

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.008

某超音速风洞大尺寸光学玻璃观察窗优化设计

何 登, 余 鑫, 郑晓东, 付 涌

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要:为解决某超音速风洞 $\Phi 800$ mm 光学玻璃在试验过程中出现裂纹问题,对光学玻璃结构形式及装配方法开展优化设计。在满足强度要求的情况下减小玻璃厚度,设计易安装调节的低应力台阶式光学玻璃,利用 SolidWorks 软件计算在合适预紧力及内外压差为一个大气压下 2 种结构形式的应力区别,并采用 Abaqus 软件分析风洞试验过程中温度对光学玻璃的影响。结果表明:压差对玻璃观察窗强度影响不大,台阶式光学玻璃应力小于原结构形式;高马赫数、增压情况下的温度骤降将造成观察窗中间部位应力集中。

关键词: 超音速风洞; 光学玻璃; 优化设计; 有限元分析

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Optimization Design of Large-size Optical Glass Observation Window in Certain Type Supersonic Wind Tunnel

He Deng, Yu Xin, Zheng Xiaodong, Fu Yong

(High Speed Aerodynamic Research Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the crack problem of 800 mm optical glass in a supersonic wind tunnel during the test, the structural form and assembly method of optical glass were optimized. Under the condition of meeting the strength requirements, the thickness of the glass was reduced, and the low-stress stepped optical glass which was easy to install and adjust was designed. SolidWorks software was used to calculate the stress difference of the two structural forms under the appropriate pre-tightening force and the internal and external pressure difference of one atmosphere, and Abaqus software was used to analyze the influence of temperature on the optical glass during the wind tunnel test. The results show that the pressure difference has little effect on the strength of the glass observation window, and the stress of the stepped optical glass is less than that of the original structure; the sudden drop of temperature under high Mach number and pressurization will cause the stress concentration in the middle of the observation window.

Keywords: supersonic wind tunnel; optical glass; optimization design; finite element analysis

0 引言

风洞观察窗的光学玻璃是风洞试验段实时监测和纹影仪图像采集的重要部件。光学玻璃窗设计是否合理可靠关系着风洞试验的安全质量。光学玻璃作为硬脆性材料,出现裂纹的原因有很多,比如玻璃本身存在缺陷、安装调试阶段的受力不均、环境变化导致应力集中等都可能造成光学玻璃出现裂纹。近年来,在试验过程中,光学玻璃陆续出现了裂纹,需要频繁更换,严重影响试验的安全及正常进度。

目前,关于光学玻璃观察窗的研究很多,方煜等^[1]从断裂力学的角度进行分析,在考察断裂强度的基础上,对机载多光谱相机光学窗口的厚度进行了详细设计。徐钰蕾等^[2]对载机高速飞行工况下的航空遥感器双层光学窗口进行了热光学分析,得出了高温条件对光学系统 MTF 及像质 RMS 的影响。

罗传伟等^[3]研究气动压力载荷对超音速飞行器光学窗口的影响。许明明等^[4]以热光学分析为基础,对复杂环境下改正镜作为光学窗口的玻璃厚度进行了优化设计。姬文晨等^[5]对红外光学系统透镜自身存在的轴向温度梯度对光学性能的影响进行了研究。

以上关于光学玻璃观察窗的研究主要包括强度可靠性以及外部载荷对光学元件光学性能的影响,但是对于超音速风洞中大尺寸光学玻璃的研究很少。为确保光学玻璃在使用过程中的可靠性,笔者在保证玻璃本身质量可靠的情况下,在分析产生玻璃裂纹原因的基础上,对其结构进行优化设计,避免安装调试阶段对玻璃造成损伤,并满足环境变化对玻璃的强度要求。

1 产生裂纹原因分析

光学玻璃观察窗在风洞试验段中呈两侧对称布置,以便观察试验过程中模型的实时情况以及纹影

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-10

第一作者: 何 登(1989—),男,湖北人。

观测流场，如图 1 所示。

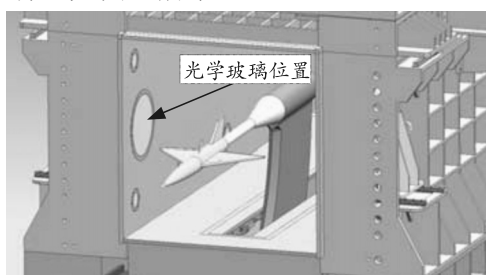


图 1 光学玻璃窗口位置

光学玻璃尤其是大尺寸光学玻璃在风洞使用过程中产生裂纹如图 2 所示，其主要原因为：

1) 光学玻璃本身的缺陷，主要表现为生产加工阶段导致光学玻璃存在细微裂纹，在外部载荷的情况下，使得裂纹扩张；

2) 结构设计不合理，玻璃厚度过厚，目前 800 mm 光学玻璃的厚度为 150 mm，导致应力消除困难、加工难度大，在风洞试验过程中，高马赫数、增压等试验工况下，出现轴向温度分布不均，从而导致玻璃表面出现应力集中；

3) 安装调试时操作不当，比如在压紧过程中两侧受力不均，导致装配过程中光学玻璃出现应力集中。



图 2 光学玻璃裂纹

2 观察窗结构设计

2.1 厚度设计

光学玻璃没有固定的特征强度，其强度受到使用环境和表面裂纹等因素的影响^[6]，针对风洞光学玻璃的实际工况，在不考虑静疲劳的影响下，采用断裂几率预测法来校核光学玻璃的强度，文献^[7]给出了 K9 光学玻璃校核的抗拉极限强度为 48.3 MPa。厚度 t 由平板薄壳理论计算，即：

$$t = \sqrt{\frac{3PA(3m+1)f_s}{8\pi m\sigma_{\max}}} \quad (1)$$

式中： P 为光学玻璃的内外压力差； A 为受力面积； σ_{\max} 为材料抗拉极限强度； f_s 为安全系数； m 为泊松比的倒数。

风洞试验过程中光学玻璃承受一个大气压的负压，即 $P=0.101$ MPa，受力面积为通光面积，通光直径为 800 mm 的光学玻璃，其通光面积 $A=502\,400$ mm²，抗拉极限强度取 48.3 MPa，安全系数取 10，泊松比为 0.216，将各参数带入式(1)得到光学玻璃厚度 t 为 63.2 mm，实际取 100 mm，较之前的 150 mm 厚度减薄了 50 mm。

2.2 台阶设计

原光学玻璃厚度为 150 mm，通光直径为 800 mm，采用 C_{25} 倒角；新设计玻璃厚度为 100 mm，通光直径为 800 mm，采用 25 mm 高的直角台阶，直角处倒 R_2 圆角，其结构形式如图 3 所示。

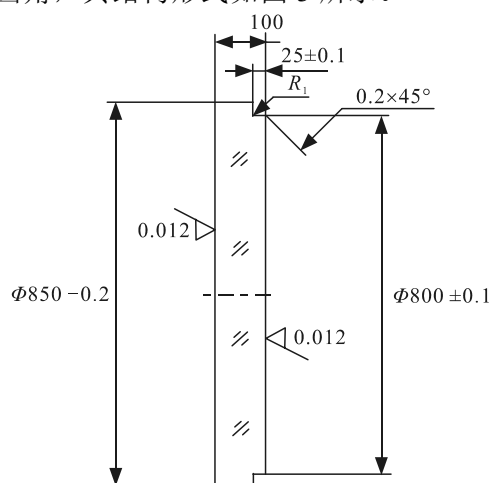


图 3 台阶式光学玻璃

2.3 观察窗整体结构

观察窗整体由压框、密封胶垫、光学玻璃和窗框等组成，如图 4 所示。

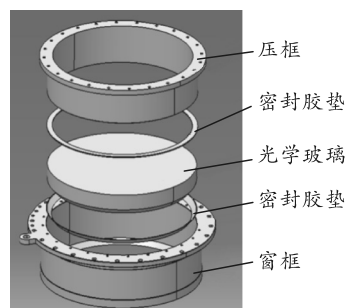


图 4 观察窗整体结构

压框与窗框之间通过法兰螺钉连接，光学玻璃与压框及窗框之间通过密封胶垫接触，避免压紧力之间作用在光学玻璃上。

3 数值计算

3.1 压差对 2 种结构的影响

K9 玻璃抗拉强度为 48.3 MPa，法兰与玻璃

接触面积约为 $64\ 795.35\ \text{mm}^2$ ，理论极限压力为 $3\ 129\ 615.405\ \text{N}$ ，由螺栓预紧力矩计算公式可以得出螺栓理论极限预紧力矩为 $M_T=250.37\ \text{Nm}$ ，但实际操作时由于零件可能出现缺陷，取螺栓拧紧安全系数 0.8，K9 取其抗剪强度 (约为抗拉强度的 0.5)，螺栓理论安全预紧力矩为 $M_T=100.15\ \text{Nm}$ 。

考虑内外压差及预紧力的情况，计算 2 种结构光学玻璃的应力分布如图 5 和 6 所示。

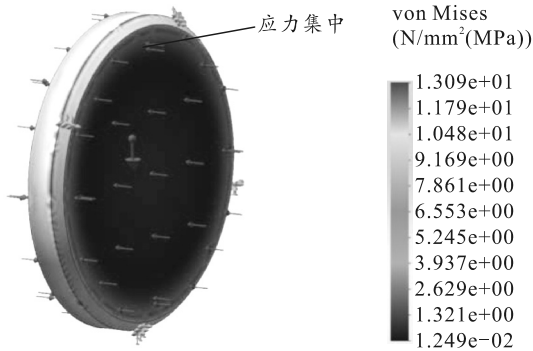


图 5 倒角式应力分布

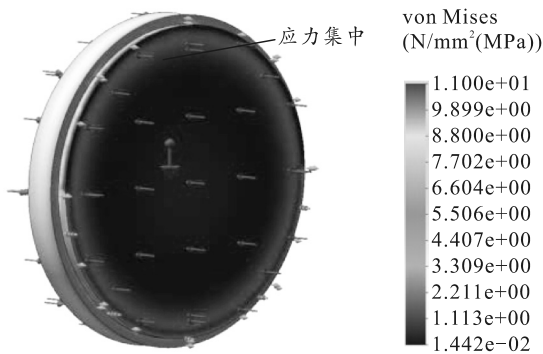


图 6 台阶式应力分布

结果表明：在本工况下应力主要由螺钉预紧力影响，倒角式应力集中于斜边最大圈边线上，最大 Mises 应力为 13.09 MPa，台阶式应力集中于压圈内圈上，最大 Mises 应力为 11 MPa，台阶式最大 Mises 应力小于倒角式。

3.2 温差对光学玻璃的影响

超音速风洞试验过程中，因流速很快，所以洞内温度很低，为验证低温环境对台阶式光学玻璃的应力影响，通过非线性有限元软件 Abaqus，分别分析了 -50 、 $-100\ ^\circ\text{C}$ 下光学玻璃的受力情况。窗口玻璃结构四周均采用胶材料与窗口边框结构相连，胶材料的弹性模量与窗口玻璃和框架相比要小得多，因此分析中假设使窗口玻璃处于自由状态来进行近似处理^[2]。K9 材料参数与文献[2]中一致，计算得到 -50 和 $-100\ ^\circ\text{C}$ 下光学玻璃表面及轴向应力分布如图 7—10 所示。

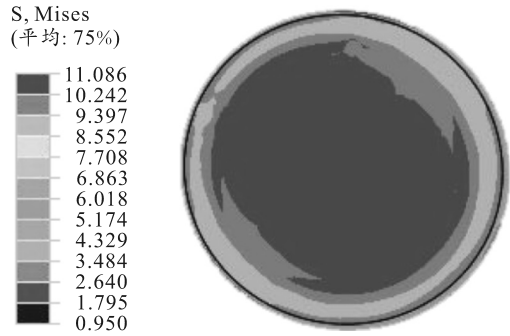


图 7 $-50\ ^\circ\text{C}$ 时光学玻璃表面应力分布

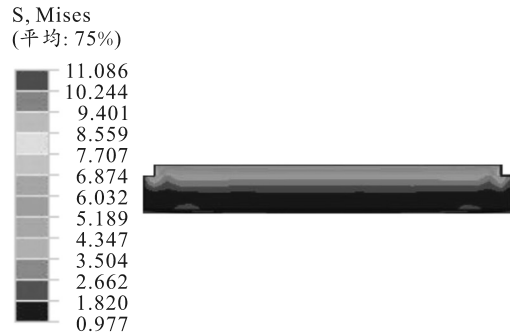


图 8 $-50\ ^\circ\text{C}$ 时光学玻璃轴向应力分布

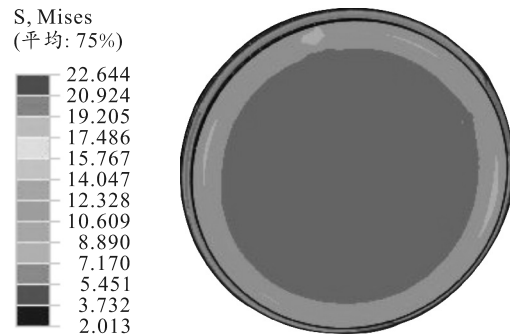


图 9 $-100\ ^\circ\text{C}$ 时光学玻璃表面应力分布

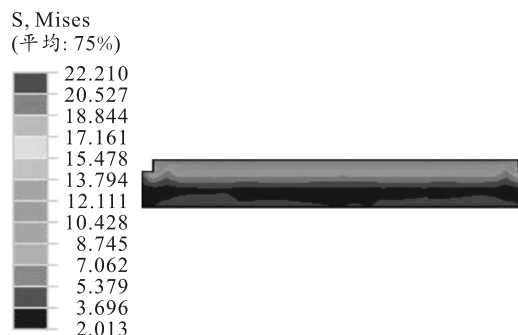


图 10 $-100\ ^\circ\text{C}$ 时光学玻璃轴向应力分布

由图 7—10 可以看出：光学玻璃的应力集中部位为由圆心向四周扩散，这与图 2 所示裂纹情况比较吻合；光学玻璃风洞一侧的应力较大，沿轴向应力分布不均；温度越低，光学玻璃的 Mises 应力越大，低温对 K9 光学玻璃的安全可靠存在巨大挑战。

最大 Mises 应力随试验时间的变化如图 11 所示。

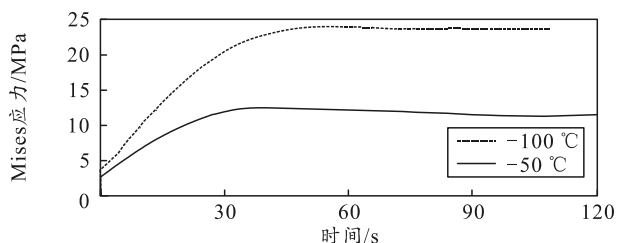


图 11 不同温度下 Mises 应力随时间的变化

由图 11 可知,光学玻璃最大 Mises 应力随时间增加而迅速增大,而后趋于平缓;温度越低,增长速度越快。由于试验段内温度与马赫数高低、是否增压有关,因此,需要着重关注高马赫数、增压情况下,试验开始阶段光学玻璃的载荷变化。

4 结束语

笔者针对某大型超声速风洞 $\Phi 800$ mm 光学玻璃观察窗在试验过程中出现裂纹问题,展开优化设计,并通过数值计算得出新设计光学玻璃结构应力优于原结构形式。此外,风洞试验过程中的低温效

应对光学玻璃强度影响很大,应着重关注高马赫数、增压情况下,试验开始阶段光学玻璃的载荷变化。

参考文献:

- *****
- [1] 方煜,相里斌,吕群波,等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 220-225.
- [2] 徐钰蕾,王乃祥,许永森. 高速航空遥感器的双层光学窗口设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 378-386.
- [3] 罗传伟,常伟军,强华,等. 超音速飞行器光学窗口气动压力载荷分析[J]. 红程, 2011, 40(4): 664-667.
- [4] 许明明,侯永辉,陈文亮,等. 基于热光学分析的真空相机光学镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 213-219.
- [5] 姬文晨,张宇,黄攀,等. 轴向温度梯度对红外透镜光学性能的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1100-1104.
- [6] 熊长新,李钱陶. 光学玻璃的强度设计方法研究[J]. 光学与光电技术, 2006(5): 115-118.
- [7] 虞择斌,廖达雄,刘政崇,等. 2M 超声速风洞总体结构设计[J]. 实验流体力学, 2012(2): 90-96.
- *****
- (上接第 30 页)
- [8] ZHANG X L, CHEN X F, HE Z J. An ACO-based algorithm for parameter optimization of support vector machines(Article)[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(9): 6618-6628.
- [9] 石权. 基于集成学习的空气质量预测研究与系统实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [10] 鲁娟,张振坤,吴智强,等. 基于支持向量机的蠕墨铸铁表面粗糙度预测[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 339-346.
- [11] PELIKAN M. Bayesian optimization algorithm: From single level to hierarchy[D]. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [12] YANG K F, M EMMERICH M, A DEUTZ A, et al. Efficient computation of expected hypervolume improvement using box decomposition algorithms[J]. Global Optimization, 2019, 75(1): 3-34.
- [13] EMILE C, DAVID B, ALEXANDRE R, et al. Parallel Gaussian Process Optimization with Upper Confidence Bound and Pure Exploration[J]. Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, 2013, 8188: 225-240.
- *****
- (上接第 39 页)
- [15] WANG J, WAN Z, DONG Z, et al. Research on Performance Test System of Space Harmonic Reducer in High Vacuum and Low Temperature Environment[J]. Machines, 2021, 9(1): 1.
- [16] 施成华,彭立敏,刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 585-589.
- [17] DENIMAL E, SINOUE J-J. Advanced computational technique based on kriging and Polynomial Chaos Expansion for structural stability of mechanical systems with uncertainties[J]. Engineering Mathematics, 2021, 130(1): 1-19.
- [18] ELISHAKOFF I, REN Y. Finite Element Methods for Structures with Large Stochastic Variations[M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [19] ZADEH L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 100: 9-34.
- [20] 夏佩伦. 不确定性推理方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(11): 87-91.
- [21] 苏静波,邵国建. 基于区间分析的工程结构不确定性研究现状与展望[J]. 力学进展, 2005, 35(3): 338-344.
- [22] JIANG C, NI B Y, HAN X, et al. Non-probabilistic convex model process: A new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 268: 656-676.
- [23] JIANG C, HAN X, LU G Y, et al. Correlation analysis of non-probabilistic convex model and corresponding structural reliability technique[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(33): 2528-2546.
- [24] 李龙. 基于椭球凸模型的可靠性灵敏度研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [25] 闵超,陈绍雄. 多元函数条件极值问题[J]. 高等数学研究, 2021, 24(2): 72-75.