

发动机冷却液流动与传热的数值模拟

李宝童, 洪军, 孙静, 徐海波, 邱志惠, 潘世翼

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高发动机的冷却效率、降低高温零件的热负荷、实现整机的热量合理分配与利用, 针对冷却水套优化设计中存在的冷却液三维流动与传热问题, 以直列 4 缸发动机为研究对象, 利用流固耦合的方法确定冷却水套壁面的传热边界条件, 采用计算流体动力学软件 AVL-FIRE 对发动机冷却系统进行三维数值模拟, 并对冷却水套内冷却液的流场分布、温度分布、壁面换热系数、各缸冷却均匀性和压力损失进行了分析。在此基础上, 为了实现发动机冷却水套三维流场形态的可视化, 构建了与实际冷却水套三维尺寸成 1:1 的水套试验件模型, 结合其结构特点讨论了试验件的制备方案, 并对模拟工况下试验件的强度与管路系统的压力损失进行了验证计算, 从而进一步为冷却水套的优化设计提供了理论与试验依据。

关键词: 发动机; 数值模拟; 冷却水套; 流动与传热; 流固耦合

中图分类号: TK424 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0017-05

Numerical Simulation for Flow and Heat Transfer of Engine Coolant

LI Baotong, HONG Jun, SUN Jing, XU Haibo, QIU Zhihui, PAN Shiyi

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For improving the engine cooling efficiency and reducing thermal load of high temperature components to realize the rational heat distribution and utilization, a numerical simulation of engine cooling system with computational fluid dynamics software AVL-FIRE was carried out for a four-cylinder engine to simulate the three-dimensional flow and heat transfer of cooling water in the engine jacket for optimization design. During the calculation, the heat transfer boundary of water jacket was determined following coupled liquid-solid theory, and the flow field of cooling water, the heat convection coefficient of the inner wall, the cooling uniformity of each cylinder and the whole pressure loss for the engine were analyzed. To realize the visualization of 3D flow field of the engine coolant, one to one scale 3D experimental part model of cooling jacket was constructed and its preparation scheme was also discussed according to the structural characters. Then the structural strength and pressure loss of the piping system were also simulated to verify the rationality of the design scheme.

Keywords: engine; numerical simulation; cooling jacket; flow and heat transfer; fluid-solid coupling

随着发动机强化程度的不断提升, 热负荷越来越高, 试验证明发动机缸内气体的最高燃烧温度可达 2 500 K, 在燃烧期间, 传给燃烧室壁面的热流量密度可达 10 MW/m² 以上, 燃气传给冷却液的热量

约占燃料总热量的 20%~30%, 通过缸盖传出的热量约占发动机传给冷却液全部热量的 50%~65%^[1]。为了保证发动机正常工作, 必须很好地组织受热零部件的冷却过程, 而作为发动机冷却系统的

重要组成部分,水套中冷却液的三维流动与传热是最主要的问题,它直接影响到发动机的冷却效率、高温零件的热负荷以及整机的热量合理分配与利用。目前,计算流体力学(CFD)已经成为分析水套冷却能力的有效手段^[2],通过三维数值模拟的方法获得冷却液在水套中的速度场、温度场和压力场等信息,从而为冷却系统的优化设计提供了重要的理论依据,同时也可对燃烧室部件的强度分析提供了重要的边界条件。

近年来,随着多物理场耦合技术的发展,流固耦合传热计算方法已逐渐被应用于冷却水套的设计计算当中^[3],从而提供了更为准确的热边界条件。冷却水套结构复杂,又封闭在机体内部,因此不易观察和测量。现有的发动机冷却液流场试验^[4-5]只能观察到冷却水套内的特定位置或者局部区域的流场分布情况,而无法得到所有位置的流场数据,这一方面使研究者很难全面了解冷却水套复杂三维几何尺寸的详细信息,另一方面又制约了试验数据对于水套冷却性能优化设计的指导作用。为此,本文以实现发动机冷却水套三维流场形态可视化为目标,构建了与实际冷却水套三维尺寸成1:1的水套试验件模型,并对模拟工况下试验件的强度与管路系统的压力损失进行了验证计算,为冷却水套流场试验平台的搭建提供了理论指导。

1 发动机冷却水套的分析模型

1.1 几何模型及计算网格的建立

本文以BYD483Q直列4缸发动机为研究对象,其主要技术参数为:缸径83 mm,行程85 mm,排量1.839 L,压缩比9.0,标定点功率90 kW,转速6 000 r/min,标定点扭矩160 N·m,转速4 500 r/min。

该机型采用整体式冷却方式,冷却液从水泵入口流入,然后进入缸体水套入口,经过缸体进气侧和排气侧流向缸体后端,同时一部分冷却液经过缸体上水孔及缸垫流入缸盖水套,最后经缸盖水套出口流出,如图1所示。由于实际的冷却液流动区域具有不规则且复杂的几何外形,为了保证计算的准确性,在划分网格时应尽量保持计算区域与实际流动区域相一致。考虑冷却水套的设计特点,在网格划分中水套主体部分采用非结构化的六面体网格,局部采用非结构化的多面体网格,将水套的三维CAD模型通过转换文件STL输入到软件AVL-FIRE的前处理模块FAME中进行网格划分。整体冷却水套计算

模型的总网格数为150万,其中六面体网格占91.07%,四面体网格占0.05%,金字塔型网格占2.93%,棱柱网格占5.95%。

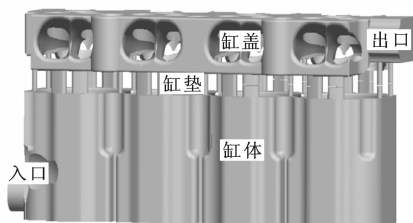


图1 冷却水套的计算区域

1.2 数学模型及边界条件的建立

1.2.1 数学模型 冷却液选用体积分数均为50%的水和乙二醇混合液,密度为1.024 kg/m³,温度为363 K。采用稳态计算模式,在计算过程中认为冷却液在水套内的流动状态是有热交换、不可压缩的湍流流动。采用有限体积法把计算区域划分为离散的控制体网格,在每个控制体体积上进行控制方程积分,形成计算变量的代数方程。流体运动通用控制方程组为

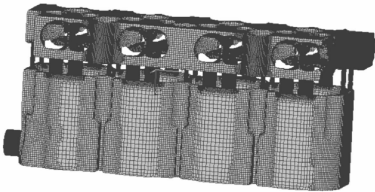
$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi}$$

式中: φ 为通用变量; ρ 为密度; u 为速度; Γ 及 S 分别为广义扩散系数及广义源项。当 φ 取值不同时,此式可以表达成连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和 k - ϵ 湍流模型。

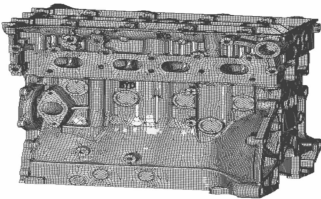
1.2.2 入口、壁面和出口边界条件 发动机在标定工况下(6 000 r/min)的水泵流量为2.5 kg/s,湍动能为0.02 m²/s²,湍动能尺度为1 mm。由于冷却液的温度分布状态与其流过的缸体、缸盖的温度分布是互相联系的,因此可利用流固耦合的方法将冷却水套的CFD计算与缸体、缸盖的温度场有限元FEA的计算联合起来,实现流固交界面数据的反复迭代(如图2所示),从而得到满足精度要求的由冷却水套CFD计算的传热边界条件。由于 k - ϵ 模型只适用于离开壁面一定距离的湍流区域,因此对于壁面附近的区域可采用标准壁面函数法来处理。由于缸盖水套出口连接了较长的出水管,所以按照流场充分发展进行处理,即给定任何物理量的梯度为0。

1.2.3 缸体缸盖温度场的计算边界条件 缸体缸盖流固接触面的换热系数由冷却水套CFD计算得出,缸套内表面燃气温度与对流换热系数由文献[6]推荐的经验公式计算得到。缸体缸盖暴露于空气的

表面环境温度 T 为 293 K, 换热系数 δ 为 $23\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 与机油接触的缸盖顶部表面、油道及缸体裙部的油温为 410 K, 换热系数为 $200\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 燃烧室顶部的燃气温度为 1 286 K, 换热系数为 $725\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 进气道温度为 310 K, 换热系数为 $210\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 排气道温度为 1 040 K, 换热系数为 $300\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



(a) 流体计算区域模型(冷却液)



(b) 固体计算区域模型(缸体缸盖)

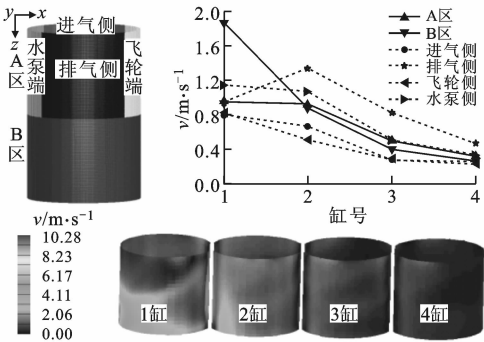
图2 冷却水套流固耦合传热计算模型

2 发动机冷却液流动与传热分析

针对所研究问题的具体情况, 本文主要对气缸套外壁面与缸盖鼻梁区的冷却液流动与传热、各缸流动均匀性及冷却系统的压力损失进行了分析.

2.1 速度场分布

为方便分析并使对比结果明确清楚, 将缸体内侧水套划分为上半区域(A区)和下半区域(B区). 由于A区对缸套上部冷却效果影响显著, 因此将其沿圆周方向再均匀划分为排气侧、水泵侧、进气侧和飞轮侧4个区域. 图3给出了缸体水套内表面的速



(a) 缸体水套内表面速度分布

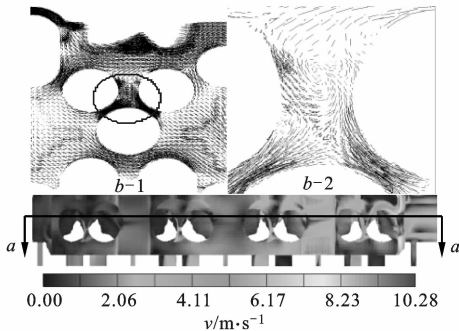
度分布云图以及各个区域的平均速度折线图, 由图可知, 缸体水套内基本没有流动死区出现, 从而杜绝了形成蒸汽囊的可能性. 在图3a中, 1缸B区流速大于A区, 相差1 m/s左右, 而2、3、4缸A区的流速则大于B区, 相差0.1 m/s左右, 这是因为入水口在1缸下部, 可以通过调整入水口位置使1缸上部的流速大于下部的流速, 并且适当增加2、3、4缸的上下部流速差值. 另外, 缸体水套上部流速较大(大于0.5 m/s), 同时各缸排气侧流速均大于进气侧流速, 符合冷却要求. 由于缸盖采用纵流的冷却方式, 因此从1缸到4缸的流速逐渐增大, 1缸的平均流速为0.758 m/s, 2缸为1.023 m/s, 3缸为1.581 m/s, 4缸为2.407 m/s. 发动机缸盖热负荷较高的区域是缸盖底部, 在进排气门座与喷油嘴之间的“鼻梁区”的热负荷最高. 图3b给出了缸盖 $\alpha\text{-}\alpha$ 剖面下“鼻梁区”的流速矢量图, 由图可知, 两排气门之间的“鼻梁区”由于排气侧和火花塞部位流出的冷却水发生交汇、冲撞而形成漩涡, 造成冷却液流速降低, 使得冷却效果减弱. 因此, 可以通过加入导流板来改善这一区域的冷却液流动情况.

2.2 流量分布与压力损失评价

对于多缸发动机, 需尽量保证各缸流量均匀, 以防止造成局部过热. 表1列出了各缸的流量数据, 其中流量不均匀性等于单缸的理想流量(单缸实际流量减去单缸理想流量).

表1 各缸流量均匀性对比

缸号	流量/L	流量比/%	流量不均匀性/%
1	0.635	25.12	0.47
2	0.652	25.78	3.13
3	0.549	21.74	-13.04
4	0.692	27.36	9.44



(b) 缸盖水套鼻梁区速度分布

$b\text{-}1$: $\alpha\text{-}\alpha$ 剖面下缸盖的水套流场分布; $b\text{-}2$: 缸盖水套鼻梁区流场分布(放大)

图3 冷却水套速度场的分布

由表1中数据可知:1、2缸流量比较接近理想流量,不均匀性不超过5%;3缸由于分水孔9的堵塞使流量与理想流量相差较大,不均匀性为13%左右;4缸由于添加了分水孔13而使流量较大,可以通过调整3、4缸的分水孔来控制两缸的流量以保证均匀性.为了防止穴蚀,水流沿程的流速和压力不应形成强烈的变化,整个水套的总压力损失为46.4 kPa,其中缸体的压力损失所占比率为25.55%,缸垫的占4.75%,缸盖的占69.70%,与同类机型相比,处于合理范围内,能够保证冷却液在水套内充分流动.

2.3 换热系数与温度分布

如图4a所示,水套的表面换热系数与冷却液速度分布密切相关,但高速区的表面换热系数则相对较高,低速区的表面换热系数则相对较低.整体水套的换热系数平均值为 $8\,752.68\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,缸体水套换热系数的平均值为 $6\,542.21\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,缸盖水套换热系数平均值为 $11\,716.70\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,都已经达到了可以接受的范围.图4b是发动机冷却液温度场的分布,随着冷却过程的进行,特别是缸盖部位,冷却液温度逐渐升高,水套表面换热系数也逐步增大,使得整体温度场趋于一致(360 K左右),从而使缸体缸盖整体变形比较均匀.

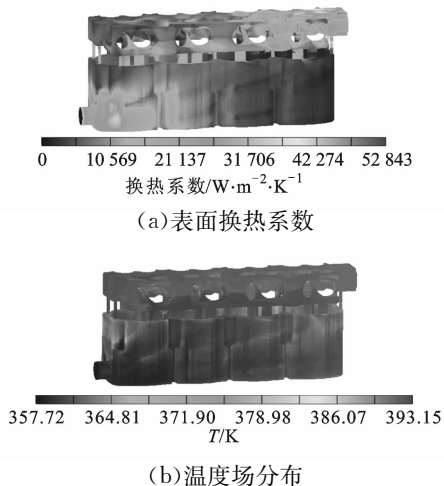


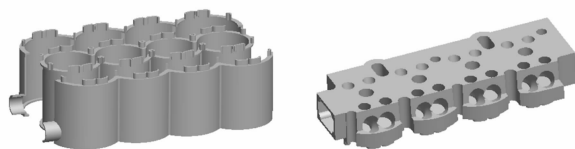
图4 冷却水套的温度场及换热系数分布

3 发动机冷却水套试验件模型

由于冷却水套结构复杂,又封闭于机体内部,所以无法得到现有冷却液流动试验的完整流场数据,因此限制了试验手段对于水套结构优化设计的指导作用.针对上述不足,在详细分析水套三维尺寸信息的基础上,对水套实体模型的各个曲面进行偏置处

理和布尔运算,构建出与三维尺寸成1:1且具有中空特征和一定壁厚的冷却水套试验件模型,其中缸体水套试验件模型壁厚为3 mm(如图5a所示),缸盖水套试验件模型壁厚为3~6 mm(如图5b所示).以该试验件模型为指导,结合具体的结构特点,通过选择合适的透光材料与成型方法,即可制备出完全反映发动机冷却水套的结构特征,并且可直接用于全场观测的水套试验件,从而实现了发动机冷却液全场形态的可视化.

对于缸体水套试验件,由于其结构特征相对简单、规则,因此可选用有机玻璃(透光率达到92%)作为成型材料,采用数控加工的方式并按照对称原则将其分为三部分进行制备.对于缸盖水套试验件,由于结构复杂且很不规则,采用数控加工(去除材料)的方式制备难度很大,因此可选择具有良好透光性的光固化树脂(如11122低密度聚乙烯树脂)作为成型材料,并采用快速成型(累积材料)的方式进行制备.



(a) 缸体水套 (b) 缸盖水套

图5 冷却水套试验件模型

试验管路系统的流动区域比较复杂,系统的能量损失包括沿程压力损失与局部压力损失,因此需要计算整个管路流动区域的压力损失,以判断管路设计是否合理.如图6所示,在AVL-FIRE中构建整个管路系统的CFD模型,按照发动机额定工况施加边界条件,计算得到试验工况下的压力损失分布如图6a所示.由计算结果可知,整个管路系统的压力损失为97 kPa,因此水泵扬程需大于该值才能满足试验压力供给的要求.

冷却水套试验件作为核心部件,由于其结构复杂且为了保证试验过程中具有良好的透光性,在建模过程中使得各处壁厚相对较薄,因此需要对其进行强度校核.将模拟工况下冷却水套试验件的CFD压力场数据作为边界条件导入强度校核有限元模型中,计算得到该工况下的应力分布如图6b所示.由计算结果可知,缸体水套试验件所承受的最大应力为19 MPa,缸盖水套试验件为7 MPa.参照有机玻璃与光固化树脂的力学性能参数,可得缸体、缸盖水套试验件的静强度安全系数分别为4.6和8.8,该

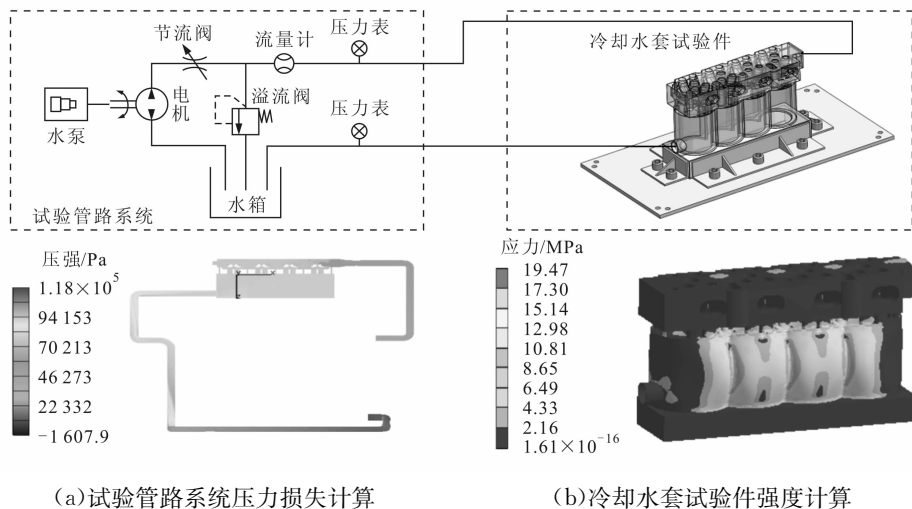


图6 冷却水套试验件模型验证计算

结果证明了冷却水套试验件的壁厚可以满足试验强度的要求。

4 结 论

本文利用流固耦合的方法,将冷却水套的流场计算与缸体、缸盖的温度场计算联合起来,结合CFD软件与FEA软件之间的反复迭代确定了满足精度要求的冷却水套壁面传热边界条件,计算了4缸发动机冷却水套内冷却液的三维流动、压力及传热特性,获得了大量流场信息。在此基础上,对冷却水套三维尺寸特征进行了详细分析,并构建了与实际水套三维尺寸成1:1的水套试验件模型,结合模型的结构特点讨论了试验件的制备方案,并对模拟工况下试验件的强度与管路系统的压力损失进行了验证计算,从而为冷却水套流场试验平台的搭建提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 姚仲鹏,王新国. 车辆冷却传热[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001:83.
- [2] 白敏丽,吕继组,丁铁新. 六缸柴油机冷却系统流动与传热的数值模拟研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(6): 525-530.
BAI Minli, LÜ Jizu, DING Tiexin. Numerical simulation on flow and heat transfer of cooling system in a six-cylinder diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(6): 525-530.
- [3] 李迎,陈红岩,俞小莉. 流固耦合仿真技术在发动机稳态传热计算中的应用[J]. 内燃机工程, 2007, 28(4):

19-22.

LI Ying, CHEN Hongyan, YU Xiaoli. Application of liquid-solid coupled numerical simulation method in steady heat transfer calculation of an engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(4): 19-22.

- [4] 朱义伦,邓康耀. 发动机缸头冷却水流场试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(4): 463-465.
ZHU Yilun, DENG Kangyao. Experimental investigation on the water coolant flow field of engine cylinder head [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(4): 463-465.
- [5] 屈盛官,夏伟. 高强度柴油机气缸套周围冷却水流场的数值模拟和试验研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25(4): 32-35.
QU Shengguan, XIA Wei. Numerical simulation and experimental research on cooling-water flow around cylinder liner for heavy duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(4): 32-35.
- [6] 王希珍,严兆大,周军. 柴油机缸套热负荷评估的分析及实验研究方法[J]. 内燃机工程, 2001, 22(4): 62-65.
WANG Xizhen, YAN Zhaoda, ZHOU Jun. Analytical and experimental method of thermal load estimation for diesel engine cylinder liner [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(4): 62-65.

(编辑 管咏梅)