

热应力分析及应用

Analysis and Application of Thermal Stress

洛阳光电技术发展中心 王宏伟

[摘要] 简要介绍了某结构设计时热应力分析的必要性,通过对某结构的温度场分析和热应力分析,计算静热联合应力,同时与单独静力作用下的应力比较,可以看出静热应力远大于单独静力应力,说明在该结构设计时,必须考虑温度梯度变化引起的热应力作用。

关键词: 温度场 热应力 结构设计

[ABSTRACT] The necessity of thermal stress in structure design analysis is briefly introduced. The stress under static and thermal loads is calculated by analyzing of temperature field and thermal stress. Compared with the stress under static load alone, the joint stress is much greater. The present work indicates that the effect of thermal stress resulted from temperature gradient should be considered in structure design.

Keywords: Temperature field Thermal stress Structure designing

在产品设计中,一般情况下按照静力强度准则已足以满足使用要求,但是对于由不同线膨胀系数的材料组成的零件装配成的产品,当各个零件的温度变化较大时,在一定温升下各零件间的热应力因线膨胀系数不同而很大。特别是对于处于复杂环境中的产品,内外表面因存在巨大的温度差,而产生很大的热应力,虽然该产品的常温静力强度富裕系数较大,但常常会因为热应力而导致产品破坏。因此对于工作在温度变化比较大环境中的产品设计,往往需要对其进行温度场分析和热应力计算,以确定考虑温度变化时结构的强度富裕系数,即按照静力载荷和温度载荷联合作用下的静热联合强度设计准则来设计结构。

1 热分析平衡方程

热分析问题分为稳态热分析和瞬态热分析2种。本计算采用的方法是稳态热分析方法。稳态热分析平衡方程如下式:

$$Ku+R(u+T_{abs})^4=P+N$$

其中, K 为热传导矩阵, R 为辐射对流矩阵, u 是一个待求的温度向量; T_{abs} 是绝对温度的偏置温度值, P 是稳定的热流量向量, N 是依赖于温度的热流量向量。

对于上述热平衡方程,应用 Newton-Raphson 迭代方法,即可进行温度场分析计算, Newton-Raphson 迭代方程为:

$$K_T^i \Delta u^i = R^i$$

当 K_T^i = 切向热传导矩阵 \cong

$$K^i + 4R^i (u^i + T_{abs})^3 - \delta N / \delta u$$

$$R^i = \text{残热向量} = P^i + N^i - K^i u^i - R^i (u^i + T_{abs})^4$$

通过计算方程中的未知向量 Δu^i , 就可以得到迭代后的温度 u^{i+1} :

$$\Delta u^i = u^{i+1} - u^i$$

$$\text{或 } u^{i+1} = \Delta u^i + u^i$$

式中, u^i 为迭代前的温度。

2 算例

某结构由2部分组成,组成材料分别是非金属材料 and 金属材料。2部分之间采用胶粘剂连接。该结构件的各项材料特性参数见表1。

将该结构件工作置于复杂的温度环境中,使其表面温度迅速升高,在材料一定的热传导作用下,表面热向产品内部迅速传输,从而在结构各个方向上产生不同的

表1 材料的特性参数

性能	导热系数 / (m·K)	比热 / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	泊松比	线膨胀系数 / (10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)
非金属材料	0.8542	531.5	1600	60000	0.21	0.75~0.85
金属材料	10.73	686	4050	见表2	见表3	见表4
胶粘剂	0.193	2176	1200	15	0.09	203

表2 金属材料的弹性模量

温度 / °C	20	150	250	350	450
弹性模量 / (10 ³ MPa)	129	107	101	95	85

表3 金属材料的泊松比

温度 / °C	20	100	200	300	400	500	600
泊松比	0.32	0.32	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40

表4 金属材料的线膨胀系数

温度 / $^{\circ}\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600
线膨胀系数 ($10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	10.1	10.3	10.4	10.6	10.8	11

温度差,具有不同的温度梯度分布,产生很大的热应力。当热应力达到一定程度时可能会导致产品破坏。

3 有限元模型

使用 MSC/Patran 前后处理软件,根据该产品的结构图建立有限元模型,其有限元模型图见图 1。

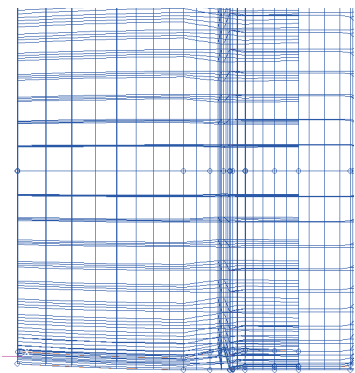


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

4 单独静力强度计算

在模型上单独施加静力载荷,使用 MSC/Nastran 软件中的 SOL101 解算器计算得到结构的最大静应力为 9.1352MPa (非金属材料部分),其应力云图见图 2。

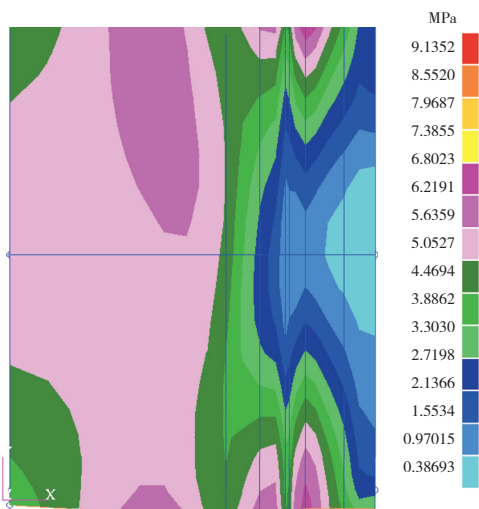
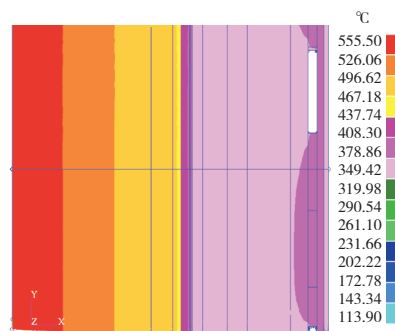


图2 静力作用下的应力

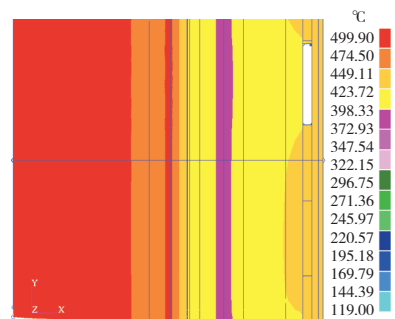
Fig.2 Stress under static load

5 温度场分析

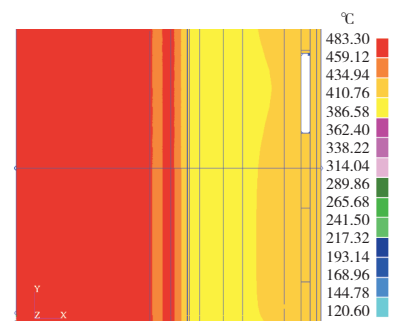
根据给定结构各时刻的边界温度值,确定计算边界条件,同时在计算模型上加上材料的热特性参数,使用 MSC/Nastran 解算器 SOL153 进行该模型的稳态温度场分析,计算得到工作各时刻产品的温度场分布,图 3 为工作的第 8s、第 15s、第 20s 的温度场分布云图,其他时刻的温度场分布图略。



(a) 第 8s



(b) 第 15s



(c) 第 20s

图3 温度场分布云图

Fig.3 Temperature field distribution nephogram

6 热应力分析

根据计算得到的各时刻温度场分布结果,利用 MSC/Patran 的 Fields 菜单中的 Create/Spatial/FEM 取出各时刻的温度场分布函数,以该温度场分布函数作为温

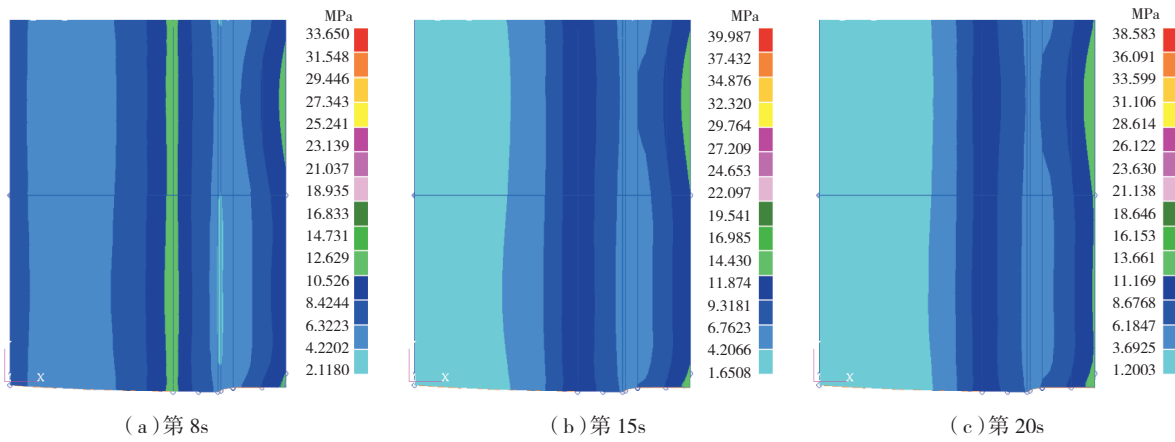


图4 热应力云图

Fig.4 Thermal stress nephogram

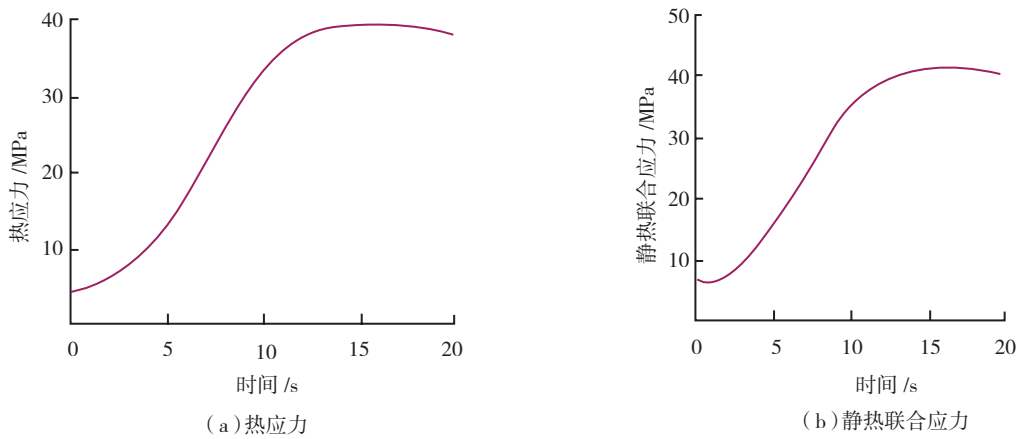


图5 非金属件应力随时间变化的曲线

Fig.5 Stress-time curve of non-metallic structure

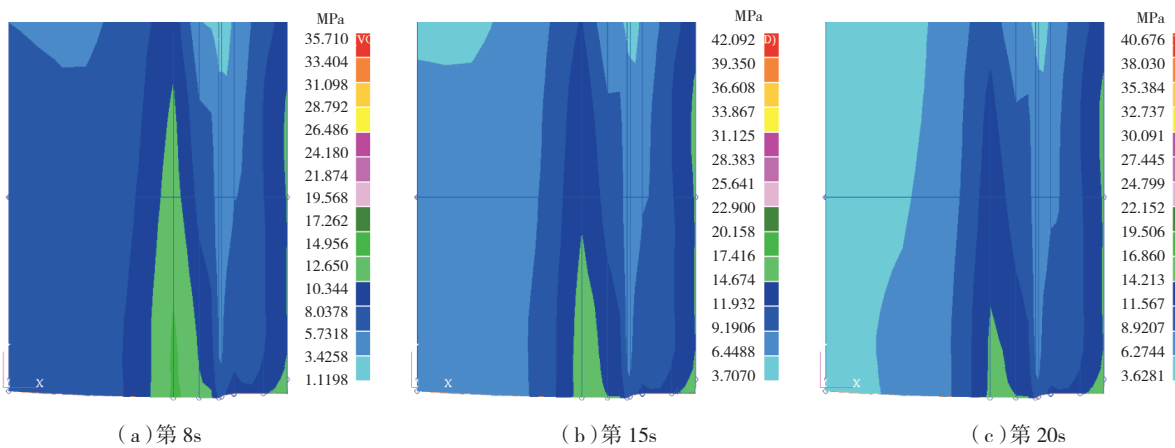


图6 静热联合应力

Fig.6 Joint stress of static and thermal loads

度边界条件施加到模型上,同时确定约束边界条件和材料的力特性参数,使用 MSC/Nastran 解算器 SOL101 计算热应力,由此可得各时刻产品的热应力结果。因

篇幅所限,本文只介绍非金属件应力结果。非金属件在工作第 8s、第 15s、第 20s 等时刻的热应力云图见图 4。

(下转第 74 页)