

基于 STAR-CD 柴油机冷却水套流动传热分析

Based on STAR-CD flows in the engine cooling water heat transfer analysis

于江林

(浙江新柴股份有限公司)

摘要: 针对 498 发动机在试验中出现的“拉缸”现象,应用 STAR-CD 软件对柴油机冷却水套中的流场进行分析,发现水套中存在大范围的低速流区,通过调整气缸垫中通往缸盖分水孔的大小和分布设计了改进方案,利用 STAR-CD 软件分析得到了最终的优化方案。

关键词: 柴油机; 冷却水套; CFD 分析; 流场

ABSTRACT: Scuffing occurred in the test for the diesel engine of Model 498, after the flow field in the cooling jacket analyzed with the help of computation fluid dynamics software STAR-CD. it is found that there is low speed field in the cooling jacket. The improved designs are introduced after the position and size of the hole in the jacket, in which water flows from cylinder block into cylinder head, are modified. The optimum design is obtained according to the CFD analyzed results in the improved design.

Keywords: diesel engine, cooling jacket, CFD analysis, flow field

1. 前言

柴油机冷却水套内冷却液的三维流动直接影响发动机冷却效率,高温零部件的热负荷,发动机的热量分配和能量利用,也是穴蚀研究关注的焦点之一。在发动机冷却水套内不发生沸腾的强制对流情况下,冷却水的换热强度取决于流动速度和特征,从流场的角度而言,应加强高温部分(如进排气门座和喷油器之间的“鼻梁区”)的流动以强化冷却,而对冷却要求不高的部位则不要求过高的流速;为防止局部过热,应避免流动死角。进行冷却水套流场分析的目的就是了解冷却水在水套内的流动状况。通过优化冷却水套的结构,降低功率损失,提高零部件的可靠性和发动机的整体性能。由于冷却水套结构复杂,难于通过试验来对水套流场进行测量和分析,计算流体力学是对水套冷却能力进行分析的有效手段,它通过三维数值模拟的方法获得冷却液在水套中的速度场和压力场等信

息，从而对水套结构的合理性作出判断。

2. 模型 算法 网格 边界条件

2.1 几何结构模型

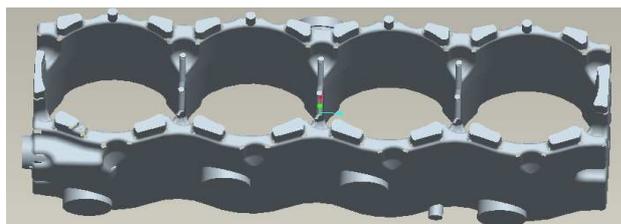
柴油机参数如表 1 所示。该柴油机采用整体式冷却方式，即缸盖水套和机体水套内的冷却水是相通的。水泵 水箱位于柴油机前端，冷却水从水箱进入水泵，水泵将冷却水加压后送入机体进气侧，冷却水在机体中一方面从前端流向后端，另一方面由机体流向缸盖，最后从缸盖流出进入水箱。冷却水套的几何模型包括缸体 缸垫 缸盖的冷却水套，由于水套结构非常复杂，无法在三维实体结构上生成计算网格，因此要在保证与原水套内流场尽可能一致的前提下，简化其几何实体。

表一 发动机主要参数

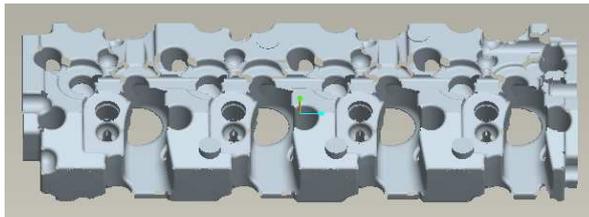
缸径 (mm)	98
行程(mm)	110
排量 (L)	3.32
压缩比	18
标定点(kW/r/min)	45/2200
扭矩点(N.m/r/min)	35/1600

几何实体的简化程度与进行CFD模拟计算所需的时间及结果精度密切相关。实体简化的越简单，计算量越小，但计算精度及模拟结果的可靠性会降低。所以要在提高计算精度和可靠性与降低模拟计算工作量两者折中的基础上进行实体简化工作。例如，由于缸盖水套的结构非常复杂，完全按照其真实模型建立计算模型是非常困难的，也是没有必要的，可根据计算经验作适当的简化，如不考虑结构的圆角和倒角以及螺栓搭子周围的小曲面等。但对模型的关键位置(如缸盖水套鼻梁区处)最好不作简化。

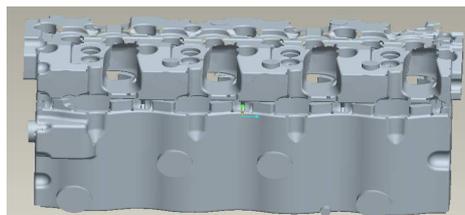
在工程计算中，通常将三维的CAD模型通过图形转换文件(如STP, STL, IGES等)输入到前处理软件中，在此基础上划分计算网格。计算网格的类型及尺度都会直接影响到CFD结果的精度和稳定性。对于结构复杂的发动机水套，主要采用应用比较广泛的非结构化的四面体网格。为了保证计算精度和计算时间上取得合理的折中，在水套表面和气缸垫处对网格进行加密，网格总数为120万。



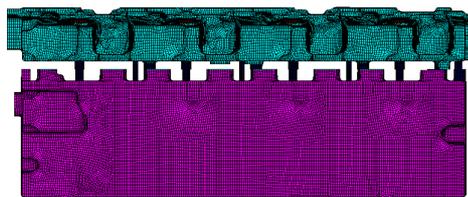
(a) 机体水套



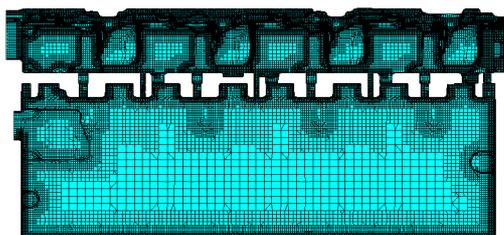
(b) 缸盖水套



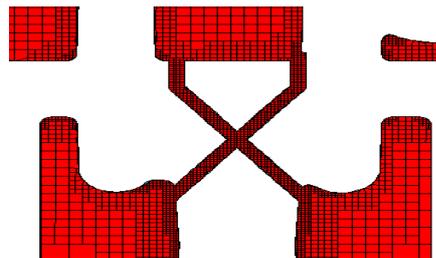
(c) 整体水套（几何未简化前）



(d) 简化后的整体水套面网格



(e) 划分好的整体水套体网格



(f) 缸垫上水孔加密网格

图1 冷却水套模型及网格

2.2 计算模型

将冷却水套内冷却液的流动视为稳态的三维有粘性不可压缩流体的湍流流动，暂不考虑传热现象(即与燃烧室内无热交换)。所用数学模型为描述流体运动基本规律的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、k-e双方程。通用控制微分方程采用直角坐标系的张量形式表示(由于本文仅限于稳态计算，方程中的非稳态项均略去不再涉及)

2.3 算法与网格划分

采用有限体积法把计算区域划分为离散的控制体网格，在每个控制体积上积分控制方程，形成计算变量的代数方程计算中认为流体为稳态不可压流动，湍流模型选用k-Epsilong高雷诺数模型，压力速度耦合采用SIMPLE算法，连续性方程、湍流方程采用MARS格式，壁面函数采用标准的壁面函数(Standard Wall Function)对边界层进行处理。该模型对贴近壁面的网格要求用 y^+ 来反映为了得到准确的结果，选用标准壁面方程时应保证 y^+ 的值在11~200。

2.4 边界条件设置

进口边界条件定义为柴油机标定工况下水泵的流量为 126l/min。

出口边界条件定义为自由出流，即流入多少则流出多少。

2.5 收敛准则

可以从两方面判断计算是否收敛：

- (1) 进出口流量是否相同；
- (2) 速度、湍动能、湍流耗散及焓的监控残差是否达 $1e-4$ 数量级，动量的残差是否达到 $1e-2$ ，并且上述残差是否都达到了稳定。

3. CFD计算结果的分析与比较

计算结果主要从以下几个方面进行评价：各缸流场均匀性以及关键区域的流速要求，各缸流量分布。下面我们就从这几个方面对该水套冷却性能进行评价。

3.1 各缸均匀性评价

评价各缸流场要分布均匀，要求不存在流动死区(流速低于0.5m/s的区域)，同时要求缸体上部速度要比下部的流速高。此次计算的机体水套的速度云图如图5所示。以下均采用图2中的标尺。

从图中可以看出：各缸流场是非常不均匀的，水流进入机体后，大部分水流通过个缸间的串水孔直接流入气缸盖，与入口同侧的缸体冷却效果稍好，但2、3、4缸体顶部存在大面积流动死区，与入口异侧几乎全部为流动死区，这可能导致缸套冷却不足，烧毁活塞环。

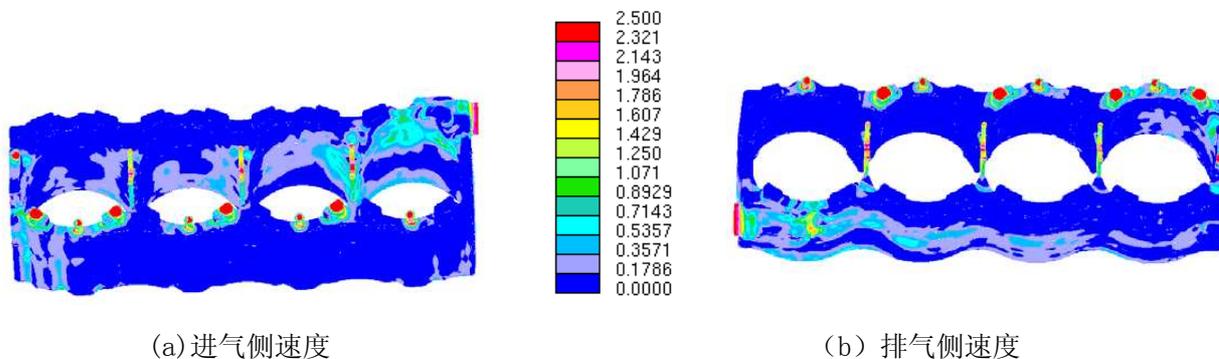


图2 机体速度云图

3.2 关键区域流动情况

一般将机体顶部和鼻梁区作为重点考察区域，从机体水套云图中已经得出机体顶部冷却不满足设计要求，缸盖速度云图及鼻梁区局部速度云图如图3所示。从图中可以看出：缸盖整体冷却还是比较好的，鼻梁区的流速虽然没有达到 $1\sim 1.5\text{m/s}$ 的要求，但基本上能够起到良好的冷却效果。

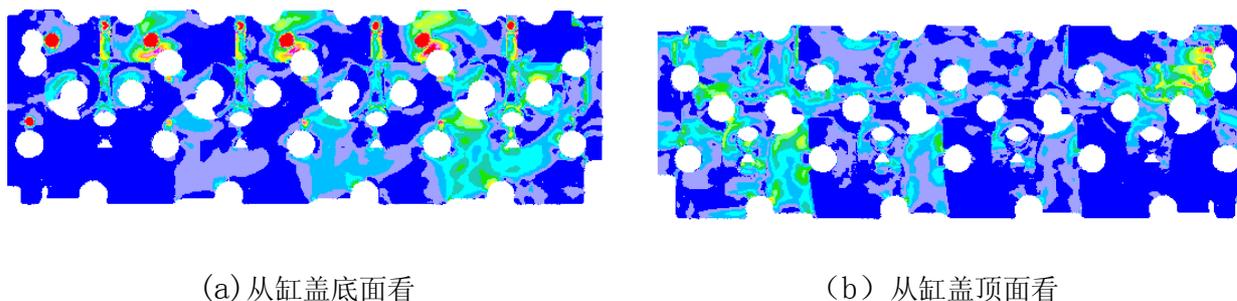
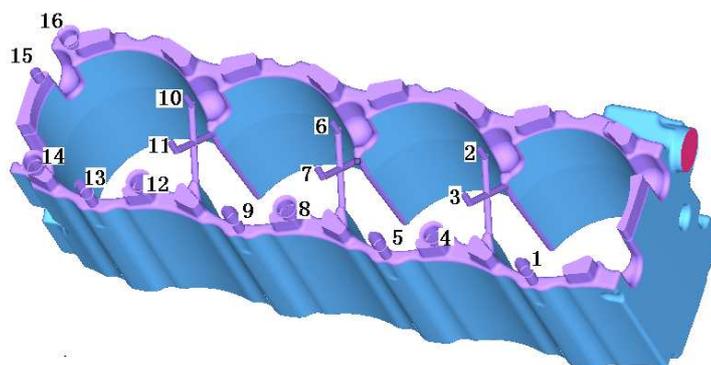


图3 缸盖速度云图

3.3 各缸流量分配

为了保证流场的均匀性以及关键位置的冷却效果，可以调整缸垫水孔大小和布置来保证水套流场均匀以达到冷却要求。各水孔编号如下图所示。



由于该水套结构为串联型，因此在评价每个缸的流量时，假定各缸间的水孔流量平均分配给两侧气缸，由此得出各缸的流量如表2所示。

表2:各缸冷却水流量分布

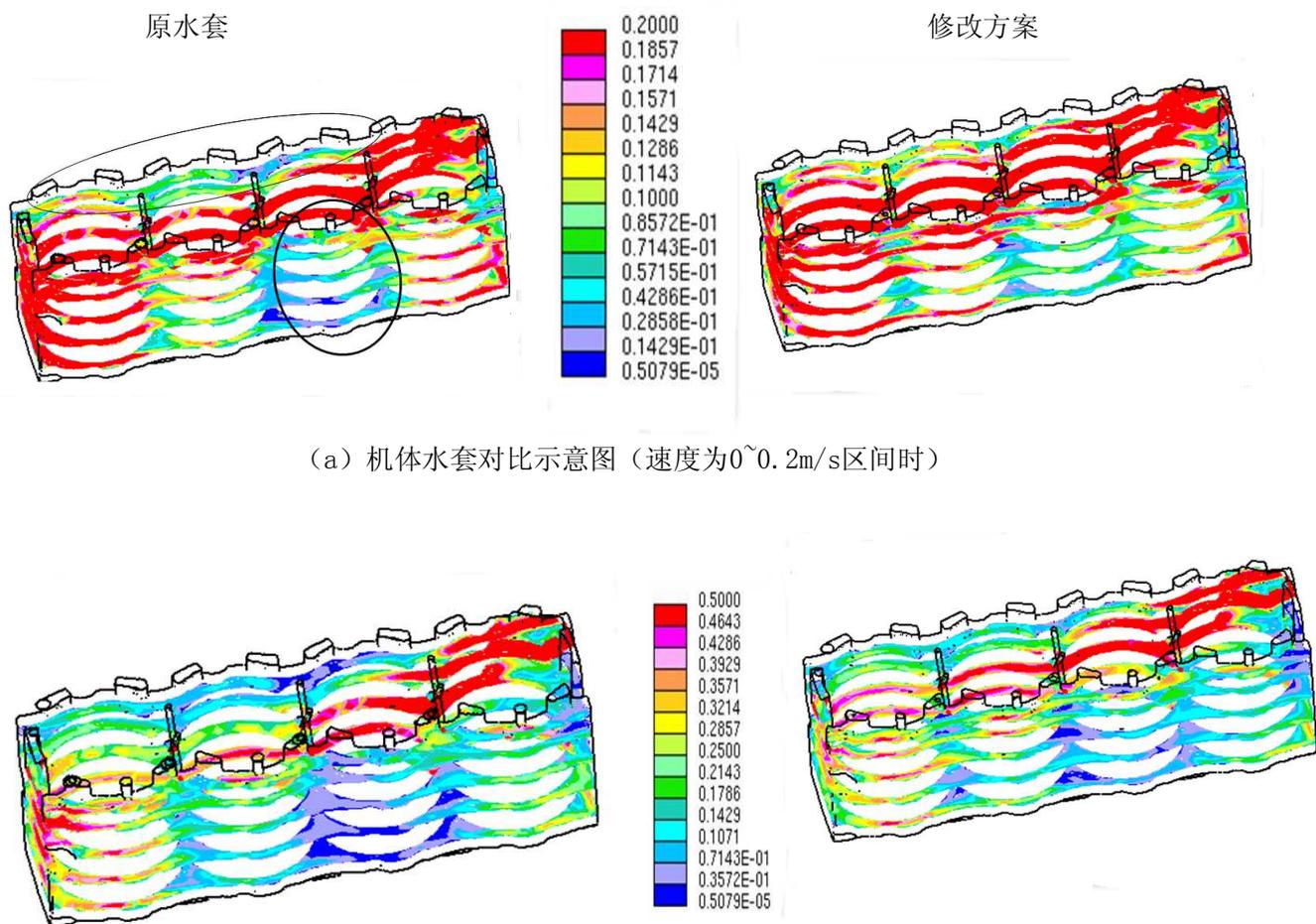
	一缸	二缸	三缸	四缸
积流量	$1.64643\text{e-}04$	$5.32925\text{e-}04$	$4.96644\text{e-}04$	$8.80759\text{e-}04$
百分比	7.93%	25.68%	23.93%	42.45%

从表2中明显可以看出：各缸流量差异很大，第四缸的流量过大，此缸的流动阻力相对其它缸小很多，因此，大部分水流直接流入缸盖，没能较好的冷却缸体，这在机体水套速度云图（图2）中得以验证。

3.4 改进建议

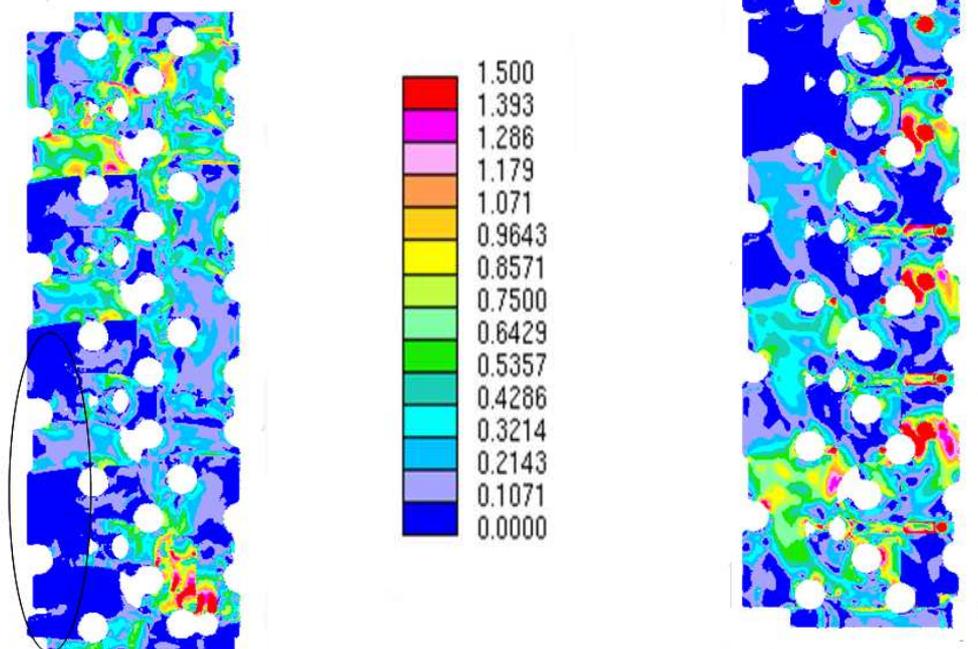
- 1、机体冷却水套存在大部分流动死区，不能起到良好的冷却效果，需要进一步改进；
- 2、缸盖冷却水套基本上能够获得较好的冷却，暂不要改进；
- 3、为使机体冷却水套获得较好的冷却，考虑对流量比较大的4、8、12、14四孔进行孔径优化，以改善入口异侧机体水套的冷却效果；
- 4、编号为16的孔没有流量，没有起到引流的作用，可考虑可以在入口侧布置一定数量和一定尺寸的上水孔，以改善入口侧机体水套的冷却效果。
- 5、将编号为14的孔直径改为3mm，将编号为12的孔直径改为5mm，将编号为8的孔直径改为8mm，编号为16的孔打通。

具体如图5所示：

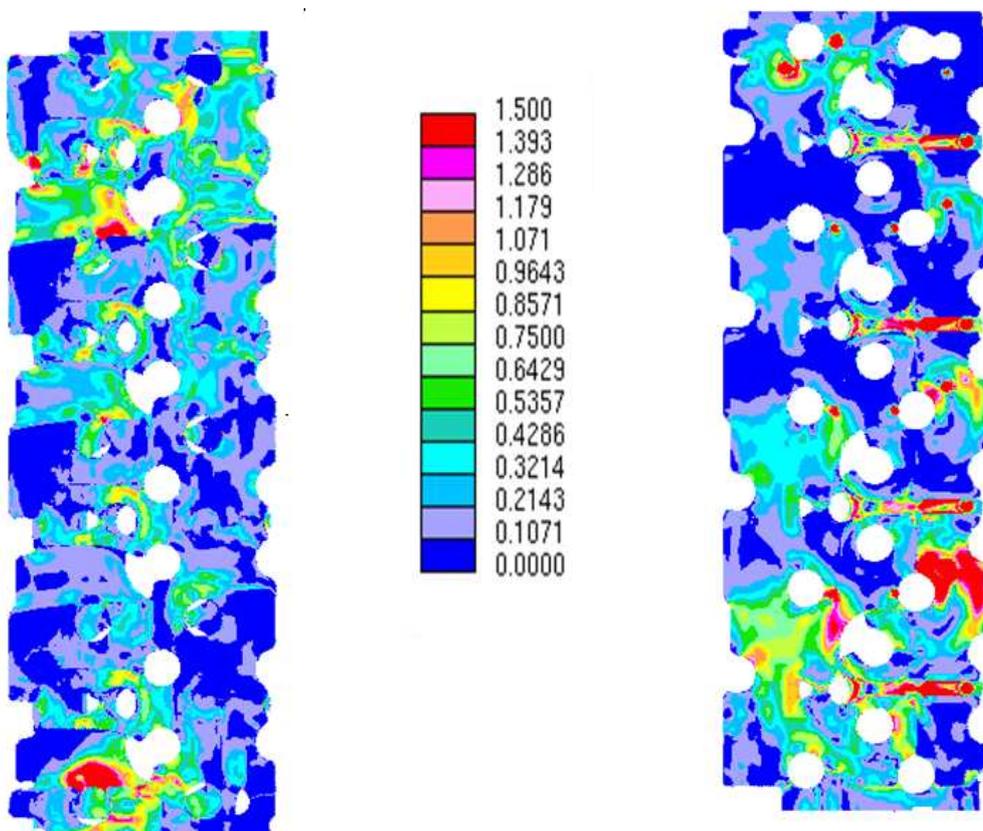


(a) 机体水套对比示意图（速度为0~0.2m/s区间时）

(b) 机体水套对比示意图（速度区间为0~0.5m/s区间时）



(c) 缸盖底面对比示意图 (速度区间为0~1.5m/s区间时)



(d) 缸盖顶面对比示意图 (速度区间为0~1.5m/s区间时)

图5

4. 结论

应用STAR-CD软件对三缸发动机冷却系统的多种改进方案进行了分析，得到如下结论：

- a. 通过STAR-CD软件分析计算所得的速度场可以方便地对各种设计方案进行比较，从而快速地优选出合理的设计方案。设计更改后的CFD计算结果表明，水套的流动得到了改善，特别是靠近燃烧室部分的流速有明显提高，缸体水套的冷却已经达到工程上可接受的范围。缸盖鼻梁区的冷却液流速也满足要求，缸盖水套的冷却已经能够满足工程要求。
- b. 机体水套的改进方案只修改了缸垫中缸体通往缸盖上水孔的大小和分布，不对原方案中缸盖和机体的水套结构作任何调整。
- c. 改进方案消除了机体进气侧水套中的低流速区，加强了其换热作用，从而强化了对缸套的冷却。
- d. 合理的压力损失保证了冷却液在水套内的充分流动。

参考文献

- [1] 陶文铨. 数值传热学 西安交通大学出版社. 2001
- [2] 杨世铭. 传热学 人民教育出版社, 1980.
- [3] 朱自强, 吴子牛. 应用计算流体力学 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [4] 陈群. 车用柴油机冷却水套的计算流体力学的分析