

文章编号 1004-924X(2011)11-2573-09

透镜无热装配中粘结层的设计

范志刚, 常虹*, 陈守谦

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对胶粘固定的透镜会由于透镜、镜框和粘结层的材料热膨胀系数不匹配而在透镜内部产生径向应力,影响系统光学性能的问题,对无热粘结厚度进行研究以最小化甚至消除这种径向应力。首先,对现有的几种基于胡克定律推导的无热粘结厚度方程进行了分析对比,对粘结层提出了一种新的约束,并由此推导了一个无热粘结厚度的简化近似方程,通过修正粘结层轴向约束得到改进的近似方程。然后,采用有限元方法,对几个粘结层高宽比不同的胶粘透镜装配体进行了热应力分析,得出它们的无热粘结厚度仿真解。最后,将仿真解与解析方程计算的数值结果进行对比,指出解析方程的适用范围。对比分析表明:改进的近似方程适用于粘结层高宽比小于 1/10 的情况;高宽比在 1/10~1/3 之间时使用高宽比近似方程较好;简化近似方程适用于高宽比大于 1/3 的情况。结果显示,无热粘结厚度的解析方程在各自的使用范围内具有足够的准确性,能够满足各种工程应用的需要。

关键词:无热装配;热应力;无热粘结厚度;有限元分析

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2573

Design of bonding layer in lens athermal mount

FAN Zhi-gang, CHANG Hong*, CHEN Shou-qian

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: sunshine8299@126.com

Abstract: As the mismatch of thermal expansion coefficients among the optics, frames and the bond layer can bring a radial stress on the optics and can affect the properties of optical systems, this paper researches how to select the athermal bond thickness to minimize or cancel the radial stress. First, the existing derivations for the athermal bond thickness based on Hooke's Law are compared, then a novel way for constraining the bond is proposed and a simplified approximation formula for the athermal bond thickness is derived. By modifying the axial constrain of the bond layer, a modified approximation formula is also derived. Furthermore, a series of bonded lenses with different bond aspect ratios are built, the simulation value of athermal bond thickness of each assembly is solved by the finite element analysis. Finally, the simulation and analytic solutions of athermal bond thickness are compared, and the application scopes of the analytic equations are pointed out. According to the comparison and analysis, it indicates that the modified approximation formula is applicable to the bond layer

收稿日期:2011-04-13;修订日期:2011-08-18.

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 20080177003)

with a aspect less than 1/10, the approximation formula is suitable for that with a aspect in 1/10~1/3; and when respect ratio is more than 1/3, the simplified approximation formula is more appropriate. In their application scopes, athermal bond thickness equations have adequate accuracy, and can satisfy the requirement of engineering applications.

Key words: athermal mount; thermal stress; athermal bond thickness; finite element analysis

1 引言

随着近代合成胶粘剂的出现与发展,光学零件的胶合和固定得到了很大的改进。相对于机械连接来说,胶粘结固定具有如下优点:(1)可以简化结构、减轻重量和改善粘结件的应力分布;(2)可以实现其它连接方式难以解决的各种不同材料之间的连接;(3)通过选择适当的粘合剂可满足耐温和抗震等方面的要求^[1]。近年来,室温硫化(Room Temperature Vulcanization, RTV)胶作为粘结剂被广泛地应用在航天、航空、汽车制造中。在透射式光机结构系统中,透镜与镜框的连接就是采用 RTV 胶接方式来连接和定位的^[2-4]。

透镜使用胶粘固定时,光学材料、机械材料和粘结材料的热膨胀系数不匹配将使透镜内部产生径向热应力,这个热应力一方面将导致光学材料产生应力双折射,另一方面会导致透镜表面产生变形,从而最终影响光学系统的像质^[5]。通过选择合适的粘结材料和粘结厚度可以最小化甚至消除热应力。消除径向热应力的光学装配设计称为无热设计,此时粘结剂的膨胀应与镜框和透镜的膨胀差相匹配。

无热粘接厚度问题首先由 Bayar^[6]提出,随后一些文章对此进行了讨论,并推导了一系列无热粘接厚度解析方程,包括 Bayar 方程、改进的 Bayar 方程、Van Bezooijen 方程等^[7-9]。

大多数无热厚度的解析解都是由表征三维应力的胡克定律矩阵推导出来的。本文首先对现有的几种基于胡克定律的无热厚度解析方程的推导进行了比较,各解析方程在表达式上的差别是由于方程推导过程中对粘结层约束使用了不同的假设。在此基础上,对粘结层的约束条件提出了一种新的假设,基于这一假设条件结合胡克定律推导出简化的无热粘接厚度近似值方程,并通过修正粘结层轴向约束得到一个改进的近似方程。最后采用有限元分析方法对多个具有不同高宽比的胶粘装配体进行热应力分析,求得无热粘接厚度

的仿真解,并通过仿真结果与各解析方程计算结果的对比验证了新近似值方程的准确性,并给出了方程适用的范围。

2 理论背景

无热粘接厚度的求解是以消除径向的应力为目的,因此求解过程中只需关注径向应力的表达式。由表征固体三维应力的胡克定律可知,径向应力可以表示为:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_z + \epsilon_\theta)],$$

其中 ϵ_r 、 ϵ_z 、 ϵ_θ 分别为径向、轴向和切向的应变。

求解无热粘接厚度方程,需令径向应力为 0,也就是令 σ_r 表达式中括号中的项为 0,即

$$(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_z + \epsilon_\theta) = 0. \quad (1)$$

此式即为用胡克定律求解无热粘接厚度的一般方程。从方程(1)中可以看出,要求解这一方程就需要知道粘结层在三个方向(径向、轴向、切向)上的应变,即粘结层的约束条件。

图 1 为典型透镜粘接装配的示意图,用于后面讨论的几何结构参数以及径向、轴向和切向三个方向都在图中给出了定义。

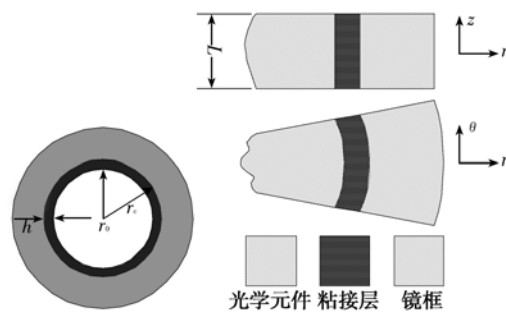


图 1 典型透镜粘接装配示意图

Fig. 1 Typical athermal lens mount

由方程(1)可知,无热粘接厚度求解的关键是获得粘结层在径向、轴向和切向方向上的应变。粘结层在径向被约束于透镜和镜框之间,其径向应变是与粘结厚度直接有关的量,容易确定,其他两个

方向上的应变需要通过一定的假设条件获得。

径向应变 ϵ_r 是径向偏差 δh 的函数,径向偏差定义为温度变化时不受约束的厚度变化与实际厚度变化之差,即

$$\delta h = h\alpha_b\Delta T - [(r_0 + h)\alpha_c\Delta T - r_0\alpha_0\Delta T]$$

$$\delta h = \Delta T [h(\alpha_b - \alpha_c) - r_0(\alpha_c - \alpha_0)]$$

那么径向应变就可以表示为

$$\epsilon_r = \frac{\delta h}{h} = \Delta T \left[\alpha_b - \alpha_c - \frac{r_0}{h}(\alpha_c - \alpha_0) \right]. \quad (2)$$

结合方程(1)、方程(2)以及粘结层在轴向和切向的约束假设条件,就可以求出实现无热装配时的粘结厚度。

3 无热粘结厚度方程

3.1 Bayar 方程

Bayar 方程是无热粘结厚度求解最为简单的

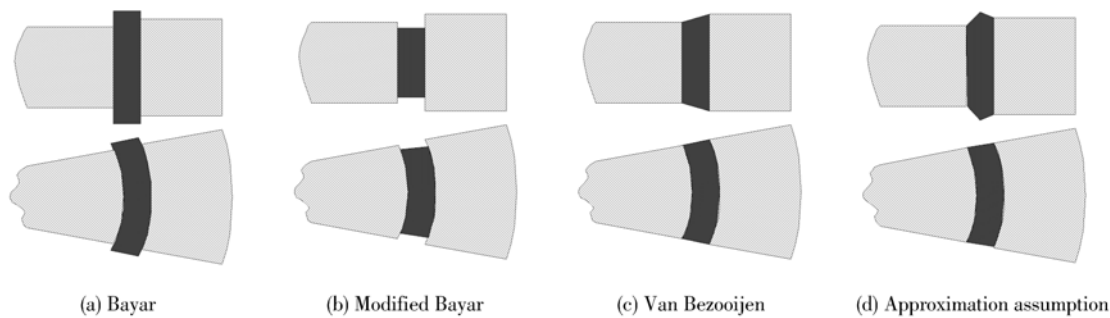


图 2 各种假设条件下装配体受热对比

Fig. 2 Comparison of a heated system under different assumptions

将径向应变方程(2)代入(1)式中并令 $\epsilon_z = \epsilon_\theta = 0$,就可以解得粘结层的无热厚度方程,正如公式(3)所示。

3.2 改进的 Bayar 方程

改进的 Bayar 方程由 Herbert 在 2006 年提出,他对 Bayar 方程做出一个重大改进,考虑了垂直于径向方向上的应变,将泊松比引入到了无热粘结厚度方程中。

方程在推导过程中对粘结层的约束采用了如下假设:切向和轴向的应变等于粘结层在这些方向上的膨胀。换句话说,粘结层在轴向和切向上被完全约束在其未受热时的尺寸,如图 2(b)所示。此时,粘结层在轴向和切向的应变可以表示为:

$$\epsilon_z = \epsilon_\theta = \frac{\delta L}{L} = \alpha_b\Delta T. \quad (4)$$

方程,由 Bayar 在 1981 年首次提出,此后被广泛用于光学元件的粘结装配中^[10-11]。

Bayar 方程仅考虑径向的热膨胀,忽略轴向和切向约束效应,令粘结层厚度的变化等于镜框和光学元件半口径变化之差,对粘结层厚度求解,即令

$$h\alpha_b\Delta T = (r_0 + h)\alpha_c\Delta T - r_0\alpha_0\Delta T,$$

求解上面的方程可以得到

$$h = r_0 \frac{\alpha_c - \alpha_0}{\alpha_b - \alpha_c}. \quad (3)$$

Bayar 方程上面的推导过程非常简单,没有用到胡克定律,但其也可以由胡克定律得到,只是推导过程稍微复杂。

Bayar 方程忽略轴向和切向约束效应,认为在这两个方向上粘结层是自由膨胀或收缩的,即轴向和切向的应变为 0,如图 2(a)所示。

将(2)式和(4)式代入(1)式中,化简求解得到改进的 Bayar 方程为:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)}\alpha_b - \alpha_c}. \quad (5)$$

方程(5)等号右端分母第一项相对于 Bayar 方程多了一个系数 $(1+\nu)/(1-\nu)$ 。由于泊松比的取值在 0 到 0.5 之间,而且用于固定透镜的 RTV 胶的泊松比一般都接近 0.5,再加上粘结剂的热膨胀系数比镜框材料的热膨胀系数要大得多,所以(5)式的分母项要比(3)式大很多,那么由改进的 Bayar 方程求得的无热粘结厚度值比 Bayar 方程求得的值小很多,两者的比值大约接近 1/3。

3.3 Van Bezooijen 方程

Van Bezooijen 方程有时也称为 Muench 方程,但它最初是由 Roel Van Bezooijen 推导出来

的。相对于改进的 Bayar 方程, Van Bezooijen 方程所进行的改进是在粘结层轴向和切向的约束中考虑了透镜和镜框热膨胀的影响, 使用了透镜和镜框热膨胀的平均值作为粘结层在加热条件下的约束尺寸, 如图 2(c) 所示。此时轴向和切向的应变可以表示为

$$\epsilon_z = \epsilon_\theta = \left[\alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right] \Delta T. \quad (6)$$

将(2)式和(6)式代入方程(1)中求解粘结厚度可以得到

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{2\nu}{1-\nu} \left[\alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right]}. \quad (7)$$

式(7)即为 Van Bezooijen 方程的表达式。这个方程的假设条件中考虑了透镜和镜框的膨胀, 并允许粘结层在轴向和切向随它们的变化有稍微的膨胀。那么, 相对于改进的 Bayar 假设情况, 粘结层在径向的膨胀就会稍微减小, 从而导致求解得到的无热粘结厚度将会比改进的 Bayar 方程的解稍大, 这也可以从方程(7)和(5)的对比中分析出来。

Van Bezooijen 方程假设粘结层完全被透镜和镜框约束, 而实际中这种假设并不完全准确, 因为粘结层在其自由表面是允许凸出和凹陷的。因此, Van Bezooijen 方程所计算出来的结果并不是无热粘结厚度的最优值, 但它可以作为无热粘结厚度的一个最小值, 即下限。

3.4 改进的 Van Bezooijen 方程

在已知无热粘结厚度下限的基础上, 希望能够得到一个上限, 基于这样一个目的, Christopher L. Monti 在 2007 年提出了改进的 Van Bezooijen 方程。方程假设: 粘结层在轴向完全不受约束, 在切向被透镜和镜框完全约束, 即轴向的应变为 0, 而切向的应变仍用(6)式表达^[12]。

使用相同的求解方法, 求得改进的 Van Bezooijen 方程如下:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right]}. \quad (8)$$

方程(8)和(7)分别描述了无热粘结厚度的上下限。实际无热粘结厚度处于两个极限值之间, Christopher L. Monti 在方程中引入高宽比 h/L 来调整其大小, 由此推导出的无热粘结厚度方程称为高宽比近似方程 (Aspect Ratio Approxima-

tion), 表示如下:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[2 - \frac{h}{L} \right] \left[\alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2} \right]}. \quad (9)$$

图 3 给出了粘结层高宽比的定义。粘结层的宽度 L 处于厚度值 h 和无限大之间时, (9) 式求得的无热厚度在最大值和最小值之间。方程等号右侧含有需要求解的厚度 h , 因此求解时需进行几次迭代, 或将其展开, 变为关于 h 的二次方程, 再进行求解。

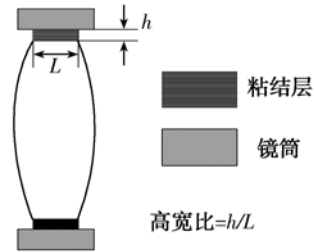


图 3 高宽比定义

Fig. 3 Definition of aspect ratio

3.5 无热粘结厚度的新方程

由前文的分析可知, Van Bezooijen 方程和改进的 Van Bezooijen 方程考虑的约束条件代表的分别是两种极端的情况, 没有考虑粘结层自由表面上的弹性行为, 它们分别在粘结层的高宽比比 较小和非常大时计算比较准确。

实际上, 粘结层在其自由表面上是允许凸出和凹陷的。因此, 在求解无热粘结厚度时, 不引入高宽比, 可以考虑这样一个简化的近似条件, 即假设自由表面中间位置自由膨胀或收缩, 而与透镜和镜框相接的位置受两者膨胀的约束。这种假设下装配体受热后的状态如图 2(d) 所示。

粘结层在加热条件下的约束尺寸由透镜、镜框和粘结层自由热膨胀共同决定, 通过 3 次求平均值获得, 即第 1 次求透镜和粘结层自由膨胀尺寸的平均值, 第 2 次求镜框和粘结层尺寸自由膨胀的平均值, 第 3 次是对求得的两个值取平均。那么, 此时得到粘结层的约束尺寸为

$$\frac{L \cdot \alpha_0 \cdot \Delta T + L \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4} + \frac{L \cdot \alpha_c \cdot \Delta T + L \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4}.$$

根据应变的定义, 可以得到此时粘结层轴向的应变为:

$$\epsilon_z = \frac{\delta L}{L} = \frac{1}{L} \cdot \left[L \cdot \alpha_b \cdot \Delta T - \frac{L \cdot \alpha_0 \cdot \Delta T + L \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4} - \frac{L \cdot \alpha_c \cdot \Delta T + L \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4} \right]. \quad (10)$$

$$\epsilon_z = \Delta T \left[\frac{\alpha_b}{2} - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{4} \right]$$

对于完全圆周粘结, 粘结层在切向是封闭的, 因此粘结层的膨胀在切向完全被透镜和镜框的热膨胀约束, 其切向应变仍使用方程(6)给出的表达式, 将各方向的应变表达式代入方程(1)中可以求得无热粘结厚度的简化近似方程为:

$$h = \frac{r_0(1-\nu)(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{4}(2\alpha_b + \alpha_c - 3\alpha_0)}. \quad (11)$$

在这个近似值推导的过程中, 对粘结层约束采用了如下假设: 粘结层在切向完全约束在透镜和镜框变化范围内, 在轴向与透镜和镜框相连的位置被二者完全约束, 而在厚度中间位置完全不受约束自由膨胀。

在这种假设条件下, 粘结层的受热变形行为

虽然考虑了透镜和镜框的约束也考虑了自身的膨胀, 但只是一种粗略近似; 相对于高宽比近似方程, 简化的近似方程计算过程简单, 但会导致精确度下降, 适用范围较窄。

实际上由于粘结层比较薄, 其厚度中心位置处并不能在轴向完全不受约束地自由膨胀, 而会受到透镜和镜框的限制。根据无热厚度上下限方程, 可以假设粘结层只在其自由表面附近、与厚度尺寸相等的区域内不受约束。那么粘结层在轴向自由膨胀的尺寸为 h , 对轴向应变公式(10)进行修正, 得

$$\epsilon_z = \Delta T \left[\alpha_b - \frac{h}{2L} \alpha_b - \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{4} \right]. \quad (12)$$

采用相同的推导过程得到改进的无热粘结厚度近似值方程为:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_0 + \alpha_c) \right]}. \quad (13)$$

改进的近似方程在最后的表达式中也引入了高宽比, 但引入的方式与高宽比近似方程不同, 两者求解的结果不同。

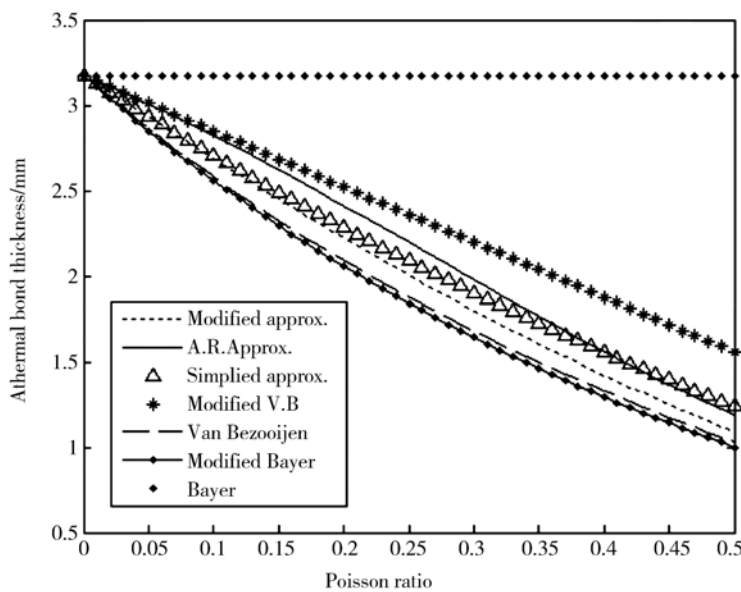


图 4 对某一装配体使用各种无热粘结厚度方程求解的结果比较

Fig. 4 Comparison of results for a system from different athermal bond thickness equations

以某一红外透镜装配体为例, 将上述各方程计算的无热粘结厚度解随粘结材料泊松比的变化曲线描绘在同一图中, 如图 4 所示。透镜为半口

径 40 mm 的硅透镜, 镜框材料为铝合金。计算中需用到的各种材料的特性参数列于表 1 中。

从图 4 中可以看出, Van Bezooijen 方程和改

进的 Bayar 方程非常接近,前者求得的结果比后者稍大。这是由于在改进的 Bayar 方程中,粘结层在轴向和切向的约束忽略了光学元件和镜框的影响,即假设光学元件和镜框的热膨胀系数足够小,可以忽略。由于粘结材料的热膨胀系数一般比透镜和镜框大 1~2 个量级,所以这种忽略对计算结果影响不大。这样就使得改进的 Bayar 方程和 Van Bezooijen 方程结果很接近。

表 1 计算用 3 种材料的热膨胀系数

Tab.1 Thermal expansion coefficients of three materials for calculation

material	CTE/ $^{\circ}\text{C}$
Si	2.6×10^{-6}
RTV	2.8×10^{-4}
Al alloy	2.36×10^{-5}

无热粘结厚度的简化近似方程所求得的结果处于 Van Bezooijen 方程解和改进的 Van Bezooijen 方程解之间,可以明显体现出其是上下限两种情况的简单折中。

随着泊松比的增大,求得的无热厚度值减小,粘结层高宽比减小,改进的近似方程曲线逐渐接近 Van Bezooijen 方程曲线,其值小于 A. R. 近似方程的解。在高宽比较大时,A. R. 近似方程与改进的 Van Bezooijen 方程接近,高宽比接近 1 时基本重合。

4 有限元分析(FEA)

以不同粘结宽度的几个透镜装配体为研究对象,对它们受热时在不同粘结厚度下的应力和变形进行有限元建模分析,求得应力为 0 时的无热粘结厚度,并将仿真分析的结果与上述各解析方程求得的结果进行比较分析,验证各方程的准确性,并给出方程适用的范围。

表 2 有限元分析中使用的材料特性参数

Tab.2 Material parameters for FEA

material	E /MPa	ν	$\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$
Si	1.3×10^5	0.278	2.33
RTV	3.5	0.49	1.1
Al alloy	7.1×10^4	0.33	2.77

所有装配体所处的热环境均为 40°C 均匀温度分布,参考温度为 20°C ,材料热膨胀系数采用表 1 中的数据,其余特性参数列于表 2 中。装配体使用的材料相同,透镜曲率半径相同,只是透镜口径和厚度不同(表 3),以取得不同的粘结层高宽比。

表 3 各装配体几何尺寸

Tab.3 Geometric dimension of each assembly(mm)

Serial number	Semi-diameter	Lens thickness	Bond width
1	40	6.06	3.09
2	40	15	12.03
3	20	6.06	5.32
4	20	3	2.26

首先需要对装配体进行有限元建模。由于胶层厚度薄且材料特性难以通过试验完全获得,RTV 胶层在光机有限元建模中常常被简化处理甚至完全忽视^[13]。但是在无热粘结厚度的研究中,粘结层的特性非常重要,不能忽视。由于粘结层比较薄,且材料具有很低的体积模量,几乎不可压缩,其在受热时表现出来的弹性特性不同于其他刚体材料,在建模时需要特别注意。为了能够真实描述粘结层的弹性行为,采用详细模型^[14-15]。由于装配体和温度载荷所具有的对称性,可以建立装配体的部分模型来代替整体模型进行分析,

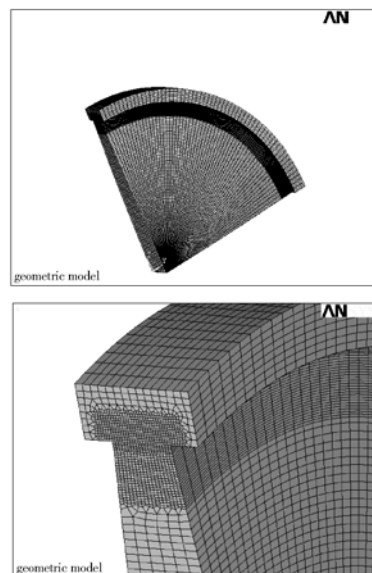


图 5 胶粘透镜有限元模型

Fig.5 Finite element model of bonded lens

图 5 为装配体的 1/4 模型,网格划分采用了 Sol-id5 单元。

在建立的有限元模型上施加温度载荷,采用直接法进行热应力耦合分析得到模型的应力分布图(图 6)。在各装配体中对粘结层厚度取多个值,进行有限元热应力分析,通过分析得到的结果建立各装配体径向应力和粘结厚度的关系,如图 7 所示。

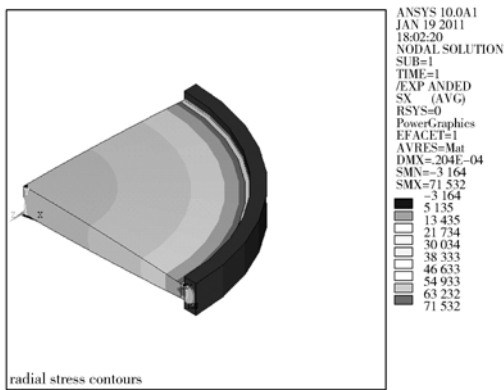


图 6 径向热应力分布

Fig. 6 Radial thermal stress distribution

从图 7 中可以看出,随粘结层厚度的增大,径向应力逐渐减小,对高宽比较大的粘结层,当其厚度在达到一定的数值后,这种变化趋于平缓,在一定的厚度范围内,径向应力数值很小,变化也很小。这种情况下,无热粘结厚度的取值可以是一个比较宽的范围。而对于高宽比较小的粘结层,径向应力的变化比较明显。

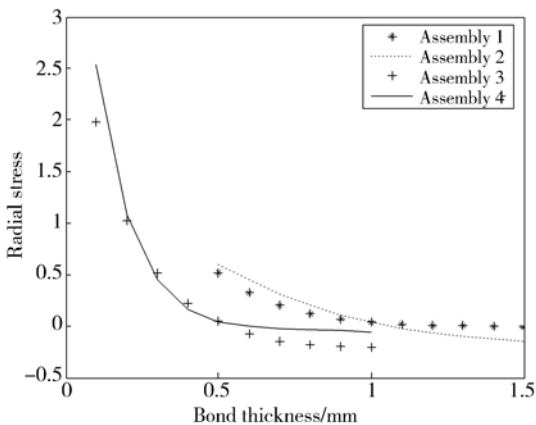


图 7 径向应力与粘结厚度关系图

Fig. 7 Plot of radial stress vs. bond thickness

对于装配体 1,通过有限元分析得到,其粘结层厚度在 1.2 mm 之后径向应力变化很小,且趋

近于 0,经插值计算得到,径向应力为 0 时的粘结厚度为 1.34 mm,即为无热粘结厚度。但是在粘结厚度达到 1.2 mm 之后径向应力已经很小且变化也很小,所以在 1.2~1.34 mm 的厚度值也可以作为无热粘结厚度。同样的方法可以得到装配体 2、3、4 的无热粘结厚度分别为 1.07,0.54,0.59 mm。

相同条件下,利用前文分析及推导的解析方程求无热粘结厚度的解析解,列于表 4 中,并与有限元仿真分析的结果进行比较。

对比表 4 中 A. R. 近似方程和改进的近似方程的结果,可以看出,两个近似方程求解的结果非常接近,改进的近似方程结果略小于高宽比近似方程。

表 4 无热粘结厚度解析解

Tab. 4 Analytic solution of athermal bond thickness/(mm)

Equation	Athermal bond thickness			
	Assembly 1	Assembly 2	Assembly 3	Assembly 4
Bayar	3.175	3.175	1.588	1.588
Modified Bayar	1.026	1.026	0.513	0.513
Van Bezooijen	1.059	1.059	0.530	0.530
Modified V. B.	1.588	1.588	0.794	0.794
A. R. approx.	1.220	1.092	0.548	0.579
Simplified approx.	1.271	1.271	0.635	0.635
Modified approx.	1.121	1.067	0.535	0.548

将表 4 的计算结果与仿真结果进行比较发现,对于装配体 2、3,粘结层的高宽比约在 1/10 左右时,改进的近似值方程计算的结果与仿真结果最为接近,而且误差非常小,在 1%之内。此时 A. R. 近似方程计算的结果也比较接近仿真结果,但其误差在 1.5%~2%之间,较改进的近似值方程稍大。装配体 1 的粘结层高宽比大约为 1/2.3,简化的近似方程计算的结果与仿真结果最为接近,但其误差在 5%左右。虽然其误差稍大,但从图 7 中的曲线可知,装配体 1 径向应力在无热粘结厚度附近变化平缓,较大的误差是可以接受的。装配体 4 的粘结层高宽比约为 1/3.8,此时 A. R. 近似方程计算的结果与仿真结果最为接近,误差约为 1.86%,此时改进的近似方程的误差约为

7%。与装配体 1 类似,此种情况可接受的误差范围也比较大。

通过以上分析可知,当粘结层的高宽比小于 1/10 及其附近时,改进近似方程的准确度相对较高;粘结层的高宽比在 1/3 和 1/10 之间时,高宽比近似方程准确度相对较高;粘结层的高宽比大于 1/3 时,简化的近似方程准确度相对较高。以上方程在各自的适用范围内具有足够的准确性。

5 结 论

基于一种新的对粘结层约束条件的假设,建立了一个无热粘结厚度的简化近似方程。考虑粘结层厚度对应变的影响,对简化近似方程进行了

修正,得出改进的近似方程。利用有限元方法对几个胶粘透镜装配体的无热粘结厚度进行了仿真求解,并与解析方程的计算结果进行了对比。对比表明,改进的近似方程适用于粘结层高宽比小于 1/10 的情况;高宽比近似方程适用于高宽比在 1/3~1/10 之间的情况;简化近似方程适用于高宽比大于 1/3 的情况。方程在各自的适用范围内都具有足够的准确性。需要指出的是,方程适用范围只是进行了粗略划分,实际各方程的适用范围并没有明显的界限。另外,无论哪个方程推导过程中都没有考虑材料特性参数随温度的变化,而假设它们是不变的。这种假设在温度变化相对很小的时候一般可以认为是正确的,但是在温度变化很大时就将会出现很大误差,那么这时近似值方程所求得的结果准确性将大大降低。

参考文献:

- [1] 《光学仪器设计手册》编辑组. 光学仪器设计手册 [M]. 北京:国防工业出版社,1971.
Optical Instrument Design Manual Editing Group. *Optical Instrument Design Manual* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1971. (in Chinese)
- [2] 苗健宇,张立平,吴清文,等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. 光学 精密工程,2008,16(9): 1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, *et al.* . Designing, manufacturing, and assembly for optical lens of mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16 (9): 1648-1653. (in Chinese)
- [3] 韩旭,吴清文,董得义,等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J]. 光学 精密工程,2010,18(1):118-125.
HAN X, WU Q W, DONG D Y, *et al.* . Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (1): 118-125. (in Chinese)
- [4] CÔTÉ P, LECLERC M, CHÂTEAUNEUF F, *et al.* . Lens barrel design of the NIRST IR camera [J]. *SPIE*, 2009, 7424: 74240E.
- [5] RYABOY V M. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics [J]. *SPIE*, 2007, 6665:66650K.
- [6] BAYAR M. Lens barrel optomechanical design principles[J]. *Optical Engineering*, 1981,20(2): 181-186.
- [7] HERBERT J J. Techniques for deriving optimal bondlines for athermal bonded mounts[J]. *SPIE*, 2006,6288:62880J.
- [8] VUKOBRATOVICH D, FETTERHOFF K A, *et al.* . Bonded mounts for small cryogenic optics [J]. *SPIE*, 2000,4131: 228-239.
- [9] KIHM H Y, YANG H S, LEE Y W, *et al.* . Athermal elastomeric lens mount for space optics [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009,13(2):201-205.
- [10] YODER P R. *Handbook of Optomechanical Engineering*[M]. Florida: CRC Press, 1997.
- [11] VUKOBRATOVICH D. New solutions in optomechanics[J]. *SPIE's oemagazine*, 2005, 5(7): 17-19.
- [12] MONTI C L. Athermal bonded mounts: Incorporating aspect ratio into a closed-form solution[J]. *SPIE*,2007,6665:666503.
- [13] 赵鹏,吴清文,卢铎,等. 航天相机主镜热特性研究 [J]. 光学 精密工程,1997,5(6):64-68.
ZHAO P, WU Q W, LU E, *et al.* . A study of the thermal response of a primary mirror in spatial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(6):64-68. (in Chinese)
- [14] MICHELS G J, GENBERG V L, DOYLE K B. Finite element modeling of nearly incompressible

bonds[J]. SPIE, 2002, 4771:287-295.

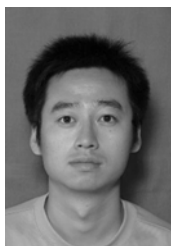
[15] 关英俊. 胶粘结固紧调焦镜有限元分析[J]. 光电工程, 2010, 37(10):1-5.

GUAN Y J. Finite element analysis of the focusing firror fastened by adhesive [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(10):1-5. (in Chinese)

作者简介:



常虹(1982—),女,河北石家庄人,博士研究生,2004年于河北大学获得学士学位,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学系统无热化、热稳定性等方面的研究。E-mail: sunshine8299@126.com



陈守谦(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2004年于东北林业大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事傅里叶光学、波前编码及图像处理等方面的研究。E-mail: csq_hit@163.com

导师简介:



范志刚(1966—),男,黑龙江嫩江人,博士后,教授,博士生导师,1989年,1992年,2004年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士与博士学位,现为哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心副主任,主要从事精密光电测试技术、气动光学等方面的研究。E-mail: fzg@hit.edu.cn

● 下期预告

一种新型离轴三反光学系统研究

薛栋林,郑立功,张峰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)

中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

为了实现某长焦距大视场离轴三反空间光学系统的研制,探讨了自由曲面光学数理模型描述,研究了基于自由曲面的新型离轴三反光学系统。针对焦距 4 500 mm,成像视场角为 11° ,系统总长与焦距的比值为 $1/3$ 的光学系统研制需求,完成了传统离轴三反光学系统和基于次镜为自由曲面的新型离轴三反光学系统设计及关键性能对比分析,在新型光学系统中次镜采用自由曲面设计,拓展了优化自由度,提升了光学系统的像差平衡能力。经过对比分析与优化选型,最终选用相对孔径 $D/f=1/9.5$ 的系统设计方案,光学系统全视场平均波像差优于 0.030λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),平均传函优于 0.434 (71.4 lp/mm),接近衍射极限,在同等条件下系统设计传函比传统离轴三反系统提高 5% 以上。在系统优化设计过程中充分考虑了技术可实现性,经过优化设计后光学系统自由曲面次镜与理论球面偏差仅为 1.1λ ,采用定制的标准球面镜结合基于数字样板的非零位检测方法即完成面形实时高精度检测,避免了大口径凸自由曲面检测难题,可以有效指导自由曲面次镜的加工过程。结果表明采用基于自由曲面次镜的新型空间光学系统,具有体积小、技术可实现性强、波像差和传函等关键性能优越等一系列优点,满足航天遥感光学系统高性能指标要求。