功能梯度材料活塞三维温度场分析

王 素 倪春阳 朱心雄

(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 功能梯度材料零件具有单质材料零件无法比拟的理化性能优势,然而由于材料分布复杂以及对功能梯度材料本身性能研究不充分,功能梯度材料零件性能分析存在很多困难. 以陶瓷纤维梯度增强活塞、陶瓷纤维非梯度增强活塞为例,应用复合材料热性能理论,采用有限元分析软件 ADINA 中的 ADINA-T 模块和结构分析模块对功能梯度材料活塞和普通活塞的温度场和热流场进行了计算分析,结果表明使用陶瓷纤维梯度层可以明显改变活塞温度分布,降低散热量,缓和由于热膨胀系数不匹配,在陶瓷纤维增强层与活塞本体交界处产生的应力.

关 键 词: 有限元; 功能梯度材料活塞; 温度场

中图分类号: TB 34

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)12-1299-04

Temperature field analysis for heterogeneous material piston

Wang Su Ni Chunyang Zhu Xinxiong

(Dept. of Automobile Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Physical and chemical performance of heterogeneous material part exceeds homogeneous material part. Because of material distributing complexity and insufficient study for heterogeneous material, there are lots of difficult in analysis of heterogeneous material part. Theory of composite performance and ADINA-T module of finite element analysis software ADINA were used to compute and analyze temperature field and heat dissipating capacity for heterogeneous material and common piston, using the gradient aluminum matrix composite piston reinforced by ceramic fibers and aluminum matrix composite piston reinforced by ceramic fibers (no grads) as examples. The results show this method can change piston temperature distribution, reduce heat dissipation capacity and relax the stress at interface of gradient aluminum matrix composite layer reinforced by ceramic fibers and piston noumenon which caused by mismatch between different coefficients of thermal expansion, using gradient aluminum matrix composite layer reinforced by ceramic fibers.

Key words: finite element; heterogeneous material piston; temperature field

现代发动机的温度、压力、速度等工作条件对活塞的要求越来越高,均质铝合金活塞已经无法满足这种趋势的要求. 陶瓷纤维梯度增强活塞不仅顶部耐热、隔热、耐磨性有所提高,还避免了由于零件中材料成分和性能的突然变化导致的局部应力集中,因此具有广泛的应用前景[1]. 现有活塞温度场、热应力分析的对象一般为均质铝合金活塞或非梯度复合材料活塞,对于梯度增强活塞的分析很少见到. 论文采用有限元分析软件 ADINA 对陶瓷纤维梯度增强活塞的热流场、温度场进行了分析.

1 建模分析

1.1 模型的建立

鉴于活塞本身复杂的形状及其所承受的载荷性质,整个活塞不具有对称性,因此取活塞整体建立模型,只对倒角等细小结构进行了简化. 用 CATIA 完成的活塞三维实体模型如图 1 所示.

收稿日期: 2005-01-12

基金项目: 航空科学基金资助项目(04H51079)

作者简介: 王 素(1963-),男,江西景德镇人,副教授, wangsu2000@buaa.edu.cn.

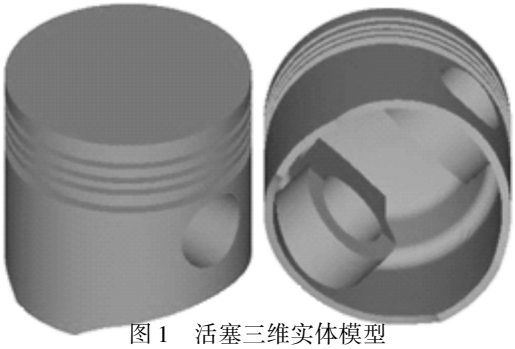

图 1 活塞三维实体模型

在得到活塞三维实体模型的基础上,利用有限元分析软件 ADINA 中的 ADINA-T 模块对模型进行网格划分. 采用 10 节点四面体三维导热(3D-conduction)单元和 4 节点边界换热(surface boundary convection)单元,共得到 135 102 个节点和101 431个单元. 单元划分结果如图 2 所示.



图 2 单元划分结果

1.2 梯度层材料性能的确定

活塞本体材料选用 ZL109,增强材料选用氧化铝(Al_2O_3)短纤维. 增强形式为从活塞顶部向下,Al_2O_3 体积分数从 30% 逐渐减少到 0. 实际计算中,将梯度层离散为 5 层:30%,24%,18%,12%,6%. 划分单元时,属于不同梯度层的单元赋予不同材料性能参数. 温度场计算中,需要的材料性能参数是导热系数和比热容. 复合材料的导热系数和比热容需要根据理论公式计算并加以修正后得到,导热系数理论计算公式如下[2]:

$$\lambda_c = v^2/[2v/\lambda_r + (1-2v)\lambda_m] + 2v(1-v)/[v/\lambda_r + (1-v)/\lambda_m] + (1-v)^2\lambda_m \quad (1)$$

式中,λ_c,λ_r,λ_m 分别为复合材料、增强相、本体材料的导热系数;v 为 Al_2O_3 增强相体积分数. λ_r,λ_m 查表获得. 比热容计算公式如下[2]:

$$\left.\begin{aligned} c_p &= \sum M_i c_{pi} / \sum M_i = \sum \rho_i v_i c_{pi} / \sum \rho_i v_i \\ \sum v_i &= 1 \qquad i = 1,2,3,\cdots,n \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

式中,c_p 为复合材料比热容;ρ_i,v_i,c_{pi} 分别为各组分密度、体积分数、比热容. 本文中各组分原始数据及计算结果见表 1.

表 1 复合材料 λ_c 和 c_p

v	λ_c/(W·(m·K)$^{-1}$)	c_p/(kJ·(kg·K)$^{-1}$)
1.00	28	379
0.30	49	639
0.24	57	702
0.18	68	765
0.12	82	830
0.06	104	896
0.00	156	963

1.3 边界条件的确定

采用有限元法进行温度场分析时,确定活塞的热边界条件是计算的关键. 一般取第 3 类边界条件,即需要确定边界换热系数和环境温度. 通常确定换热系数的方法是采用经验和半经验公式计算,并用实测温度值加以修正. 本文采用 Eichelberg 公式:

$$\alpha_g = k\sqrt[3]{v_m}\sqrt{p_a T_a} \quad (3)$$

式中,α_g 为瞬时换热系数;$k=2.1$ 为修正系数;v_m 为活塞平均速度;p_a,T_a 分别为燃气的瞬时压力和温度见图 3,可由热力计算求得. 用式(4)计算平均换热系数 α_{gm} 和气体平均温度 T_{gm}:

$$\alpha_{gm} = \frac{1}{720}\int_0^{720} \alpha_g \mathrm{d}\varphi \quad (4)$$

$$T_{gm} = \frac{\int_0^{720} \alpha_g T_g \mathrm{d}\varphi}{\int_0^{720} \alpha_g \mathrm{d}\varphi} \quad (5)$$

式中,φ 为曲轴转角. 活塞顶部换热系数随半径位置而变化,因此把活塞顶面分为 3 个区,并满足:

$$\sum_{i=1}^{3} A_i \alpha_i = \alpha_{gm} A \quad (6)$$

式中,α_i 和 A_i 分别为每个区的换热系数和面积;A 为活塞顶面面积.

根据活塞实测温度和换热系数原始数据,在模型上反复计算和修正之后,得到的活塞换热系数 α 计算结果见表 2.

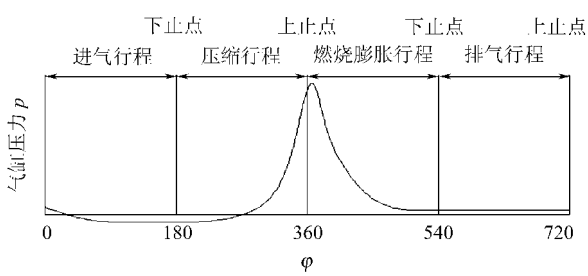

图 3 四冲程内燃机示功图

表 2　活塞换热系数 α

位置	顶面中间部位	顶面第 1 外层	顶面第 2 外层	火力岸	第 1 环槽	第 2 环槽	油环	裙部	内腔裙部及销孔	内腔顶平面
$\alpha/(W\cdot(K^{-1}\cdot m^{-2}))$	411	405	400	100	900	800	300	360	50	90

2　计算结果分析

为更明显的显示陶瓷纤维梯度增强形式对活塞温度场的影响,对陶瓷纤维非梯度增强活塞和普通活塞的温度场进行了计算. 图 4 ~ 图 6 分别为这 3 种活塞的三维温度分布云图、平行于活塞销轴方向的活塞剖面温度分布云图和垂直于活塞销轴方向的活塞剖面温度分布云图. 活塞各特征温度点计算结果见表 3,特征温度点位置在图 5、图 6 中已标出. 图 7、图 8 为陶瓷纤维梯度增强活塞的三维热流分布图、平行于活塞销的纵剖面热流分布图、垂直于活塞销的纵剖面热流分布图.

表 3　3 种活塞特征点温度

特征点温度	特征点号					
	1	2	3	4	5	6
陶瓷纤维梯度增强活塞特征点温度/K	546	587	540	585	628	575
陶瓷纤维非梯度增强活塞特征点温度/K	550	581	541	587	618	576
普通活塞特征点温度/K	552	564	546	560	600	579

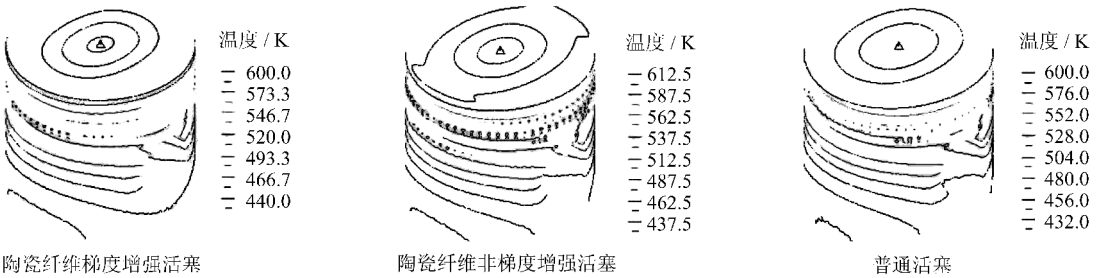

图 4　3 种活塞的三维温度分布云图

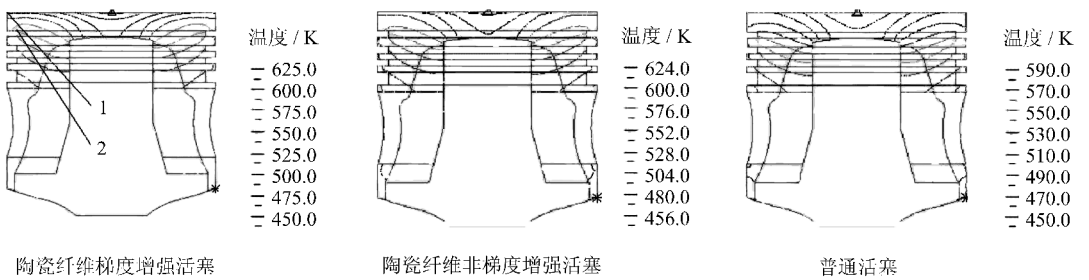

图 5　3 种活塞沿平行销轴方向的二维温度分布云图

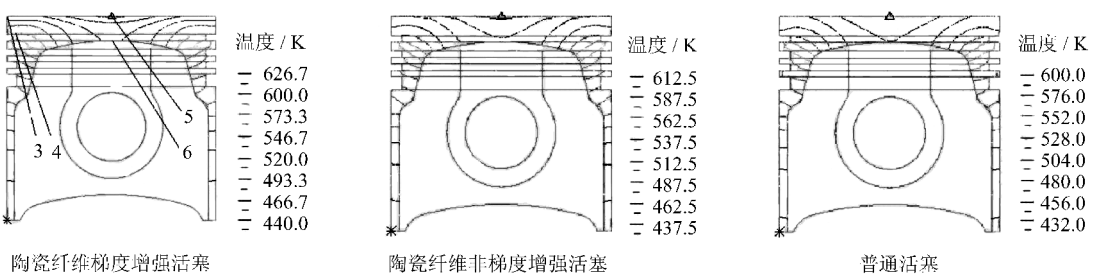

图 6　3 种活塞沿垂直销轴方向的二维温度分布云图

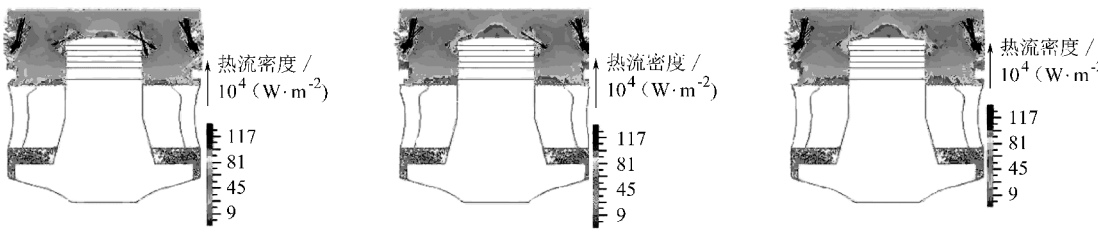

图 7　3 种活塞沿平行销轴方向的热流密度分布图

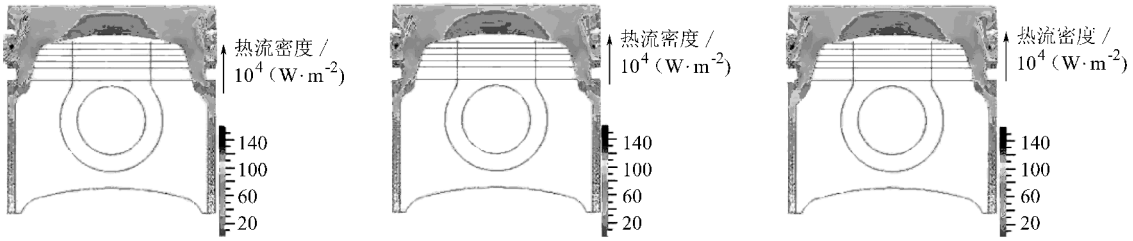

图 8 3 种活塞沿垂直销轴方向的热流密度分布图

通过比较温度分布云图和特征温度点的温度可以看出,采用陶瓷纤维增强的活塞顶起到了隔热作用. 陶瓷纤维梯度增强活塞顶部温度比普通活塞对应位置的温度上升 23 ~ 30 K,陶瓷纤维非梯度增强活塞顶部温度比普通活塞上升 17 ~ 27 K;梯度增强活塞第 1 环槽温度比普通活塞降低6 K左右,非梯度增强活塞比普通活塞降低了 5 K左右;梯度增强活塞上下顶面温度差 52 ~ 57 K,非梯度增强活塞上下顶面温度差 25 ~ 47 K. 由图 7、图 8 的三维热流分布图可以看出,陶瓷纤维梯度增强活塞热流量最大值为 1 657 449 W,陶瓷纤维非梯度增强活塞和普通活塞的最大热流量分别为 1 703 349 W 和 1 715 436 W. 普通活塞顶部第 2 分区附近热流量约为 500 000 W,明显高于梯度增强活塞和非梯度增强活塞相同位置的热流量——约为 375 000 W. 从图 7、图 8 平行于活塞销的纵剖面热流分布图和垂直于活塞销的纵剖面热流分布图可以看出,活塞热流量在第 1 环槽附近最大,内腔顶部与侧壁交界处次之,梯度增强活塞在内腔顶部与侧壁交界处热流量大于非梯度增强活塞,非梯度增强活塞大于普通活塞. 活塞顶面温度相对较低的区域面积,梯度增强活塞大于非梯度增强活塞,非梯度增强活塞大于普通活塞. 由以上分析可以看出,陶瓷纤维梯度增强层隔热效果明显,与普通活塞相比最大热流量降低了 3.4%. 梯度增强活塞顶面温度略高于非梯度增强活塞,第 1 环槽大部分位置温度低于非梯度增强活塞,即陶瓷纤维梯度增强层隔热效果略好于非梯度增强层,主要是因为陶瓷纤维梯度层的存在,使得梯度增强活塞的陶瓷纤维增强层比非梯度增强活塞厚度增加. 活塞最高温度提高,发动机在高温下燃烧有利于发动机做功,根据热力学第二定律,温度升高,热力过程的不可逆性降低[3].

3 结 论

本文应用复合材料热性能理论,采用有限元分析软件 ADINA 中的 ADINA-T 模块对陶瓷纤维梯度增强活塞、陶瓷纤维非梯度增强活塞和普通活塞的温度场和热流场进行了计算分析. 结果表明,陶瓷纤维增强层隔热效果明显,梯度增强层隔热效果略好于非梯度增强层. 活塞温度场分析为热应力分析提供了必要条件,本文也为功能梯度材料零件温度场计算提供了一种思路.

参考文献 (**References**)

[1] 李 永,宋 健,张志民. 功能梯度材料在绿色内燃机上的应用研究[J]. 公路交通科技,2003,20(4):118 ~ 122
Li Yong, Song Jian, Zhang Zhimin. Theory investigate of functionally gradient material on application to green internal combustion engines[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003,20(4):118 ~ 122(in Chinese)

[2] 曾竟成,罗 青,唐羽章. 复合材料理化性能[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998
Zeng Jingcheng, Luo Qing, Tang Yuzhang. The characteristics of the composite material's physical & chemistry[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,1998(in Chinese)

[3] 朱秀荣,童文俊,费良军,等. 陶瓷纤维增强梯度铝基复合材料研究[J]. 宇航材料工艺,2000,30(3):42 ~ 44
Zhu Xiurong, Tong Wenjun, Fei Liangjun, *et al*. A study on gradient aluminum matrix composite reinforced by ceramic fibers[J]. Aeropace Materials & Technology,2000,30(3):42 ~ 44(in Chinese)

[4] Bhashyam S, Shin K H, Dutta D. An integrated CAD system for design of heterogeneous objects[J]. Rapid Prototyping Journal, 2000,6(2):119 ~ 135

[5] 刘达利,齐丕骧. 新型铝活塞[M]. 北京:国防工业出版社,1999
Liu Dali, Qi Peixiang. A new-style aluminum piston[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999(in Chinese)