

# 流固耦合方法对增压发动机缸盖热应力求解精度影响分析

## Strength Analysis Accuracy of Boosted Engine Cylinder-Head Using Fluid-Solid Coupled Method

周龙 陈龙华 徐宏昌 张玉银

(上海交通大学 汽车工程研究院 汽车发动机研究所)

**摘要:** 使用 Star CCM+软件对某涡轮增压汽油发动机缸体、缸盖以及水套内流体区同时建模, 并进行流固耦合传热分析。将传热分析得出的流体与固体交界面温度和传热系数分布结果向 Abaqus 固体区模型进行映射耦合处理, 为有限元热应力计算提供传热边界, 从而得出准确的缸盖热力耦合的应力分布结果, 用以分析试验中发动机缸盖三四缸燃烧室过热引起火花塞烧蚀的原因。

**关键词:** 流固耦合、Star CCM+、Abaqus、缸盖、热应力

**Abstract:** Using the software of Star CCM+ to mesh both solid part of an engine cylinder-head and cylinder block and fluid part of water in water jacket. Then fluid-solid coupled method was used to make a heat transfer analysis, whose temperature and heat coefficient distribution results of the interface were coupled to the Abaqus solid mesh surface. Then finite element thermal-mechanical coupled strength analysis was made and the result of stress distribution was got. These all could be used to analyze the reason for the overheated third and fourth cylinder-chambers, which may break the spark.

**Keywords:** Fluid-Solid Coupled; Star CCM; Cylinder-Head; Heat Transfer; Stress

## 0 引言

发动机缸盖是发动机最为复杂和重要的零部件之一。在发动机运转过程中, 缸盖不仅承受螺栓预紧力、燃气爆发压力等机械载荷的作用, 而且由于在燃烧室内和进排气道内不断进行着气体和固体热传导, 同时水套内还进行着液体和固体的热传导, 导致发动机缸盖温度分布不均, 从而也就产生了热载荷。也就是说缸盖是受到流场、温度场、应力场共同作用的<sup>[1]</sup>。

传统的发动机缸盖强度分析时, 由于受到计算机计算能力以及求解方法的限制, 对于发动机温度场的施加很多情况都只采用分割表面加载平均温度和传热系数的方法, 这样计算出来的结果势必会与实际情况有较大差异, 特别对于燃烧室鼻梁区等温度梯度大、应力相对集中的区域, 传统的方法计算结果存在很大误差。

随着计算机技术的发展、计算水平的提升, 计算方法也有了很大的改进。流固耦合方法在计算受热部件强度和安全性问题上现在已逐渐被广泛采用。它能够与 CFD 计算与有限元计算关联起来, 发挥各自求解流体和固体之所长, 提升计算准确度。

本文采用 Star CCM+和 Abaqus 两款主流 CFD 和有限元求解软件对发动机缸盖进行流固耦合温度和强度分析, 以此来判断发动机三四缸过热而引起烧火花塞的原因所在。同时, 还对分析结果与未采用流固耦合方法得出的结果进行比较, 以论证流固耦合求解的准确性。

## 1 流固耦合方法介绍

流固耦合问题按其耦合机理可分为两大类：第一类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相交界面上，在方程上的耦合是由两相耦合面上的平衡及协调来引入的，如发动机缸体与水套中冷却水的热量传递等；第二类问题的特征是两域部分或全部重叠在一起，难以明显地分开，使描述物理现象的方程，特别是本构方程需要针对具体的物理现象来建立，其耦合效应通过描述问题的微分方程来体现。

流固耦合问题求解时有两种方式：一种是两场交叉迭代，另一种是直接全部同时求解。由于两场交叉迭代需要很大的计算量，特别是对于发动机这种复杂结构，需要多次迭代之后才有可能收敛，为了节省计算成本，本文所采用的方法是利用 Star CCM+软件进行流体与固体同时求解，得出温度分布后，将流体与固体交接面的传热系数与流体温度通过网格映射到 Abaqus 有限元的固体传热表面再进行缸盖有限元计算，这样就避免了多次迭代的过程。

## 2 发动机水套流固耦合求解

### 2.1 发动机整体网格划分

利用 Star CCM+软件对发动机原始三维模型进行表面修复和重构，网格划分采用多面体网格，包含流体和固体两个求解域，对燃烧室鼻梁区、缸体交叉水道、缸垫过水孔等区域进行局部网格细分处理，保证网格划分质量。划分好的网格如图 1 所示，网格基本数据如表 1 所示。

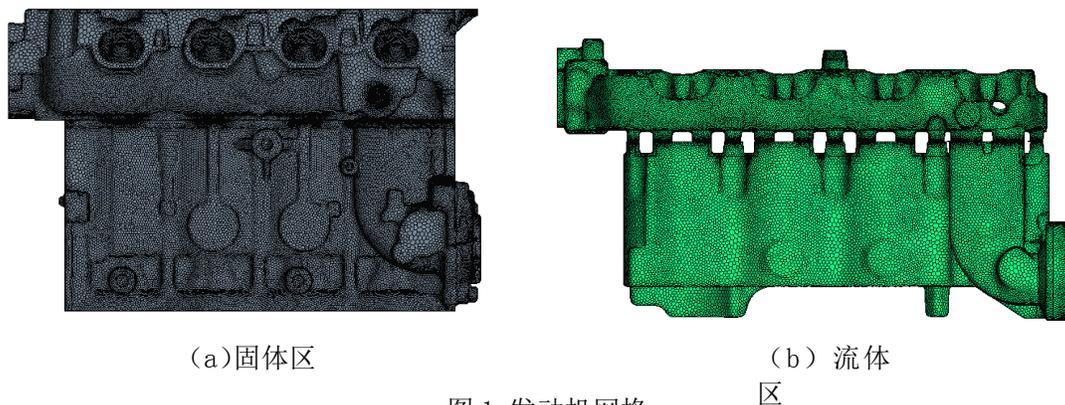


图 1 发动机网格

表 1 网格划分基本数据

项目	基本尺寸	总体网格数量	边界层	进出口拉伸层
数值	1-5mm	212 万	3 层	10 层，厚度 150mm

### 2.2 发动机水套边界条件设定

边界条件是外界环境与计算域物理场的质量和能量交换参数。边界条件主要包括进出水口边界条件、热负荷边界条件，包括燃烧室壁面边界条件、以及发动机外表面边界条件。

#### (1) 进出水口边界条件设定

根据发动机水泵流量确定进水口边界类型为速度进口 (mass flow inlet)，流速为 1.87m/s，温度为 358K。出口边界类型为压力出口 (pressure outlet)，出口边界条件主要包括：出口压力、出口温度、湍流强度与长度。根据实验值和推荐值，出口温度设定为 363K，湍流强度为 0.01，湍流长度为 0.0015m。

## (2) 热负荷边界条件

热负荷边界主要包括：燃烧室顶盖、进气道、排气道、缸套内壁和发动机外表面五个部分。与燃烧室顶盖和气缸内壁接触的是燃烧室内高温气体，气缸内壁的中下部分还与活塞接触。燃烧室顶面与高温气体的换热方式主要是强制对流换热，热辐射换热占很小比例。气缸内壁上部与高温燃气换热方式主要是强制对流换热，气缸壁中部既有与高温气体的对流换热又有与活塞的热传导换热，气缸内壁底部主要是与活塞的传导换热。进排气道与气道的空气换热方式为强制对流换热。发动机外表面与周围空气的换热方式主要是自然对流换热。

根据已有经验数据，本文采用直接向气缸壁和排气道内壁输入能量 ( $W/m^2$ ) 的方式施加热负荷边界。首先根据经验公式，计算由冷却水带走的热流量  $Q$  可由下式计算： $Q = q \cdot P$

其中  $q$  为比热阻 ( $kW/kW$ )， $P$  为发动机功率 ( $kW$ )。汽油机的比热阻取值范围是 0.4~0.6，在此取  $q=0.5kW/kW$ 。发动机各个区域热量流输入如表 2 所示。

表 2. 热量分配表

	燃烧室顶面	缸套内壁上部	缸套内壁中部	缸套内壁下部	排气道内壁
热流量( $kW/m^2$ )	850	350	200	50	557

发动机进气道仍按强迫对流计算，进气道内壁与新进气体的传热系数为  $300 W/m^2K$ 。发动机周围空气温度取  $300K$ ，换热方式为自然对流换热，换热系数为  $10 W/m^2K$ 。

## 2.3 发动机水套计算结果

计算的结果主要包括水套内冷却水的压力分布、速度分布、温度分布以及表面传热系数分布等。

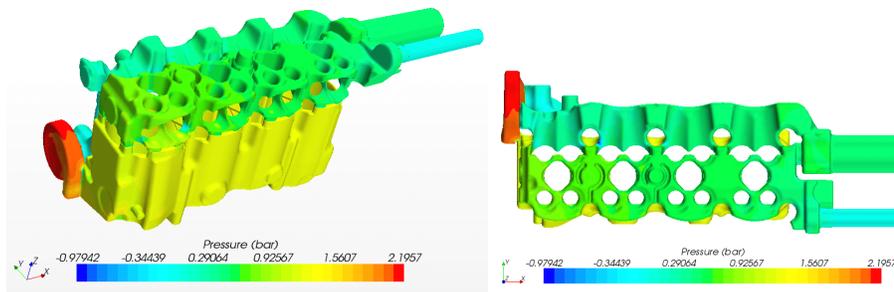


图 2 水套冷却水压力分布云

其中冷却水的压力分布如图 2 所示，由图可以看出，水泵处有一个明显的压力梯度变化，缸体整体压力比较平均，而且高于缸盖压力，缸盖四个缸压力分布有明显的压力差，从一缸到四缸呈递减趋势。

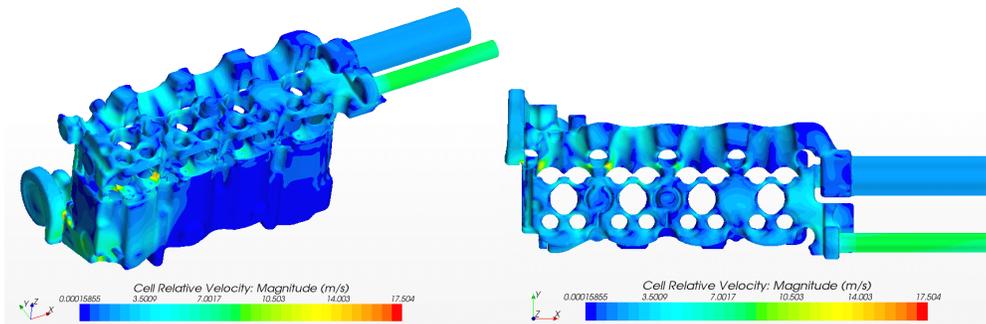


图 3 水套冷却水流速分布云

图

冷却水的流速分布如图 3 所示，由图可以看出，四个缸的水流速明显存在差异，尤其是三缸，冷却水的流速很低，这对于发动机的冷却相当不利。

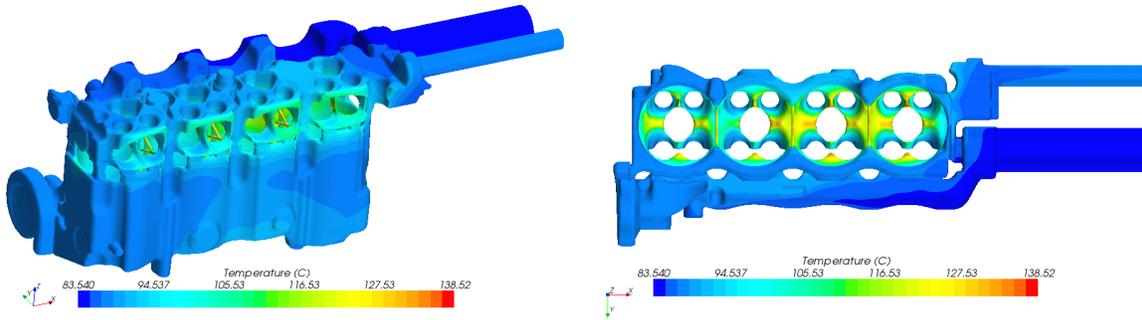


图 4 水套冷却水温度分布云图

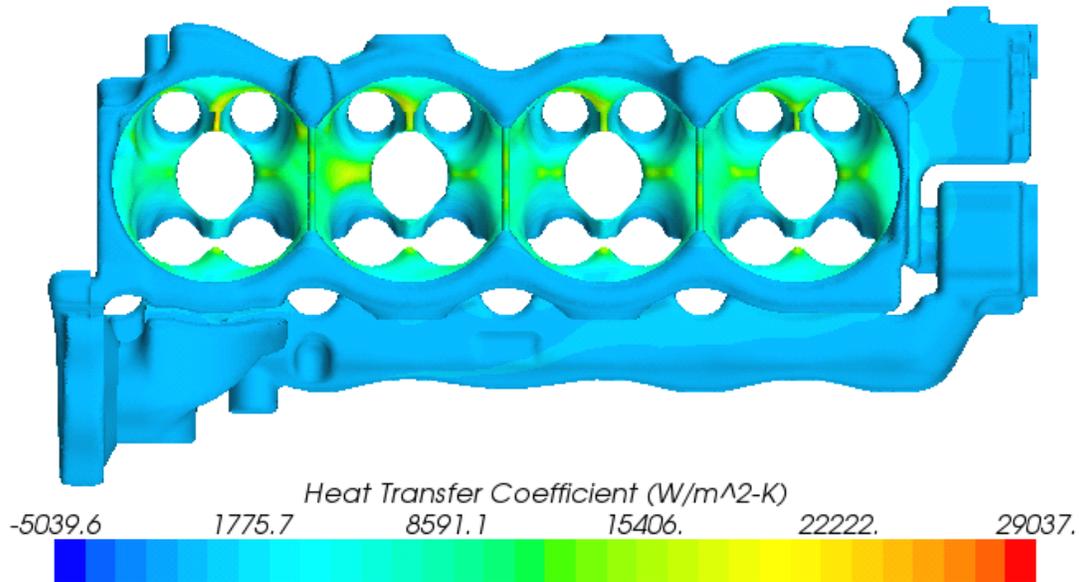


图 5 水套冷却水传热系数分布云图

水套冷却水的温度分布如图 4 所示，由图可以看出，缸盖燃烧室区域、缸体过水孔以及排气侧温度较高，最高温度达到  $138.52^{\circ}\text{C}$ 。一般情况下，冷却液由 50%乙二醇+50%水组成，在 1.9bar 的压力下，冷却液的沸点为  $130^{\circ}\text{C}$ 。根据图 20 所示，水套内最高温度已超过冷却液沸点，因此图中三四缸鼻梁区位置可能会存在局部的沸腾，这必然会导致该区域缸盖燃烧室过热，从而可能会导致发动机缸盖局部过热，产生热疲劳，这也是发动机三四缸火花塞存在被烧现象的原因所在。

传热系数表示水套从发动机内部带走的热量的效率，传热系数越大，表面冷却液从缸盖和缸体单位时间带走的热量越多，水套的冷却效果越好。图 5 是发动机水套内部的传热系数分布：平均传热系数达到  $1500\text{ W/m}^2\text{-K}$ ，在温度较高区域，传热系数超过  $10000\text{ W/m}^2\text{-K}$ ，但是也可以看出第三缸的传热系数比其它几缸的要低，这说明冷却水从第三缸带走的热量相对较少。

### 3 发动机有限元强度计算

通过发动机水套的流固耦合求解，得出了较为准确的水套表面传热系数和温度分布，将该结果映射到发动机缸盖有限元网格上重新进行固体区温度分布计算，然后再施加缸盖螺栓预紧力、过盈配合力以及气缸压力等边界条件，便可得出发动机缸盖各工况的应力分布。

#### 3.1 发动机缸盖有限元网格划分

发动机缸盖有限元模型中包含了发动机缸盖、气门座圈、气门导轨、缸盖螺栓、气缸垫以及简化缸体如图 6 所示。其中缸盖实体部分采用二阶四面体单元 C3D10M，表面采用薄膜单元 M3D3，气缸垫采用缸垫单元 GK3D6N，其他部件都采用六面体单元 C3D8。所示的有限元网格模型共包含节点 601968 个，单元 481508 个。各主要部件的材料属性如表 3 所示。

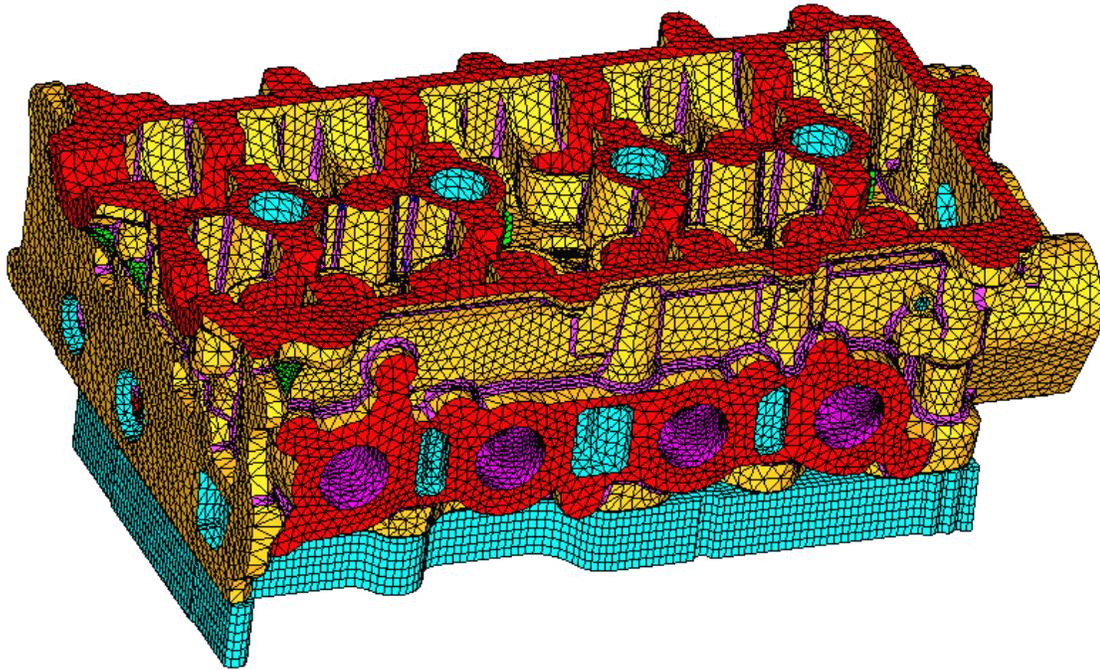
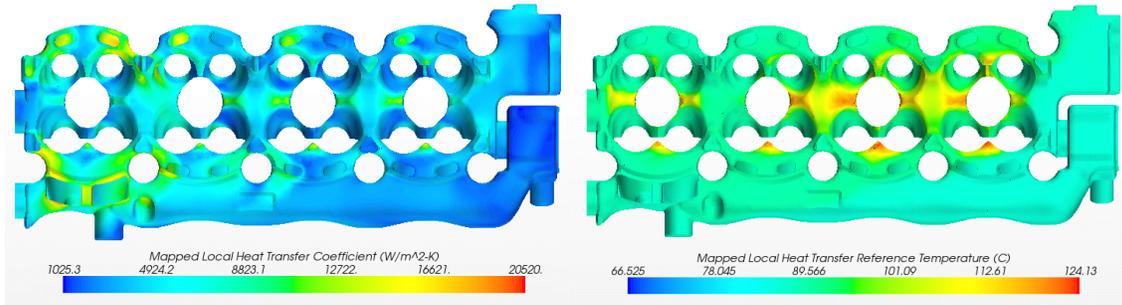


图 6 发动机有限元网格

表 3 各部件材料属性

材料	密度 t/mm <sup>3</sup>	杨氏模量 Mpa	泊松比	热膨胀系数 mm/mmK	热传导系数 W/mK	比热容 mJ/tK
缸盖	2.68E-9	6.80E+4	0.33	非线性	159.00	8.37E+8
缸体	7.20E-9	2.00E+5	0.30	1.12E-5	80.00	5.10E+8
气门座圈与导轨	7.20E-9	2.00E+5	0.33	1.20E-5	80.00	5.10E+8
缸垫	7.80E-9	2.10E+5	0.30	1.12E-5	40.00	5.10E+8
螺栓	7.20E-9	2.00E+5	0.30	1.20E-5	80.00	5.10E+8

### 3.2 发动机缸盖有限元传热分析



(a) 传热系数映射结果 (b) 温度分布映射结果  
图 7 水套表面映射结果

将水套计算的传热系数与温度分布映射到有限元网格上，如图 7 所示，并对其余表面施加平均传热系数与温度，具体数值如表 4 所示，便可对缸盖进行传热分析，得出其温度分布。

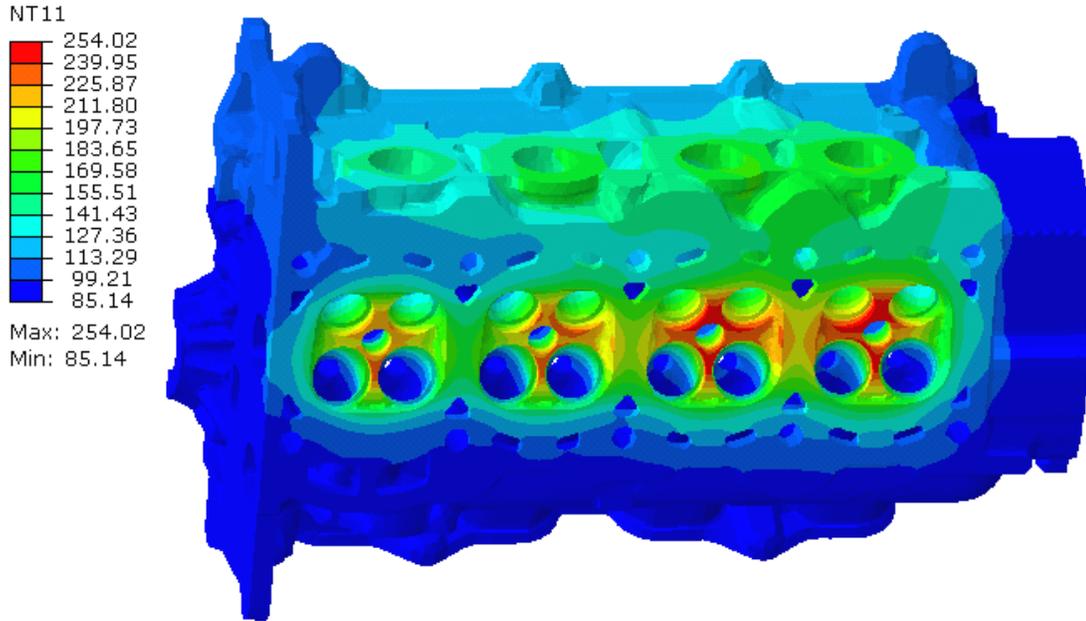


图 8 缸盖温度分布

表 4 缸盖其余表面传热系数及温度取值

	燃烧室	进气道	排气道	外表面
平均传热系数 (mW/mm <sup>2</sup> ·°C)	1	0.3	0.4	0.01
平均传热温度 (°C)	1024	80	650	80

通过 Abaqus 软件计算，得出缸盖的温度分布如图 8 所示，很明显可以看出，缸盖各缸的温度存在很大的差异性，一二缸相对较低，三四缸鼻梁区位置温度达到了 254°C，这对于铝合金缸盖来说，是不能承受的。这与之前的分析一致，是由于冷却水在该区域流速过慢，导致温度过高，发生局部沸腾，冷却不足。缸盖容易发生热疲劳，并可能烧结火花塞。

### 3.3 发动机缸盖有限元强度分析

发动机缸盖的有限元强度分析需要施加的载荷包括螺栓预紧力、气门座圈及导轨过盈配合力、热载荷以及缸压载荷，分别依据实验数据和设计值进行加载，得出缸盖的应力分布如图 9 所示。分析应力分布情况，可以看出，三缸和四缸燃烧室内应力相对较大，超过了 200MPa，这很大程度上是由于温度分布不均匀，热载荷过大导致的。发动机的热载荷又是交变载荷，随发动机的启停，很有可能会发生低周热疲劳。

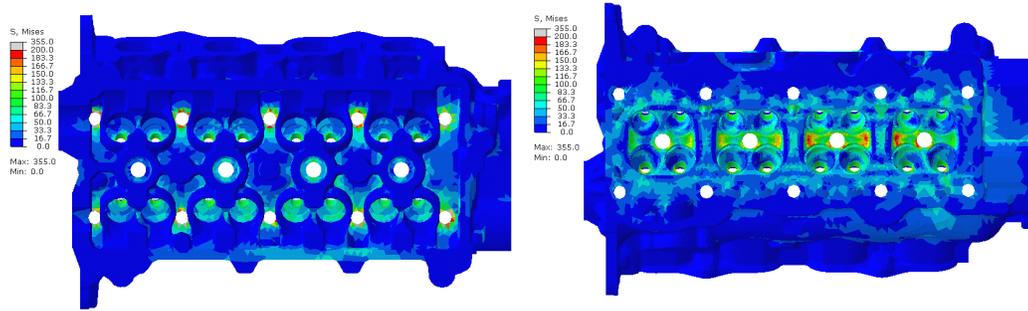


图 9 发动机缸盖应力分布云图

### 3.4 采用流固耦合方法与不采用结果对比

图 10 显示出了采用流固耦合方法和不采用的温度分布的区别，从图中可以看出，不采用流固耦合方法各缸的温度基本一致，而且由于水腔内采用平均温度和传热系数计算，导致实际传热系数和温度较大的燃烧室区域温度计算结果比实际的低，而且不能体现冷却不均导致的各缸温度的差异性。

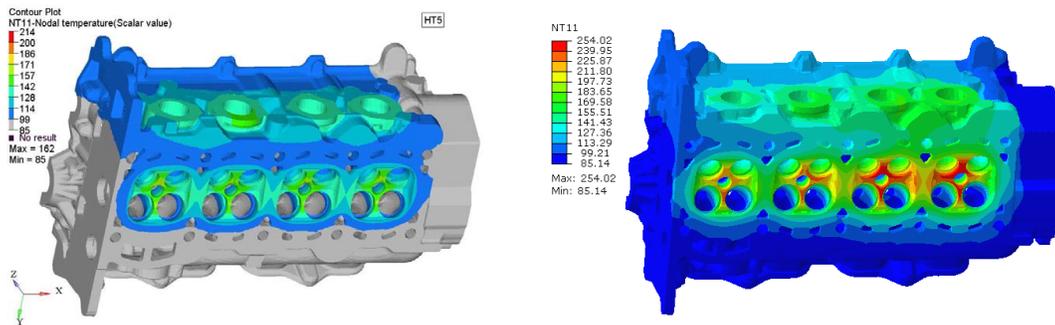


图 10 温度分布对比

图 11 显示出了采用了流固耦合方法和不采用的应力分布的区别，从图中可以看出，不采用流固耦合方法各缸的应力分布与温度分布一样，基本是一致的，这与实际情况有很大的出入，也就不能分析实际情况三四缸火花塞被烧结的原因所在。而采用流固耦合方法变能很明显地体现出三四缸由于温度过高所存在的问题。

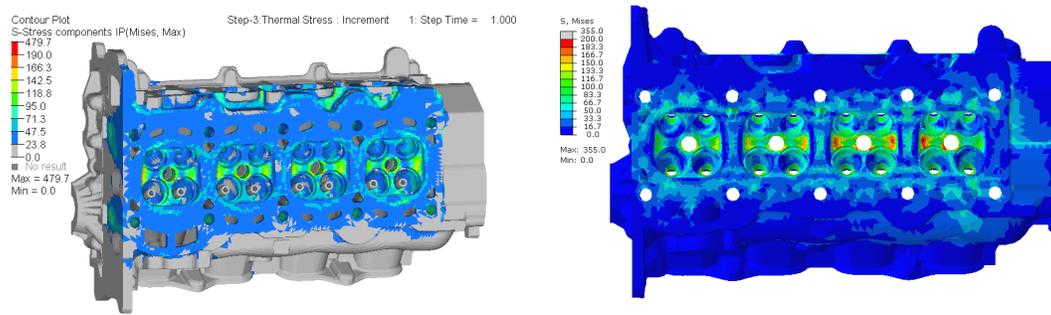


图 11 应力分布对比

## 4 结论

流固耦合求解,可以较为准确的求出存在流体与固体边界换热结构的温度分布。本文采用 Star CCM+ 软件对某发动机水套进行了流固耦合求解, 得出了其压力、流速、传热系数以及温度分布情况, 通过分析得出其三缸燃烧室区域冷却水流速较低, 温度偏高, 会发生局部沸腾情况。

利用 Star CCM+ 软件与 Abaqus 软件耦合计算, 将水套 CFD 计算结果中的传热系数和温度分布情况通过网格映射施加到有限元网格上, 然后利用有限元求解器对发动机缸盖的应力分布进行分析, 得出其由于温度分布不均匀, 三四缸燃烧室内应力偏大, 存在热疲劳的风险。

综合 CFD 和有限元计算结果, 可以得出, 由于水套内流体区设计不合理, 导致水套内冷却水流速不均匀, 进而导致温度分布不均匀, 局部过热, 从而使缸盖局部热载荷过大, 这也是此处烧结火花塞的原因所在, 所以需要对水套进行优化设计。

此外, 对比采用流固耦合方法和未采用的计算结果, 流固耦合方法明显存在优势。未采用流固耦合方法, 由于温度分布计算采用平均温度和传热系数边界, 导致各缸差异性被忽略, 从而不能分析出发动机仅仅三四缸存在火花塞被烧结的真实原因。而采用流固耦合方法便能成功的分析出各缸差异性, 使得发动机的问题得以发现。

## 参考文献

- [1] 肖翀,左正兴. 柴油机气缸盖的耦合场分析及应用[J]. 车用发动机, 2006, (4): 26-29.
- [2] 李迎. 内燃机流固耦合传热数值仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学.2006: 39—45.
- [3] 刘巽俊, 陈群. 车用柴油机冷却系统的 CFD 分析[J]. 内燃机学报, 2003.(2): (125-128).
- [4] Launder B E, Spalding D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M] London: Academic Press. 1972.
- [5] Schlichting H Boundary Layer Theory[M]. 6th Edition. New York: McGraw·Hill Book Company, 1968.