

基于射线追踪法的模块石英灯热流计算方法

李昕昕, 王彬文, 吴敬涛, 张肖肖, 刘宁夫

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要:针对带反射屏的模块石英灯热流计算时间较长问题,采用射线追踪法计算模块石英灯辐射热流,灯管表面随机释放出能量光束,光束经过反射屏反射作用于目标面上,每个点能量光束累积得到目标面表面热流。将表面热流作为试验件的热源边界进行传热分析,计算出试验件内部温度分布,实现了模块化石英灯加热器的温度预测。开展模块石英灯的典型件辐射加热试验,通过射线追踪法和辐射传热计算典型试验件的热流和温度分布,试验结果与计算结果的相对误差小于 10%,验证了射线追踪法可以实现模块石英灯加热的表面热流预测,为热强度试验设计提供支撑。

关 键 词:模块石英灯;热流密度;射线追踪法;反射屏

中图分类号:V216.4

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)04-0758-07

对于马赫数超过 10 的高超声速飞行器,迎风面最高温度超过 1 500 °C,背风面最高温度超过 1 100 °C;高超声速飞行器地面验证试验气动热模拟以辐射加热为主要手段,部件试验主要采用石英灯辐射加热器,加热能力极限为 1 200 °C。石墨加热器能提供 1 500 °C 以上的加热能力,但不能在大气环境下使用^[1]。受加热能力限制,目前相关的高超声速飞行器结构部件热强度试验采用减薄防热层厚度或限制最高温度、总加热量等效的方法进行,存在验证不充分的问题,急需加热能力更高的加热装置,以满足超高温加热需求。

由于在石英灯阵背面增加反射板可以提高加热器转换功率^[2],中国飞机强度研究所热强度研究室设计了模块石英灯加热器,将水、电、气路等在一个狭小空间中进行集成设计,形成加热能力达到 1 500 °C 以上的加热装置。模块石英灯采用 6 支石英灯密集排列,将反射板设置为 U 型,并在模块内部设计了主动冷却装置,提升目标面的热流,并且确保了反射板和灯管温度不超过适用范围。

针对带反射屏和反射涂层的石英灯加热器的热流分布,国内外学者一般采用蒙特卡洛方法对其进

行模拟研究,该方法能较为准确地模拟试验件表面到达热流,缺点是随着追至光线数量的增加,计算时间成倍增加,而且光线不能可视化。夏吝时等^[3]采用蒙特卡洛法针对石英灯加热器的灯管间距、灯管阵列与受热面间距、水冷反光板与灯管间距等因素进行分析,计算了辐射热场中受热表面温度分布均匀性和热流密度,对加热器结构设计起到了指导作用。宋伟浩等^[4-5]利用蒙特卡洛法确定了出射光线的位置和方向,通过追踪红外灯发出的大量出射光线的轨迹,累积在辐射面上的光线落点数量,计算得出受热平面辐射照度分布情况,有效模拟了红外灯辐射照度分布。Tan 等^[6]建立了线性或非线性各向异性散射介质的辐射传递模型,在镜面反射条件下,推导了具有不透明边界的吸收层和各向异性散射层的辐射传递系数,解决了辐射传热和导热传热的耦合问题。Tumer 等^[7]提出了带有金属反射罩红外单灯的热流预测方法,与理论解进行对比,证实了反射罩的镜面反射作用增强了红外灯的辐射场强度,给出了较准确的红外单灯热流计算模型。朱言旦等^[8-10]基于蒙特卡洛方法分析了加载高度对石英灯阵列热流分布的影响规律。结果表明,随着高度的增大,中心区域均匀区面积先增大后减小,计算结果与试验结果符合较好。并且基于遗传算法,发展了以石英灯功率为优化参数的热流模拟优化方法,有效模拟大面积非均匀气动加热,提高了试验模拟的

收稿日期:2024-08-28

基金项目:航空科学基金(ASFC-2023M058023002)资助

作者简介:李昕昕(1996—),工程师

通信作者:王彬文(1974—),研究员 e-mail:1511203174@qq.com

精度。刘守文等^[11]基于蒙特卡洛法建立了随机能束的辐射数学模型,给出了反射率、吸收率、辐射波长等辐射参数的确定方法,提出了红外灯热流分布计算流程,可作为红外灯加热时优化设计的基础。孔凡金等^[12]针对石英灯辐射加热装置,对比分析几种辐射计算软件的计算精度,得到不同计算模型的适用性,并为试验热环境的快速模拟提供参考。张坤等^[13]基于蒙特卡洛算法对钨丝灯圆柱体光源进行建模,分析光源位置对计算准确度的影响,仿真结果表明:存在一个最佳的光源装配位置,使仿真精度高于98%,证实该方法可以达到高精度模拟的要求。杨国巍等^[14]考虑了影响红外灯热流的因素,对红外灯空间坐标进行了参数优化,并测试了热流均匀性,得到的红外单灯热流分布计算结果与测试结果接近。王智勇等^[15]通过数值模拟仿真,研究了石英灯辐射加热过程中影响平板热流均匀性的因素,通过优化石英灯参数改善了平板式加热器内部热流分布,提高了热流均匀性。

由于采用蒙特卡洛法计算带反射屏的模块石英灯热流时间太长,本文提出了将射线追踪法用于带反射屏加热器的热流计算。大量能量光束从灯丝边界随机释放,设置灯丝的总发射功率,将灯管总功率均匀分配到每个能量光束中,能量光束随机地从石英灯管表面发射出去,灯管发出的射线包含在各离散单元面的半球空间内。能量光束经过反射屏的镜面反射作用后,沿着射线轨迹向四周发射,通过追踪发射光束的路径,最后大部分射线落在试验件表面。射线在某一落点的能量累积为该点的热流密度,所有点的热流密度共同组成了目标表面的热流密度,根据追踪射线落点的方法得到目标面的沉积射线功率,从而实现了带反射屏加热器的热流预测。利用射线追踪法计算模块化石英灯热流分布,不考虑射线的二次反射作用,提高了计算速度,保证了计算精度,同时将射线轨迹可视化,可以直观看到试验件表面的射线落点密度。

1 计算方法

模块石英灯加热器如图1所示,将加热器内部结构进行简化,主要考虑反射屏对热流的增强作用^[16-17]。利用射线追踪方程计算模块石英灯热流,模块石英灯的计算模型如图2所示,由6根石英灯管和U形反射屏组成,主要由反射屏反射石英灯发出

的射线提供热量。每根石英灯管额定输出功率为3.3 kW,灯管长度为320 mm,相邻2根灯管的间距为15 mm,距离目标面高度为60 mm。用扫掠法对灯管、反射屏和目标面分别进行网格划分,网格总数为35 202。

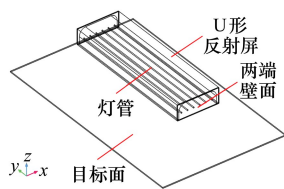
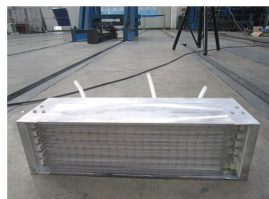


图1 模块石英灯实物图 图2 单个模块石英灯计算模型

射线追踪方程如(1)式所示。

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1)$$

式中: q 为射线位置,单位 m; t 为时间,单位 s; ω 为角频率,单位 rad/s; k 为波矢,单位 rad/m。

射线从石英灯边界释放,射线释放的初始位置基于网格密度分布,每次释放射线数一般要达到 10^4 量级^[18],射线方向矢量沿各离散单元的半球空间释放,射线随机从灯管半球空间内释放,如图3所示。同时设置灯管的总源功率,总源功率根据6根灯管实际输出功率确定,一般不超过灯管的额定输出功率。每根灯管的额定输出功率为3.3 kW,单个模块化石英灯的额定输出功率为19.8 kW。计算公式为

$$f(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \sin \theta, \quad \theta \in [0, \pi/2], \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad (2)$$

式中: θ 为发射点法向与发射方向的夹角,单位($^\circ$); φ 为灯管周向角,单位($^\circ$)。

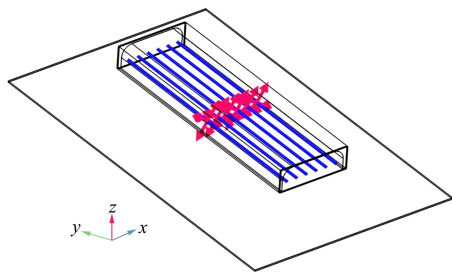


图3 模块石英灯射线方向

将U形反射屏设置为镜面反射,反射系数为

0.7, 吸收系数为 0.3, 计算公式为

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2\cos\theta_i \mathbf{n}_s \quad (3)$$

式中: $\mathbf{n}_r$ 为反射后的射线方向矢量; $\mathbf{n}_i$ 为射线初始方向矢量; $\mathbf{n}_s$ 为反射屏上的法向矢量; θ_i 为射线发射角度。

将两端壁面反射设置为漫反射, 反射系数为 0.5, 吸收系数为 0.5, 计算公式为

$$\mathbf{k}_n = |\mathbf{k}_c| \cos\theta \quad (4)$$

$$\mathbf{k}_t = |\mathbf{k}_c| \sin\theta \cos\varphi \quad (5)$$

式中: θ 为发射点法向与发射方向的夹角, 单位($^\circ$); φ 为灯管周向角, 单位($^\circ$); $\mathbf{k}_n$ 为射线法向波矢, 单位 rad/m; $\mathbf{k}_t$ 为射线轴向波矢, 单位 rad/m; $\mathbf{k}_c$ 为撞击壁时的射线波矢, 单位 rad/m。

将目标面表面设置为沉积射线功率接收面, 根据入射射线的功率计算落到目标面的射线累积功率, 计算公式为

$$Q = \sum \frac{1}{A_j} Q_j \quad (6)$$

式中: A_j 为沿灯管方向第 j 个离散单元的面积, 单位 m^2 ; Q_j 为沿灯管方向第 j 个离散单元释放出的射线

功率, 单位 W。

2 计算结果分析

2.1 单个模块石英灯热流计算

射线沿灯管各离散单元的半球空间释放数为 3×10^4 , 灯管额定输出功率为 19.8 kW, 不同时刻下的射线轨迹如图 4 所示。开始时刻, 射线从灯管发射, 没有到达反射屏和目标面, 所以目标面上没有热流分布; $t=0.4 \text{ ns}$ 时, 部分射线直接传播和经过反射屏反射后到达目标面表面, 热流云图呈现环形分布, 中间热流高, 四周热流低, 根据统计学原理, 说明射线落点主要集中在中心区域, 从中心向四周落点逐渐减少; $t=0.6 \text{ ns}$ 时, 大部分射线到达目标面表面, 目标面表面热流最大值为 223 kW/m^2 ; $t=0.8 \text{ ns}$ 时, 几乎所有射线到达目标面表面, 有些射线落在目标面之外, 可以忽略不计, 目标面表面热流达到稳定, 热流最大值为 249 kW/m^2 。此后试验件表面热流值保持稳定, 说明单个模块化石英灯在额定功率下的最大辐射热流在 250 kW/m^2 左右。

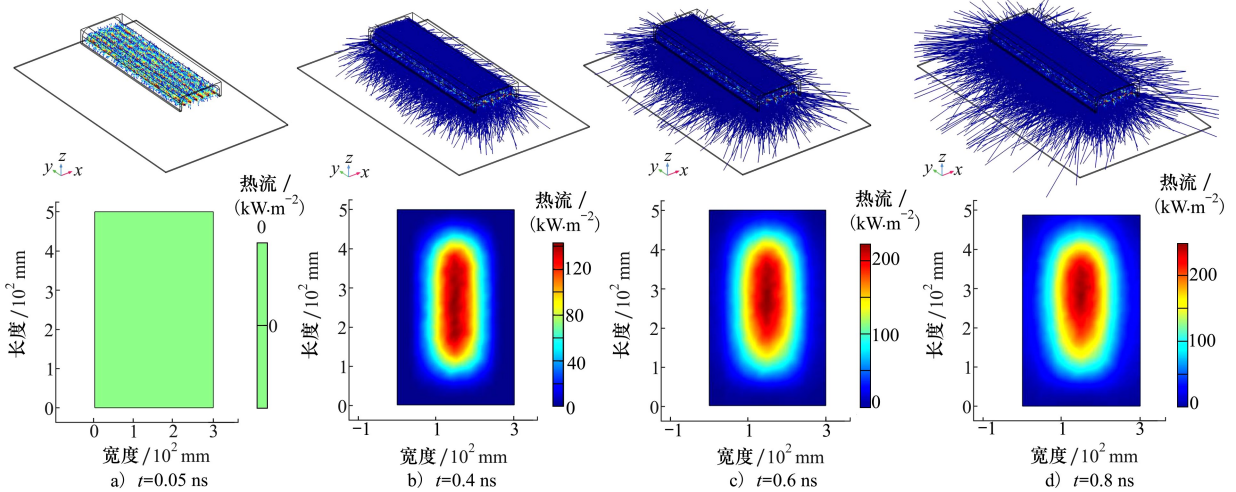


图 4 不同时刻下的射线轨迹和目标面热流分布

2.2 计算结果与试验结果对比

验证试验采用 4 个竖直排布的模块化石英灯对 SiC 陶瓷板进行加热, 试验件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, SiC 材料参数随温度变化, 如图 5 所示。模块石英灯加热示意图如图 6 所示, 模块石

英灯的几何参数同第 1 节, 模块石英灯距离试验件表面距离为 50 mm。4 个模块石英灯组成的加热器总输出功率随时间变化曲线如图 7 所示, 将加热器输出功率曲线作为射线追踪法计算时的总源功率进行施加。

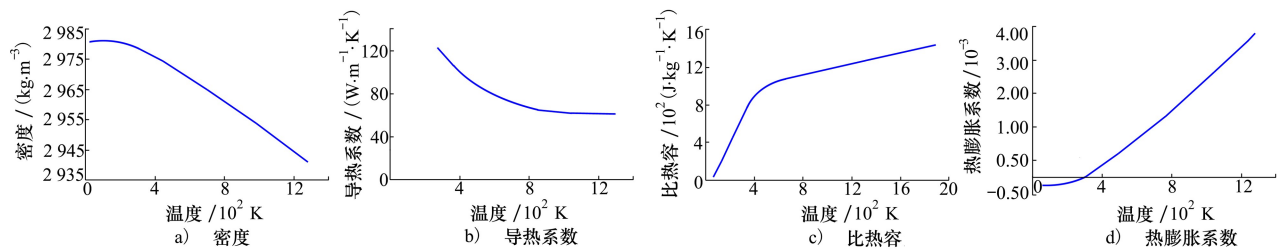


图 5 SiC 材料参数

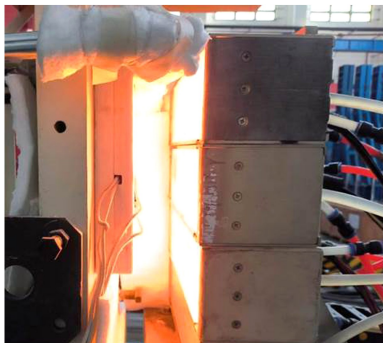


图 6 模块化石英灯加热图

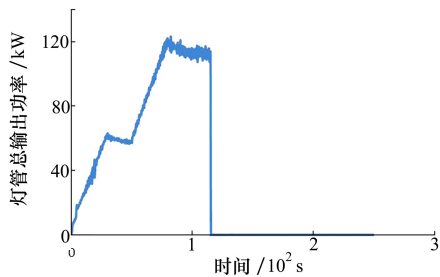


图 7 加热器总输出功率

在试验加热过程中测量试验件正面热流和试验件背面温度,试验件测点位置如图 8 所示。

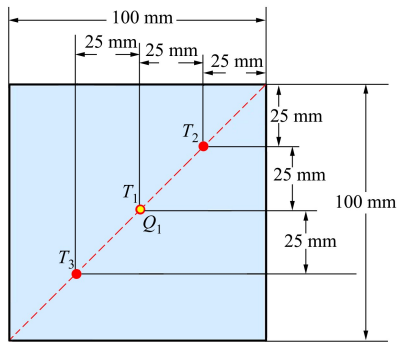


图 8 试验件测点位置

热流测点 Q_1 位于试验件表面中心点,3 个温度测点 T_1, T_2, T_3 位于试验件背面对角线的四等分点

上。试验后 SiC 试验件表面状态如图 9 所示,表面出现了部分氧化,呈现出多孔分布形状。

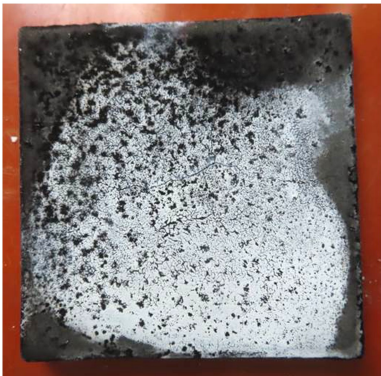


图 9 试验件表面状态

根据试验所用加热器建立的模块化石英灯加热模型如图 10 所示,射线从灯管四周向外发射,经过反射屏反射后作用于试验件表面,热量在试验件中传递,最终实现了整个试验件的加热。试验件表面热流分布和 Q_1 点热流曲线如图 11~12 所示,图中白色方框区域大小为 100 mm×100 mm,代表试验件所在区域,试验件表面的热流分布较为均匀,在 Q_1 点的热流计算结果和试验结果变化趋势基本一致。热流实测值从 0 kW/m² 上升至 175 kW/m² 后保持 20 s,然后热流从 175 kW/m² 上升至 350 kW/m² 保持 35 s,在 115 s 时停止加热,热流开始下降,数据采集到 250 s。热流计算值在上升到 350 kW/m² 之前和实测值基本保持一致,在上升到峰值热流过程中出现了一个小斜坡,在斜坡拐点处实测值为 350.8 kW/m²,计算值为 326.2 kW/m²,最大相对误差为 7.01%,到达峰值处实测值热流为 350 kW/m²,计算值热流为 355 kW/m²,峰值处的相对误差为 1.43%。两者的下降曲线基本吻合,实测过程中由于石英灯停止加热后散热较慢,所以在热流下降过程中实测值拐角处热流下降较为缓慢。

试验件背面温度分布云图和 T_1, T_2, T_3 点温度曲线如图 13~14 所示,温度云图呈现出环状分布,由中间向四周温度逐渐减小,背面 3 个点的温度计算值几乎完全吻合,温度实测值也完全吻合,说明在中间 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的区域温度均匀性良好。对比 T_1 点的计算值和实测值,上升段几乎完全重合,

计算值在 145 s 时达到最大温度 $348.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,实测值在 165 s 时达到最大温度 $348.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度峰值的相对误差为 0.23%,计算值相比于实测值温度下降较快,因为加热器随着加热曲线变化,不存在散热过程,而在试验过程中四周处于一个封闭空腔内,热量消散较为缓慢,温度下降过程中相对误差最大值为 9.93%。

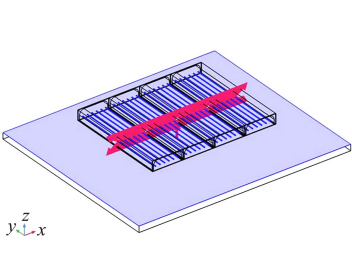


图 10 模块化石英灯辐射加热模型

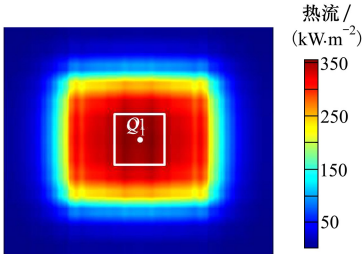


图 11 试验件表面热流分布

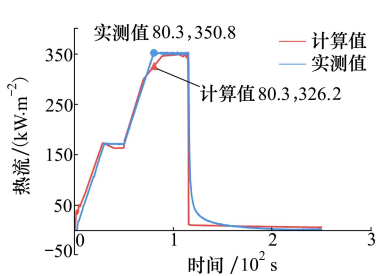


图 12 热流计算值和实测值对比

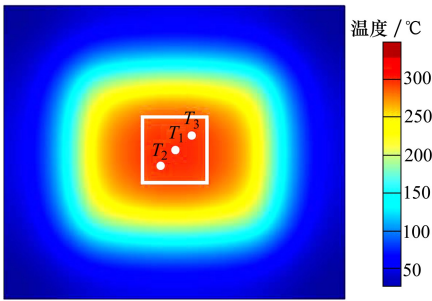


图 13 试验件背面温度分布

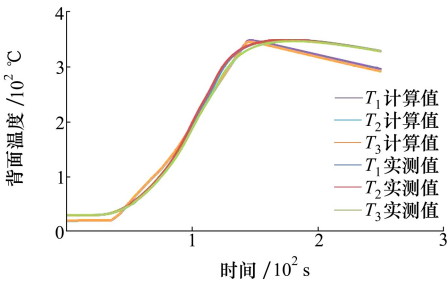


图 14 温度计算值和实测值对比

热流密度,既加快了计算速度,又将计算精度保持在 10% 以内,较为准确地模拟了模块石英灯热流分布,同时用辐射传热方法计算了试验件温度内部传导,可以模拟瞬态传热过程,为热强度试验设计提供参考。

3 结 论

本文提出了用射线追踪法计算模块化石英灯的辐射热流分布,并将多个模块石英灯的计算结果与典型件加热试验的试验结果作对比,得到以下结论:

- 1) 射线追踪法是一种基于概率统计的计算方法,根据灯管发出的能量光束落点累积得到目标面的沉积射线功率,即试验件表面热流;
- 2) 将灯管的输出功率设置为随时间变化的插值函数,可以计算模块化石英灯辐射热流的瞬态传热过程,得到试验件表面的热流变化曲线和试验件内部温度分布;
- 3) 将仿真计算结果与试验测试结果对比,正面热流测点的最大相对误差为 7.01%,背面温度测点的最大相对误差为 9.93%,计算结果吻合度较好。

综上所述,射线追踪法用于计算模块化石英灯

参考文献:

[1] 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 Dafang, PAN Bing, ZHENG Liming, 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 (in Chinese)
- [2] 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 Xiaoning, REN Jie, ZHU Xi, et al. Heat transfer simulation of high-temperature test environment with quartz lamp array [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(1): 26-32 (in Chinese)
- [3] 夏吝时, 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 Linshi, QI Bin, ZHANG Xin, 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 (in Chinese)
- [4] 宋伟浩, 顾伟, 褚建新, 等. 基于红外灯阵加热平面温度均匀性优化设计[J]. *计算机仿真*, 2017, 34(10): 429-434
SONG Weihao, GU Wei, CHU Jianxin, et al. Optimum design of temperature uniformity based on infrared lamp array heating [J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(10): 429-434 (in Chinese)
- [5] 宋伟浩, 周贤文, 张薇. 基于蒙特卡洛方法的红外光源辐照特性模拟[J]. *激光与红外*, 2018, 48(2): 198-204
SONG Weihao, ZHOU Xianwen, ZHANG Wei. Simulation for irradiation characteristics of infrared light source based on Monte Carlo method[J]. *Lasers & Infrared*, 2018, 48(2): 198-204 (in Chinese)
- [6] TAN H P, YI H L, WANG P Y, et al. Ray tracing method for transient coupled heat transfer in an anisotropic scattering layer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(19/20): 4045-4059
- [7] TUMER T, ASH R. Analysis of the thermal environment and thermal response associated with thermal-acoustic testing[J]. *AIAA Journal*, 2013, 4(2): 824-830
- [8] 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 Yandan, ZENG Lei, DONG Wei, et al. Computational and experimental study on quartz lamp array heat flux distribution [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(10): 1131-1138 (in Chinese)
- [9] 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): 122761
ZHU Yandan, WEI Dong, LIU Shenshen, et al. Power optimization of non-uniform aerodynamic heating simulated by quartz lamp array[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(6): 122761 (in Chinese)
- [10] 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[J]. *航空学报*, 2017, 38(9): 121159
ZHU Yandan, LIU Xiao, ZENG Lei, et al. Optimization design of aerodynamic heating of large area simulated by quartz lamp array[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(9): 121159 (in Chinese)
- [11] 刘守文, 尹晓芳, 裴一飞, 等. 基于蒙特卡罗方法的红外灯热流分布研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(2): 608-614
LIU Shouwen, YIN Xiaofang, PEI Yifei, et al. The study of heat flux distribution for infrared lamp based on Monte Carlo method [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(2): 608-614 (in Chinese)
- [12] 孔凡金, 刘宝瑞, 王龙, 等. 石英灯加热器热流场计算方法比较[J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(1): 47-53
KONG Fanjin, LIU Baorui, WANG Long, et al. Comparative analysis of calculation methods for heat flux field of the quartz lamp radiant heater[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(1): 47-53 (in Chinese)
- [13] 张坤, 陈海清, 廖兆曙, 等. 红外光源辐射特性的蒙特卡洛模拟[J]. *激光与红外*, 2010, 40(5): 491-495
ZHANG Kun, CHEN Haiqing, LIAO Zhaoshu, et al. Monte Carlo simulation for the radiation characteristics of infrared light source[J]. *Lasers & Infrared*, 2010, 40(5): 491-495 (in Chinese)
- [14] 杨国巍, 苏新明, 裴一飞, 等. 红外灯阵热流分布仿真优化研究[J]. *航天器工程*, 2011, 20(1): 134-141
YANG Guowei, SU Xinming, PEI Yifei, et al. Study of simulation and optimization for heat flux distribution of infrared lamp array[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(1): 134-141 (in Chinese)
- [15] 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 Zhiyong, HUANG Shiyong, JU Yatang. The quartz radiation heating system heat flux distribution optimization study[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(2): 18-23 (in Chinese)
- [16] 张肖肖, 张赐宝, 赵旭升, 等. 平板型、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 Xiaoxiao, ZHANG Cibao, ZHAO Xusheng, 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 (in Chinese)
- [17] 李昕昕, 王彬文, 张肖肖, 等. 光谱模拟器阵列辐照度分布等效计算方法[J]. *航空学报*, 2023, 44(23): 228493
LI Xinxin, WANG Binwen, ZHANG Xiaoxiao, et al. Equivalent calculation method of irradiance distribution of spectrum simula-

tor array[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(23): 228493 (in Chinese)

[18] 孟庆龙, 王元. 全光谱日光模拟器的辐照特性仿真研究与优化[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(1): 73-80

MENG Qinglong, WANG Yuan. Irradiance characteristic and design optimization of a new full-spectrum solar simulator[J]. *Journal of Solar Energy*, 2012, 33(1): 73-80 (in Chinese)

Heat flux calculation method of modular quartz lamp based on ray tracing method

LI Xinxin, WANG Binwen, WU Jingtao, ZHANG Xiaoxiao, LIU Ningfu

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the problem that the heat flow calculation time is so long of modular quartz lamp with reflective screen, a ray tracing method is proposed to calculate the radiant heat flow of modular quartz lamp. The energy beam is released randomly from the surface of the lamp tube, the light beam through the reflective is reflected and exerts on the target surface, and the accumulation of energy beam at each point gets the surface heat flow of the target surface. The surface heat flow is taken as the heat source boundary of the test piece for heat transfer analysis, the internal temperature distribution of the test piece is calculated, and the temperature prediction is realized of the modular quartz lamp. The heating test of typical test component is carried out for modular quartz lamp, and the heat flow and the temperature distribution of typical test components are calculated by ray tracing method and radiation heat transfer. The relative error between the test results and the calculated results is less than 10%, which verified that ray tracing method could realize the prediction of surface heat flow of the modular quartz lamp, and it can provide support for the design of heat intensity test.

Keywords: modular quartz lamp; heat flux; ray tracing method; reflective screen

引用格式: 李昕昕, 王彬文, 吴敬涛, 等. 基于射线追踪法的模块石英灯热流计算方法[J]. *西北工业大学学报*, 2025, 43(4): 758-764

LI Xinxin, WANG Binwen, WU Jingtao, et al. Heat flux calculation method of modular quartz lamp based on ray tracing method[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2025, 43(4): 758-764 (in Chinese)