

王萍,谭礼斌,袁越锦,等.发动机冷却水套的计算流体力学分析及结构改进[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):66-74. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.009

WANG P, TAN L B, YUAN Y J, et al. CFD Simulation and Structure Improvement of an Engine Cooling Water Jacket[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(4): 66-74. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102. 2022.04.009

# 发动机冷却水套的计算流体力学分析及结构改进

王萍<sup>1</sup>, 谭礼斌<sup>1,2</sup>, 袁越锦<sup>2\*</sup>, 黄灿<sup>1</sup>

(1.隆鑫通用动力股份有限公司 技术中心,重庆 400039;2.陕西科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710021)

**摘要:**为评估某发动机冷却水套结构设计的合理性,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析方法,采用 STAR-CCM+软件对一款双缸发动机冷却水套进行流场数值模拟分析.通过对该冷却水套的速度场及缸孔流量分配进行分析,发现该双缸发动机冷却水套的结构设计存在不足,会造成左缸冷却效果好而右缸冷却效果差的两缸冷却不均匀现象,右缸大部分区域的换热系数低于  $5\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,因此,需要提升冷却水套的冷却性能.基于流动路径及流量分配合理性的综合评估方法提出了冷却水套缸孔布局的改进方案,并对冷却水套改进结构进行了 CFD 模拟.结果表明:改进后,排气侧、鼻梁区等高温区域的冷却效果得到保证的同时,左缸和右缸的冷却均匀性得到明显的改善,冷却水套壁面平均换热系数的提升非常明显,基于流动路径及流量分配合理性来设计缸孔布局的方法是有效可行的.研究结果可为冷却水套的改进设计提供方法指导和仿真数据支撑.

**关键词:**冷却水套;计算流体力学;流场特性;缸孔;结构改进

**中图分类号:**TK402 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0066-09

## CFD Simulation and Structure Improvement of an Engine Cooling Water Jacket

WANG Ping<sup>1</sup>, TAN Libin<sup>1,2</sup>, YUAN Yuejin<sup>2</sup>, HUANG Can<sup>1</sup>

(1. Research and Development Center, Loncin Motor Co., Ltd., Chongqing 400039, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to evaluate the rationality of the structural design of the cooling water jacket of an engine, based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis method, the flow field of a double cylinder engine cooling water jacket is simulated by STAR-CCM+. Through the analysis of the velocity distribution of water jacket and the mass flow rate distribution of the cylinder gasket hole, it finds that the structural design of the water jacket of the dual cylinder engine has some shortcomings, which results in the uneven cooling of the two cylinders with good cooling effect of the left cylinder and the poor cooling effect of the right cylinder. The heat transfer coefficient of most areas of the right cylinder is lower than  $5\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Therefore, the cooling performance of water jacket is needed to be improved. Based on the comprehensive analysis of the cooling liquid

收稿日期:2020-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51876109)

\*通信作者, E-mail: yyjyuan1@163.com

flow path of gasket hole and the rationality of mass flow rate distribution, the improvement scheme of cooling water jacket gasket hole layout is proposed, and the structure improvement of water jacket is simulated by CFD. The simulation results show that the cooling uniformity of the left and right cylinders is obviously improved, and the average heat transfer coefficient of the water jacket wall surface is significantly improved. The method of designing the gasket hole layout based on the rationality of cooling liquid flow path and mass flow rate distribution of gasket holes is proved to be effective and feasible. The research results can provide theoretical guidance and simulation data support for structure improvement of cooling water jacket.

**Keywords:** cooling water jacket; CFD; flow field characteristics; gasket hole; structural improvement

冷却系统在发动机的正常运行中起着非常重要的作用.发动机冷却是保证发动机高效可靠运行的必要条件<sup>[1]</sup>,合理的发动机冷却水套结构可以加强高温区域的冷却液的流动分布及强化换热,保证发动机的有效散热及可靠运行<sup>[2]</sup>.随着发动机动力性能及运行功率的提升,对冷却系统的匹配设计提出了相对更苛刻的要求.在以往的设计中,通常采用正向设计与测试验证相结合的方法进行新产品的研发,测试投入成本大、周期长,且很容易出现反复设计及验证的重复操作,产品的开发周期很难得到保证<sup>[3]</sup>.随着计算流体力学技术的发展及在工程上的广泛运用,采用流体分析软件对冷却水套流场特性进行数值模拟分析,获取速度场、压力场等流场细节信息,从而指导冷却水套结构设计的“虚拟仿真开发”已是发动机冷却系统性能分析及优化的发展趋势<sup>[4-6]</sup>.刘云卿等<sup>[7]</sup>采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件对汽油机冷却水套的速度分布进行了分析,为评估冷却水套换热效果提供了理论数据;周芸梦等<sup>[8]</sup>采用 STAR-CCM+对柴油机的2种不同缸盖冷却水套进行了速度场及压力场的对比分析,为冷却水套结构方案的选取提供了仿真数据支撑.基于CFD技术进行流场模拟及结构改进分析,可为产品的结构设计及改进提供理论指导.基于此,利用CFD分析软件对某双缸发动机冷却水套进行数值模拟分析,评估其冷却水套结构的合理性,并依据流场分析结果对冷却水套结构针对性地进行改进设计,以保证流动均匀性及确保高温区域的重点冷却,提升整体冷却效果.研究结果可为后续该冷却水套结构的改进设计提供理论指导及仿真数据支撑.

## 1 物理模型

某双缸发动机冷却水套按照发动机样机冷却水套,采用CATIA软件1:1等比例绘制而成,冷却水套计算域模型如图1所示,导入STAR-CCM+软件中的结构如图1a和图1b所示.为了减小冷却水套进出口流体的回流,保证计算结果的准确性,分别在冷却水套进出口增加延长段(其长度为所连管路内径的3~5倍),整体冷却水套流体域如图1c所示.采用分析软件中的多面体网格(六面体)和边界层网格对计算域模型进行网格划分,其进出口延长段划分拉升层网格.计算前对网格进行流动阻力分析验证,当网格数量低于400万网格,流动阻力呈增长趋势,当网格数量达到400万网格以上,流动阻力基本趋于稳定.考虑计算精度及效率,采用400万网格的计算域进行后续计算,计算域网格及网格细节如图2所示.

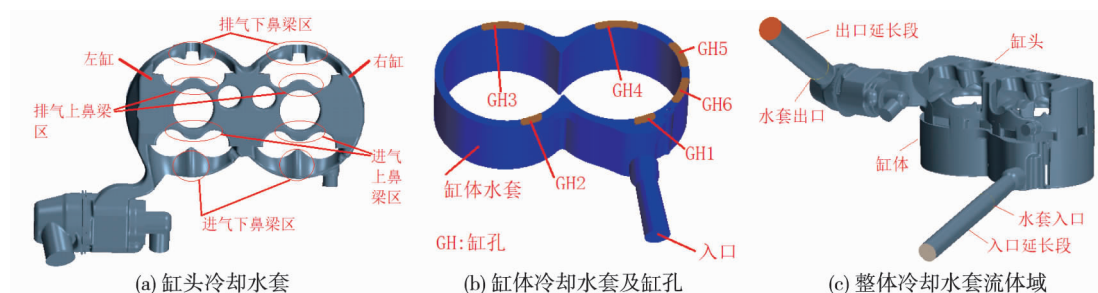


图1 冷却水套计算域模型

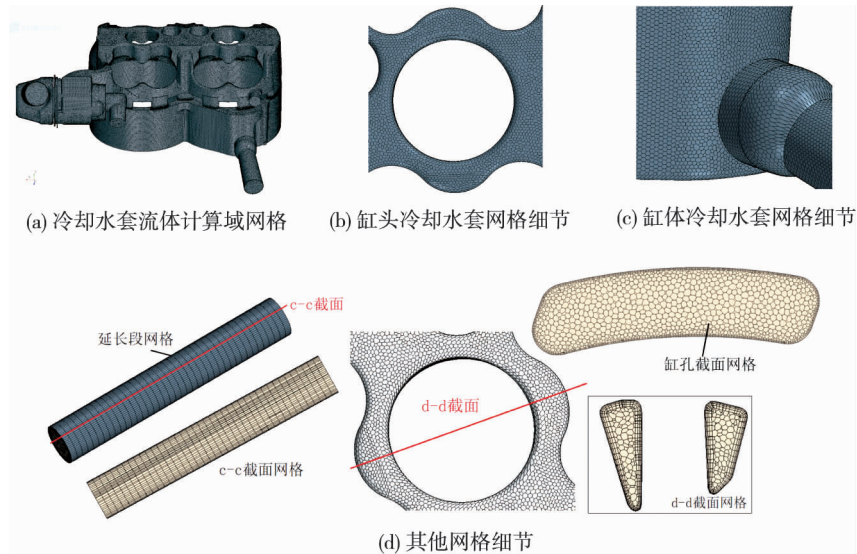


图2 计算域网格及网格细节

## 2 数学模型及边界条件

选取的冷却液介质为 50% 的乙二醇和 50% 的水的混合溶液,假设冷却液在整个冷却水套内部中的流动状态为绝热不可压缩的黏性湍流,选用 STAR-CCM+ 中的 Realizable Two-Layer  $k$ -epsilon 湍流模型进行求解.为了分析冷却水套壁面的换热系数,在分析中需要对壁面添加温度,因此,需要求解的流体基本控制方程包括流体三大基本控制方程(连续性方程、动量方程和能量方程)和湍流模型方程( $k$  方程、epsilon 方程)<sup>[9-11]</sup>.模拟求解前需要设置的边界条件如下:

1) 冷却水套入口边界条件:质量流量入口,质量流量采用整车实测的冷却系统流量换算得到.85 °C 时冷却液介质属性密度为 1 034.66 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度为 0.000 89 Pa·s,体积流量为 15, 30, 40 L/min.

2) 冷却水套出口边界条件:压力出口.

3) 壁面边界条件.为分析冷却水套壁面的换热系数,对壁面温度进行相应的温度边界设置.其中,缸头冷却水套的壁面温度设置为 120 °C,缸孔壁面温度设置为 110 °C,缸体冷却水套的壁面温度设置为 100 °C.壁面采用 STAR-CCM+ 中的 Two-Layer All  $y^+$  Wall Treatment 函数处理,无滑移壁面条件.

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 流场特性分析

采用文献[12]的试验验证方法,在进行流场对比分析前对流阻进行试验验证,模拟与仿真误差基本在 10% 以内,表明 CFD 计算模型可以获得较精确的计算结果.图 3 为原双缸冷却水套在不同流量下的进出口压差.由图 3 可以看出:随着冷却水套内冷却液流量的增加,冷却水套进出口之间的压力差值增大.由于不同流量下双缸发动机冷却水套的流场分布趋势差异不明显,因此,后续对冷却水套内的流速分布、缸孔流量分布及占比的相关分析与讨论中,仅选择流量为 40 L/min 的工况进行分析.

该冷却水套缸垫上的水孔与缸体冷却水套、缸头冷却水套为全连通状态(即缸垫上的水孔与缸体冷却水套、缸头冷却水套的连接口大小一致).图 4 为原方案双缸冷却水套在 40 L/min 流量工况下的速度流线.结合图

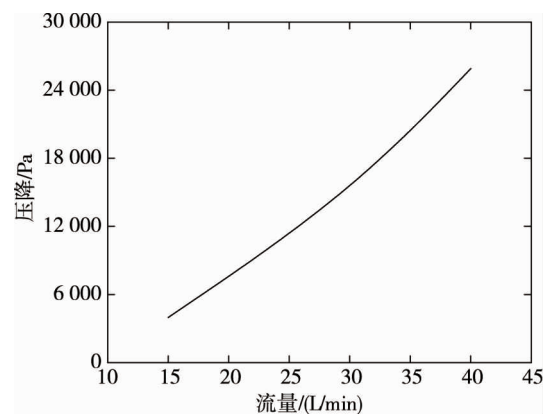


图3 原双缸冷却水套在不同流量下的进出口压差

1b 中的缸孔布局和图 4 可看出:缸孔 1 和缸孔 2 的缸孔流通面积大,流动阻力小,流经该处的冷却液流速非常大,较多的冷却液从此处流出,导致冷却液的利用率较低,冷却水套两缸的冷却液的流量分布极不均匀,右缸的冷却液流量小、流速低,冷却水套高温区域的冷却效果较差.根据速度流线图的分析,后续通过调整缸孔的布局及其过流面积对冷却水套的流量进行重新分配,促使两缸的冷却效果基本趋于一致.

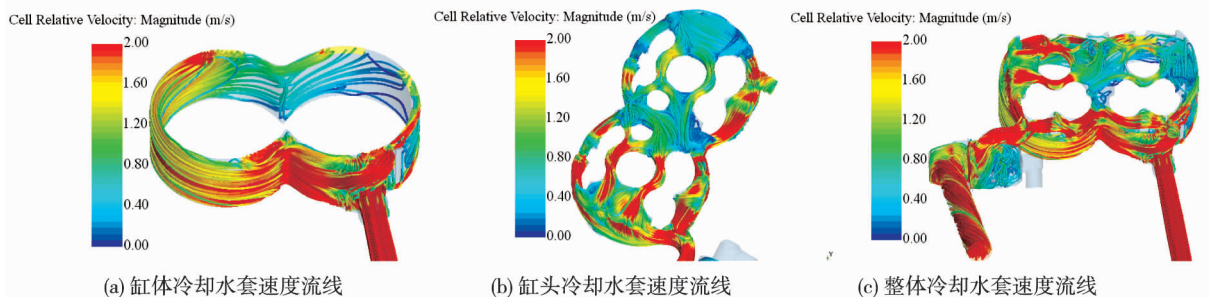


图 4 原方案冷却水套在 40 L/min 流量工况下的速度流线

图 5 为冷却水套缸体、鼻梁区截面.缸体冷却水套环形截面主要是查看缸体冷却水套的速度分布,缸头冷却水套上鼻梁区(高温区域)截面用于查看鼻梁区冷却液的速度分布情况.图 6 为原方案冷却水套中缸体、缸头鼻梁区截面的速度分布云图.由图 6 可以看出:该发动机冷却水套左缸的缸体、鼻梁区的速度分布较好,右缸的缸体、鼻梁区的速度分布极差.两缸冷却液的流量分布不均会导致两缸温度相差大,影响发动机的正常运行及运转功率.



图 5 冷却水套缸体、鼻梁区截面

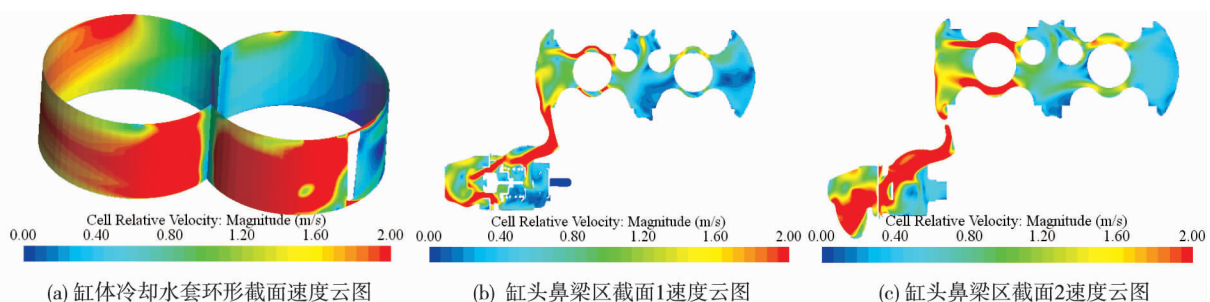


图 6 原方案冷却水套缸体、缸头鼻梁区截面速度分布

图 7 为原方案冷却水套各缸孔的冷却液流量分配及占比对比曲线.由图 7 可以看出:缸孔 1、缸孔 2 的冷却液流量较大,流量占比约为 45%,缸孔 5、缸孔 6 靠近发动机右缸,两缸孔的冷却液流量最小,两缸孔的流量占比之和为 10%,远不如缸孔 3、缸孔 4 的冷却液流量.从流量分配及占比来看,该双缸发动机左缸的冷却效果远远好于右缸,两缸的冷却性能相差较大,表明该冷却水套缸孔的设计不合理,未能达到双缸冷却水套均匀冷却的效果,需要重新布局,重点应提升右缸的冷却性能.



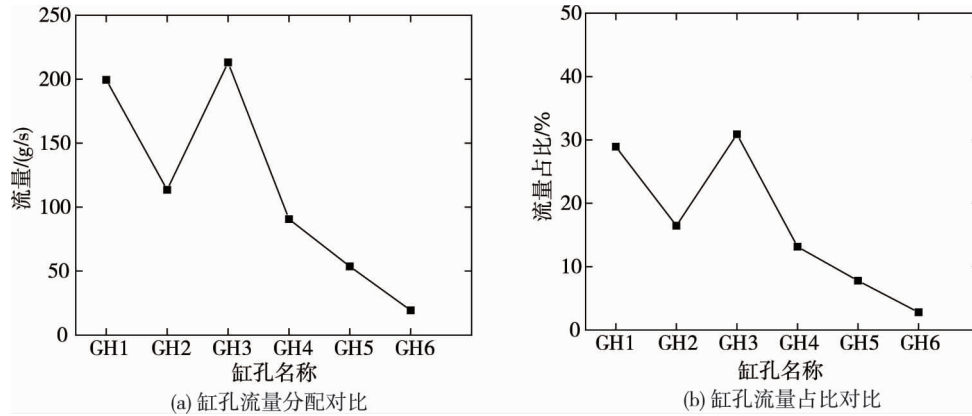


图7 原方案冷却水套各缸孔冷却液流量分配及占比对比

### 3.2 原因分析及改进对策

图8为双缸发动机原方案冷却水套缸孔布局.整个冷却水套有6个缸孔,缸孔大小与缸体冷却水套接口、缸头冷却水套接口的大小一致,为全通状态.好的缸垫上水口应能兼顾、均衡缸体冷却水套和缸头冷却水套的冷却,从这点出发,可以对该双缸发动机原冷却水套的设计合理性进行评估.

传统的发动机冷却水套的设计理念:热负荷高的排气区及鼻梁区要求冷却液流速大、流动好并分配较多的冷却液,热负荷低的进气侧的流量可适当减小.图9为原方案冷却水套各缸孔的冷却液流动路径.由图9可以看出:流经缸孔1、缸孔2的冷却液主要冷却发动机两缸热负荷较低的进气区,流经缸孔3、缸孔4的冷却液主要冷却发动机两缸热负荷较高的排气区,流经缸孔5、缸孔6的冷却液的流动路径最长,主要冷却发动机鼻梁区等高温区域.依据流体的流动路径来看,原方案中缸孔的布局方式不合理,排气侧的流量分配过多,高温区的流量分配较少、流速低,且左右两缸的速度分布不均匀,不利于发动机高温区的散热,影响发动机的性能.根据对冷却水套整体冷却液的流动路径、流速分布及缸孔流动路径进行分析,对缸孔布局进行合理的设计,可快速寻找一个相对较优的缸孔布局的改进方案.

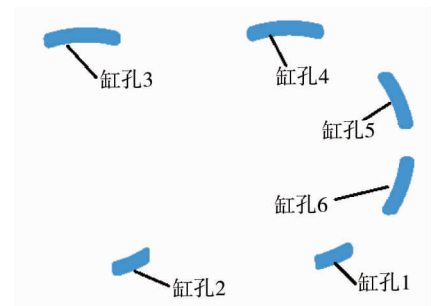


图8 原方案冷却水套缸孔布局

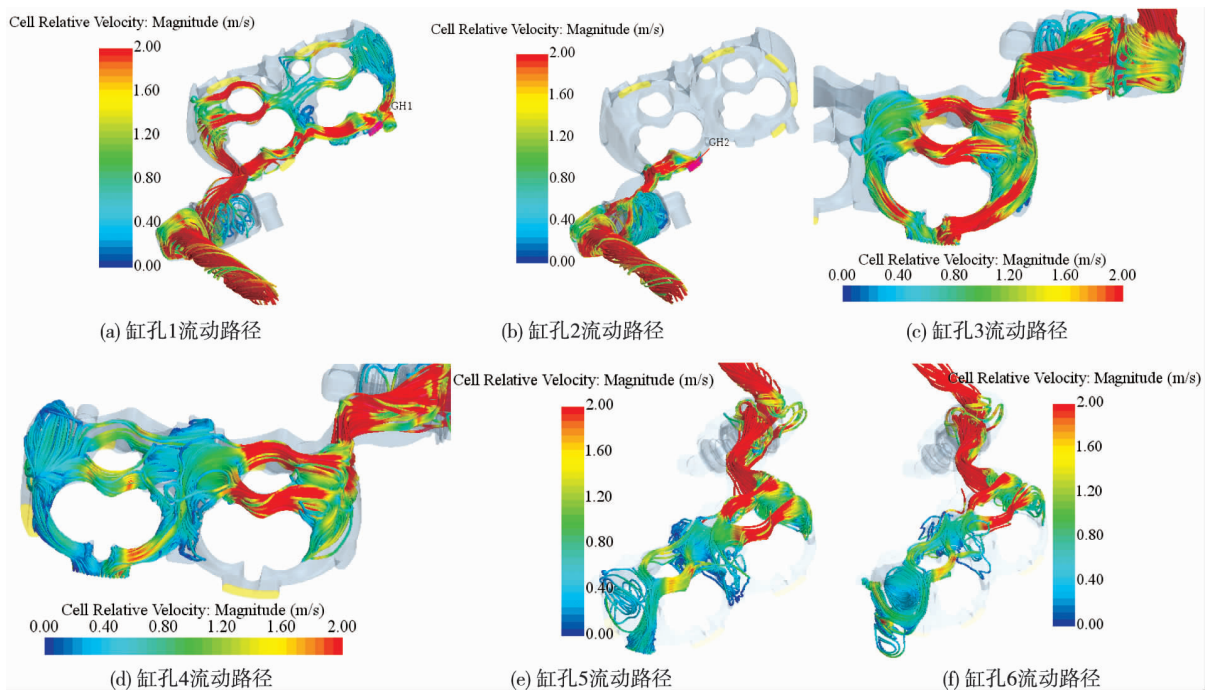


图9 原方案冷却水套各缸孔冷却液流动路径

为使该双缸发动机冷却水套冷却得更加均匀,且保证高温区域的重点冷却,可对该双缸发动机冷却水套的缸孔布局进行改进,主要改进包括:(1)减小缸孔1、缸孔2的流通面积;(2)将原缸孔3拆分为左右布局的2个缸孔(命名为缸孔3、缸孔4),原流动路径中冷却液流速较低的支路采用面积较大的缸孔(缸孔4);(3)在整体冷却水套的中间补充一个缸孔,命名为缸孔5,用于补偿左缸的冷却液流量;(4)将原缸孔4拆分为左右布局的2个缸孔(命名为缸孔6、缸孔7),按照与缸孔3同样的原理,将较大面积的缸孔7置于左端冷却液流速较小的支路,提升该支路的流量;(5)原缸孔5、原缸孔6保证其流通面积,大小基本不变,命名为缸孔8、缸孔9.按照流动路径调整缸孔的思路对缸垫上的缸孔布局进行重新设计,改进后的缸孔布局如图10所示.

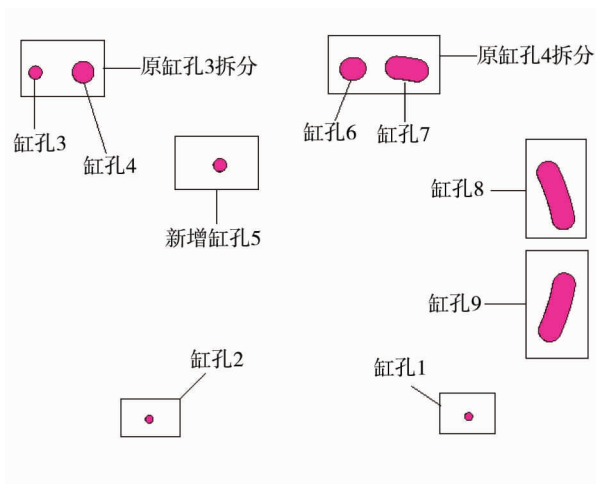


图10 双缸发动机冷却水套缸孔改进方案

采用CFD模拟获得冷却水套改进方案各缸孔的流动路径如图11所示.由图11可以看出:改进方案中,流经缸孔1、缸孔2的冷却液的流速明显降低,冷却液基本流向水套进气侧的下鼻梁区,在下鼻梁区的冷却得到保证的同时,直接从水套出口流失的冷却液也得到了降低.通过排气侧缸孔的调整,右缸的冷却能力得到了明显的提升,两缸的冷却效果逐步趋于均衡.

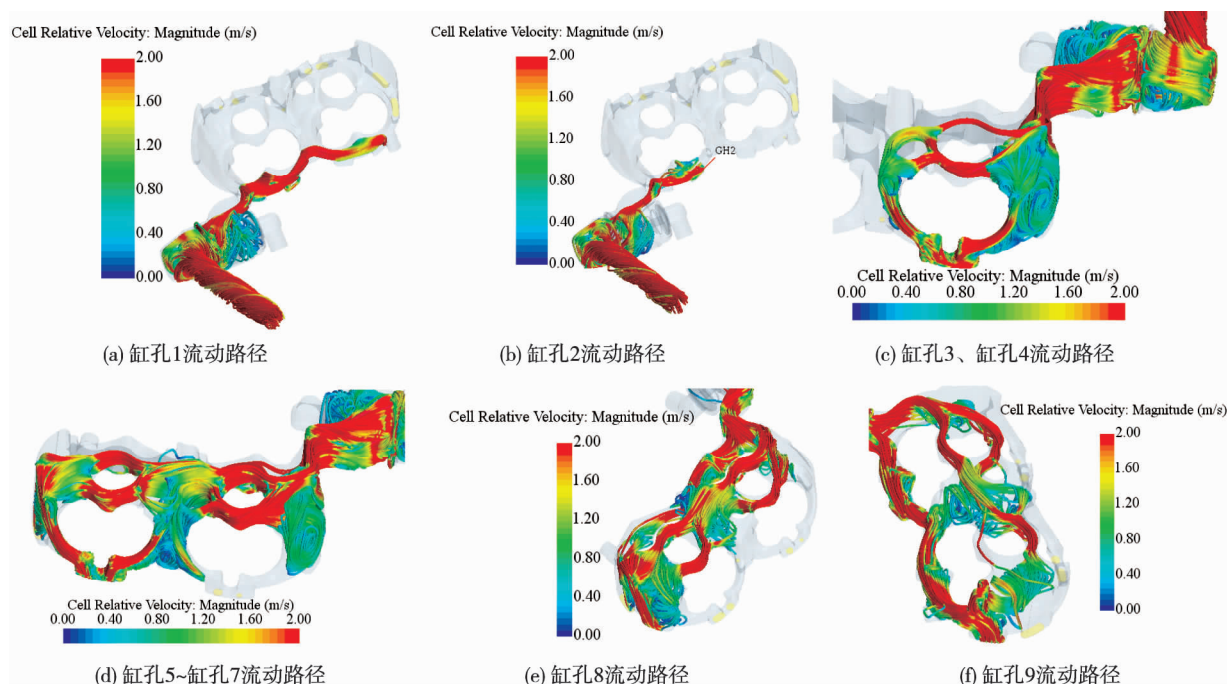


图11 冷却水套改进方案各缸孔冷却液流动路径

### 3.3 改进效果对比

图12为冷却水套结构改进前后各缸孔的流量分布对比(40 L/min流量工况).由图12可以看出:冷却水套结构改进后,缸孔流量得到了重新分配,缸孔1、缸孔2的流量减小,流量占比约3.5%;缸孔8、缸孔9的流量增加明显,流量占比约为55%,与改进对策中预估的效果基本一致;缸孔3~缸孔5的流量占比和约为18%,对应冷却左缸排气侧的高温区域;缸孔6、缸孔7的流量占比和约为23.5%,对应冷却右缸排气侧的高温区域.缸孔1、缸孔2主要流经进气侧,保证了进气侧冷却液的流动且提升了冷却液的有效利用率.缸孔8、缸孔9流量的提升,可以很好地改善右缸的冷却效果,且流经该处的冷却液最终也会在左缸的上

鼻梁区聚集,有利于左缸鼻梁区的冷却.

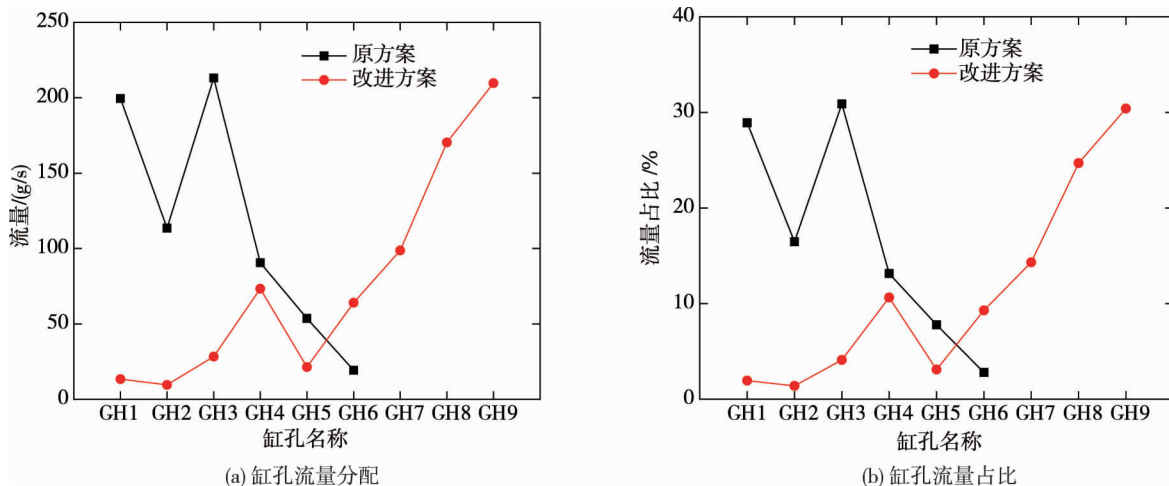


图 12 冷却水套结构改进前后各缸孔冷却液的流量分配

冷却水套内部冷却液流速的大小对冷却水套的冷却效果影响很大,流速大则冷却效果较好,流速小则冷却效果差.冷却水套缸头排气侧和燃烧室鼻梁区都是高温区域,因此,流经这些区域的冷却液一定要确保有较大的流速.根据文献[13-14]可知:发动机缸体冷却水套冷却液的流动速度达到 0.5 m/s,排气侧及燃烧室热负荷较高的火力面区域的冷却液流速达到 1 m/s,可以满足散热需求.图 13 和图 14 为冷却水套结构改进前后双缸发动机冷却水套内部的速度流线对比(40 L/min 流量工况).由图 13 和图 14 可以看出:冷却水套结构改进后,右缸排气侧、鼻梁区的冷却液流速明显增加,达到 2 m/s 以上,有利于高温区域的冷却.改进后两缸的冷却效果基本趋于一致,表明该冷却水套结构改进方案具有提升两缸冷却均匀性、高温区域重点冷却的效果.



图 13 冷却水套结构改进前后冷却水套速度流线分布

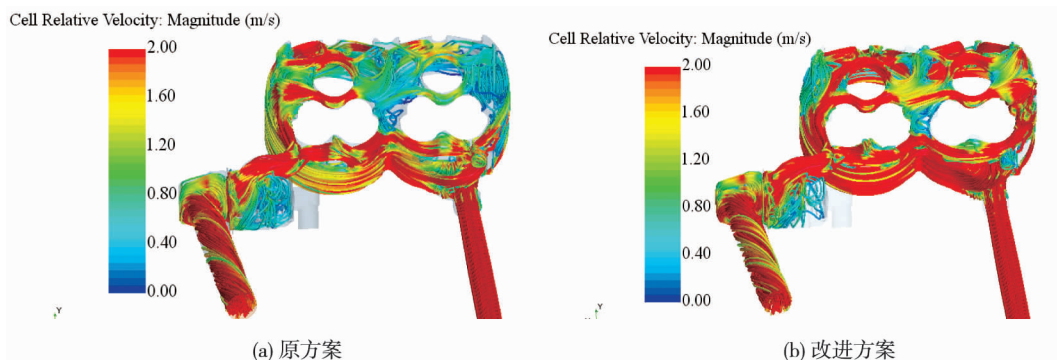


图 14 冷却水套结构改进前后整体速度流线分布

图 15 为改进前后双缸发动机冷却水套压降对比.由图 15 可以看出:改进后的冷却水套因缸孔流通面



积减小,冷却液流动路径增加,导致缸垫处的压力损失增大,冷却水套的压降增加.为了保证该冷却水套搭载发动机后冷却系统的正常运行,后期可采用一维系统对外部动力源及管路进行合理匹配,保证冷却系统流量的循环.

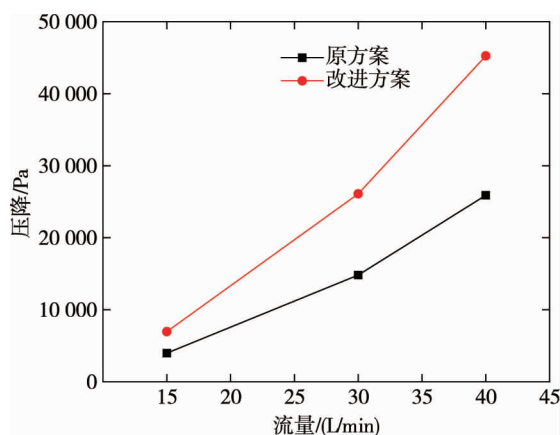


图 15 改进前后冷却水套压降对比

图 16 为改进前后冷却水套换热系数对比.由图 16 可以看出:原方案右缸壁面的换热系数大部分区域都低于  $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,改进后的冷却水套壁面换热系数的分布相对较均匀,右缸大部分区域的换热系数都大于  $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .冷却液流速越大,对应的换热系数越大,冷却效果越好<sup>[15]</sup>.图 17 为改进前后冷却水套壁面的平均换热系数对比.由图 17 可以看出:冷却水套结构改进后,壁面的平均换热系数提升得非常明显,表明基于流动路径及流量分配合理性的方法来设计缸孔布局形成的冷却水套改进方案的效果明显.该分析方法适用于同类型发动机冷却水套的流动特性及结构改进,研究结果可为冷却水套的优化设计提供方法指导和仿真数据支撑.

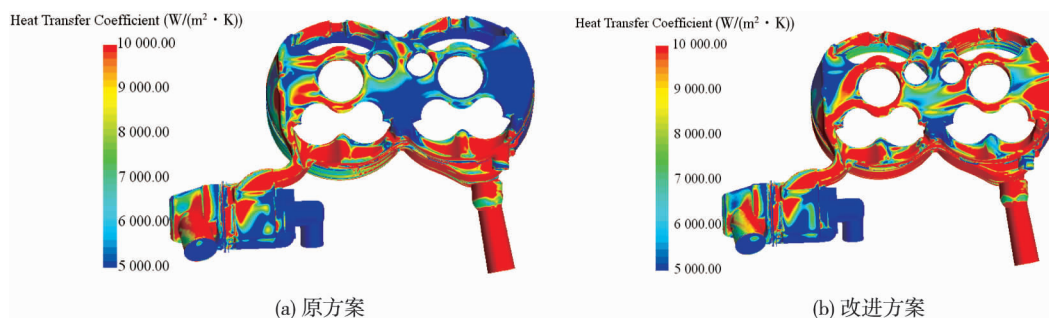


图 16 改进前后冷却水套换热系数分布

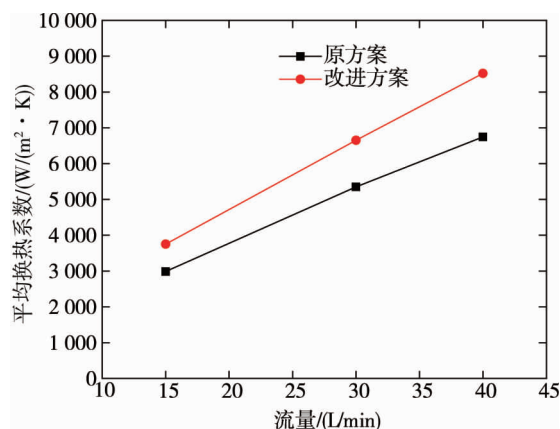


图 17 改进前后冷却水套壁面平均换热系数对比



## 4 试验验证

按照冷却水套改进方案制作样件,对改进前后冷却水套结构状态的发动机进行试验测试,主要采集不同转速工况下发动机火花塞垫片处的温度,以验证改进后冷却水套的有效性.图 18 为冷却水套结构改进前后发动机的试验结果对比.由图 18 可以看出:原方案冷却水套的左缸温度低于右缸温度,改进方案冷却水套的左缸温度也低于右缸温度,两者的变化趋势一致,冷却水套结构改进后的缸温与原方案相比明显降低,表明冷却水套结构改进后发动机的散热效果提升明显.

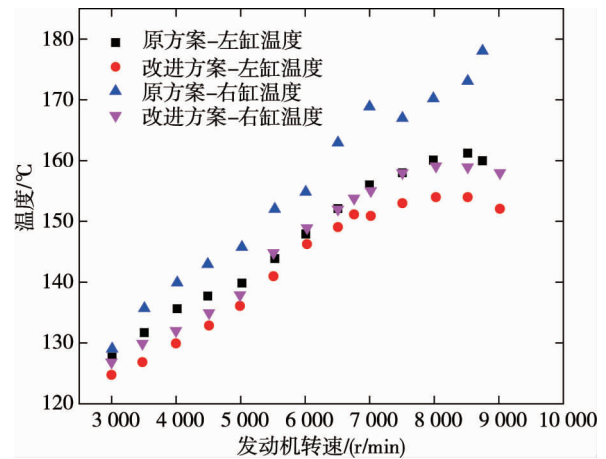


图 18 冷却水套结构改进前后发动机缸温试验结果对比

## 5 结论

1) 原冷却水套的整体流动均匀性较差,各缸孔大小设计的缺陷导致流量分配不合理,造成左缸冷却效果好而右缸冷却效果差的两缸冷却不均匀现象,右缸大部分区域的换热系数低于  $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

2) 基于缸孔流动路径、缸孔流量分配及高温区域重点关注、两缸冷却均匀性等综合评估分析,提出了缸孔布局的改进方案.缸孔布局改进后的冷却水套流场得到了非常明显的改善,两缸排气侧及鼻梁区高温区域冷却液的流速大,利于高温区域的冷却,且两缸的冷却均匀性得到明显改善,改进后右缸大部分区域的换热系数高于  $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

3) 冷却水套结构改进方案的压降增大,对冷却系统的流量略有影响,可通过系统匹配提升冷却系统的冷却量,保证冷却效果.改进后冷却水套壁面的平均换热系数提升得非常明显,基于流动路径及流量分配合理性来设计缸孔布局的方法经证实是有效可行的,研究结果可为冷却水套的优化设计提供方法指导和仿真数据支撑.

## 参考文献:

- [1] 卢瑞军,王文坤,陈海兰,等.发动机冷却水套的优化设计及分析[J].机械设计与制造,2018,2018(s2):134-136.
- [2] 张露,贾月梅,张伟.发动机缸体冷却水套的 CFD 分析与优化设计[J].交通科学与工程,2011,27(2):63-68.
- [3] 汪啸寒,王洪荣.基于数据库的某农用柴油机冷却水套 CFD 分析及优化[J].汽车工程学报,2016,6(2):125-130.
- [4] 钟翔波,朱三平,朱茂强.增压汽油机水套流场结构分析及优化[J].内燃机,2018(2):57-62.
- [5] E J Q, Zhang Z Q, Tu Z F, et al. Effect analysis on flow and boiling heat transfer performance of cooling water-jacket of bearing in the gasoline engine turbocharger[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130:754-766.
- [6] Chen X, Yu X, Lu Y, et al. Study of different cooling structures on the thermal status of an Internal Combustion Engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116:419-432.
- [7] 刘云卿,杨陈,沈源,等.汽油机水套的 CFD 优化分析[J].小型内燃机与摩托车,2013,42(3):23-26.
- [8] 周芸梦,曹贝贝,刘功晓.基于 STARCCM+的某型柴油机缸盖水套优化分析[J].内燃机与配件,2019(19):4-5.
- [9] Zhang C, Uddin M, Robinson C, et al. Full vehicle CFD investigations on the influence of front-end configuration on radiator performance and coolingdrag[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,130:1328-1340.
- [10] 邓鹏杰,崔红社,王洪乾,等.光伏电池板强制循环冷却技术的数值研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(1):66-70.
- [11] 王帝,杜镔,李春玲,等.某小排量欧 6 增压柴油机冷却水套 CFD 分析及设计优化[J].汽车与新动力,2018,1(2):76-79.
- [12] 谭礼斌,袁越锦,赵哲,等.基于 CFD 的发动机冷却水套共轭传热分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(11):87-93.
- [13] 白敏丽,吕继祖,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):525-531.
- [14] 赵伟.柴油机冷却液流动及流固耦合传热分析[D].太原:中北大学,2011.
- [15] 雷基林,申立中,陈志娥,等.卧式柴油机冷却水套结构优化与流动特性分析[J].农业机械学报,2011,42(11):19-26.