

氟化镁共形整流罩热障效应分析及试验验证

张天翼^{1,2}, 魏 群¹, 王 超¹, 虞林瑶¹, 朱瑞飞¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 围绕氟化镁共形整流罩的热障效应展开分析, 模拟了真实飞行状态, 建立了整流罩气动加热及其内部传热过程的有限元分析模型, 计算不同飞行速度下整流罩的气动热载荷及平均温度; 再根据红外探测基本原理, 分析各个温度下整流罩的热辐射及其对探测系统成像质量的影响, 计算探测器达到饱和状态时整流罩的临界温度, 即研究热障效应产生机制; 最后用成像试验对分析结果加以验证。分析结果表明, 对于该红外成像探测系统, 氟化镁共形整流罩的临界温度约为 460 K, 即在 $Ma=3$ 的末制导阶段及 $Ma=4$ 的情形下, 热障效应显著, 若想进一步加快红外成像制导武器的飞行速度, 必须对热障效应加以抑制和校正。各项结论对认识热障效应机理及其校正方法有一定借鉴意义。

关键词: 共形光学; 氟化镁; 整流罩; 热障效应

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0220001

Thermal barrier effect analysis of magnesium-fluoride conformal dome and the experimental validation

Zhang Tianyi^{1,2}, Wei Qun¹, Wang Chao¹, Yu Linyao¹, Zhu Ruifei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper focuses on the thermal barrier effect of magnesium-fluoride conformal dome. Firstly, the real flight process was simulated and a finite element analysis model of the fairing aerodynamic heating and internal heat transfer were established under different flight speeds, the aerodynamic-thermal loads and the average temperature of dome was calculated. Secondly, according to the basic principles of infrared detection, each temperature dome heat radiation and its effects on the imaging quality of the detection system were analyzed, the critical temperature of dome was calculated when detector reached the saturation condition to study the mechanism of the thermal barrier effect. Finally, imaging tests were carried out for validation of analytical results. The results show that the critical temperature of dome when detector reaches the saturation condition is about 460 K, the thermal barrier effect is remarkable under the condition of $Ma=4$ and final guidance in $Ma=3$. In order to

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-03

基金项目: 总装预研项目

作者简介: 张天翼(1985-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事导头光机结构设计方面的研究。Email: wsbnxh@126.com

导师简介: 贾宏光(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事精编末制导方面的研究。

accelerate the infrared imaging guided weapons flight speed, the thermal barrier effect must be corrected. The conclusions has certain reference for understanding the mechanism of the thermal barrier effect and correction methods.

Key words: conformal optics; magnesium-fluoride; dome; thermal barrier

0 引言

共形整流罩是以提高系统空气动力学性能为目的,平滑适应平台外形的光学窗口。和传统的球形整流罩相比,共形整流罩能有效降低导弹在高速飞行时的空气阻力,增大射程和速度。但是随着飞行速度的提高,来流空气受到整流罩的强烈压缩,整流罩外表面边界层内空气大量动能转化为热能,即产生气动加热现象。飞行速度越高,气动加热现象越严重,整流罩温度越高,当整流罩由于自身温度过高而产生大量热辐射并掩盖目标信息时,即产生热障效应^[1]。热障效应极大影响了红外成像探测系统的成像质量和探测精度,必须加以分析和抑制。

近年来,国内外相关研究机构对整流罩的热障效应开展了大量研究。国外对于红外整流罩的气动加热研究较早,Edward 等人建立了红外导引头整流罩的气动热辐射模型,计算了在复杂条件下整流罩的热光学特性及其温度分布^[2];John 等人进一步对侧窗型导引头窗口的气动光学效应进行了分析^[3];国内方面,费锦东最早对各种高速飞行过程中产生的气动效应进行了分析,并提出了几种初步的校正方法^[4];范志刚和张亚萍等人对红外窗口的热辐射效应进行了分析,计算了头罩前方温度场和应力场的非均匀性对折射率的影响^[5];张义广等人针对硫化锌为材料的红外光学整流罩进行了热障和热震试验,给出了硫化锌整流罩的热学性能评价指标^[6];赵洪卫等人针对尖晶石为材料的红外光学整流罩进行了气动光学效应分析,并进行了成像验证试验^[7],姜振海等对共形整流罩在高速飞行时产生的气动热载荷进行了风洞试验^[8]。

但到目前为止关于热障效应的研究工作大多数是一些定性分析以及工程上的验证试验,并未充分研究热障效应的产生机制以及具体的校正方法,也没有针对氟化镁为材料的整流罩进行的试验和分

析。文中使用氟化镁为材料的红外共形整流罩,模拟真实飞行状态下整流罩的热载荷并计算整流罩的平均温度,分析热障效应的产生机制,定量的计算探测器饱和状态下整流罩的临界温度,最后用成像试验验证仿真结果。

1 超声速条件下共形整流罩气动热仿真

热障效应的产生是由于整流罩受到气动加热影响,其温度上升产生红外辐射。为了分析热障效应,首先应计算整流罩所处的热环境,进而求得整流罩的平均温度。文中使用计算流体力学软件求解整流罩外部流场,然后将外流场的温度分布作为气动热载荷加载在整流罩外表面,利用有限元分析软件求解整流罩传热过程。

1.1 整流罩外流场温度计算

文中使用长径比为 1:1 的椭球形整流罩,弹径取 0.2 m,弹长取 1.2 m,计算域取 X, Y, Z 方向为 $15\text{ m} \times 12\text{ m} \times 12\text{ m}$,边界取压力远场,整流罩及弹体表面设为无滑移壁面,边界层内网格最小厚度取 0.2 mm,流域内网格划分如图 1 所示。计算条件取海拔高度 $h=10\text{ km}$,环境温度为 223 K,当地空气压强 $P=26\ 435\text{ Pa}$,大气等效成是理想气体,空气密度 $\rho=0.412\text{ kg/m}^3$,黏度 $\mu=1.46 \times 10^{-5}\text{ Pa} \cdot \text{s}$,分别计算 $Ma=2, Ma=3, Ma=4$ 的外流场温度分布情况。图 2 为 $Ma=2$ 情形下外流场温度分布,其中头部驻点温度为 530 K。

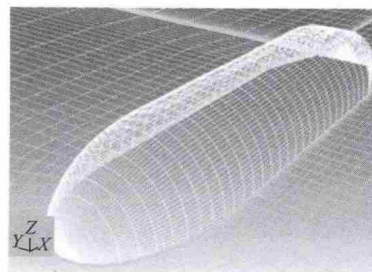


图 1 整流罩外流场网格划分

Fig.1 Mesh of outer flow field

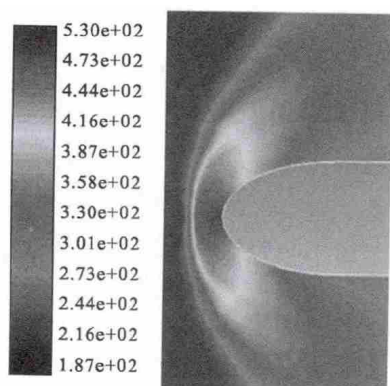


图 2 $Ma=2$ 情形下外流场温度分布

Fig.2 Temperature distribution of outer flow field in case of $Ma=2$

1.2 共形整流罩瞬态热传导计算

在得到整流罩外流场的温度分布之后, 将其作为气动热载荷加载于整流罩外表面, 计算特定时间内整流罩外表面至内表面的瞬态热传导过程, 得到沿厚度方向的整流罩温度分布及其平均温度。以最大速度为 $2Ma$ 为例, 计算传热时间为 $15s$ 后整流罩的温度场分布。

利用有限元分析软件 ansys 建立椭球形整流罩的瞬态热传导模型, 氟化镁的材料属性为: 热导率 $\lambda=14.7(W/(m \cdot K))$, 比热容 $c=485(J/(kg \cdot K))$; 初始温度状态为 $T_0=230K$ 恒温, 假定传热时间设为 $15s$, 计算热量由外表面向内表面的传递结果, 得到整流罩的温度分布, 并将各区域温度加权平均, 最终得到整流罩的平均温度。由于整流罩外表面的热流密度由驻点向两边逐渐递减, 整流罩沿厚度方向的温度分布不均匀, $2Ma$ 条件下整流罩温度分布如图 3 所示。类似的, 对 $Ma=3$ 及 $Ma=4$ 情形进行分析, 分别计算驻点温度和整流罩的平均温度。图 4 表示三种不同飞行速度下的整流罩平均温度随时间变化曲线, 结果说明整流罩平均温度的增速随速度的加快显著增大。

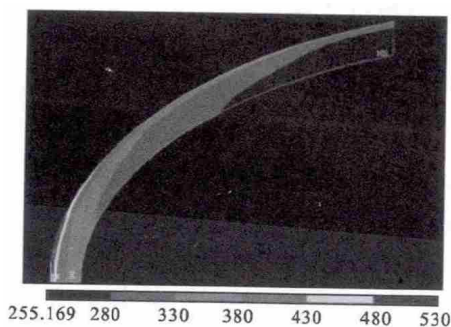


图 3 $Ma=2$, 传热时间为 $15s$ 情形下整流罩内部温度分布

Fig.3 Temperature distribution of dome in the case of $Ma=2, t=15s$

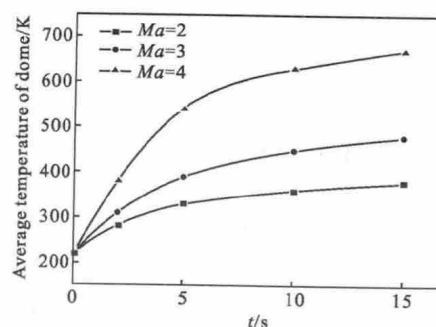


图 4 三种情形下整流罩温度随时间变化

Fig.4 Temperature change over time of three cases

2 热障效应机理分析

为了对热障效应的机理加以分析, 定量描述红外探测系统所能容忍的整流罩的极限温度, 利用红外成像探测的基本原理, 根据某一中波红外成像系统为例, 计算探测器饱和状态下整流罩的临界温度。具体计算过程是首先根据探测器靶面位置计算探测器所能接收的辐射强度, 再由探测器积分时间计算探测器所接收光子数, 并与满载光子数比较, 最终得出探测器饱和条件下整流罩的临界温度。

2.1 探测饱和状态条件下整流罩临界温度计算

由普朗克公式:

$$R_{\lambda T} = \frac{\varepsilon_{\lambda} c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\lambda} = 0.72$ 为氟化镁的辐射发射率; c_1, c_2 分别为第一辐射系数和第二辐射系数, 其中 $c_1 = 3.74 \times 10^{-12} (W/cm^2)$, $c_2 = 1.384 (K \cdot cm)$; λ 为对应的波长; T 为整流罩的平均温度。根据光学系统条件可知, 整流罩与探测器靶面同轴, 设整流罩等效辐射面积为 A_T , 整流罩与靶面的相对距离为 R , 光学系统的透过率为 τ_0 , 则探测器靶面接收的辐射强度 E 为:

$$E = \frac{R_{\lambda T}}{\pi R^2} A_T \tau_0 \quad (2)$$

若探测器靶面接收面积为 A , 则接收面辐射功率可以表示为:

$$P = EA \quad (3)$$

则单位时间内整流罩热辐射在探测器靶面上所产生的光子数为:

$$N = \frac{P}{\kappa} = \frac{EA}{hc/\lambda} = \frac{A_T A \tau_0 \eta}{\pi R^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda T} d\lambda \quad (4)$$

式中: κ 为单个光子所具有的能量; η 为探测器量效

率,设探测器的积分时间为 t_0 ,则一个积分时间内共形整流罩热辐射产生的光子数为:

$$N_i = N t_0 \quad (5)$$

若探测器饱和状态下接收的光电子数为 $N_{\max}$,则:

$$N_i = \frac{1}{2} N_{\max} \quad (6)$$

将公式(4)和公式(5)代入公式(6),并从中求解温度 T ,即积分时间所对应的探测器饱和状态下整流罩的临界温度。以文中所使用的某中波红外光学系统为例,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 某中波红外成像探测系统参数

Tab.1 An mid-infrared imaging detection system parameters

Parameter	Value
Wavelength range/ μm	3.7-4.3
Fairing radiation equivalent area/ cm^2	400
Transmission ratio of optical systems	0.5
Target surface and dome axial spacing	80
Diameter of the target surface/mm	12.5
Number of pixels	256×256
Pixel area/ μm^2	25×25
F number of optical system	2.1
Detector quantum efficiency	0.6
Detector integration time/ μs	6100
Number of electrons of saturated detector (e8)	12.1

最终解得探测器饱和状态下整流罩临界温度约为 430 K。由表 1 及公式(3)可以看出,整流罩临界温度最主要取决于探测器饱和电子数,因此在探测器相关参数已知的情况下,该计算方法及结论同样适用于其他红外成像系统。

2.2 热障效应分析

根据前面的分析可知,当整流罩受气动加热影响而温度升至探测器饱和状态下的临界温度时,即产生热障效应。因此,热障效应分析即明确在不同飞行速度下整流罩是否能够到达临界温度以及到达临界温度所需要的时间。

由图 5 可知,整流罩平均温度随飞行速度和传热时间的增加而显著增大,可用多项式拟合的方法计算平均温度的近似关系式,令:

$$T = T_0 + k_1 M t + k_2 M t^2 \quad (7)$$

其中

$$T_0 = 220, M = Ma^2 \quad (8)$$

拟合结果为 $k_1 = 5.45, k_2 = -1.4$, 令:

$$T = T_{\text{boundary}} = 430 \text{ K} \quad (9)$$

从而解得各个马赫数下整流罩达到临界温度所需要的时间:

$$t = \begin{cases} \infty, Ma=2 \\ 9.8, Ma=3 \\ 3.6, Ma=4 \end{cases} \quad (10)$$

由公式(10)可知, $Ma=2$ 时不会产生热障效应;对于 $Ma=4$ 的情况,整流罩升温迅速,只能通过窗口制冷的方法满足成像探测的要求。而对于 $Ma=3$ 的情况,前半段整流罩温度低于临界温度,在 10 s 之后才产生热障效应。

由公式(5)可知,探测器产生光子数与帧积分时间成正比,因此可以通过适当降低帧积分时间的方法来抑制末制导阶段的热障效应。令整流罩热辐射在一个积分时间内在探测器靶面产生的光子数为常数,有:

$$N_i = \frac{1}{2} N_{\max} = \text{const} \quad (11)$$

并代入公式(6)中,此时该式中存在整流罩平均温度 T 及帧积分时间 t_0 两个未知数,因此帧积分时间调节公式取决于整流罩的瞬时温度,温度越高,积分时间越短。将公式(11)和(4)代入公式(6)中,并将 $R_{\lambda T}$ 近似得看成是整流罩平均温度 T 的单值函数,整理得:

$$\frac{A_f A_{\tau_0} \eta}{4 F^2 h c} \cdot \frac{1}{2} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda_5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \cdot t = \frac{1}{3} N_{\max} \quad (12)$$

则积分时间自适应校正公式为:

$$t = \frac{C_2}{C_1} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right) \quad (13)$$

其中, $C_1 = \frac{A_f A_{\tau_0} \eta}{4 F^2 h c} \cdot \frac{1}{2} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5}$, $C_2 = \frac{1}{3} N_{\max}$ 。

2.3 热障效应成像试验

为了验证热障效应分析及整流罩临界温度的计算结果,对氟化镁整流罩的热障效应进行成像试验模拟。试验流程如下:将整流罩置于高温烤箱中加热至一定温度,然后迅速置于成像光路中,随着整流罩的自然冷却,获取整流罩处于各温度状态下探测器成像效果图。热障效应成像试验光路图如图 5 所示,主要包括红外探测器,光学系统,氟化镁整流罩以及目标模拟器。其中目标模拟器采用 MRTD 测试仪,模拟目标条纹温差为 0.1 K。

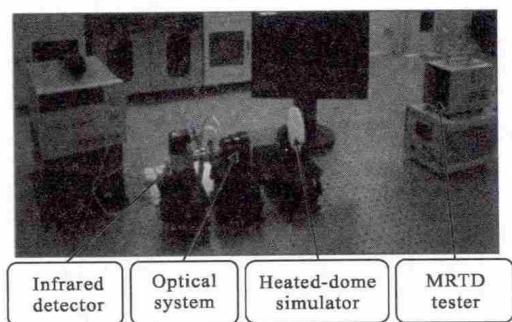
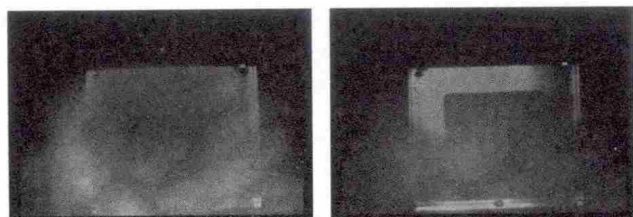


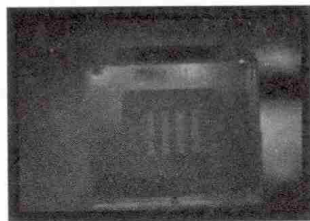
图5 热障成像试验系统示意图

Fig.5 Thermal barrier imaging test system

根据第一节中整流罩瞬态传热过程的计算结果,可先将整流罩稳态加热到 650 K,再置于系统光路中成像。试验结果表明,当整流罩温度在 600 K 左右时,探测器完全饱和;当整流罩温度下降到 470 K 左右时,热噪声依然较强,无法辨别目标条纹,如图 6(a)所示;而当温度降低到 460 K 时,图像明显清晰,可勉强分辨目标条纹,如图 6(b)所示;当整流罩温度下降到 340 K 以下时,热障效应完全消失,如图 6(c)所示。热障试验结果表明,整流罩临界温度应该在 460 K 左右,比理论预测值高 30 K 左右。



(a) 整流罩平均温度 $T=470\text{ K}$ (b) 整流罩平均温度 $T=460\text{ K}$
(a) Average temperature of dome $T=470\text{ K}$ (b) Average temperature of dome $T=460\text{ K}$



(c) 整流罩平均温度 $T=340\text{ K}$
(c) Average temperature of dome $T=340\text{ K}$

图6 热障效应成像试验结果

Fig.6 Results of thermal barrier effect of imaging experiments

3 结论

文中通过模拟氟化镁共形整流罩气动加热过

程,结合红外成像探测基本原理,定量计算探测器饱和状态下的整流罩临界温度,分析热障效应产生机制并用成像对比试验加以验证。分析结果表明,对该红外成像探测系统,探测器饱和状态下氟化镁共形整流罩的临界温度大约为 460 K,根据瞬态传热结果可知,当 $Ma=2$ 时及 $Ma=3$ 的前半段不会产生热障效应,在 $Ma=3$ 的末制导阶段及 $Ma=4$ 时会产生热障效应。各项结论对于进一步揭示热障效应产生机理及红外精确制导武器的研制有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] Yin Xingliang. Aero-optical Principle [M]. Beijing: CAPH, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Edward F. Analysis method to calculate window heating effects on IR seeker performance [C]//SPIE, 1993, 2286: 493-496.
- [3] Pond J E, Welch C T, Sutton G W. Side mounted IR window aero-optical and aerothermal analysis [C]//SPIE, 1999, 3705: 266-275.
- [4] Fei Jindong. Preliminary analysis of aero-optics effects correction technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(5): 192-195. (in Chinese)
费锦东. 气动光学效应校正技术初步分析[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(5): 192-195.
- [5] Zhang Yaping, Fan Zhigang, Liu Jinjiang. Study on aero-optical effect in the terminal infrared guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(6): 487-490. (in Chinese)
张亚萍, 范志刚, 刘金强. 红外末制导中的光学效应分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(6): 487-490.
- [6] Zhao Hongwei, Hou Tianjin, Zhu Bin. Experimental research of aerodynamic effects of spinel domes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 297-301. (in Chinese)
赵洪卫, 侯天晋, 朱斌. 尖晶石整流罩气动效应研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 297-301.
- [7] Zhang Yiguang, Feng Zhigao, Yang Jun. Thermal property assessment experiment of the optic dome [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 1314-1318. (in Chinese)
张义广, 冯志高, 杨军, 等. 超声速红外长波光学整流罩设计技术研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 1314-1318.
- [8] Jiang Zhenhai. Wind tunnel experiment of supersonic conformal dome and its optical and structure characteristics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (9): 101-140. (in Chinese)
姜振海. 超声速共形整流罩风洞试验及其光机特性[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 101-140.