

并联组合式石英灯加热器及其辐射加热性能

周法, 林国胜, 刘祥, 张敏莉, 陈海群, 欧东斌, 马汉东

(中国航天空气动力技术研究院 电弧等离子应用装备北京市重点实验室, 北京 100074)

摘要: **目的** 通过石英灯加热器对材料表面进行辐射加热, 研究其对开展飞行器表面热载荷地面模拟的有效性。**方法** 设计开发一套并联组合式石英灯加热器, 并针对 200 mm×200 mm 平板材料进行辐射加热实验研究, 通过一系列实验获得加热器辐射面与模型平板不同距离之间的热流变化规律, 以及加热器对平板模型某点热流与加热器电参数的关联特性, 并分别以模型表面某点处热流和温度参数作为控制变量, 实现加热器对模型某点的热流和温度的跟踪模拟。**结果** 本文开发的并联组合式石英灯加热器既可以单组使用, 也可以 2 组并联组合使用, 2 种形式加热器对模型表面均可以形成一个稳定的辐射加热区域, 辐射加热区域内从中心到边缘平均温度梯度分别为 8 °C/cm 和 3.3 °C/cm, 温度不均匀度分别为 3.14% 和 1.27%。模型表面热流的跟踪响应实现毫秒级控制, 控制精度保持在 1% 以内, 加热器可以实现某点温度的动态跟踪和控制, 温度控制精度受材料特性而存在一定的偏差。**结论** 石英灯加热器对于平板某点热流与加热器功率之间存在着近似的线性关系, 2 组并联实现了一个更好的均匀稳定的加热区域, 加热器对于辐射加热区域某点热流和温度均可以实现动态跟踪控制。

关键词: 石英灯加热器; 辐射加热; 热流; 防热考核; 气动热; 高速飞行器

中图分类号: V216

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0090-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.009

Parallel Combined Quartz Lamp Heater and Its Radiant Heating Performance

ZHOU Fa, LIN Guosheng, LIU Xiang, ZHANG Minli, CHEN Haiqun, OU Dongbin, MA Handong

(Beijing Key Laboratory of Arc Plasma Application Equipment, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effectiveness of radiant heating of material surfaces by quartz lamp heaters for ground simulation of thermal load on aircraft surfaces. In this paper, a parallel combined quartz lamp heater was designed and developed, and a radiant heating experiment was conducted for a kind of 200 mm×200 mm flat plate material with the parallel combined quartz lamp heater. Through a series of experiments, the heat flux of different distances between the heater's radiant surface and the flat plate was obtained, as well as the correlation characteristics of the heater's heat flux to a certain point of the flat plate and the heater's electrical parameters. The heat flux and temperature at a certain point of the flat plate were taken as the control variables respectively, which could be controlled by tracking a preset heat flux curve and temperature curve. The results showed that the parallel combined quartz lamp heater developed in this paper could be used in either one single group or two groups in parallel. Both types of heaters could form a stable radiant heating region on the surface of the flat plate, and the average temperature gradient from the center to the edge of the radiant heating region was 8 °C/cm and 3.3 °C/cm respectively. The

收稿日期: 2024-07-17; 修订日期: 2024-12-15

Received: 2024-07-17; Revised: 2024-12-15

引文格式: 周法, 林国胜, 刘祥, 等. 并联组合式石英灯加热器及其辐射加热性能[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 90-99.

ZHOU Fa, LIN Guosheng, LIU Xiang, et al. Parallel Combined Quartz Lamp Heater and Its Radiant Heating Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 90-99.

temperature inhomogeneity was 3.14% and 1.27% respectively. The tracking response of the surface heat flux of the flat plate could be controlled in milliseconds, and the control accuracy was kept within 1%. The heater also could realize the dynamic tracking and control of the temperature at a certain point, which control accuracy was affected by the material characteristics and had a certain deviation. In conclusion, there is an approximate linear relationship between the heat flux of the quartz lamp heater and the heater power at a certain point of the flat plate. The parallel combined quartz lamp heater can achieve a better uniform and stable heating zone. It can also realize dynamic tracking control of heat flux and temperature at a certain point in the radiant heating zone.

KEY WORDS: quartz lamp heater; radiant heating; heat flux; heat protection test; aerodynamic heat; high speed vehicle

随着航空航天技术的高速发展, 飞行器的飞行速度不断提升, 由此产生的气动热问题越来越严重。飞行器高速飞行时严重的气动加热, 导致飞行器机体产生高温, 这将显著降低高速飞行器材料的强度极限和飞行器结构的承载能力, 使结构产生热变形, 破坏部件的气动外形, 并影响飞行器结构的安全性能。因此, 航天飞行器材料和结构的热防护与热强度问题已成为事关飞行器研制成败的关键^[1-3]。为了模拟飞行器的高温热环境, 开展地面试验是研究材料热防护性能的有效手段之一^[4-5]。地面试验的主要手段有石英灯/石墨辐射加热、电弧等离子体射流/电弧风洞、氧乙炔烧蚀以及高温燃气风洞和激光加热试验技术等^[4,6-9]。石英灯加热器主要通过石英灯的高温对材料进行辐射加热, 由于石英灯加热器操作简单, 而且石英灯加热器具有相对较小的热惯性和优良的电控性能, 对于飞行器的地面模拟试验, 可以展现出高速变化的瞬态气动加热模拟试验状态^[3]。此外, 石英灯辐射加热器发热功率相对较大, 体积较小, 且可以比较容易地组成不同尺寸大小和不同形状的加热装置, 既适合于小型的材料热试验, 也适用于大型全尺寸的结构热试验。因此, 石英灯辐射式气动热环境模拟试验技术对于高超声速飞行器热环境的复现是一种非常重要的试验方法。吴大方等^[10]通过自行研制的石英灯加热器, 可实现 210 °C/s 的极快非线性升温速率、2 MW/m² 的瞬态非线性热流密度、1 500 °C 超高温氧化热环境的红外辐射式气动热环境试验模拟系统。王毅等^[11]基于石英灯热辐射高温加热系统, 以导弹舵面为研究对象, 开展了高温环境下结构模态试验方法研究, 为后续型号产品的热模态试验提供了试验手段和技术支持。朱言旦等^[12]提出了一种非均匀气动加热的非分区模拟方法, 这种方法基于异化调控每一个石英灯来实现, 该方法通过反向设计并优化石英灯阵列中各个灯管的功率来实现非均匀气动加热场的整体模拟, 并通过实验验证了该非分区模拟非均匀气动加热方法的可行性。

目前, 石英灯辐射加热器的结构形式多种多样^[13-14], 在加热器设计中, 可以根据实际需要进行设计。如针对飞行器翼舵等平直表面的加热而采取平板形石英灯加热器; 针对等直舱段等圆柱形表面的加热而采取柱状石英灯加热器; 针对变径非等直舱段等圆锥形或

近似圆锥形表面的加热而设计成锥形结构的石英灯辐射加热器。对于石英灯辐射加热器, 夏齐时等^[15]针对石英灯的电热特性进行了分析, 建立了热源计算模型, 并对 4 种不同灯管进行了计算和修正, 所得结果与实测值间的最大相对误差小于 4%, 其建立的模型和方法可为石英灯辐射加热地面热环境模拟的优化和试验结果的预测提供技术支撑。此外, 他们还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^[16], 通过流体仿真分析方法对石英灯阵中灯头部位进行冷却, 成功开展了低热导率材料表面 1 200 °C 持续 40 min 以上的性能考核试验。孔凡金等^[17]针对石英灯加热器灯头的盲区开展了热流场的影响因素分析, 基于蒙特卡罗研究方法获得了灯头盲区的尺寸、石英灯加热器灯管阵列与试验件之间的距离对热流波谷的影响规律, 提出了改善灯头盲区的方法, 研究结果对指导石英灯加热器的结构设计、提升热试验的模拟精度具有积极意义。王德成等^[18]针对石英灯加热器的特性, 从传感器弱信号传输、无功补偿、智能控制、仿形加热器和开环试验技术等角度出发, 分析了石英灯辐射加热对型号瞬态热试验性能的影响, 并从上述 5 个角度给出了制约热试验实施的具体改进措施。

对于材料耐热性能的考核, 一般以平板类材料的考核居多, 对于这种材料的辐射加热试验, 以平板阵列石英灯管布局为主。这种加热器结构简单, 但是为了形成一个更加均匀稳定的平面垂直加热区域, 避免辐射热向四周散射, 设计一款更加精准的辐射加热装置很有意义。本文设计开发了一款并联组合式石英灯加热器, 将 2 组独立的平行布置石英灯阵进行并联, 并且石英灯加热器的四周和背面均采取了热反射材质将石英灯辐射热量进行反射, 使其朝向一个方向进行辐射加热, 形成了一个温度和热流可控的均匀的辐射加热区域, 加热器既可以单组独立使用, 也可以 2 组并联组合使用。

1 并联组合式石英灯加热器的设计

并联组合式石英灯加热器由 2 组或多组石英灯加热器组成, 单组石英灯加热器如图 1a 所示, 主要

由电极、石英灯管、灯头固定端子和加热器框架组成。其中，电极是一根柱状中空导电金属，采用三段式设计，分别是中间方形主体和两端的圆柱形连接段，在中间方形主体上内外两侧设置有一系列灯管卡槽，灯管卡槽在中间方形主体的两侧错位排列。石英灯管由灯头、灯管和灯丝组成，石英灯管的灯头通过灯头固定端子安装固定于电极中间方形主体的灯管卡槽内，电极安装固定于加热器框架上。加热器电极和热反射板均采用水冷结构设计。相关研究显示，对于平板式石英灯加热器，针对某种型号待加热平板模型的尺寸，为了提高平板平面热流的均匀性，优化加热器内

部热流分布，增加加热器有效辐射加热面的面积，即增加横向灯管数量和加热器灯管布置方式，以及加大石英灯管内部发热丝的长度，可以很好地实现改善热流均匀性和边缘位置效应带来的不利影响^[19]。为此，针对 200 mm×200 mm 平板模型的辐射加热试验需求，设计石英灯管单根长度为 400 mm，加热器灯管辐射加热区域为 400 mm×400 mm，采用 2 组并联设计，单组加热器交错布置两排石英灯管，加热器单组及并联组合后的三维效果如图 1b 所示。加热器可以 2 组并联使用，也可以单独一组独立使用，具有组装、拆卸方便，灵活等特点。

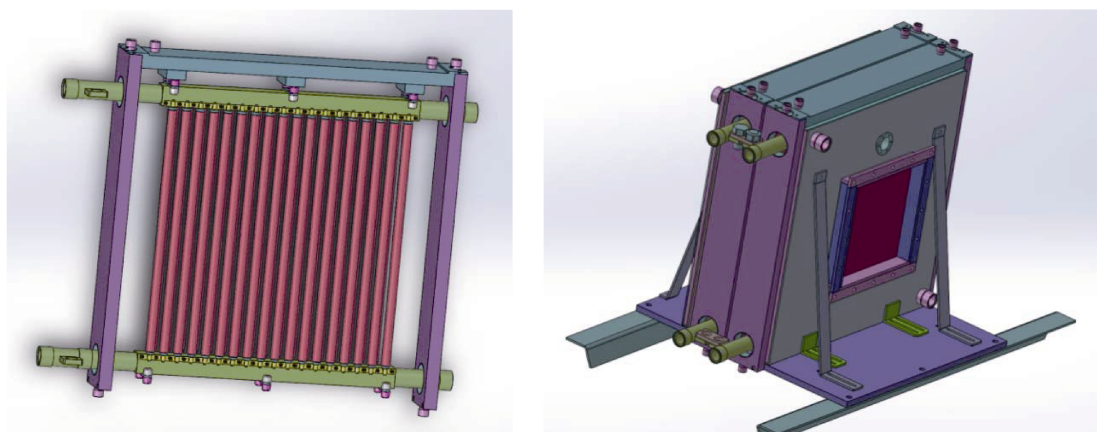
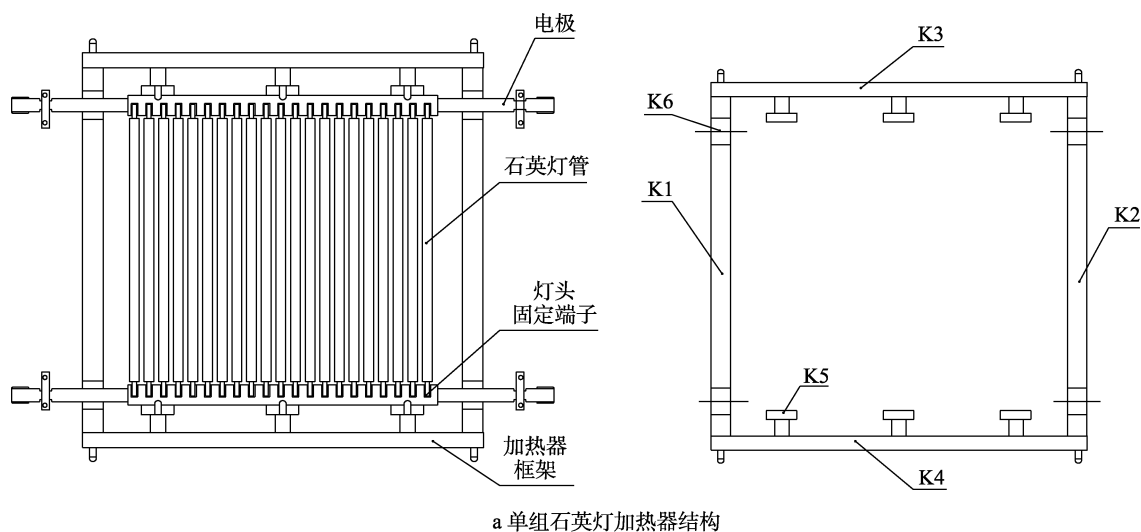


图 1 并联组合式石英灯加热器结构

Fig.1 Structure diagram of parallel combined quartz lamp heater: a) single group quartz lamp heater structure; b) 3-D diagram of single and double parallel combined quartz lamp heater

石英灯管结构如图 2 所示，设计尺寸：外径为 ϕ 14.2 mm，灯管总长度为 412 mm（有效发热长度 400 mm），单根石英灯管功率为 5 kW。石英灯管主要由内部电阻丝和外部的石英玻璃管组成，结构上设计为灯丝发热区、灯头密封区和两端的电线组成。文中灯管内部电阻丝主要采用金属钨丝通过绕制形成螺旋状的发热体，作为石英灯加热器的主要辐射热

源。这种石英灯管，既具有很好的透紫外、可见光及红外光谱性能，更好地发挥辐射加热性能。同时，灯管内充满氩气，又可以很好地抑制金属钨的氧化和热挥发进程。通过将这种石英灯管进行阵列化结构与布置形成的加热器质量轻，对电源变化的响应速度比较快，便于通过电参数调整实现状态调整与控制。

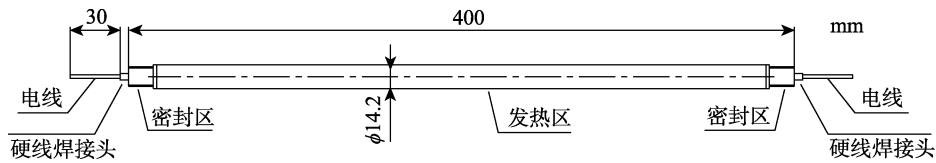


图 2 单根石英灯管结构
Fig.2 Structure diagram of single quartz lamp

电极采用紫铜材质, 由 3 部分组成, 分别为中间的方形结构体 (D1) 和两端的圆柱形结构体 (D2), 并且方形结构体和圆柱形结构体的中心线在同一条直线上, 如图 3 所示。在方形结构体 (D1) 的内侧和外侧面上分别设置有若干个等间距排列的半圆形凹槽 (D3), 且内外侧半圆形凹槽分布在方形结构体 (D1) 上错位排开, 其中一个侧面上的某一个凹槽的中心线恰好位于对面侧两个凹槽中心线的正中位置。在电极的内部为一个圆形通孔, 所述圆形通孔的中心线与电极柱状结构体的中心线重合。电极两端的圆柱形结构体 (D2) 上中间某个位置设置有一段环形凹槽 (D4), 环形凹槽处通过铜片来将不同组的加

热器进行并联或者与电源电缆连接。在圆柱形结构体 (D2) 的 2 个端部设置有一段标准螺纹接口 (D5), 用来与冷却水管相连。电极中心通水冷却, 电极与四周金属水冷框架之间通过绝缘端子和镂空设计进行绝缘, 既保证了加热器的结构稳定性, 又保证了加热器与其他金属框架之间的电绝缘, 如图 4 所示。

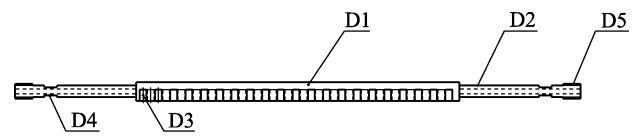


图 3 石英灯加热器电极棒结构
Fig.3 Structure diagram of quartz lamp heater electrode

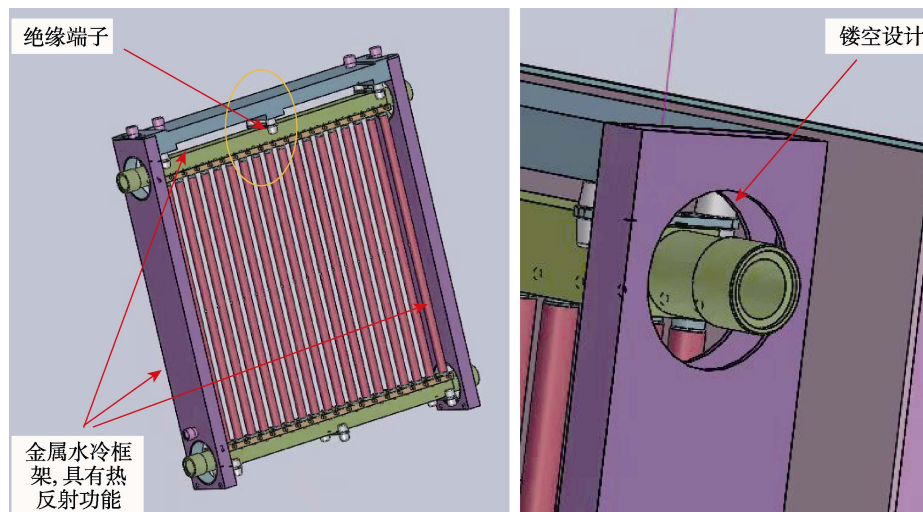


图 4 石英灯加热器绝缘设计
Fig.4 Insulation design of quartz lamp heater

加热器框架由 4 块独立的钢板组成, 2 块为 1 组, 每组形状大小和内外部结构均一致, 4 块钢板的宽度大小相同。加热器框架中, 钢板 (K1) 和 (K2) 上均设置有上下 2 个通孔 (K6), 所述通孔的直径大小为电极柱状结构体能完全通过通孔所需最小直径的 1.5~2 倍, 2 个通孔的中心孔距为石英灯管安装固定于电极上之后 2 个电极柱状体结构中心线之间的距离。加热器框架中钢板 (K3) 和 (K4) 上设置有若干个电极安装卡座 (K5)。每一块钢板内部都设置有水流通通道, 在每块钢板两端都设置有冷却水进出口接管嘴。每块钢板靠近石英灯管的一侧面均镀上一层热反射性物质, 4 块钢板之间通过螺栓将钢板端部互相固定在一起。电极穿过加热器框架中钢板的通孔, 并

通过绝缘端子安装固定于加热器框架上下 2 块钢板 (K3) 和 (K4) 的卡座 (K5) 上。

本文设计开发的并联组合式石英灯加热器, 保证了石英灯加热器的整体稳定性, 石英灯管更加稳固。同时, 在加热器的四周和加热器辐射面的正前方和后方两面均有热反射板, 保证加热区域热量不会大量分散出去, 整体框架进行水冷, 可以长时间运行而不会出现热变形。

2 并联组合式石英灯加热器辐射加热特性研究

为了研究并联组合式石英灯加热器的辐射加热

性能, 组建了如图 5 所示的一套石英灯辐射加热实验系统。该实验系统主要由实验舱、石英灯加热器、模型支架、加热控制系统、冷却系统、数据采集系统和加热器电源组成。实验系统通过数据采集系统实时采集实验模型表面的温度参数和加热器对于实验模型平板上某点处的热流参数, 并传输给控制柜。加热控制系统可以根据设定的目标温度或者热流值来调节直流电源的功率输出, 从而通过控制程序实现实验模

型表面温度或者热流的跟踪模拟。实验模型安装固定于模型支架上, 并将模型支架与石英灯加热器组合在一起安装于实验舱内部, 如图 6 所示。试验件模型尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 将石英灯加热器辐射面与模型工装平板受热面之间的距离设为 d , 可以通过调节模型工装在底部平板支架上的位置来改变。本次实验设定参数 d 为 10、15、20、30 mm, 分别研究不同距离条件下, 石英灯加热器对于平板模型上某点辐射的热流变化。

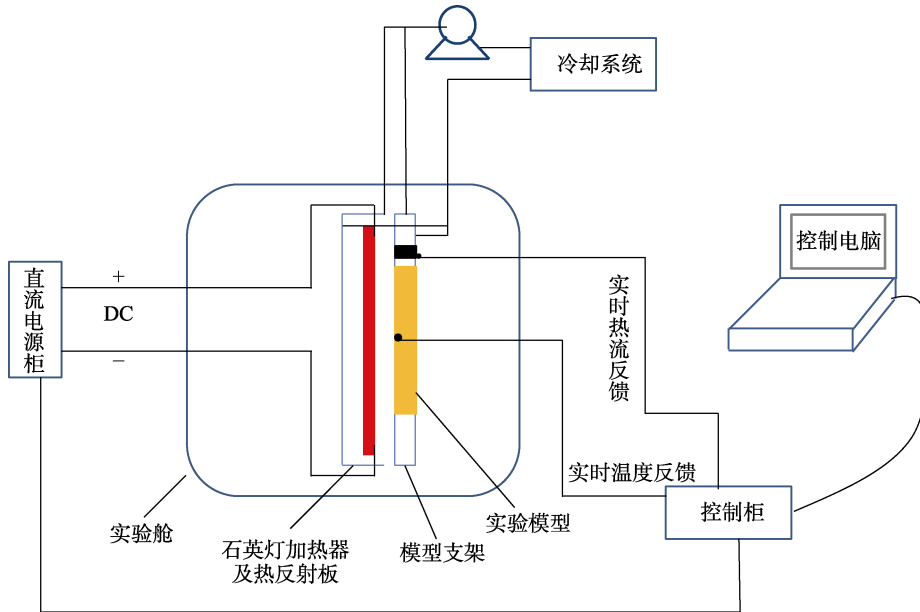


图 5 石英灯辐射加热试验系统
Fig.5 Radiation heating test system of quartz lamp

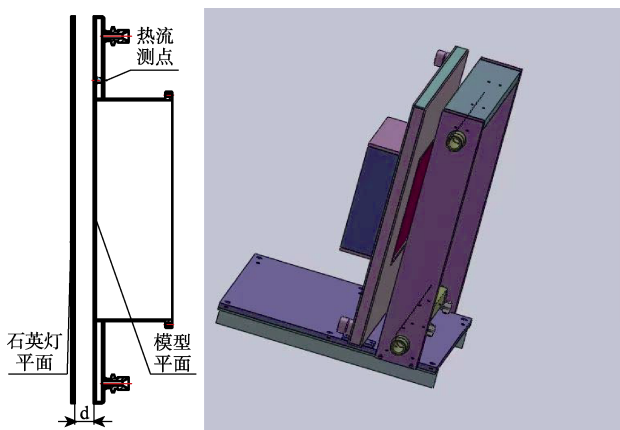


图 6 加热器辐射平面与平板模型之间的相对距离
Fig.6 Relative distance between quartz lamp radiation plane and model surface

在平板模型上按照图 7 来布置测温点, 模型表面温度测点 4 个, 从模型正中心开始沿着模型边线法线方向每隔 25 mm 设置一个点, 记为 1#、2#、3#、4#, 热流测点距模型中心 150 mm 处。通过一系列试验, 研究石英灯加热器对平板模型加热过程中某些点的温度变化曲线和热流值随加热器功率的变化曲线, 分析石英灯加热器对于平板加热区域的温度均匀性, 并

分别以平板模型表面某点温度和热流参数作为控制变量。试验前设定温度或者热流控制变量的初始值或者温度/热流曲线, 控制系统通过现场采集的模型表面温度或辐射热流密度作为反馈, 采用 PID 的控制模式, 实时调节电源的输出功率, 控制材料表面温度或辐射热流密度达到要求值, 或者实现与目标温度曲线或热流曲线的动态跟踪。温度测试采用 K 型热电偶, 热流测试采用 $0\sim 500\text{ kW/m}^2$ 量程的戈登热流计。

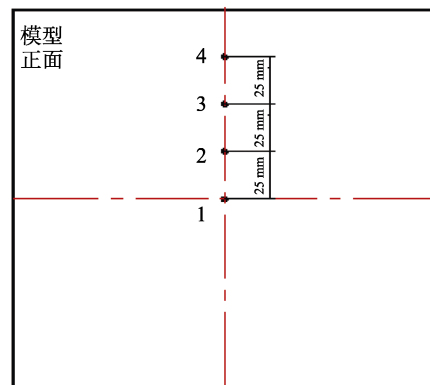


图 7 实验模型表面测温点布局
Fig.7 Surface temperature measuring point of experimental model

2.1 加热器辐射热流

为了掌握石英灯加热器对平板模型辐射加热过程中某点处的热流变化规律, 提高石英灯加热器辐射加热的预测能力, 对热流随着加热器功率和加热器辐射面与平板模型之间的相对距离的变化特性进行研究具有重要的实验参考价值。目前对石英灯加热器辐射加热特性的研究获得了不少成果^[19-22], 但已有研究大多数还是以基于蒙特卡罗方法为主的模拟计算为主, 并且对石英灯阵列做了一系列假设^[21]。因此, 本文对上述设计开发的组合式石英灯加热器热流进行了试验分析, 研究加热器加载功率, 加热器与平板之间的相对距离等不同状况下, 加热器对于某点辐射热流的影响规律。

针对加热器对于某点的辐射热流开展了 2 组实验, 见表 1。实验一是按照如图 6 所示的加热器辐射平面与平板模型之间的相对距离, 将其设定一个固定的距离 ($d=10\text{ mm}$), 研究某点的辐射热流随加热器

加载功率的变化规律; 实验二是将加热器辐射平面与平板模型之间的相对距离 d 取 10、15、20、30 mm 等 4 种不同情况, 分别研究某一固定加载功率下, 对模型表面某点处的热流的影响。实验一中, 通过不断改变电源在石英灯加热器上的加载功率, 获得石英灯加热器对平板模型某点处热流的一系列数据, 重复实验 2 次, 每次试验加载功率均为 0~20 kW, 对于每 1 kW 功率范围内, 对 2 次试验获得的大量数据分别分段取平均值, 再将 2 组数据融合在一起, 进行数据拟合。研究显示, 在石英灯加热器与平板模型表面距离一定的情况下, 石英灯加热器对于平板某点热流与加热器功率之间存在着近似的线性关系, 如图 8 所示。对于加热器启动的初始阶段 (0~2 kW), 石英灯加热器对于模型表面处的热流随加载功率的响应很缓慢。过了初始阶段, 基本上呈现一个线性增长。实验过程中, 加载功率上升至 20 kW 时, 实验模型平板某点处的热流达到 200 kW/m^2 。

表 1 石英灯加热器辐射加热性能实验设置

Tab.1 Experimental setting of radiant heating performance of quartz lamp heater

实验序列	距离/mm	加载功率/kW	辐射热流
实验一	10	0~20	固定距离下, 研究平板某点的辐射热流随加热器加载功率的变化规律
实验二	10、15、20、30	0~13	改变加热器辐射面与平板之间的距离, 研究相同加载功率下模型表面某点处的热流随距离改变的变化规律

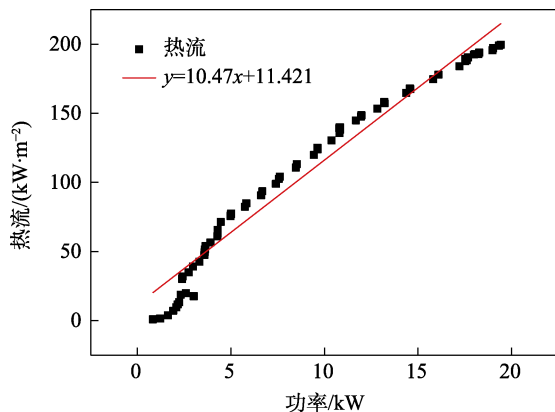


图 8 石英灯加热器辐射热流与功率之间的拟合曲线 ($d=10\text{ mm}$)

Fig.8 Fitting curve of radiation heat flux and power of quartz lamp heater($d=10\text{ mm}$)

对于实验二, 将加热器辐射平面与平板模型之间的相对距离设置为 4 种不同距离值, 分别为 10、15、20、30 mm, 分别对应于实验状态 Case1、Case2、Case3、Case4。然后分别对每一种距离下将石英灯加热器的加载功率从 0~13 kW 进行加载, 每组实验 3 次, 再将 3 次实验数据融合后再分段取平均值, 实验结果如图 9 所示。研究发现, 石英灯加热器对于模型表面某点处的热流随着相对距离的增大而呈现下降趋势。随着相对距离的增加, 石英灯辐射能量将向更

大的区域扩散^[21], 因此随着距离的增大, 模型上某点处的热流将逐渐降低。此外, 对于本文 Case1 与 Case2~4, 除了石英灯辐射面与模型表面的距离发生了变化, Case1 时石英灯加热器和模型表面之间的间隙四周被反射面完全包裹, 而 Case2~4 时石英灯加热器和模型表面之间的距离不仅在不断增大, 而且它们四周间隙没有反射板的遮挡, 增大了热量向四周的扩散。从实验结果来看, 这是导致 Case1 与 Case2~4 热流出现显著差异的一个重要原因。对于 Case4, 采取前述处理方法, 给出了石英灯加热器对于平板某点热流与加热器功率之间存在的近似线性关系, 如图 10 所示。对于石英灯加热器低功率情况 ($<2\text{ kW}$), 与 Case1 相比, 2 种情况下加热器对于某点的辐射热流随着功率的变化均没有很好的响应, 辐射热流几乎没有变化。随着加载功率的加大, 石英灯加热器对模型表面某点处的辐射热流与加热器加载功率的响应程度不一样。由于加大了石英灯辐射面和模型平板之间的相对距离, 同时改变了加热器辐射面和模型平板之间的热反射板遮挡情况, Case4 相比于 Case1, 从两者拟合的线性方程看, 两者的斜率不一样, 这说明加热器辐射热流随着加载功率的增长要更缓慢一些。

2.2 辐射加热区域温度均匀性分析

如前述 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 平板试验件模型, 在平

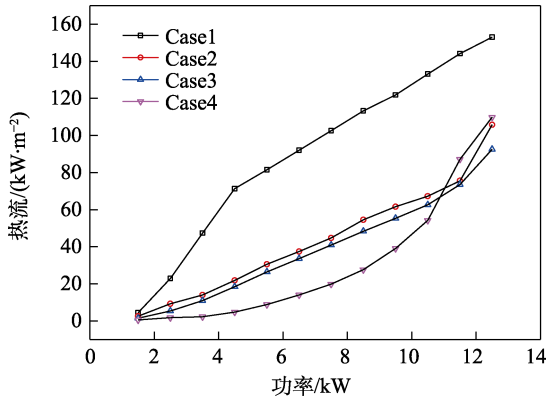


图9 石英灯加热器对实验模型某点处不同距离下热流的变化

Fig.9 Change of heat flux of quartz lamp heater to a certain point of experimental model at different distances

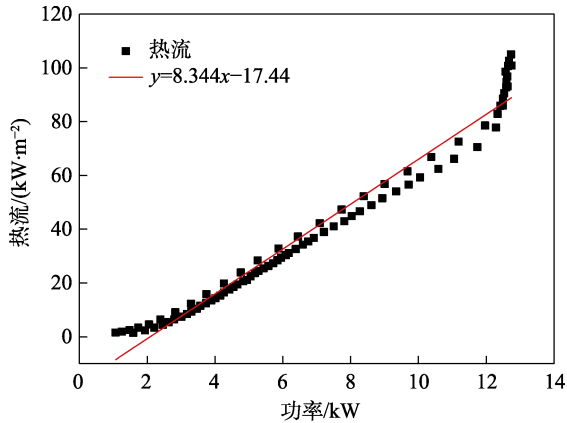
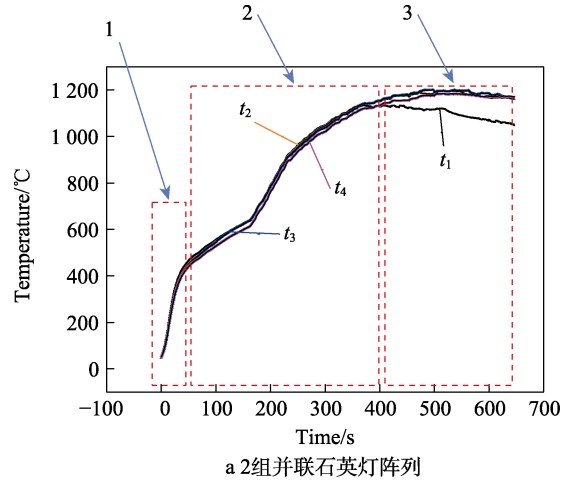


图10 石英灯加热器辐射热流与功率之间的拟合曲线 ($d=30\text{ mm}$)

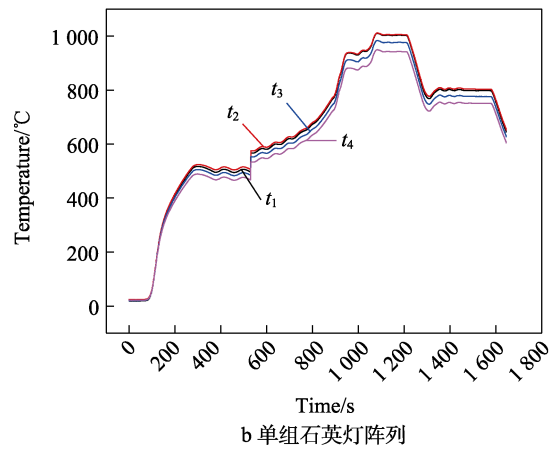
Fig.10 Fitting curve of radiation heat flux and power of quartz lamp heater($d=30\text{ mm}$)

板模型上按照图7来布置测温点,模型表面温度测点4个,从模型正中心开始沿着模型边线法线方向每隔25 mm设置一个点,记为1#、2#、3#、4#。通过对材料在石英灯加热器热辐射环境下的表面温度分布均匀性进行分析,如图11所示。从图11a中可以看出,整个实验过程中可以分为3个阶段,前50 s时间为第1阶段,4个测点的温度上升速率和同一时刻的温度值均保持很好的一致性。升高到大约450 °C后进入第2阶段,在此阶段内,离中心处最远的4#测点的温度与其他3个测点的温度形成一定的差距,1#~3#测点温度依然保持很好的一致性。在第3阶段,4#测点温度又开始与其余测点温度保持很好的一致性,其中第1#测点由于实验过程中松动,导致了试验数据的波动。

有研究表明^[23],当灯阵面积大于试件面积时,受热面温度分布均匀性更优,为保证较高试件表面温度分布均匀性,应尽可能增加灯阵与试件的面积比,同时将试件放置于灯阵的几何中心位置。因此,本文所设计的并联组合式石英灯加热器灯阵辐射面尺寸400 mm×



a 2组并联石英灯阵列



b 单组石英灯阵列

图11 石英灯加热器对模型表面不同测点的辐射加热温度变化曲线

Fig.11 Curve of radiant heating temperature change of quartz lamp heater at different points on model surface: a) two parallel quartz lamp arrays; b) single group quartz lamp array

400 mm,实际模型平板尺寸为200 mm×200 mm,加热器核心加热区域完全覆盖整个实验模型受热平面,此石英灯阵列在实验模型中心及向四周扩散的过程中能够形成很好的均匀加热区。根据文献^[22]的研究结果,在灯阵高度一定的条件下,如果被加热面尺寸不变,靠增大灯阵面积可以在一定程度上改善热流密度均匀性,随着灯阵高度的增加,热流密度均匀性逐渐改善。这说明增加灯阵的高度可以较好地改善被加热面的热流密度均匀性。从上图11中可以看到,将所设计的并联组合式石英灯加热器进行拆分,单独加热与2组并联相比,由于单组石英灯阵列高度降低了,中心向边缘延伸的方向上温度均匀性明显变差,在中心温度 t_1 达到1000 °C时, $t_2\sim t_4$ 分别为1001、973、940 °C。在2组并联情况下,当中心温度 t_1 达到1000 °C时, $t_2\sim t_4$ 分别为997、989、975 °C。2种情况下,辐射加热区域平均温度梯度分别为8 °C/cm和3.3 °C/cm。根据文献^[23]中提到的试件受热面上温度不均匀度的计算方法,温度不均匀度分别为3.14%和1.27%。从实验数据的对比分析可以看到,石英灯加

热器 2 组并联后, 对于实验模型平板加热区域的温度均匀性有明显的提升。

2.3 辐射加热区域温度和热流的跟随性控制

石英灯辐射式加热系统在热环境试验中起重要作用, 随着型号研制水平的提升, 对加热系统提出了更高的要求, 为了使得地面热环境模拟更加真实、有效, 石英灯加热器需要具有可控的温度或者热流跟踪调节能力。由于石英灯辐射加热器的热惯性小, 电控性能优良, 非常适合于高速变化的瞬态气动加热模拟^[10,18,24]。

本文以上述平板模型表面 1#测点处的温度和前述模型表面某点处的热流为跟踪对象, 在石英灯加热器与模型表面相对距离固定的情况下, 预先设定了一条任意的热流随时间的变化曲线和温度随时间的变化曲线。再通过实际测试采集的温度和热流数据为反馈, 通过控制程序实施温度和热流的控制, 以满足实际运行过程中加热器对材料按照既定的温度或热流曲线进行加热, 实际跟踪控制效果良好, 实现了温度和热流参数的动态跟踪, 如图 12 和 13 所示。

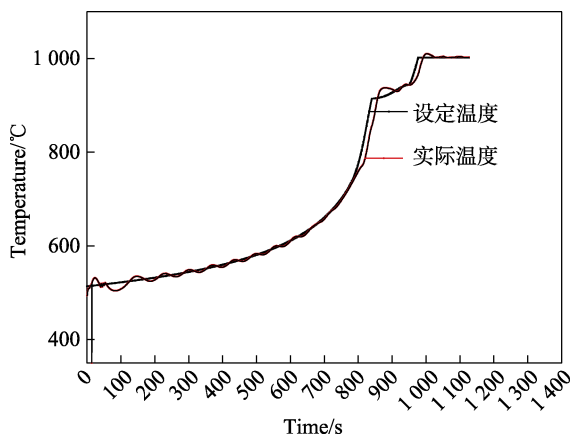


图 12 石英灯加热过程中模型表面实测温度与设定温度曲线对比

Fig.12 Comparison between measured temperature curve and set curve of model surface during quartz lamp heating

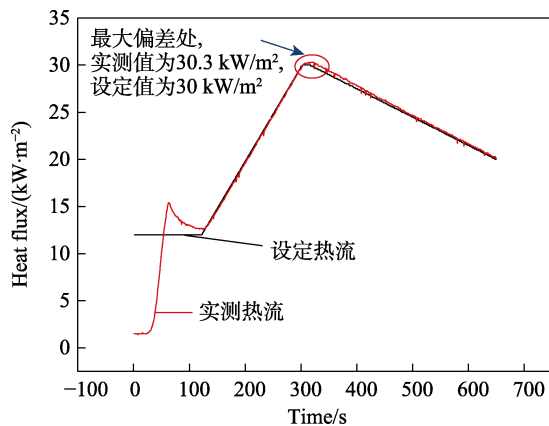


图 13 石英灯加热过程中模型表面实测热流与设定热流曲线对比

Fig.13 Comparison between measured heat flux curve and set curve of model surface during quartz lamp heating

上述试验结果表明, 在石英灯加热器对平板模型加热的实验过程中, 可以很好地通过调节加热器电参数来控制加热器对于模型表面某点的实际温度和热流, 由于加热器电流增加或者减少对于热流的控制非常快捷, 使得整个系统可以很高精度地实现热流目标曲线的动态跟踪。图 13 中显示, 热流实测值 30.3 kW/m^2 与设定值 30 kW/m^2 最大偏差为 1%, 整个过程热流控制精度保持在 1% 以内。对于加热器加热试验过程中材料表面温度的非线性连续变化, 虽然也能基本实现准确的非线性动态跟踪模拟, 但是因为受到材料的温度响应特性, 在温度曲线转弯波动的时候会有一定的滞后性, 总体上能够取得与设定环境相符的非线性气动加热试验模拟效果。

3 结论

1) 本文设计开发了一款并联组合式石英灯加热器, 将 2 组独立的平行布置石英灯阵进行并联, 石英灯加热器的四周和背面均采取了热反射材质将石英灯辐射热量进行反射, 使其朝向一个方向进行辐射加热, 形成了一个温度和热流可控的均匀的辐射加热区域。

2) 通过单组石英灯阵列加热与 2 组石英灯阵列并联组合后进行加热试验相比, 在平板模型中心点温度达到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 向平板模型边缘方向延伸依次获得 3 个温度值, 单组和 2 组并联情况下温度分别为 1001 、 973 、 $940 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 997 、 989 、 $975 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2 种情况下, 辐射加热区域平均温度梯度分别为 8 、 $3.3 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, 温度不均匀度分别为 3.14% 和 1.27% 。由单组石英灯阵列转为 2 组并联石英灯阵列, 中心向边缘延伸的方向上温度均匀性得到明显改善。

3) 对于所设计开发的并联组合式石英灯加热器, 本文给出了加热器辐射面与模型平板不同距离之间的热流变化规律, 以及加热器对平板模型某点热流与加热器电参数的关联特性。石英灯加热器对于平板某点热流与加热器功率之间存在着近似线性关系, 以模型表面某点处热流和温度参数作为控制变量, 实现了加热器对模型某点的热流和温度的跟踪模拟, 为后续石英灯加热器的实际运行和对材料的变参数跟踪模拟实验提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 喻成璋, 刘卫华. 高超声速飞行器气动热预测技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2021, 32(2): 14-21.
YU C Z, LIU W H. Research Status of Aeroheating Prediction Technology for Hypersonic Aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 14-21.
- [2] XING H J, ZHANG L F, LIANG Y, et al. Distribution of Radiation Heat Flux on a Plane Receiver Produced by a Multi-Quartz Lamps Heating System for Thermal-Structural Tests[J]. Case Studies in Thermal Engineering,

- 2023, 49: 103314.
- [3] 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 D F, PAN B, ZHENG L M, et al. Aerodynamic Heating Simulation Method and Testing Technique for Materials and Structures of Hypersonic Flight Vehicles[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(3): 250-258.
- [4] 秦强, 成竹, 蒋军亮. 高超声速飞行器热-结构试验体系与发展概况[J]. 空天技术, 2023(4): 59-69.
QIN Q, CHENG Z, JIANG J L. Thermal-Structure Test System and Development of Hypersonic Vehicles[J]. Aerospace Technology, 2023(4): 59-69.
- [5] 张伟, 张正平, 李海波, 等. 高超声速飞行器结构热试验技术进展[J]. 强度与环境, 2011, 38(1): 1-8.
ZHANG W, ZHANG Z P, LI H B, et al. Progress on Thermal Test Technique of Hypersonic Vehicle Structures[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(1): 1-8.
- [6] 陈连忠, 欧东斌, 高贺, 等. 高超声速飞行器热防护电弧风洞气动加热试验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
CHEN L Z, OU D B, GAO H, et al. Arc Wind Tunnel Aerodynamic Heating Test Technology for Hypersonic Aircraft Thermal Protection[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [7] 赵保平, 严超, 孟祥男, 等. 大型热环境试验技术的最新进展[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 1-9.
ZHAO B P, YAN C, MENG X N, et al. Recent Development and Prospect of Large Spacecraft Thermal Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 1-9.
- [8] 秦强, 蒋军亮, 成竹, 等. 临近空间高超声速飞行器地面热防护试验技术[J]. 飞机设计, 2016, 36(6): 41-48.
QIN Q, JIANG J L, CHENG Z, et al. Ground Thermal Protection Experimental Technologies for near Space Hypersonic Vehicle[J]. Aircraft Design, 2016, 36(6): 41-48.
- [9] 欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 等. 大尺寸结构部件电弧风洞烧蚀试验技术[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(5): 661-666.
OU D B, CHEN L Z, DONG Y H, et al. Ablation Test Technique of Large Scale Structure Component in Arc-Heated Wind Tunnel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(5): 661-666.
- [10] 吴大方, 潘兵, 高镇同, 等. 超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 255-271.
WU D F, PAN B, GAO Z T, et al. On the Experimental Simulation of Ultra-High Temperature, High Heat Flux and Nonlinear Aerodynamic Heating Environment and Thermo-Mechanical Testing Technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 255-271.
- [11] 王毅, 秦强, 赵朋飞, 等. 舵面结构热模态试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 7-13.
WANG Y, QIN Q, ZHAO P F, et al. Research on Thermal Modal Test Method of Rudder Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(8): 7-13.
- [12] 朱言旦, 魏东, 刘深深, 等. 石英灯阵模拟非均匀气动加热的功率优化[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 118-125.
ZHU Y D, WEI D, LIU S S, et al. Power Optimization of Non-Uniform Aerodynamic Heating Simulated by Quartz Lamp Array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 118-125.
- [13] 张肖肖, 张赐宝, 赵旭升, 等. 平板形、圆柱形、圆锥形石英灯阵列热流计算方法[J]. 航空科学技术, 2022, 33(11): 34-40.
ZHANG X X, ZHANG C B, ZHAO X S, et al. Computation Method for the Heat Flux of Quartz Lamp Heating Array in the Plane, Cylindrical and Conical Shape[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 34-40.
- [14] 王振亚, 杨志斌. 一种锥形加热装置设计方法[J]. 工程与试验, 2022, 62(3): 57-60.
WANG Z Y, YANG Z B. A Design Method of Conical Heater[J]. Engineering & Test, 2022, 62(3): 57-60.
- [15] 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 L S, QI B, TIAN N, et al. Study on Modeling Analysis and Testing Method of Electro-Thermal Properties of Quartz Lamp[J]. Infrared Technology, 2015, 37(10): 877-882.
- [16] 夏齐时, 张利嵩, 张凯, 等. 长时间高温热环境考核试验中石英灯阵的破坏及预防[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 75-81.
XIA L S, ZHANG L S, ZHANG K, et al. Destruction and Prevention of Quartz Lamp Array in High Temperature Long-Term Thermal Environment Assessment Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 75-81.
- [17] 孔凡金, 尹晓峰, 张伟, 等. 辐射加热器灯头盲区对热流场影响分析[J]. 强度与环境, 2013, 40(3): 48-52.
KONG F J, YIN X F, ZHANG W, et al. Effect Analysis of Quartz-Lamp Holder Blind Area of Radiation Heater to Heat Flux Field[J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(3): 48-52.
- [18] 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 D C, LIN H. Main Technical Analysis of Quartz Lamp Radiation Transient Thermal Environment Experiment Main Technical Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 36-40.
- [19] 王智勇, 黄世勇, 巨亚堂. 石英灯辐射加热试验热流分布优化研究[J]. 强度与环境, 2011, 38(2): 18-23.
WANG Z Y, HUANG S Y, JU Y T. The Quartz Radiation Heating System Heat Flux Distribution Optimization Study[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(2): 18-23.
- [20] 朱言旦, 刘骁, 曾磊, 等. 大面积气动加热的石英灯阵

- 模拟优化设计研究[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 1211-1219.
ZHU Y D, LIU X, ZENG L, et al. Study on Optimization Design of Aerodynamic Heating of Large Area Simulated by Quartz Lamp Array[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 1211-1219.
- [21] 朱言旦, 曾磊, 董威, 等. 石英灯阵热流分布规律计算与试验研究[J]. 宇航学报, 2017, 38(10): 1131-1138.
ZHU Y D, ZENG L, DONG W, et al. Computational and Experimental Study on Quartz Lamp Array Heat Flux Distribution[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(10): 1131-1138.
- [22] 杨晓宁, 孙玉玮, 余谦虚. 提高红外灯阵热流模拟均匀性的优化设计方法[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 27-31.
YANG X N, SUN Y W, YU Q X. The Optimized Design for Improving Flux Uniformity of Infrared Lamp Array[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 27-31.
- [23] 夏齐时, 齐斌, 张昕, 等. 防隔热试验用平板型石英灯加热器热环境分析[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 617-621.
XIA L S, QI B, ZHANG X, et al. The Thermal-Environment Analysis of Flat Quartz Lamp Heater System for Thermal Protection & Insulation Test[J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 617-621.
- [24] 张伟, 王乐善, 王梦魁, 等. 气动加热模拟试验加热系统控制研究[J]. 强度与环境, 2005, 32(3): 45-52.
ZHANG W, WANG (L / Y) S, WANG M K, et al. Research on Control of Heating System for Aerodynamic Heating Simulation Test[J]. Structure & Environment Engineering, 2005, 32(3): 45-52.
- [25] 柳晓宁, 任杰, 朱熙, 等. 石英灯阵高温试验环境换热特性仿真分析[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(1): 26-32.
LIU X N, REN J, ZHU X, et al. Heat Transfer Simulation of High-Temperature Test Environment with Quartz Lamp Array[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(1): 26-32.