

文章编号:1000-8055(2011)01-0042-06

小型航空二冲程风冷发动机缸体流固耦合传热的仿真

唐梓杰, 丁水汀, 杜发荣

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以某小型航空二冲程风冷发动机为研究对象, 结合风冷发动机缸体的传热特点和汽油机的燃烧规律并基于流固耦合理论, 对风冷发动机缸体传热进行了模拟计算. 根据耦合传热理论, 将缸体与缸套的导热转化为系统内部边界条件进行简化处理, 并将模拟计算的结果与地面试验结果相比较, 证明了耦合传热方法在研究缸体热负荷方面的可靠性. 在考虑飞行器整个飞行包线下的外界大气环境下, 对风冷发动机在整个工作高度范围内缸体的传热仿真进行了模拟计算, 为发动机缸体传热的进一步研究开发奠定了基础.

关 键 词: 二冲程; 风冷发动机; 流固耦合; 传热; 缸体

中图分类号: V231.71

文献标识码: A

Simulation of fluid-solid coupled heat transfer of cylinder of a small two-stroke air-cooled aero-engine

TANG Zi-jie, DING Shui-ting, DU Fa-rong

(School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on a small two-stroke air-cooled aero-engine, the heat transfer of cylinder for air-cooled engine was simulated according to the theory of the fluid-solid coupled heat transfer, in combination with characteristics of heat transfer and discipline of combustion. In this theory, the heat conduction between the cylinder and cylinder liner was considered as internal condition of the system, which can make the simulation simple and convenient; as compared with the experiment result; this shows that coupled analysis is reliable about the heat transfer of the cylinder. Considering the whole working condition of the aerial vehicle, the heat transfer of the cylinder within the working altitude was simulated, thus establishing a basis for further study of the cylinder heat transfer.

Key words: two-stroke; air-cooled engine; fluid-solid coupled; heat transfer; cylinder

随着无人机应用范围的扩展, 对无人机发动机性能的要求也越来越高, 对于小型航空用活塞式发动机, 要求具有体积小、升功率高、结构简单、使用维护方便等特性. 风冷发动机由于其结构简单, 散热系统质量较低以及使用维护方便的特点

得到了广泛的应用. 风冷发动机是以空气做冷却介质, 与水冷发动机相比, 水冷发动机气缸外壁向冷却水传热系数比风冷发动机气缸外壁向空气的传热系数大 40 倍左右, 这就使得风冷发动机一些受热零件的温度较高. 由于风冷发动机的缸体散

收稿日期: 2010-05-07; 修订日期: 2010-10-12

作者简介: 唐梓杰(1981—), 男, 四川中江人, 博士生, 研究方向为小型航空二冲程活塞发动机设计. E-mail: tzjgyj@gmail.com

热片是环绕缸体四周布置,因此热量的分布在迎风面和背风面有很大的差别,而缸体热负荷的水平又直接影响到发动机的性能水平以及工作可靠性,所以,对于风冷活塞发动机,分析研究缸体的热负荷就显得十分必要^[1-4]。

随着数值模拟技术和计算机技术的发展,Morel 提出的全仿真模拟思想可以得到部分应用,可以在一定程度上实现流体与固体之间的流动和传热仿真。

流固耦合的指导思想是对于复杂的含有流体与固体的研究对象,只考虑这个系统的外部边界条件,而将系统内各部分的相互作用作为内在的边界条件进行研究。这样分析的好处是一方面提高了模拟仿真的精确程度,同时另一方面可以简化计算工作^[5-7]。

1 模型的建立

1.1 几何模型

以某双缸对置风冷发动机的缸体为例,建立缸体和缸套的三维几何模型,如图 1 所示。

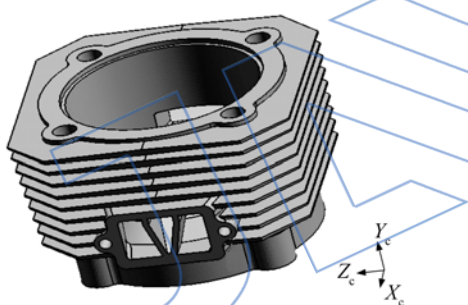


图 1 缸体的三维模型

Fig. 1 Three-dimensional (3-D) model of engine block

1.2 有限元模型

对三维几何模型进行有限元网格划分,如图 2 所示。

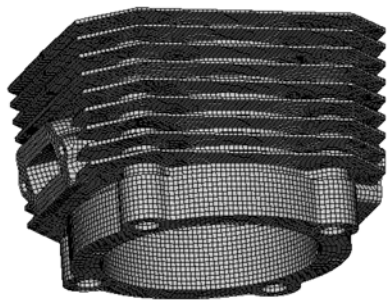


图 2 缸体的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of engine block

耦合分析中各零件材料特性如表 1 所示。

表 1 零件的材料特性

Table 1 Material property of parts

名称	材料	导热系数/ (W/(m·K))	密度/ (kg/m ³)	质量热容/ (J/(kg·K))
缸套	硼铸铁	45	7 500	420
缸体	铸铝	230	2 700	880

2 传热边界条件

2.1 燃气侧热边界条件

对于燃气与缸套边界条件采用对流换热边界条件,不考虑辐射的影响。国内外对于燃烧室内辐射传热还处在研究阶段,而将对流换热与辐射传热相结合来研究燃烧室传热实现起来还有一定的难度,同时也还没有一个确定可行的方法。但通过已经发表的众多研究发动机缸内耦合传热的资料来看,单独考虑对流换热的模拟计算已经和试验数据非常接近,可以起到指导设计研究的作用^[8-13]。

直接与燃气接触的缸套壁面边界条件采用商业软件仿真计算,采用零维燃烧模型。零维燃烧模型是将燃烧过程假设为瞬态的均匀过程,假设研究对象的场函数与空间无关,它无法描述喷雾、油滴蒸发、混合、卷吸及工质运动等重要物理过程以及非均匀温度场对有害排放产物的影响,但对于本文中所涉及到的研究分析还是较为准确的^[14]。

利用 Woschni 公式,可得到缸内瞬时燃气温度和瞬时传热系数,由于数值仿真中需要的是燃气循环平均温度 T_m 和传热系数 α_m ,经公式(1)和(2)计算后施加在缸套内表面^[15]。

$$T_m = \frac{\int_0^{360} \alpha T d\varphi}{\int_0^{360} \alpha d\varphi} \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{\int_0^{360} \alpha d\varphi}{360} \quad (2)$$

发动机缸体内表面稳态传热边界条件轴向高度上有如下分布规律^[16]:

$$\alpha_m(H) = \alpha_m(0) \cdot (1 + k_1 \beta) \cdot e^{-\sqrt{\beta}} \quad (3)$$

$$T_{res}(H) = T_{res}(0) \cdot (1 + k_2) \cdot e^{-\sqrt{\beta}} \quad (4)$$

式中 $\beta = H/S$; $0 \leq \beta \leq 1$; $k_1 = 0.537 (S/D)^{0.24}$; $k_2 = 1.45 k_1$; H 为距缸体顶端的距离; $\alpha_m(0)$ 为发

动机工作循环中燃气的平均传热系数 h , $T_{\text{res}}(0)$ 为发动机工作循环中燃气的平均温度 $t_{\text{g,m}}^*$.

根据式(3)、式(4),可以求得在最大功率转速条件下,缸体内缸套各高度的燃气平均温度和平均传热系数,将缸套内壁表面在高度上划分为 7 段,每段内燃气的平均传热系数和平均温度如表 2 所示.

表 2 缸内燃气平均传热系数和平均温度
Table 2 Average heat transfer coefficient and average temperature of cylinder

位置编号	平均传热系数/ (W/(m ² · K))	燃气平均 温度/K
1	300	1728
2	275	1456
3	258	1235
4	225	1120
5	195	963
6	176	762
7	152	503

2.2 冷却空气边界

散热片与空气之间的传热系数 α_f 的计算与散热片间的风速紧密相关,由于各散热片槽内风速均不相同,表征流动特性的雷诺数 Re 也就不同,因而各散热片槽内的冷却空气可分别处于层流、湍流和过渡流动状态. 对这三种流动状态应分别选取与其相适应的公式,以计算散热片传热系数^[17-18].

层流状态 ($Re < 2200$)

$$\alpha_f = 1.86 \frac{\lambda_f}{d_e} Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \left[\frac{d_e}{L} \right]^{\frac{1}{3}} \epsilon_T \epsilon_R \quad (5)$$

过渡流动状态 ($Re = 2200 \sim 10000$)

$$\alpha_f = 0.116 \frac{\lambda_f}{d_e} [Re^{\frac{2}{3}} - 125] Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{d_e}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \epsilon_T \epsilon_R \quad (6)$$

湍流状态 ($Re > 10000$)

$$\alpha_f = 0.023 \frac{\lambda_f}{d_e} Re^{0.8} Pr^{0.4} \epsilon_L \epsilon_T \epsilon_R \quad (7)$$

雷诺数 $Re = \frac{V_f d_e}{\nu_f}$; 弯管修正系数 $\epsilon_R = 1 +$

$1.77 \frac{d_e}{R}$; 温度修正系数 $\epsilon_T = \left[\frac{T_f}{T_w} \right]^{0.3}$; 流道长度

修正系数 ϵ_L , 取值为 1.13. 其中, d_e 为散热片槽当量直径, $d_e = 4F/U_f$, F 为散热片间通道截面, U_f 为通道截面周边长, ν_f 为空气运动黏度, $\nu_f = \eta/\rho$, η 为空气的动力黏度, 取 $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, ρ 为空气的密度, 取 1.235 kg/m^3 , λ_f 为空气的导热系数, 取 $0.02477 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, Pr 为普朗特数, L 为空气流道长度, V_f 为通过散热片的空气平均速度.

缸体外采用经验公式求得,即先求出散热片间空气流速然后计算得到表面传热系数. 各散热片间的空气流速利用流体计算软件对冷却来流流场进行模拟,流场几何模型如图 3 所示.

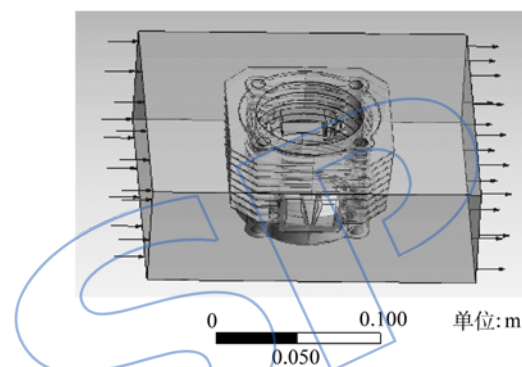


图 3 缸体的外部边界

Fig. 3 External condition of engine block

入口采用速度边界,由螺旋桨转速求得入口速度;出口边界定义为出口与环境压力差为 0. 各散热片间流场流速分布如图 4 所示.

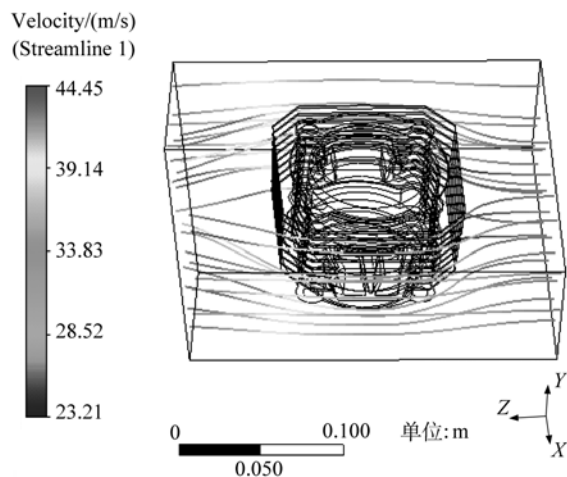


图 4 缸体的外部速度边界

Fig. 4 External velocity condition of engine block

根据式(5)~(7)求得 7500 r/min 转速下迎、背风面表面传热系数,见表 3,散热片号码为从缸顶散热片开始计数.

表 3 迎、背风面表面传热系数

Table 3 Heat transfer coefficient of windward and leeward

翅片编号	迎风面表面传热 系数/(W/(m ² ·K))	背风面表面传热 系数/(W/(m ² ·K))
1	250	110
2	260	102
3	270	95
4	275	90
5	280	80
6	270	90
7	260	100
8	255	105
9	251	110

3 数值仿真结果及试验验证

3.1 数值仿真结果及分析

将上述流固耦合系统的缸体材料特性和边界条件施加到有限元模型上,为了与试验数据相比较,大气环境采用海平面的大气状态,计算后得到风冷发动机在地面及低空巡航工作状态下的温度场,如图 5 所示。

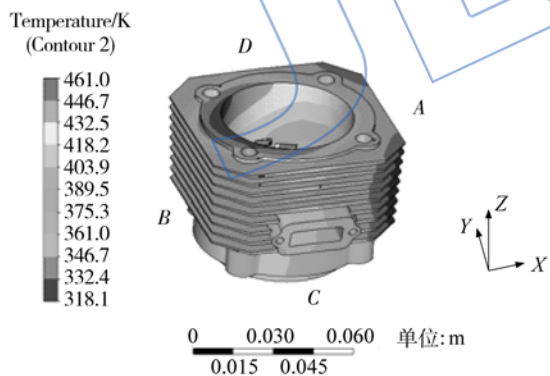


图 5 发动机缸体热负荷

Fig. 5 Thermal load of engine block

从上面的分析结果可以看出,在轴向方向,缸体的温度自上而下呈现递减的趋势,温度的最高点出现在缸体上方,这是因为当活塞运行到上止点处,此处与活塞以及缸盖共同形成燃烧室,是做功冲程中受到燃气冲刷最强烈的地方,而且在发动机的工作过程中,此处没有活塞往复运动的覆盖,受热最多。在径向上,缸体温度场的分布呈现两种态势。相对于 Z-X 平面,温度场的分布是对

称的,这是因为当冷却气流从 A 面流过 B 面,气流对 C, D 两个表面的冷却作用相同;相对于 Z-Y 平面,温度的分布呈现了非常大的差别,这是因为气流从 A 面吹来,对 A 面的冷却效果非常显著,而 B 面处于冷却效果最差的背风面,冷却气流在流经 A, C, D 面后本身气流温度已经升高,与缸体的温差减小,同时由于缸套外部形状的限制,冷却气流会在 B 面会产生冷却真空区,可以看到背风面缸体内部缸套处的温度在整个缸体的温度场分布中是最高的,所以对于缸体的热负荷的重点就是校核背风面的最高温度。

3.2 试验结果

试验机型与仿真机型相同,在缸体自上而下的第一道翅片与第二道翅片之间布置四个 K 型热电偶,分别布置在迎风面,背风面和缸体的两个侧面,每个热电偶相隔 90°。为了测温准确,在缸体测温点的位置打浅孔,将热电偶的头部测温点埋入,并用铝粉填实。当发动机稳定在巡航工作状态时,测量四个测点的温度,如表 4 所示。

表 4 四个测点的温度值

Table 4 Temperature of the four points

	A 面	B 面	C 面	D 面
测量温度/K	430	456	441	445

3.3 模拟计算与试验结构的对比分析

将每个测点的模拟计算值与测量值绘制在同一坐标图上,如图 6 所示。

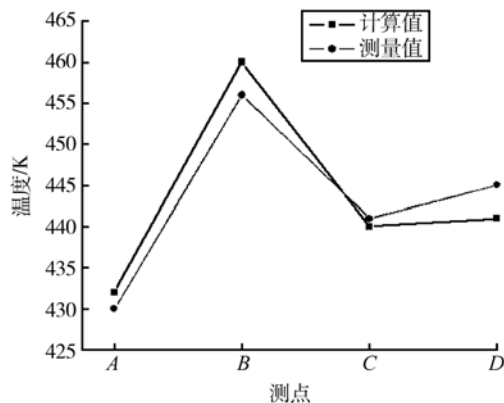


图 6 计算值与测量值的温度分布曲线

Fig. 6 Temperature distribution curve of the simulation and experiment

缸套外部温度的模拟计算值与试验测量值的最大偏差在 D 点,温度偏差为 6 K,在误差允许的范围内,可见模拟计算结果能够准确地表现出缸

套温度分布的趋势. 因此, 利用流固耦合的计算方法可以较为准确地模拟出风冷发动机缸套的热负荷水平.

4 缸体高空热负荷的模拟计算预测

航空发动机区别于普通发动机的特点之一在于工作环境的不同, 通常工作高度在海拔 3 000~4 000 m 的高空. 而随着海拔高度不同, 空气的温度和空气的密度也随之变化, 这对于发动机的散热也有着重要的影响. 因此要研究发动机缸体的热负荷水平, 就必须分析缸体在高空的热状态.

空气在不同海拔高度的性质可以由大气简表获得^[4], 标准大气简表如表 5 所示.

表 5 大气简表

Table 5 Atmosphere property of the different altitudes

海拔高度/ m	大气压/ 10^5 Pa	大气温度/ K	大气密度/ (kg/m^3)
0	1.01	288	1.225
1000	0.899	281.65	1.11
2000	0.75	275.15	1.006
3000	0.7	268.65	0.909
4000	0.62	262.15	0.81
5000	0.54	255.65	0.74

由标准大气简表可以看到, 随着海拔高度的增加, 空气的温度和密度都呈下降趋势. 在海拔 4 000 m 的高空, 大气温度比海平面低 26 K. 较低的大气温度可以增加缸体与大气的温度差, 有助于缸体的散热. 在 4 000 m 的高度, 大气的密度只有海平面的 66%, 在冷却风速一定的情况下, 大气密度的降低会导致冷却气体流量的降低, 从而会影响散热翅片的表面传热系数, 不利于缸体的散热. 因此, 有必要研究在大气环境温度和密度的综合影响下风冷发动机缸体散热的情况.

应用商业软件模拟计算出发动机在海拔高度为 0~4 000 m 时, 发动机最大输出功率的变化曲线, 如图 7.

根据发动机所配飞行器的工作高度, 选取 0~4 000 m 高度的大气环境参数作为冷却空气的条件, 仍然采用经过试验验证的流固耦合的计算方法, 得到在整个飞行高度下的发动机缸体的热负荷状态. 绘制缸体在不同海拔高度下迎风面与背风面的温度曲线, 如图 8 所示.

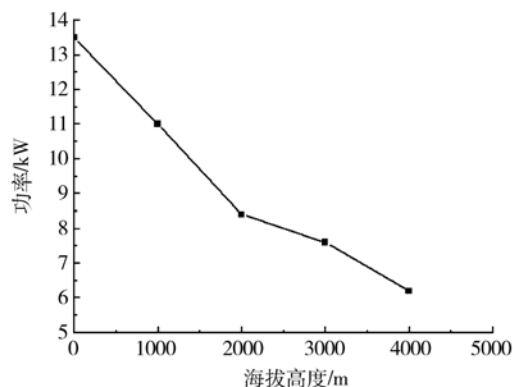


图 7 海拔高度对于功率输出影响的曲线

Fig. 7 Effect of altitude on power output

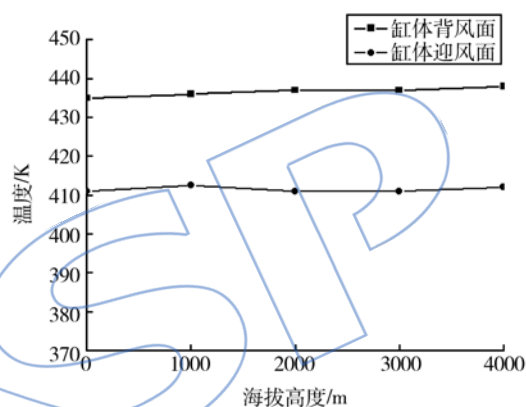


图 8 海拔高度对于冷却系统影响的曲线

Fig. 8 Effect of altitude on coolant system

背风面的温度决定了缸体的最高温度水平, 是整个缸体温度最高的部分, 而迎风面的温度是整个缸体温度最低的部分, 两者的差值表明了整个缸体的温度差. 对于样机所采用的这个缸体, 背风面温度满足设计要求.

5 结 论

对于风冷发动机的缸体, 采用流固耦合的研究方法能够准确地模拟出发动机的热负荷水平, 并且能较好地吻合试验结果. 缸体热负荷最大的地方在背风面, 原因是目前的缸体翅片形式, 冷却气流无法有效地流过背风面, 导致背风面的温度较高. 所以, 在分析缸体热负荷的时候, 应该以背风面的温度为最高工作温度来进行校核.

模拟计算表明, 大气环境随高度的变化对于缸体热负荷的影响不大, 但需进一步的高空试验来验证. 同时迎风面和背风面的温度差值变化范围也很小, 为高空试验的进行提供了良好的预测信息.

本研究只考虑了基于流固耦合理论下,缸内燃烧状况以及外部冷却条件对于缸体热负荷的影响,在确定传热系数时使用目前比较权威的传热系数确定方法,虽然也得到了较为合理的结果,但是仍需要探求更准确的计算方法以得到更准确的计算结果。

参考文献:

- [1] 秦有方. 车辆内燃机原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
- [2] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 荆晓东,徐寒清. 航空活塞发动机使用[J]. 中国科技信息, 2005(19A):77.
JING Xiaodong, XU Hanqing. Use of the aero piston engine[J]. China Science and Technology Information, 2005 (19A):77. (in Chinese)
- [4] 李卫东,赵廷渝. 航空活塞动力装置[M]. 成都:西南交通大学出版社,2004.
- [5] Morel T, Fort E, Blumberg P. Effect of insulation strategy and design parameters on diesel heat rejection and performance[R]. SAE Trans. 850506, 1985.
- [6] XIN Jun, Shih S, Itano E. Integration of 3D combustion simulation and conjugate heat transfer analysis to quantitatively evaluate component temperatures[R]. SAE Paper 2003-01-3128, 2003.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2004.
- [8] 陈红岩,李迎,俞小莉. 柴油机流固耦合系统稳态传热数值仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2):56-60.
CHEN Hongyan, LI Ying, YU Xiaoli. Numerical simulation study on steady heat transfer of fluid-solid coupled system in diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2):56-60. (in Chinese)
- [9] 赵宏国,白敏丽. 耦合法在柴油机传热研究中的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, 36(6):1-5.
ZHAO Hongguo, BAI Minli. Application of coupled methods on heat transfer of diesel engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2007, 36(6):1-5. (in Chinese)
- [10] 姜明. 基于 ANSYS 的内燃机活塞-缸套耦合系统的传热模拟[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(6):1437-1440.
- JIANG Ming. Simulation of coupled methods on heat transfer of internal combustion engine based on ANSYS [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(6): 1437-1440. (in Chinese)
- [11] 陈红岩,李迎,李孝禄. 柴油机流固耦合传热仿真研究[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(4):284-288.
CHEN Hongyan, LI Ying, LI Xiaolu. Simulation study on the fluid-solid coupled heat transfer of diesel engine[J]. Journal of China Jiliang University, 2006, 17(4):284-288. (in Chinese)
- [12] 李迎,俞小莉. 发动机冷却系统流固耦合稳态传热三维数值仿真[J]. 内燃机学报, 2007, 25(3):252-257.
LI Ying, YU Xiaoli. 3-D simulation of steady heat transfer of fluid-solid coupled system in engine coolant system[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(3):252-257. (in Chinese)
- [13] 赵立峰,李云清. 风冷航空发动机的活塞形状恢复研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10):2255-2259.
ZHAO Lifeng, LI Yunqing. Piston reshapes study for the air-cooled engine of aerial vehicle[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10):2255-2259. (in Chinese)
- [14] 钟春敏. 内燃机燃烧过程数学模拟的研究现状及其发展[J]. 科技与经济, 2004, 6(10):36-38.
ZHONG Chunmin. Research on mathematics simulation during the combustion for internal combustion engine[J]. Technology and Economy in Aeras of Communications, 2004, 6(10):36-38. (in Chinese)
- [15] Woshni G, Fieger J. Determination of local heat transfer coefficients at the piston of a high speed diesel engine by evaluation of measured temperature distribution[R]. SAE Paper 790834, 1979.
- [16] 俞小莉,郑飞,严兆大. 内燃机气缸体内表面稳态传热边界条件的研究[J]. 内燃机学报, 1987, 5(4):324-332.
YU Xiaoli, ZHENG Fei, YAN Zhaoda. Study on steady heat transfer condition of cylinder surface in internal combustion engine[J]. Transactions of CSICE, 1987, 5(4): 324-332. (in Chinese)
- [17] 郑飞,严兆大. 风冷柴油机的传热与热负荷[J]. 内燃机学报, 1985, 3(1):77-88.
ZHENG Fei, YAN Zhaoda. Study on heat transfer and heat duty of air-cooled engine[J]. Transactions of CSICE, 1985, 3(1):77-88. (in Chinese)
- [18] 朱访君,吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京:国防工业出版社,1997.