

温度箱入射窗方案与温度场模拟

张亮亮,王高明,郭 城,杨志文
(长春理工大学,吉林 长春 130022)

摘 要:介绍了夜视仪可靠性试验中温度应力试验箱入射窗的结构方案,并通过其上的加热器加热避免低温造成内层窗口玻璃结霜,且确保光通道中温度梯度尽量均匀,计算加热器所需功率,并使用 ANSYS 软件对温度场进行模拟。

关键词:入射窗;加热器;温度梯度

中图分类号:TP203;TK11⁺2

文献标识码:A

Scheme and Temperature Field Simulation of the Incident Window of Temperature Chamber

ZHANG Liang-liang, WANG Gao-ming, GUO Cheng, YANG Zhi-wen
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The scheme of the incident window of temperature test chamber with imposing temperature stress in the night vision reliability test is introduced, it mainly used heat exchanger to avoid inner window glass frosting caused by the low-temperature, but to ensure that temperature gradient is small on the optical channel, calculate the needed power and use ANSYS10.0 to simulate the temperature field.

Key words: incident window; heat exchanger; temperature gradient

1 引言

温度箱的入射窗口是连接常温光应力源与施加温度的被试品的光通道。测试目标的成像光线可以看作是与窗口表面平行的平面光波,由光学理论知,初射波面与入射波面之间是等光程的。当平面波入射到存在非均匀温度场的窗口和传输介质时,由于镜面畸变和折射率梯度的变化,使出射后的等光程波面偏离了理想波面,平面波发生了畸变。因此对窗口玻璃的均匀性、面形及装卡应力等要求较严。此外,由于窗口内外温差大,使窗口材料在径向和轴向造成差分膨胀或收缩^[1],低温时需要用加热装置以防止窗口内层玻璃结霜^[2];在光通道中温度梯度引起的沿轴向的介质不均匀不产生光线偏折,而沿径向的介质不均匀会使入射光产生波面弯曲与相位畸变等像质问题^[3],因此入射窗方案要考虑各因素使对波前影响达最小。

2 入射窗结构方案

入射窗方案设计要使所施加的光应力均匀,保

证窗口附近有效温度场的一致。入射窗结构方案如图1所示。

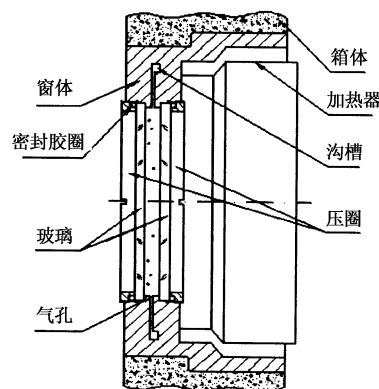


图1 入射窗结构方案图

带有双层高质量玻璃的绝缘窗体黏接到高低温箱壁的开孔处上。用聚硫化物密封胶将内外层玻璃

作者简介:张亮亮(1982-),男,硕士研究生,研究方向为光电测控技术与仪器。E-mail:liangliang32@yahoo.com.cn
收稿日期:2008-08-29

黏结在绝缘的窗体上,再由密封胶圈与压圈固定,在压圈上紧后用螺纹胶锁固。为减小热传导,玻璃层间的气体应与外界密封,气体的热胀冷缩产生的压力,可通过气孔与沟槽缓冲。窗口内侧安放加热器散热防止内侧玻璃低温时结霜。

光窗是直径 150mm、厚 6mm 的圆板,材料是 k9 玻璃。要求 k9 光学玻璃的光学均匀性好、双折射、光吸收达到规定标准,其楔形角及最小焦距须满足技术要求,所以对它的加工要求较高。对入射窗窗口玻璃的质量要求如表 1 所示。

表 1 入射窗材料及加工要求

对玻璃材料的要求		对零件加工的要求	
Δn_D	3D	光圈数	$N=1$
$\Delta(n_F - n_C)$	3D	局部光圈	$\Delta N=0.2$
光学均匀性	4	平行度	$\theta=2'$
双折射	3	光洁度	$P=V$
光吸收系数	4	气泡度	$q=0.05$
条纹度	1C		
气泡度	2B		

窗体材料的热膨胀系数通常大于安装在其中的玻璃的热膨胀系数,因此要通过加热器散热以避免由于温度下降造成的窗体沿径向向窗口玻璃的边缘收缩。加热器采用台阶状圆腔式结构,它由电热管和壳体组成,壳体部分采用硅碳陶瓷高温材料并进行发黑处理($\varepsilon=0.9$)以强化辐射换热,电热管内的电热丝采用镍铬合金丝。螺旋型电热丝精密绕制穿过专门设计的耐高温陶瓷中,可保证绝佳电热均匀性。热传递效率为 80% 以上。

3 窗口通道的温度场影响分析^[4]

加热器中心部分空气的温度会比管壁附近的空气温度低,使得管中部空气折射率比管壁附近高,故使平面波变为会聚光波。窗口内侧空间还同时存在径向和轴向温度梯度。经分析只有径向折射率梯度分量(dn/dR)对光线偏折起作用,其偏折角为:

$$\theta = \sum_{j=2}^{\infty} (-1)^{(j+1)} (\delta'')^{(j-1)} \times \frac{Z^{2(j-1)}}{(2j-1)!} \quad (1)$$

式中, Z 为通过折射率梯度为($d\delta/dy$)区域的光线路径长度; δ 为是光速和波长在传播过程中的分数变化; $d\delta/dy$ 随 z 方向变化,有 $\delta = n-1$ 和 $d^2\delta/dy^2 = d^2n/dy^2$ 通常在 10^{-4} 量级。

介质折射率不均匀性产生的光程差 ΔL_s 会引起光波的波面相位畸变^[4], $\Delta\phi$ 为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \int_a^b [n(s_1) - n(s_2)] ds \quad (2)$$

由以上分析可知,使窗口光通道的温度场尽量

均匀是至关重要的,可有效减小光线偏折和波面相位畸变。

4 加热器功率计算

通过入射窗口与箱内冷环境进行热交换的热平衡关系,可建立热计算模型,进行加热器功率计算,其基本考虑是:加热器产生的热量应等于窗口光通道内对流换热量和窗口向箱内空间辐射换热量之和,其热平衡方程式为:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (3)$$

式中, Q_1 为加热器散发的热量; Q_2 为窗口光通道内对流换热量; Q_3 为窗口向箱内空间辐射换热量。

(1) 对流换热量计算^[5]

管内对流换热比较复杂,可以采用间接法计算管内的对流换热量,将加热管按侧面积分为四份,近似看为二个竖面、一个底面和一个顶面。假设加热器表面温度为 423K,箱内空气为 223K,参考温度为 333K,查空气的相关物理参数, $Pr = 0.697$, $\lambda = 2.87 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\beta = 1/328$, $\nu = 18.46 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

① 竖面

这时的特征长度 $L_1 = 0.15\text{m}$,将相应参数带入瑞利数计算公式:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL_1^3}{\nu^2} Pr \quad (4)$$

经计算 $Ra = 4.33 \times 10^7 < 10^9$,可判断管内空气为层流。这时的平均对流换热系数可表示为:

$$\bar{h}_1 = \frac{\lambda}{L_1} 0.59 (Ra)^{1/4} \quad (5)$$

计算得 $\bar{h}_1 = 9.16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

② 底面

这时特征长度为底面面积与周长的比值,经计算 $L_2 = 0.023\text{m}$, $Ra = 1.60 \times 10^5$,这时的平均对流换热系数可表示为:

$$\bar{h}_2 = \frac{\lambda}{L_2} 0.54 (Ra)^{1/4} \quad (6)$$

带入数据得 $\bar{h}_2 = 13.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

③ 顶面

其特征长度和瑞利数与底面时相同,只是平均对流换热系数不同,即:

$$\bar{h}_3 = \frac{\lambda}{L_3} 0.27 (Ra)^{1/4} \quad (7)$$

$\bar{h}_3 = 6.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

则将以上各值带入对流换热量的计算公式得:

$$Q_2 = \bar{h} A \Delta t = (2 \times 9.16 + 13.39 + 6.70) \times (0.042/4) \times (160 + 50) = 84.69 \text{ W} \quad (8)$$

(2) 辐射换热量计算^[6]

入射窗口向箱内冷空间辐射换热量由两部分组

成:加热器管壁和内侧玻璃端面向箱内空间辐射换热。则 Q_3 为:

$$Q_3 = A_1 F_1 \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_3^4) + A_2 F_2 \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_3^4) \quad (9)$$

式中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为窗口组件发射率, 其值为 0.9; A_1 为加热管壁面积; A_2 为内侧玻璃端面面积; T_1 为加热管壁温度, 其值为 433K; T_2 为内侧窗口玻璃温度, 其值为 283K; T_3 为箱内冷环境温度, 其值为 223K; F_1 为管壁对内部冷空间的辐射形状系数, 其值为 0.347; F_2 为玻璃端面的辐射形状系数, 其值为 0.46。

经计算, $Q_3 = 26.65 \text{ W}$ 。

因此, $Q_1 = 84.69 + 26.65 = 111.34 \text{ W}$, 考虑到效率系数(其他方面的损耗), 最终加热器的最大加热功率为 139W。

5 ANSYS 热模拟

本文用 ANSYS 软件模拟入射窗内侧的温度梯度场^[7]。换热器与空气间存在的温差引起热交换, 使玻璃附近空气维持 10°C 左右即可除霜。

加热器模型: 小端孔径为 180mm, 大端为孔径 200mm, 轴向长度 70mm, 管材料发射率 0.9。参考环境温度 223K。考虑到被试品在温度试验箱中的位置, 因此在加热器模型基础上扩展一定空间, 符合实际的试验环境。

建立几何模型: 采用 FLOTTRAN CFD 模块中的 FLUID 141 二维四节点单元模拟空气温度场。经过单位类型的选择、几何建模、单元生产等步骤, 建立加热器温度场的有限元模型, 有限元模型为轴对称模型的剖面, 网络图如图 2 所示。

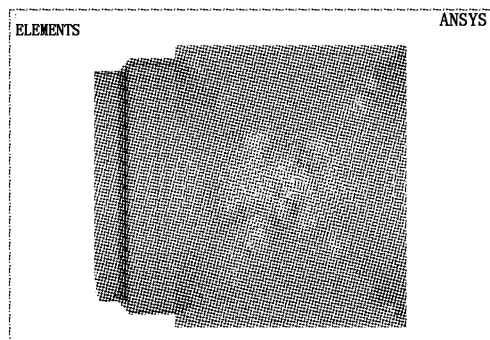


图2 有限元模型网络图

加载和求解: 通过定义分析类型, 载荷数据和载荷步选项, 然后进行有限元求解。所得温度场云图如图 3 所示。

由图 3 可知, 温度的最大值在热源附近, 最小值在试验箱的内部, 由于热边界层的存在, 换热管壁附近存在着很大的温度梯度, 而在腔体中部温度梯度很小, 并且在轴向方向形成温度梯度渐变。ANSYS

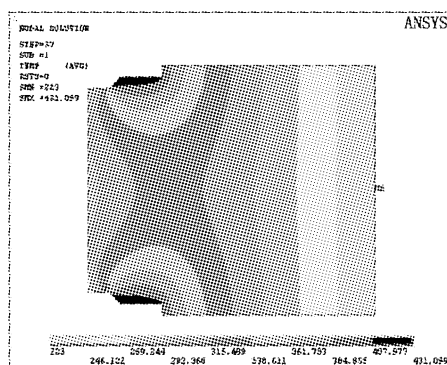


图3 加热器内温度场云图

软件也可以将温度分布映射为窗口内侧玻璃处的径向温度分布, 如图 4 所示。

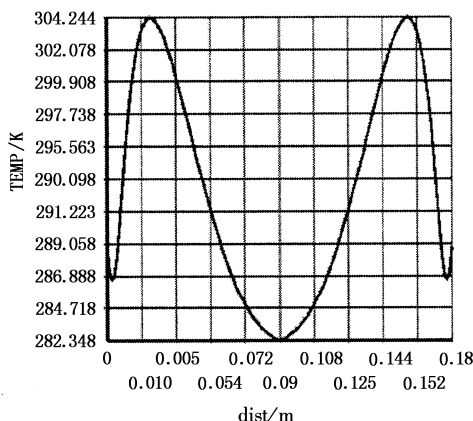


图4 内层玻璃沿径向温度分布图

从图 4 可知窗口内侧玻璃的温度在 283.548K 以上, 符合除霜要求。

6 结论

入射窗通道的温度分布对确保夜视仪光应力试验的准确进行是很重要的。文章依据窗口条件, 利用 ANSYS 模拟出光应力通道中介质的温度梯度值, 在加热器中部范围内其温度值梯度比较平缓, 对入射光波前影响较小, 可满足试验要求。

参考文献:

- [1] Paul R Yoder Jr. 光机系统设计[J]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 725 - 735.
- [2] 许东晟. 除霜和除霜控制研究[J]. 流体机械, 2006, 34(1): 69 - 73.
- [3] Thomas H Jamieson. Thermal effects in optical systems. Optical Engineering, 1981, 20(2): 156 - 160.
- [4] 李贵春. 气动光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006, 130 - 138, 164 - 171.
- [5] 张学学. 热工基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 278 - 285.
- [6] 弗兰克 P 英克鲁佩勒. 传热的基本原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1985.
- [7] 张国智. 热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.