

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.06.008

阵列靶防护取样面板热效应仿真分析

张凯^{1,2,3}, 谭逢富^{2,3*}, 侯再红^{2,3}, 黄志刚^{2,3},
仇陈祥^{2,3}, 张巳龙^{2,3}, 吴毅^{1,2,3}

(1 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室,
安徽 合肥 230031;
3 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 探测器阵列靶是测量激光光斑分布的常用设备, 在高功率激光长时间辐照下阵列靶的取样面板需要更高的抗损伤能力。为了提高取样面板的抗损伤能力, 从热设计角度出发, 基于 Ansys Workbench 有限元分析软件, 比较了不同厚度、不同热管排布方式以及不同界面传热系数下, 防护取样面板在高功率激光长时间辐照下的温度场和热应力。分析结果表明, 添加十字热管排布后, 在激光辐照 120 s 时, 6 mm 厚度的取样面板耐受峰值功率密度从 $1470.9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提高至 $3632.1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。该仿真分析为阵列靶防护取样面板的设计提供了有效的理论和数据支持。

关键词: 激光技术; 探测器阵列靶; 有限元分析; 热分析; 静力学分析

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)06-00879-09

Simulation analysis of thermal effects of protective sampling panel for array target

ZHANG Kai^{1,2,3}, TAN Fengfu^{2,3*}, HOU Zaihong^{2,3}, HUANG Zhigang^{2,3},
QIU Chenxiang^{2,3}, ZHANG Silong^{2,3}, WU Yi^{1,2,3}

(1 School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3 Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: Detector array target is a common device for measuring the distribution of laser spot, and the sampling panel of array target needs higher damage resistance under long-term high-power laser irradiation. In order to improve the damage resistance of the sampling panel, based on the finite element analysis software Ansys Workbench, from the perspective of thermal design, the research compares the temperature field and thermal stress of the protective sampling panels with different thicknesses, different

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(41875033)

作者简介: 张凯 (1996 -), 安徽六安人, 研究生, 主要从事光电测量设备热设计和仿真分析方面的研究。E-mail: m15001787717@163.com

导师简介: 吴毅 (1960 -), 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输、激光大气光学参数测量等方面的研究。

E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2022-01-06; 修改日期: 2022-03-08

*通信作者。E-mail: tanfengfu@163.com

heat pipe arrangements and different interface heat transfer coefficients under long-term high-power laser irradiation. The analysis results show that after adding a cross heat pipe arrangement, the withstand peak power density of the sampling panel with a thickness of 6 mm increases from $1470.9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ to $3632.1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ when the laser irradiation lasts for 120 s. This simulation analysis provides effective theoretical and data support for the design of protective sampling panel for array target.

Key words: laser technology; detector array target; finite element analysis; thermal analysis; static analysis

0 引言

对于目前的激光应用,准确测量出激光系统的激光输出特性参数,例如:激光光束直径、功率和出光时间等,是一项非常重要的技术研究^[1,2]。为了能够准确分析激光发射系统的性能参数,需要对激光强度时空分布,光斑功率和光斑尺寸等相关参数进行准确测量,为综合判断其光束质量提供依据^[3]。探测器阵列靶是目前测量激光相关参数的常用设备,高功率密度的激光光束长时间照射于阵列靶防护取样面板,由于面板表面的小孔结构和不均匀的光斑分布,激光照射后产生的热量过大无法及时传导和散出,热量聚集在阵列靶表面产生较大的温升和温差。过高的温升会导致阵列靶探测设备损坏,温差引起的热应力会导致面板自身损坏。

本文选取正常大气条件和室温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)作为激光阵列靶工作环境,考虑激光辐照产生的热能,取样面板热传导、热辐射和与空气的热对流,通过仿真分析得到取样面板在激光辐照下的热效应。通过在 SolidWorks 中建立阵列靶防护取样面板的模型导入 Ansys Workbench 进行仿真分析,分析面板在不同条件下的温度场分布和热应力情况,探究面板在不同条件下的抗损伤能力,为激光阵列靶的研制和改进提供理论支持。

1 防护取样面板模型

激光阵列靶主要由防护取样面板,主体承载框架、衰减取样板和电路板等部件组成。防护取样面板接受长时间激光辐照,因此其本身需要较高的抗损伤能力。阵列靶与取样小孔结构如图 1 所示,面板的小孔结构和不均匀的激光辐照会造成热量聚集,较大的温差会导致热应力和热变形,同时小孔本身的结构导致小孔处的面板厚度较小抗损伤能力不足。防护取样面板材料需要良好的热传导性能、较高的抗损伤阈值。在常见的材料中铜和铝都具有良好的导热性能,下文将对比两种材料不同的抗损伤能力。

由于取样面板的结构较为复杂,直接采用热力学公式对其计算的难度较大且计算精度不高,选用 Ansys Workbench 对其进行热仿真分析^[4]。在模型中存在许多小孔、挖槽等细小结构造成计算量巨大,为了提高计算速度,在不影响整体计算精度的情况下在 SolidWorks 中对于模型进行一定程度的简化。忽略模型中不重要的小孔、凹槽和突起,忽略其中不重要的螺纹孔及不重要的圆角和倒角。将模型导入 Ansys Workbench,靶面尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}$ 。仿真模型建立后,对整体模型进行网格的划分,设置整体网格大小为 10 mm 。在测量远场激光时,到靶激光光斑呈现类高斯分布,对于激光照射区域,进行网格划分时采取中间密边缘疏的网格划分方式,针对这一区域采用二维的平面网格进行细化划分,对于激光照射部分采取 5 mm 面网格细化。对于较为细小的部件和需要密切关注的部件采取局部细化以保证其计算准确性,避免出现计算局部不收敛情况。网格划分后,节点数为 38085,总单元数为 20623。设置防护取样面板材料,相关材料属性如表 1 所示。

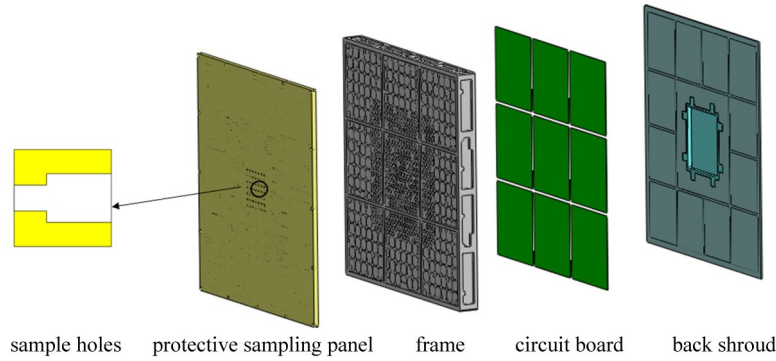


图 1 阵列靶与取样小孔结构示意图

Fig. 1 Structural representation of array target and sampling holes

表 1 材料特性

Table 1 Material property

Parameter	Aluminum alloy	Copper alloy
Destiny/kg·m ³	2750	8306
Youngs modulus/MPa	45000	1.1×10 ⁵
Poisson's ratio	0.33	0.34
Isotropic thermal	120	400
Coefficient of thermal	2.1×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁵

2 阵列靶取样面板温度场分析

2.1 热分析原理

热分析是指对热力学参数或物理参数随周围热边界条件变化而变化的关系进行分析的方法。一般来说,实际工程中通常关心的是结构的热流、温度分布和热应变。从物理定律出发,可以得到非线性热平衡矩阵方程^[5]

$$C(T) \cdot T + K(T) \cdot T = Q(T) \quad (1)$$

式中: T 为节点温度矩阵; $C(T)$ 为比热容矩阵; $K(T)$ 为导热矩阵,包括传热系数、对流系数、辐射系数和形状系数; $Q(T)$ 为热流量。

如果系统的热流不随时间的变化而变化,则可以认为系统处于热稳定状态,可以得到热力学方程为

$$K \cdot T = Q \quad (2)$$

瞬态热分析可以用来求解系统中温度随时间变化的情况及其他相关的热力学指标。在很多实际的工程应用中,系统的温度分布、热流量和其他热边界条件是随时间的变化而变化的,这时候需要用到瞬态的热分析,瞬态热分析的有限元方程为^[6]

$$C \cdot T + K \cdot T = Q(T) \quad (3)$$

2.2 热边界条件

热量的传递有热传导、热对流和热辐射三种方式。激光阵列靶在实验过程中选取正常大气环境,激光阵列靶自身存在热传导和热辐射,激光阵列靶与周围环境之间存在热辐射与热对流,一般大气条件下对流换

热系数取 $5\sim 25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 仿真中取 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。热传导主要为取样面板本身的热传导和面板与空气间的热传导。空气自身为热的不良导体, 面板与空气间的热传导在本次仿真中忽略。热辐射主要包括面板向外的辐射散热, 激光照射于靶面时的光辐射。取样面板表面辐射率及材料的其他参数, 通过查阅相关文献[7]和进行相关实验得到。阵列靶防护取样面板通过热传导和表面辐射将热量传向周围环境。从斯忒藩-玻尔兹曼定律出发, 得到激光阵列靶向外辐射方程为 $E = \varepsilon\sigma T^4$, 式中: ε 为防护取样面板发射率, 镀膜后取0.1; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, 即是黑体辐射常数 $5.67\times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$; T 为防护面板的热力学温度, 单位K。

工作时激光以高斯光斑形式辐射于防护面板中心位置, 激光施加于防护面板上的能量可以通过传输距离、激光功率及防护面板本身反射率等相关参数计算得出。根据激光光斑分布, 在面板中心直径为 100 mm 的圆内施加不同功率的激光能量。为方便施加激光能量, 将 100 mm 的圆分为13个同心圆, 圆内激光功率密度按照高斯分布递减。防护取样面板表面反射率为97% (吸收率为3%), 施加时间为 120 s , 激光照射位置和光斑三维分布如图2所示, 水平两个维度代表像素尺寸, 垂直维度代表归一化的强度值。

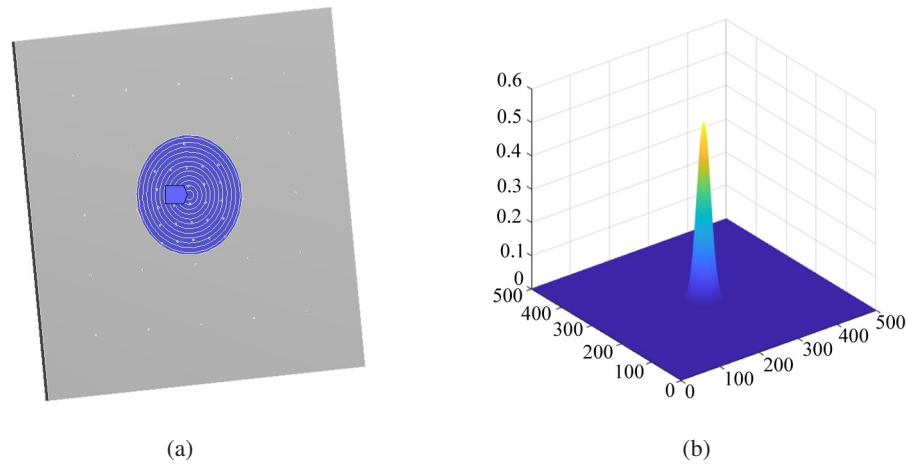


图2 激光照射位置和光斑三维分布示意图。(a) 激光位置; (b) 光斑分布

Fig. 2 Schematic diagram of laser position and three-dimension distribution diagram of laser spot.

(a) Laser position; (b) Laser spot distribution

2.3 抗损伤能力分析

针对不同厚度的防护取样面板, 施加不同峰值功率密度的激光辐照, 添加相应的边界条件得到防护取样面板的温度场分布。将温度场导入应力分析模块, 设置背后安装点为固定约束, 得到取样面板的等效应力^[8,9]。对于不同厚度的防护取样面板, 激光峰值功率密度与等效应力的关系如图3所示。图3(a)虚线为铝合金的许用应力 180 MPa (安全系数取1.5), 图3(b)虚线为紫铜的许用应力 120 MPa ^[10], 当热应力大于材料的许用应力时会使得表面膜层产生破坏。由图3可以得出, 相同面板厚度的情况下, 随着峰值功率密度的增加面板等效应力呈线性增加。许用应力与曲线交点所对应的峰值功率密度为该厚度下面板所能承受的最大峰值功率密度, 二者关系如图4所示。由图4可得出, 在面板厚度为 $2\sim 12\text{ mm}$ 之间时, 两种材料面板的耐受峰值功率密度与面板厚度之间大致呈线性相关, 在面板厚度为 16 mm 时出现拐点, 面板厚度对于面板抗损伤能力的提升效果减弱。当取样面板厚度大于 28 mm 时, 面板厚度的增加对于面板的抗损伤能力几乎没有提升。在相同条件下, 6061铝合金的许用应力为 180 MPa , 紫铜的许用应力为 120 MPa , 从图3可以看出铝合金的抗损

伤能力要高于紫铜, 选用铝合金作为之后仿真的材料。以激光峰值功率密度 $2250 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 铝合金面板厚度为 12 mm 为例, 得出其经过激光 120 s 辐照后的温度场分布如图 5 所示。由图可得出, 不均匀的激光辐照和面板本身的结构特征导致面板温度中间高边缘低。不均匀的温度场分布和较大的温差是造成面板等效应力增大的主要原因, 提高热量的传导和扩散效率能有效降低相同热边界条件下面板的等效应力, 提高面板的抗损伤能力。

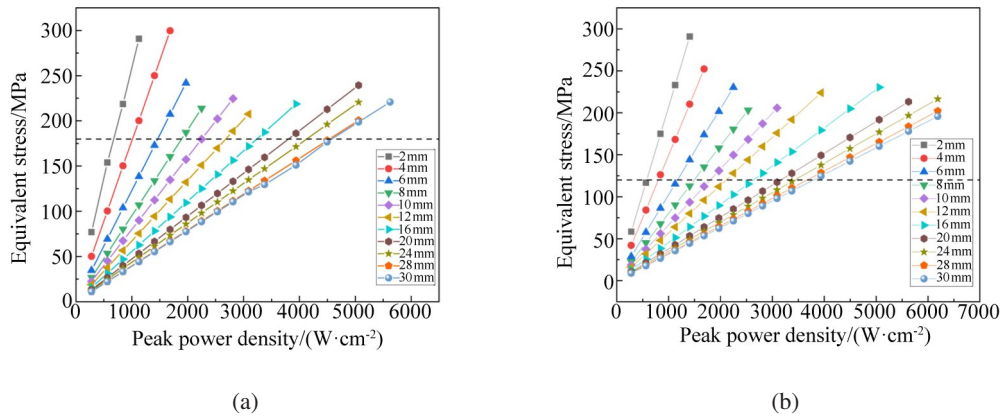


图 3 两种材料面板等效应力随峰值功率密度变化曲线。(a) 铝合金; (b) 紫铜

Fig. 3 The curve of panel equivalent stress with peak power density. (a) Aluminium alloy; (b) Red copper

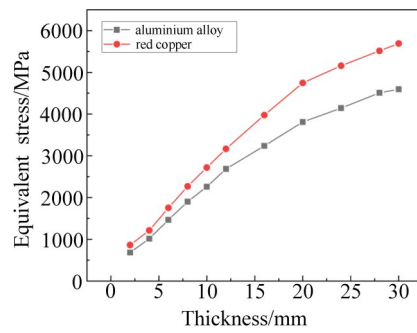


图 4 耐受峰值功率密度随面板厚度的变化曲线

Fig. 4 The curve of tolerance peak power density with the thickness of the panel

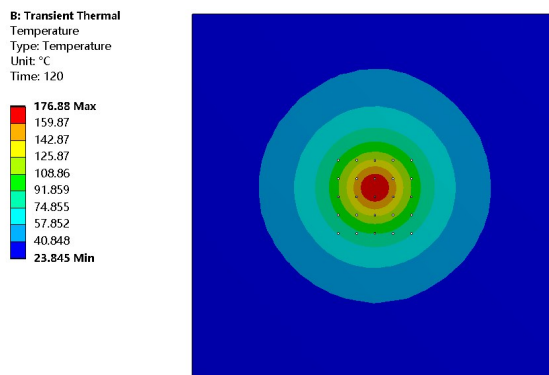


图 5 防护取样面板温度分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of temperature distribution on protective sampling panel

3 优化方案设计与分析

由面板厚度与抗损伤能力分析可得出,当面板厚度大于20 mm时,厚度的增加对于面板本身抗损伤能力影响变小,无法通过增加面板厚度进一步提升面板抗损伤能力。对于实际应用而言,阵列靶本身质量受限,面板厚度无法一直增加,需要根据阵列靶和防护取样面板自身结构和功能进行进一步散热优化设计。

3.1 散热方法简介

目前常用的散热方法有风冷散热技术、水冷散热技术和热管散热技术等^[11]。风冷散热技术是目前使用最为广泛的散热技术,然而空气强制对流传热系数有限,简单仿真后可得风冷散热技术对于阵列靶防护取样面板的散热效果不理想。水冷散热是通过水在管道内的流动快速带走多余热量。整个水冷系统包括热交换器、循环系统、水箱和水泵等,对于阵列靶水冷散热的制造工艺难度较大。热管是一种利用相变传热技术工作的被动散热原件,通过在内部填充相变介质进行传热,由于其超高的导热性和环境适应性被广泛应用于各个领域。热管工作时一端作为蒸发段,另一端作为冷凝段,在蒸发段工质吸热汽化通过内部压力向冷凝段流动,在冷凝段工质液化放热通过毛细力作用回流至蒸发段实现热量传导,本身无需增加泵等运动部件,安装工艺简单,适合作为防护取样面板散热。

3.2 散热效果分析

根据防护取样面板的自身结构和在激光辐照后的温度场分布,设计横向热管排布方案和十字型热管排布方案如图6所示。横向排布热管尺寸为200 mm × 10 mm × 4 mm,竖向排布热管尺寸为100 mm × 10 mm × 4 mm。以6 mm厚度面板为例,给出不同接触热阻和不同峰值功率密度激光辐照120 s后防护取样面板等效应力,光斑大小为100 mm,研究不同界面传热系数下面板等效应力随峰值功率密度变化得出图7,图中虚线为铝合金许用应力。热管与取样面板间具有接触热阻,金属界面传热系数受表面粗糙度、接触面压力和界面填充材料等影响,根据文献[12]仿真中界面传热系数 h 取5000~30000 W/(m²·K)。由图7可得,随着激光峰值功率密度的增加防护取样面板的等效应力大致呈线性增加。当热管与防护取样面板间的界面传热系数增大时,面板耐受的激光峰值功率密度增大。以激光峰值功率密度2250 W·cm⁻²,面板厚度6 mm为例,仿真得出在相同峰值功率密度下接触面的界面传热系数 h 与防护取样面板等效应力之间关系如图8所示。在相同热载荷条件下,面板等效应力随着界面传热系数的增大而减小,在界面传热系数较小时,界面传热系数的改变对面板等效应力影响较大。当热管与防护取样面板间采取焊接技术时,热管与面板接触面的传热系数可达到30000 W/(m²·K)^[11]。以面板厚度6 mm为例,仿真得出不同峰值功率密度激光辐照120 s后,无热管排布和有热管排布时面板的等效应力变化曲线如图9所示。由图9可得出,添加十字热管排布后面板耐受功率密度相对于未添加热管排布时从1470.9 W·cm⁻²提高至3632.1 W·cm⁻²,对于抗损伤能力的提升效果比仅添加横向热管更好,防护取样面板抗损伤能力相比未添加热管得到大幅度提升。相对仅横向排布的热管,十字排布式热管在横竖两个方向上均加速热量传导,使得面板温度场分布更加均匀,提升了面板的抗损伤能力。

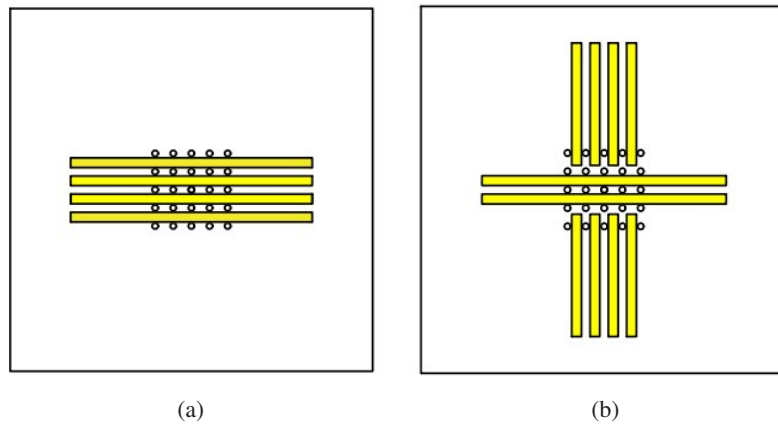


图 6 热管排布方式示意图。(a) 横向排布; (b) 十字排布

Fig. 6 Schematic diagram of heat pipe arrangement. (a) Horizontal arrangement; (b) Cross arrangement

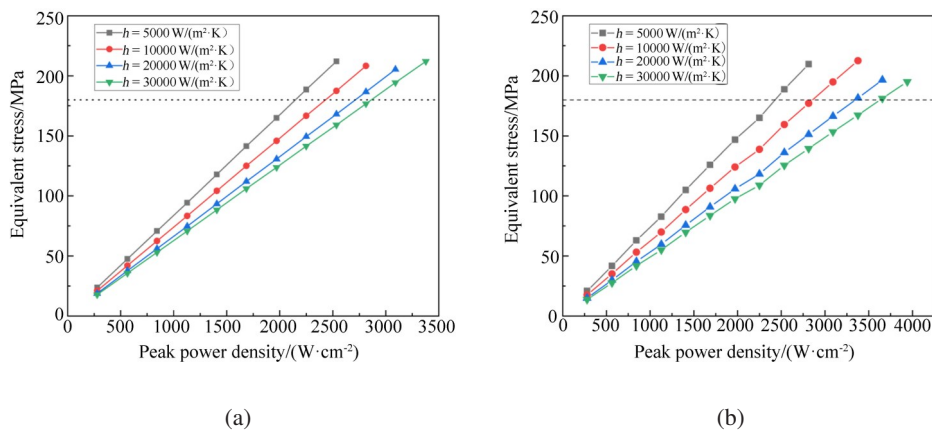


图 7 不同界面传热系数下, 面板等效应力随峰值功率密度变化曲线。(a) 横向排布; (b) 十字排布

Fig. 7 Curve of equivalent of panel with peak power density under different interfacial heat transfer coefficients.

(a) Horizontal arrangement; (b) Cross arrangement

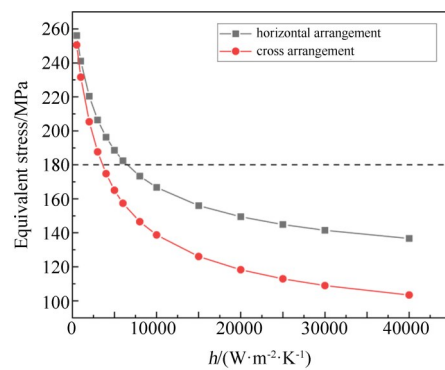


图 8 面板等效应力随界面传热系数变化曲线

Fig. 8 Curve of equivalent stress of panel with interfacial heat transfer coefficient

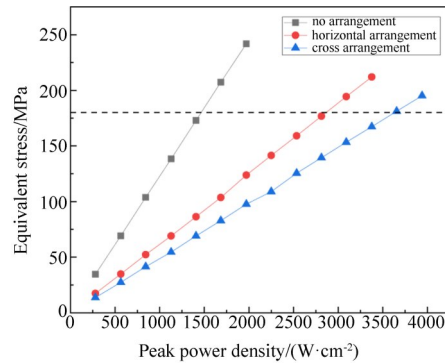


图9 不同热管排布时面板等效应力随峰值功率密度变化曲线

Fig. 9 Curve of equivalent stress of panel with peak power density with different heat pipe arrangement

4 结 论

本研究建立阵列靶防护取样面板模型和分析取样面板的热边界条件,通过瞬态热分析和结构静力学分析,得到防护取样面板在激光辐照 120 s 后的温度场分布和不同厚度的防护取样面板的耐受峰值功率密度。基于防护取样面板结构和温度场分布,设计不同热管排布提高面板热量传导效率。在相同的热边界条件下,界面传热系数为 $30000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,十字热管排布的防护取样面板相比于无热管排布的防护取样面板耐受激光的峰值功率密度从 $1470.9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 提高至 $3632.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。本研究对高功率密度长时间激光辐照下的阵列靶设计提供了有效的理论和数据支持。

参考文献:

- [1] Yang P L, Feng G B, Wang Z B, *et al.* Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 521-525.
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪 [J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 521-525.
- [2] Pang M, Zhou S, Wu J, *et al.* Research on scattering sampling and attenuating in measurement of laser intensity distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3213-3217.
庞淼, 周山, 吴娟, 等. 激光强度时空分布测量漫散射取样衰减技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3213-3217.
- [3] Tan F F, Huang Z G, Zhang S L, *et al.* Detector array target calibration system based on point-by-point scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0213003.
谭逢富, 黄志刚, 张巴龙, 等. 基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0213003.
- [4] Li J, Wang Z P, Liu W X, *et al.* Numerical simulation of tire steady-state temperature field based on ANSYS Workbench [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 501: 382-387.
- [5] Dong L Y, Zhang S L, He F, *et al.* Thermal structure analysis of tracking telescope frame [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(4): 408-415.
董丽媛, 张巴龙, 何枫, 等. 跟踪望远镜机架的热结构分析 [J]. *量子电子学报*, 2019, 36(4): 408-415.
- [6] Tan H, Zhang Y X, Liu Y X, *et al.* ANSYS Workbench simulation of glass welding by femtosecond laser pulses [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 334-340.

- [7] Guan W L, Tan F F, Hou Z H, *et al.* Design of scattering sampling attenuation unit for detector array target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 286-293.
管雯璐, 谭逢富, 侯再红, 等. 探测器阵列靶散射取样衰减单元设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 286-293.
- [8] Peng Y. Research of thermal analysis collaboratively using ANSYS Workbench and SolidWorks simulation [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 127: 262-266.
- [9] Tan H, Zhang Y X, Liu Y X, *et al.* ANSYS Workbench simulation of glass welding by femtosecond laser pulses [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 334-340.
- [10] Liu J. *The Experimental Research on Measurement of Thermal Contact Resistance of Two Contacted Solids and Thermal Conductivity* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
刘菊. 固体界面接触热阻及导热系数测量的实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [11] Wu L, Gao M, Zhang T, *et al.* Thermoelectric cooling application and optimization: A review [J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(6): 1-12.
吴雷, 高明, 张涛, 等. 热电制冷的应用与优化综述 [J]. *制冷学报*, 2019, 40(6): 1-12.
- [12] 刘鸿文. 材料力学 (第六版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [13] Dai S J, Wang D, Zhang H B, *et al.* Thermal contact resistance between aero engine compressor blade and flexible fixture [J]. *Journal of Thermal Science*, 2021, 30(2): 530-539.
- [14] Wang B. *Exploration on IHTC and Influence Factors of AA5083 in Elevated Temperature Forming Process* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
王斌. 5083 铝合金温热成形界面换热系数求解及影响因素研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.