

汽油机缸盖流固耦合CFD分析

Fluid-solid Coupled Calculation on Cylinder Head of an Engine

邬文睿 陈明 张小矛 丁宁

(上海汽车集团股份有限公司技术中心/发动机部, 上海, 201804)

摘要: 本文基于流固耦合CFD方法预测了汽油机缸盖的温度场和水套流场, 评估了原水套设计, 并对其进行了改进。根据实际的缸盖建立了三维计算域, 并利用沸腾换热模型模拟了近壁冷却液的换热系数。计算结果表明: 改进水套设计后, 缸盖温度比原设计明显地降低。

关键词: 汽油机, 缸盖, 水套, 流固耦合计算

Abstract: In this paper, temperature and flowing field of the cylinder head of a gasoline engine were predicted based on Fluid-Solid Coupled CFD to evaluate the original design of water-jacket. Modifications were applied to improve this design. 3 dimensional simulation region were built according to the practical cylinder head, while the heat transfer coefficient of near-wall coolant was modeled by boiling heat transfer correlation model. The result indicated that the improved design of water-jacket can obviously reduce the head temperature.

Keywords: gasoline engine, cylinder head, water-jacket, fluid-solid coupled calculation

0. 引言

汽油机功率提升受到缸盖温度的制约。过高的缸盖温度会降低材料的机械强度, 破坏油膜润滑的效力, 同时也会增加燃烧室的爆震倾向^[1]。合理地优化水套设计^[2], 可以有效地降低缸盖温度, 提高其承载热负荷的能力, 扩大整机的升功率空间, 因此对于汽油机设计来说十分重要。随着CFD技术的成熟, 通过数值模拟方法已可以较为准确地预测缸盖热场和水套流场, 为设计提供重要的数据和指导性信息^[3]。而相比实验测量, 数值模拟可以避开繁琐的样件加工和实验台搭建过程, 更便于改进方案的实施与迭代, 具有周期短、成本低的优点。因此, 基于CFD技术的缸盖温度预测方法对于推进汽油机的设计开发有着相当大的意义。

本文利用商业软件STAR-CCM+对某小排量汽油机的缸盖温度进行了预测, 并基于计算结果对冷却水套设计和改进方案进行了评估。分析结果表明: 通过CFD技术可以准确地提供发动机部件的温度场和流场信息, 为设计和优化提供了有力的依据。

1. 计算模型

缸盖热场分析的计算域主要包括缸盖、缸体和冷却水套三个部分。采用稳态模型计算, 发动机

热负荷和冷却水泵流量根据发动机转速决定。在缸壁、燃烧室顶面和进排气道上施加表面气膜温度和换热系数来模拟缸内气体与气缸间的换热。对于水套和气缸间的换热，则通过STAR-CCM+中连接流域与固体域的接触面边界(contact interface)来实现。几何模型如图1.1。

CFD计算采用SIMPLE方法求解流动-传热方程，湍流模型采用realizable k- ϵ 模型模拟，壁面区则采用标准壁面函数。通过STAR-CCM+自带的前处理器生成多面体网格(Polyhedral Mesh)离散计算域，如图1.2。多面体网格不仅具有良好的适体性，而且相比四面体网格，同样离散精度下所需要的网格数目可以大为减少，从而有效地缩短计算时间。

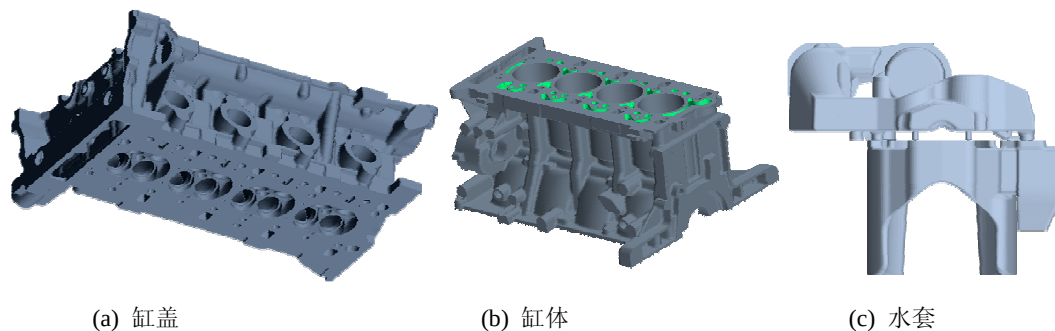


图1.1 几何模型

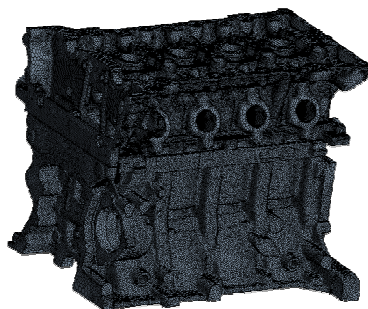


图1.2 计算网格

本文采用的多面体网格总数在120万左右，为了保证精度，对水套网格进行了细化，网格数目约为60万。

由于缸盖的温度较高，水套内的局部区域可能存在沸腾现象。由于沸腾流动包含相变的因素，其传热机理相对一般的对流传热更为复杂。本文利用Rohsenow's模型^[4]模拟了冷却液进入核态沸腾时水套表面的换热系数 h_{total} ：

$$h_{total} = h_{conv} + h_{boil}$$

2. 计算结果

(1). 缸盖温度场及水套流场计算结果

如图2.1所示为发动机缸盖燃烧室顶面的温度场分布（从左至右依次为缸1、缸2、缸3、缸4），该云图指示了缸盖几个关键区域上的温度情况。如图可见，缸盖上的温度峰值出现在每缸排气门之间的鼻梁区，温度达到245摄氏度左右。这主要是由于该区域附近的高温排气放热，排气门与气门座圈接触换热导致。缸盖与气门座间的温度最高，而进气门间的温度在200摄氏度以下，与排气门间约有50摄氏度的温差，可能会导致较高的热应力出现。因此，需要通过水套的设计优化来提高鼻梁区

的冷却液流量，加快冷却液该区域里的流速，以提高其散热性能。此外，四个缸火焰面上的温度差在5%以内，满足一般的设计要求。

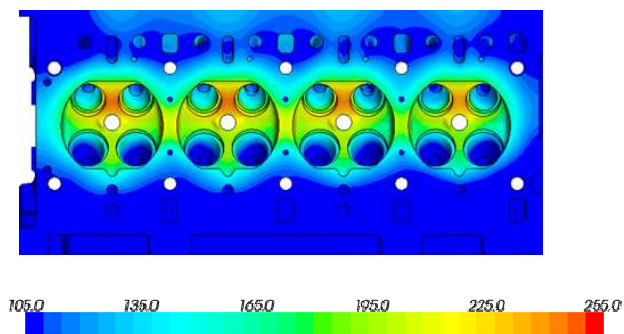


图2.1 缸盖温度分布

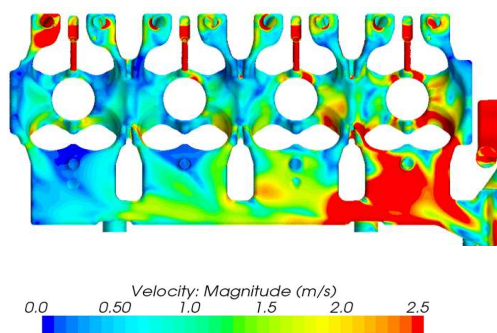


图2.2 缸盖水套速度分布

如图2.2为水套内的流速分布图（仰视，（从左至右依次为缸1、缸2、缸3、缸4）。如图所示，鼻梁区钻孔内的流速较高，但靠近火焰面中心的流道内流速较低，各缸之间的差别也较大，这也导致了温度上各缸的分布不平衡。由图可见，缸盖火焰面上的温度场对附近流道内冷却液的流动具有较大的敏感性。提高冷却液流速或者换热面积会对缸盖温度产生较大的作用。

如图2.3为某缸三个纵截面上的温度场云图和冷却液流速图。如图2.3（b）可见，鼻梁区的流道距离较远，存在一定的改进空间。由于该位置接近缸盖的高温区（排气门之间），水套设计的改进中可优先考虑局部修改此处的流道形状。

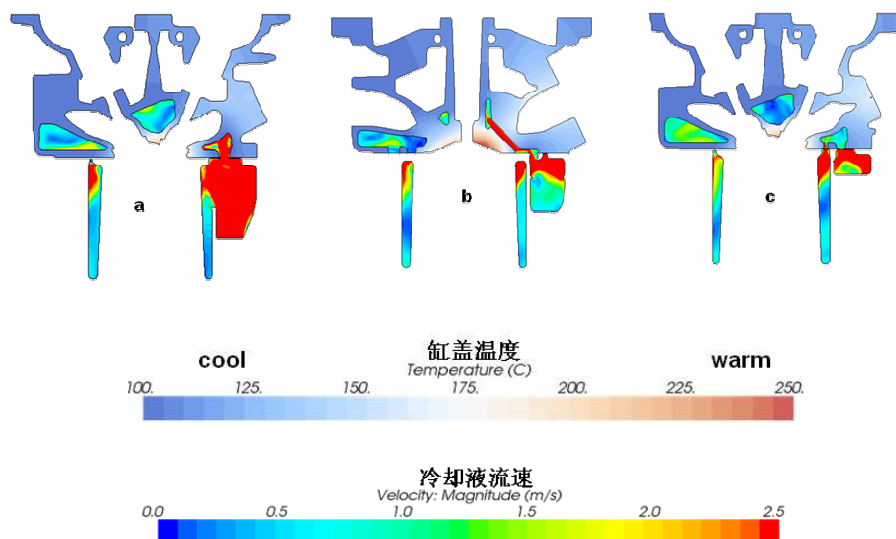


图2.3 缸盖纵截面温度场、流速场分布

(2). 改进水套后的效果

如图2.4为水套鼻梁区的原设计与改进方案。改进后的方案扩充了鼻梁区流道的容积，在一定程

度上可以增加冷却液的换热面积，获得更好的缸盖冷却效果。同时改进后的鼻梁区流道由于倾角变小，更贴近缸盖的火焰面，因此也更有利于降低该区域的金属温度。

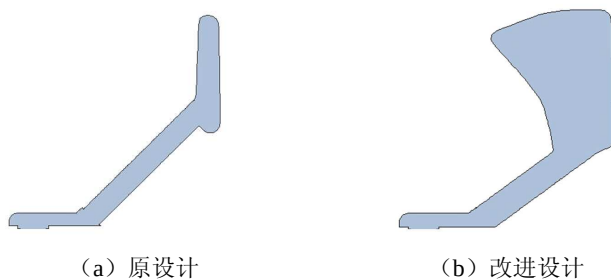


图2.4 设计方案的改进

如图2.5显示了改进水套后的缸盖温度分布。由图可见，缸盖温度有一定的降低，火焰面上温度分布的均匀度也有所改善。表2.1列出了改进水套后，缸盖上各缸最高温度的降低幅度。原缸盖上温度最高的位置处于第2缸排气门之间，改进水套后，该缸最高温度下降了6.5摄氏度，有明显的改善。而其余各缸的温度均有9摄氏度左右的下降。温度场结果表明，改进水套鼻梁区的流道形状使得缸盖温度有了较为明显的下降，并且平衡了各缸的温度差异。

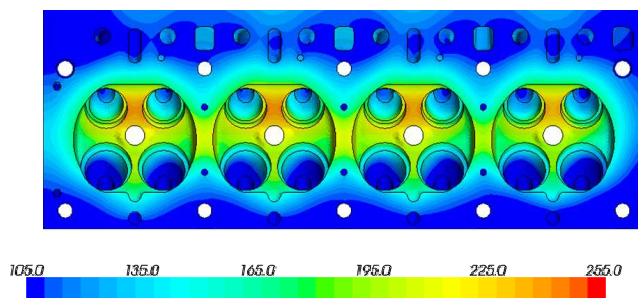


图2.5 改进后的缸盖温度分布

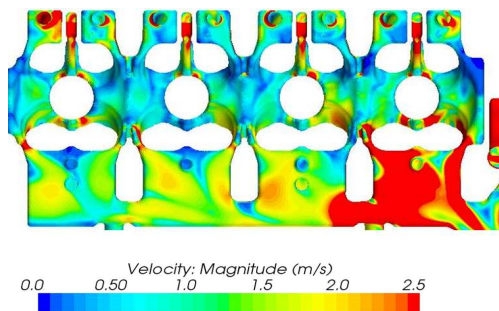


图2.6 改进后水套的流速分布

表2.1 改进后各缸温度下降

	温度降低 (C)
缸1	9.8
缸2	6.5
缸3	9.0
缸4	9.3

如图2.6显示了改进水套后冷却液的速度场分布。尽管扩大鼻梁区流道的通流截面积使得该区域的平均流速略微下降，但由于改动方案增加了该处的局部换热面积，减小了其与缸盖的间隔，因此仍然使得冷却效果有了较明显的提升。

3. 结论

基于STAR-CCM+商用软件, 计算了缸盖温度场和水套的流动分布, 得到以下结论:

1. 缸盖各缸均匀性较好, 但鼻梁区上的温度较高, 需要对水套设计进行改进
2. 扩大鼻梁区流道容积后有效地加强了该处的冷却效果, 降低了缸盖的温度

4. 参考文献

- [1] Jun Xin, Stephen Shih. Intergration of 3D Combustion Simulations and conjugate Heat Transfer Analysis to Quantitatively Evaluate Component Temperatures. SAE Paper 2003-01-3128, 2003
- [2] Nucleate and Film Boiling of Engine Coolants Flowing in a Uniformly Heated Duct of Small Cross Section. SAE Paper 0223-0032502, 1987
- [3] Kenjiro, Nakama. Study of Knock Control in Small Gasoline Engines by Multi-Dimensional Simulation, SAE Technical Paper 2006-32-0034, 2006
- [4] STAR-CCM+ User Guide