

文章编号: 1001-3806(2012)06-0754-05

脉冲激光辐照金属板温度场应力场数值分析

卢长亮 胡芳友* 黄旭仁 易德先 胡滨 崔爱永
(海军航空工程学院青岛分院, 青岛 266041)

摘要: 为了研究脉冲激光加热金属板的温度场和应力场的特点, 基于弹塑性力学理论, 采用有限元分析方法, 对脉冲激光扫描过程中金属板的温度场和应力场进行了3维数值模拟, 得到了温度场与应力场在时间和空间上的分布和变化规律。结果表明, 在脉冲激光扫描加热作用下, 金属表面发生多次熔化和凝固, 温度时间曲线呈锯齿形; 重熔区域应力场变化剧烈, 随间歇的激光脉冲发生强烈的拉-压应力波动; 金属基体冷却后在重熔区域留有高值残余拉应力, 纵向应力达799MPa, 横向应力达700MPa。

关键词: 激光技术; 温度场; 应力场; 有限元; 脉冲激光

中图分类号: TG156.99 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.011

Numerical simulation of temperature and stress field of metal plates irradiated by pulsed laser

LU Chang-liang, HU Fang-you, HUANG Xu-ren, YI De-xian, HU Bin, CUI Ai-yong
(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering College, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to study the thermal and stress field of metal plates irradiated moving pulsed laser beam, 3-D simulation models for thermal and stress field were built by means of finite element analysis method based on the thermal elasto-plastic constitutive theory. The distribution and evolution of temperature and stress with the space and time was obtained. The numerical results show that the surface of the metal is melt within the laser pulse existing time, solidified in the interval of the discontinuous pulses. The temperature variation curves are serrate with different peaks. The stress field varies tempestuously with the tensile stress and compressive stresses transformed reciprocally. After the remelting and cooling down, residual tensile stress retains in the remelting zone with the longitudinal tensile stress reaches 799MPa and the transverse stress reaches 700MPa.

Key words: laser technique; temperature field; stress field; finite element; pulsed laser

引言

采用波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 脉冲激光对金属进行加工, 其具有吸收率高、热输入小、造成的热畸变、热积累效应小的特点, 可以对金属零件进行局部重熔、改性、熔覆。金属在激光的照射下, 伴随着温度场的剧烈变化, 应力应变场同时发生复杂的变化, 易引发变形甚至损伤, 而且加工后的残余应力影响零件的力学性能^[1-3]。因此, 研究激光熔凝金属过程中热应力演化机理, 寻找减少热应力影响的方法, 对于提高激光加工技术具有重要意义。为此, 众多学者采用数值计算方法对激光加工过程进行了多方面的研究^[4-8]。

本文中采用有限元法, 使用 ANSYS 有限元软件模拟了脉冲激光直线扫描加热金属板材过程, 分析了该

过程金属板温度场和应力场的时空演变规律。

1 有限元计算方法

1.1 模型的建立与网格划分

图1为作者所建立的3维实体模型及网格划分示意图, 该模型尺寸为 $100\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 。激光辐照金属材料表面时, 辐照区及其邻近区域温度和应力变化剧烈, 为了保证计算的精度并节省时间, 划分网格时在激光辐照区及其邻近区域选择较细密的有限元网格, 单元网格大小控制在 0.4mm , 在远离激光扫描区域选择较粗大的网格尺寸。

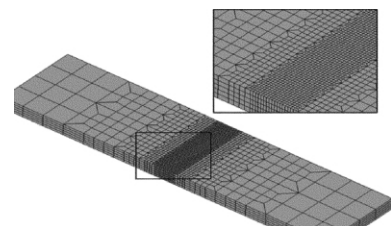


Fig. 1 Finite element mesh used in thermo-mechanical analysis

作者简介: 卢长亮(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域的应用研究。

* 通讯联系人。E-mail: fangyouhu@hotmail.com

收稿日期: 2012-02-21; 收到修改稿日期: 2012-05-02

1.2 热源的选择与边界条件

固体材料表面受到激光辐照以后,辐照区域吸收的能量会向周围传导和扩散,假设材料为各向同性的均匀材料,则瞬态温度场变量 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标系中应满足傅里叶定律的热平衡方程。激光加热金属时,内部不存在内热源,导热平衡方程可以表示为:

$$\rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T] \quad (1)$$

式中 $\rho(T)$ 为材料密度, $c(T)$ 为材料比热容, $\lambda(T)$ 为热导率。该微分方程表明微体升温所需要的热量与传入微体的热量相平衡。

激光在室温下扫描金属表面,主要有 3 种边界条件必须考虑,即激光热源的输入,金属表面与空气的对流换热,以及高温熔池向空气的热辐射,如图 2 所示。

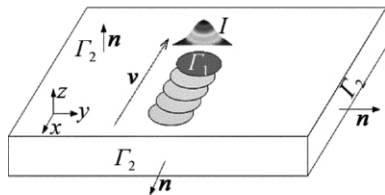


Fig. 2 Schematic of the pulsed laser irradiating a metal plate: geometry and boundary conditions

这 3 种边界条件可以归纳为下式:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} -\beta I(x, y, t) + h_c(T - T_a) + \sigma \varepsilon(T^4 - T_a^4) & (\Omega \in \Gamma_1) \\ h_c(T - T_a) + \sigma \varepsilon(T^4 - T_a^4) & (\Omega \notin \Gamma_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Γ_1 为激光作用区域; Γ_2 为金属外表面; n 为边界 Γ_1 和 Γ_2 的外法线方向向量; β 为金属对激光的吸收率; $I(x, y, t)$ 为激光在金属表面的能量分布; h_c 为对流换热系数; T_a 为环境介质温度; σ 为 Stefan-Boltzman 常数 ($5.76 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$); ε 为表面辐射效率。

采用以钇铝石榴石晶体为基质的固体激光器所发生的脉冲激光,其单脉冲能量分布在空间上近似呈高斯分布。移动激光在扫描金属基体时在时间上是间断的,其能量的时域分布如图 3 所示,单个脉冲作用时间

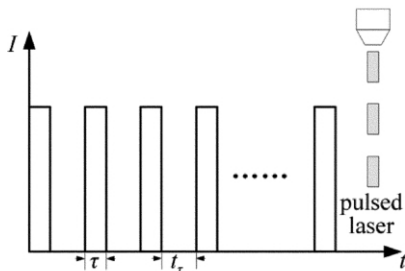


Fig. 3 Distribution of the pulsed energy in time domain

即为脉冲宽度 τ , 相邻脉冲间的间隔时间 $t_\tau = \frac{1}{f} - \tau$, f 为脉冲频率。单脉冲能量分布可用下式表示为:

$$I(x, y, t) = \frac{4P_0}{\pi w^2 (2\eta + 1)} \times \left[\eta + \frac{(x - vt)^2 + y^2}{w^2} \right] \exp \left[-2 \frac{(x - vt)^2 + y^2}{w^2} \right] \quad (3)$$

式中 P_0 为激光单脉冲能量, w 为光强下降到中心光强 e^{-1} 时的光斑半径, η 为基模高斯光束的占有系数,通过调整 η ($0 \leq \eta \leq 1$) 的值可以得到贴合实际的功率分布表达式, v 为激光扫描速率。

1.3 热-力耦合有限元处理

材料热应力应变的分析可以将其看作材料的非线性瞬态问题,选用弹塑性力学模型计算,材料的屈服服从 von Mises 屈服准则,塑性区内的行为服从塑性流动准则和强化准则。

本文中采用间接耦合的方法对脉冲激光作用过程中的热应力进行计算。材料在加热及冷却过程中的非线性响应,通过定义随温度变化的材料参量(如比热容、热导率、弹性模量、热膨胀系数、泊松比、屈服强度等)来描述。首先通过瞬态热分析,得到激光加热全过程的温度场,然后将得到的温度场结果作为结构分析的体载荷进行应力应变场的计算。为了精确计算整个过程中的热-力变化,必须对加载的时间点和作用的时间步长进行精确控制,温度场结果需要尽可能精确,尤其是脉冲激光作用过程以及随后的冷却过程,必须采用较小的时间步长;将温度场结果作为体载荷加载求解应力场时,加载的时间点必须能够再现温度场的变化历程,温度变化率较大的地方适当增加载荷步及相应的子步。

2 计算结果与分析

2.1 温度场

本文中采用的金属基体材料为 K418 高温合金,激光加工参量中,激光平均功率为 200W,脉冲宽度为 1ms,频率为 10Hz,扫描速率为 5mm/s,光斑直径约 2mm。

图 4 为激光扫描线中心典型点处的温度-时间曲线。0.4s 时,该点位于激光光斑中心,该点在扫描路径上具有典型性。由于激光的脉宽为 10ms,即每个能量脉冲对材料的加热作用都为 10ms,加热区域在 10ms 内温度迅速上升,升温曲线接近于直线;脉冲的间隔时间为 90ms,即每个脉冲作用后都有 90ms 的导热和散热时间,此过程加热区域温度下降,降温曲线接近于双曲线。经多脉冲的反复加热,该点温度时间曲线呈锯齿形分布。从图 4 中主要波峰波谷的分布可以看出,

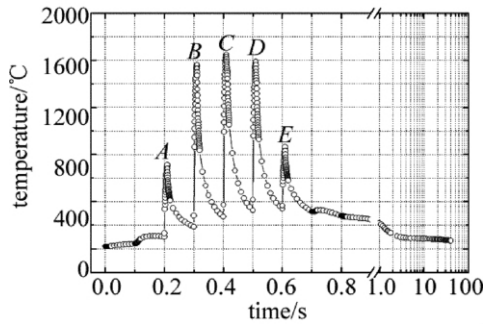


Fig. 4 Temperature evolution of the typical point versus time

该点主要经历了5次波动较大的温度变化:0.2s的时候,该点位于激光作用中心前方1mm,该点处于激光作用半径的边缘,经加热最高温度为700℃左右;0.3s和0.5s时,该点处于距激光中心0.5mm,最高温度可达到1600℃;0.4s时,该点处于激光作用中心,最高温度到达1700℃;0.6s时,该点位于激光作用中心后方1mm,最高温度为900℃。在整个过程中,该点经历了3次熔化与凝固,扫描线上的点的温度时间历程均与之相似。

图5和图6分别为激光扫描过程中0.41s和0.5s时间点的温度场分布云图。0.41s时刻为某一激光脉冲作用结束时刻,0.5s时刻为下一脉冲来临时刻。从金属板上表面看,在激光作用时间段,等温线为一组具有梯度的长轴与扫描线重合的椭圆,离光斑越近等温线越密集,光斑区域最高温度到达1700℃,温度达到材料熔点区域最大半径接近0.8mm,熔池形状近似呈椭球坑形,基体的升温区域较小。在激光间歇时间段,基体高温区域热量向低温区域传导,最高温度下降至350℃,金属基体整体升温不高。因此,脉冲激光可以在较小的区域内对材料进行重熔性加工,并且不产生

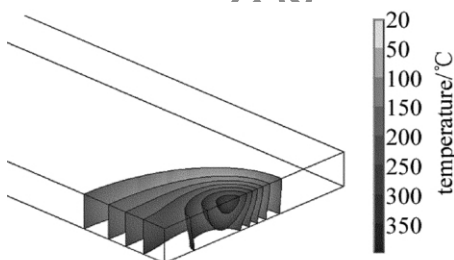


Fig. 5 3-D temperature distributions of the metal at 0.41s

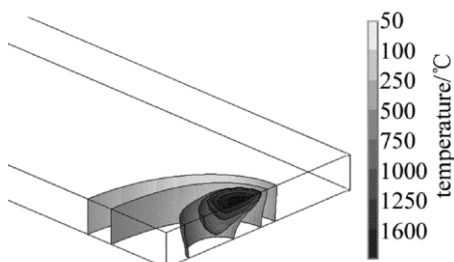


Fig. 6 3-D temperature distributions of the metal at 0.5s

大的热影响区,热累计效应小,这一点相比连续激光具有优越性。

2.2 应力场

2.2.1 应力演变规律 为方便说明基体的应力分布,作者将基体微元的3个主应力作如下规定:在水平面上垂直于激光扫描线的应力分量为横向应力,平行于激光扫描线的应力分量为纵向应力,垂直于水平面方向的应力分量为板厚方向应力。图7分别为激光扫描过程中激光脉冲作用前(0.4s)和作用后(0.41s)时的基体上表面应力分布云图。0.4s时刻金属熔池凝固,经激光扫描过的区域纵向应力、横向应力均表现为拉应力,分布特点接近于光斑移动痕迹;0.41s时,激光脉冲将作用点处金属熔化,熔池周围由于热膨胀的作用形成环形压应力,同时也卸载了部分前一次加热留下的拉应力。随着激光扫描的继续进行,此过程呈周期性变化,如图8和图9所示。图8和图9为扫描线典型点的横向应力、纵向应力随时间、温度的变化曲线,该点的应力伴随着温度变化而发生周期性变化。当激光脉冲照射到金属表面时,辐照区域温度迅速升

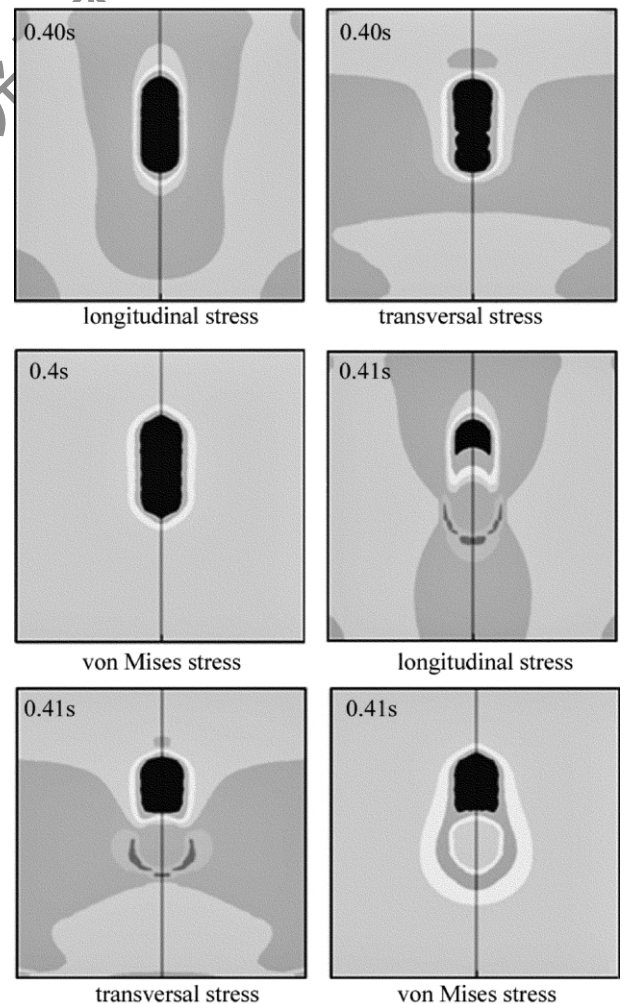


Fig. 7 3-D modeled contours of stress components (longitudinal stress, transversal stress and von Mises stress) at 0.40s and 0.41s

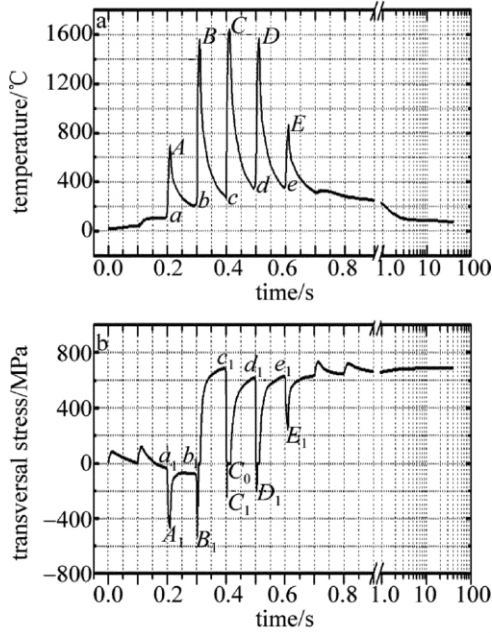


Fig. 8 Transversal stress evolution of the typical point versus the time compared with the temperature evolution

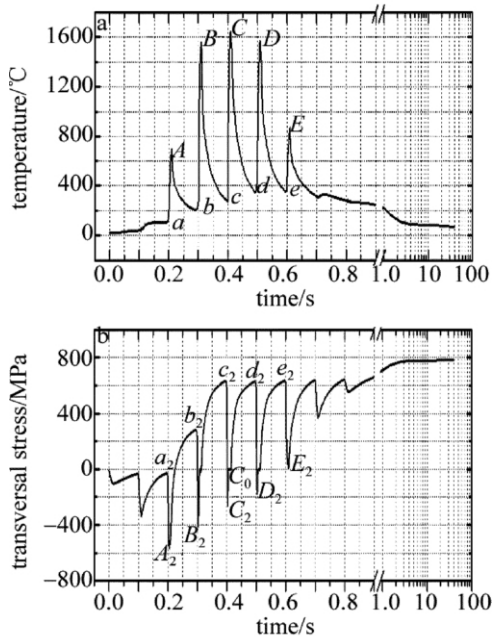


Fig. 9 Longitudinal stress evolution of the typical point versus the time compared with the temperature evolution

高, 受热区域的金属发生膨胀, 材料局部膨胀受到周围材料的限制, 受热区域产生压缩应变与压缩应力, 如图 8b 中 c_1 - C_1 曲线段。压应力随温度增高继续增大, 直至材料发生屈服。由于材料的非线性, 材料的屈服应力随温度的增加而减小, 所以在升温阶段材料一旦达到屈服, 该处的压缩应力将降低, 因此应力曲线出现拐点(图 8b 中 B_1 , C_1 , D_1 ; 图 9b 中 B_2 , C_2 , D_2)。当该处温度达到材料熔点时, 该处的压应力趋近于 0, 如点 C_0 。在激光作用间歇, 高温区域热量向低温区域传导, 熔池温度降低发生凝固, 材料发生冷

却收缩, 材料局部收缩同样受到周围材料的限制, 产生拉伸应变与拉应力, 如图 8b 中 C_0 - d_1 曲线段, 拉应力的数值主要取决于冷却过程中的温差。该点材料经过 5 次主要的应力波动以后, 最终的应力在横向和纵向上都表现为拉应力。

2.2.2 残余态的应力分布 图 10 和图 11 中分别给出了激光作用 100s 以后, 基材上表面垂直于扫描线的水平参考线上的残余应力分布和沿板厚方向的残余应力分布。在水平参考线上, 残余应力相对于扫描中心线呈轴对称分布, 在数值上以残余纵向应力和横向应力为主, 板厚方向的应力数值较小, 经激光扫描过的区域留有高值的残余应力, 尤其是经过熔化再凝固的区域。其中, 纵向应力在激光光斑作用范围内表现为拉应力, 在 0.8mm 以内可达 799MPa, 随着离中心线距离的增加, 拉应力迅速变小并逐渐变为压应力, 在距中心线 1.5mm 处压应力达到最大, 约 60MPa; 横向应力在整个参考线上都表现为拉应力, 在光斑有效作用范围内数值最高达 700MPa, 在光斑有效作用区外数值逐渐减小。在板厚方向上, 残余纵向应力和横向应力从板上表面沿深度方向从拉应力逐渐转为压应力, 在板厚 0.38mm 处压应力达到最大值, 横向应力约 300MPa, 纵向应力约 100MPa, 结合温度场结果看, 该处距熔池的底部约 0.2mm。随着深度继续增加, 压应力下降, 到板底面时均转为数值不高的拉应力。

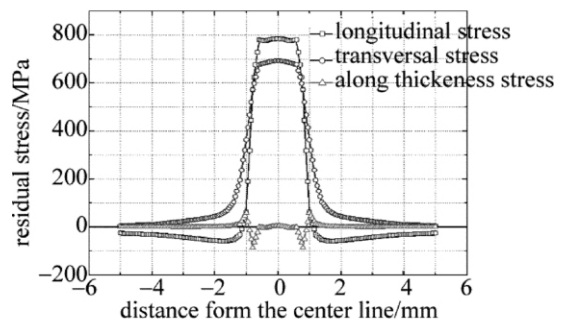


Fig. 10 Residual stress distribution on the top of metal plate across the scan line

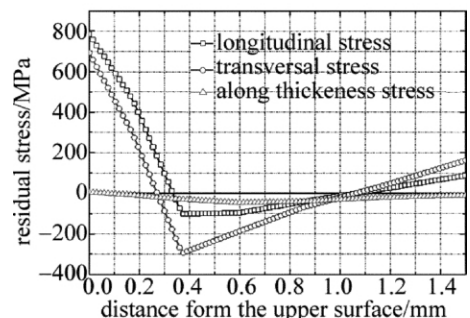


Fig. 11 Residual stress distribution in the depth direction of the metal plate

3 结 论

采用有限元方法对脉冲激光辐照 K418 合金表面过程中的温度场与应力场进行了动态模拟,分析了脉冲激光作用期间与间歇金属基体的温度场、应力场的时空分布规律。

(1) 脉冲激光扫描作用下,金属表面发生多次熔化和凝固,温度时间曲线呈锯齿形。熔池形状近似呈球坑形,基体的温升区域较小,整体温升不高。

(2) 金属基体的热应力场跟随温度场发生演变。重熔区域应力场变化剧烈,在间歇的激光脉冲作用下发生强烈的拉-压应力波动。

(3) 金属基体冷却后留有高值残余应力,上表面激光作用区域内应力最大,并表现为拉应力,纵向应力达 799MPa,横向应力达 700MPa。在板厚方向上,拉应力逐渐变为压应力,在距金属上表面 0.38mm 处压应力达到最大。

参 考 文 献

[1] SEXTON L. Laser cladding: repairing and manufacturing metal parts

and tools [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4876: 462-469.

- [2] SEXTON L, LAVIN S, BYRNE G, *et al.* Laser cladding of aerospace materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(1): 63-68.
- [3] KHAN O U, YILBAS B S. Laser heating of sheet metal and thermal stress development [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155/156: 2045-2050.
- [4] JENDRZEJEWSKI R, SLIWINSKI G, KRAWCZUK M, *et al.* Temperature and stress fields induced during laser cladding [J]. Computers and Structures, 2004, 82(7/8): 653-658.
- [5] CHEN Y, LU J, NI X W, *et al.* Plastic penetration during laser heating of a metal plate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1/3): 9-15.
- [6] ZAIN-UL-ABDEIN M, NELIASA D, JEAN-FRANCOIS J, *et al.* Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 2907-2917.
- [7] KONG F, KOVACEVIC R. 3-D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6/7): 941-950.
- [8] WEI Y H, DONG Z B, LIU R P, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of weld solidification cracking [J]. Modelling and Simulation in Materials Science Engineering, 2005, 13(3): 437-454.

版权所有 ©

《激光技术》编辑部