

整流罩气动加热对红外成像系统像质的影响

关英姿

(哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 导弹高速飞行时, 整流罩的气动加热会导致整流罩具有较高的温度, 并且承受较大的气动载荷。利用 ANSYS 软件计算在 500℃ 高温和 4 个大气压气动载荷下热压硫化锌红外平板窗口和同心球形整流罩的变形情况, 并采用 ZEMAX 光学设计软件分析了变形对红外成像系统像质的影响。针对视场角 13°、焦距 70 mm、F 数为 1 的红外长波成像系统进行了气动加热影响下的像质分析, 结果表明: 红外平板窗口的变形对成像系统所有视场的调制传递函数(16 lp/mm)几乎没有影响; 同心球形整流罩的变形导致成像系统的调制传递函数最大下降了 2.56%。

关键词: 气动加热; 红外成像系统; 成像质量; 平板窗口; 球形整流罩

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0290-04

Effect of pneumatic calefaction of the dome on IR imaging system quality

Guan Yingzi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: During the high speed flight of a missile, its dome was subject not only to high temperature, but also to load caused by pneumatic calefaction. In this work, the deform of both the planar window and the spherical dome made of ZnS material were ANSYS-based calculated at a temperature of 500℃ and at the pneumatic pressure of 4 atm. Furthermore, the effect of deform on IR imaging system quality were analyzed by ZEMAX optical design software. As to the IR long wavelength imaging system with optical parameters, field of view of 13°, focal length of 70 mm, and F number of 1, effect of pneumatic calefaction on imaging system quality was discussed. It has been demonstrated that the modulation transfer function (MTF) (16 lp/mm) in all field of view is insensitive to deform of IR planar window. However, deform of spherical dome could cause MTF declined by maximum 2.56%.

Key words: pneumatic calefaction; IR imaging system; imaging quality; planar window; spherical dome

0 引言

红外成像导引头的光学系统由整流罩和光学镜头组成。对于超声速和高超声速导弹来说,导弹在大气层内高速飞行时所引起的气动加热效应,将使整流罩加热到较高的温度^[1];同时,根据气动力学原理,高速飞行的导弹整流罩承载着一定的气动压力,这可能引起其头罩的局部变形,从而影响整个光学系统的成像质量^[2-4]。

目前,整流罩多采用球形、平板或者由多块平板拼接而成的结构^[5-7],文中主要针对平板红外窗口和同心球形整流罩两种结构形式进行分析,利用 ANSYS 软件计算在 500℃高温和 4 个大气压气动载荷下两种整流罩的变形情况,在此基础上分析其对整个红外成像光学系统像质的影响。

文中的研究基于以下条件:

(1) 工作波段为长波红外,主波长 10 μm。

(2) 整流罩表面最高温度 500℃,光学镜头工作温度 -40~80℃。

(3) 整流罩材料为热压 ZnS,材料的折射率温度系数 $dn/dt=5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;热膨胀系数为 $7.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (20~600℃时),密度为 $4.09 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 74.5 GPa,抗弯强度为 120 MPa,抗剪强度为 60 MPa,泊松比为 0.29;努普硬度为 160 kg/mm²。

(4) 整流罩材料折射率的变化只考虑热光效应,忽略弹光效应的影响。

1 带有红外平板窗口的整流罩

1.1 红外平板窗口变形分析

红外平板圆形窗口直径 $\phi 110 \text{ mm}$,厚度 8 mm,平板窗口与光学镜头的光轴成一定角度,考虑平板窗口与光学镜头的光轴分别成 35°和 45°两种情况,后文称平板倾斜 35°和 45°。

利用 ANSYS 软件计算平板窗口在 500℃温度载荷和 4 个大气压的气动力载荷作用下的变形情况,其中平板窗口的温度载荷是通过瞬态热分析计算的,加载 15 s,分析输入项如下:(a) 平板前表面 500℃黑体辐射(出射率为 1),后表面 20℃、出射率为 0.2 的辐射;(b) 平板周围金属的后表面辐射 20℃、出射率为 0.85;(c) 平板前表面输入热流密度为

0.32 W/mm²。4 个大气压的气动载荷是以面压力的形式施加上的,将瞬态热分析的温度分布结果作为初始条件,进行静态气动载荷加载,最终结果包括两方面的综合效应。图 1~图 2 给出了倾斜 35°和 45°的平板窗口的变形图。

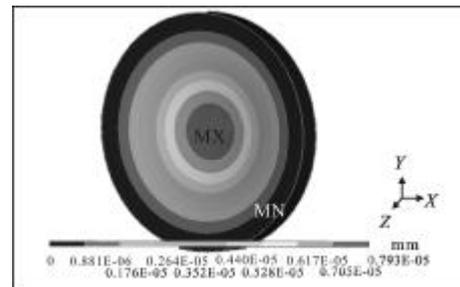


图 1 平板倾角为 35°时的变形图

Fig.1 Deformation of 35° tilted planar window

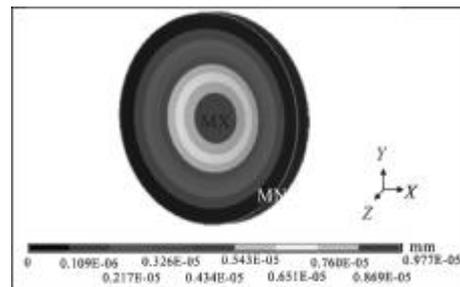


图 2 平板倾角为 45°时的变形图

Fig.2 Deformation of 45° tilted planar window

从图中可看出,平板中心的变形最大,且变形方向为内凹。平板倾斜 45°时最大变形量为 9.77 μm,平板倾斜 35°时最大变形量为 7.93 μm。

利用软件对变形后的窗口面形进行拟合,发现变形后平板窗口变成了内凹的球面窗口,45°和 35°倾斜平板窗口变形后的面形方程为(单位:mm):

$$x^2+y^2+z^2=61521.16^2$$

$$x^2+y^2+z^2=65457.88^2$$

1.2 对成像质量的影响分析

假设物点位于无穷远处,整流罩后的光学镜头为理想透镜,视场角为 13°,焦距为 70 mm, F 数为 1,将理想透镜作为系统的孔径光阑。

利用 ZEMAX 软件对含整流罩的光学系统的成像质量进行分析。图 3 和图 4 分别给出了 20℃、1 个大气压下和 500℃、4 个大气压下,具有 45°的平板窗口的光学系统的点列图。

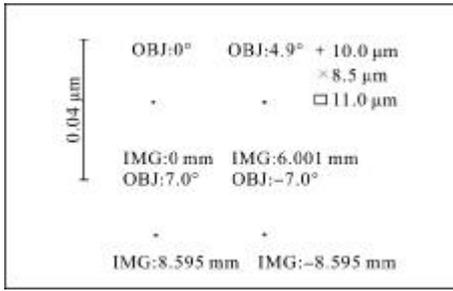


图 3 20°C、1 个大气压时光学系统的点列图
Fig.3 Spot diagram of system at 20°C and 1 atm

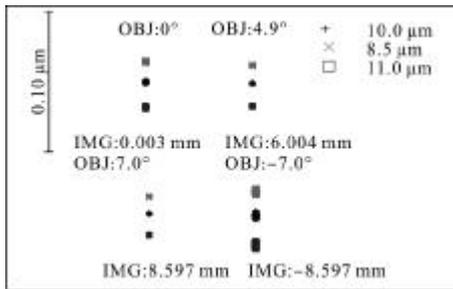


图 4 500°C、4 个大气压差时光学系统的点列图
Fig.4 Spot diagram of system at 500°C and 4 atm

由图中可见,500°C高温和 4 个大气压导致光学系统 0 视场处弥散斑 RMS 点半径由 $3.1 \times 10^{-11} \mu\text{m}$ 增加到 $0.014 \mu\text{m}$, 0.7 视场处弥散斑 RMS 点半径由 $5.4 \times 10^{-12} \mu\text{m}$ 增加到 $0.013 \mu\text{m}$, 1 视场处弥散斑 RMS 点半径由 $5.1 \times 10^{-11} \mu\text{m}$ 增加到 $0.017 \mu\text{m}$ 。

图 5 给出了 20°C、1 个大气压下,采用 45°倾斜平板窗口的整个光学系统的传递函数图。对该光学系统在 500°C、4 个大气压下的调制传递函数计算表明,在空间分辨率小于等于 16 lp/mm 的范围内各视场的调制传递函数值的最大相对变化率仅为 0.006%,因此可认为调制传递函数基本没变。

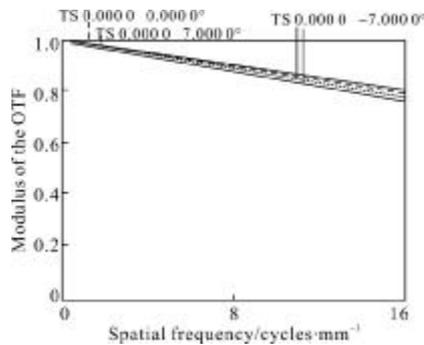


图 5 20°C、1 个大气压时光学系统的调制传递函数图
Fig.5 MTF curve of system at 20°C and 1 atm

2 同心球形整流罩

2.1 高温对整流罩光学结构参数的影响

高温对整流罩光学结构参数的影响应考虑以下因素:

- (1) 高温会导致整流罩发生热膨胀,从而整流罩前后表面的曲率半径变大,整流罩的厚度增加。
- (2) 整流罩材料的绝对折射率随温度的变化而变化,仅考虑温度变化的一阶量的影响。

不同温度下整流罩的光学结构参数如表 1 所示。

表 1 不同温度下整流罩的光学结构参数

Tab.1 Optical parameters of the dome at different temperatures

Parameter	T/°C	r ₁ /mm	r ₂ /mm	d/mm	n(λ=10 μm)
	20	148	140	8	2.198 62
Value	420	148.464 7	140.439 6	8.025 1	2.218 97
	500	148.557 6	140.527 5	8.030 1	2.223 00

2.2 应力和变形计算

利用 ANSYS 软件计算了整流罩在 500°C 温度载荷、4 个大气压气动载荷作用下,且整流罩非自由膨胀时,整流罩内部的应力分布,如图 6 所示,此种条件下整流罩的变形如图 7 所示,计算时温度载荷和压力载荷的施加方式与前面所述的平板窗口的相同,均给出的是 15 s 后的结果。

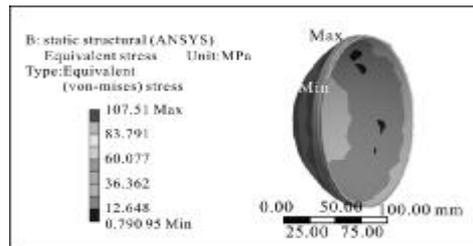


图 6 整流罩在 500°C、4 个大气压下的应力分布
Fig.6 Stress distribution of dome at 500°C and 4 atm

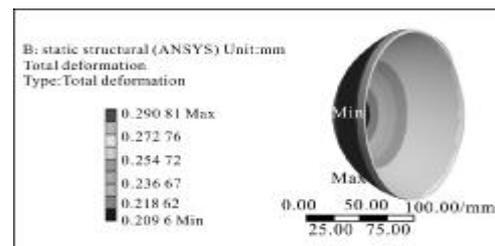


图 7 整流罩在 500°C、4 个大气压下的变形图
Fig.7 Deformation of dome at 500°C and 4 atm

2.3 对成像质量的影响分析

文中基于以下两个条件利用 ZEMAX 光学设计软件来分析光学系统成像质量:

(1) 物点位于无穷远处;

(2) 由于球形整流罩产生的像差通常由后面的光学镜头来平衡,所以,整流罩后的光学镜头没有采用理想透镜,而是设计了一个与整流罩能够平衡像差的光学镜头,镜头的视场角为 13° , 焦距为 70 mm, F 数为 1, 镜头的第一面为系统的孔径光阑。

图 8 示出了研究球形整流罩变形对整个红外成像系统像质影响时所采用的光学系统结构图。表 2 给出了该红外成像系统在不同温度下典型视场在空间分辨率为 16 lp/mm 处的调制传递函数。

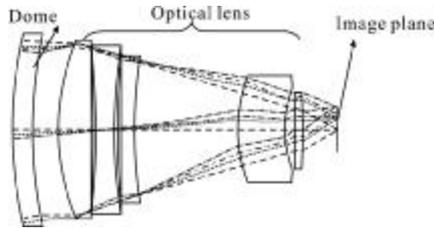


图 8 球形整流罩和光学镜头结构图

Fig.8 Structure diagram of dome and optical lens

表 2 不同温度下光学系统的调制传递函数

Tab.2 MTF of the system at different temperatures

T/°C	MTF(16 lp/mm)				
	0 FOV	0.7 FOV Tangential	0.7 FOV Sagittal	1 FOV Tangential	1 FOV Sagittal
60	0.741 60	0.726 6	0.733 6	0.639 5	0.680 3
220	0.743 50	0.723 0	0.735 0	0.634 3	0.676 8
260	0.743 80	0.722 0	0.735 1	0.633 2	0.676 3
300	0.744 04	0.720 9	0.735 3	0.631 6	0.675 1
340	0.744 20	0.719 7	0.735 3	0.630 0	0.673 9
380	0.744 31	0.718 5	0.735 3	0.628 4	0.672 6
420	0.744 35	0.717 2	0.735 2	0.626 6	0.671 2
460	0.744 32	0.715 8	0.735 1	0.624 9	0.669 8
500	0.744 24	0.714 4	0.734 8	0.623 1	0.668 3

由表中可见,当整流罩温度在 60~500°C 工作时,整个光学系统 0 视场空间频率为 16 lp/mm 处的 MTF 变化 0.36%, 0.7 视场空间频率为 16 lp/mm 处的子午方向 MTF 下降 1.68%, 弧矢方向 MTF 变化 0.23%, 1 视场空间频率为 16 lp/mm 处的子午方向 MTF 下降 2.56%, 弧矢方向 MTF 下降 1.76%。

3 结 论

文中针对超声速或高超声速导弹飞行时可能出现的 500°C 高温和 4 个大气压的气动载荷环境,研究了此种工作环境下整流罩对光学系统成像质量的影响。针对带有平板红外窗口和同心球形两种形状整流罩进行了研究,考虑了高温下整流罩尺寸的自由膨胀,整流罩材料折射率随温度的变化,在高温产生的温度应力和压力应力下整流罩的变形等因素。利用 ZEMAX 光学设计软件分析了上述变化对光学成像系统成像质量的影响,得到如下结论:

(1) 对于带有平板红外窗口的整流罩,在 500°C 高温和 4 个大气压气动压力载荷的作用下,平板窗口变成了曲率半径很大的内凹的球面窗口,并且平板窗口倾角不同,平板窗口的变形量不同,倾角在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 之间时, 45° 倾角的平板变形最大。平板窗口的变形对成像系统的弥散斑有影响,其导致的调制传递函数的最大相对变化率仅为 0.006%,可认为对成像系统的调制传递函数基本没有影响。

(2) 对于同心球形整流罩,在 500°C 高温和 4 个大气压气动压力载荷作用下,整流罩的变形及其折射率的变化导致其焦距、像差发生变化,从而引起整个光学系统的调制传递函数发生变化,最大下降 2.56%。

参考文献:

- [1] He Youjin, 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):373-376. (in Chinese)
- [2] Chen Lianzhong, Zhang Jiaxiang, Fei Jindong. Experiment research on the aerodynamic heating effect on the infrared imaging [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (1): 36-38. (in Chinese)
- [3] Lu Xiaofen, Zhang Tianxu, Hong Hanyu. Image correction method with pixel deviation caused by aero-optics effects[J]. Infrared and laser Engineering, 2007, 36 (5): 758-761. (in Chinese)
- [4] Zhao Hongwei, Hou Tianjin, Zhu Bin. Experimental research of aerodynamic effects of spinel domes[J]. Infrared and laser Engineering, 2012, 41(2): 297-303. (in Chinese)
- [5] Claude K A. Window and dome technologies and materials III[C]//SPIE, 1992, 1760: 338-356.
- [6] Tropf W J, Thomas M E, Frazer R K. Windows and domes: past, present, and future[C]//SPIE, 2003, 5078: 80-89.
- [7] Mollart T P. The development of CVD infrared optics from planar windows to missile domes[C]//SPIE, 2003, 5078: 127-136.