

柴油机缸盖循环瞬态温度场仿真计算分析

高春林¹, 吕建明², 欧阳光耀², 张 萍²

(1. 91287 部队装备修理监修室, 上海 200136; 2. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033)

摘 要: 为研究柴油机缸盖零件在一个工作循环内温度场即循环瞬态温度场的分布、变化规律, 应用有限元分析软件 ANSYS 对某柴油机气缸盖进行了循环瞬态温度场的仿真计算。结果显示: 柴油机在稳定工况运行时, 缸内燃气周期性热冲击造成缸盖底板壁面温度波动明显; 沿缸盖高度方向, 随着深度变大, 温度波动幅度迅速变小, 当深度为 2mm 时, 温度趋于平稳; 而缸盖外表面温度变化平稳, 无明显波动现象。

关键词: 柴油机; 气缸盖; 瞬态温度场; 有限元

中图分类号: TK423.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)05-0039-04

Cyclic Transient Temperature Field Numerical Simulation of Diesel Engine Cylinder Head

Gao Chunlin¹, Lv Jianming², OuYang Guangyao², Zhang Ping²

(1. No. 91287 Navy Equipment Repair Superintend Office, Shanghai 200136;

2. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, HubeiWuhan 430033)

Abstract: To study the distribution of cyclic transient temperature field of diesel engine cylinder head as well as its changing rules, finite element analysis software ANASYS was employed to carry out numerical simulations on a diesel engine's cylinder head. The results show that when the diesel engine runs in a steady condition, the temperature field of areas near cylinder head fire deck was obviously affected by the cyclic impact of burned gas. With the increase of the distance from fire deck wall, the swing of wall temperature in cylinder head will decrease rapidly. When the depth exceeds about 2mm, the swing went to placidity. In addition, the temperature in outer surface varied placidly and there was no obvious transient temperature variation.

Keywords: diesel engine; cylinder head; transient temperature field; finite element

0 引 言

在对柴油机气缸盖进行热负荷分析时, 大部分研究者都近似认为稳定工况下其温度为稳态, 即气缸盖任何部位的温度不随时间变化, 实际上这样往往不能完整准确地反映气缸盖温度场信息^[1]。图 1 给出了某型柴油机在额定工况, 对应转速为 1 500 r/min, 一个工作循环内缸内燃气温度随曲柄转角变化的曲线。由

图可见, 燃气温度在一个工作循环 0.08 s 内, 温度变化幅度达 1 500 K。在短暂时间里燃气温度的这种剧烈变化对燃烧室壁面造成了强烈的周期性热冲击作用, 在燃烧室燃气侧表面薄层内产生周期性的高频温度波动。研究表明: 这种波动是导致零件失效的一个重要原因^[2], 同时温度波动的深度影响零件温度检测中测温仪器的布置。因此本文以柴油机缸盖为例, 采用数值模拟方法研究柴油机缸盖零件在一个工作循环内温

度场即循环瞬态温度场的分布、变化规律。

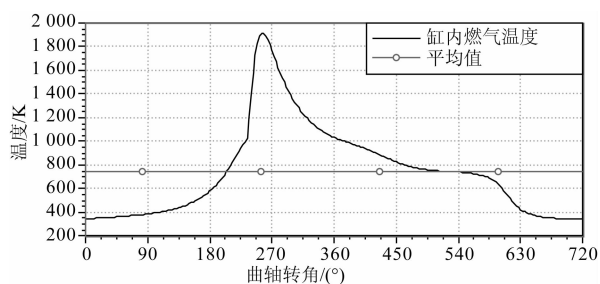


图 1 一个工作循环中缸内燃气温度随曲柄转角变化曲线

1 缸盖三维瞬态传热理论

瞬态导热是指温度场随时间变化的物体内部所进行的热传递过程。当物体考虑为三维时，对应的三维瞬态导热微分方程为：

$$\rho c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad (1)$$

式中， t 为物体温度； x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标分量； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为材料三向导热系数； q_v 为内热源强度； ρ 为材料密度； c_v 为定容比热。

缸盖在传热过程中，内部无内热源，则式(1)右边部分 $q_v = 0$ ，此时(1)式可简化为：

$$\rho c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (2)$$

在计算过程中，若采用第三类边界条件，则(2)式可写为：

$$\alpha(t - t_f) = \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} n_z \quad (3)$$

式中， α 为对流换热系数； t_f 为介质温度； n_x 、 n_y 、 n_z 为边界的外法线方向的方向余弦。

2 有限元计算模型

气缸盖是内燃机上最复杂的零部件之一，其外形不规则，而且本文分析所用的柴油机气缸盖采用水冷方式，内腔中有进、排气道和水套等。因此本文采用 Pro/Engineer 三维造型软件建立其三维模型，如图 2 所示。为确保计算精度，实体建模过程中没作过多简化，尽可能还原缸盖真实结构。采用 Hypermesh 软件划分网格，图 3 为其网格模型。考虑工作中缸盖底板是直接和缸内燃气接触的，燃气的热冲击作用涉及到缸盖底板一定范围的壁面，因此在网格划分过程中，在该型缸盖底板厚度 12.9 mm 范围内，选取了沿缸盖底面向上 12 mm 高度内进行网格细化处理，采用了六面体结构化网格，其余部分

自动划分为四面体网格。

缸盖材料为铜铬合金铸铁，材料的物性根据 HT300CuCr 材料物性来设置，其中比热容为 532 J/(kg·K)，导热系数为 58 W/(m·K)，密度为 7 000 kg/m³。

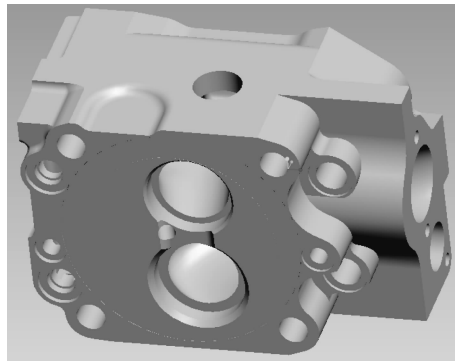


图 2 缸盖三维实体模型

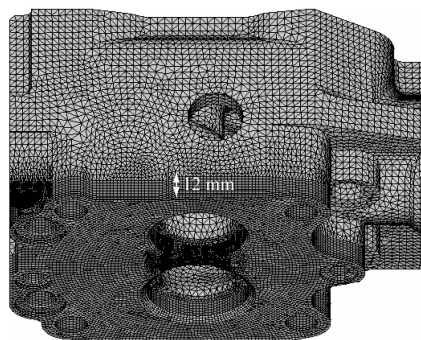


图 3 缸盖有限元模型

3 缸盖循环瞬态温度场计算及分析

3.1 传热边界条件

运用有限元进行温度场的模拟计算，关键是要给出合理的换热边界条件^[3]。本次研究中采用第三类边界条件，即介质的换热系数和介质的温度。对缸盖温度场计算来说，主要是确定缸盖燃气侧、缸盖水套壁面、缸盖进排气道壁面以及缸盖外表面壁面处换热介质的换热系数和相应的介质温度。

柴油机一个工作循环中，缸内气体经历进气、压缩、燃烧、膨胀、排气等过程，气体的压力和温度变化很大，这使得燃烧室壁面的换热极为复杂。要准确获取燃烧室内燃气的温度和换热系数，应对特定机型及工况进行缸内工作过程的数值模拟。本文采用 AVL BOOST 软件，通过对某型柴油机进行额定工况下的缸内工作过程模拟计算，得出了缸内燃气的对流换热系数和温度随曲轴转角的变化情况，如图 4、图 1 所示。图中 0 对应进气冲程的上止点。

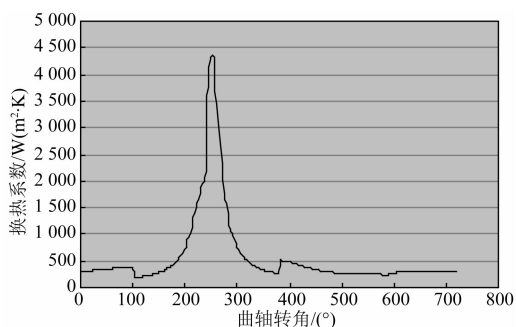


图4 一个工作循环中缸内燃气换热系数随曲柄转角变化曲线

在稳态温度场计算中, 缸盖火力面与燃气之间的换热系数由图4中平均对流换热系数设定, 定义综合平均燃气温度 t_{gm} 作为相应的介质温度, 计算公式如下^[4]:

$$t_{gm} = \frac{\frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} t_g h_g d\tau}{\frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} h_g d\tau} \quad (4)$$

式中, τ_0 为一个工作循环周期, s ; t_g 为缸内燃气瞬时温度, K ; h_g 为缸内燃气与室壁的瞬时换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

其余边界条件则参考相关机型, 采用经验或半经验的方法获得^[5], 具体见表1。

表1 温度场计算所需的边界条件

边界条件	温度/ K	换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$
外表面	323.15	20
进气道壁面	350.15	400
排气道壁面	700.15	350
缸盖火力面	1 116.4	610.3
上水套表面	368.15	8 000
下水套表面	363.15	10 000
底板绝热面	热流量为零	

3.2 稳态温度场的计算

气缸盖循环瞬态温度场计算需要给出其初始温度分布。由于气缸盖从室温达到稳定的温度需要数以千计的发动机循环, 如果把室温作为初始温度, 则求解时间将很长^[6], 因此以计算得到的气缸盖稳态温度场作为瞬态计算的初始条件。而气缸盖稳态温度场则根据表1所示的边界条件计算。稳态温度场如图5所示。

3.3 循环瞬态温度场计算

通过上述稳态温度场的计算, 气缸盖有限元模型每个节点都具有稳态的初始温度。在此基础上加载如图1、4所示的一个工作循环中缸盖火力面与燃气之间的对流换热系数及燃气温度, 进行瞬态温

度场的计算。

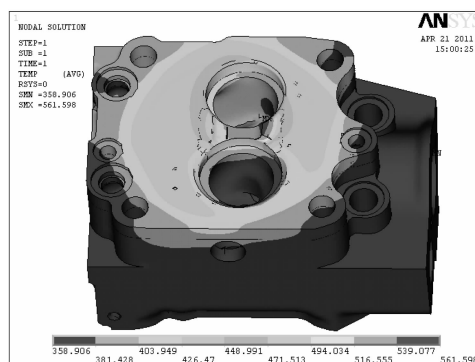


图5 稳态条件下气缸盖温度分布

3.4 结果分析

在缸盖内部选取了6个观测节点用作温度对比分析, 具体分布见图6~图8。节点1位于缸盖鼻梁区; 节点3位于缸盖火力面; 节点2、4分别为节点1、3在深度2mm平面上的对应点; 缸盖侧面沿高度方向布置有节点5和节点6, 距火力面分别为1mm和2mm。

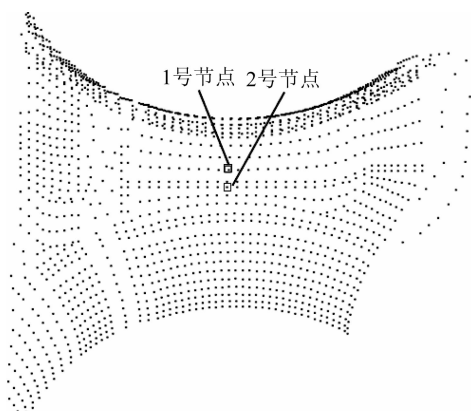


图6 缸盖鼻梁区1, 2号节点

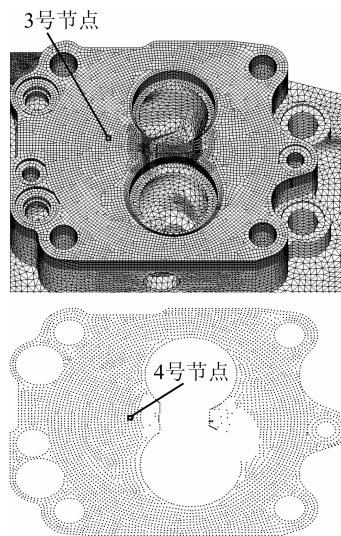


图7 缸盖火力面薄层区域内3, 4号节点

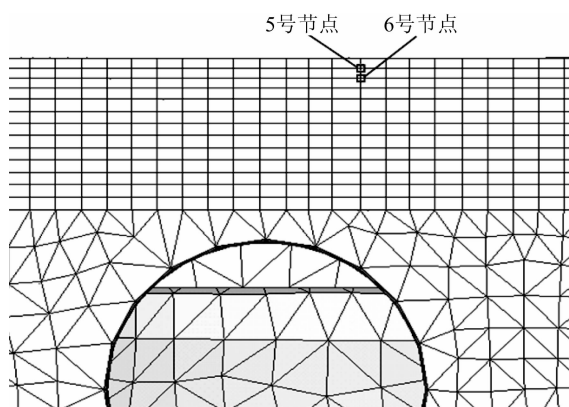


图 8 缸盖侧表面上 5, 6 号节点

应用 ANSYS 软件计算了该型柴油机额定工况 (转速: 1 500 r/min, 额定功率: 186 kW) 下缸盖循环瞬态温度场, 得到了一个循环内缸盖底板表面薄层内各测点温度值。根据各测点温度值画出的图 9 反映了各测点的温度波动情况。

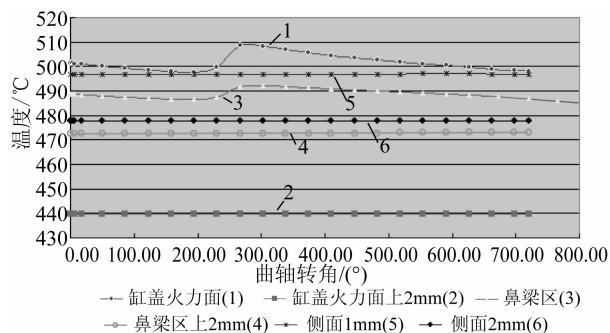


图 9 缸盖 1-6 号节点一个循环内温度曲线

4 结 论

通过对该型柴油机缸盖额定工况下循环温度场的计算发现:

(1) 柴油机在稳定工况运行时, 缸内燃气周期性热冲击对缸盖底板壁面温度场有影响, 且温度波动明显; 沿缸盖高度方向, 随着深度变大, 温度波动幅度迅速变小, 当深度为 2 mm 时, 温度趋于平稳; 缸盖外表面温度变化平稳, 无明显波动现象;

(2) 对比一个循环中缸内燃气换热系数随曲柄转角变化和缸盖火力面节点温度变化可知, 由于热惯性的影响, 火力面节点的温度上升要滞后于燃气换热系数的上升。

参考文献

- [1] 张敬国, 崔可润, 龚齐清, 等. 船舶柴油机气缸套裂纹的研究[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000 (2): 155-159.
- [2] 杨万里, 陈国华, 叶晓明, 等. 内燃机燃烧室零件表面薄层瞬态传热研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2001 (6): 19-22.
- [3] 吴怡, 黄烈涛. 柴油机缸盖火力面温度场的有限元分析[J]. 内燃机, 2010 (4): 29-34.
- [4] 李佑长. 四缸柴油机缸盖传热研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [5] 俞小莉. 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 (4): 324-332.
- [6] 郭立新, 杨海涛, 夏兴兰. 某汽油机气缸盖循环瞬态温度场计算[J]. 现代车用动力, 2008 (2): 16-21.

(上接第 38 页)

(3) 计算得到动态疲劳强度安全系数为 2.67, 能够满足疲劳强度的要求。

参考文献

- [1] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1980.
- [2] 吕继汉. 有限元在动力机械中的应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995.
- [3] 张俊红, 程晓鸣, 郑勇. 柴油机曲轴动态疲劳强度分析

[J]. 拖拉机与农用运输车, 2005, 6(4): 66-68.

- [4] 李桂琴, 钱伯雄. 内燃机曲轴应力三维有限元分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 1997, 19(5): 19-24.
- [5] 郭磊, 郝志勇, 刘波, 等. 曲轴强度多体动力学与有限元子模型法仿真[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(9): 1639-1643.
- [6] 陈亮, 宋希庚, 明章杰, 等. 基于有限元和多体动力学的柴油机曲轴动态强度与冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(11): 187-208.