

铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析

赵安安, 张鸿帅, 燕国强, 郭跃文

Thermal stress coupling analysis on laser engraving of aluminum alloys with protective coatings for chemical milling

引用本文:

赵安安,张鸿帅,燕国强,郭跃文. 铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 419–424.

ZHAO Anan,ZHANG Hongshuai,YAN Guoqiang,GUO Yuwen. Thermal stress coupling analysis on laser engraving of aluminum alloys with protective coatings for chemical milling[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 419–424.

您可能感兴趣的其他文章

1. CFRP与不锈钢激光焊接的有限元分析

引用本文: 王强, 焦俊科, 王飞亚, 等. CFRP与不锈钢激光焊接的有限元分析[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 853–859.

2. 激光与外载荷联合加载7075铝合金的实验研究

引用本文: 陈伊铭, 李泽文, 唐杰, 等. 激光与外载荷联合加载7075铝合金的实验研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 13–18.

3. 基于热效应飞秒激光诱导LiNbO₃表面结构的研究

引用本文: 冯杰, 范宗学, 单常亮, 等. 基于热效应飞秒激光诱导LiNbO₃表面结构的研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 869–872.

4. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法

引用本文: 朱小伟, 胡龙, 杨文锋, 等. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 745–750.

5. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究

引用本文: 蒋翼, 陈根余, 周聪, 等. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 821–825.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0419-06

铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析

赵安安¹, 张鸿帅², 燕国强², 郭跃文²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710048; 2. 西安中科微精光子科技股份有限公司, 西安 710048)

摘要: 激光刻型过程中, 保护胶与铝合金因热物理性能参数不同会导致界面裂纹、保护胶脱落等现象。为了解决这些问题, 基于热应力耦合分析法, 建立了 2 维多层材料有限元模型, 将脉冲激光以高斯热流密度载荷的形式加载在保护胶表面, 通过计算求解得到铝合金基体的应力分布云图以及在热应力作用下保护胶切口形貌随激光加工参数的演变规律, 对比分析了激光功率、扫描速率、重复频率等加工参数对温度场、应力场、刻蚀形貌与应力位移的影响。结果表明, 功率 60 W、扫描速率 10 m/min、重复频率 100 kHz 时, 对温度场、应力场、刻蚀形貌与应力位移的影响最小。该研究对于激光刻型在化学铣切中的实际应用具有参考价值, 为激光刻型的工艺优化提供了方向。

关键词: 激光技术; 激光刻型; 有限元仿真; 热应力耦合; 铝合金; 化学铣切

中图分类号: V261.8; TG485 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.021

Thermal stress coupling analysis on laser engraving of aluminum alloys with protective coatings for chemical milling

ZHAO Anan¹, ZHANG Hongshuai², YAN Guoqiang², GUO Yuewen²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co. Ltd., Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Zhongke Microfine Photonics Technology Co. Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the phenomena of interface cracking and falling off of protective coatings caused by different thermophysical parameters between protective coatings and aluminum alloy in the process of laser engraving, a two-dimensional finite element model of multi layer materials was established based on the thermal stress coupling analysis method. The pulsed laser was loaded on the surface of protective coatings in the form of Gaussian distributed heat flux. The stress distribution nephogram of aluminum alloy matrix and the evolution law of kerf morphology of protective coatings under the action of thermal stress with different laser processing parameters were obtained by calculation. The effects of laser power, scanning speed, and repetition frequency on temperature field, stress field, engraving morphology, and stress displacement were compared and analyzed, respectively. The results show that when the parameters are selected as power 60 W, scanning speed 10 m/min and repetition frequency 100 kHz, the influence on temperature field, stress field, etching morphology, and stress displacement is minimal. The research of this paper has great reference significance for the practical application of laser engraving in chemical milling, and provides a direction for the process optimization of laser engraving.

Key words: laser technique; laser engraving; finite element simulation; thermal stress coupling analysis; aluminum alloy; chemical milling

引 言

化学铣切简称为化铣, 被广泛应用于航空航天飞行器铝合金、钛合金蒙皮类构件的减薄、减重工艺

作者简介: 赵安安(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事大中型飞机整机及航空零部件制造、装配; 航空产品加工装备设计、制造; 航空产品装配装备设计、制造等方面的技术研究。

E-mail: 15929905030@163.com

收稿日期: 2022-03-14; 收到修改稿日期: 2022-06-14

中^[1-5]。刻型^[6]作为航空航天合金构件化铣生产过程中的重要环节, 其加工质量直接关系到整个化铣工艺的优劣和最终产品的精度及质量。激光加工技术具有非接触、适应材料广、加工质量高、易实现自动化等优点, 在航空航天、能源装备、汽车制造、电子信息等领域具有广泛的应用潜力^[7-13], 尤其是在航空航天合金构件刻型环节中。目前国际上主流的航空制造企业已将激光刻型工艺成功地应用到合金构件化铣生产中, 例如: 波音、空客、达索等。国内航空制造企业也通过引进或自主研发激光刻型专用装备, 逐渐实现了合金构

件化铣工艺中自动化激光刻型^[14],升级迭代传统手工刻型。

对于铝合金化铣保护胶的激光刻型^[15],由于保护胶与合金基体的比热容、导热系数、热膨胀系数的不同,刻型过程中会产生温度梯度^[16],且切缝内存在气化以及等离子体冲击波,该现象易使保护胶层与合金基体的结合部位产生较大的应力,进而生成界面裂纹。在热应力的持续作用下,裂纹逐渐生长、延伸,最终导致护胶层的开裂和脱落^[17],进而影响航空航天合金构件化铣生产过程的后续环节。因此,从机理上分析激光加工过程中涂层与基体材料的热应力分布及演变过程^[18],受到了国内外研究人员的广泛重视。基于上述问题,WU^[19]针对热障涂层的制备过程,建立了激光熔覆^[20]的温度场模型,探索了熔覆过程中应力场的变化规律,发现激光熔覆后期,残余应力主要分布在热障涂层与基体材料相结合的界面处,该区域更易出现开裂、脱层现象;激光熔覆后的残余应力受到涂层与基体的热膨胀系数的共同影响,热膨胀系数差值越大,熔覆层残余应力越大。LIAO等人^[21]结合有限元仿真技术探究在持续的热载荷下,热障涂层产生裂纹和剥落的失效机制,发现高孔隙率的热障涂层具备优于低孔隙率的服役寿命。RAD等人^[22]通过计算机仿真软件模拟了实际的涂层缺陷,发现较粘结层的孔隙,陶瓷层材料的孔隙对应力分布的影响更加显著,但粘结层的孔隙更易导致材料产生裂纹并失效。WANG等人^[23]建立热机械耦合模型,探究激光加工过程中,带热障涂层的镍合金的热应力的产生机制和微孔的生成机制,发现造成涂层产生裂纹和失效的主要原因是界面层附近的应力突变和热应力冲击。

本文作者凭借仿真软件对铝合金化铣保护胶脉冲激光刻型工艺进行理论研究,通过热应力耦合分析直观地展示了温度场引起的应力变化及保护胶和铝合金界面处的应力细节,并借助仿真软件的变形几何功能动态地显示刻型过程中化铣保护胶的形貌演变规律,可为航空航天铝合金构件化铣保护胶激光刻型工艺的优化提供理论支撑与参考。

1 激光加工模型建立

在激光刻蚀铝合金化铣保护胶的工艺研究中,一般需要通过实验手段来获得良好的加工效果,但因刻蚀的微槽结构具有细、长、深等特点,无论是高速相机的同步拍摄,还是显微镜的离线测量,都只能得到表面微结构的变化情况,而无法获得微槽底部和侧壁的形

貌特征。更重要的是,只能得到激光刻蚀过程中微结构的宏观变化规律,而无法准确把握材料内部特征的变化机理,尤其温度场与热应力的变化规律及其对加工过程的影响。在此基础上,本文作者借助 COMSOL Multiphysics 仿真软件对铝合金化铣保护胶脉冲激光刻型工艺进行热应力耦合理论研究,传热学分析可以直观地展示化铣保护胶在激光辐照作用下的温度场分布情况及变化过程,应力分析可以直观展示激光加工过程中保护胶和铝合金界面处的应力细节,此外,变形几何功能的使用可以动态地显示整个刻型过程中化铣保护胶的形貌演变规律。

1.1 仿真模型材料及参数

铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析建模中使用到的化铣保护胶材质为 AC850,铝合金基体材料材质为 2A12,材料对应的厚度如表 1 所示。铝合金化铣保护胶激光刻型使用的脉冲激光器为北京热刺激光技术有限公司生产的 R40 二氧化碳激光器,其输出波长、脉冲宽度、重复频率等参数如表 2 所示。

表 1 模拟分析中使用的材料及厚度

type	material	thickness/ μm
chemical milling protective glue	AC850	400
aluminum alloy substrate	2A12	2000

表 2 脉冲激光器的参数

parameter	value
wavelength/ μm	10.6
pulse width/ μs	2~970
repeat frequency/kHz	1~100
duty cycle/%	30~50
focal length/mm	101.6
maximum power/W	300
spot diameter/ μm	150

1.2 化铣保护胶脉冲激光刻型有限元模型

微观来看,由于化铣保护胶属于高分子材料,在使用长脉冲激光辐照铝合金化铣保护胶表面时,材料分子吸收大量光热产生分解、气化,直接或间接与空气中的 O_2 发生氧化反应并生成气态物质并逃逸,从而达到激光刻蚀效果。宏观来看,激光刻型时,聚焦区域会达到数千摄氏度的高温,通过叠加激光脉冲,使辐照区域刻型宽度和深度逐渐增加,来实现化铣保护胶的脉冲激光刻型。

本文作者基于 COMSOL Multiphysics 软件的固体传热、固体力学、变形几何 3 个模块来实现多物理场耦

合仿真计算。固体传热物理场用于计算激光刻蚀过程中随时间和热物理参数改变而变化的温度场,需要考虑到传导传热、对流传热、辐射传热 3 种传热情况。其中,铝合金化铣保护胶脉冲激光刻型过程中材料表面与空气的换热视为对流传热,对流传热边界条件为:

$$-nq = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (1)$$

式中, h 为换热系数, T_{ext} 为环境温度, T 为温度, n 为法线上的单位向量, q 为激光的热流密度。

激光束热流密度表示为:

$$q = \frac{2AP}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (2)$$

式中, A 为材料对激光的吸收率, P 为激光功率, w 为光斑半径, r 为材料表面到光斑中心的距离。

变形几何物理场的加入是为了计算出刻蚀过程中材料在脉冲激光作用下的去除速率,根据材料相变过程中材料的熔化潜热与蒸发潜热推导出材料升华热,则材料的去除速率 v 可表示为:

$$v = \frac{q}{\rho H} \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度, H 为材料的升华热。

通过加入固体力学物理场来计算激光刻蚀过程中温度场的实时变化与不同材料属性对热应力场变化规律的影响,对应关系可表示为:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_v \quad (4)$$

式中, \mathbf{u} 为位移场, ∇ 为梯度算子, $\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量, \mathbf{F}_v 为单位变形体积上的力。

热应力耦合分析可以反映热温度场和应力场的相互影响过程,根据求解步骤的不同,分为直接求解法和间接求解法。直接求解法是利用包含温度以及位移自由度的耦合单元,经过一次求解计算同时得到热分析和结构应力分析结果。间接求解法则需要分步进行,首先通过热分析计算出模型的节点温度,将求解的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中,求解出节点应力。由于直接求解法的平衡状态需要同时满足多个准则,复杂的约束条件使得节点自由度较多,并且矩阵方程繁杂,求解效率低。在铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析中,相较于结构响应,热分析的温度对结构分析时应力应变的影响更为显著,因此本文中选取效率较高的间接求解法来实现对铝合金化铣保护胶激光刻型的热应力耦合分析。脉冲激光的刻蚀原理如图 1 所示,采用移动高斯热源模拟长脉冲激光与目标材料的相互作用过程。

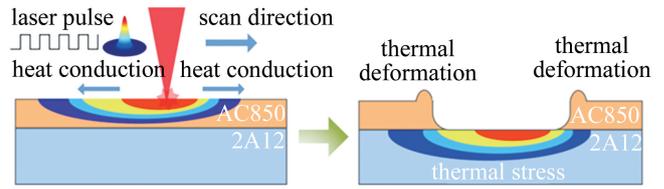


图 1 铝合金铣削保护胶激光雕刻模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser engraving simulation of aluminum alloy milling protective glue

2 仿真计算分析

2.1 铝合金基体应力分布仿真计算

按照表 2 中的加工参数,对 2 维多层材料有限元模型进行计算分析,首先进行的是铝合金化铣保护胶激光刻型温度场仿真,采用间接求解法得到铝合金化铣保护胶激光刻型的应力及位移分布云图。从图 2 可以明显看出,在保护胶与铝合金的结合界面上出现应力集中现象。图 2 中的仿真结果以激光功率为变量,选取 50 W, 60 W, 70 W 作为参数节点,根据激光烧蚀时间选择 3 个时间节点 (2 ms, 4 ms, 6 ms),其余仿真条件如下:激光扫描速率为 10 m/min、重复频率为 100 kHz。在 9 个仿真结果中,应力的颜色显示已经统一为最高 4×10^7 Pa,最低为 0 Pa。

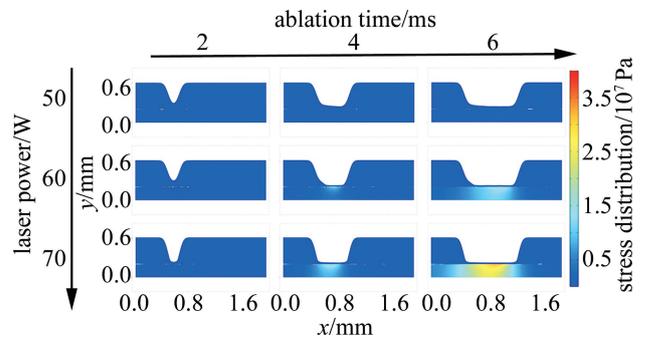


图 2 不同功率对铝合金基体应力分布的影响

Fig. 2 Effect of different power on the stress distribution of aluminum alloy matrix

纵向观察发现,烧蚀时间恒定,烧蚀深度随着激光功率的增大逐渐增大,同时,烧蚀区域底部对应的保护胶与铝合金的结合界面处出现了应力集中现象,而应力集中点也随着激光功率的增大而显著增多;其中烧蚀时间为 4 ms、6 ms,激光功率为 60 W、70 W 时,保护胶与铝合金的结合界面处开始出现应力集中现象,且应力集中区随着激光扫描路径延伸逐渐扩大,应力最高点出现在扫描区域的中心位置,且对铝合金基体材料产生了应力影响。横向观察发现,激光功率为 50 W 时,整个烧蚀过程中没有出现特别明显的应力集中区,这是因为激光功率较小时,保护胶材料不能被完全烧

蚀,所以保护胶与铝合金的结合界面处并未产生明显应力;同烧蚀深度的变化规律,其应力影响区域面积与应力数值也随着激光功率的增大而增大。仿真计算结果表明:激光功率越大,烧蚀深度越深;激光焦点距保护胶与铝合金的结合界面处越近,界面处产生的应力就越大,由于铝合金是热的良导体,较高的传热性能使其在激光刻型时,容易产生更大范围的应力区域与更高的应力值。

图3是以激光扫描速率为变量的仿真结果。分别选取8 m/min, 10 m/min, 12 m/min为参数节点,其余仿真条件如下:激光功率为60 W、重复频率为100 kHz。烧蚀时间节点选择与图例设置同图2。横向观察发现,较10 m/min, 12 m/min的仿真结果,激光扫描速率为8 m/min时,其烧蚀深度最深,且整个烧蚀过程中产生的应力区域最大、应力值最高,而烧蚀深度、应力区域和应力极值均与扫描速率呈负相关。因为扫描速率的增大会造成激光烧蚀过程中脉冲重叠率的减小,从而降低了激光加工过程中的热效应累积,同时也减少了热应力的集中现象。

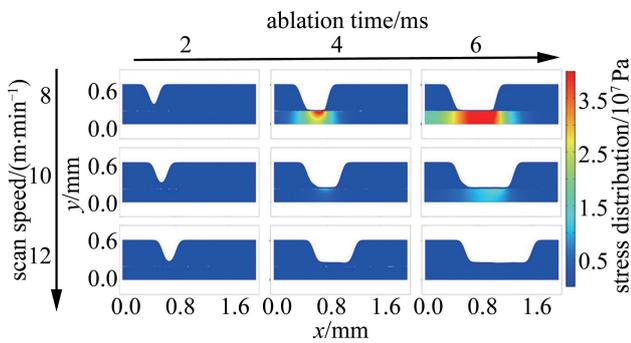


图3 不同扫描速率对铝合金基体应力分布的影响

Fig. 3 Effect of different scanning speeds on the stress distribution of aluminum alloy matrix

图4是以激光重复频率为变量的仿真结果。选取60 kHz, 80 kHz, 100 kHz为参数节点,其余仿真条件

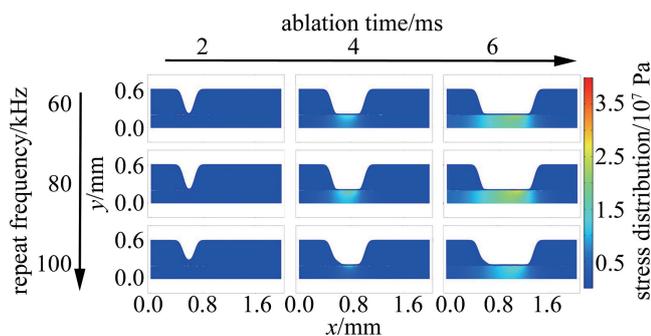


图4 不同重复频率对铝合金基体应力分布的影响

Fig. 4 Influence of different repetition frequencies on stress distribution of aluminum alloy matrix

如下:激光功率为60 W、扫描速率为10 m/min。烧蚀时间节点选择与图例设置同图2。观察发现,激光重复频率为60 kHz, 80 kHz时,烧蚀过程中产生的应力区域与应力值差别较小但显著大于重频为100 kHz时的情况。3种重频下的烧蚀深度并无明显差别,说明在激光功率与扫描速率相同的情况下,脉冲激光的重复频率对烧蚀效果的影响并不显著,但却会带来烧蚀过程中应力的变化,这对调整激光加工工艺有重要的指导意义。

图5展示了分别以激光功率(第1排)、扫描速率(第2排)、重复频率(第3排)为变量,选取烧蚀时间节点为6 ms时,保护胶与铝合金的结合界面处的应力数值。通过图5可以更清晰地看到烧蚀过程中应力极值与加工参数的联系。观察发现,应力极值与激光功率呈正相关,与扫描速率呈负相关,与重复频率呈负相关,其中脉冲激光的扫描功率对应应力极值的影响最为显著。

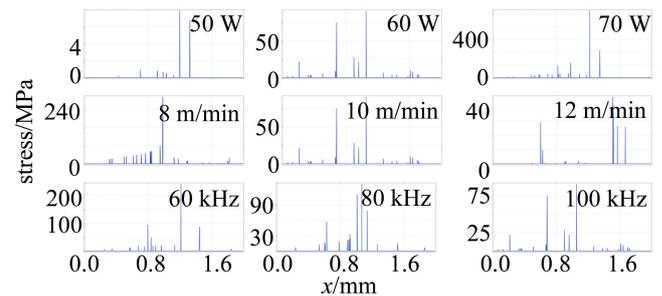


图5 保护胶和铝合金的界面应力分布

Fig. 5 Interfacial stress distribution between protective adhesive and aluminum alloy

2.2 结合热变形的保护胶刻型形貌分析

图6为不同激光功率对保护胶刻型形貌的影响示意图。以激光功率为变量,分别选取50 W, 60 W, 70 W为参数节点,根据激光烧蚀时间选择3个时间节点分别为0.1 ms, 0.4 ms, 0.7 ms。在9个仿真结果

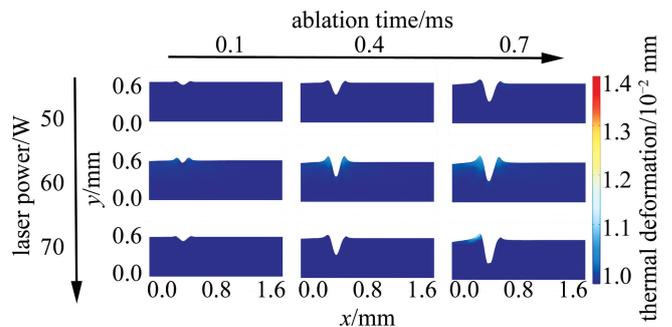


图6 不同功率对保护橡胶切口状态的影响

Fig. 6 Effect of different powers on the incision morphology of the protective rubber

中,材料因热应力而产生的位移通过颜色图例显示,最高为 1.4×10^{-2} mm,最低为 0.98×10^{-2} mm。

观察发现,靠近切口处变形最大,整体呈现出凸起的火山口形貌。脉冲激光以高斯热流密度载荷的形式垂直作用在目标材料的表面,随着脉冲数的增加,热量迅速向材料内部传导。同一时刻,激光功率越大,切口处变形越大,并且烧蚀深度越深。激光功率为 70 W 时,可以明显看到激光已经烧蚀到了保护胶与铝合金的结合界面处,并在切口处产生了最大的热变形。因为材料固定于运动平台上,平台对材料底面具有位移约束。材料内部热量的传导及底面所受位移约束都具有方向性,因此应力和位移的变化趋势并不完全相同。

图 7 是以扫描速率为变量的仿真结果。分别选取 8 m/min, 10 m/min, 12 m/min 为参数节点,其余加工参数如下:激光功率为 60 W、重复频率为 100 kHz。烧蚀时间节点选择与图例设置同图 6。观察图 7 发现,扫描速率为 8 m/min 时,保护橡胶产生的热变形最大。这是因为扫描速率的增大会引起脉冲重叠率的减小,且会明显降低激光刻型过程中热效应的累积现象,同时也会减小切口的热变形程度。

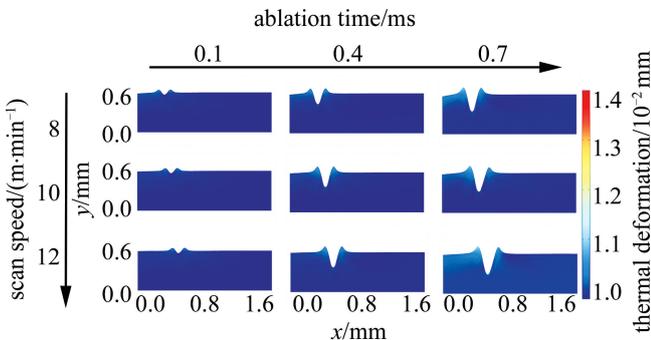


图 7 不同扫描速率对保护橡胶切口形貌的影响

Fig. 7 Effect of different scanning speeds on the topography of the protective rubber incision

图 8 是以重复频率为变量的仿真结果。分别选取

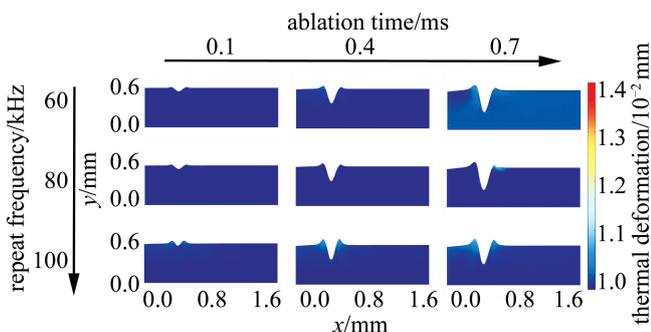


图 8 不同重复频率对保护橡胶切口形态的影响

Fig. 8 Effect of different repetition frequencies on the incision morphology of the protective rubber

60 kHz、80 kHz、100 kHz 为参数节点,其余仿真条件如下:激光功率为 60 W、扫描速率为 10 m/min。烧蚀时间节点选择与图例设置同图 6。观察图 8 发现,扫描时间恒定时,重复频率以选取的参数节点变化;重复频率为 60 kHz、80 kHz 时,切口形貌、烧蚀深度无明显变化,当重复频率达到 100 kHz 时,形貌变化较明显,且切口处产生了较大的热变形现象。

3 结论

为了研究铝合金化铣保护胶激光刻型热应力演变过程,本文中通过铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析,得到了铝合金基体的应力分布云图以及在热应力作用下保护胶切口的最终形貌。

(1) 通过铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析得到的应力分布云图,发现应力集中主要发生在保护胶与铝合金的结合界面。应力集中区随着激光扫描路径延伸逐渐扩大,应力最高点出现在扫描区域的中心位置,且对铝合金材料产生了一定的应力影响。

(2) 应力极值与激光功率呈正相关,与扫描速率和重复频率呈负相关,其中激光功率对应力极值的影响最为显著。由于铝合金是热的良导体,较高的传热性能使其在激光刻型时,更易产生大范围的应力区域与更高的应力值。

(3) 重复频率、激光功率以及扫描速率等参数共同决定着铝合金化铣保护胶刻型的切口形貌,其中,切口形貌的热变形与重复频率、激光功率呈正相关,与扫描速率呈负相关,且切口整体呈现为凸起的火山口形貌。

参考文献

- [1] ZHOU L J, ZHAO Q, DU N, *et al.* Adjustment and regeneration of TC4 titanium alloy chemical milling groove fluid [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(4): 190-195 (in Chinese). 周礼君, 赵晴, 杜楠, 等. TC4 钛合金化学铣切槽液调整与再生 [J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 190-195.
- [2] LIU H J, QIAO Y L, DONG Y, *et al.* Study on treatment of aluminum alloy milling cleaning fluid by fenton oxidation [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 220-223 (in Chinese). 刘会军, 乔永莲, 董宇, 等. 芬顿氧化法处理铝合金化铣清洗液的研究 [J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 220-223.
- [3] YI H Zh, DENG F Y, ZHANG Zh T. Research on chemical milling technology of 2197 Al-Li alloy [J]. *Surface Technology*, 2010, 39(4): 73-76 (in Chinese). 易慧芝, 邓飞跃, 张忠亭. 2197 铝锂合金化学铣切工艺研究 [J]. *表面技术*, 2010, 39(4): 73-76.
- [4] LI Q S, WANG J H, HU W B. Optimizations of electric current assisted chemical milling condition of 2219 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 249: 379-385.

- [5] HOT J, DASQUE A, TOPALOV J, *et al.* Titanium valorization: From chemical milling baths to air depollution applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119344.
- [6] EVANGELOS N, ARISTOMENIS A. FEM modeling and simulation of kerf formation in the nanosecond pulsed laser engraving process [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35: 236-249.
- [7] ZHAI Zh Y, MEI X S, WANG W J, *et al.* Research progress of laser etching technology of silicon carbide ceramic matrix composites [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 600002(in Chinese). 翟兆阳, 梅雪松, 王文君, 等. 碳化硅陶瓷基复合材料激光刻蚀技术研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 600002.
- [8] ZHAI Z Y, WANG W J, ZHAO J, *et al.* Influence of surface morphology on processing of C/SiC composites via femtosecond laser[J]. *Composites*, 2017, A102: 117-125.
- [9] ZHAI Z Y, WEI C, ZHANG Y C, *et al.* Investigations on the oxidation phenomenon of SiC/SiC fabricated by high repetition frequency femtosecond laser [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 502: 144131.
- [10] LIU C, ZHANG X Z, GAO L, *et al.* Feasibility of micro-hole machining in fiber laser trepan drilling of 2.5D C_r/SiC composite; Experimental investigation and optimization [J]. *Optik*, 2021, 242: 167186.
- [11] CHEONG H G, CHU C N, KWON K K, *et al.* Micro-structuring silicon compound ceramics using nanosecond pulsed laser assisted by hydrothermal reaction [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50: 34-46.
- [12] LI H Y, YANG F, GUO J W, *et al.* The development status and prospect of laser cleaning [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 654-661(in Chinese). 李浩宇, 杨峰, 郭嘉伟, 等. 激光清洗的发展现状与前景[J]. *激光技术*, 2021, 45(5): 654-661.
- [13] ZHU X W, HU L, YANG W F, *et al.* Laser degumming process algorithm based on block scanning of CFRP fiber woven mesh[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(6): 745-750(in Chinese). 朱小伟, 胡龙, 杨文峰, 等. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 745-750.
- [14] KIRILLOV A G, SAKEVICH V N, TROCHIMCZUK R. Automated laser engraving system for the calibration and manufacturing of non-linear scales for electrical measuring instruments[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2019, E233(4): 849-856.
- [15] HONG Sh, ZOU S H, WANG Sh D, *et al.* Feasibility analysis of laser engraving on aluminum alloy surface milling protective adhesive layer [J]. *Plating and Finishing*, 2018, 37(24): 1139-1142(in Chinese). 洪帅, 邹松华, 王帅东, 等. 铝合金表面化铣保护层激光刻型的可行性分析[J]. *电镀与涂饰*, 2018, 37(24): 1139-1142.
- [16] YAO F P, FANG L J, LI J H, *et al.* Effect of laser power on temperature field and stress field of laser cladding Ni-based coatings [J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2021, 28(11): 87-94(in Chinese). 姚芳萍, 房立金, 李金华, 等. 激光功率对激光熔覆 Ni 基涂层温度场和应力场的影响[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(11): 87-94.
- [17] LIU D D. Thermal behavior study and numerical simulation of thermal barrier coating micro topography[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 45-56(in Chinese). 刘冬冬. 热障涂层微观形貌的热力行为研究及数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 45-56.
- [18] XIE L S, CHEN X Y, YAN H P, *et al.* Experimental research on the technical parameters of laser engraving[J]. *Journal of Physics*, 2020, 1646(1): 012091.
- [19] WU T. Numerical simulation of multiphysics coupling based on laser cladding of iron matrix composites[D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2020: 21-23(in Chinese). 吴涛. 基于铁基复合材料激光熔覆多物理场耦合数值仿真[D]. 上海: 华东交通大学, 2020: 21-23.
- [20] CHAI Q, FANG C, QIU X L, *et al.* Modeling of temperature field and profile of Ni60AA formed on cylindrical 316 stainless steel by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 428: 127865.
- [21] LIAO H X, SONG P, ZHOU H H, *et al.* Effects of ceramic layer and interface porosity on the life and failure mechanisms of thermal barrier coatings[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 33(8): 1785-1793(in Chinese). 廖红星, 宋鹏, 周会会, 等. 陶瓷层与界面孔隙率对热障涂层寿命及其失效机制的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(8): 1785-1793.
- [22] RAD M R, FARRAHIA G H, AZADI M, *et al.* Stress analysis of thermal barrier coating system subjected to out-of-phase thermo-mechanical loadings considering roughness and porosity effect[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 262: 77-86.
- [23] WANG R J, DUAN W Q, WANG K D, *et al.* Computational and experimental study on hole evolution and delamination in laser drilling of thermal barrier coated nickel superalloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 161-175.