

【航空材料】

激光冲击强化 7075 铝合金数值模拟与试验分析

朱 焯, 胡 斌

(滁州职业技术学院 机械与汽车工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘 要:针对激光冲击强化 7075 铝合金的问题,利用有限元技术和试验方法进行研究。首先利用光学显微镜、电子背散射衍射、显微硬度试验分析激光冲击前后试样上表面和横截面上微观组织和力学性能。其次采用有限元软件对 7075 铝合金进行数值模拟,得到应力变化云图和残余应力云图。试验结果表明,激光冲击细化表面和横截面晶粒组织,表面和横截面上再结晶晶粒占比分别从激光冲击前 6.5% 和 8.3% 提升到 33.0% 和 80.1%;激光冲击后表面平均显微硬度提升幅度超过 15%;随着深度增加,横截面上显微硬度提升幅度逐渐衰减。数值模拟结果表明,激光冲击过程中应力从 447 MPa 提升到 581 MPa,在稳定时降到 550 MPa;激光冲击提高了表面残余应力,而横截面上应力随着厚度增加而衰减。

关键词:激光冲击;7075 铝合金;数值模拟;硬度;应力

中图分类号: V 252 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2024.01.007

0 引言

7075 铝合金作为 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金,具有强度高、耐腐蚀和耐磨等优点,被广泛应用于航天航空、交通运输等行业^[1]。在与其他组件进行连接或者配合时,7075 铝合金零部件结构形状易发生突变,从而产生应力集中问题^[2]。张兴权等^[3]利用有限元技术对 7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟得知,搭接率越大,获得的残余压应力幅值越大,残余应力分布越均匀。张红英等^[4]发现双面激光冲击能进一步提高 7075 铝合金表面残余压应力,但双面冲击增大了表层微创,不利于改善 7075 铝合金抗疲劳性能。姜银方等^[5]通过数值模拟方法,以 2024 铝合金板料为对象,研究单次激光冲击诱导的“残余应力洞”现象。李博民等^[6]利用有限元软件研究了激光功率密度、光斑尺寸、脉冲宽度(脉宽)以及冲击次数等对铝合金残余应力场的影响规律,并且得出光斑半径主要对残余压应力层深度影响较大的结论;冲击次数在一定阈值范围内能使光斑中心的残余压应力增幅明显,之后逐渐趋于饱和;在一定参数范围内能使残余压应力层深度随脉宽和冲击次数的增加而增大。杨勇等^[7]对 7050 铝合金表面微弧氧化涂层进行激光冲击强化,激光冲击后 7050 铝合金表面晶粒细化,从而降低了微弧氧化过程中阳极激活所需要的能量,加速了微弧氧化涂层的形成。

目前国内外激光冲击强化铝合金的研究主要集中在残余应力数值模拟或者试验,鲜有进行激光冲击铝合金后的微观组织、晶粒尺寸及力学性能等研究。本文以激光冲击的 7075 铝合金为研究对象,利用光

收稿日期:2023-10-21

基金项目:安徽高校自然科学重点项目(KJ2021A1411);滁州职业技术学院重点课题(YJZ-2020-05)

第一作者简介:朱 焯(1988—),男,安徽安庆人,讲师,硕士,主要从事材料仿真优化研究。

E-mail:1372006925@qq.com

学显微镜、电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD)、X 射线衍射、显微硬度试验对激光冲击后 7075 铝合金进行微观组织和力学性能研究, 以晶粒组织、再结晶晶粒、显微硬度情况说明激光冲击后 7075 铝合金性能的提升情况。利用有限元分析软件 ABAQUS 对 7075 铝合金进行数值模拟, 得到激光冲击过程中应力变化及表面和横截面残余应力变化。

1 试验方法与数值模拟

1.1 试验方法

试验用的材料为 7075 铝合金板材, 化学成分如表 1 所示。试样的尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 7075 铝合金密度为 2780 kg/m^3 , 弹性模量为 70 GPa , 泊松比为 $0.3^{[7]}$ 。

表 1 7075 铝合金化学成分

								%
$w(\text{Zn})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Al})$
5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.3	0.072	0.18~0.28	0.5	0.4	bal

采用西安天瑞达股份有限公司的 YS1505-R200A 激光冲击设备, 激光脉冲能量 15 J 、激光脉冲宽度 30 ns 、激光波长 1064 nm 、激光光斑直径 3 mm 、搭接率 50% , 激光光束垂直 7075 铝合金试样表面, 如图 1 所示。

采用线切割设备沿垂直于激光冲击方向截取金相及硬度试样和 EBSD 试样, 具体取样位置见图 1 (A 为金相及硬度试样, B 为 EBSD 试样)。A 和 B 试样尺寸均为 $7\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。金相及硬度检测: 首先用金相砂纸对试样进行粗磨和细磨, 用金刚石研磨膏进行机械磨抛, 直至待观察面呈镜面。然后依次用丙酮、乙醇和去离子水清洗抛光表面, 并用氢氟酸水溶液进行浸蚀。最后将其快速吹干, 用光学显微镜对激光冲击前后表面和横截面显微组织进行观察, 利用显微硬度计对表面和横截面上硬度进行测量。EBSD 试样检测: 首先通过电解抛光腐蚀仪对待观察表面进行电解抛光, 然后采用 EBSD 探头进行激光冲击前后 7075 铝合金试样再结晶晶粒机制分析。

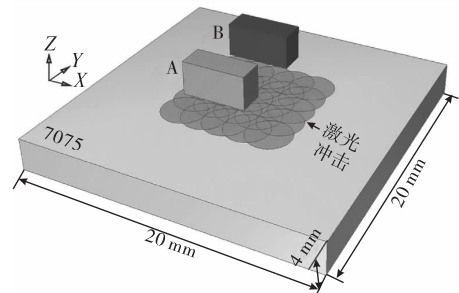


图 1 激光冲击示意图

1.2 数值模拟

数值模拟选用 7075 铝合金, 在数值模拟过程中塑性应变服从 Von Mises 屈服准则, 需考虑应变和应变率对材料性能的影响^[8]。目前在工程应用中 Johnson-Cook 模型能较好描述金属材料加工硬化、应变率和温度软化效应。激光冲击过程时间极短, 且在冲击过程中有流水进行冷却, 模拟中对 Johnson-Cook 模型简化忽略温度软化效应对材料影响, 简化后的模型^[9]为 $\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}]$ 。式中: ϵ 表示材料应变; $\dot{\epsilon}$ 表示实际应变率; A, B, C 和 n 表示材料常数, $A = 520\text{ MPa}$, $B = 477\text{ MPa}$, $C = 0.0025$, $n = 0.52^{[10]}$ 。

激光冲击载荷的施加需要同时考虑冲击波压力的时间和空间分布, 目前根据西安天瑞达公司激光冲击设备采用平顶光束进行冲击强化, 而在数值模拟中人们通常用超高斯函数来描述平顶光束场的分布情况, 当 $z = 0$ 时, 其表达式为 $E(x, y, z) = E_0 \times \exp[-2(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0})^N]$ ^[10]。式中: E_0 为光斑中心处平顶光束的光场强度标量值, ω_0 和 N 分别为平顶光束光斑的尺寸大小和阶数。当 $N = 2$ 时, 超高斯函数成为高斯函数, 本文在数值模拟计算时取 $N = 10$ 。数值模拟计算时激光脉宽通常取常量, 激光功率密度函数 I 与 $E(x, y, 0)^2$ 成正比, 平顶光束激光冲击波压力时间分布如图 2 所示。 $P(t)$ 为时间函数, 根据已有冲击波压力随时间变化趋势的研究, 冲击波压力随时间的变化规律为近似高斯分布, 其加载曲线如图 2 所示。相关

文献[11]表明,在约束模式下冲击波压力的持续时间大约为激光脉冲宽度的 2~3 倍或者更高,在数值模拟中脉冲宽度取 30 ns。

在数值模拟过程,考虑到激光冲击波压力与材料相互作用的力效应,通常用 Fabbro 推导出的激光冲击峰值估算式^[12-13]; $\bar{P}=0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{Z}\sqrt{I_0}$ 。式中: \bar{P} 表示激光冲击波平均压力(GPa); α 表示内能转化为热能的系数,一般取 0.1; I_0 表示脉冲激光的平均功率密度(GW/cm²); Z 表示折合声阻抗(g/(cm²·s))。

根据上述激光冲击峰值公式,在材料确定的情况下激光冲击峰值压力与 I_0 有关^[14-15],而 I_0 又与单脉冲能量、激光脉冲宽和光斑直径有关系,其中激光脉冲宽度取 30 ns,即激光冲击波压力与单脉冲能量和激光脉冲宽度有关。

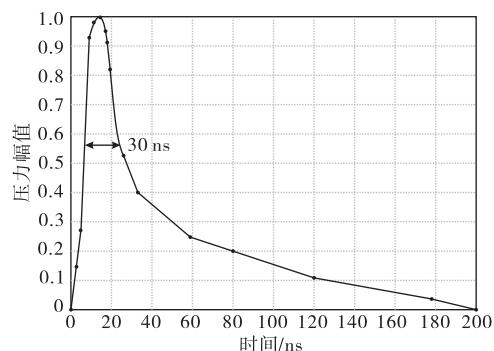


图 2 冲击波加载曲线

根据上述激光冲击峰值公式,在材料确定的情况下激光冲击峰值压力与 I_0 有关^[14-15],而 I_0 又与单脉冲能量、激光脉冲宽和光斑直径有关系,其中激光脉冲宽度取 30 ns,即激光冲击波压力与单脉冲能量和激光脉冲宽度有关。

2 试验结果分析

2.1 显微组织

图 3 和图 4 分别为激光冲击前后 7075 铝合金表面和横截面显微组织图。由图 3 可以看出,激光冲击前后晶界和晶粒形状明显的变化,其中,激光冲击前晶粒尺寸较为粗大呈现“块”形,晶粒内部分布少量析出物;激光冲击后晶粒尺寸变小,晶粒内部的析出物增多。图 4 中激光冲击前横截面上晶粒形状为“板条”形,晶粒尺寸细小、晶粒内部的析出物多;激光冲击后横截面上晶粒比激光冲击前细化明显,细小且狭长的晶粒增加。

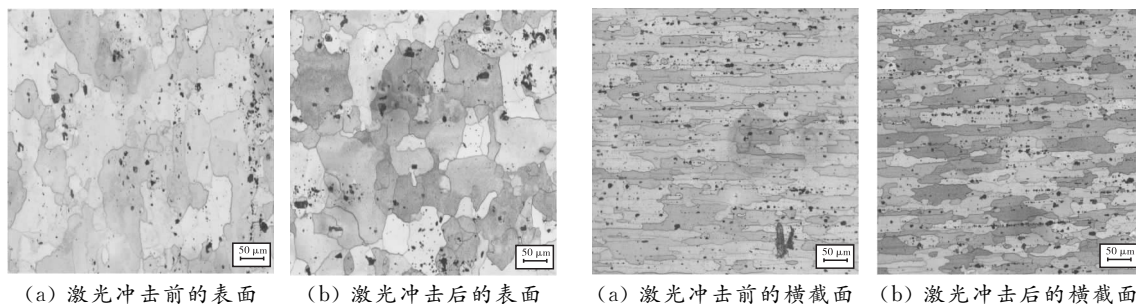
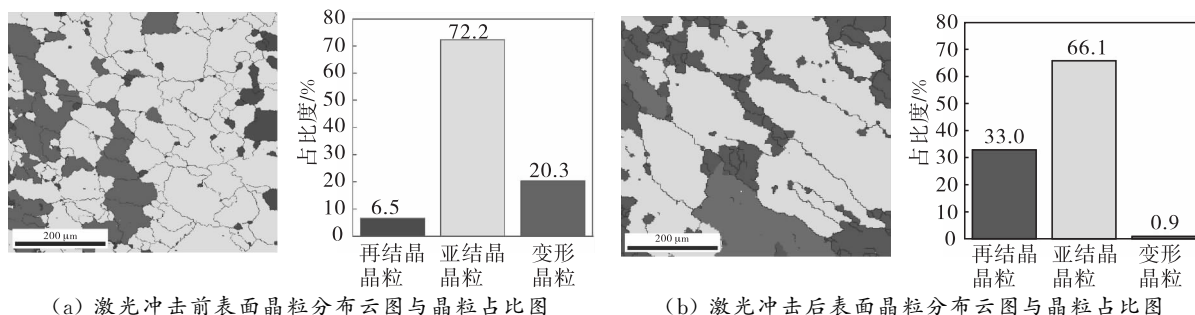


图 3 表面显微组织

图 4 横截面显微组织

2.2 晶粒分布

图 5 和图 6 分别为表面和横截面晶粒分布和占比。根据晶粒内取向差不同,可以分为再结晶晶粒、亚结晶晶粒、变形晶粒。



(a) 激光冲击前表面晶粒分布云图与晶粒占比图

(b) 激光冲击后表面晶粒分布云图与晶粒占比图

图 5 表面晶粒分布与占比图

由图 5 可以看出,激光冲击前再结晶晶粒、亚结晶晶粒、变形晶粒占比分别为 6.5%、73.2%、20.3%,而激

光冲击后表面再结晶晶粒、亚结晶晶粒、变形晶粒分别为 33.0%、66.1%、0.9%。激光冲击后表面再结晶晶粒比激光冲击前提高了 26.5%，而亚结晶晶粒和变形晶粒相比激光冲击前分别减少了 7.1% 和 19.4%。

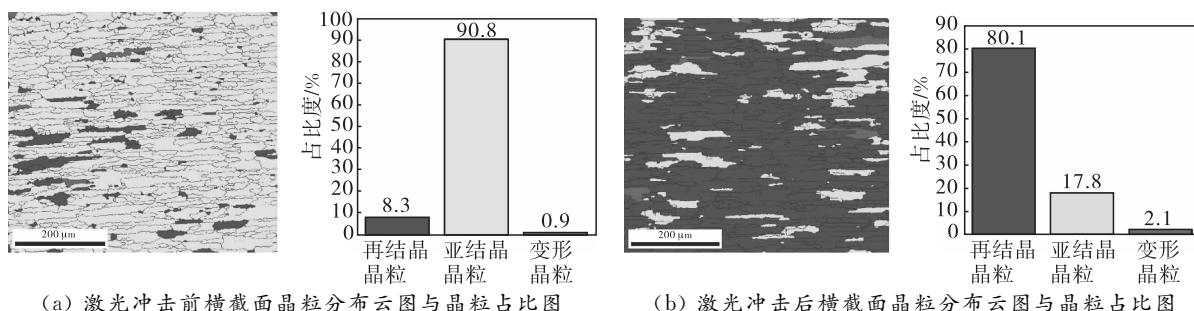


图 6 横截面晶粒分布与占比图

由图 6 可以看出,激光冲击前横截面上再结晶晶粒、亚结晶晶粒、变形晶粒占比分别为 8.3%、90.8%、0.9%;激光冲击后再结晶晶粒为 80.1% 相比于激光冲击前提高了 71.8%,而亚结晶晶粒从激光冲击前的 90.8% 下降到 17.8%。

2.3 硬度分析

图 7 为激光冲击前后表面显微硬度曲线图。激光冲击前 7075 铝合金表面显微硬度在 120.0~153.8 HV, 激光冲击后其表面显微硬度显著提高到 155.0~170.1 HV, 平均显微硬度提升幅度超过 15%。图 8 为激光冲击前后横截面显微硬度曲线图。激光冲击对横截面深度方向上硬度硬化可分为严重硬化区(0~2 mm)、一般硬化区(2~3 mm)及无影响区(3~4 mm)。在严重硬化区,激光冲击对材料深度方向上的硬度强化明显,激光冲击前材料平均显微硬度为 131.7 HV, 而激光冲击后平均显微硬度为 158.1 HV, 平均显微硬度提升了 20.05%;横截面中心处硬度提升幅度为 14.02%。以上数据表明,激光冲击对 7075 铝合金表面显微硬度提升幅度较大,而深度方向上存在极限值,当材料过厚时,激光冲击对材料硬化效果基本消失,符合激光冲击在材料内部传播时会逐渐衰减的规律。

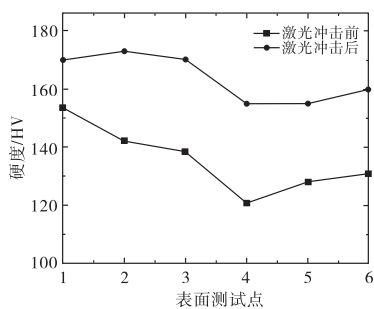


图 7 表面显微硬度分布曲线图

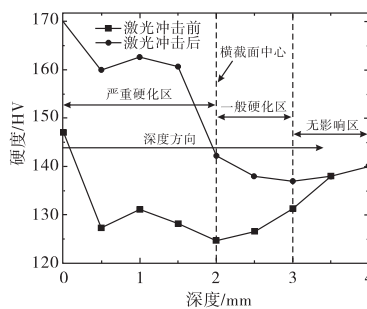


图 8 横截面显微硬度分布曲线图

2.4 残余应力试验分析

利用 X 射线应力仪分析激光冲击前、后试样表面和横截面方向上的残余应力。图 9 为试样残余应力表面和横截面测试点简图。为了保证结果的稳定性,每个测试点测试 3 次取平均值。残余应力测试采用同倾固定 Ψ 法,倾斜角在 $-35^{\circ} \sim 35^{\circ}$, X 射线管电压和电流分别为 33.0 KV 和 0.08 mA, 计数时间为 20 s, 准直管直径为 1 mm。图 10 为激光冲击后 7075 铝合金表面和横截面残余应力分布情况图。由图 10(a) 可看出,激光冲击后试样表面残余应力呈现“V”字形分布,在距离试样中心 2.5 mm 处,表面残余应力最大为 -485 MPa。由图 10(b) 可知,激光冲击后 7075 铝合金残余应力主要分布在近表层,且残余应力随着深度增加而减少。在距表面

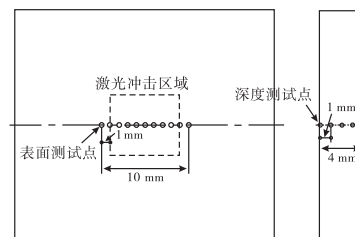


图 9 残余应力测试简图

在距表面

1 mm 处时,激光冲击对 7075 铝合金试样在深度增加残余应力几乎为 0。

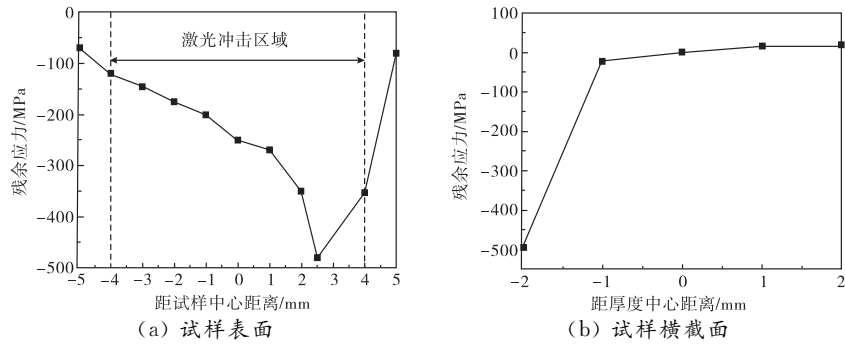


图 10 激光冲击后残余应力分布图

3 数值模拟结果分析

3.1 应力变化分析

激光冲击过程极短,所以很难在试验条件下对材料表面进行应力检测,采用有限元数值模拟能清晰反应激光冲击过程中应力变化情况,图 11 为激光冲击表面应力变化云图。

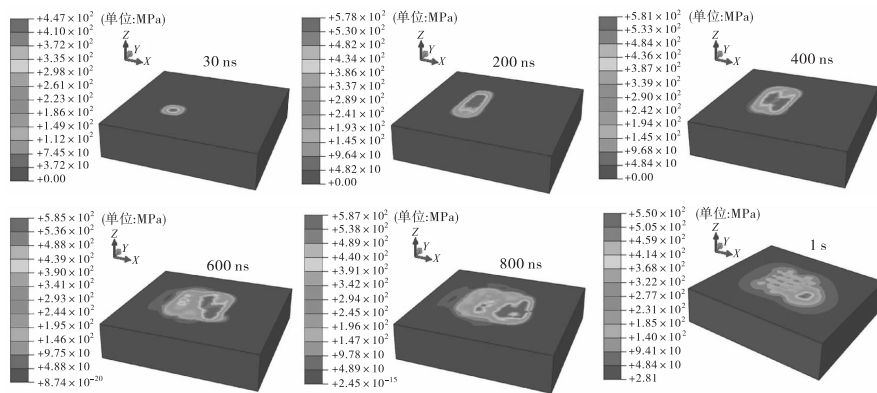


图 11 表面应力变化云图

由图 11 可以看出,30 ns 时,激光冲击脉冲表面最大应力为 447 MPa;从 30 ns 到 800 ns 过程中,激光冲击表面最大应力从 447 MPa 增加到 587 MPa,最大应力位置也随着激光冲击光斑路径在不断变化,当激光冲击时间稳定在 1 s 时表面最大应力为 550 MPa。

3.2 残余应力数值分析

图 12 为表面残余应力。由图 12 可以看出,表面最大残余应力为 -536 MPa。

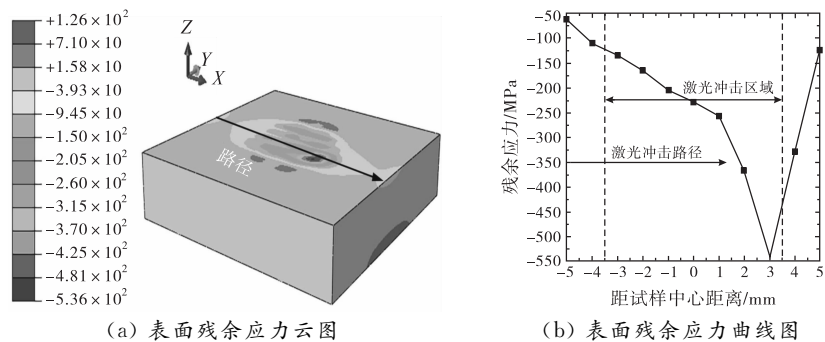
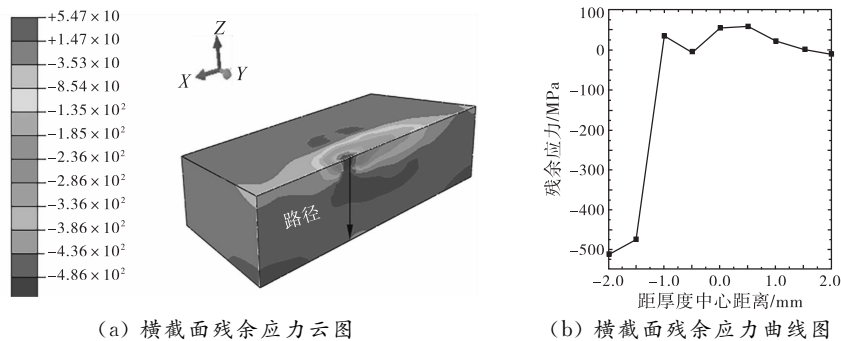


图 12 表面残余应力

由图 12(b)可以看出,距激光冲击中心的距离在 -3.5 mm 至 1 mm 时,表面残余应力增加缓慢;在

1~3 mm 时, 表面残余应力基本呈线性增加; 在 3 mm 处, 残余应力达到云图中的最大; 当超过 3mm 后, 表面残余应力衰减。

图 13 为横截面残余应力。由图 13(a)可以看出, 在表面残余应力最大处, 随着厚度增加, 残余应力不断衰减。图 13(b)显示表面至厚度 1 mm 处, 残余压应力在 $-536 \sim 42.5$ MPa。在厚度 1 mm 后激光冲击对材料厚度方向上残余应力影响几乎为 0。



(a) 横截面残余应力云图

(b) 横截面残余应力曲线图

图 13 横截面残余应力

4 结论

对 7075 铝合金进行激光冲击试验和数值模拟, 对比冲击前后微观组织、晶粒分布、显微硬度、应力变化及残余应力, 主要结论如下:

(1) 在微观组织上, 激光冲击后, 表面和横截面晶粒得到细化, 晶粒内析出物增多。在再结晶晶粒分布上, 激光冲击后表面再结晶晶粒从 6.5% 提高到 33.0%, 横截面上再结晶晶粒从 8.3% 提高到 80.1%。

(2) 激光冲击强化后, 表面显微硬度显著提高, 从激光冲击前的 120.0~153.8 HV, 提高到 155.0~170.1 HV。而横截面上显微硬度分为严重硬化区、一般硬化区及无影响区。

(3) 在激光冲击数值模拟结果中, 随着激光冲击从 0 到 800 ns, 表面应力也从 447 MPa 增加到 587 MPa, 而当激光冲击结束稳定后表面应力下降为 550 MPa。激光冲击后表面最大残余应力为 536 MPa, 而横截面上随着深度增加残余应力在不断衰减, 在距表面 1 mm 处时残余应力为 42.5 MPa。

参考文献:

- [1] 张新华, 曾元松, 王东坡, 等. 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究[J]. 航空制造技术, 2008 (13): 78-80.
- [2] 殷之平, 陈瑶, 黎泽松, 等. 不同激光冲击区域对 7075 铝合金结构件缺口疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(12): 1907-1913.
- [3] 张兴权, 李欢, 黄志来, 等. 7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 80-88.
- [4] 张红英, 袁海洋. 7075 高强铝合金构件缺陷对激光冲击强化残余应力的影响[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(8): 46-49.
- [5] 姜银方, 来彦玲, 张磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37 (8): 2073-2079.
- [6] 李博民, 刘新民, 张晖辉, 等. 铝合金激光冲击强化的三维数值模拟[J]. 应用激光, 2017, 3(6): 852-858.
- [7] 杨勇, 陈宇海, 唐伟清, 等. 7050 铝合金激光冲击强化-微弧氧化涂层的组织和性能[J]. 材料热处理学

- 报,2022(2):112-119.
- [8] 杜永,马玉娥,苟磊,等.激光强化后 7050 凹槽铝板的残余应力分布规律研究[J].西北工业大学学报,2019,37(4):643-649.
- [9] NIE X,TANG Y,ZHAO F,et al. Formation mechanism and control method of residual stress profile by laser shock peening in thin titanium alloy component[J]. Materials,2021,14:1878.
- [10] 朱然.平顶光束多点激光冲击薄壁件的强化与变形研究[D].南京:东南大学,2019.
- [11] 李振.基于激光冲击的钛合金小孔构件残余应力分布及疲劳性能研究[D].镇江:江苏大学,2016.
- [12] ZHAO J Y,DONG Y L,YE C. Laser shock peening induced residual stresses and the effect on crack propagation behavior[J]. International journal of fatigue,2017,100:407-417.
- [13] 韩培培,焦清洋,权纯逸,等.激光冲击强化对 7050 铝合金小孔结构残余应力和疲劳性能的影响[J].金属热处理,2021(46):202-206.
- [14] 曹宇鹏,葛良辰,冯爱新,等.冲击波传播方式对激光冲击 7050 铝合金残余应力分布的影响[J].表面技术,2019,48(6):195-202.
- [15] 闫家阳,王永军,王俊彪,等.2024-T351 铝合金件方形光斑激光喷丸残余应力数值模拟[J].锻压技术,2021,46(5):79-85.

Numerical Simulation and Experimental Analysis of Laser Impact on 7075 Aluminum Alloy

ZHU Ye,HU Bin

(School of Mechanical and Automotive Engineering,
Chuzhou Polytechnic,Chuzhou 239000,China)

Abstract: The problem of laser impact strengthening of 7075 aluminum alloy is investigated using finite element techniques and experimental methods. Firstly, the microstructure and mechanical properties of the upper surface and cross-section of the sample before and after laser shock are analyzed using optical microscopy, electron backscatter diffraction, and microhardness testing. Secondly, finite element software is used to numerically simulate 7075 aluminum alloy, obtaining stress variation cloud maps and residual stress cloud maps. The experimental results show that laser shock refines the surface and cross-sectional grain structure, and the proportion of recrystallized grains on the surface and cross-section increases respectively from 6.5% and 8.3% before laser shock to 33.0% and 80.1%, and the average microhardness increases on the surface after laser shock is over 15%. As the depth increases, the increase in microhardness on the cross-section decreases gradually. The numerical simulation results show that the stress increases from 447 MPa to 581 MPa during the laser shock process, and reduces to 550 MPa when stable. Laser shock increases the residual compressive stress on the surface, while the compressive stress on the cross-section decreases with increasing thickness.

Keywords: laser impact; 7075 aluminium alloy; numerical simulation; hardness; stress

(责任编辑:王新亮)

引用格式 朱焯,胡斌.激光冲击强化 7075 铝合金数值模拟与试验分析[J].山东航空学院学报,2024,41(1):60-66.
ZHU Y,HU B. Numerical simulation and experimental analysis of laser impact on 7075 aluminum alloy[J].
Journal of Shandong University of Aeronautics,2024,41(1):60-66.