

TC4 钛合金激光冲击强化塑性变形流动规律研究

廖新隆, 苏波泳*, 徐硕, 花国然, 王恒, 曹宇鹏

南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

摘要 以 TC4 钛合金为研究对象, 采用数值模拟与试验相结合的方式, 研究了激光冲击 TC4 钛合金表面金属塑性变形和体积流动规律, 分析了塑性变形驱动金属表层体积流动、应力重构、晶粒细化的机制。研究表明: 激光冲击塑性变形使得光斑中心区域材料向着边缘及材料内部流动。整体塑性变形体积数值计算结果显示: 当功率密度为 1.58、2.25、3.02 GW/cm² 时, 表面凹坑体积大致等于内部正向变形体积与表面环状凸起体积之和, 在无相变体积改变的情况下, 试件整体塑性变形符合体积不变定律; 不同激光功率密度作用下的表面残余应力分布与表面塑性变形分布规律大致相同, 存在对应关系; 表面凹坑变形、环状凸起变形、内部凸起变形各区域粒径尺寸分别为 99、108、136 nm, 晶粒细化程度在表面凹坑区、环状凸起变形区域、内部正向变形区域依次递减。此外, 光斑边缘出现的微凸起变形在受到搭接激光冲击作用后, 再次发生塑性变形, 微凸起变形在冲击载荷方向被压回, 向着材料内部流动; 凹坑表面各光斑边缘处依旧存在较小的微凸起变形。

关键词 激光技术; TC4 钛合金; 激光冲击波; 塑性流动; 残余应力; 晶粒细化

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221368

1 引言

激光冲击强化(LSP)作为一种先进的表面改性技术,其主要是利用激光诱导的冲击波作为直接力源,在金属材料表面产生塑性变形,从而调控材料表面质量,改善材料表面性能^[1-2]。相比其他表面改性技术,激光冲击具有加载压力高、塑性变形影响程度深、冲击区域和加载压力可控性好、易于自动化等优点^[3-8],在航空航天、汽车制造、海洋工程等领域中具有广阔的应用前景^[9-10]。

塑性变形是激光冲击强化重构表面应力、改善表面形貌、硬化表层材料的基础,其与激光冲击波压力衰减、材料动态屈服强度和塑性应变率、材料内部位错及微裂纹等直接相关,是一种非常复杂的非线性动力学过程。针对激光冲击强化的塑性变形过程,国内外学者开展了广泛的研究。Hu等^[11]利用LS-DYNA软件模拟了单次和多次激光冲击过程,结果表明:塑性变形与残余应力分布有良好的相关性,且随着激光冲击次数的增加,残余压应力和塑性影响深度会大幅增加,并逐渐达到饱和状态。Sealy等^[12]利用ABAQUS软件模拟了Ti-6Al-4V微尺度的激光冲击喷丸微凹坑,轮廓和深度的数值模拟结果与实测结果一致。周文等^[13]研究了不同激光冲击次数下GH3039高温合金的表面完

整性,结果表明:一次激光冲击后,表面出现凹坑和凸起;随着冲击次数的增加,凹坑深度加大,表面起伏程度加剧。黄志辉等^[14]研究了不同激光冲击能量下Al7075材料表面的微凹坑分布,结果表明:随着能量的增加,微凹坑深度先增大后减小,直径没有明显的变化。柳沅汛等^[15]以304奥氏体不锈钢为研究对象,分析了激光冲击区、过渡区、未冲击区的微观形貌特征,结果表明:LSP处理后材料表面形貌与塑性变形之间存在一定的对应关系。Lu等^[16]探讨了金属材料在激光冲击压力波和局部反向变形作用下的塑性流动行为,并在材料表面观察到了许多形状不规则、分布随机的起伏特征。杨丰槐等^[17]阐明了激光冲击作用下的材料塑性变形规律,分析了塑性变形与弯曲成形后应力梯度分布的关系。Zhou等^[18]研究了激光冲击强化超高速率塑性变形中的位错特征,结果表明:位错运动速度随温度的降低而增大,位错主导的塑性变形对加载方向敏感。上述研究对阐明激光冲击塑性变形过程非常有益,但由于激光冲击塑性变形强化与多种异质模式有关^[19-22],很难在临界压力下进行明确的试验演化研究,目前的研究主要集中在材料表面的塑性变形规律和微观缺陷分布方面,未深入分析材料内部的激光冲击塑性变形过程和体积流动趋势及塑性变形对形貌轮廓、表面应力、微观特征演变的影响机制。

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2022-12-14; 录用日期: 2023-02-21; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005305)、江苏省教育厅面上项目(20KJB460010)、江苏省研究生科研创新计划(KY-CX21_3081)

通信作者: *sby1872@163.com

本文利用数值模拟与试验相结合的方式,研究了 TC4 钛合金在激光冲击波作用下的塑性流动规律,通过试验验证了数值模型的可靠性,基于数值模型计算了不同激光冲击参数下材料内部体积的流动情况;在此基础上,分析了塑性变形驱动材料体积流动、应力重构、晶粒细化的机制。

2 试验设计和数值模拟仿真

2.1 试验设计

试验材料选用 TC4 钛合金,利用线切割将其加工为 30 mm×30 mm×5 mm 的试样,随后利用砂纸打磨并抛光,用乙醇进行超声波清洗并风干。激光冲击设备选用 Nd:YAG 型激光器,光斑直径为 2.5 mm。使用厚度为 180 μm 的黑胶带作为吸收层,采用厚度为 1 mm 的流水层作为约束层。单光斑 LSP 示意图如图 1 所示,具体激光参数如表 1 所示。采用 X 射线残余应力测定仪测试试样激光冲击处理区域的表面残余应力,测试过程采用侧倾定 Ψ 法,定峰方法为交相关法,X 射线管电压为 22 kV,管电流为 6 mA,选取钴靶 Kα 特征辐射,准直管直径为 2 mm,阶梯扫描步进角为

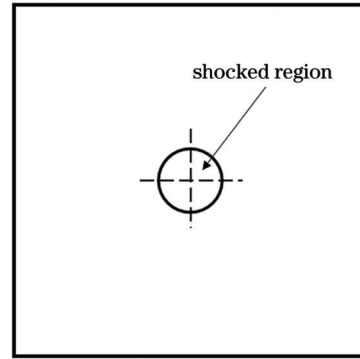


图 1 LSP 处理示意图

Fig. 1 Schematic of LSP treatment

0.05°,时间常数为 1 s,侧倾角分别取 0°、25°、35°和 45°,应力常数为 -180 MPa/(°),扫描起始角和终止角分别为 137°和 144°,衍射角扫描步距为 0.1°,衍射晶面为 (211)。同时使用非接触光学轮廓仪测量冲击后 TC4 钛合金的表面三维形貌。采用场发射式高分辨透射电子显微镜观察激光冲击处理前后表层不同深度的微观组织,并利用 Measure nano 软件进行粒径测量和分布统计处理。

表 1 激光冲击强化参数

Table 1 LSP parameters

Parameter	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
Laser power density / (GW/cm ²)	1.58	2.25	3.02	4.92	6.43
Pulse duration / ns	16	16	16	16	16
Spot diameter / mm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Number of shocks	1	1	1	1	1

2.2 激光冲击数值分析模型

采用 ABAQUS 有限元分析软件模拟 TC4 钛合金激光冲击过程,模型尺寸为 30 mm×30 mm×5 mm,光斑直径为 2.5 mm。为了提高仿真试验的效率,取原模型的 1/4 进行建模并且在其中两个剖面添加对称约束,如图 2 所示,在激光冲击强化作用区域以及周边采用 0.08 mm×0.08 mm×0.08 mm 的网格尺寸,在其他区域采用 0.15 mm×0.15 mm×0.08 mm 的网格尺寸,采用 C3D8R 网格类型对模型进行网格划分,

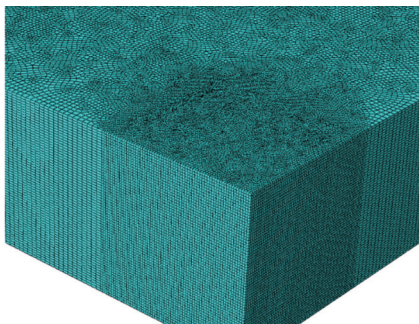


图 2 网格划分后的三维有限元模型

Fig. 2 Three dimensional finite element model after mesh division

划分数量为 1237700 个,分析过程中在模型底部设置全约束。

在激光冲击强化过程中,材料表层的应变速率能达到 10⁶ s⁻¹ 以上,选择 Johnson-Cook 本构模型^[23]。它是一种适用于钛合金激光冲击强化的经验型本构关系,能反映应变硬化、应变率硬化和温度软化。其表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (1)$$

式中:σ 为等效屈服应力;ε 为等效塑性应变;ε* 为无量纲的塑性应变率;A 为初始屈服应力;B 为应变硬化模量;n 为硬化指数;C 为应变率强化参数。材料具体参数如表 2 所示。

在计算激光喷丸冲击波压力时,按照 Fabbro 的模型公式^[24]进行计算。峰值压力与激光功率的关系式为

$$\sigma_m = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot \sqrt{ZI_0}, \quad (2)$$

式中:σ_m 为冲击波峰值压力;I₀ 为激光功率密度;α 为内能转化为热能的系数,通常 α = 0.2~0.5;Z 为折合声阻抗,其值由靶材和水约束层之间的冲击波声阻抗共同决定,计算公式为

表 2 TC4 钛合金的基本材料参数

Table 2 Basic material parameters of TC4 titanium alloy

Parameter	Density / (kg·m ⁻³)	Poisson ratio	Modulus of elasticity /GPa	A /MPa	B /MPa	n	C
Value	4500	0.342	1.10	950.228	603.3825	0.1992	0.0198

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

式中： Z_1 和 Z_2 分别为材料和约束层的阻抗，其中， $Z_1 = 2.74 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ， $Z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。压力加载时间为脉宽的 2~3 倍，得到的冲击波压力随时间的变化曲线呈高斯分布，激光功率密度为 1.58、2.25、3.02 GW/cm² 时对应的压力加载时程曲线如图 3 所示。

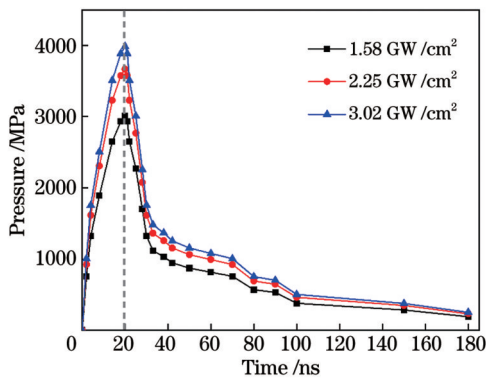


图 3 激光冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Pressure-time history curves of laser shock wave

2.3 体积计算方法

由于传统的测量工具无法对材料内部的变形情况进行测量，因此采用数值模拟方法对仿真模型中激光冲击强化后的内部变形情况进行提取，在模型冲击载荷方向每隔 0.3 mm 提取冲击中心线上的变形分布，得到不同深度处的变形分布图，利用 Matlab 软件对内部变形分布曲线进行拟合，并编程计算表面微凹坑的大致体积。旋转体积公式为

$$V = 2\pi \int_a^b x f(x) dx, \quad (4)$$

式中： V 为变形体积； x 为拟合曲线中光斑中心的横坐标； $f(x)$ 为表面塑性变形曲线拟合的函数方程； a 为拟合起点横坐标； b 为拟合终点横坐标。图 4 为中心线方

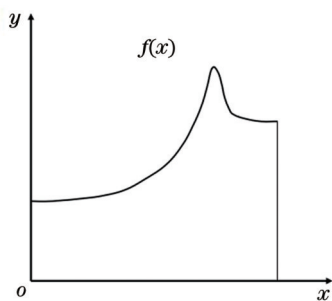


图 4 中心线上提取的变形示意图

Fig. 4 Deformation diagram extracted on center line

向上提取的变形示意图，图 5 为表面塑性变形体积计算的流程图。

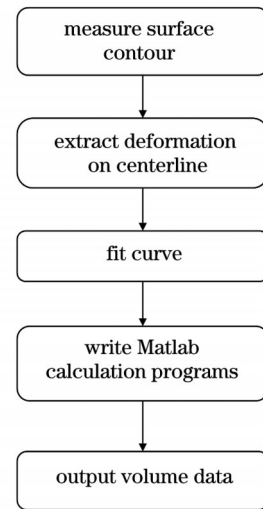


图 5 体积计算流程图

Fig. 5 Volume calculation flowchart

3 结果分析与讨论

3.1 数值分析模型验证

图 6(a) 为激光功率密度为 3.02 GW/cm²、脉宽为 16 ns 时变形的数值仿真结果云图，可以看出：在冲击中心区域有微凹坑产生，其最大深度为 6.095 μm；并且在距冲击中心区域 1.5 mm 处出现环状凸起变形，其最大高度为 1.647 μm。这主要是由于光斑中心在受到冲击载荷的作用后，激光冲击的边缘遭受剪切力作用，部分材料产生塑性流动，体积转移至光斑周围时受到材料固有体积的约束，进而形成环状凸起变形带^[25]。图 6(b) 和图 6(c) 分别为激光功率密度为 3.02 GW/cm² 时的变形截面云图和表面变形具体分布，可以看出：冲击中心区域的凹坑深度差别不大，凸起变形区位于光斑边缘外 0~0.5 mm 范围内，并且在距光斑冲击边缘 0.25 mm 处达到凸起高度最大值，为 1.647 μm，凸起变形的范围与光斑直径的比率为 0.45。此外，截面云图表明：除表面凹坑以及环状凸起之外，还有存在于材料内部的塑性变形，在冲击波完全作用之后，冲击中心区域产生凹坑变形的材料会向周围转移，一部分垂直于冲击载荷方向在光斑边缘处形成正向环状凸起，另一部分沿冲击载荷方向挤压至材料内部，形成内部凸起变形。

图 7 为激光功率密度为 3.02 GW/cm² 时的残余应力仿真结果，可以看出：表面凹坑及环状凸起区域均出

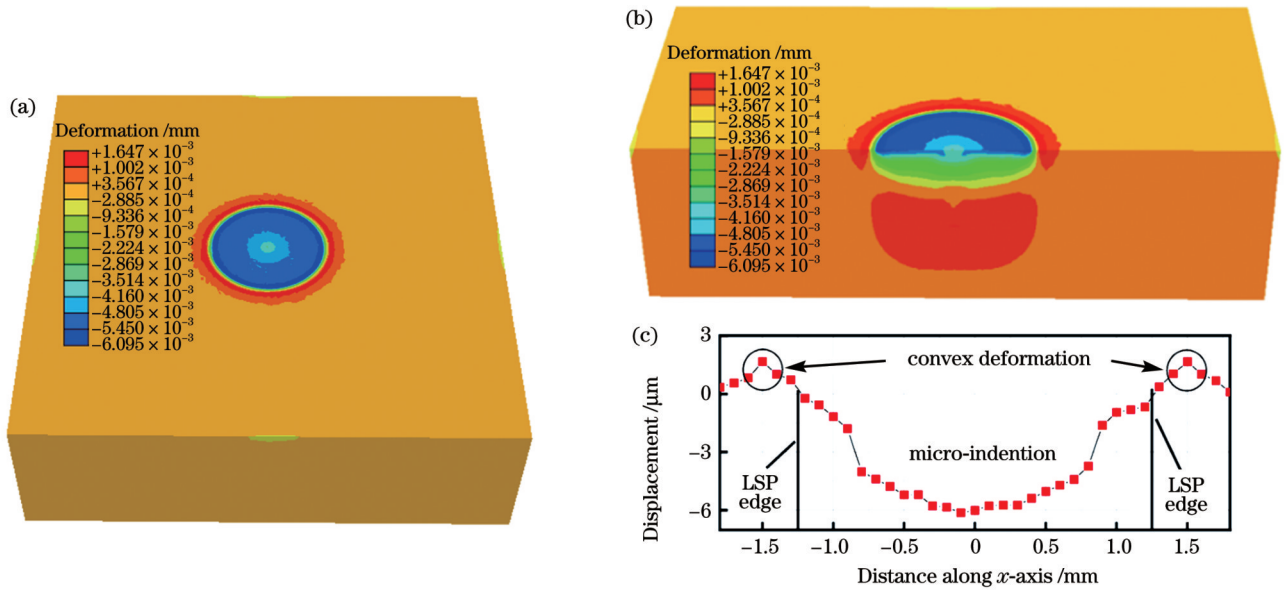


图 6 激光功率密度为 3.02 GW/cm^2 时变形的仿真结果。(a) 变形云图; (b) 变形截面云图; (c) 表面变形具体分布

Fig. 6 Simulation result of deformation when laser power density is 3.02 GW/cm^2 . (a) Cloud diagram of deformation; (b) cloud diagram of deformation section; (c) detailed surface deformation distribution

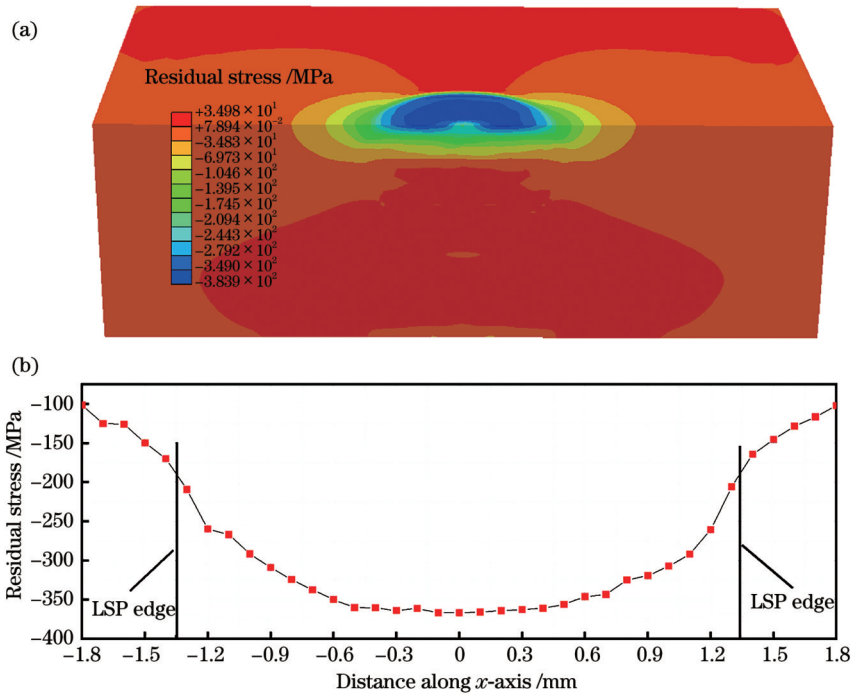


图 7 激光功率密度为 3.02 GW/cm^2 时表面残余应力的仿真结果。(a) 残余应力云图; (b) 残余应力具体分布

Fig. 7 Simulation results of surface residual stress when laser power density is 3.02 GW/cm^2 . (a) Cloud diagram of residual stress; (b) detailed distribution of residual stress

现了残余压应力, 表面凹坑区域的残余压应力约为 370 MPa , 环状凸起区域的残余压应力约为 130 MPa , 而在环状凸起变形外围及内部凸起变形区域则产生了约为 30 MPa 的残余拉应力, 且残余压应力值与凹坑深度及凸起变形高度成正比, 这表明材料的塑性流动在冲击区域以及周边诱导产生了残余应力, 并且表面凹坑和环状凸起的变形分布规律与残余应力分布规律大致相同, 二者具有一定的对应关系。

图 8(a) 为不同激光功率密度作用下表面凹坑深度以及环状凸起高度的分布规律, 可以看出: 表面凹坑深度以及环状凸起高度都随着功率密度的增加而增加, 当功率密度从 1.58 GW/cm^2 增加至 6.43 GW/cm^2 时, 凹坑深度从 $1.8 \mu\text{m}$ 增加到 $11.2 \mu\text{m}$, 凸起高度从 $0.5 \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $4.8 \mu\text{m}$ 。图 8(b) 为不同激光功率密度作用下表面残余应力的分布规律, 可以看出: 当功率密度从 1.58 GW/cm^2 增加至 6.43 GW/cm^2 时, 凹坑

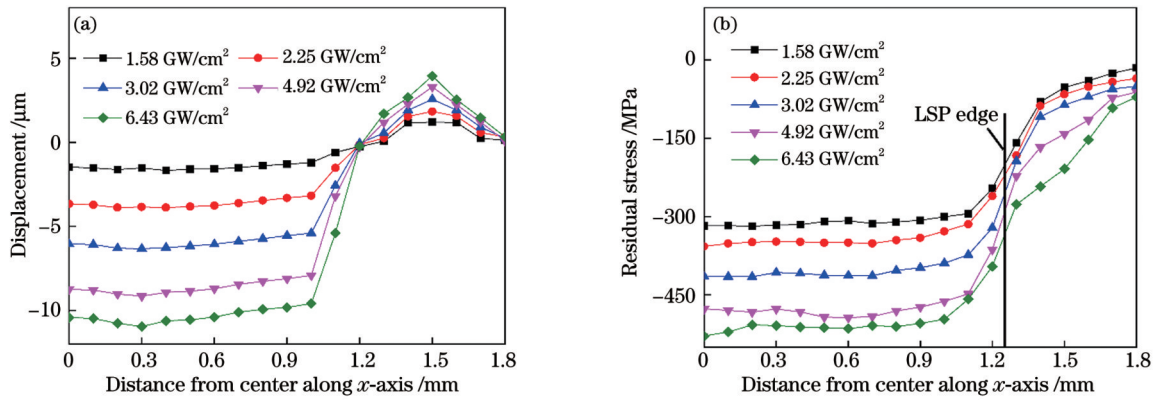


图 8 不同激光功率密度下表面变形和表面残余应力的分布。(a)表面变形分布;(b)表面残余应力分布

Fig. 8 Distributions of surface deformation and surface residual stress under different laser power densities. (a) Surface deformation distribution; (b) surface residual stress distribution

区域的残余压应力由 318 MPa 增加到 525 MPa, 凸起变形区域的残余压应力由 122 MPa 增加到 248 MPa。对比图 8(a)和图 8(b)可知,残余应力及变形高度的增加幅度逐渐变小。这可能是由于较大激光功率密度激光冲击产生的幅值压力超过了材料屈服极限的饱和值,此时材料的塑性变形达到饱和^[26]。此外,当激光功率密度过大(高于 6.43 GW/cm²)时,隔水层能量退化^[27],退化水层中产生的等离子体阻挡激光进入材料表面,微凹坑深度和凸起变形高度在非常大的激光功率密度下不再增长。同时,随着功率密度的增加,受激

光冲击影响的变形范围并没有明显变化,始终保持在距光斑边缘 0.5 mm 的范围内,且不同激光功率密度作用下的表面残余应力分布与表面塑性变形分布同样存在着对应关系,分布范围较为一致,变化规律趋同。

图 9 为激光功率密度为 3.02 GW/cm² 时的试验结果。图 9(a)为激光功率密度为 3.02 GW/cm² 时的试样表面,可以看出,在激光冲击强化处理之后有明显的微凹坑形成。图 9(b)为光学形貌仪采集到的单光斑表面凹坑形貌,图 9(c)为光斑中心线上表面变形的具体分布,可以看出:在光斑冲击中心区域产生了深度为

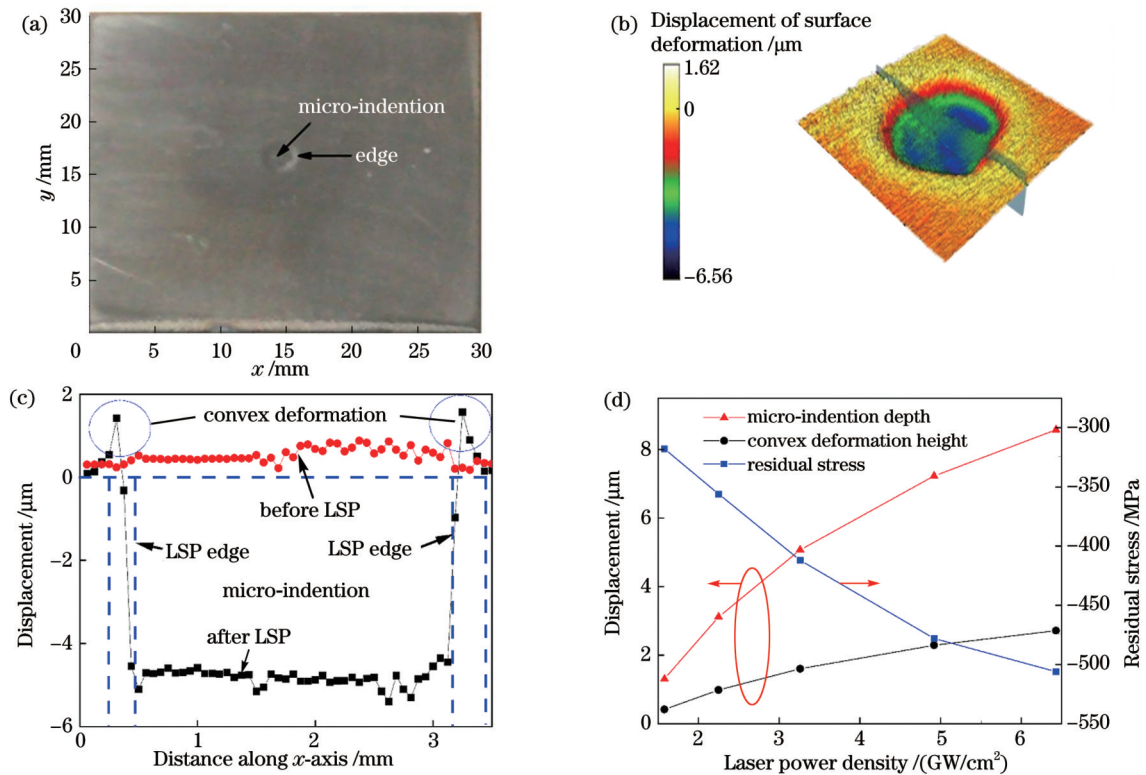


图 9 激光冲击试验结果。(a)试样表面凹坑;(b)表面凹坑形貌;(c)详细的表面轮廓;(d)凹坑深度、凸起变形高度和残余应力随激光功率密度的变化

Fig. 9 Laser shock test results. (a) Micro-indentation on specimen surface; (b) topography of surface micro-indentation; (c) detailed surface profiles; (d) micro-indentation depth, convex deformation height, and residual stress versus laser power density

6.56 μm 的凹坑变形,在距光斑冲击边缘 0~0.2 mm 的范围内产生了最大高度为 1.62 μm 的凸起变形。图 9(d) 为不同功率密度下表面凹坑深度、环状凸起高度以及残余应力的分布情况,可以看出:当激光功率密度为 1.58 GW/cm^2 时,凹坑深度为 1.1 μm ,凸起高度为 0.5 μm ;当激光功率密度为 3.02 GW/cm^2 时,凹坑深度为 4.9 μm ,凸起高度约为 1.3 μm ;当激光功率密度为 6.43 GW/cm^2 时,凹坑深度为 8.1 μm ,凸起高度为 2.3 μm 。

由以上结果可知:3.02 GW/cm^2 功率密度下残余应力和表面变形分布与数值仿真结果基本一致。图 10 为表面凹坑深度随功率密度变化的仿真和试验结果,可以看出:仿真实验值与试验值的变化趋势一致,且两者数值接近,误差约为 25%。这表明 LSP 数值仿真的加载参数、本构模型以及有限元分析模型是合理的,可以用来进一步分析激光冲击后材料内部的塑性流动过程。

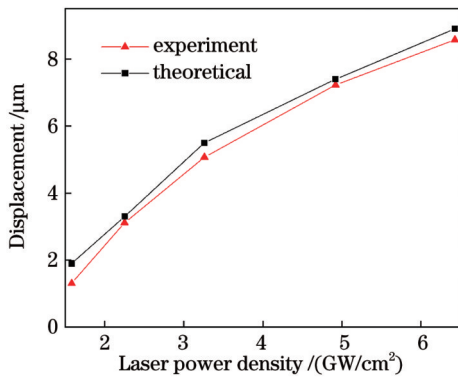


图 10 不同功率密度下的表面凹坑深度

Fig. 10 Surface micro-indentation depth versus laser power density

3.2 激光冲击强化塑性流动分布规律

由数值仿真和试验结果可知:表面凹坑的深度远

大于表面凸起的高度,表面凹坑体积大于表面环状凸起体积。根据式(4)对试验中 3.02 GW/cm^2 功率密度下的变形体积进行计算,表面凹坑体积约为 $2.65 \times 10^{-3} \text{mm}^3$,环状凸起体积约为 $6.10 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ 。这表明表面凹坑的材料一部分会在冲击边缘剪切力的作用下形成表面环状凸起变形,另一部分在冲击载荷作用下被挤压到材料内部,这与数值仿真结果中材料内部产生的凸起变形现象是一致的。图 11 为激光功率密度为 3.02 GW/cm^2 时不同深度处的仿真变形分布情况,可以看出:随着深度的增加,凹坑变形幅度逐渐减小,当深度大约为 0.8 mm 时,材料内部变形开始由负转正,随后在大约 1.2 mm 深度处,材料的内部正向变形达到最大值 4.562 μm 。

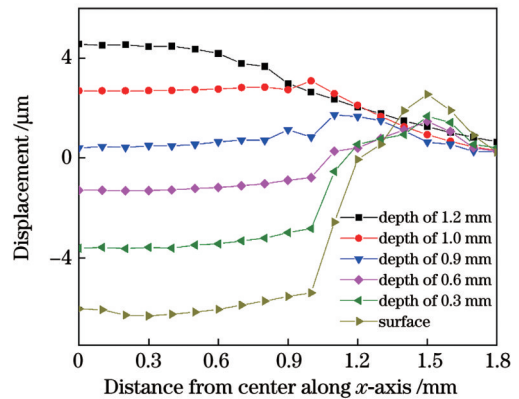


图 11 激光功率密度为 3.02 GW/cm^2 时不同深度处的变形分布
Fig. 11 Detailed deformation distributions at different depths when laser power density is 3.02 GW/cm^2

为详细计算材料塑性流动体积,将整体的变形体积分成三部分:表面凹坑体积、环状凸起体积以及内部凸起体积。利用不同深度处的变形分布曲线叠加计算各部分的体积,图 12 为利用 Matlab 拟合的材料表面变形及材料内部变形曲线,分别采用了 Parabola 以及 Exp2PMod2 拟合模型。

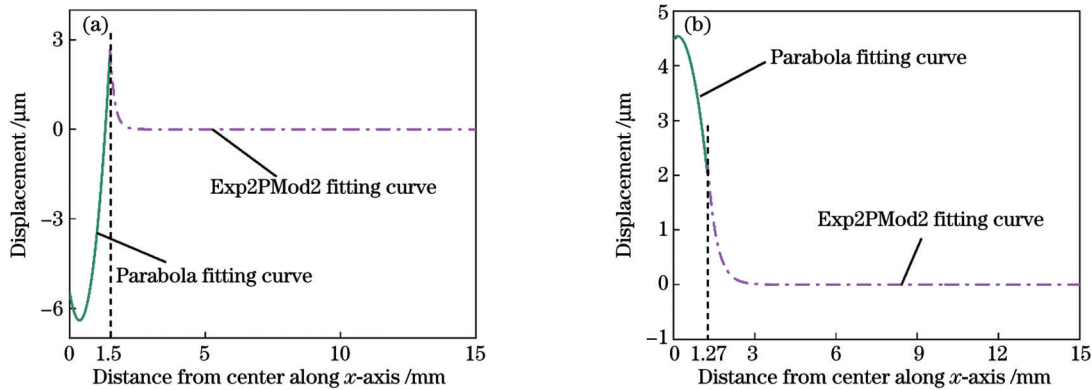


图 12 拟合曲线。(a) 表面凹坑变形;(b) 内部凸起变形

Fig. 12 Fitting curves. (a) Surface micro-indentation deformation; (b) internal convex deformation

根据不同深度处变形分布的曲线拟合方程,利用 Matlab 计算各部分变形体积,得到在 3.02 GW/cm^2 功

率密度下表面凹坑体积约为 $3.24 \times 10^{-3} \text{mm}^3$,环状凸起体积约为 $7.47 \times 10^{-4} \text{mm}^3$,内部凸起体积约为

$2.77 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。图 13 为不同功率密度下塑性变形体积的分布情况。图 13(a) 为各部分体积的变化趋势, 图 13(b) 为各部分体积所占比例, 可以看出: 随着功率密度的增加, 各部分塑性变形体积都会增加, 表面凹坑体积所占比例从 50% 逐步上升到了 57%, 表面环状凸起体积所占比例从 16% 逐步下降到了 11%, 内部凸起体积所占比例随着功率密度的增加呈现先上升后下降的趋势。当激光功率密度较小时, 凹凸体积之差接近于零, 但不等于零, 材料内部因载荷挤压作用而压缩的体积较少, 冲击光斑中心区域产生了残余压应力, 材料向光斑边缘和材料内部流动, 并形成残余拉应力; 随着功率密度的增加, 凹坑体积逐渐大于环状凸起体积与

内部凸起体积之和, 材料受到了较大的激光冲击压力, 材料因载荷挤压作用而压缩明显, 拉应力区体积在总变化体积中的占比持续下降, 但内部拉应力区体积依旧占据较大比例, 这主要是因为内部凸起变形区域位于光斑冲击载荷加载方向上, 塑性流动比光斑边缘更为剧烈。激光冲击强化区域存在残余压应力, 处于残余压应力区的材料体积是减少的, 周边处于残余拉应力区的体积是变大的, 并且一部分体积在塑性变形过程中转移到了材料内部, 在无相变^[28-30]体积改变的情况下, 试件整体符合体积不变定律。

图 14 为 3.02 GW/cm^2 功率密度下冲击前后 TC4 钛合金表层的透射电镜(TEM)图像。图 14(a) 为未经

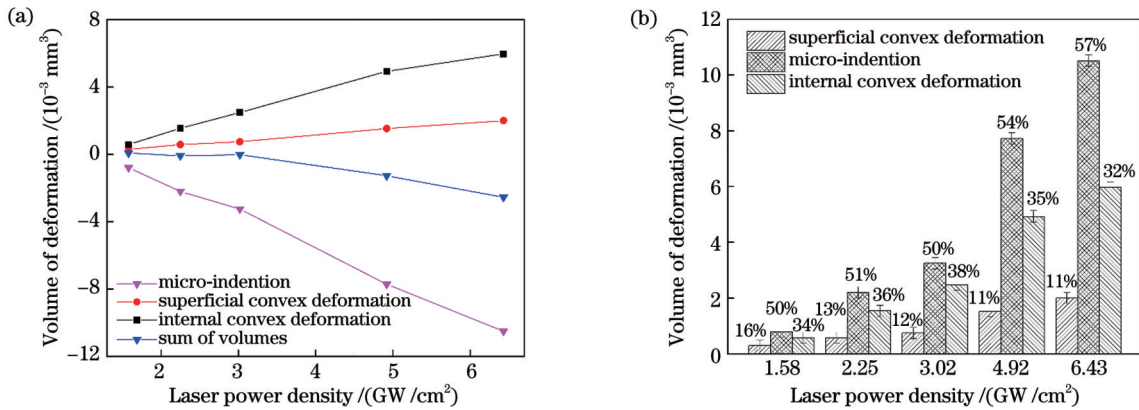


图 13 塑性变形体积的分布。(a) 各部分体积变化趋势; (b) 各部分体积所占比例

Fig. 13 Distributions of plastic deformation volume. (a) Trend in volume of each part; (b) proportion of volume of each part

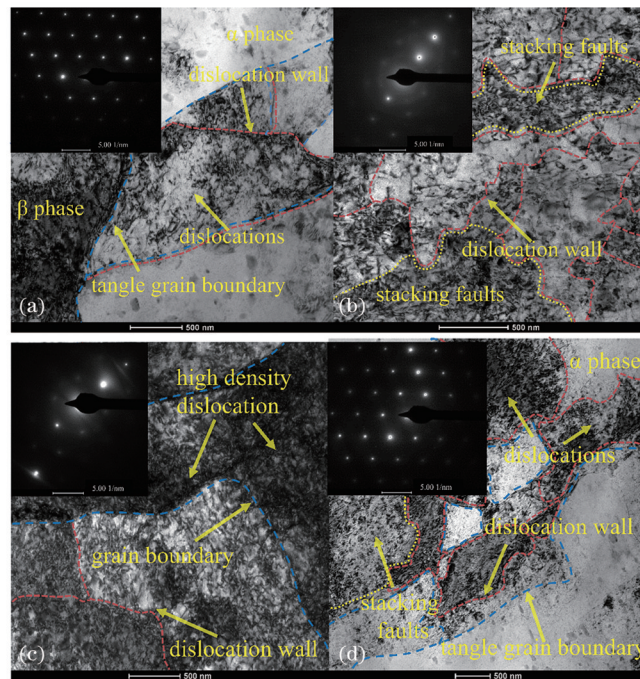


图 14 LSP 前后 TC4 钛合金表层的 TEM 图像。(a) LSP 前表面以下 $10 \mu\text{m}$ 处; LSP 后表面下方 $10 \mu\text{m}$ 处的 (b) 凹坑变形和 (c) 环状凸变形区域; (d) LSP 后表面下方 1 mm 处的内部凸起变形区域

Fig. 14 TEM images of TC4 titanium alloy surface layer before and after LSP. (a) Position at $10 \mu\text{m}$ below surface before LSP; (b) micro-indentation and (c) annular convex deformation areas at $10 \mu\text{m}$ below surface after LSP; (d) internal convex deformation area at 1 mm below surface after LSP

过激光冲击强化的 TC4 钛合金距表层 10 μm 处的 TEM 图,可以看出:未经激光冲击强化的材料内部晶界分明,衍射花样呈对称性排列,此时晶粒为原始粗晶^[31],材料主要由 α 相和 β 相两相组成, α 相中没有出现明显缺陷,在 β 相内能够观察到一定数量的位错。图 14(b)、(c) 为经过激光冲击强化后距表层 10 μm 处凹坑变形区域和凸起变形区域的 TEM 图,可以看出:经过激光冲击强化后,晶粒内部出现大量的位错、位错墙、位错缠结等晶体亚结构缺陷,并且凹坑区域的片层组织上出现了层错堆积现象^[32],在凸起变形区域则是形成了高密度位错;凹坑变形区域的晶界较为模糊,凸起变形区域依然存在相对明显的晶界结构。图 14(d) 为经过激光冲击强化后距表层 1 mm 处的 TEM 图,可以看出:局部区域也产生了较少的位错和缠结,与未处理区域相比,晶粒界限变化不大,较为清晰。由以上结果可知:LSP 处理后各区域的位错缠结和晶界分布规律与塑性变形存在一定的对应关系。凹坑区域为激光冲击光斑中心区域,此处产生的塑性变形最为剧烈,因此该区域产生的位错缠结数量较大,且晶界结

构由于剧烈的塑性变形而模糊化。凸起变形区域的塑性变形则是激光冲击波切向传播形成的剪切力挤压而成的,相比于光斑中心区域,塑性变形程度较轻,因而形成了高密度位错且晶界仍较为清晰。材料内部凸起变形则是光斑区域材料向下塑性流动与内部固有材料因载荷挤压作用而压缩造成的,激光冲击波传递至此处时,峰值压力和塑性应变率衰减较大,因而在该区域仅有少量位错缠结产生,晶粒界线未产生明显的变化。

图 15 为激光冲击强化前后不同区域的粒径分布情况,可以看出:粒径分布与 TEM 分析结果呈现一致性。未经过激光冲击强化时 TC4 钛合金的平均晶粒尺寸约为 169 nm,激光冲击强化后光斑中心区域的晶粒尺寸约为 99 nm,环状凸起变形区域的晶粒尺寸约为 108 nm,内部凸起变形区域的晶粒尺寸约为 136 nm。晶粒尺寸的变化规律与塑性变形的剧烈程度直接相关:凹坑区域为激光冲击载荷直接加载区域,晶粒细化程度最深;其次为环状凸起变形区域;内部凸起变形区域的晶粒则随着材料压缩而产生小幅度细化。

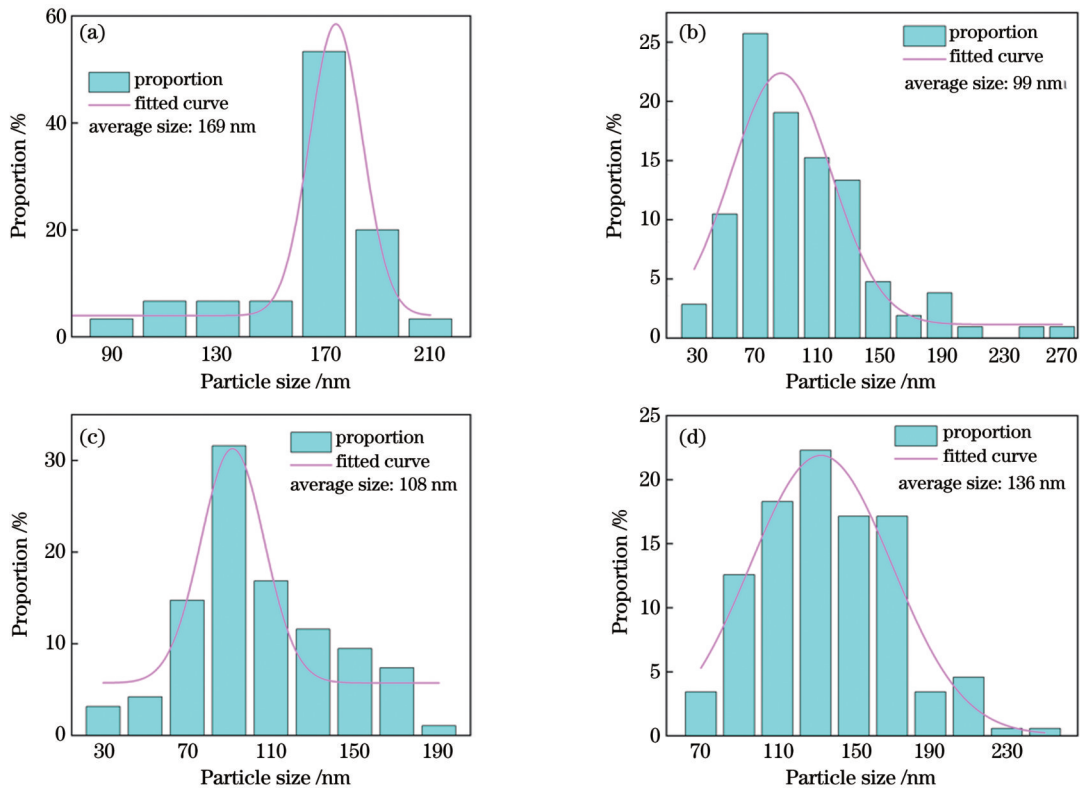


图 15 LSP 前后 TC4 钛合金的粒径分布图。(a) LSP 前表面以下 10 μm 处; LSP 后表面下方 10 μm 处的 (b) 凹坑变形和 (c) 环状凸变形区域; (d) LSP 后表面以下 1 mm 处的内部凸起变形区域

Fig. 15 Particle size distribution diagrams of TC4 titanium alloy before and after LSP. (a) Position at 10 μm below surface before LSP; (b) micro-indentation and (c) annular convex deformation areas at 10 μm below surface after LSP; (d) internal convex deformation area at 1 mm below surface after LSP

3.3 搭接激光冲击塑性流动规律

单光斑塑性流动行为为不同搭接率激光冲击强化后的塑性流动研究提供了一种思路。图 16 为 3.02 GW/cm^2 功率密度下光斑搭接率为 0 时的表面形

貌。当搭接率为 0 时,表面形貌变化主要表现为:各个光斑中心区域受冲击载荷直接作用形成微凹坑,在光斑与光斑交界处由于冲击载荷剪切力与固有材料挤压作用,会出现微凸起。光斑 1 未搭接边缘处产生最大

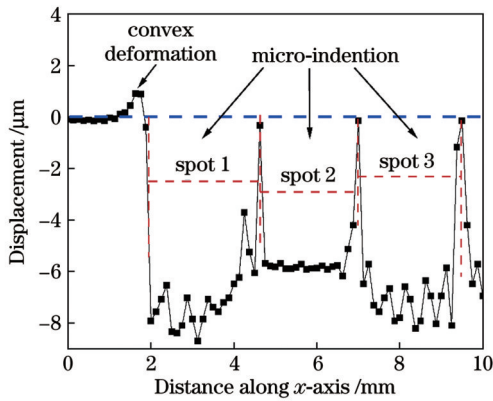


图 16 光斑搭接率为 0 时的激光冲击表面形貌

Fig. 16 Laser impact surface morphology when spot overlapping rate is 0

高度为 $0.89 \mu\text{m}$ 的微凸起, 光斑 1 所在区域产生了深度约为 $8.2 \mu\text{m}$ 的微凹坑, 并且由于光斑 1 先于光斑 2 作用, 光斑 1 在与光斑 2 搭接的范围内形成凸起变形, 因此光斑 2 冲击强化时的初始表面形貌不同于光斑 1, 光斑 2 所在区域产生的凹坑深度以及范围都要小于光斑 1。此时, 在光斑 1 和光斑 2 交界凹坑中, 形成了最大高度约为 $5.3 \mu\text{m}$ 的微凸起变形, 交界凹坑中凸起变形的高度、范围以及形成方式与光斑 1 未搭接边缘的凸起变形都不同。交界凹坑中的凸起变形先后受到两次激光冲击作用: 先是受到光斑 1 冲击波的剪切力和固有材料的挤压作用, 材料垂直于冲击载荷方向向光斑边缘发生体积流动转移, 之后又受到光斑 2 的激光冲击作用, 原本光斑 1 边缘处形成的微凸起沿冲击载荷方向被压回, 导致光斑交界凹坑中的微凸起高度低于未搭接边缘处的凸起高度。光斑 3 所在区域的表面形貌和塑性变形情况与光斑 2 类似, 在该光斑所在区域产生了深度约为 $7 \mu\text{m}$ 的凹坑变形, 在与光斑 2 交界处产生了最大高度约为 $6.3 \mu\text{m}$ 的微凸起变形。

图 17 为 $3.02 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 功率密度下激光搭接率为 33% 时的表面形貌, 可以看出: 当搭接率为 33% 时, 各个光斑区域均产生了微凹坑并在光斑边缘处产生了微

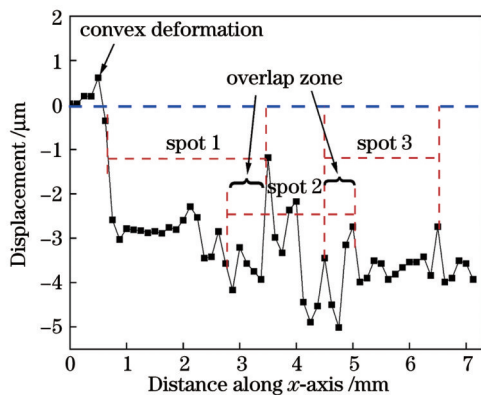


图 17 激光搭接率为 33% 时的激光冲击表面形貌

Fig. 17 Laser impact surface morphology when spot overlapping rate is 33%

凸起, 其塑性变形原因与搭接率为 0 时相同。搭接区域由于先后受到两次激光冲击作用而产生了更大深度的凹坑, 光斑 1 所在区域的凹坑深度约为 $2.8 \mu\text{m}$, 光斑 1 和光斑 2 搭接区域的凹坑深度约为 $4.1 \mu\text{m}$; 光斑 1、光斑 3 边缘处的微凸起都在光斑 2 的冲击范围内观察到, 这也导致了光斑 2 凹坑范围内出现不均匀分布的凹凸现象, 但是其实质都是冲击区域的微凹坑和光斑边缘的微凸起。在与光斑 2 搭接处的凹坑中, 光斑 1 边缘位置产生的凸起变形高度约为 $2.7 \mu\text{m}$, 在光斑 1 未搭接边缘处凸起变形高度为 $0.62 \mu\text{m}$ 。同样, 在光斑 2 和光斑 3 的搭接区域内, 凹坑深度达到 $4.8 \mu\text{m}$, 大于光斑 3 中心区域的凹坑深度 ($3.8 \mu\text{m}$)。

图 18 为 $3.02 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 功率密度下激光搭接率为 50% 时的表面形貌, 可以看出: 当搭接率为 50% 时, 表面的微凹坑和微凸起变形分布较为均匀, 各光斑范围内的微凹坑深度以及光斑边缘的微凸起高度基本一致, 激光搭接冲击塑性变形的规律并未发生变化, 依旧是各个光斑中心区域整体产生微凹坑并在各光斑边缘处产生微凸起。光斑 1 所在区域的微凹坑深度约为 $5 \mu\text{m}$, 在光斑 1 与光斑 2 搭接区域形成了高度约为 $2.1 \mu\text{m}$ 的微凸起变形, 在光斑 1 未搭接边缘处凸起高度为 $0.78 \mu\text{m}$ 。光斑 1 和光斑 2 搭接区域的微凹坑深度约为 $5.3 \mu\text{m}$, 略大于光斑 1 未搭接区域, 光斑 2 和光斑 3 搭接区域的微凹坑深度约为 $5.4 \mu\text{m}$ 。

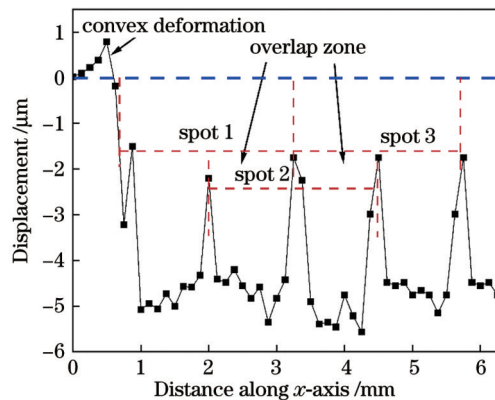


图 18 激光搭接率为 50% 时的激光冲击表面形貌

Fig. 18 Laser impact surface morphology when spot overlapping rate is 50%

表面各种形貌的产生是激光冲击强化处理过程中塑性变形和体积流动的结果, 只考虑激光冲击光斑 1 的作用时, 激光诱导吸收层产生等离子体, 在约束层的作用下冲击波向着材料内部方向传播, 促使 TC4 钛合金表面产生一定深度的微凹坑变形; 由于冲击载荷的剪切力作用与固有材料的挤压作用, 在光斑边缘处产生了微凸起变形, 材料一部分沿冲击方向转移到内部, 另一部分在光斑边缘处形成表面环状凸起。当按照一定的搭接率进行光斑 2 的激光冲击时, 实质是在光斑 1 作用后塑性变形和体积流动结果上再次发生了塑性流

动现象,光斑 2 使得搭接区域的微凸起变形受到新的冲击载荷作用,搭接区域凹坑内的凸起变形沿冲击载荷方向被压回,材料向着内部方向流动,具体表现为:各个冲击光斑共同作用下形成微凹坑变形,材料大部分向着内部方向流动转移,少部分在表面未搭接区域形成微凸起变形,并且微凹坑内各个光斑边缘挤压形成较小的凸起变形。搭接冲击的影响可以理解为重复的压力脉冲在相同的区域产生了积累效应,在激光冲击强化中扫描次数、激光能量、重叠率都会通过这种积累效应来影响激光冲击强化的效果^[33]。随着搭接率的增加,搭接区域的微凸起变形越来越频繁地受到搭接光斑的作用,产生塑性变形的同时体积越来越多地向着内部转移流动,最终结果是大部分材料体积沿冲击载荷方向向内部挤压流动,少部分的材料体积向光斑边缘挤压流动,在搭接光斑范围内产生具有一定规律的形貌。

4 结 论

通过数值模拟与试验研究相结合的方法,研究了 TC4 钛合金表面激光冲击强化过程中的塑性流动规律,分析了激光冲击强化后塑性变形驱动体积流动、应力重构、晶粒细化的机制,得到以下结论:

1) 在激光冲击中心区域,表面凹坑和表面环状凸起体积与激光功率密度呈正相关,表面凹坑体积远大于表面环状凸起体积。

2) 激光冲击强化后除在材料表面产生微凹坑与微凸起变形外,部分材料体积在激光冲击作用下向内部流动,在残余压应力层下方形成正向凸起变形区域。在无相变体积改变的情况下,表面环状凸起变形体积和内部凸起变形体积之和与表面凹坑体积相等,激光冲击强化试件整体的塑性变形符合体积不变定律。

3) 激光冲击强化塑性流动直接影响各区域晶粒的细化机制,晶粒细化程度在表面凹坑区、环状凸起变形区域、内部正向变形区域依次递减。

4) 搭接激光冲击时,在各个冲击光斑共同作用下形成了凹坑变形,在凹坑表面的光斑边缘处存在较小的凸起变形,在未搭接的光斑边缘处形成了正向凸起变形。

参 考 文 献

- 钱丽艳,王艳虎,戴峰泽,等.激光冲击强化对钛合金疲劳寿命影响综述[J].中国表面工程,2022,35(2):103-112.
Qian L Y, Wang Y H, Dai F Z, et al. Laser shock processing and its effect on fatigue life of titanium alloys: a review[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(2): 103-112.
- Yuan S, Lin N M, Zou J J, et al. Effect of laser surface texturing (LST) on tribological behavior of double glow plasma surface zirconizing coating on Ti6Al4V alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 368: 97-109.
- Lao X S, Zhao X F, Liu Y, et al. Study on the friction characteristics of plasma spray modified layer on titanium alloy in artificial sea water environment[J]. Materials Science Forum, 2020, 990: 73-78.
- 崔振铎,朱家民,姜辉,等.Ti及钛合金表面改性在生物医用领域的研究进展[J].金属学报,2022,58(7):837-856.
Cui Z D, Zhu J M, Jiang H, et al. Research progress of the surface modification of titanium and titanium alloys for biomedical application[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(7): 837-856.
- 陈雪鹏,张凌峰,熊毅,等.激光冲击强化对激光增材制造 TC4 钛合金组织和性能的影响[J].中国激光,2022,49(16):1602017.
Chen X P, Zhang L F, Xiong Y, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and properties of laser additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602017.
- Ananth M P, Ramesh R. Sliding wear characteristics of solid lubricant coating on titanium alloy surface modified by laser texturing and ternary hard coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(4): 839-847.
- 王延忠,李菲,陈燕燕,等.TC4喷丸强化仿真与试验[J].北京航空航天大学学报,2019,45(9):1723-1731.
Wang Y Z, Li F, Chen Y Y, et al. TC4 shot peening simulation and experiment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1723-1731.
- 聂祥樊,李应红,何卫锋,等.航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望[J].机械工程学报,2021,57(16):293-305.
Nie X F, Li Y H, He W F, et al. Research progress and prospect of laser shock peening technology in aero-engine components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 293-305.
- Jiang Q H, Li S, Zhou C, et al. Effects of laser shock peening on the ultra-high cycle fatigue performance of additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107391.
- 徐硕,苏波泳,花国然,等.激光冲击强化对 TC4 钛合金表面 TiN 涂层界面结合性能的影响[J].表面技术,2022,51(3):315-325.
Xu S, Su B Y, Hua G R, et al. Effect of laser shock peening on the interfacial bonding properties of TiN coatings on TC4 titanium alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 315-325.
- Hu Y X, Yao Z Q, Hu J. 3-D FEM simulation of laser shock processing[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1426-1435.
- Sealy M P, Guo Y B. Fabrication and finite element simulation of micro-laser shock peening for micro dents[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2009, 10(2): 134-142.
- 周文,葛茂忠,王大明,等.激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响[J].激光与光电子学进展,2021,58(3):0314001.
Zhou W, Ge M Z, Wang T M, et al. Effect of laser shock peening on surface integrity of GH3039 superalloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0314001.
- 黄志辉,刘会霞,沈宗宝,等.工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J].中国激光,2012,39(5):0503004.
Huang Z H, Liu H X, Shen Z B, et al. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0503004.
- 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.
Liu Y X, Wang X, Wu X Q, et al. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103004.
- Lu G X, Liu J D, Qiao H C, et al. The local microscale reverse deformation of metallic material under laser shock[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(2): 1600672.
- 杨丰槐,卢国鑫,杨青天,等.激光冲击在材料成形领域的应用[J].航空材料学报,2018,38(6):1-10.
Yang F H, Lu G X, Yang Q T, et al. Research progress of laser shock treatment in the field of material forming[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(6): 1-10.

- [18] Zhou W F, Ren X D, Yang Y, et al. Dislocation behavior in nickel and iron during laser shock-induced plastic deformation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(4): 1073-1083.
- [19] Zbib H M, de la Rubia T D. A multiscale model of plasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18(9): 1133-1163.
- [20] Cheng G J, Shehadeh M A. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: a multiscale simulation approach [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(9): 1013-1018.
- [21] Ding H, Li Y W, Zhang Z K, et al. Analysis of microstructural evolution properties based on laser shock peening[J]. *Optik*, 2019, 179: 361-366.
- [22] Gill A S, Telang A, Ye C, et al. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened Inconel alloy 718SPF[J]. *Materials Characterization*, 2018, 142: 15-26.
- [23] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [24] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [25] Zhang X Q, She J P, Li S Z, et al. Simulation on deforming progress and stress evolution during laser shock forming with finite element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 27-35.
- [26] Yang H, Zhao J B, Wang T R. Research on a different method to reach the saturate limit of titanium aluminide alloy surface mechanical and fatigue properties by laser shock process[J]. *Optik*, 2019, 193: 162989.
- [27] Ballard P, Fournier J, Fabbro R, et al. Residual stresses induced by laser-shocks[J]. *Le Journal De Physique IV*, 1991, 1(C3): C3-487.
- [28] 吴先前, 黄晨光. 强激光驱动爆炸与冲击效应[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(1): 42-60.
- Wu X Q, Huang C G. Laser driven explosion and shock wave: a review[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(1): 42-60.
- [29] Lu J Z, Wu L J, Sun G F, et al. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 127: 252-266.
- [30] Kaschel F R, Vijayaraghavan R K, Shmeliov A, et al. Mechanism of stress relaxation and phase transformation in additively manufactured Ti-6Al-4V via in situ high temperature XRD and TEM analyses[J]. *Acta Materialia*, 2020, 188: 720-732.
- [31] 王博涵, 程礼, 李冬春. 激光冲击强化 TC4 微观组织演化及纳米晶形成[J]. *中国激光*, 2022, 49(8): 0802019.
- Wang B H, Cheng L, Li D C. Microstructure evolution and nanocrystal formation of TC4 by laser shock peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(8): 0802019.
- [32] 薛军, 冯建涛, 马长征, 等. 激光冲击强化对激光增材 TC4 钛合金组织和抗氧化性的影响[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 198-205.
- Xue J, Feng J T, Ma C Z, et al. Influence of laser shock peening on microstructure and oxidation resistance of laser additive manufactured TC4 titanium alloy[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 198-205.
- [33] Pu T Y, Liu W W, Wang Y L, et al. A novel laser shock post-processing technique on the laser-induced damage resistance of 1ω $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer coatings[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e19.

Flow Law of Plastic Deformation of TC4 Titanium Alloy by Laser Shock Peening

Liao Xinlong, Su Boyong*, Xu Shuo, Hua Guoran, Wang Heng, Cao Yupeng
School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China

Abstract

Objective Laser shock peening (LSP) is an advanced surface modification technology that uses laser-induced shock waves as a direct source of force for the production of plastic deformations on the surface of metals. It can be used to regulate the surface quality of the material and improve its properties. Laser shock peening has several advantages over other surface modification techniques, such as high loading pressure, large influence range, and controllable impact area and loading pressure parameters, and can be easily automated. It has a wide range of applications in aerospace, automotive manufacturing, and marine engineering industries. The plastic deformation is the fundamental process for laser shock peening in the reconstruction of surface stress, improvement of surface morphology, and hardening of surface materials. This deformation is influenced by a complex nonlinear dynamic process that is dependent on various factors such as laser shock wave pressure decay, the dynamic yield strength of materials, plastic strain rate, internal dislocations, and microcracking of materials. In this study, the flow law of plastic deformation of the TC4 titanium alloy under the action of shock waves is analyzed by combining numerical simulations and experimental studies. The reliability of the numerical model is verified through experimental studies, and the volume changes of internal plastic deformations under different laser shock parameters are calculated based on the numerical model. Additionally, the influence of plastic flows on volume distribution, stress reconstruction, and internal grain distribution of the material is analyzed.

Methods A TC4 titanium alloy is used in this study. A combination of numerical simulations and experiments is used to study the flow law of plastic deformation of the TC4 titanium alloy by laser shock peening. First, a numerical simulation model of the laser shock peening of a TC4 titanium alloy is established. The surface deformation and residual stress distributions in the numerical simulation are extracted and compared with the experimental results, and the numerical simulation model is validated. After verifying the validity of the numerical simulation model, the internal deformation distribution of the material is extracted from the numerical simulation model, and the internal deformation distribution data is processed. Subsequently, the deformation distribution data is fitted, and the fitted equations are calculated to evaluate the flow of plastic deformation by obtaining the volume change of each part

after the LSP. In addition, the microstructures of the surface layers at different depths before and after the laser impact treatment are observed using a field-emission high-resolution transmission electron microscope (TEM), and particle size measurements and distribution statistics are processed.

Results and Discussions The clouds obtained from the numerical simulation show that other plastic deformations occur beyond surface microindentation and superficial convex deformations after laser shock peening. The effects of the shock wave cause the volume of the microindentation deformation produced in the center of the impact area to shift to the surrounding area. This results in the formation of the superficial convex deformation at the edge of the spot impact, and the remaining volume is squeezed into the material, leading to internal convex deformations (Fig. 6). The distributions of the residual stress and deformations on the surface at a power density of 3.02 GW/cm^2 are consistent with the numerical simulation results (Fig. 10). As the volume in the residual compressive stress zone decreases, the volume in the residual tensile stress zone increases, and a part of the volume is transferred to the internal part of the material during the plastic deformation process (Fig. 13). After laser shock peening, a large number of dislocations, dislocation walls, dislocation entanglements, and other sub-structural defects appear inside the grains. Lamellar dislocation accumulation occurs in the lamellar organization in the microindentation deformation region, and high-density dislocations are formed in the convex deformation region (Fig. 14). Variations in the grain size are directly related to the intensity of the plastic deformation. The grain size is the smallest in the microindentation deformation region, which is directly loaded by the laser spot. The superficial convex deformation region exhibits a larger grain size compared to the microindentation deformation region, while only a slight refinement in grain size is observed in the internal convex deformation region (Fig. 15).

Conclusions In this study, the microindentation deformation is formed in the center area of a spot, the convex deformation is formed in the edge area of the spot, and the residual compressive stress is generated in the surface layers of the microindentation and convex deformation areas. The 3D morphology test results of the TC4 titanium alloy surface show that the volumes of the microindentation and convex deformations are not equal, mainly because the laser shock wave induces the flow of plastic deformation in the surface metal towards the interior of the material, forming a convex deformation area under the microindentation deformation layer and a residual tensile stress layer in this area. Based on the results of numerical calculations, the volume of the overall plastic deformation is extracted and calculated. The results show that the sum of the internal convex deformation volume and superficial convex volume is approximately equal to the microindentation deformation volume. In the absence of phase changes, the overall plastic deformation adheres to the volume constancy law. The TEM images before and after laser shock and particle size distribution results show that flow of plastic deformation of the TC4 titanium alloy by laser shock peening directly affects the grain refinement mechanism in each region; the degree of grain refinement decreases successively in the microindentation deformation area, the superficial convex deformation area and the internal positive deformation area. When a multispot laser shock peening is performed, all spots work together to form microindentation deformations, and small convex deformations appear at the edge of the indentation surface. In the part without an overlap of spots and impact of shocks, convex deformations are formed.

Key words laser technique; TC4 titanium alloy; laser shock wave; plastic flow; residual stress; grain refinement