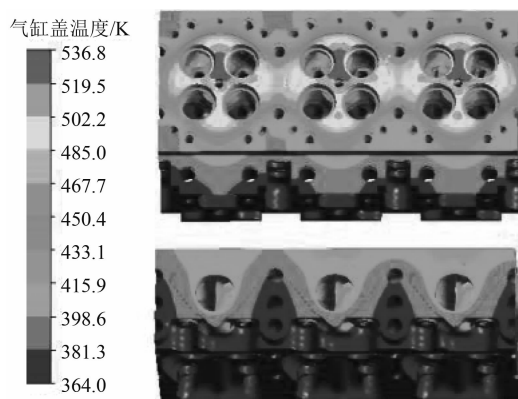


图9 气缸盖温度分布

5 结 论

通过构建由气缸盖及冷却水等组成的局部系统流固耦合传热仿真模型, 进行全仿真模拟计算, 得到了额定工况下冷却水温度场以及气缸盖温度场。该气缸盖冷却液的流速分布比较均匀, “鼻梁”区的冷却水流速约为 $0.5 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$, 换热系数达到 $10\,000 \text{ (W} \cdot \text{(m}^2 \cdot \text{K)}^{-1})$ 以上, 能够满足冷却要求。气缸盖整体温差较大, 火力面排气门“鼻梁”区温度最高达到 536.6 K, 但低于材料高温极限。计算所得气缸盖温度场可以为进一步热机耦合分析提供依据。

参考文献

- [1] 刘震涛, 陈思南, 黄瑞, 等. 高功率密度柴油机气缸盖热负荷分析与优化 [J]. 浙江大学学报, 2015 (8): 1544-1552.
- [2] 王兆文. 重载车用柴油机缸盖内冷却水流动分析及强化传热研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [3] 闫理贵. 缸盖内沸腾传热流固耦合模拟及其可靠性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [4] 李迎. 内燃机流固耦合传热问题数值仿真与应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 戴鑫鑫. 发动机气缸盖内复杂流动与传热的仿真研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [6] 邓帮林, 刘敬平, 杨靖, 等. 基于流固耦合的缸盖温度场分析 [J]. 汽车工程, 2012, 34 (3): 203-206.
- [7] 王宇, 白敏丽, 吕继组, 等. 利用部件整体耦合分析法柴油机气缸盖热机械强度 [J]. 内燃机工程, 2007, 28 (6): 41-44.

《柴油机》杂志官方网站启用公告

《柴油机》杂志从即日起正式启用官方网站, 网址为“<http://cyjzz.csic-711.com>”。该网站为我编辑部唯一官网, 请各位读者与作者通过该网站了解《柴油机》杂志相关信息, 并按其上联络方式进行日常联络。

如您在使用过程中遇到任何问题, 或对我刊有任何意见或建议, 请与我刊编辑部联系。具体联系方式见网页下方名址栏, 或网站首页“联系我们”。

感谢广大读者与作者对《柴油机》杂志的长期关注和支持。

《柴油机》编辑部
2016 年 12 月 1 日