

•光电器件与材料•

连续波 1 064 nm 激光辐照铝金属的热分布研究

丁宇, 蔡军

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 由于卫星载荷的功率受限, 使得天基高能激光的方案只能处于构想, 为了增加天基激光对空间碎片清理的可用性, 研究了连续波 1 064 nm 激光辐照铝金属的热分布, 分析了连续波作用下的热力效应, 建立了激光作用金属材料的热效应解析模型并数值模拟了其温度场分布, 并以此为基础论证分析了低功率密度的连续波激光对铝金属结构热破坏作用的可行性, 在低功率大光斑的连续波辐照条件下, 工作状态的铝金属结构存在热和力学的综合破坏模式, 即利用低功率密度的连续波激光同样可以实现对空间碎片的清理。

关键词: 热力效应; 温度场; 热传导

中图分类号: O641.13

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-06-0028-05

Research on Thermal Distribution of 1 064 nm Continuous Wave Laser Irradiation Aluminum

DING Yu, CAI Jun

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: Due to the limited power of satellite loads, the space-based high-energy laser scheme can only be in the idea. In order to increase the space-based laser availability of space debris clean-up, the heat distribution of 1 064 nm continuous wave laser irradiation aluminum metal is researched. Through analyzing the continuous wave action on the thermal effect, the analytical model of the heating effect of metal materials and the numerical simulation of the temperature field distribution are established. On this basis, the feasibility of the low power density of the continuous wave laser heat damage on aluminum metal structure is analyzed. Under the condition of continuous wave laser irradiation at low power large spot, the working state of aluminum metal structure exist the comprehensive damage model of heat and mechanics. The space debris clean-up can be realized using the continuous wave laser with low power density.

Key words: thermal effect; temperature field; heat conduction

随着人类航天活动的日益频繁, 空间碎片数目也随着急剧增加, 其中厘米量级的空间碎片, 由于数目较多难以规避, 结构防护困难, 被公认为是在轨航天器威胁最大的空间碎片^[1-3]。目前, 天基高能激光技术是主动清理厘米量级的空间碎片的一种有效方法。早在 1989 年 Metzger 等学者就提出了天基激光清除空间碎片的构想^[4]。之后, 德国航天

研究中心的 Wolfgang 等对其进行了进一步的系统研究, 对碎片及卫星运行轨道, 激光器参数, 碎片材料及碎片环境等多方面进行了分析, 并对天基激光系统参数进行了初步设计, 提出了可行的技术方案^[5]。近年来, NASA 还提出利用装在太空望远镜上的一个中等功率激光器可使太空垃圾偏离原轨道。

激光清除空间碎片的模式主要有两种:直接烧蚀模式和烧蚀反喷模式。前一种主要针对微小空间碎片,利用高功率密度的激光照射碎片,使其温度升高至碎片的熔点甚至沸点,使其熔化或汽化,实现清理;后一种主要针对较大的空间碎片,在高能脉冲激光辐照下的冲量耦合特性和冲量作用下减速降轨进入大气层,最终碎片在气动加热下烧毁达到清除的目的。而物质接收入射激光,在不同条件下通过不同的吸收机制吸收激光能量,温度升高,同时发生复杂的相变,这一过程的时间很短,且在高速运动的流场中进行,所以激光能量的吸收伴随着相当复杂的动态过程,这个过程不仅依赖于激光参数(能量、波长及脉宽等),还与物质的物理特性和作用环境条件密切相关。一般说来,不同数量级的激光功率密度作用下的物质发生的物理现象是加热($10^3 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$),融化($10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$),汽化($10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$),等离子体($10^8 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$)^[6]。

激光对物质的破坏形式主要有高功率密度,低能量密度激光引起的物质的层裂破坏;低功率密度,高能量密度激光加热引起的热烧蚀破坏;低功率密度,低能量密度激光(主要为长脉冲或者连续激光)加热引起的物质的热应力破坏^[7]。由此可以看出,研究长脉冲或者连续激光与物质相互作用,人们主要从研究受热材料的温度场分布,同时考虑熔融、汽化的相变过程以及其过程中的热力耦合效应出发的。因此为了使激光在清除碎片的过程中达到最佳的效能,研究激光辐照金属的热分布是很有必要的,目前对于大能量短脉冲激光以及毫秒量级长脉冲激光对物质的作用研究居多,对于大功率连续波激光对金属的热分布分析还有待进一步深入研究。

1 连续激光辐照铝薄板的热-力效应

在连续光辐照时,物质内因温度的非均匀性而在材料内产生一定的热应力。由热应力造成物质破坏所需的激光能量密度阈值比纯粹由穿透效应(熔化和汽化造成的材料穿孔)造成的破坏相应阈值低得多。同时,温度上升也伴随着材料的软化,对材料的结构造成损伤。Yilbas等人通过建立相关的模型并运用软件对激光加热钢表面和冷却过程中产生的热应力和应力波的发展进行了研究^[8];强希文等人数值模拟了激光辐照金属圆板的温度场

分布,结合热弹性理论,获得了金属圆板轴对称热应力计算公式,并对合金钢薄圆板在COIL激光辐照下的热应力损伤进行了讨论^[9];陈小伟等人推导了弹性薄圆板在热力联合作用下的弯曲动力响应方程,发现热屈曲是弹性薄板的主要失效方式^[10];2014年,黄亿辉等人利用三维数字图像相关技术和红外热像技术,试验测量了四边固支薄板在激光辐照下的屈曲行为,获得了全场变形过程^[11]。众多演示实验都表明,结构处于工作状态(即受到预载荷、装有炸药或燃料)下,但激光辐照时,结构的破坏不是激光产生的热学破坏效应和预载荷产生的力学破坏效应的简单线性叠加,而是热力的非线性效应,使结构发生灾难性的破坏效应或者是激光束仅仅起到一个导火索的作用,结构可能会由于自激励效应而发生毁灭性的破坏。由此可见,研究低功率密度的激光束对物质结构的破坏效应具有重要意义。

2 激光作用金属材料的热效应解析模型

关于计算激光加热下金属的温度场,激光辐射可视为一个热加工的热源,而激光作用材料表面的热转换主要是通过三种途径进行,即电子热传导、声子热传导和辐射热传导。通过激光能量的吸收和热扩散,引起物体边界上和内部的热流运动,使得各处的温度不同程度的上升。激光加载条件、物体的形状、初始和边界条件以及金属的热物理性质决定了温度场的时空变化。

2.1 热传导理论

为了确定物体的温度场,必须给定激光加载条件,通常把被吸收的激光能量作为面热源(表层吸收)或体热源(深层吸收)处理。当物体某处温度到达熔点时,温度暂时不再上升,直到热能的继续累积提供了该处所需的熔融潜热,才将熔融为液态物质。固/液界面的处理是热物理计算的难题,这里我们只讨论未发生相变的情形,也不考虑物体形变对温度场的影响。在给定热源、边界和界面条件、初始温度分布和物体的热物理特性时,激光加热各向同性物体的问题就可以归结为不定常热传导方程的计算,为了便于分析金属材料的加热效应并计算在激光辐射下的温度变化,作了下面两个假定:(1)

忽略材料的热物理性质随温度的变化;(2)忽略材料表面的再辐射和对流现象及其引起的能量损失。在有了以上两个假定后,就可以应用一般热传导方程求解激光热效应破坏问题。考虑到入射激光束具有高斯分布的特性,在分析中采用柱坐标系,其热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \right) + q \quad (1)$$

式中, $T(r, z, t)$ 表示 t 时刻的温度分布; p 、 c 和 k 分别表示密度、热容量和热扩散系数, 均为温度的函数。 q 是考虑激光束在材料内传播产生的热源效应, 即材料所吸收的能量, 表示为

$$q = I_0(1 - R)\alpha f(r)\exp(-\alpha z) \quad (2)$$

并且具有初始条件和边界条件, 有下式

$$T(r, z, t)|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

式中, T_0 取 298 K

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (4)$$

式中, R 是样品表面的反射率; α 是样品的吸收系数; I_0 是激光辐照功率密度的峰值; T_0 是初始环境温度; h 为金属片厚度; $f(r)$ 是激光脉冲的空间分布, 由于采用的是连续波激光, 因此在照射时间上呈均匀分布, 于是可以表示为

$$f(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{\alpha_0^2}\right) \quad (5)$$

解析金属薄板的温度场, 假设材料各处物理参数相同, 不考虑与外界的热交流, 边界条件只考虑激光辐照热量流入, 入射表面处仍为 $x=0$ 。激光垂直辐照材料表面, 激光强度为平均分布, 考虑一维情况, 材料对激光的吸收形式为表层吸收, 阶梯时间波形为连续波, 有下式

$$T(x, t) = \frac{AI_0 t}{\rho c l} + \frac{AI_0 l}{k} \left[\frac{3(l-x)^2 - l^2}{6l^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 D t / l^2} \cos \frac{n \pi (l-x)}{l} \right] \quad (6)$$

式中, A 为吸收率; l 为薄板厚度。当以二维圆柱坐标为基础时, 材料深度方向上温差不大, 温度场只涉及坐标 r 、 t , 即薄板近似。此种情况考虑热交流传热对材料温度的影响, 激光强度呈高斯分布, 材料表面吸收, 阶梯时间波形为连续波。

$$T(r, t; h) = \frac{AI_0 \alpha^2}{\rho c l} \int_0^t \frac{dt_1}{4Dt_1 + \alpha^2} \exp[-Dh^2 t_1 - \frac{r^2}{4Dt_1} + \frac{r^2 \alpha^2}{4Dt_1(4Dt_1 + \alpha^2)}] \quad (7)$$

通过上述方程, 轴对称分布、连续波激光对材料的辐照都可以通过积分变化的方法得到和温度相关的结果。

2.2 金属铝对激光的吸收

激光辐照在铝表面上时, 将激光辐照铝表面直接看成表面热吸收。铝的电阻率是决定其对激光的吸收率的重要因素之一, 材料温度升高, 电阻率随之变大, 对激光吸收率也得到提升; 在固态铝向液态铝的相转变过程中, 其电阻率会出现巨大而快速的变化, 这导致当出现熔融时吸收率突变式的升高。文中在考虑材料铝对 1 064 nm 激光的吸收率时应用 Hagen-Rubens 公式^[12], 有下式

$$A(T)_{1064 \text{ nm}} = 354.67 \sqrt{\Omega(T)} \quad (8)$$

式中, A 为吸收率; T 表示材料的温度; Ω 为铝的电阻率, 其熔点为 933 K。

$$\Omega(T) = \begin{cases} 10^{-8}(-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} \times T), & 0 \leq T \leq 933 \\ 10^{-8}(10.7 + 1.45 \times 10^{-2} \times T), & 933 \leq T \leq 2792 \end{cases} \quad (9)$$

1 064 nm 波长激光辐照铝板时, 铝板的吸收率为

$$A(T) = \begin{cases} 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} \times T}, & 0 \leq T \leq 933 \\ 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} \times T}, & 933 \leq T \leq 2792 \end{cases} \quad (10)$$

3 1 064 nm 连续激光辐照铝金属的温度场数值模拟及分析

激光作用时间为 30 s, 初始温度 $T_0=300$ K, 光斑半径为 2 mm, 波长为 1 064 nm, 功率为 100 W 和 60 W, 铝金属半径为 25 mm, 厚度为 2 mm。

由上述数据可知, 整个过程中, 温度的升温速度都在发生变化。材料下表面的温度明显要低于上表面的温度, 近似于上表面的温度空间变化梯度, 变化程度相对上表面较小。变化曲线如图 1~图 6 所示。由图 1、图 3 可以看出, 不同功率激光加载对表面温度分布形态总体上不产生太大影响, 即不同功率加载下表面温度分布满足一定的规律且表面

不同位置处的温度仅与距离中心的距离和加热时间以及加载的功率有关。由图2、图4可以看出,光斑中心随深度的变化,可以得出与表面温度场相同的结论;同时也可以看出,在连续激光加载较薄的铝金属时看不出在深度方向明显的温度变化,即较弱连续激光加载这种情况下主要表现为对铝金属整体加热效应,而熔池效应不明显。由图5、图6可以看出,在加热的初期(0.01 s以内)温度变化很快,

在以后的时间内则近乎直线上升;当然可以看到,温度上升有加快的趋势,但并不是非常明显,这个可以理解为在初期温度主要被表面和靠近一定区域内的介质吸收,造成部分区域温度升高很快,但是在后面的时间里热传导效应表现明显,导致整体温度上升,后期温度上升加快可以理解为温度升高导致吸收率的增加引起的。

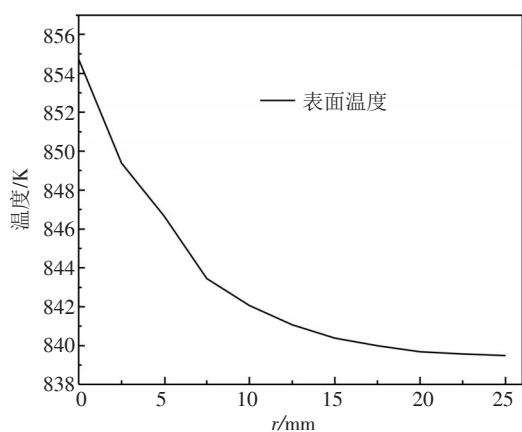


图1 100 W 辐照 30 s 的表面温度分布

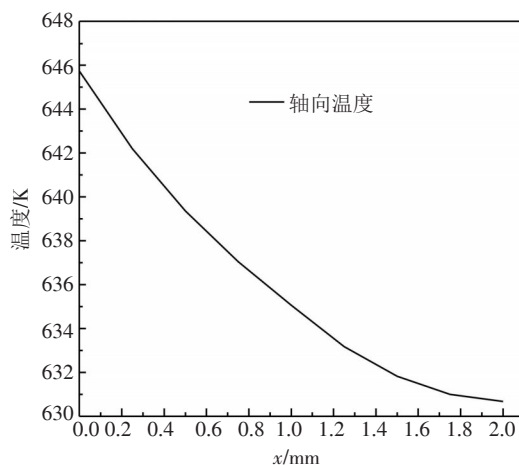


图4 60 W 辐照 30 s 的轴向温度分布

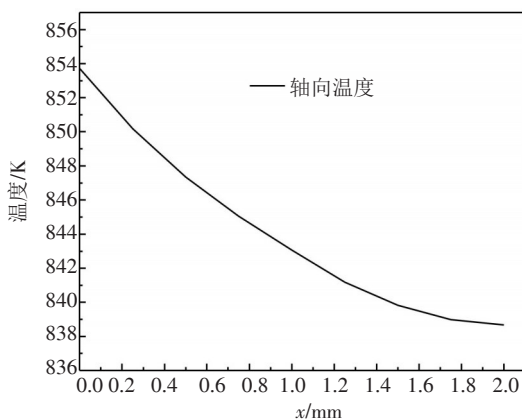


图2 100 W 辐照 30 s 的轴向温度分布

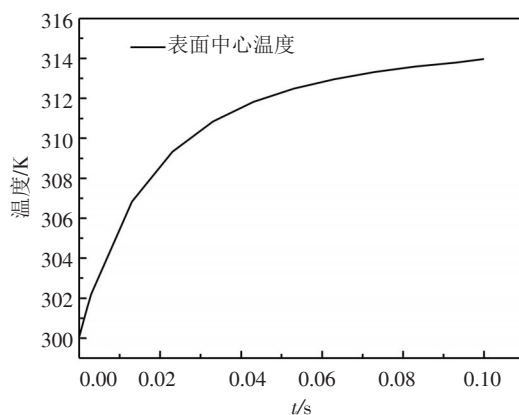


图5 100 W 表面中心温度在 0.1 s 内的变化

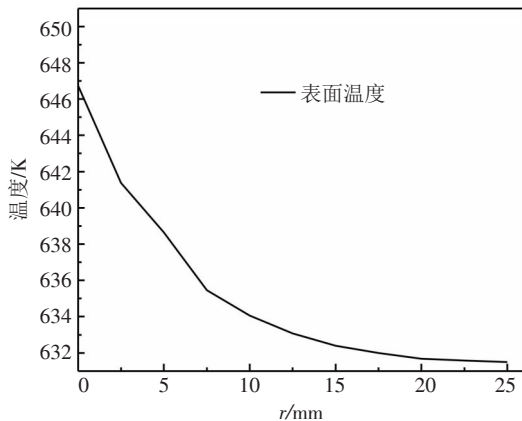


图3 60 W 辐照 30 s 的表面温度分布

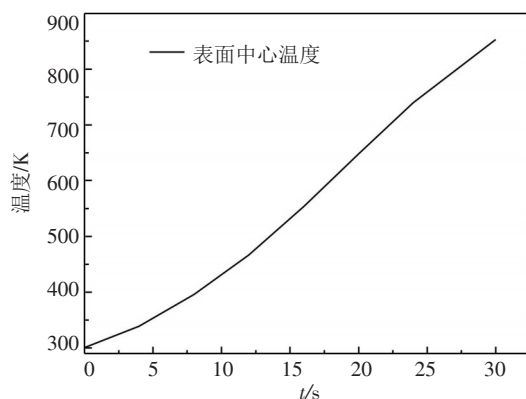


图6 100 W 表面中心温度在 30 s 内的变化

4 连续波激光的结构破坏效应

工作状态的铝金属结构,承受激光辐照会诱发力学模型的改变,从而带来失效或破坏。激光辐照铝金属结构的特点是受热区域的空间高度局部化。光斑区内按激光的功率密度呈温度梯度的分布状态,而结构材料的热传导还来不及疏散强激光连续供给的能量,不断沉积的热能促进光斑区温度迅速上升,材料将会从热应力状态转化为热软化或热熔融。工作状态的铝金属结构承受激光辐照的整体灾难性破坏,都是材料和结构的热力综合效应的集中体现^[13]。在连续波激光辐照下,相应于热层形成的在厚度方向往复传播的应力波,还会被以热传导的时间量级扩散的温升而松弛。这样一来,对于低功率连续波激光作用可以不必顾及初始应力波的影响,也就是说,热层引起的应力波的一维效应不予考虑,因此,在辐照持续一定的时间后,光斑区横截面或厚度方向的热平衡已完成,可以忽略温度梯度的影响,而只需考虑光斑区的空间温度分布,即大维度方向的温度分布会给整体结构响应和失效带来的影响。假设圆形激光光斑的直径同板宽,当激光辐照后,类 Gauss 分布的温度场随连续波时间的历程,均匀受拉的一维应力状态向二维应力状态变化,光斑中心横截面应力重新分布呈马鞍形,中心应力水平下降,边缘应力水平提高。由于光斑区材料的冶金动力效应和应力水平的综合作用,形成了裂纹的萌生和发展,最终形成宏观断裂^[14]。在低功率大光斑的连续波辐照条件下,工作状态的铝金属结构存在热和力学的综合破坏模式。破坏机理包括:材料在高温和高温升速率条件下的物理和力学特性的变化、结构局部温升带来的应力、变形的重新分布以及热动力响应,使其在原有的工作受力环境下的结构整体破坏。

5 结论

通过建立 1 064 nm 激光作用铝金属材料的热效应模型,数值模拟计算了铝金属在不同功率作用下的温度场分布,并以此为基础,论证分析了低功

率密度的连续波激光对铝金属结构热破坏作用的可行性,得到了在低功率大光斑的连续波辐照条件下,工作状态的铝金属结构存在热和力学的综合破坏模式的结论,为卫星搭载低功耗的连续波激光器,实现天基激光清除空间碎片的可行性提供必要的依据。

参考文献

- [1] Kaplan M H. Survey of Space Debris Reduction Methods [R]. AIAA-2009-6619, 2009.
- [2] Bonnal C, Ruault J, Desjean M. Active debris removal: recent progress and current trends [J]. Acta Astronautica, 2013, 85:51-60.
- [3] Bruno Esmiller, Hans-Albert Ecket. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusion of the European project clean space[J]. Applied Optics, 2014, 53(31):45-54.
- [4] Metzger J D, Leclair R J, Howe S D, et al. Nuclear-powered space debris sweeper[J]. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5(5):582-590.
- [5] Schall W O. Laser radiation for cleaning space debris from lower earth orbits[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(1):81-91.
- [6] 陆建. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [7] 周益春, 段祝平. 强激光破坏机制研究进展[J]. 力学与实践, 1995(1):10-18.
- [8] Yilbas B S, Faisal M, Shuja Z S, et al. Laser pulse heating of steel surface and flexural wave analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002(37):63-83.
- [9] 强希文. 强激光与靶材相互作用的力学效应研究[J]. 激光与红外, 2000(30):141-144.
- [10] 陈小伟, 陈裕泽, 余同希, 等. 热力联合作用弹性薄圆板的弯曲与屈曲[J]. 强激光与粒子束, 1998(10):531-536.
- [11] 黄亿辉, 袁武, 宋宏伟, 等. CW 激光辐照薄板热力响应全场测量[J]. 强激光与粒子束, 2014(26):111012-1-5.
- [12] 陈彦北. 金属板激光加热时的温升、应力、应力波动和塑性区演化[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [13] 陈海韬, 夏生杰, 李旭昌, 等. 强激光辐照受拉铝板的破坏过程[J]. 力学学报, 1993(25):16-22.
- [14] 宋宏伟, 黄晨光. 激光辐照诱导的热与力学效应[J]. 力学进展, 2016(46):435-477.