

文章编号:1002-2082(2009)03-0361-05

气动热环境下高速飞行器光学头罩特性分析

范志刚¹, 肖昊苏¹, 高豫强²

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:建立高速飞行器红外光学头罩在气动热环境下有限元分析模型,分析头罩在气动热环境下的物理特性和光学特性,对头罩在气动热环境下的温度场、应力场、应变场和位移场进行数值计算。计算结果表明头罩在气动热环境下温度场分布不均匀,因此头罩会产生热应力而发生形变。利用有限元分析结果,根据热光效应和弹光效应理论,对气动热环境下红外光学头罩的折射率场进行数值计算。以头罩外表面中心点折射率为例,在头罩工作时间内,通过计算得到头罩15 s后由热光效应造成的折射率改变为0.011,而由弹光效应造成的 x 方向折射率改变为0.000 107,即弹光效应造成的折射率改变量约为热光效应造成折射率改变量的0.97%,由此可知,在气动热环境下热光效应对头罩折射率的影响比较大,而弹光效应对头罩折射率的影响比较小。

关键词: 气动光学; 红外光学头罩; 有限元分析; 折射率场

中图分类号: TN206; O435.1

文献标志码: A

Characteristics analysis of high-speed aircraft optical dome in aerodynamic heating environment

FAN Zhi-gang¹, XIAO Hao-su¹, GAO Yu-qiang²

(1. Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: A finite element model of the high-speed aircraft infrared optical dome in the aerodynamic heating environment was established to analyze the dome's physical and optical properties. The temperature field, stress field, strain field and displacement field of the dome in the aerodynamic heating environment were computed numerically. The calculated results show that the temperature distribution of the dome in aerodynamic heating environment is non-uniform and thus the dome is deformable due to its thermal stress. Based on the theories of thermo-optical effect and elastic-optical effect, the refractive index field of the dome was numerically computed with the result of the finite element analysis. Taking the refractive index of the central point in the dome's outer surface as an example, the refractive index variation caused by thermo-optical effect is 0.011 while the x -direction refractive index variation caused by elastic-optical effect is 0.000 107. That is, the refractive index variation caused by elastic-optical effect is only 0.97% in the amount of the refractive index variation caused by thermo-optical effect during the dome's working time. Therefore, thermo-optical effect has greater influence on the refractive index variation of the dome than elastic-optical effect.

Key words: aero-optics; infrared optical dome; finite element analysis; refractive index field

收稿日期:2008-11-12; 修回日期:2008-12-26

作者简介:范志刚(1966—),男,黑龙江哈尔滨人,博士后,哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心教授,主要从事气动光学、光电检测方面的研究工作。E-mail:fzg@hit.edu.cn

引言

当带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在稠密大气层中高速飞行时,飞行器头罩与外部气流之间发生剧烈的相互作用形成激波、强湍流边界层等复杂流场,对光学成像探测系统形成气动热、热辐射和图像传输干扰,引起目标图像偏移、抖动、模糊,该现象称为气动光学效应^[1]。随着新军事技术变革的到来,各种无人驾驶精确制导飞行器对信息获取的精确性和时效性的依赖程度大幅度地提高,采用光学成像探测跟踪制导和追求高速飞行已成为当代各种精确制导武器的必然发展趋势。本文针对气动热环境中的光学头罩,分析了它在气动热环境下的热稳定性,并根据热光效应和弹光效应原理,考察了光学头罩在气动热环境下的折射率分布,得到的结果可以用于分析头罩内光传输特性^[2-3]。

1 气动热环境下头罩窗口分析

红外光学头罩作为红外成像导引头的关键部件之一,位于成像系统的最前端,它不仅要实现保护功能,而且还不能造成探测系统性能严重损失,因此分析气动热环境下光学头罩的特性对于提高制导精度有一定的实用意义。

1.1 气动热环境下光学头罩传热分析

根据传热学原理,红外头罩壁面单位面积的气动传热速率 q 可以表示为

$$q = h(T_r - T_w) \quad (1)$$

式中 h , T_w , T_r 分别为头罩的传热系数、壁温和恢复温度。传热系数 h 是壁面几何形状、尺寸、温度以及飞行条件等参数的函数。若没有气动传热,则恢复温度等于壁温,常用恢复因子 r 定义恢复温度 T_r :

$$T_r = T(q + 0.2r(Ma)^2) \quad (2)$$

式中 Ma 是高速飞行器的飞行马赫数。

如果壁面是热动力的,即 $b_w h / k_w \ll 1$ (式中 b_w 是头罩厚度, k_w 是热传导率),且当热辐射和热传导损失可以忽略时,传热率可以看作是头罩壁面的焓增加速率,因而有:

$$h(T_r - T_w) = \rho_w \cdot b_w \cdot C_{pw} (dT_w / dt) \quad (3)$$

式中 ρ_w 和 C_{pw} 分别是头罩材料的密度和热容量。

如果气动流场有速度变化,则 h 和 T_r 发生变化,于是有:

$$\frac{T_r - T}{T_r - T_i} = \exp\left(-\frac{h}{\rho_w \cdot C_{pw} \cdot b_w} \cdot t\right) \quad (4)$$

式中 $T_i(t=0)$ 是头罩的初始温度。

在更高马赫数(或更高的头罩温度)时,辐射热

交换应成为考虑的重要部分。此时热平衡方程变为

$$h(T_r - T_w) = \rho_w \cdot b_w \cdot C_{pw} (dT_w / dt) + \sigma \epsilon_e(T) T_w^4 \quad (5)$$

式中 $\epsilon_e(T)$ 是头罩的等效总辐射系数,它是温度的强函数; σ 为斯特藩-波尔兹曼常数。

1.2 气动热环境下光学头罩应力应变分析

设头罩材料为各向同性的弹性材料,忽略头罩自身重力的影响,则头罩在气动热环境下应力分布服从^[4]:

$$\partial \sigma_{ij} / \partial x_j = 0 \quad (6)$$

材料变形满足广义的胡克定律:

$$\epsilon_i = (\sigma_i + \gamma(\sigma_j + \sigma_k)) \quad (7)$$

式中: ϵ 为应变; σ 为应力。

1.3 热光效应对光学头罩折射率的影响

热光效应是光介质的光学性质随温度变化而发生变化的物理效应。折射率随温度变化的关系^[5-6]为

$$n_{\text{rel}}(\lambda, T(x, y, z)) = n_{\text{rel}}(\lambda, T_0) + \frac{dn_{\text{rel}}(\lambda, T)}{dT} \cdot \Delta T(x, y, z) \quad (8)$$

$$\Delta T(x, y, z) = T(x, y, z) - T_0 \quad (9)$$

式中: $dn_{\text{rel}}(\lambda, T)/dT$ 为光学材料的相对折射率温度系数,即热光系数; T_0 为参考温度; ΔT 为温度变化量; λ 为相应色光的波长; $n_{\text{rel}}(\lambda, T_0)$ 为光学材料在参考温度下的相对折射率; $n_{\text{rel}}(\lambda, T(x, y, z))$ 为光学材料在要考察温度下的相对折射率。

1.4 气动热应力(弹光效应)对光学头罩折射率的影响

光学头罩温度升高导致热应力产生,当介质中存在弹性应力或应变时,介质的光学性质(折射率)将发生变化,这就是弹光效应。应力对材料折射率的影响是一个比较复杂的问题。原来各向同性的材料受到应力的作用,其折射率会变成与单轴晶体或双轴晶体类似,应力双折射是应力作用下材料折射率变化的主要表现^[7-8]。晶体的折射率可以用折射率椭球来描述,即

$$\beta_{ij} x_i x_j = 1 \quad (10)$$

式中

$$\beta_{ij} = \frac{1}{\epsilon_{ij}} = \frac{1}{n_{ij}^2}$$

$$\text{介电张量 } \epsilon = \begin{bmatrix} n_{xx}^2 & n_{xy}^2 & n_{xz}^2 \\ n_{xy}^2 & n_{yy}^2 & n_{yz}^2 \\ n_{xz}^2 & n_{yz}^2 & n_{zz}^2 \end{bmatrix}, \text{ 折射率 } n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}, n_{yz}, n_{xz}, n_{xy} \text{ 都是 } x, y, z \text{ 的函数, 对于立方型结}$$

构的晶体,折射率 n 与应变之间的关系可以表示为

$$\Delta \begin{bmatrix} 1/n_{xx}^2 \\ 1/n_{yy}^2 \\ 1/n_{zz}^2 \\ 1/n_{yz}^2 \\ 1/n_{zx}^2 \\ 1/n_{xy}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xx} \\ \gamma_{yy} \\ \gamma_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 p_{11}, p_{12}, p_{44} 为应变光学常数。由应力和应变的关系可以得到折射率和应力之间的关系:

$$\Delta \begin{bmatrix} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{zz} \\ n_{yz} \\ n_{xz} \\ n_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: C_1, C_2, C_3 都是应力光学常数, $C_1 = n_0^3(p_{11} - 2\nu p_{12})/(2E)$; $C_2 = n_0^3(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))/2E$; $C_3 = n_0^3 p_{44}/(2G)$; E, G, ν 分别为杨氏模量、剪切模量和泊松比。对于各向同性晶体, $p_{44} = (p_{11} - p_{12})/2$, $G = E/2/(1 + \nu)$, 此时应力光学常数 C_1, C_2, C_3 即为弹光系数(晶体的物性参数)。

2 头罩气动热效应的ANSYS仿真

头罩采用ZnS晶体半球头罩,外半径为120 mm,内半径为110 mm。ZnS晶体的光学特性参数为:常温常态下折射率 $n = 2.356$ (波长 $10 \mu\text{m}$ 时),热光系数为 5×10^{-5} ,弹光系数 $p_{11} = 0.091$, $p_{12} = -0.01$, $p_{44} = 0.075$ 。ZnS晶体的物性参数为:导热系数 $\lambda = 18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比热 $p = 485 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度 $\rho = 4030 \text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量 $E = 74 \text{ GPa}$,热膨胀率为 $\alpha = 7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,泊松比 $\nu = 0.37$,屈服强度 $\sigma = 105 \text{ MPa}$,切变弹性模量为 $G = 27 \text{ MPa}$,断裂强度为 100 MPa 。头罩初始温度 $T_0 = 50^\circ\text{C}$,应力分析参考温度为 20°C ,时间步长为 1 s ,工作时间为 15 s 。利用ANSYS软件进行分析,采用热-结构耦合分析的方法,得到了头罩在 15 s 后的温度场、应力应变场分布以及头罩外侧面中心点温度随时间的变化曲线。

由 15 s 后头罩温度场分布图(图1)可知,头罩在 15 s 后温度最大可以升高至 264.164°C ,为了使探测器不发生饱和,头罩的温度必须控制在 450 K

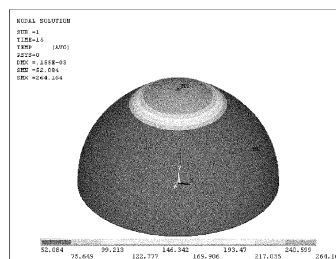


图1 15 s后头罩温度场分布图

Fig. 1 Temperature field distribution of dome after it worked for 15 s

(177°C)以下^[9]。显然,必须采用制冷措施来降低头罩的温度。除此之外,头罩在 15 s 后的温度分布是不均匀的,由于热光效应,头罩在 15 s 后的折射率场分布也是不均匀的。由 15 s 后头罩应力场分布图(图2)可知, 15 s 后头罩的最大等效应力为 41.5 MPa ,由于ZnS晶体的断裂强度为 100 MPa ,故头罩在气动热环境下将不会碎裂。由 15 s 后头罩的应变场分布以及变形场分布(图3和图4)可知,头罩在 15 s 后发生的最大的变形为 $68.5 \mu\text{m}$,由于头

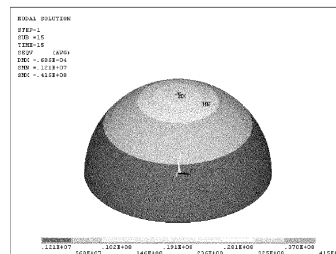


图2 15 s后头罩应力场分布图

Fig. 2 Stress field distribution of dome after it worked for 15 s

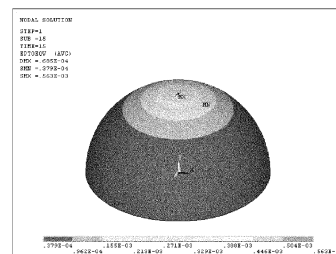


图3 15 s后头罩应变场分布图

Fig. 3 Strain field distribution of dome after it worked for 15 s

罩的工作波长为 $(8\sim 12)\mu\text{m}$,头罩的变形将会改变头罩内光传输的光程差,最终影响头罩的光传输。由头罩外侧面中心点温度随时间变化曲线(图5)可以看出,头罩外侧面中心点升温速度较快,在15 s的工作时间内,温度由 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $264.164\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

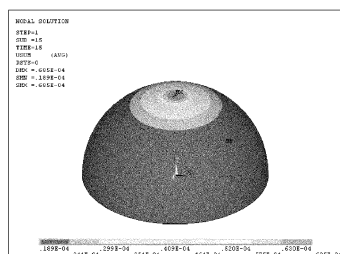


图4 15 s后头罩变形场分布图

Fig. 4 Deformation field distribution of dome after it worked for 15 s

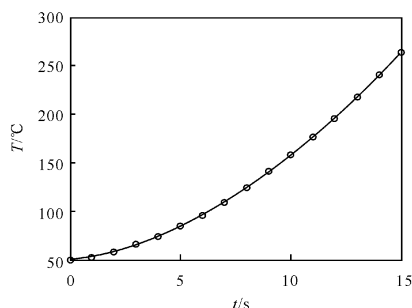


图5 头罩外侧面中心点温度随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of temperature at central point of dome's outside surface with time

3 气动热环境下光学头罩折射率场分析

由15 s后头罩温度场分布图、应力场分布图和应变场分布图可知,头罩在气动热环境下的温度场分布、应力场分布以及应变场分布是不均匀的,由于热光效应和弹光效应的影响,气动热环境下头罩的折射率场分布也是不均匀的,由上述头罩有限元模型各点的温度值以及应力应变值,根据公式(8)、(9)、(11)、(12)可以得到气动热环境下头罩有限元模型中各个点的折射率,最终可以得到气动热环境下头罩的折射率场分布。根据热光效应得到头罩外侧面中心点折射率随时间变化曲线,如图6所示。根据弹光效应算得外侧面中心点折射率随时

间变化曲线,如图7所示。

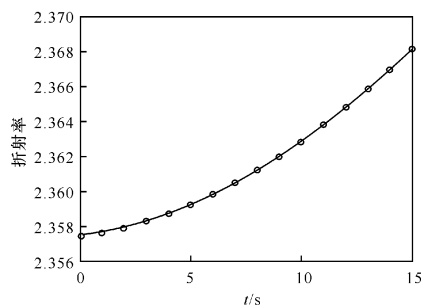


图6 头罩外侧面中心点的折射率随时间变化曲线(热光效应)

Fig. 6 Variation of refractive index at central point of dome's outside surface with time(thermo-optical effect)

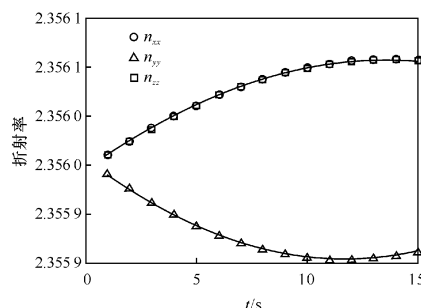


图7 头罩外侧面中心点的折射率随时间变化曲线(弹光效应)

Fig. 7 Variation of refractive index at central point of dome's outside surface with time (elastic-optical effect)

由图6可知,热光效应使得折射率增大,由图7可知,弹光效应使得 x 和 z 方向的折射率增大,而 y 方向的折射率减少,这是由于 y 方向的应力为负值,是压应力。同时由图6和图7可知,热光效应对头罩折射率的影响比较大,而弹光效应对头罩折射率的影响比较小,例如头罩外侧面中心点15 s后由热光效应造成的折射率改变为0.011,而由弹光效应造成的 x 方向折射率改变为0.000 107,只是热光效应造成折射率改变量的0.97%。

4 结论

本文采用热-结构耦合分析的方法,利用软件仿真得到了气动热环境下高速飞行器光学头罩的温度场、应力和应变场,然后根据热光效应和弹光效应得到了头罩外侧面中心点的折射率随工作时

间的变化情况。通过分析可知,在气动热环境下,头罩温度场以及热应力、应变场分布是不均匀的,由于热光效应和弹光效应,头罩的折射率场分布也是不均匀的,且热光效应对光学头罩折射率的影响远比弹光效应的影响大。因此,头罩的不均匀折射率分布将影响到头罩内的光传输,最终影响高速飞行器的制导精度。

参考文献:

- [1] 殷兴良. 现代光学新分支学科——气动光学[J]. 中国工程科学, 2005, 7(12): 1-2.
YIN Xin-liang. A new subdiscipline of contemporary optics-aero-optics[J]. Engineering Science, 2005, 7(12): 1-2. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 范志刚, 张亚萍, 苑立波, 等. 热环境中的光传输与光学校正仿真研究[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 203-206.
FAN Zhi-gang, ZHANG Ya-ping, YUAN Li-bo, et al. Emulation of optics transmission and correction in aero thermo environment [J]. Optical Technique, 2008, 34(2): 203-206. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 范志刚, 张亚萍, 裴扬威, 等. 气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 396-399.
FAN Zhi-gang, ZHANG Ya-ping, PEI Yang-wei, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aerodynamic thermal environment [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(5): 396-399. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 何友金, 张鹏, 彭军, 等. 高速红外空空导弹整流罩气动加热及应力分析[J]. 红外技术, 2007, 29(7): 373-374.
HE You-jin, ZHANG Peng, PENG Jun, et al. Aerodynamic heating and stress analysis on dome of infrared high speed air to air missiles[J]. Infrared Technology, 2007, 29(7): 373-374. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 罗传伟, 焦明印. 光学系统折射率温度效应的模拟计算[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 235-238.
LUO Chuan-wei, JIAO Ming-yin. Simulated calculation for effect of temperature on refractive index in optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 235-238. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 195-197.
JIAO Ming-yin. General conditions for thermal compensation in optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 195-197. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏. 激光窗口热效应和应力双折射的分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 575-581.
DU Shao-jun, LU Qi-sheng, SHU Bo-hong. Analysis on thermal effect and stress-birefringence of laser window[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 575-581. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 邢进华, 钱斌, 冯金福, 等. 白光干涉技术测量晶体的弹光效应[J]. 激光杂志, 2004, 25(3): 32-33.
XING Jin-hua, QIAN Bin, FENG Jin-fu, et al. Measurement of the elastic optical effect of crystal using white light interferometer[J]. Laser Journal, 2004, 25(3): 32-33. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 429-430.
MA Yi-fei, ZHAO Wen-ping. Effects of window radiation on infrared imaging detection[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(3): 429-430. (in Chinese with an English abstract)