

内燃机活塞三维热分析

杜平安*

(电子科技大学电子机械系 成都 610054)

【摘要】 介绍高温状态下内燃机活塞的热分析原理,利用有限元法计算活塞温度、热变形和热应力,建立活塞三维热分析有限元模型和相应热边界条件,给出了活塞温度分布、综合应力和综合变形,提出对活塞设计的合理结论。

关键词 温度分布; 热变形; 热应力; 有限元; 活塞; 内燃机

中图分类号 TH122

活塞是内燃机关键零件,工作时处于高温受热状态。为了设计合理的活塞结构,提高活塞寿命和内燃机使用性能,本文计算了高温活塞的温度、热变形和热应力。由于活塞由顶部和裙部组成,限于篇幅,本文仅给出顶部的计算方法和结果。

1 热分析原理

固体内部的热量传递满足热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho q_i \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度; c 为材料比热; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为材料沿 x 、 y 、 z 三个主轴方向的热传导系数; q_i 为内部热源的热流密度; t 为时间变量。

由于活塞采用各向同性的铸钢,因此有

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$$

正常工作状态下,活塞处于稳定热流状态,且内部无热源,所以

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad q_i = 0$$

因此式(1)可改写为

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

或写成

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

式(2)是描述活塞稳定温度场的二阶常微分方程。求解该方程还需定义完整的边界条件。由于活塞表面分别与高温气体和冷却介质接触,并通过对流换热达到热平衡,因此热边界条件统一写为

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_r + \alpha (T - T_m) = 0 \quad (3)$$

式中 T_m 为周围介质温度,是可测已知值; α 为换热系数,它是一个与介质流动类型、边界换热形状、介质流动状态和介质密度、粘度、导热系数等有关的工程常数,可通过测试和试算确定; Γ 、 n 分别表示活塞边界和边界法向。

式(2)和式(3)构成活塞稳定温度场的边值问题,求解该问题可以得到整个活塞的空间温度分布。由于该边值问题非常复杂,用理论方法求其解析解很困难,故本文利用有限元法求其数值解。

温度变化将引起变形,由于活塞各部位温度不等和形状差异,各部位变形不同而在内部产生热应力。引起这种热应力的温度变化可视为一种载荷,在有限元法中,该载荷可表示为

1998年11月20日收稿,1999年1月29日修改定稿

* 男 36岁 博士 副教授

$$\{R\}_i^e = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon\}_i dV$$

式中 $\{R\}_i^e$ 为单元变温等效节点载荷列阵; $[B]$ 为单元应变矩阵; $[D]$ 为活塞材料的弹性矩阵; $\{\varepsilon\}_i$ 为热应变矩阵, 由给定的初始温度计算出的温度值和材料线膨胀系数确定。

由上式可以集成整个活塞的变温等效节点载荷列阵 $\{R\}$, 即

$$\{R\} = \sum_{e=1}^{ne} \{R\}_i^e \quad (ne \text{ 为单元总数})$$

因此, 求解线性方程组 $[K]\{q\} = \{R\}$, 就可以求出所有节点的热变形位移 $\{q\}$, 其中 $[K]$ 为活塞总刚度矩阵。再根据物理方程 $\{\sigma\} = [D]\{[B]\{q\} - \{\varepsilon\}_i\}$, 便可求出各个单元的热应力。

2 几何模型

几何模型描述求解域形状和大小是自动划分网格的基础, 考虑到活塞形状和边界条件的对称性, 仅取四分之一结构进行分析, 几何模型见图 1。为减少单元数量, 该模型忽略了一些对热分布和热应力影响甚微的细节(如倒角、倒圆、销孔等)。

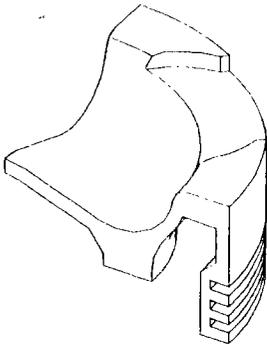


图 1 求解几何模型

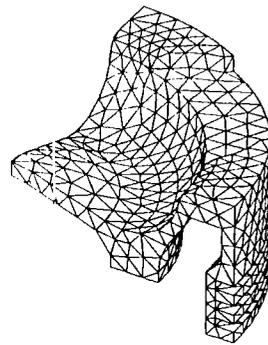


图 2 有限元模型

3 有限元模型

由于活塞形状不规则, 故选择边界适应能力较强的四面体温度单元进行离散。由于结构局部尺寸限制了单元尺寸, 在小单元情况下增加单元阶次并不能明显增加计算精度, 故单元阶次取为线性。基于几何模型自动划分出的有限元模型如图 2 所示。该模型有 3 779 个单元, 1 179 个节点。由于要计算热应力, 所以网格形式考虑了应力计算的疏密要求。为减小计算误差, 对应力集中区少数形状较差的网格进行了修正。

4 边界条件

定义热边界条件需要确定边界单元面上式(3)中的换热系数 α 和介质温度 T_m 。介质温度为爆破气体温度和冷却液温度, 分别为 880°C 和 110°C 。换热系数与多种因素有关, 且表面不同部位的值不一定相同, 因此不可能通过理论方法确定。为此, 实测活塞表面一些特殊位置的温度值, 首先根据经验给定表面不同部位假设的 α 值, 并计算活塞温度分布。然后比较计算温度值和实测值, 并调整 α 大小, 直到两者相同为止。

由于活塞形状和热边界条件具有反射对称性, 因此活塞温度也应是相应的对称分布。所以在图 1 中的两个反射对称面上不会传递热量, 否则将破坏温度分布的对称性, 故取这两个表面的热边界条件为绝热条件。为此令这两个面上的换热系数为零, 式(3)变为

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

上式便是绝热边界条件。由于本文还要计算顶盖变形和应力，故在对称面和接触面上定义了相应的位移边界条件。

5 计算结果

由有限元模型计算出的活塞温度分布如图 3a 所示。活塞最高温度为 327℃，发生在活塞顶面的 A 点附近。最低温度为 114℃，发生在与冷却液接触的活塞底部表面。

根据活塞初始温度(常温)和计算出的工作温度，可由式(4)形成温度载荷。在该载荷作用下活塞发生热变形并产生热应力，再考虑塞顶部气体压力(13.2 MPa)作用，计算出的活塞变形和应力分布如图 3b 和图 3c 所示。活塞最大径向热变形为 0.49 mm，发生在边缘的 B 点附近，该变形值为活塞—气缸配合间隙设计提供了参考。活塞下端最大轴向变形为 0.17，该变形值为顶部—裙部配合间隙设计提供了参考。最大应力发生在 C 点附近，这是由于周围结构热变形相差较大且相互制约的结果，最大应力值为 325 MPa，满足材料强度要求。为防止产生断裂裂纹，设计时应保证 C 点附近有足够大的过渡圆弧。

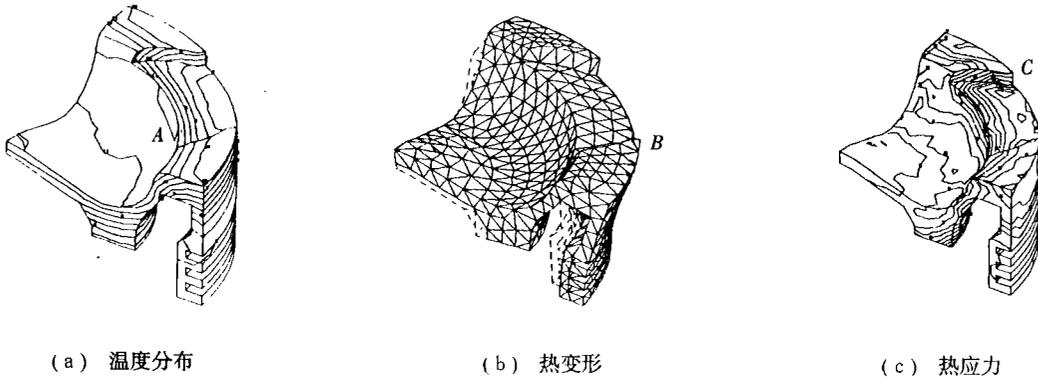


图 3 计算结果

参 考 文 献

- 1 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 2 杜平安. 结构有限元分析建模方法. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 3 杜平安, 王豪才. 发动机活塞复合工况下的有限元分析. 电子科技大学学报, 1995, 24(3): 255~258

3D Thermal Analysis of Piston in Internal-combustion Engine

Du Pingan

(Dept. of Electromechanical Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper presents the calculation principle of the temperature, thermal deformation and thermal stress of the piston in internal-combustion engine, and calculates the temperature, thermal deformation and thermal stress of the piston by the method of finite element analysis. This paper also builds up the finite element model and boundary condition for three dimension thermal analysis, and gives the calculating results and conclusion about the design of piston.

Key words thermal analysis; finite element method; piston; internal-combustion engine