

DOI: 10.3901/JME.2008.10.162

发动机冷却系统中流动与传热问题数值模拟进展*

于秀敏¹ 陈海波¹ 黄海珍¹ 陈群² 高莹¹

(1. 吉林大学汽车工程学院 长春 130022;

2. 中国第一汽车集团公司技术中心 长春 130011)

摘要: 着重论述利用数值模拟技术研究发动机冷却系统中流动与传热问题的发展现状, 包括水套单相流及气液两相流流动、流-固耦合传热、一维与三维联合模拟等该研究领域的热点内容。耦合系统之间联合分析的方法准确反映了发动机各部件之间的影响关系, 这种分析方法是目前研究的重点, 但其中仍存在问题。基于此状况提出改进办法: 针对不同工况选用循环平均参数作为燃气侧传热边界条件; 水套进出口的流动边界条件, 在稳态工况下设为定值, 在过渡工况下通过循环一维仿真计算确定; 应采用整体耦合方法进行计算, 计算模型应尽量完整, 但可以进行适当的简化, 并总结出模型简化的原则。

关键词: 发动机冷却系统 流动 传热 数值模拟

中图分类号: TK402

Development of Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer in Internal Combustion Engine Cooling System

YU Xiumin¹ CHEN Haibo¹ HUANG Haizhen¹ CHEN Qun² GAO Ying¹

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022;

2. R&D Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011)

Abstract: The development of research on flow and heat transfer in internal combustion engine cooling system using numerical simulation technology is summarized, including the popular investigations on single phase and gas-fluid two phase flow in water jacket, fluid-solid coupled heat transfer, 1D and 3D co-simulation, etc. Among these investigations, the coupled systems co-simulation accurately reflects the influence relations among internal combustion engine parts. These influence relations are research emphasis at present, however some problems still exist therein. On the basis of this situation, the improvement methods are put forward. In view of different working conditions, circulation average parameters are used as the heat transfer boundary condition of combustion side. The flow boundary condition of water jacket inlet and outlet is set as a fixed value under steady working condition, or it is determined through circulation 1D simulation calculation under transit working condition. For the calculation, integral coupling method should be used, and the calculation model should be complete as far as possible, but it may be simplified appropriately. The principle of the model simplification is summarized.

Key words: Internal combustion engine cooling system Flow Heat transfer Numerical simulation

0 前言

发动机内部结构复杂, 热负荷及热应力较大, 随着现代发动机强化程度越来越高, 零部件工作环境越来越恶劣, 导致发动机缸盖热裂、活塞烧顶等冷却不足问题。而结构合理性能优越的冷却系统能够减小热应力, 降低磨损和热变形, 防止发动机部件损坏, 提高发动机零部件的使用寿命、发动机功率及燃油的经济性。此外, 日益严格地排放标准也

对冷却系统提出了新的要求。冷却系统工作性能的优劣, 直接影响着动力系统的整体性能, 因此对发动机冷却系统的研究需求也日益提高。

由于汽车发动机冷却水套结构复杂, 并且内部冷却液流动状态复杂, 难以用传统流体力学理论和试验方法来分析、测量。近年来, 随着计算流体力学和计算机技术的发展, 模拟计算越来越多的应用于工程设计与优化领域。数值模拟技术是一种基于计算机并行技术的模拟工具, 能够预测各种复杂的流动和传质现象, 并能够对计算结果进行可视化处理。发动机冷却系统中流动与传热现象的数值模拟是发动机设计的一个重要问题, 其结果的准确性和

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2006AA110107)。20071114 收到初稿, 20080611 收到修改稿

可靠性是令人满意的，而且可以节省大量的时间。但在计算模型的确立、计算方法的选择及边界条件的确定等方面还存在一些问题。本文主要针对目前发动机冷却系统中流动与传热问题数值模拟计算的发展现状及存在的问题进行分析，进而提出了改进方法。

1 流体流动问题的数值模拟

冷却水的流动状况不但影响高温零部件的热负荷及冷却效果，而且影响发动机的热量分配和能量利用。由于发动机冷却水套结构复杂，并且封闭在发动机体的内部，不易观察和测量，因此冷却水三维流动的数值模拟受到国内外研究人员的重视。

1.1 流动状态假定为两相流

发动机冷却系统的高温冷却技术能够充分利用冷却液沸腾传热的高换热性能，可以适度减少冷却液流量及冷却水腔的容积，从而降低燃油消耗率、减小发动机体积，而且有利于减小受热零部件内温度梯度，提高发动机受热零部件的可靠性。但是当沸腾情况由泡核沸腾转化为膜态沸腾时，各零部件内热负荷和热应力将急剧增高，此时这些零部件就面临着失效的危险。为较好地控制沸腾状况的发展，迫切须要改进发动机零部件现有的设计方法和分析方法，以使发动机结构更加合理，实现精确冷却的目的。

1997年 CAMPBELL 等^[1]对泡核沸腾及过渡沸腾状态的精确冷却方法进行分析和试验。结论表明发动机内部水路的当量直径是影响临界热流密度(Critical heat flow, CHF)的主要因素。POROT 等^[2]采用模拟计算与试验相结合的方法研究了柴油机在最大转速工况下的蒸发冷却问题，在保证发动机安全运行的前提下确定了冷却系统所需的最小冷却水流量。研究了该流量下冷却液入口温度对循环压力的影响。最后为了提高各缸流量的均匀性，对缸盖结构进行优化，并通过试验验证了优化的效果。2004年 BO^[3]考虑到当水腔内发生沸腾时，要准确的计算出气液两相的边界就需要划分出尺寸更小的网格结构，这就使模拟计算所需要的时间明显增加，而且由于受计算机硬件条件的限制，这种方法要应用在工程上还不太现实。于是他利用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)软件中的均匀混合流动模型模拟内燃机冷却系统中的泡核沸腾换热，在单相流 CFD 求解器中引入空穴率方程来描述气相的浓度，而过热壁面的换热、液体蒸发和凝结的传质由子模型描述。此方法的初步验证是通过已有文献中的试验数据验证的。预测的壁面热流和气

相浓度分布与试验数据较吻合。最后通过对一个存在局部沸腾的发动机冷却系统进行了 CFD 分析，示范了该方法的工程应用。

国内研究方面，2005年麦华志等^[4]介绍了两种适用于发动机冷却水传热计算的单相流沸腾模型：Chen 模型和 BDL 模型。2007年刘永等^[5]根据 BO^[3]的方法基于 VC++6.0 开发了适用于缸盖水腔沸腾传热计算的单相流模型，并将该模型作为子程序编译链接到 CFD 软件中。以车用道依茨 226B 型发动机气缸盖冷却水腔为研究对象，运用该模型对其水腔内冷却水进行了沸腾模拟计算，缸盖水腔 CFD 计算模型如图 1 所示，最终求解出冷却水腔内的沸腾传热和流动情况。

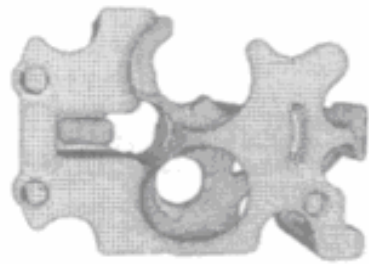


图 1 缸盖水腔 CFD 计算模型

1.2 流动状态假定为单相流

目前许多研究都是基于单相流假设的基础，因为这种假设可以使计算简化，而且精度也可以满足工程需求。这种研究方法在国外发展较快，应用较广。

2002年 MAKKAPATI 等^[6]利用 CFD 商业软件 FLUENT 分析了某 V8 发动机的水套，在计算过程中将发动机中的一列作为研究对象，计算模型中包括水泵和节温器，在计算换热系数分布时，MAKKAPATI 采用求解 N-S 方程和能量方程的方法，进而得到表面对流换热系数分布，最后利用热膜流速仪测量了多个位置处的冷却液流速。计算与试验结果相比平均流速结果相符，但是紊流强度结果比试验测量值低大约 50%，因此对于利用 FEM 方法预测金属温度的影响还需进一步研究。2003年 SHIH 等^[7]以及 2004年 YE 等^[8]通过 CFD 分析结果对发动机水套的结构进行了优化设计。结果表明，为了评价水套设计改进的效果，在 CFD 计算时设定流体边界条件为等温条件时，计算效率较高，优化设计的周期较短。通过 CFD 计算结果可以对发动机缸体、缸盖垫圈水孔及缸盖等部件参数进行优化，此项研究对冷却系统的优化设计提供了理论与试验依据。

国内也已有一些相关研究。2001年华中科技大学的屈盛官^[9]利用商业软件 Fire 对军用车辆发动机

水套进行了 CFD 分析。2003 年吉林大学的陈群^[10]应用 FLUENT 软件对 CA498 和 4DE3 型发动机水套进行 CFD 分析,根据流场计算结果和自编的 UDF 程序计算出传热系数分布,此结果可以为结构强度计算提供边界条件。2007 年吉林大学刘铁刚^[11]在对 CA498 水套流场进行计算时考虑了水泵的影响,对有泵与无泵情况下的计算结果进行了比较,最后对水套的结构进行了优化。

以上的研究中,在进行发动机水套 CFD 计算时,冷却水沿程的边界条件大多设定为绝热或等温,而这种假设与实际情况不符,为了使研究对象更加贴近实际情况,有必要将水套边界壁面上的温度信息反映到其上,而这些温度信息的获得必须通过详细的固体传热计算得到,流体与固体之间存在着相互影响,这就涉及到了流-固耦合问题。

2 流-固耦合问题的数值模拟

在车辆冷却散热的研究中,发动机受热零部件的冷却散热是研究的重点。实质上这些受热零部件与冷却水套互为边界,如果采用流-固耦合的方法,可将很难直接确定的流-固之间的边界转化为内部边界,这样就可以直接对流-固组成的系统进行耦合计算,得到水套和固体零部件的温度分布,为相应的水套设计和固体强度计算提供条件。

但是,发动机固体受热零部件之间又存在着相互影响,要想准确研究流-固耦合问题,必须先清楚受热零部件之间的换热关系,因此目前很多研究人员基于耦合传热理论和有限元法,对存在换热关系的零件系统进行耦合仿真计算。

2.1 发动机零部件的耦合传热

发动机零部件系统中活塞组-润滑油膜-气缸套之间的换热最为复杂,因此也是目前研究的热点问题。

2.1.1 轴对称活塞组-润滑油膜-气缸套模型

1987 年华中科技大学的陈国华等^[12]根据分区的方法,确定计算所需的边界条件,在处理润滑油膜时,将它与其他部件一起划分网格,然后计算得到耦合系统的温度分布。1994 年大连理工大学的白敏丽等^[13]在计算时认为由于活塞和气缸套的间隙非常小,因此在活塞和气缸套的接触部位只考虑润滑油膜的导热影响,而忽略其对流作用,这样做可以防止尺寸差异过大引起奇异性。随后在此研究工作的基础上又分别研究了耦合系统的循环瞬态和过

渡工况的传热问题^[14-15]。此类研究由于属于二维传热问题的范畴,因此该方法不能反映三维结构的复杂边界条件和结构信息。

2.1.2 三维活塞组-润滑油膜-气缸套模型

随着计算机技术及硬件的飞速发展,三维数值模拟计算已有条件进行。2003 年华中科技大学的杨万里等^[16]重点分析了移动零件-润滑油膜-零件系统的内部边界换热条件,建立了活塞组与缸套动接触传热模型。在循环瞬态三维传热理论和有限元离散理论的基础上,开发了内燃机零件系统过渡工况不稳定传热的有限元分析软件,利用该软件模拟了 CUB100 发动机燃烧室零件系统的启动工况传热过程。2004 年大连理工大学的丁铁新^[17]对发动机动接触部件耦合传热内外边界进行了分析,开发了内燃机燃烧室动接触部件耦合传热三维有限元仿真软件,并针对 6110 型柴油机活塞组-气缸套进行了计算,计算结果与试验测得的活塞特征点的温度值进行了比较,数据吻合较好。

以上的研究作为发动机流-固耦合传热研究奠定了基础。

2.2 流-固耦合传热

当在一个数值模拟中同时考虑多个物理场的相互关系时即可以称为耦合模拟。根据其性质可以分为顺序耦合和直接耦合(也称为整体耦合)。目前关于发动机冷却系统的流-固耦合研究如下。

2.2.1 顺序耦合

2005 年白敏丽等^[18]将活塞组-润滑油膜-气缸套、冷却介质作为一个耦合体,采用顺序耦合的方法对整个系统进行数值模拟。气缸套外壁的温度场由活塞组-润滑油膜-气缸套耦合系统的传热有限元分析软件计算得出,以此作为冷却水路的热边界条件,利用 STAR-CD 软件模拟得出了直列六缸柴油机冷却水套的速度、压力和换热系数分布。但是,如果考虑到气缸套外壁的温度既受到燃气及活塞组-润滑油膜-气缸套换热的影响,又受到冷却水流动换热的影响,那么整体耦合方法显然更加适用。

2.2.2 整体耦合

(1) 研究对象为多缸中的一缸(无缸盖)。2006 年浙江大学李婷^[19]的计算模型为六缸机中的一缸,对发动机缸体和冷却水套进行耦合传热分析。利用 GAMBIT 软件进行网格划分,得到的网格总数为 4.3×10^7 。利用 FLUENT 软件进行流-固耦合传热计

算, 得到了稳态传热问题的数值解。2006年浙江大学的李迎^[20]在计算时建立了活塞与气缸套的动接触传热模型, 另外还考虑了摩擦热的影响。利用 ANSYS 软件进行了周期性瞬态、变工况(冷启动、外特性、负荷特性)的传热数值仿真研究。但是, 由于冷却液在水套中的流动大都是顺序地流过各缸, 因此, 只拿其中的一缸作为研究对象会对计算结果产生较大的影响。

(2) 研究对象为多缸(无缸盖)。2005年重庆大学的苏培刚^[21]针对 Q475 发动机缸体的传热和强度进行了研究, 发动机缸体及水套有限元模型如图 2 所示, 他在计算时将缸套内表面在高度上划分 17 段, 每段确定的换热系数和平均温度均不同。求解初始化时自动施加无滑移边界条件。利用有限元软件 ANSYS-FLOTTRAN 软件对缸体、水套进行流-固耦合传热分析, 得到了水套的流场分布和水套、缸体的温度场分布。

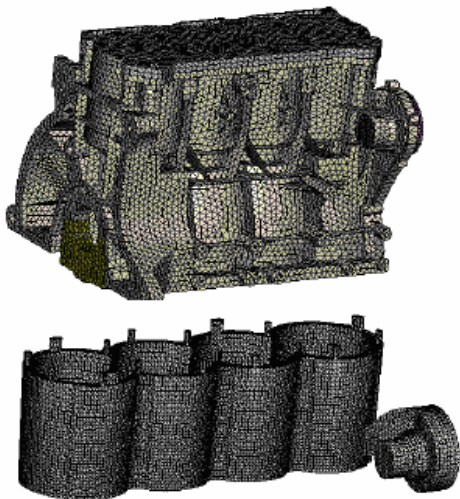


图2 发动机缸体及水套有限元模型

(3) 研究对象为气缸盖。2006年北京理工大学的肖翀等^[22]以某 V6 高速大功率柴油机为研究对象, 进行了流-固直接耦合传热的计算模拟。并且在此结果的基础上, 通过单元转换进一步实现了热、固直接耦合分析, 从而使缸盖流场、温度场、应力场分析在单一计算模型中得以实现。他的计算模型在冷却水道的设计上采用了各缸相对独立、互不联通的设计方法, 也就是通过机体顶端的上水孔流出的冷却水流并行地进入气缸盖各缸的水腔内, 气缸盖各缸水腔结构完全相同。因此, 可用单缸模型作为研究对象, 缸盖和水套的计算模型如图 3 所示。利用 ANSYS-FLOTTRAN 模块求解, 得到缸盖和缸盖水套温度分布及水套流体速度分布。

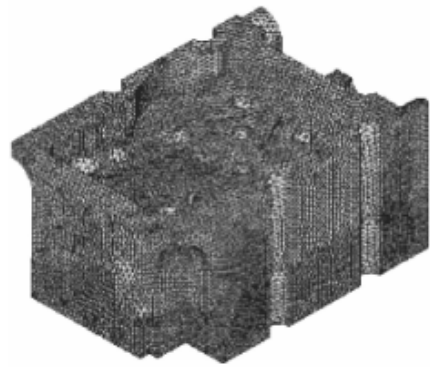


图3 缸盖和水套的计算模型

3 一维与三维联合模拟

系统仿真着眼于全局, 重点研究系统中各部件的相互配合和相互影响。目前有很多成熟的商业软件可以进行冷却系统仿真计算, 这给工程技术人员和科研人员带来了很大的方便, 如密执安科技大学的 E-VECSS 软件, 法国 IMAGINE 公司的 AMESim 软件、英国 Flowmaster International 公司的 Flowmaster 软件和美国 Gamma Technologies 公司的 GT-COOL 软件等。这些软件都是基于一维技术的仿真, 他们的特点是对计算机硬件要求不高、计算速度快、使用方便, 但是得不到想要局部细节, 而三维模拟的特点恰好与之相反。如果能够使两者结合在一起, 则能够提高模拟的效率。

2006年 WATANABE 等^[23]对联合模拟进行了尝试, 他们利用 3-D 软件 SC/Tetra、一维软件 Flowmaster 及联合模拟的接口软件 CFDLink 对某四缸发动机的水套流场进行了模拟, 其中 CFDLink 软件能够对一维和三维之间交换的数据进行自动处理, 与手动处理数据相比工作量大大降低了。计算结果与试验测得的水套流场及单纯进行三维模拟的结果比较, 联合模拟比单纯的三维模拟精度更高。这项研究是对早先人们提出的联合模拟设想在发动机水套研究中的一次实践, 但关于该系统传热问题的联合模拟还有待进一步研究。

4 目前研究存在的问题和解决办法

由于发动机冷却系统与缸内燃烧及固体部件存在着较强的耦合作用, 因此关于水套的单纯流动模拟研究已经不能满足需求, 耦合系统之间的联合分析已经成为研究的热点, 但仍存在以下几个问题。

(1) 换热边界条件问题。气缸壁的换热量受到燃气对流辐射换热、活塞润滑油膜换热及摩擦热的

影响, 目前的研究对于模型的燃气侧的条件确定大都采用经验公式或一维软件计算确定, 若能采用三维软件计算确定边界条件, 计算结果精度会得到进一步提高。

(2) 流动边界条件问题。目前研究中大多情况下均是给定水套的进出口流动状态, 这种边界条件比较适合稳定工况的研究, 但是对于变工况的条件下, 该计算条件势必会对结果带来较大的误差。

(3) 耦合方法问题。燃气—缸体—水套之间换热的影响存在一定的非线性特征, 采用整体耦合方法更适用研究此问题, 而目前的研究多基于顺序耦合的方法。

(4) 计算模型的问题。由于冷却液在水套中的流动大都是顺序地流过各缸, 并且沿程通过垫圈水孔流入缸盖水套, 因此, 只拿多缸中的一缸且无缸盖的计算模型作为研究对象会对计算结果产生较大的影响。

以上存在的问题必将会随着计算机硬件能力的提高和人们研究的深入进行从根本上逐一解决的。针对目前的研究条件可以提出以下解决方案。

(1) 目前许多三维商业软件可以模拟发动机缸内循环的工作过程, 得到的燃气温度、压力及换热系数是随空间位置和曲轴转角的变化而变化的, 以这样庞大的数据作为计算模型的边界条件显得过于复杂。可以对数据进行如下处理: 考虑到燃烧室表面层的周期性温度波动深度一般在 2.0 mm 左右, 如果只想得到发动机部件和冷却水套的总体温度分布, 那么此表层内的温度变化细节可以忽略, 因此可以采用循环的平均参数作为传热计算的边界条件。

(2) 在研究稳态工况下模型的传热问题时, 水套的进出口流动边界条件可以设为定值, 而在研究过渡工况下此问题时, 水套的流动边界条件应该通过冷却系统循环的一维仿真计算得到。

(3) 耦合方法建议采用整体耦合, 目前的许多商业软件也可以完成这样的耦合计算, 但是这种方法计算量较大, 收敛时间长, 因此要视计算机的计算能力而定。

(4) 考虑到冷却水在发动机内部的流动路线, 建议计算模型尽量完整, 但是模型可以进行适当的简化, 如略去缸体内部小于 5 mm 的细小油道孔和螺栓孔, 其余螺孔用圆孔代替, 忽略刚体上的铸造圆角; 另外因为金属的导热系数较大, 金属部件内部的温度梯度较小, 这样机体处网格可以化分得大些, 但是冷却水套的模型应该尽量详细, 网格划分细些, 流—固边界网格也应适当加密, 从而更加准

确地计算梯度变化对流动造成的影响。

5 结 论

(1) 冷却系统是发动机及车辆总成的一个重要的分系统, 而发动机水套的传热量是其散热的主要部分, 科学合理的水套设计可以使发动机在各种不同环境温度和运转工况下具有最佳的热状态, 同时具有良好的动力性、经济性和可靠性, 因此对冷却系统的研究显得越来越重要。

(2) 数值计算时应针对不同工况选用循环平均参数作为燃气侧传热边界条件; 冷却水套进出口的流动边界条件, 在稳态工况下应设为定值, 在过渡工况下应通过循环一维仿真计算确定; 计算模型应尽量完整, 但可以进行适当的简化。

(3) 冷却系统是一个复杂的耦合体, 其流动、传热过程与发动机整体各物理场相互耦合在一起, 因此采用整体耦合方法对其进行模拟研究将是未来发展的必然趋势。

参 考 文 献

- [1] CAMPBELL N A F, TILLEY D G, MACGREGOR S A, et al. Incorporating nucleate boiling in a precision cooling strategy for combustion engines[G]. SAE Paper 971791.
- [2] POROT P A, MÉNÉGAZZI P, AP N S. Understanding and improving evaporative engine cooling at high load, high speed by engine tests and 3D calculations[G]. SAE Paper 971792.
- [3] BO Tao. CFD homogeneous mixing flow modeling to simulate subcooled nucleate boiling flow[G]. SAE Paper 2004-01-1512.
- [4] 麦华志, 李国祥. 缸盖冷却水的单相沸腾模型[J]. 山东内燃机, 2005 (2): 8-11.
MAI Huazhi, LI Guoxiang. Single-phase boiling flow models of cylinder head coolant flow[J]. Shandong IC Engine, 2005 (2): 8-11.
- [5] 刘永, 李国祥. 缸盖水腔表面温度场的确定[J]. 内燃机与动力装置, 2007 (1): 18-21.
LIU Yong, LI Guoxiang. Determination of temperature field for cooling water jacket wall in cylinder head[J]. IC Engine and Powerplant, 2007 (1): 18-21.
- [6] MAKKAPATI Sathesh, POE Steve, SHAIKH Zafar, et al. Coolant velocity correlations in an IC engine coolant jacket[G]. SAE Paper 2002-01-1203.
- [7] SHIH Stephen, ITANO Edwin, XIN Jun. Engine knock toughness improvement through water jacket optimization

- [G]. SAE Paper 2003-01-3259.
- [8] YE Jian, COVEY Jim, AGNEW Daniel D. Coolant flow optimization in a racing cylinder block and head using CFD analysis and testing[G]. SAE Paper 2004-01-3542.
- [9] 屈盛官. 高强度大功率车用发动机冷却水流动的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
QU Shengguan. A study on cooling-water flow for vehicle engine with highly-intensified heavy duty[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001.
- [10] 陈群. 车用柴油机冷却水套的计算流体力学分析[D]. 长春: 吉林大学, 2003.
CHEN Qun. Computational fluid dynamics analysis on the automotive diesel engine water jacket[D]. Changchun: Jilin University, 2003.
- [11] 刘铁刚. 柴油机冷却水套模拟分析及结构优化[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
LIU Tiegang. Numerical simulation and optimization of structure of water jacket of diesel engine[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [12] 陈国华, 海伍德 J B. 燃烧室偶合系统不稳定传热的数值分析[J]. 华中工学院学报, 1987, 15(4): 25-32.
CHEN Guohua, HEYWOOD J B. Numerical analysis of unsteady heat transfer in coupling system of combustion chamber[J]. Journal of Huazhong Technical Institute, 1987, 15(4): 25-32.
- [13] 白敏丽, 蒋惠强, 陈家骅. 发动机活塞组一缸套整体耦合系统瞬态温度场数值模拟[J]. 小型内燃机, 1994, 22(4): 12-17.
BAI Minli, JIANG Huiqiang, CHEN Jiahua. Numerical simulation on temperature field of IC engine piston set-cylinder liner coupled system under transient condition[J]. Small Internal Combustion Engine, 1994, 22(4): 12-17.
- [14] 白敏丽, 沈胜强, 陈家骅, 等. 燃烧室部件耦合系统循环瞬态传热模型的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(1): 100-103.
BAI Minli, SHEN Shengqiang, CHEN Jiahua, et al. Research on heat transfer model of combustion chamber components coupled system under circulation transient condition[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(1): 100-103.
- [15] 白敏丽, 沈胜强, 陈家骅, 等. 燃烧室部件耦合系统过渡工况传热全仿真模拟研究[J]. 内燃机学报, 2001, 19(3): 229-234.
BAI Minli, SHEN Shengqiang, CHEN Jiahua, et al. Heat transfer simulation of combustion chamber components coupled system under transient condition[J]. Transactions of CSICE, 2001, 19(3): 229-234.
- [16] 杨万里, 陈国华, 陈燕, 等. 内燃机燃烧室耦合零件系统过渡工况的传热模拟[J]. 内燃机学报, 2003, 21(2): 161-166.
YANG Wanli, CHEN Guohua, CHEN Yan, et al. Study on heat transfer of coupling 3-D component system in combustion chamber under transient operating conditions [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(2): 161-166.
- [17] 丁铁新. 内燃机燃烧室动接触部件耦合传热仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
DING Tiexin. Simulation on coupled heat transfer of sliding-contact component in combustion chamber[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [18] 白敏丽, 丁铁新, 吕继组. 活塞组一缸套耦合传热模拟[J]. 内燃机学报, 2005, 23(2): 168-175.
BAI Minli, DING Tiexin, LV Jizu. Simulation study on coupled heat transfer for piston set-cylinder liner[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(2): 168-175.
- [19] 李婷. 发动机耦合系统中稳态固流耦合传热问题的数值仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LI Ting. Numerical simulation on solid-fluid coupled heat transfer in IC engine coupling system under constant condition[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [20] 李迎. 内燃机流固耦合传热问题数值仿真与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LI Ying. Simulation and application of solid-liquid coupled heat transfer in IC engines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [21] 苏培刚. Q475发动机缸体的传热和强度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
SU Peigang. A study on the heat transfer and the intensity of Q475 engine body[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [22] 肖翀, 左正兴, 覃文洁, 等. 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.
XIAO Chong, ZUO Zhengxing, QIN Wenjie, et al. Coupling field analysis and application for cylinder head of diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2006(4): 26-29.
- [23] WATANABE Norihiko, KUBO Masahiko, YOMODA Nobuyuki. An 1D-3D integrating numerical simulation for engine cooling problem[G]. SAE Paper 2006-01-1603.

作者简介: 于秀敏, 男, 1960年出生, 教授, 博士研究生导师。研究方向为内燃机电子控制、热力设备传热仿真等。

E-mail: yuxiumin@sohu.com

陈海波, 女, 1976年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为热力设备传热仿真。

E-mail: chenhb@jlu.edu.cn