

7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟

张兴权 李 欢 黄志来 张 鑫 余建平 章 艳 段士伟

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002

摘要 激光冲击强化技术是一种新型的材料表面改性技术。在实际应用中,由于激光光斑直径通常在 20 mm 以下,工件表面大范围的激光冲击强化需要采用多个光斑搭接。运用实验和数值模拟的方法,探讨了光斑在不同中心距下诱导的残余应力场的分布规律,研究了不同搭接率对残余应力分布的影响,以及两种不同加载顺序下表面残余应力的分布特性。结果表明:相邻光斑中心距对两光斑之间区域的残余应力有重要影响,随着两光斑中心距的减小,相邻光斑之间区域的应力场由残余拉应力转变为残余压应力;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;从中间到两侧的多点冲击方式能获得较大、较均匀的残余压应力。

关键词 激光技术;残余应力;有限元分析;搭接

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1203002

Numerical Simulation of Residual Stress Induced in 7075 Aluminum Alloy by Repeated High-Power Laser Pulses

Zhang Xingquan Li Huan Huang Zhilai Zhang Xin She Jianping Zhang Yan Duan Shiwei

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract Laser shock peening (LSP) is a novel surface modified technique. In practical applications, due to the diameter of laser beam smaller than 20 mm, the overlapping LSP technology needs to process workpiece surface with large area. The residual stress fields induced by laser spots in different center distances are discussed with finite element methods and experiments. The influences of overlapping rate on the distributions of residual stress are investigated. The characteristics of residual stress distributions induced by different shocking sequences are also analyzed. The results show that the center distances of laser spots have significant influences on the residual stress of region between two laser spots. With the center distances of two laser spots decreasing, the residual stress fields at the region between two laser spots turn from tensile residual stress into compressive residual stress. The magnitude of compressive residual stress is increased with the increment of laser spot overlapping rate, and the distributions of residual stress generated by larger overlapping rate are more uniform. The multiple shocking sequence of mid-left-right can induce a large and uniform compressive residual stress field.

Key words laser technique; residual stress; finite element method; overlapping

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光冲击强化技术是利用强激光在工件表面诱导产生残余压应力层来提高其疲劳寿命,并同时能提高工件的耐磨性和抗腐蚀特性^[1-2]。同传统的机械喷丸、滚压强化相比,激光冲击强化技术有着加工柔性大、效率高、形成的残余压应力层深、表面质量好等优点,在航空、航天等制造领域有着潜在的重要应用。

目前,国内外学者对激光冲击强化开展了相关研究。Fairand等^[3]利用高功率激光脉冲诱导的应力波来改善 7075 铝合金的力学性能。Mithila等^[4]采用本征应变模型对激光冲击的残余应力进行了研究。Braisted等^[5-6]相继对激光双面冲击诱导的残余应力进行了研究。张永康等^[7]以 TC4 钛合金为材料,采用 ABAQUS 有

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51175002)、安徽省自然科学基金(090414156)

作者简介: 张兴权(1970—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事激光表面强化等方面的研究。Email: zhxq@ahut.edu.cn

限元软件建立激光冲击模型,计算单点激光冲击诱导的残余应力场。姜银方等^[8]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。然而这些研究较多地集中在单点激光冲击下诱导的残余应力场,对多点激光冲击诱导的残余应力场的研究较少。

在激光冲击过程中,要在工件表面诱导产生残余压应力,激光诱导的冲击波的峰值压力必须要超过材料的动态屈服极限,激光的功率密度必须超过一定的阈值。在实际应用中,由于受激光器输出能量等条件的限制,光斑直径往往在20 mm以内,因此当工件表面待冲击处理面积较大时,需要采用多点激光冲击组合。在进行多点激光冲击时,相邻光斑的中心距、冲击的顺序以及搭接率对于残余应力的形成至关重要,也急需探究。7075铝合金被广泛用来制造航空器件,如用来蒙皮、制造壁板等零件,然而,目前还未见到多点激光冲击7075铝合金诱导残余应力场的研究报道,因此有必要研究在其表面进行多点激光冲击后形成的残余应力场规律。

以7075航空铝合金为研究对象,采用实验和数值模拟相结合的方法,探讨了光斑中心距对残余应力场的影响;研究了搭接率对诱导的残余应力场及表面变形的影响;分析讨论了多点激光冲击加载顺序对残余应力场的影响。本文的研究结果不仅为多点激光冲击技术在7075航空铝合金零件表面强化的实际应用提供参考,也为其他材料零件表面的激光冲击强化提供借鉴。

2 激光冲击原理

激光冲击作用机理如图1所示,预先在待处理的工件表面涂上一层黑漆或者铝箔作为吸收层,用以防止工件材料表面被灼伤和提高对激光能量的吸收率,吸收层表面覆盖一层用以提高冲击波的压力和作用时间的约束层,通常为透明的玻璃或流水。高功率(GW/cm^2)、短脉冲(ns)的激光脉冲穿过透明的约束层辐照到吸收层上,吸收层材料吸收激光能量迅速气化、电离产生等离子体,等离子体继续吸收激光束能量,形成高温高压等离子体,在工件材料表面产生吉帕量级的冲击波,在材料内部诱导应力波的产生,当应力波的峰值压力超过材料的动态屈服极限时,材料表面发生塑性变形,产生残余压应力,同时材料的晶粒得到细化,其硬度得到了提高,从而使材料的力学特性得到了改善,工件的疲劳寿命得到延长^[9-10]。

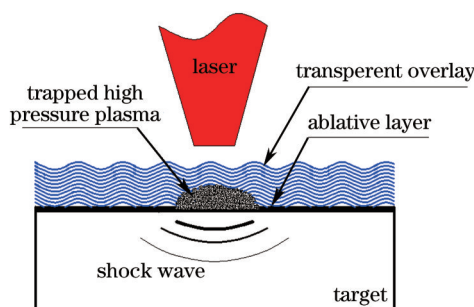


图1 激光冲击原理

Fig.1 Schematic of LSP

3 有限元分析

ABAQUS是一个强大的有限元分析软件,被广泛运用于模拟激光冲击诱导的残余应力场和应变^[11-12]。ABAQUS有限元分析主要有动态显式和静态隐式两个分析步,多点激光冲击模拟过程主要也包括两个分析步,首先在ABAQUS/Explicit模块中模拟材料在冲击波作用下的动态响应过程,再将ABAQUS/Explicit瞬态响应的结果导入ABAQUS/Standard模块,模拟材料在高速冲击下的回弹,最终获得稳定的残余应力场。

3.1 模型建立

为了计算多点激光冲击诱导的残余应力场,在ABAQUS中建立了三维有限元模型,其几何尺寸为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,单元类型为C3D8R。单元的密度决定计算结果的准确性,单元越密,计算结果越精确,但单元太密集,计算量会很大,为了得到较高计算精度的同时减少计算量,冲击区域单元细化,其余可以适当粗化。在加载方向上将模型切割成两个部分,上半部分单元尺寸均为 0.1 mm ,下半部分单元加载方向尺寸为

0.2 mm, 总共划分 259,200 个单元。边界条件为模型的底面全约束。

3.2 材料本构模型

激光冲击过程应变率高达 10^6 s^{-1} , 所以需要考虑靶材的加工硬化和应变率效应。本模型采用 Johnson-Cook 模型。Johnson-Cook 模型因其较好地考虑了金属材料的加工硬化、应变率和温度软化效应, 在工程上得到了较好的应用^[13]。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) [1 - T^{*m}], \quad (1)$$

式中 σ 为 Von Mises 流动应力, A 为屈服强度, B, n 为应变强化参数, C 为经验性应变率敏感系数, ε 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为相对等效塑性应变率 ($\varepsilon_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$), $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ 为无量纲温度, T_m 和 T_0 为材料的熔点和室温, m 为温度软化因子。(1) 式中右边的第一个因子式给出的是 $\dot{\varepsilon}^* = 1.0$ 和 $T^* = 0$ 时的应力, 第二个和第三个因子式分别表示应变率和温度效应。激光冲击过程中由于激光辐照在黑色的胶带上, 屏蔽了对材料的热影响, 另外采用了水作为约束层, 也带走了大量的热, 因此这个过程属于冷加工范畴, 因此在激光冲击的过程中可不需要考虑温度影响, 这是与激光打孔等热加工工艺的重要区别。7075-T7351 的 Johnson-Cook 模型中所需的参数如表 1 所示。

表 1 7075-T7351 物理和力学性能^[12]

Table 1 Physical and mechanical properties of 7075-T7351^[12]

Material	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	E / GPa	ν	A / MPa	B / MPa	n	C
7075-T7351	2780	70	0.33	430	350	0.4	0.12

3.3 分析步

经过早期的学者计算, 在 ABAQUS/Explicit 中进行多次冲击时, 加载应当在不同的分析步中^[5,12]。在第一次加载中建立了两个分析步, 分析步 1 用于施加压力载荷, 计算冲击波传播和衰减, 总的时间步长需要大于加载时间的两倍^[12], 此处取 5000 ns。分析步 2 用于计算变形和应力场, 时间步长通常比分析步 1 大两个数量级, 用以获得稳定的应力状态^[5], 此处取 100000 ns。在第二次加载时运用分析步 3 和分析步 4, 第 3 次加载运用分析步 5 和分析步 6, 依此类推。

3.4 激光诱导冲击波加载

模拟选用光斑直径为 3 mm, 半峰全宽(FWHM)为 8 ns, 功率密度为 2.97 GW/cm^2 。冲击波的压力加载曲线如图 2 所示。激光冲击诱导的峰值压力 $P(\text{GPa})$ 可以用公式估算^[14]:

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} Z I_0, \quad (2)$$

式中 α 为常数, $Z(\text{g/cm}^2\text{s})$ 为靶材与约束层间的声阻抗, $I_0(\text{GW/cm}^2)$ 为激光功率密度。

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (3)$$

式中 Z_1, Z_2 分别为约束层和靶材的声阻抗, 其中约束层为水 $Z_1 = 0.165 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \text{ s}^{[6]}$, 靶材为铝合金 $Z_2 = 1.45 \times 10^6 \text{ g/cm}^2 \text{ s}^{[15]}$ 。

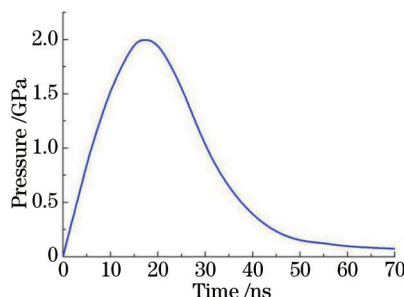


图 2 冲击波压力加载曲线

Fig.2 Loading curve of shock wave pressure

4 实 验

采用线切割方法直接将厚度为 3 mm 的 7075 铝合金板料切割成 6 个 12 mm×12 mm 的矩形板料,首先用粒度为 1000[#]的 SiC 砂纸将试样表面抛光,再用蒸馏水洗净,然后用乙醇去除试样表面污渍。试样表面贴上一层厚度约为 100 μm 的黑色专用胶带作为吸收层,一层厚度约为 1 mm 的水帘作为冲击表面的约束层,机械手夹持试样边缘区域。实验所用的激光器为调 Q 型 Nd:YAG 型激光器,频率为 8 Hz,波长为 1064 nm,其它输出参数与上述模拟的参数相同。进行激光冲击实验时,激光脉冲参数都相同,光斑中心距为主要变化参数,多点激光冲击参数如表 2 所示。表 2 中 L 为相邻两光斑中心距, ΔL 为相邻两光斑在中心线上重叠的距离, η 为搭接率。若光斑直径为 D ,则搭接率可以表示为

$$\eta = \frac{\Delta L}{D} \quad (4)$$

表 2 多点搭接冲击时的参数

Table 2 Parameters of overlapping LSP

Number	L /mm	ΔL /mm	η /%
(a)	4.0	/	/
(b)	3.5	/	/
(c)	3.0	0	0
(d)	2.0	1.0	33
(e)	1.5	1.5	50
(f)	1.0	2.0	66

激光冲击后用 VHX-900 型超景深显微镜观察试样的表面形貌,表面残余应力是采用 X 射线衍射方法测定的。X 射线由 Cr Ka 靶发出,衍射管的直径约为 1 mm,测量时,X 射线衍射管的电压和电流分别为 20 kV 和 5.0 mA,Cr Ka 特征辐射,衍射晶面(211), 2θ 角扫描步距为 0.10°,计数时间为 0.5 s,扫描的起始角和终止角分别为 130°和 142°。每个点的残余应力测量 3 次,取平均值作为结果。考虑到残余应力分布的对称性,只需测量试样中心线左侧的表面残余应力。

5 结果与讨论

5.1 激光冲击表面形貌

在不同的中心距下,如表 2 中所示,激光辐照后吸收层表面形貌如图 3 所示。由图 3 可以看出,激光辐照后,吸收层的表面留下了被激光烧蚀的痕迹。当相邻光斑的中心距离为 3.5 mm,大于两光斑的半径之和时,由图 3(b)中可以发现,两个烧蚀斑连在一起,说明吸收层受高温等离子体作用区域大于光斑直径,这主要是由于激光脉冲诱导的高压等离子体会发生横向膨胀作用的结果,采用水作为约束层存在一定非均匀性,使激光束波面产生畸变,增大了光斑面积^[16]。当相邻光斑的搭接率为 33%,烧蚀斑的形状还可以辨认。当搭接率为 66%,烧蚀斑连接成一个整体了。

去除试样表面残留的黑色胶带吸收层后,试样表面形貌如图 4 所示。由图 4 可以看出,试样表面没有烧蚀痕迹,而且在激光冲击波的作用下,表面产生了塑性变形的凹坑。强激光几乎可以融化或气化所有的金属材料,但在实验中,由于采用了黑色的胶带作为烧蚀层,屏蔽了激光对金属材料表面的直接辐照,在辐照的过程

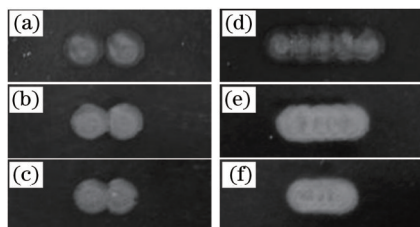


图 3 激光冲击后吸收层形貌

Fig.3 Morphologies of ablative layers after LSP

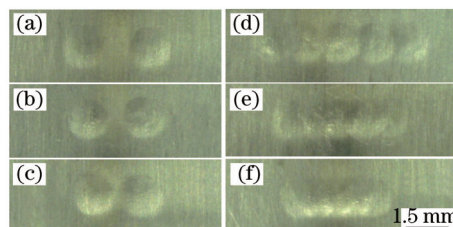


图 4 去除残留吸收层后试样表面形貌(放大 5 倍)

Fig.4 Morphologies of specimen surfaces after removing ablative layer (magnified by 5 times)

中,流动的约束层水带走了大量的热,同时由于辐照的时间很短(纳秒量级),生成的热也难以传递给金属材料,因此工件的表面没有被热损伤。如前面所述,施加冲击波的峰值压力高达2 GPa,远高于材料的动态屈服极限,所以在工件的表面留下塑性变形的凹坑。从图4还可以发现,相比于未冲击的表面,冲击坑表面机械划痕减少。当搭接率为33%时,每个光斑留下的圆形凹坑清晰可见,冲击后的表面有波度;当搭接率为66%时,每一次冲击的凹坑被下一次的凹坑覆盖的区域增大,造成圆形凹坑的形貌不明显,表面的波度减小。

5.2 中心距对残余应力场的影响

图5为相邻光斑中心距对激光冲击诱导的残余应力场的影响。激光冲击后,在其冲击区域的表面分布着残余压应力,同时表层也分布着一层残余压应力。在两个光斑之间区域的应力状态随着中心距离的不同而不同。当光斑中心距 $L=4$ mm时,相邻光斑之间的区域存在着残余拉应力;在两光斑中心线上 $X=6$ mm处产生残余拉应力,最大达到17.1 MPa;当中心距 $L=3.5$ mm时,此处最大残余拉应力达到了44.6 MPa。当中心距 $L=3$ mm,即两光斑相邻时,冲击区域连成一片,在两光斑相切区域的表面分布着幅值较小的压应力。在激光冲击波加载时,受到冲击区域的材料将会发生塑性变形和弹性变形,卸载后,表面的塑性变形形成了冲击坑,如图4所示。同时塑性变形层阻挡了发生弹性变形层的材料恢复到原来的位置,因此产生了残余压应力。而冲击区域周围的材料由于受到冲击区的挤压也发生了变形,呈现出拉应力状态,这种存在于冲击坑外围的拉应力在早期的文献中有所报道^[7]。零件表面的压应力有助于减少外部循环拉应力的幅值,延长零件的疲劳寿命。而拉应力的存在,对工件的疲劳寿命存在着不利的影响,因此对工件表面进行大面积的激光冲击处理时,需要采用搭接技术,使相邻光斑的中心距离要小于光斑的直径,这样才能在工件表面获得连续分布的残余压应力,从而有利于提高工件的疲劳性能。

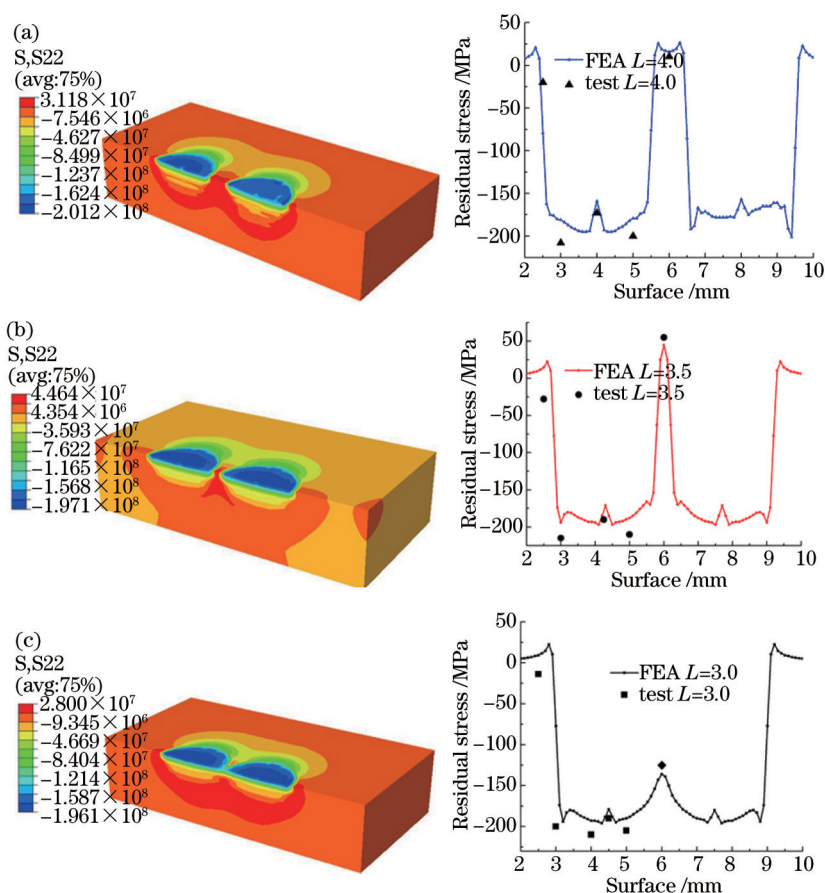


图5 中心距对两光斑诱导残余应力场的影响。(a) $L=4.0$ mm; (b) $L=3.5$ mm; (c) $L=3$ mm

Fig.5 Effect of laser spot center distance on residual stress field. (a) $L=4.0$ mm; (b) $L=3.5$ mm; (c) $L=3$ mm

5.3 搭接率影响

为了研究光斑搭接率对诱导的残余应力场的影响,研究了3种典型的搭接率,如图6所示。从图6中可

以看出,不同的搭接率预示着区域的不同冲击次数,如搭接率为33%时,受到了两次激光冲击的区域较少。搭接率为50%时,受两次冲击的区域加大。当搭接率为66%时,不仅有的区域受到了两次冲击,有的区域还受到了3次激光冲击。

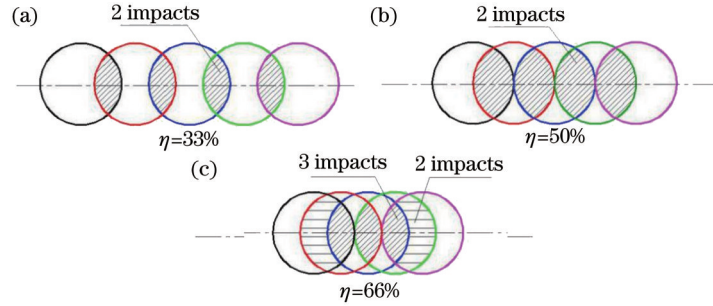


图6 各种搭接率示意图。(a) $\eta=33\%$; (b) $\eta=50\%$; (c) $\eta=66\%$

Fig.6 Schematic of overlapping rate. (a) $\eta=33\%$; (b) $\eta=50\%$; (c) $\eta=66\%$

图7表示搭接率为50%情况下多点激光冲击模拟的结果云图,图7(a)为Mises应力分布图,图7(b)为表面变形云图。在多点搭接冲击路径的首尾两端,Mises应力和塑性变形的冲击坑的深度较小。这是因为在搭接率为50%情况下,两端区域仅受到了一次激光冲击,而搭接的区域受到了两次冲击,是每次冲击形成残余应力和塑性变形的叠加,因此中间区域的Mises应力和变形量较大。

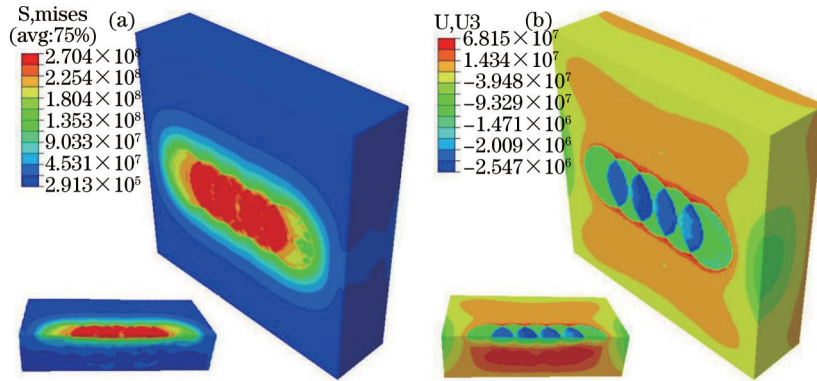


图7 搭接率为50%的激光冲击结果。(a) Mises应力;(b) 表面变形云图

Fig.7 Results of LSP with overlapping rate 50%. (a) Mises stress contour; (b) surface deformation contour

图8表示不同搭接率下激光冲击处理后材料表面残余应力的分布,图8(b)是图8(a)局部区域M的放大图。从图8可以看出数值模拟数据与实验数据得到了很好的吻合。在激光冲击波的峰值压力为2 GPa时,冲击波从左至右的顺次加载,冲击区域($X=4\sim 8$ mm)内的残余应力的起伏值呈现着不同的变化,在搭接率为33%时,残余压应力最大差值达到了110 MPa,50%时最大差值为68 MPa,66%时最大差值仅为24 MPa,因此,随着搭接率增大,表面的残余压应力分布越均匀。而且随着搭接率由33%增加到50%和66%,激光冲击强化区域中心位置($X=6$ mm)的残余压应力由158 MPa,增加到185 MPa,237.3 MPa,分别增加了17.1%和

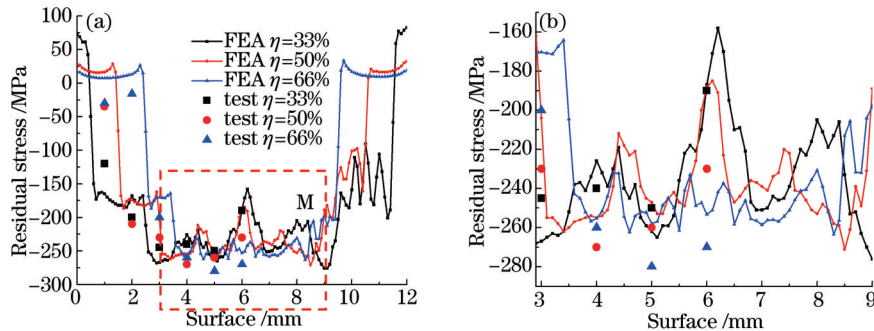


图8 搭接率对表面残余应力影响。(a) 不同搭接率下表面残余应力分布;(b) M区域放大图

Fig.8 Effect of overlapping rate on residual stress. (a) Surface residual stress under different overlapping rates; (b) magnification of M region

50.2%。因此增大搭接率能够提高工件表面残余压应力的幅值。

图9表示不同搭接率下表面塑性变形情况。在激光冲击下,工件的表面产生微米量级的冲击微坑,这与文献[18-19]报道的研究结果一致。搭接率的不同,表面微变形的深度也不一样。由图9可知,当搭接率为33%时,有部分区域受到两次冲击,且这些区域是不连续的。受两次冲击后的表面的塑性变形量加大,对应于表面塑性变形形貌曲线出现连续“几”字形分布;当搭接率为50%时,在冲击的路径上出现了连续的两次冲击区域,表面的变形较为均匀;当搭接率增大到66%时,由于不同区域受到的冲击次数不同,导致此时的表面的变形形貌呈现出3级台阶状。由此可分析出,不同的搭接率引起冲击面的塑性变形形貌不同。

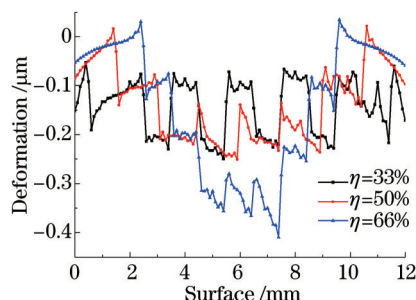


图9 搭接率对表面变形的影响

Fig.9 Effect of overlapping rate on deformation

5.4 冲击顺序影响

在实际工程应用中,大面积激光冲击处理的加载顺序有多种方案,不同的加载顺序对残余应力场有着不同的影响。采用两种搭接加载方式,研究不同加载方式对残余应力场的作用。如图10所示,在搭接率为50%下,采用两种不同的加载顺序对工件材料加载。

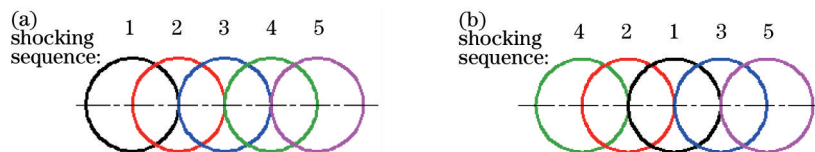


图10 多点激光冲击加载顺序。(a) 从左至右;(b) 从中间向两侧

Fig.10 Shocking sequence of overlapping LSP. (a) From left to right; (b) mid-left-right

工件表面大面积的激光冲击强化是通过脉冲激光单点多次冲击逐渐形成的,诱导的残余应力场也是逐渐产生的。图11显示了激光冲击后表面残余应力随着光斑的加载逐步产生的过程,shot 1,2,3,4,5为光斑作用位置。由图11可以看出,每一次冲击波加载都在工件表面诱导了新的残余应力,相比于未搭接的激光冲击,搭接冲击区域的残余压应力值有明显增大,如前所述,这是搭接区的冲击次数最多的缘故。在第5次加载后,表面残余压应力在个别点出现了幅值减小,这主要是由于在激光冲击处理时采用了圆形光斑,激光诱导的表面波在中心会聚形成残余应力洞的缘故^[8]。

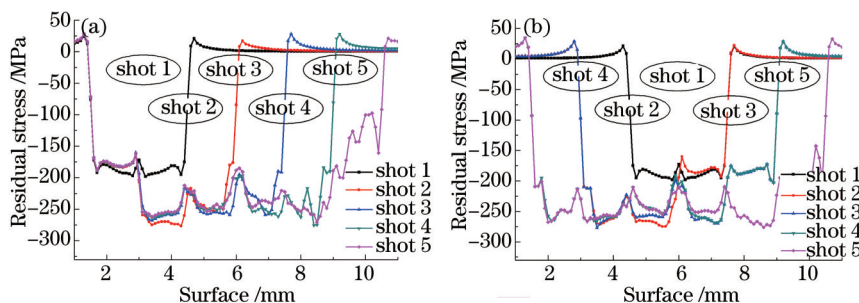


图11 多点激光冲击表面残余应力产生过程。(a) 从左至右;(b) 从中间向两侧

Fig.11 Change in residual stress profile of overlapping LSP. (a) From left to right; (b) mid-left-right

从图11可以看出,在X=6 mm处,加载方式一(从左至右)产生的残余压应力值为188 MPa,而方式二(从中间向两侧)为210.2 MP,方式二能够获得更大的残余压应力。在X=4~8 mm区域内,方式一诱导的残余压应力

的起伏度为 70.3 MPa, 方式二的起伏度为 50.5 MPa, 方式二加载获得的残余压应力更均匀, 但是在冲击过程中, 采用方式二对工件表面加载时存在空行程, 会使处理时间变长, 影响加工效率。

6 结 论

1) 激光冲击能够在工件的表层诱导残余压应力; 多点冲击时, 当相邻光斑的中心距大于光斑直径时, 光斑之间的区域存在着残余拉应力; 当光斑相切时, 两光斑相切区域存在残余压应力。

2) 光斑搭接率影响着工件表面的残余应力场分布, 随着搭接率的增加, 冲击区残余压应力的幅值随之增加, 其本质是搭接区受到冲击次数的增加, 是多次冲击形成的残余压应力累加的结果。表面塑性变形的深度随着搭接率的增加而增大。

3) 不同的加载顺序影响着工件表面的残余应力分布, 从中间到两侧的加载方式能获得较大、较均匀的残余压应力, 但会影响加工效率。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xingquan, Li Huan, Yu Xiaoliu, *et al.*. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate[J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 425-431.
- 2 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yalin, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 04030021.
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 04030021.
- 3 B P Fairand, B A Wilcox, W J Gallagher, *et al.*. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(9): 3893-3895.
- 4 M Achintha, D Nowell. Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 1091-1101.
- 5 W Braisted, R Brockman. Finite element simulation of laser shock peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(7): 719-724.
- 6 K Ding, L Ye. FEM simulation of two sided laser shock peening of thin sections of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Surface Engineering*, 2003, 19(2): 127-133.
- 7 Zhang Yongkang, Zhou Lichun, Ren Xudon, *et al.*. Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2009, 30(1): 10-13.
张永康, 周立春, 任旭东, 等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(1): 10-13.
- 8 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei, *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2073-2079.
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.
- 9 Nie Xiangfan, He Weifeng, Zang Shunlai, *et al.*. Experimental study on improving high-cycle fatigue performance of TC11 titanium alloy by laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0803006.
聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光喷丸提高 TC11 钛合金高周疲劳性能的试验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803006.
- 10 Lu Ying, Zhao Jibin, Qiao Hongchao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAl alloy by laser shock peening [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003013.
陆莹, 赵吉宾, 乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003013.
- 11 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, *et al.*. Characteristics of deformation of plate by laser peening under the elastic pre-loading condition[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(7): 1095-1100.
张兴权, 张永康, 周建忠, 等. 弹性预加载下板料激光喷丸成形特性[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1095-1100.
- 12 P Peyre, A Sollier, I Chaieb, *et al.*. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2003, 23(2): 83-88.
- 13 G R Johnson, W H Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. 7 th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.
- 14 R Fabbro, J Fournier, P Ballard, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- 15 P Peyre, L Berthe, X Scherpereel, *et al.*. Laser-shock processing of aluminium-coated 55C1 steel in water-confinement regime,

- characterization and application to high-cycle fatigue behaviour[J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33(6): 1421-1429.
- 16 Zhang Lingfeng, Ren Fengzhang, Zhou Heyu, *et al.*. Experimental study on actual role area of plasma in laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1224-1228.
- 张凌峰, 任凤章, 周合玉, 等. 激光冲击过程中等离子体实际作用面积实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1224-1228.
- 17 W W Zhang, Y L Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2): 369-378.
- 18 F Z Dai, J Z Lu, Y K Zhang, *et al.*. Surface integrity of micro-dent arrays fabricated by a novel laser shock processing on the surface of ANSI 304 stainless steel [J]. *Vacuum*, 2014, 106: 69-74.
- 19 Liu Yuanxun, Wang Xi, Wu Xianqian, *et al.*. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103004.
- 柳沅汛, 王 曦, 吴先前, 等. 激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及其机理分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103004.

栏目编辑: 宋梅梅