

# 基于 STAR-CCM+某发动机冷却水套内部流动与传热的 数值分析与优化

## Numerical Analysis and Optimization of Internal Flow and Heat transfer at Cooling Jacket of an Engine Based on STAR-CCM+

李康宁 郭立新 李海洋  
(无锡油泵油嘴研究所)

**摘要:** 本文采用 star-ccm+软件对某六缸发动机冷却水套内部水流场进行了数值模拟,结果显示6个缸的鼻梁区速度均偏低,根据水套鼻梁区设计经验,该水套的大多数鼻梁区速度均不符合要求,且缸体水套上部流速较小,流动死区面积较大,容易造成冷却不足致使局部过热。为了改进本水套设计上的不足,本文通过调整气缸垫孔径大小和缸体水套进气侧分水孔及缸体直接连通孔的布置进行结构改进,结果显示鼻梁区速度得到了较大程度的提高,改进后缸体水套上端的流动死区基本消失,且气缸体水套流动均匀性改善显著。

**关键词:** STAR-CCM+; 发动机; 冷却水套; 流动

**Abstract** Numerical simulation of internal flow at cooling jacket of an inline 6 cylinder engine has been employed in this article. The result is shown that the flow in the valve bridges is low and the most velocity vales are below empirical design guidelines. And the flow in the upper side block water-jacket is low and the stagnant zones accrue which are bad for cooling. In order to improve the deficiencies of the water jacket design, we modified the size of cylinder gaskets and water holes fed coolant in and around between cylinders based on the original scheme. It is found that the velocity of valve bridges is remarkably increased. In the optimized water jacket the stagnant zones are basically eliminated and uniformity of flow distribution in block water jacket has been improved.

**Key words:** STAR-CCM+; engine; cooling jacket; flow

### 1 前言

发动机水套是为发动机内部高温部件(如缸盖、缸套、排气道等)降温而设计的冷却水循环通道。水套内冷却液的流动直接影响发动机冷却效率、高温零部件的热负荷、发动机的热量分配及能量利用。而一般发动机水套设计是通过试制样机,然后进行试验分析,不仅设计周期长、成本大,而且很可能解决不了设计中出现的问题;由于发动机水套结构复杂,而且封闭在机体内部,很难进行试验观测与测量。随着计算机的不断发展,计算方法的不断优化改进,CFD 计算已成为发动机设

计必不可少的手段之一。

本文采用 STAR-CCM+ 软件对某发动机冷却水套原设计方案与改进设计方案的内部冷却液的流动与换热情况进行了分析研究。

## 2 几何模型及计算网格

### 2.1 几何模型

本文以某 6 缸直列水冷式柴油机冷却水套为研究对象，在设计过程中对原方案进行了多次修改，由于篇幅有限，本文仅将最后修改的水套方案与原方案进行了对比分析。原方案 CAD 几何模型如图 1，图中冷却水流动路径如下：冷却水从机油冷水腔入口流入后，经过机油冷却水腔和冷却水道上的六个分水口（图 1(b)黑框所示，编号 A~F）进入机体水套，经 14 个上水孔（图 1(b)h1~h14）进入缸盖水套，最后经缸盖水套前端出口流出。

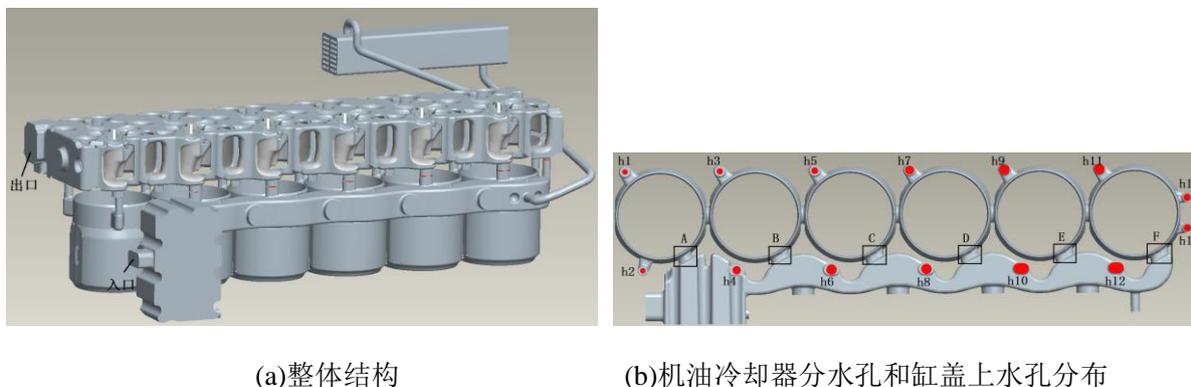


图 1 原方案水套 CAD 模型

改进方案在原方案结构基础上，修改了气缸垫水孔的尺寸，其几何尺寸变化情况如表 1 所示，并且在 2~6 缸每缸加设一个分水孔，以及在相邻两缸上端加设连通孔，结构改进说明如图 2 所示。

表 1 两方案上水孔孔径

编号	孔径/mm													
	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14
原方案	8	8	9	12	10	15	13	15	15	15	15	15	11	11
改进方案	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	13	15	15	15	15	15	<b>13</b>	<b>13</b>

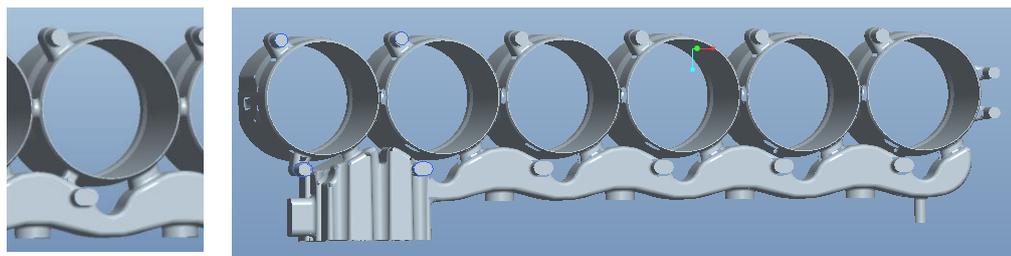


图2 改进方案机体水套示意图

## 2.2 网格划分

本文采用STAR-CCM+自带的多面体网格模型进行体网格划分，并且在缸垫区域和鼻梁区域进行了加密，该模型体网格数大约为68万。图3为原方案水套的网格图。

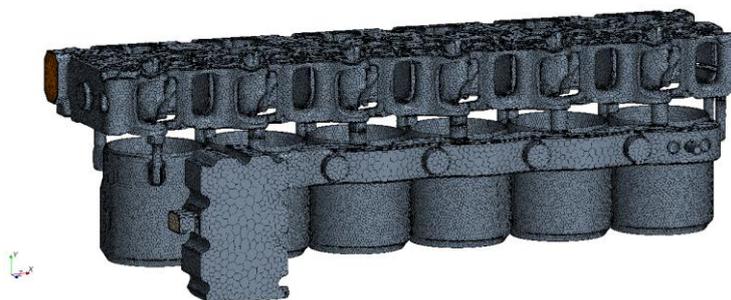


图3 原方案水套计算网格

本文将靠近进气侧进排气门座间的鼻梁区定为进气侧鼻梁区，靠近排气侧进排气门座间的鼻梁区定为排气侧鼻梁区，而排气门座与排气门座间的鼻梁区定为 ex-ex 鼻梁区，如图4所示。为了将改进方案与原方案计算结果进行比较，在鼻梁区选取、网格划分方法、边界条件设置、物理模型选择、初始条件设置上均保持一致。

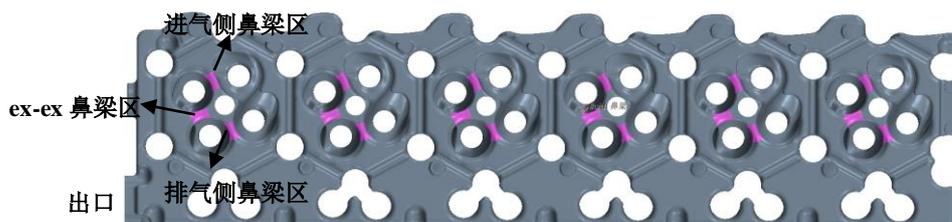


图4 鼻梁区示意图

## 3 物理模型选择及边界条件

在模拟计算中，采用水作为冷却介质，并假定其物理性质为定常数（不随温度和压力变化）。模拟计算过程采用稳态计算，并假设冷却水在水套内的流动状态是三维不可压缩的粘性湍流流动，采用分离求解器求解，湍流模型选取了  $k-\varepsilon$  湍流模型。在计算过程中，求解连续性方程、动量方程、能量方程和  $k-\varepsilon$  湍流模型。

冷却系统数值模拟选在柴油机的标定工况，162kW/2300r/min，水泵流量为 240L/min。与水泵出口相连的机油冷却器进水口采用质量流量边界条件，进水口的温度设定为 363K；水套出水口给定压力边界条件。壁面边界条件采用了假定壁面温度场的方法，机油冷却器温度为 373K，缸体水套 373K，缸盖水套也分为 2 个区域，气门座附近的火力面温度设为 393K，其他部分为 383K。

## 4 冷却水套计算结果分析

### 4.1 速度场分析

为了判断计算迭代是否收敛，对鼻梁区平均速度进行了监测，图 5 为原方案六个缸的 ex-ex 鼻梁区的速度随迭代步数的变化曲线，从图中可以发现鼻梁区的速度最终随着迭代步数的增加而保持不变，从图中可以看出 2 缸鼻梁区的速度最大，1 缸次之，3~6 缸速度依次降低。

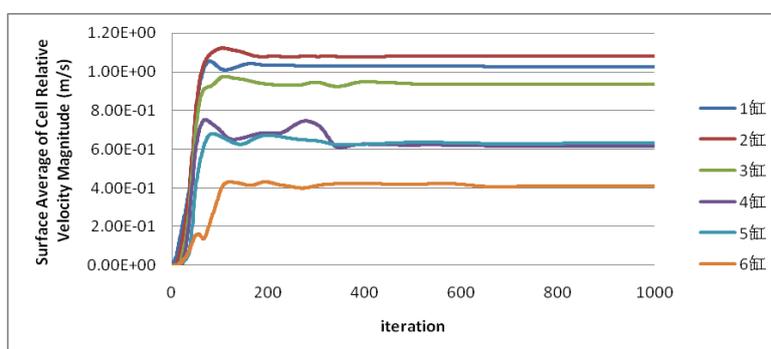


图 5 原方案 ex-ex 鼻梁区速度曲线

表 2 和表 3 给出了原方案与改进方案各缸鼻梁区的平均速度值，根据水套鼻梁区设计要求，从表 1 计算结果来看，6 个缸的 ex-ex 鼻梁区流速均偏低，2-5 缸进气侧鼻梁区的速度偏低，3-6 缸排气侧的鼻梁区流速偏低，无法满足设计要求。

比较表 2 与表 3 发现，通过修改气缸垫水孔的尺寸，改进方案的 6 个缸的 ex-ex 鼻梁区流速得到了明显提高，尤其是进排气侧鼻梁区速度值，尽管有些缸的鼻梁区速度值仍然偏小，但大部分鼻梁区速度均得到了改善。

表 2 原方案缸盖各鼻梁区速度(m/s)

Cylinder	1	2	3	4	5	6
进气侧鼻梁区	0.491	0.314	0.123	0.135	0.462	0.617
ex-ex 鼻梁区	0.954	1.017	0.771	0.475	0.457	0.297
排气侧鼻梁区	0.640	0.631	0.478	0.290	0.076	0.130

表 3 改进方案缸盖各鼻梁区速度(m/s)

Cylinder	1	2	3	4	5	6
进气侧鼻梁区	0.440	0.583	0.518	0.173	0.727	0.830
ex-ex 鼻梁区	1.026	1.081	0.937	0.614	0.631	0.410
排气侧鼻梁区	0.667	0.686	0.621	0.364	0.112	0.185

图 6 和图 7 为原方案和改进方案缸盖水套的速度分布。从图 6 中可以看出，1 缸到 6 缸，进排气侧流速逐渐降低，且流动分布不均匀。而改进方案缸盖水套整体速度相比原方案有了较明显的提升，4~6 缸低速区范围变小，速度均匀性也得到了有效改善。

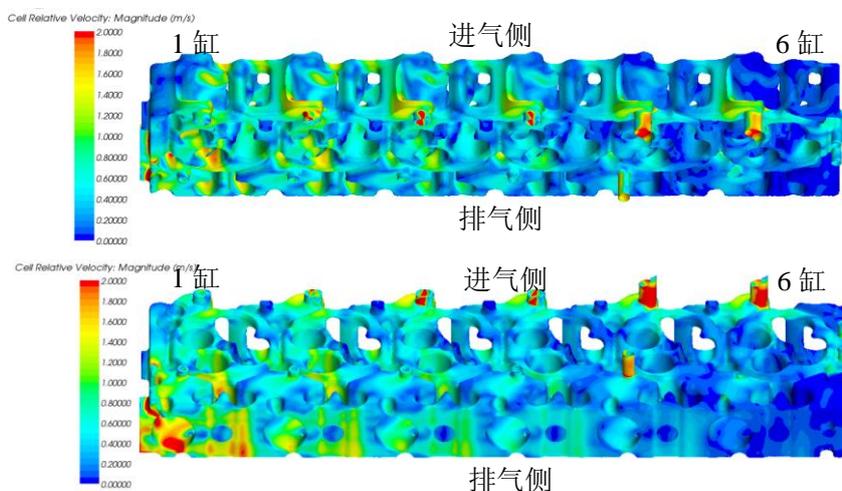


图 6 原方案缸盖水套速度云图

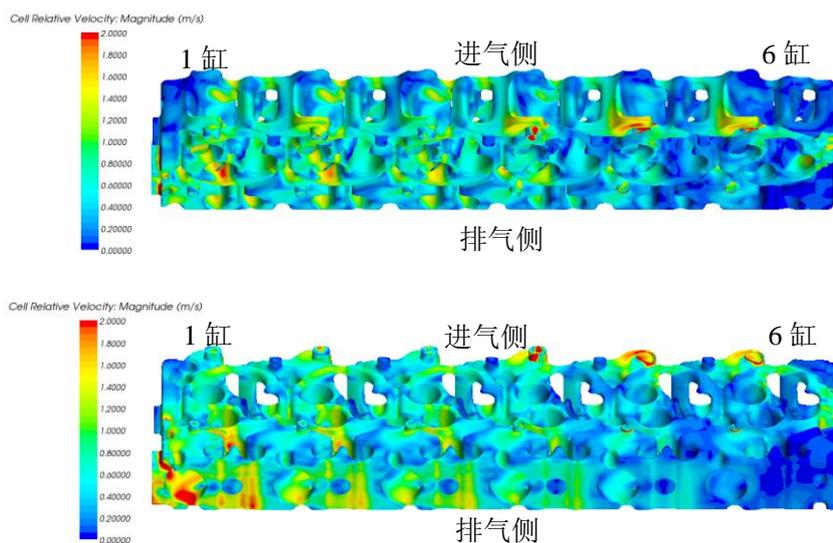


图 7 改进方案缸盖水套速度分布

图 8 和图 9 给出了原方案和改进后方案的气缸体水套的速度分布，从图 8 原方案缸体水套速度图中可以看出，除 1 缸外，其余 5 个缸体水套流速分布不均匀，缸体上部整体流速也比较低（图中黑圈表示明显的低速区域），且在流动过程中缸体上部存在流动死区，低速区的面积比较大，这容易造成局部过热，从而导致拉缸现象。

图 9 为改进方案缸体水套速度分布，通过在两缸上端增加连通孔以及在 2-6 缸加设分水孔，缸体整体速度明显提升，且速度分布均匀性得到明显改善，缸体水套上部低速区面积大大减小，低流速区位置分散，流动死区基本消失，较原方案而言，有利于防止壁面局部过热，尤其是缸体上端。

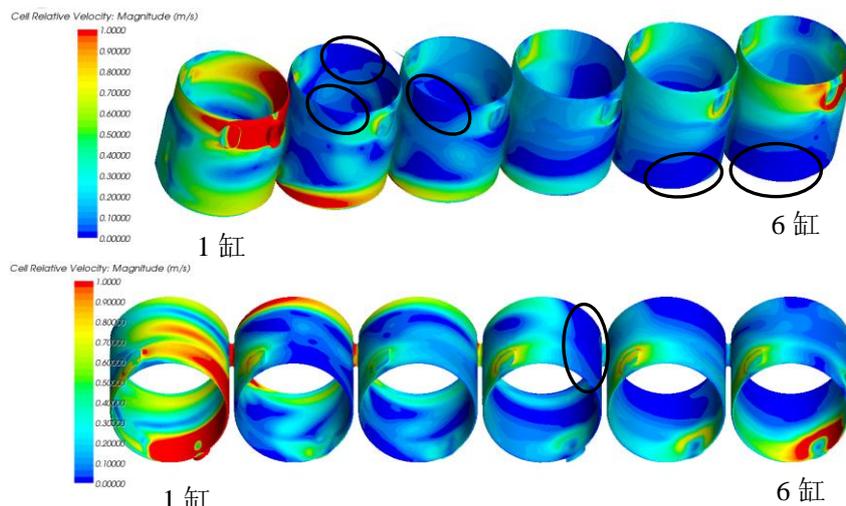


图8 原方案缸体水套速度分布

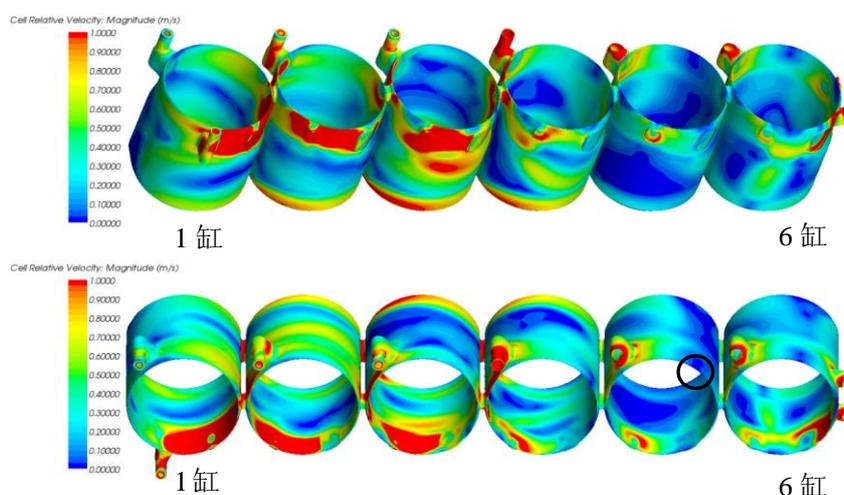


图9 改进方案缸体水套速度分布

本文研究的水套在气缸垫上共布置 14 个上水孔，其布置如图 1b 所示，图 10 为原方案和改进方案各上水孔体积流量百分比分布。从图 10 中原方案上水孔体积流量百分比分布可知，1~6 缸缸盖进水量占总进水量的百分比分别为 8.0%、14.6%、16.7%、16.3%、19.5%、24.9%。虽然经上水孔流入 6 缸缸盖的水量最多，但大部分冷却水流入 6 缸缸盖后，从两侧直接流向 5 缸，故导致 6 缸缸盖冷却效果较差。

从图 10 中改进方案 14 个上水孔各上水孔体积流量百分比分布可知，通过修改气缸垫上水孔尺寸和缸体分水孔及连通孔后，气缸盖 1~6 缸缸盖进水量占总进水量的百分比分别为 5.0%、7.3%、7.7%、21.5%、25.8%、32.7%，由于 6 缸缸盖后端上水孔 h13 和 h14 上水量增加，使得 6 缸冷却加强。

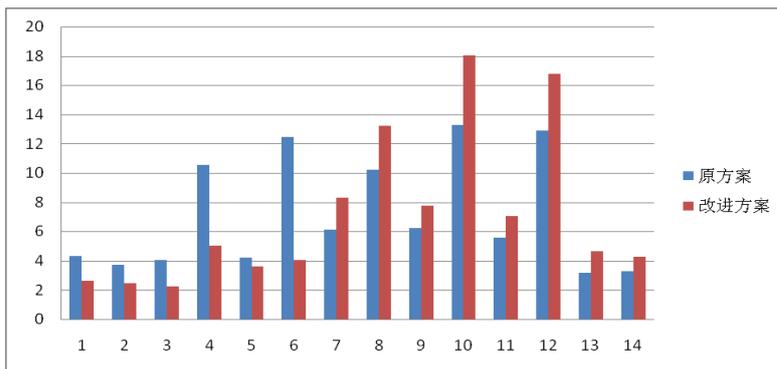


图 10 原方案和改进方案 14 个上水孔的体积流量百分比

由于速度流线分布图能为水套设计提供一定的参考,图 11 给出了原方案整体水套的速度流线图,冷却水从入口流入机油冷却器后,经各分水孔流入各个气缸体水中,同时从分水管的上水孔流入气缸盖水套,从缸盖俯视图可以清楚的看出冷却液的流动方向,为水套设计优化提供指导。

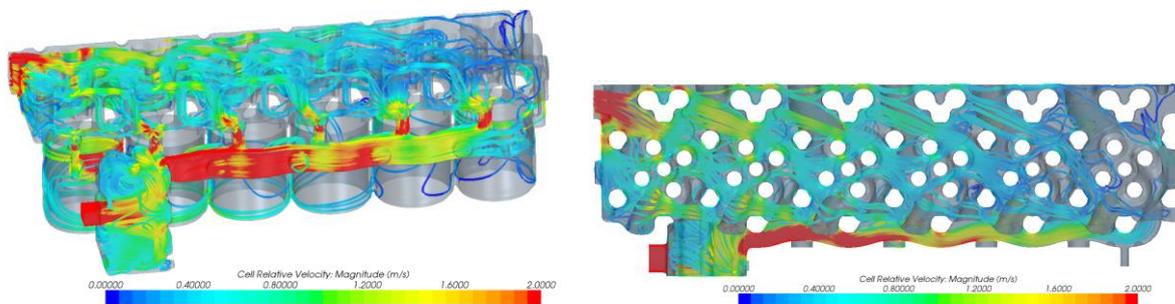
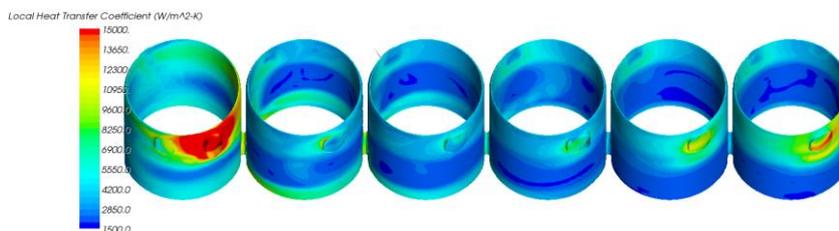


图 11 原方案速度流线

#### 4.2 换热系数分析

图 12 给出了原方案换热系数分布,与图 6、图 8 速度分布类似,原方案换热系数分布均匀性较差,在流动低速区换热系数较小,4-6 缸缸盖底平面的换热系数明显要小于 1-3 缸,且均匀性较差。经计算知,原方案 1~6 缸气缸盖水套底平面鼻梁区附近的火力面平均换热系数分别为  $6938\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $6817\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $5783\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $4513\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $4576\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 和  $4662\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

图 13 给出了改进方案换热系数分布云图,相比原方案换热系数分布明显得到改善,尤其是缸体水套上部,经计算知,改进方案 1~6 缸火力面平均换热系数分别为  $7249\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $7223\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $6688\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $5655\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $5664\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 和  $5870\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,相比原方案火力面平均换热系数有了较大的提高,尤其是 4-6 缸的火力面。



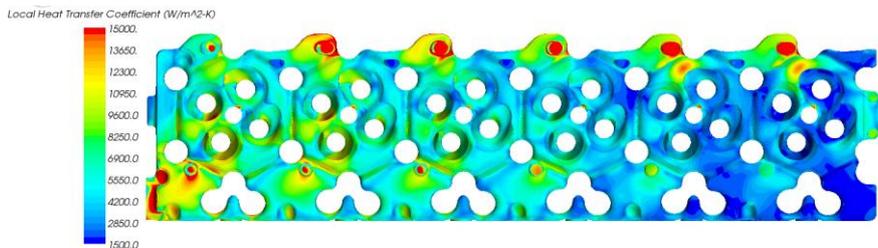


图 12 原方案水套换热系数分布

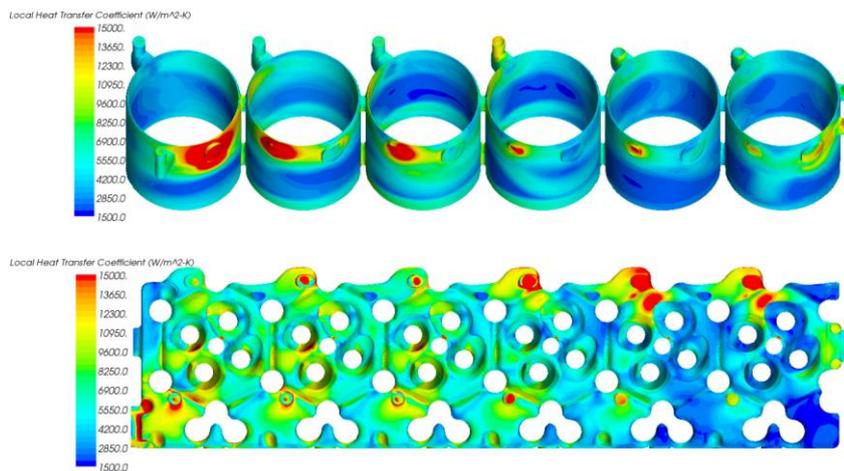


图 13 改进方案水套换热系数分布

## 5 结论

1) 原方案计算结果表明缸盖和缸体水套的速度大小及均匀性较差, 缸体上部出现流动死区, 容易造成过热, 甚至“拉缸”现象; 6 个缸的 ex-ex 鼻梁区流速均偏低, 且绝大部分鼻梁区速度均不符合设计要求。

2) 改进方案优化上水孔孔径和添加分水孔及连通孔后, 计算结果表明冷却水套整体冷却水流速有了较大幅度的提升, 缸盖和缸体水套的速度均匀性得到明显改善, 尤其是缸体上部流速和流动均匀性的提高, 更有利于防止局部过热的发生。对于缸盖来说, 缸盖鼻梁区平均速度均有提升, 尤其鼻梁区域受热较高的部位, 冷却效果显著改善, 但有些鼻梁区处的速度仍需适当的改进。

3) 利用 STAR-CCM+ 软件对水套设计进行模拟分析, 不仅为发动机水套结构设计提供指导, 而且大大缩短了设计周期。

## 6 参考文献

- [1] STAR-CCM+ UserGuide, CD-adapco, 2012
- [2] 夏兴兰, 王胜利, 陈大陆, 计算流体力学在发动机冷却水套设计中的应用, 现代车用动力, 2006,4
- [3] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980