

环境试验与评价

# 长时间高温热环境考核试验中 石英灯阵的破坏及预防

夏吝时, 张利嵩, 张凯, 石宝丽, 齐斌

(北京航天长征飞行器研究所 防隔热实验中心, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 解决 220 V-6 kW 石英灯管阵列在试件表面 1200 °C 持续 40 min 以上试验过程中的热破坏问题。**方法** 对灯管破坏形貌进行分析, 通过热应力计算找到了爆灯的主要原因。针对现有加热器灯阵中灯头部位的热结构问题设计一套气体强制对流冷却装置, 利用流体仿真分析方法获得出气管上不同出气孔孔径在相同间距条件下的气流速度、出气管外空流场状态和有灯阵时的灯头绕流冷却效果, 为结构设计提供依据。**结果** 在相同地面热环境模拟试验中成功进行了考核试验。对比有无冷却装置时的试验结果, 对流换热装置能够增加灯管使用寿命, 保证试验质量。**结论** 针对灯头部位进行强制对流保护的方法, 能够提高加热器在试验过程中的热环境模拟温度上限和有效试验时间, 对高温长时间类热环境试验具有较好的应用和推广价值。

**关键词:** 高温热环境; 热应力; 强制对流; 使用寿命

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.012

**中图分类号:** V216 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)10-0075-07

## Destruction and Prevention of Quartz Lamp Array in High Temperature Long-term Thermal Environment Assessment Test

XIA Lin-shi, ZHANG Li-song, ZHANG Kai, SHI Bao-li, QI Bin

(Thermal Protection Experimental Center, Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the thermal damage problem in the test process of the 220 V-6 kW quartz lamp tube array on the surface of the test piece at 1200 °C for more than 40 min. The damage appearance of the lamp was analyzed, and the main reason for the explosion lamp was found by thermal stress calculation. A gas forced convection cooling device was designed for the thermal structure problem of the lamp head in the existing heater lamp array. The fluid simulation method was used to obtain the airflow velocity of different outlet pores on the outlet pipe under the same spacing conditions, the state of the airflow field outside the outlet pipe, and the cooling effect of the lamp head around the lamp array, to provide a basis for structural design. The test was successfully carried out in the same ground thermal environment simulation test. Based on comparison of test results with or without cooling device, the convection heat exchange device can increase the service life of the lamp and ensure the test quality. The method of forced convection protection for the lamp head can improve the thermal environment simulation temperature upper limit and effective test time of the heater during the test. It has good application and popularization value for the high temperature long-term heat environment test.

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2019-11-20

Received: 2019-10-14; Revised: 2019-11-20

作者简介: 夏吝时(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器地面防隔热试验及试验技术。

**Biography:** XIA Lin-shi (1984—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: aircraft ground insulation test and test technology.

**KEY WORDS:** high temperature thermal environment; thermal stress; forced convection; service life

在航空航天领域的地面热试验中,石英灯加热器是国内外采用最为广泛的加热设备之一,其主要加热部件是由若干石英灯管组成的面阵列<sup>[1-5]</sup>。石英灯由灯头、灯丝、灯管、灯托等部分组成,灯头内部由钨片与灯丝连接,按灯头类型可分为金属和陶瓷两种。其中金属灯头在使用过程中需与水冷导流条(电极)相连接,陶瓷灯头考虑局部绝缘,通过电线引出至远端电源柜。灯丝由金属钨绕制成螺旋状,因钨材密度较大,需要每隔相等间距使用灯托进行支撑防垂,钨丝的结构和钨含量对其最大发热量有直接影响<sup>[6]</sup>。灯管采用热膨胀系数小且高温承载能力强的石英玻璃,一些灯管外壁面 180°圆周部分使用涂层增加能量利用率。一般在灯管内部填充一定压力的惰性气体,用于抑制加热过程中钨丝的氧化和挥发过程。

在实际使用过程中,石英灯阵中灯管多采用密集排布的方式,均布在配套的水冷反光板下方,加热功率和试件表面与水冷反光板间的热环境强度呈正相关关系。随着试验时间的延长,试件表面核心区能量不断积累,导致局部温度超过石英灯耐受极限,发生爆灯,并导致试件表面高温热环境难以维持,严重时导致试验失败。石英灯阵在试验过程中由于使用温度超过其耐受极限的情况,严重影响热环境模拟温度上限数值和石英灯管的使用寿命。国内多家研究机构在相关试验过程中均遇到过类似问题<sup>[7-10]</sup>。北京航空航天大学吴大方教授在文献[9]中提出,在灯头金属引出部位采用水冷方式,同时在石英玻璃表面采用透明流动介质进行冷却带走热量的方法,可有效避免金属灯头石英灯阵长时间 1200 °C 高温热试验进行时发生石英玻璃高温软化而引起的管壁爆裂现象的发生。孔凡金等人针对额定功率 1、2、3 kW 金属灯头石英灯管的破坏形式进行了描述,并提出了一种可以提升加热器辐射功率的通风冷却措施,但未对具体形式进行说明。

文中通过对由若干 220 V-6 kW 陶瓷灯头石英灯组成的平板式加热器,开展 1200 °C 恒温 2500 s 试验过程中灯管的破坏形式进行分析,找到了易发生热结构问题的薄弱环节,并针对该症结设计了强制对流保护装置,成功解决了灯管高温破坏问题。

## 1 220 V-6 kW 石英灯管的破坏形式及原因分析

### 1.1 破坏形式

在对某飞行器用刚性隔热瓦表面进行 1200 °C 恒温 2500 s 的隔热性能考核试验过程中,出现因加热器中石英灯管爆灯而导致试验被迫中止的情况,更换灯

管后重复试验,问题复现,如图 1 所示。其中 a 为未使用过的陶瓷灯头石英灯产品, b、c、e 左侧灯头爆裂, c、d、e 右侧灯头陶瓷套破裂, f 的两侧陶瓷套与石英灯管连接处有微裂痕导致外界空气进入灯管内部,造成石英玻璃失透。



图 1 220 V-6 kW 石英灯管照片  
Fig.1 Quartz tube photo of 220 V-6 kW

### 1.2 原因分析

由图 1 观察发现,问题部位集中在灯头位置。根据使用需要,灯头部分被设计为内侧石英玻璃、中间耐高温胶、外侧陶瓷绝缘保护套的结构,如图 2 所示。对表 1 中三种材料在使用环境下因热应力导致的等效位移进行了计算,使用位移分量表示的平衡微分方程和边界条件如式(1)、(2)所列<sup>[11-12]</sup>,求解面的向外法线  $N$  与直角坐标系各坐标轴方向的余弦  $l$ 、 $m$ 、 $n$  用式(3)表示,结果如图 3 所示。

对照图 1 中灯管 c、d、e 右侧陶瓷套月牙形破坏形式可以看出,与图 3 中灯头切面陶瓷套外侧局部热应力等效位移弧形分界形状相似。三种材料因热膨胀系数不同,在长期处于高温条件下中间胶体膨胀量过大,并受外层陶瓷套约束,引发灯头部位石英玻璃和陶瓷套发生破裂。当胶体热膨胀从缝隙挤出时,空气进入灯管内部,导致灯丝氧化产生黑色气体附着于灯管内壁,石英灯管的红外透过率下降而吸收率升高,最终管内压强升高导致爆灯。

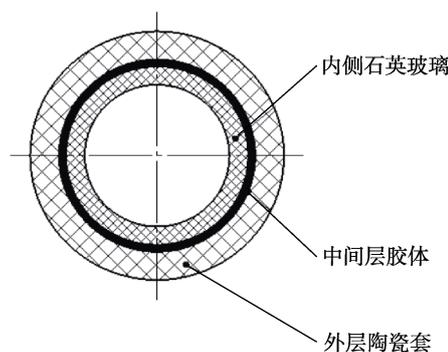


图 2 灯管灯头截面结构  
Fig.2 Cross-section of the lamp tube and head

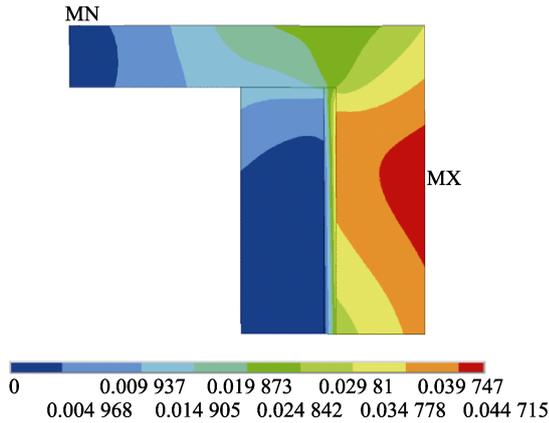


图 3 灯头切面热应力等效位移  
Fig.3 Thermal stress equivalent displacement of the lamp head section

表 1 灯头物性参数

Tab.1 Physical property parameter of lamp head

材料名称	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	弹性 模量/GPa	热胀系数/°C <sup>-1</sup>	泊松比
石英玻璃	0.484	85	5×10 <sup>-7</sup>	0.17
高温胶	0.35	1.2	6.7×10 <sup>-5</sup>	0.48
陶瓷套	1.5	76.5	4.5×10 <sup>-6</sup>	0.32

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial e}{\partial x} + \nabla^2 u \right) + X = 0 \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial e}{\partial y} + \nabla^2 u \right) + Y = 0 \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{1}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + \nabla^2 u \right) + Z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \lambda e l + G \frac{\partial u}{\partial N} + G \left( \frac{\partial u}{\partial x} l + \frac{\partial v}{\partial x} m + \frac{\partial w}{\partial x} n \right) = \bar{X} \\ \lambda e l + G \frac{\partial v}{\partial N} + G \left( \frac{\partial u}{\partial y} l + \frac{\partial v}{\partial y} m + \frac{\partial w}{\partial y} n \right) = \bar{Y} \\ \lambda e l + G \frac{\partial w}{\partial N} + G \left( \frac{\partial u}{\partial z} l + \frac{\partial v}{\partial z} m + \frac{\partial w}{\partial z} n \right) = \bar{Z} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} l = \cos(N, x) \\ m = \cos(N, y) \\ n = \cos(N, z) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $E$  为弹性模量； $\mu$  为泊松比； $\nabla^2$  为拉普拉斯算子， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ； $u$ 、 $v$ 、 $w$  为三个位移分量； $e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ； $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为体积力  $F$  沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三个分量； $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 、 $\bar{Z}$  为边界上各点的面力分量； $\lambda$  为拉梅常数； $G$  为剪切弹性模量。

## 2 对流保护装置设计

### 2.1 结构

针对灯阵增加的风冷装置主要用于试验过程中吹扫灯头，使其在长时间热环境作用下免受热应力破坏。主要包括进气管、出气管、堵头等组件，其中出气管管壁设有出气孔，孔的方向与石英灯阵平行，沿管壁径向配打，两端采用堵头封死，结构如图 4 所示。冷却气体由进气管上游配套空气压缩机提供，可根据实际试验状态调节气量，额定出口流量值为 0.65 m<sup>3</sup>/min。其中进气管为圆形截面，出气管为矩形截面。由于现有灯阵中阵列结构不可调节，因此出气孔间距固定为 25 mm，可通过改变出气孔大小调节冷却效果。

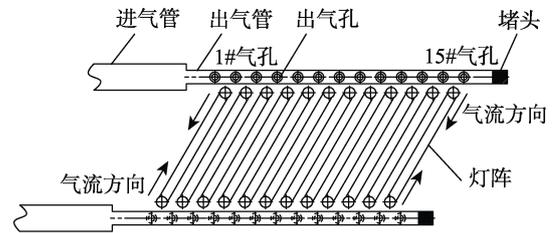


图 4 风冷结构  
Fig.4 Diagram of air-cooled structure

### 2.2 出气孔尺寸对孔口流速的影响

在考虑沿程压力损失和局部阻力损失的空压机额定工况条件下，分别对出气孔直径 4、6、8、10、14 mm 工况进行分析，获取出口流速  $v$  及其分布规律，计算结果如图 5 所示。为表征出口流速的离散程度<sup>[13]</sup>，由式 (4) 计算得到不同孔径条件下出气管的平均流速  $\bar{v}$ ，由式 (5) 计算得到不同孔径出气孔相对平均流速的标准偏差  $\sigma$ ，如图 6 所示，其中自由度  $N=n-1$ 。

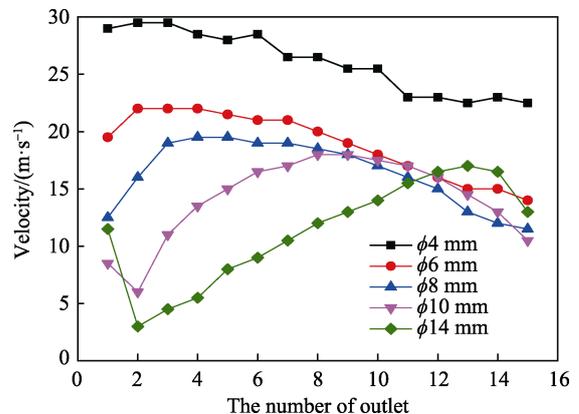


图 5 不同孔径下的出口流速及分布规律  
Fig.5 Flow velocity and distribution law of outlets under different pore sizes

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}, (i = 1, 2, \dots, n, n = 15) \quad (4)$$

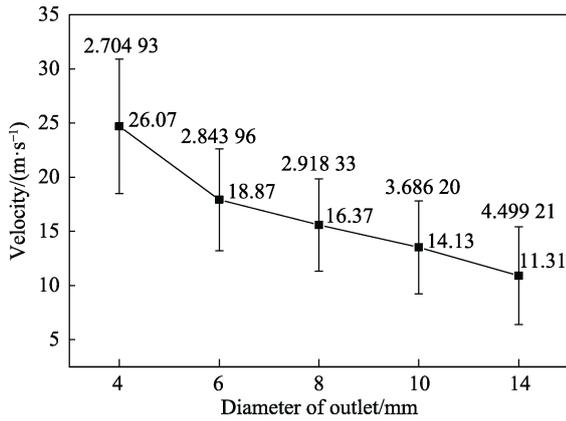


图6 不同孔径下的平均流速和标准差  
Fig.6 Average flow rate and standard deviation at different pore sizes

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (v - \bar{v})^2}{N}} \quad (5)$$

由图5和图6可以看出, 随出气孔直径的增加, 出口平均流速呈负相关趋势, 且各出气孔流速的均匀性随孔径增大而变差的趋势越加明显。考虑到出口流

速在对流换热过程中对换热系数的影响<sup>[14-15]</sup>, 取孔径4、6、8 mm三种条件进行流场冷却效果的进一步分析, 舍弃出口平均流速低于15 m/s且相对平均流速的标准偏差σ大于3的两种工况。

## 2.3 流场冷却效果

### 2.3.1 空流场

在未放置灯阵时, 对孔径4、6、8 mm三种条件的空流场进行仿真, 由于三种条件下流速大小不同和各出气孔流速的不均匀性, 导致流场内流线分布如图7所示。图7中沿z轴方向为出气孔1#—15#排列方向。可以看出, 孔径为8 mm时, 空流场流线沿z轴方向的中心区域气流速度较两侧偏高, 同时不均匀趋势沿x轴随喷射方向延伸较长。孔径为4 mm和6 mm时, 空流场流线沿z轴方向的整体气流速度较为平均, 且沿x轴正向负向随喷射方向较为均匀。孔径6 mm时, 空流场流线的冷却面积较大, 但出口流速较孔径4 mm时偏小。考虑到孔径8 mm时的出口流速最低, 且空流场均匀性较差, 在进行流场冷却效果的进一步分析时将其舍去。

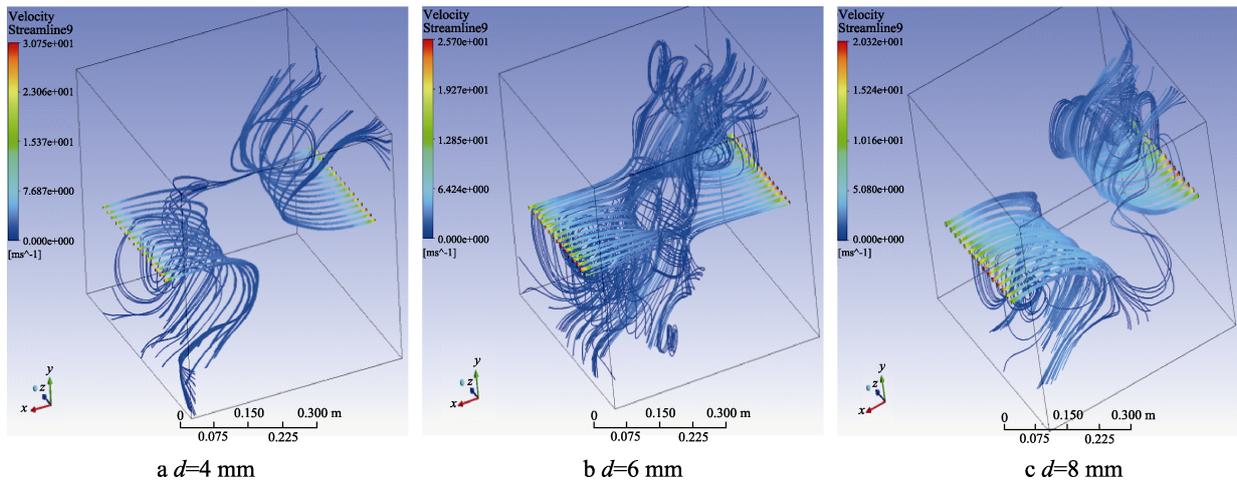


图7 空流场流线  
Fig.7 Streamline diagram of empty flow field

### 2.3.2 有灯阵时流场

在放置灯阵的情况下, 对孔径4 mm和6 mm时的流场进行仿真, 计算域中心xz平面和x方向灯头部位yz平面的流场速度云图如图8、9所示。从计算域中心xz平面云图中可以看出, 孔径6 mm条件下灯阵中灯管间气流的速度略低于孔径4 mm条件, 但流场均匀性更好, 气流经过灯管轴向表面的冷却面积更大。从x方向灯头部位yz平面云图中可以看出, 孔径6 mm条件下气流对灯头周向的包覆面积大于孔径4 mm条件, 孔径4 mm和6 mm时的灯头绕流气体流速分别约为9 m/s和

7.5 m/s。

### 2.3.3 冷却效果

综合考虑带灯阵时的流场效果, 选取孔径6 mm时灯头部位平均流速7.5 m/s状态计算对流换热系数h, 并将其和使用环境下的灯头部位表面温度一起作为边界条件带入热应力分析。当气流沿灯头外壁周向平行稳流时, 对流换热系数由式(6)获得<sup>[16]</sup>, 灯头切面热应力等效位移计算结果如图10所示。对照图3可以看出, 在热应力集中部位热膨胀率降低68%。可按此条件对出气管孔径进行加工并开展试验验证。

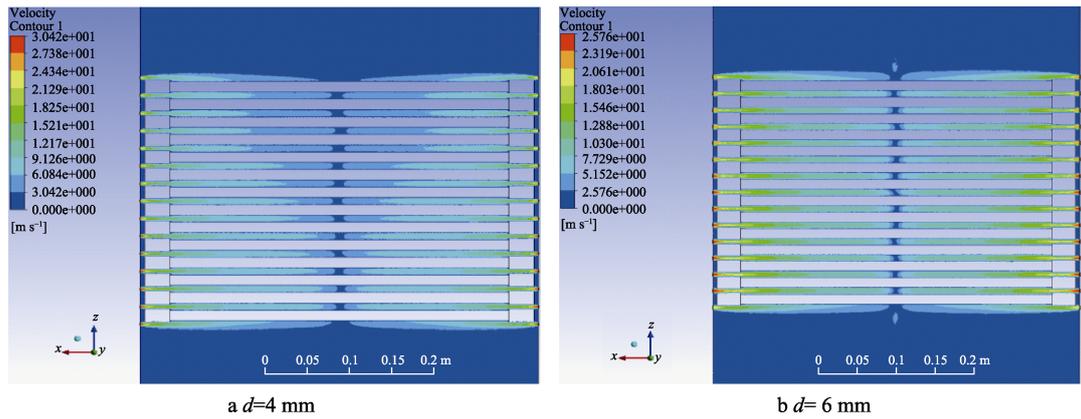


图 8 计算域中心  $xz$  平面流场速度云图  
Fig.8 Flow field velocity cloud map of  $xz$  plane, calculation field center

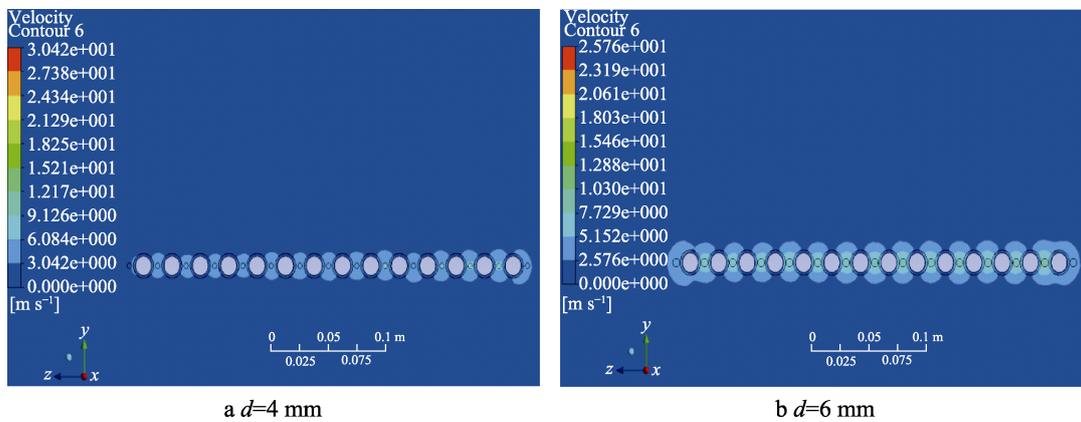


图 9  $x$  方向灯头  $yz$  平面的流场速度云图  
Fig.9 Flow field velocity map of  $y$ -plane in  $x$ -direction lamp head

$$h = \frac{0.664\lambda \left(\frac{vL}{\nu_f}\right)^{\frac{1}{2}} \Pr^{\frac{1}{3}}}{L} \quad (6)$$

式中： $\lambda$  为空气导热系数； $v$  为气流速度； $\nu_f$  为运动黏度； $\Pr$  为普朗特数； $L$  为灯头轴向长度。

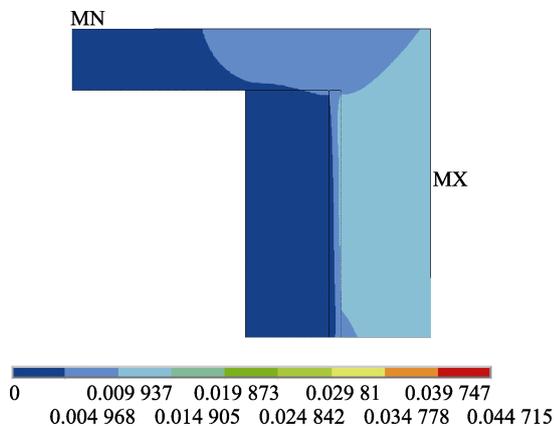


图 10 冷却时灯头切面热应力等效位移  
Fig.10 Equivalent displacement of thermal stress of the lamp head section when cooling

### 3 工程应用

使用额定出口流量值  $0.65 \text{ m}^3/\text{min}$  的空压机为出气管孔径  $6 \text{ mm}$ 、孔间距  $25 \text{ mm}$  的对流保护装置提供冷却气体的条件下，对相同材料和尺寸的刚性隔热瓦试件成功进行了表面温度  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  保持  $2500 \text{ s}$  的热环境试验，石英灯加热器中灯阵未发生爆灯现象。

将未使用和使用了风冷降温的试验数据进行对比发现（如图 11 所示），在无冷却条件下，当试件表面温度接近目标值时发生了第一次爆灯，热源数量减少致使试件表面温度下降，同时调功电源输出电流值减少。随后因灯阵中灯头所处热环境仍高于其耐受温度，又连续发生两次爆灯。后两次爆灯时，试件表面温度和调功电源输出电流值继续减小，且三次减小量基本相同。同时，由于试件表面温度未达到所需目标值，控制系统算法将调功电源输出电压升至并稳定在  $220 \text{ V}$ ，调功电源峰值最大输出功率为  $77 \text{ kW}$ 。在有冷却条件下，试件表面温度在达到  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  后的  $2500 \text{ s}$  内稳定维持，同时调功电源输出电压和电流持续保持在  $190 \text{ V}$  和  $290 \text{ A}$ ，稳定输出功率  $55.1 \text{ kW}$ ，

说明灯阵中灯头所处热环境满足其耐受温度,冷却效果良好。

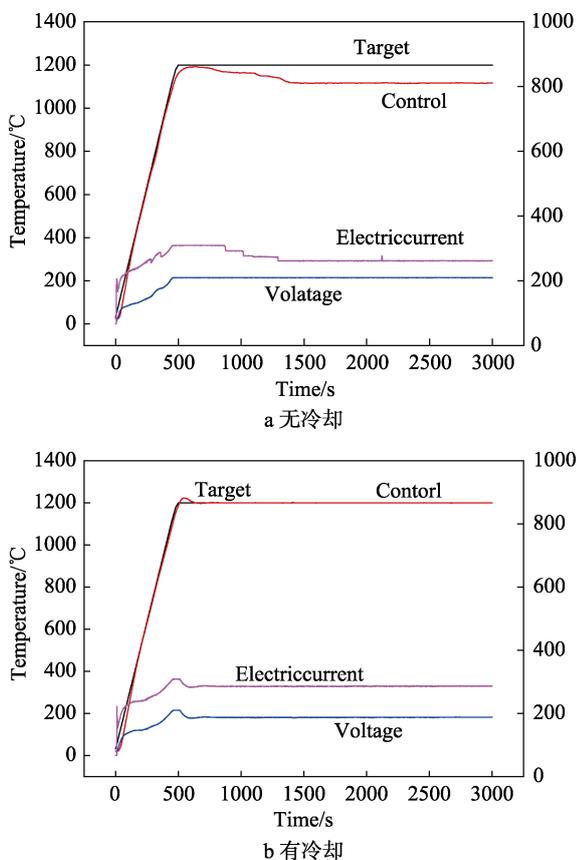


图 11 试验结果对比

Fig.11 Comparison of test results:  
a) without cooling; b) with cooling

## 4 结论

针对平板型石英灯加热器高温长时间热环境试验过程中出现的爆灯问题,通过流体仿真分析方法设计的强制对流冷却装置能够很好地对灯阵中灯头部位进行冷却保护。成功开展了低热导率材料表面1200℃持续40 min以上的性能考核试验。

1) 灯阵在高温长时间试验过程中爆灯的主要原因是灯头结构内三种材料因热膨胀系数不同而产生的热应力破坏导致。

2) 在空压机额定流量下的出气孔孔径越大,各出气孔处平均流速越小,且各出口处气流速度分布均匀性越差。

3) 在比较强制对流冷却效果时,应同时考虑出气孔气流速度、灯头部位气体绕流接触面积和流场均匀性的影响。

4) 针对灯头部位进行强制对流保护的方法,提高了加热器在试验过程中的热环境模拟温度上限,同时增加了高温状态下的有效试验时间,在降本增效方面起到了积极作用。

## 参考文献:

- [1] HUDSON L. Thermal-mechanical Testing of Hypersonic Vehicle Structures[R]. NASA-2008-13159, 2008.
- [2] APPEL G, BAR K, KNAPP T. Thermomechanical Test Facility of Hermes Winglet Box[C]// 5th International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies Conference. Munich,1993.
- [3] KAMRAN D, JOSEPH G S, DARRELLWELL L C. Evaluation of Heating Methods for Thermal Structural Testing of Large Structures[R]. NASA/TM-1998-206913, 1998.
- [4] НИКИТИН П В. Тепловая Защита[M]. Москва: Издательство Маи, 2006.
- [5] 王德成, 林辉. 石英灯辐射式瞬态热环境试验关键技术分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 36-40.  
WANG De-cheng, LIN Hui. Main Technical Analysis of Quartz Lamp Radiation Transient Thermal Environment Experiment Main Technical Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 36-40.
- [6] 夏齐时, 齐斌, 田宁, 等. 石英灯电热特性建模分析及测试方法研究[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 877-882.  
XIA Lin-shi, QI Bin, TIAN Ning. Study on Modeling Analysis and Testing Method of Electro-Thermal Properties Quartz Lamp[J]. Infrared Technology, 2015, 37(10): 877-882.
- [7] 任青梅, 刘一鸣, 成竹, 等. 热防护系统热真空模拟试验技术[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 64-68  
REN Qing-mei, LIU Yi-ming, CHENG Zhu. Investigation of Thermal Vacuum Simulation Test for Thermal Protection System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(6): 64-68
- [8] 吴大方, 王岳武, 商兰, 等. 1200℃高温环境下板结构热模态试验研究与数值模拟[J]. 2016, 37(16): 1861-1875.  
WU Da-fang, WANG Yue-wu, SHANG Lan. Test Research and Numerical Simulation on Thermal Modal of Plate Structure In 1200℃ High-temperature Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 37(16): 1861-1875.
- [9] 吴大方, 潘兵, 郑力铭, 等. 高超声速飞行器材料与结构气动热环境模拟方法及试验研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 250-258  
WU Da-fang, PAN Bing, ZHENG Li-ming. Aerodynamic Heating Simulation Method and Testing Technique for Materials and Structures of Hypersonic Flight Vehicles[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(3): 250-258
- [10] 孔凡金, 张伟, 吴振强, 等. 结构热试验石英灯电热特性研究[J]. 强度与环境, 2012(4): 1-6.  
KONG Fan-jin, ZHANG Wei, WU Zhen-qiang. Study on Electro-Thermal Properties of Quartz-lamp Element for the Thermal-Structural Test[J]. Structure and Environment

- Engineering, 2012(4): 1-6.
- [11] 李世芸, 肖正明. 弹性力学及有限元[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 44-69.  
LI Shi-yun, XIAO Zheng-ming. Elasticity and Finite Element[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 44-69.
- [12] 李维特, 黄保海. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 242-269.  
LI Wei-te, HUANG Bao-hai. Analysis and Application of Thermal Stress Theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 242-269.
- [13] 高志强, 庞彦军. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 179-186.  
GAO Zhi-qiang, PANG Yan-jun. Probability Theory and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 179-186.
- [14] 吴东, 陈德江, 马昊军. 气动热环境下玻璃窗口热应力试验分析[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(5): 592-597.  
WU Dong, CHEN De-jiang, MA Hao-jun. Experimental Thermal Stress Analysis of Glass Window in Aerodynamic Thermal Environment[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(5): 592-597.
- [15] 向树红, 张敏捷, 童靖宇, 等. 高超声速飞行器主动式气膜冷却防热技术研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 1-7.  
XIANG Shu-hong, ZHANG Min-jie, TONG Jing-yu, et al. Research on Active Film Cooling and Heat-Proof Scheme for Hypersonic Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 1-7.
- [16] 曹玉璋, 邱绪光. 实验传热学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 119-126.  
CAO Yu-zhang, QIU Xu-guang. Experimental Heat Transfer[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 119-126.