

复合夹层式抗激光防护材料结构优化设计

邬志华, 徐天恒, 付怀龙, 黄禄明, 胡月宏, 徐 维

河南大学人工智能学院, 河南 开封

收稿日期: 2022年6月9日; 录用日期: 2022年7月18日; 发布日期: 2022年7月25日

摘 要

为了减轻抗激光防护材料的结构重量, 本文采用有限元方法对一种由反射层、散热层、隔热层和基板构成的复合夹层式抗激光防护材料结构进行了优化设计。仿真结果表明: 随着散热层厚度的增加, 激光防护层和基板的最高温度都随之降低; 随着隔热层厚度的增加, 基板最高温度随之降低, 而激光防护层的最高温度却随之升高, 且隔热层厚度对其防护性能的影响更显著。当散热层厚度为1.48 mm、隔热层厚度为0.29 mm时, 结构满足防护要求, 且重量最轻, 为0.295 kg。

关键词

抗激光, 防护, 有限元模拟, 优化设计

Optimal Design of a Compound Sandwich Type of Anti-Laser Protection Material Structure

Zhihua Wu, Tianheng Xu, Huailong Fu, Luming Huang, Yuehong Hu, Wei Xu

School of Artificial Intelligence, Henan University, Kaifeng Henan

Received: Jun. 9th, 2022; accepted: Jul. 18th, 2022; published: Jul. 25th, 2022

Abstract

In order to lighten the weight of a compound sandwich type of anti-laser protection material structure which consists of reflection layer, heat conduction layer, heat insulation layer and substrate, the structure design and optimization were proposed by using the finite element method. The simulation results show that with increasing the thickness of the heat conduction layer, the highest temperature of laser protection layers and substrate both become smaller and smaller. With increasing the thickness of the heat insulation layer, the highest temperature of substrate

文章引用: 邬志华, 徐天恒, 付怀龙, 黄禄明, 胡月宏, 徐维. 复合夹层式抗激光防护材料结构优化设计[J]. 建模与仿真, 2022, 11(4): 1179-1184. DOI: 10.12677/mos.2022.114108

becomes smaller and smaller. However, the highest temperature of laser protection layers becomes higher and higher. And the thickness of the heat insulation layer has more significant effect on the protective property. When the thickness of the heat conduction layer is 1.48 mm, and the thickness of the heat insulation layer is 0.29 mm, the structure could satisfy the anti-laser protection demands and the weight is the lightest, which is 0.295 kg.

Keywords

Anti-Laser, Protection, Finite Element Simulation, Optimal Design

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着激光试验技术[1]的不断发展, 激光防护技术[2] [3] [4] [5] [6]研究已成为一个重要研究方向。空中飞行器作为激光辐照试验中一类非常重要的靶目标[7], 其抗激光性能已经成为激光辐照试验的一个突出问题。目前为止, 空中飞行靶目标的抗激光加固均是通过加装金属板[8]、耐高温复合材料[9] [10] [11]以及热障涂层[12] [13] [14]等激光防护结构来实现的, 但受限于防护材料的性能特点, 上述防护结构仍存在重量大、防护指标不高、工艺复杂等不足。因此, 本论文提出一种反射层 + 散热层 + 隔热层 + 基板的复合夹层式抗激光防护材料, 再针对空中飞行靶目标抗激光防护性能及减重要求, 开展抗激光防护材料结构优化设计研究, 设计得到一种结构重量最轻且激光防护性能优异的抗激光防护材料结构方案, 以保证靶目标在各类试验中顺利完成试验内容。

2. 模型建立

基于本单位自主开发的高能激光安全防护效应评估软件, 建立激光辐照空中飞行靶目标抗激光防护材料仿真有限元模型, 对空中飞行靶目标抗激光防护材料结构表面及内部的温度场分布情况进行模拟分析, 将仿真结果与试验结果相比较, 验证模型的准确性。再利用校验后的仿真模型对防护材料结构参数进行灵敏度分析, 并进行结构优化设计, 得到空中飞行靶目标抗激光防护材料最佳结构设计方案。

2.1. 有限元模型

激光辐照试验用抗激光防护材料结构为平板件, 长度和宽度都为 15 cm, 结构沿厚度方向依次为反射层、散热层、隔热层和基板, 各层厚度分别为 0.05 mm、0.55 mm、0.1 mm 和 2 mm。仿真计算过程中, 采用三维实体 8 节点单元对板件进行网格划分, 面内方向单元尺寸为 1 mm × 1 mm, 并对各层共面处采取共节点约束处理。另外, 采用表面效应单元建立光斑模型。试验中, 激光为圆形光斑, 直径为 9 cm, 平均功率密度为 48 W/cm², 辐照时间为 30 s。最后, 得到仿真计算有限元模型, 如图 1 所示。

2.2. 材料参数

模型计算中, 反射层为 Ag 涂层, 散热层为 Cu 涂层, 隔热层为 AZ 涂层, 基板为 Cu, 各涂层均为等离子喷涂工艺制得, 其物理性能参数如表 1 所示。

2.3. 边界条件

考虑自然热对流情况, 换热系数为 15 W/m²·K, 环境初始温度为 25℃。

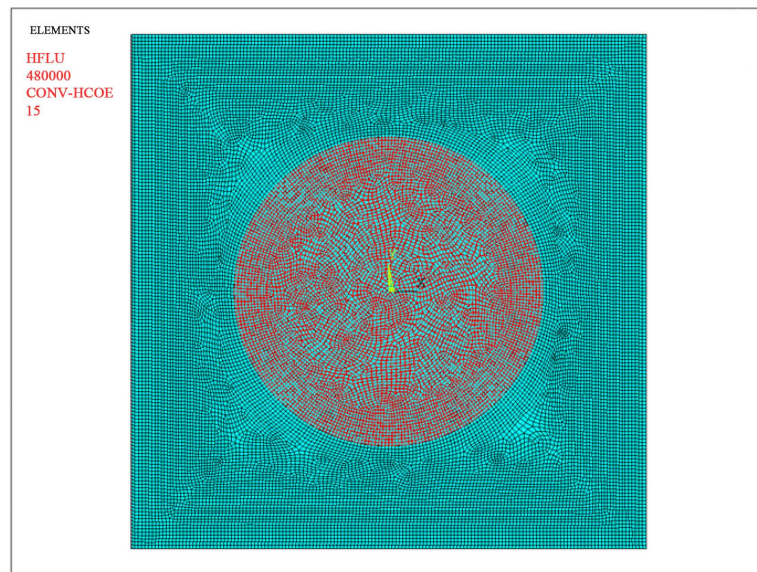


Figure 1. The simulation FEM of the laser irradiation effects
图 1. 激光辐照效应仿真有限元模型

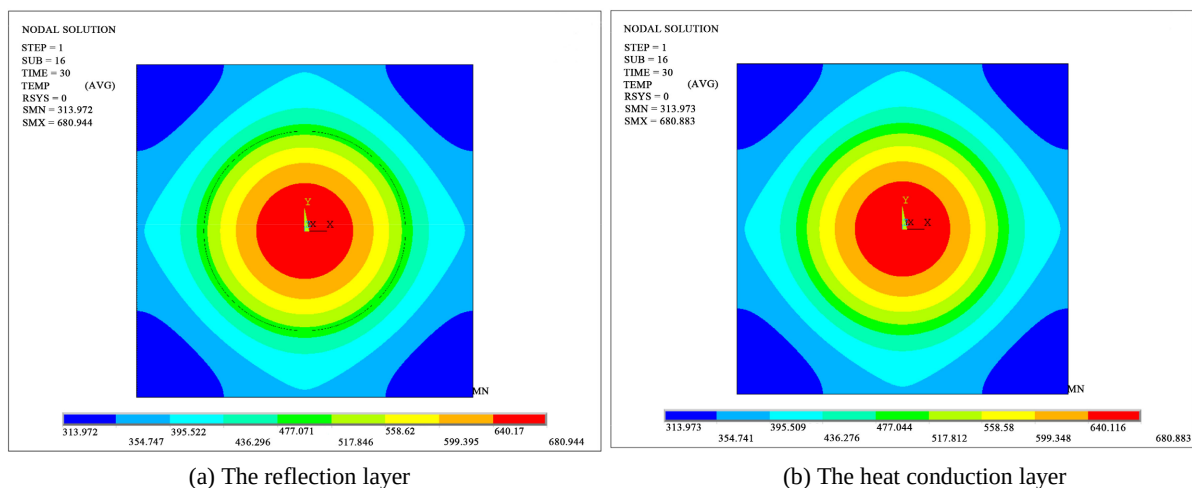
Table 1. Parameters of the materials defined in the FEM
表 1. 计算用材料性能参数

Material	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$c/(\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C})$	$k/(\text{W/m}\cdot\text{K})$			
			25°C	200°C	400°C	600°C
Ag	10,000	234	420	415	399	384
Cu	8500	385	400	389	379	366
AZ	4500	634	4.32	4.25	4.16	4.08

3. 仿真结果与讨论

3.1. 验证模型仿真结果

空中飞行靶目标抗激光防护材料结构板件验证仿真模型内部各层温度场分布情况如图 2 所示。



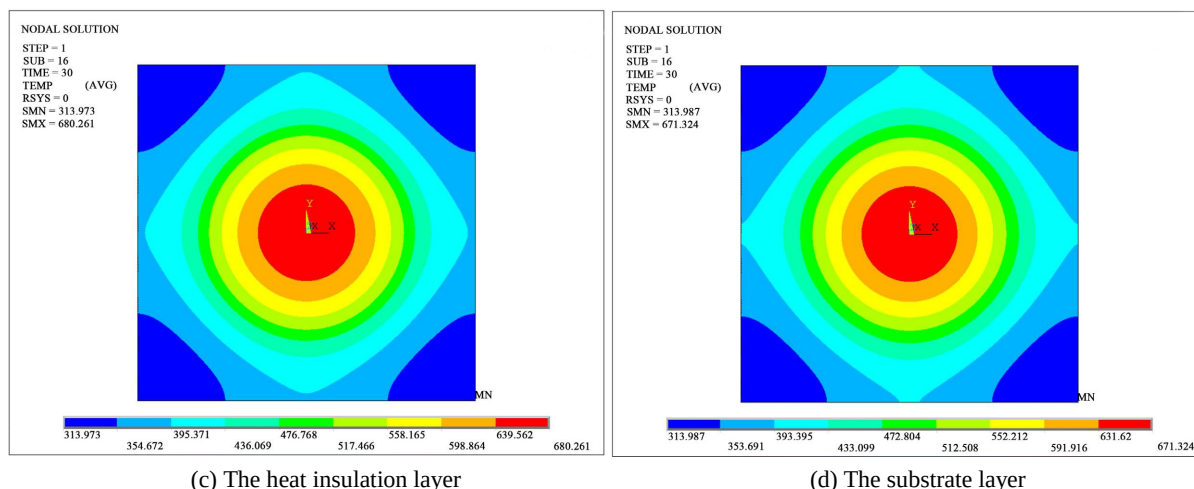


Figure 2. The temperature contour graphs of the anti-laser protection material structure
图 2. 抗激光防护材料结构内部温度分布云图

由图2可知,该复合涂层防护结构在上述激光辐照条件下,外表面Ag反射层的最高温度为680.94℃,内部Cu散热层和AZ隔热层的最高温度分别为680.88℃和680.26℃,Cu基板的最高温度为671.32℃。由于Ag和Cu涂层具有良好的导热性能,能及时将表面能量沿面内和面外方向传递开来,使得两涂层的温差不大。而中间隔热层的热传导系数较小,能够阻碍热量向内部传输,导致基板的温度比散热层温度低了约10℃。这说明采用反射层+散热层+隔热层的复合涂层结构设计方案能够有效降低激光能量向内层基板传输的效率,达到抗激光防护的目的。另外,仿真分析得到Cu基板背表面最高温度为668.07℃,试验测得结果为642℃,仿真结果高了约26℃,误差为4%。

3.2. 结构厚度对温度的影响

考虑空中飞行靶目标在一定激光辐照条件下,机体温度不能超过150℃的抗激光防护具体要求,对上述复合涂层防护结构进行改进。用Cu板替换Cu散热涂层,增加散热层吸收热量的比例;用SiO₂气凝胶材料替换AZ隔热涂层,进一步提升隔热效果;基板即为空中飞行靶目标机体材料Al板。根据等离子体喷涂工艺条件及靶目标实际情况,Ag反射涂层的厚度为0.05 mm,机体Al板的厚度为2.0 mm。改变抗激光防护结构散热层厚度以及隔热层厚度,研究其对结构抗激光防护性能的影响。

散热层(Cu板)厚度以及隔热层(SiO₂气凝胶材料)厚度对抗激光防护结构各层最高温度的影响如图3和图4所示。由图可知,随着散热层厚度的增加,抗激光防护结构各层的最高温度都随之降低,机体最高温度也随之降低;而随着隔热层厚度的增加,抗激光防护结构各层的最高温度都随之升高,机体最高温度随之降低。这主要是因为,散热层的作用是将结构表面吸收转化的激光能量快速在横向方向传输,尽可能的将热量在更大范围内吸收掉。所以增加散热层厚度,其热影响区明显扩大,吸收的能量明显增加,传递到机体的能量明显降低,导致机体最高温度降低。而隔热层厚度增加,会进一步阻碍热量向机体处扩散,大部分热量被前表面反射层及散热层吸收消耗,使其表层热负荷增加,导致机体最高温度降低,而表层最高温度升高。

当散热层厚度由0.5 mm增加至2.0 mm时,机体最高温度由116.79℃降低至52.54℃,降低了约64℃;当隔热层厚度由0.2 mm增加至1.0 mm时,机体最高温度由176.61℃降低至60.99℃,降低了约116℃。这说明,隔热层厚度对抗激光防护结构防护性能的影响更显著。

另外,由于Ag的熔点为962℃、Cu的熔点为1083℃、SiO₂气凝胶的最高使用温度为800℃。而当

散热层厚度为 2.0 mm、隔热层厚度为 1.0 mm 时,反射层、散热层和隔热层的最高温度分别为 646.72℃、646.68℃和 645.73℃,均低于其熔点温度,且机体最高温度为 52.54℃,低于其防护性能设计使用要求。因此,在进行抗激光防护材料结构设计时,可以进一步减小散热层厚度和隔热层厚度,使其满足防护要求的同时,减少防护结构重量。

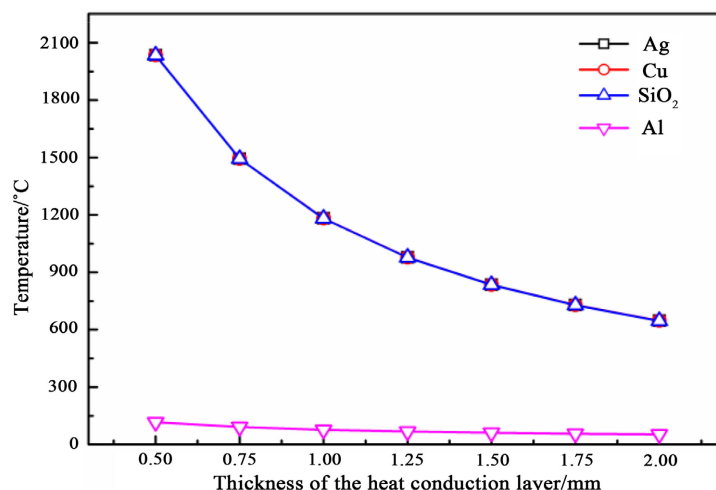


Figure 3. Effect of thickness of the heat conduction layer on the anti-laser protection structure temperature

图 3. 散热层厚度对抗激光防护材料结构温度的影响

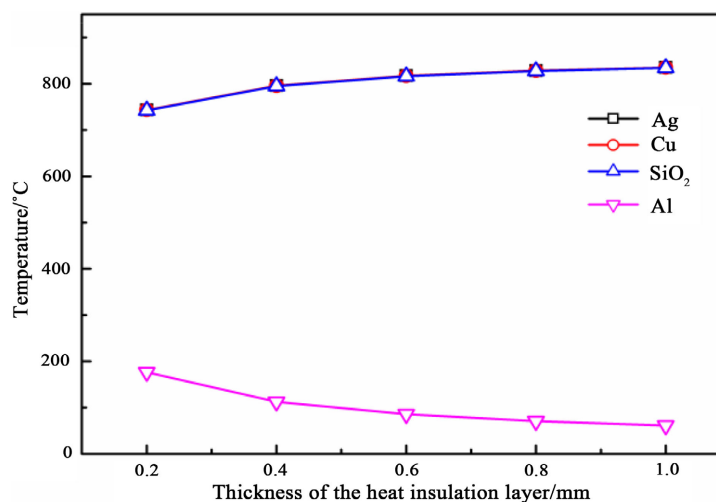


Figure 4. Effect of thickness of the heat insulation layer on the anti-laser protection structure temperature

图 4. 隔热层厚度对抗激光防护材料结构温度的影响

3.3. 防护结构优化设计

采用一阶优化算法,对反射层 + 散热层 + 隔热层 + 基板抗激光防护材料结构进行优化设计。优化设计目标为结构重量,状态变量为各层最高使用温度,设计变量为散热层厚度和隔热层厚度。经过设计分析,得到优化结果为:散热层厚度为 1.48 mm、隔热层厚度为 0.29 mm,反射层、散热层、隔热层和机体的最高温度分别为 784.79℃、784.74℃、784.00℃和 140.03℃,该防护结构重量为 0.295 kg。

4. 结论

本文采用自主开发的激光辐照效应数值模拟软件对反射层 + 散热层 + 隔热层 + 基板的复合夹层式抗激光防护材料进行了温度场数值仿真分析。首先, 建立激光辐照防护结构有限元模型, 对仿真模型进行验证; 然后, 利用验证后的模型对防护结构参数灵敏度进行分析; 最后, 对整个防护结构进行优化设计, 最大程度减轻防护结构的重量。通过以上研究, 得到以下主要结论:

1) 仿真分析得到 Cu 基板背表面最高温度为 668.07℃, 试验测得结果为 642℃, 仿真结果高了约 26℃, 误差为 4%。

2) 随着散热层厚度的增加, 抗激光防护结构各层的最高温度都随之降低, 机体最高温度也随之降低; 而随着隔热层厚度的增加, 抗激光防护结构各层的最高温度都随之升高, 机体最高温度随之降低, 且隔热层厚度对抗激光防护结构防护性能的影响更显著。

3) 满足无人机抗激光防护要求的最佳结构设计方案为: 散热层厚度为 1.48 mm、隔热层厚度为 0.29 mm, 该防护结构重量为 0.295 kg。

参考文献

- [1] 李华, 成斌, 王非, 等. 国外强激光武器试验技术[J]. 光电技术应用, 2003(3): 1-4.
- [2] 余文成, 杨臻. 高能激光防护技术现状及应用前景[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(1): 14-16.
- [3] 赵缨慰, 付秀华, 李珊, 等. 多功能抗激光损伤高反射膜[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 274-278.
- [4] 蒋向东, 张怀武, 黄祥成. 激光高反射膜的研究[J]. 应用光学, 2003, 24(1): 25-27.
- [5] 刘强, 林理彬. 提高氧化物介质膜层损伤阈值的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(7): 637-641.
- [6] 王雅琴, 姚刚, 黄子健, 等. 用于红外激光防护的高开关率 VO₂ 薄膜[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 1-6.
- [7] 冯国斌. 空中目标靶上强激光光斑参数测量技术[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] 冯俊森, 李和章, 马壮. 高能激光辐照条件下构件温度场模拟研究[J]. 新技术新工艺, 2016(5): 45-47.
- [9] 彭国良, 王玉恒, 闫辉, 等. C/C 复合材料的氧化对激光防护的影响研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 148-151.
- [10] 陈林柱. 蜂窝夹层复合材料激光烧蚀实验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北核技术研究所, 2010.
- [11] 汤文辉, 冉宪文. 强激光对靶材烧蚀效应的数值模拟研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 32-34.
- [12] 肖军, 李铁虎, 陈建敏, 等. 机载武器抗烧蚀防护涂层的研究[J]. 材料保护, 2006, 36(6): 34-37.
- [13] 沈立娜, 马壮, 柳彦博, 等. 抗激光辐照涂层的结构设计与优化[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(增刊): 24-28.
- [14] 李雅娣, 吴平, 马喜梅, 等. 氧化锆涂层在激光防护中的应用研究[J]. 表面技术, 2008, 37(3): 71-74.