

激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及其机理分析

柳沅汛 王曦 吴先前 黄晨光

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 为了研究激光冲击强化(LSP)过程中冲击波柔性加载条件下靶材的表面形貌与变形机理的联系,采用短脉冲强激光对 304 奥氏体不锈钢表面进行 LSP 处理,在没有对材料表面进行腐蚀的条件下,利用光学显微镜直接观察了 LSP 处理后材料的表面,并分析了其表面形貌特征与形成机理。研究发现,表面形貌呈现了多晶面心立方(FCC)金属的塑性变形特征,所浮现的形变组织能够直接反映材料在冲击波加载下的变形机制。实验结果表明,激光冲击后材料的表面形貌与塑性变形机制具有对应关系,这为 LSP 处理的变形机理的研究提供了一种新的实验方法。

关键词 激光技术;激光冲击强化;表面形貌;变形机理;显微组织

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0103004

Surface Morphology and Deformation Mechanism of 304 Stainless Steel Treated by Laser Shock Peening

Liu Yuanxun Wang Xi Wu Xianqian Huang Chenguang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract To study the relation between the surface morphology and the deformation mechanism of the target material under the flexible loading shock condition, in laser shock peening (LSP), the surface morphology of 304 austenite stainless steels treated by LSP is investigated using the optical microscope. The surface features observed present the characteristics of plastic deformation in the polycrystalline face centered cubic (FCC) metal. The surface microstructure can directly represent the deformation mechanism of the material under shock wave loading. The experimental results show that the surface morphology of the treated material corresponds to the deformation mechanism, which provides a new experimental method of studying the deformation mechanism in LSP.

Key words laser technique; laser shock peening; surface morphology; deformation mechanism; microstructure

OCIS codes 350.3390; 350.3850; 140.3390; 240.6700

1 引言

激光冲击强化(LSP)是利用高功率密度、短脉冲激光诱导的高幅值冲击波使材料发生塑性变形,并在冲击表面形成残余压应力来对材料进行强化处理的新方法^[1~6]。LSP 能显著提高金属材料的抗疲劳、抗磨损、抗腐蚀等机械性能。与传统的冷挤压、

喷丸等表面强化技术相比,LSP 具有非接触、无热影响区、可控性强、强化效果更显著等优点,在航空航天、汽车、能源化工等领域的关键零部件强化处理方面具有重要的应用价值。

国内外围绕着 LSP 的机理及其应用开展了大量的研究工作^[7~16]。其中,金属材料在 LSP 作用下

收稿日期:2012-07-13;收到修改稿日期:2012-09-17

基金项目:国家自然科学基金(10972228,11002150,91016025)和中国科学院科研装备研制项目(YZ200930)资助课题。

作者简介:柳沅汛(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用机理方面的研究。

E-mail: lyx6782006@126.com

导师简介:黄晨光(1969—),男,博士,研究员,主要从事冲击动力学、激光与物质的相互作用和结构动力学等方面的研究。E-mail: huangcg@imech.ac.cn(通信联系人)

的宏观和微观变形机理是研究的热点。对金属材料 LSP 作用下的微观结构与塑性变形机制的研究,通常采用光学显微镜对腐蚀后的靶材截面或冲击表面进行观察,然后通过透射电镜来分析塑性变形机制,研究手段较为复杂^[17~19];对于材料在 LSP 作用下的原始表面微观形貌的观察及其与变形机理的联系研究较少。而在激光诱导的冲击波柔性加载下,材料的冲击加载界面随着试样的变形而变化,材料表面能形成反映材料变形机理的特征。因此,本文对 304 奥氏体不锈钢激光冲击后的原始表面进行宏观、微观观察,建立起强激光诱导的冲击波柔性加载下材料的表面形貌特征与材料变形机理之间的内在联系,为 LSP 作用下金属材料塑性变形机制的研究提供一种快速有效的方法。

2 实验方法

LSP 处理的实验装置如图 1 所示。靶体材料选用 LSP 变形机理研究较为深入的冷轧 304 奥氏体不锈钢。试样厚为 2 mm、直径为 40 mm。在冲击实验前,将试样的待冲击表面研磨抛光。吸收层为 50 μm 厚的铝膜,约束层为 4 mm 厚的 K9 玻璃。采用 Nd:YAG 激光器对试样表面进行单次冲击处理,激光单次脉冲能量为 2.5 J,激光波长为 1064 nm,激光能量在时间、空间上均为高斯分布,激光脉冲的半峰全宽(FWHM)为 10 ns。通过改变试样距聚焦透镜的距离,得到不同的光斑直径 D ,对应不同的激光功率密度 I 。

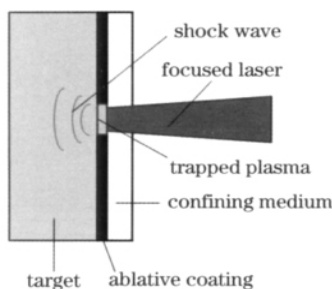


图 1 激光冲击强化处理示意图
Fig. 1 Schematic of LSP

LSP 处理后,用丙酮清洗试样表面,采用 AF-LI04 三维轮廓仪测量激光冲击后试样的表面轮廓和粗糙度,获得冲击区域的宏观变形形貌特征,采用光学显微镜对冲击试样的表面微观形貌进行观察。进行微观观察时,首先观察丙酮清洗后冲击试样的表面微观形貌,并通过压痕标记观察区域的位置;然后为了验证观察结果,将试样用王水($\text{HCl}:\text{HNO}_3$:

甘油=4:2:1)腐蚀 10 s 后用酒精冲洗,观察相同位置,得到腐蚀后的微观形貌特征,与腐蚀前的观察结果进行对比分析。

3 实验结果与分析

3.1 表面宏观形貌分析

304 不锈钢在功率密度 I 为 3.49 GW/cm^2 、光斑直径 D 为 3 mm 的激光单次冲击后的冲击面轮廓如图 2 所示。LSP 处理后试样的表面无烧蚀痕迹,形成了一个光亮的、深度为 14 μm、直径为 2.5 mm 的微凹坑,表明表层材料发生了塑性变形。

根据激光冲击面的轮廓测量结果,将试样的冲击处理表面分为冲击区、过渡区和未冲击区,如图 2 所示。分别对冲击区和未冲击区的表面进行粗糙度测量,得到冲击区的粗糙度 R_a 为 0.12 μm,未冲击区的粗糙度 R_a 为 0.02 μm。测量结果表明 LSP 后不锈钢表面的微观形貌也发生了改变。

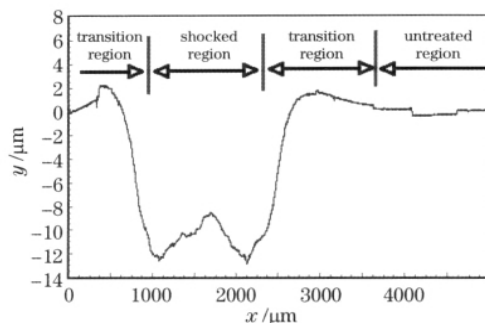


图 2 304 不锈钢冲击试样的表面轮廓
Fig. 2 Surface profile of the shocked 304 stainless steel sample

在 LSP 处理靶材的过程中,高功率密度激光诱导产生高压等离子体,等离子体膨胀对靶材产生高幅值、短脉冲的冲击压力,形成在靶材内部传播的冲击波。在高压、短持续时间的冲击波作用下,材料经历高应变率($10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)变形,当冲击波峰值压力超过靶材动态屈服极限时,靶材发生塑性变形。因此,等离子体的压力特征是 LSP 效果的直接影响因素。根据 Fabbro 等^[3]基于能量守恒方程提出的压力分析模型,可得到激光脉冲诱导等离子体峰值压力 p 的估算公式:

$$p = 0.01 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{\frac{1}{2}} Z^{\frac{1}{2}} I^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 α 为内能转化为热能的比例系数,通常取 0.1; Z 为约束层和靶材之间的声阻抗。实验中,取 K9 玻璃和不锈钢之间的声阻抗 $Z = 1.8 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,

功率密度 $I = 3.49 \text{ GW/cm}^2$, 计算得到强激光在靶面诱导的峰值压力 $p = 4.43 \text{ GPa}$ 。

304 不锈钢的静态屈服强度为 289 MPa ^[20], 鉴于材料在强动载作用下的动态屈服强度一般为其静态屈服强度的 2~4 倍, 可设定 304 不锈钢的动态屈服强度为 867 MPa 。LSP 处理过程中, 材料的变形近似为一维应变方式, 其动态屈服强度 σ_H 为^[21,22]

$$\sigma_H = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \sigma_Y^{\text{dyn}}, \quad (2)$$

式中 ν 为材料的泊松比。对 304 不锈钢, $\nu = 0.3$, $\sigma_Y^{\text{dyn}} \approx 867 \text{ MPa}$, 为材料一维应力时的动态屈服强度; 将 $\nu, \sigma_Y^{\text{dyn}}$ 代入(2)式, 得 $\sigma_H = 1.52 \text{ GPa}$ 。

可见, 当激光功率密度 $I = 3.49 \text{ GW/cm}^2$ 时, 冲击波压力 $p = 4.43 \text{ GPa}$ 明显超过了 304 不锈钢的动态屈服强度 $\sigma_H = 1.52 \text{ GPa}$, 因此, 不锈钢发生了剧烈的塑性变形, 形成深度为 $14 \mu\text{m}$ 的凹坑(见图 2)。凹坑中心的变形量反而较小, 是由于冲击区边缘产生的表面稀疏波在光斑中心叠加, 对冲击区中心产生反向加载, 使其发生了一定量的反向塑性变形; 这与胡永祥等^[23]对 45# 钢进行 LSP 处理仿真分析时发现的“残余应力洞”现象一致, 当冲击压力提高到 4 GPa 时, 在冲击区中心由于表面稀疏波叠加会产生较大的反向塑性变形, 冲击区域中心残余压应力约为 430 MPa , 而 $r = 0.2 \text{ mm}$ 处残余压应力最大, 约为 620 MPa 。

图 3 和图 4 分别是 304 不锈钢表面形成的凹坑深度和冲击区粗糙度随激光功率密度的变化曲线。从中可以看出, 激光功率密度越大, 冲击区越深, 表面越粗糙, 但是在功率密度提高到一定值时, 冲击坑深度开始减小, 粗糙度也趋于饱和。可见, 提高激光强度能增大塑性变形量, 但到了临界值后塑性变形量会趋于饱和, 甚至减小。这与 Ballard 等^[4]的理论模型分析结果一致, 当激光功率密度提高到一定值

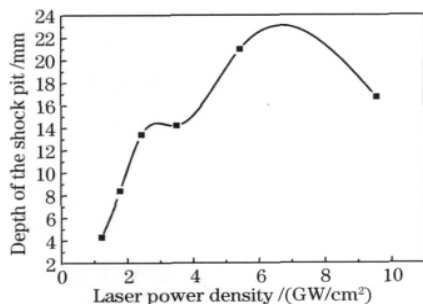


图 3 冲击坑深度随激光功率密度的变化曲线
Fig. 3 Profile of the depth of the shock pit as a function of laser power density

即冲击压力增大到一定值时, 材料的塑性变形程度不再增加, 反而减小。

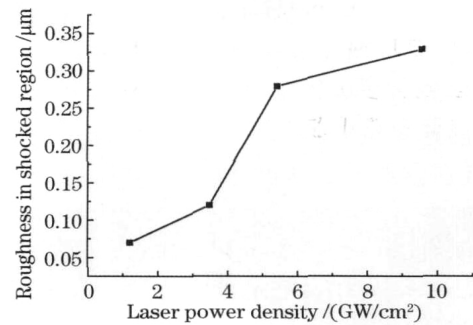


图 4 冲击区粗糙度随激光功率密度的变化曲线
Fig. 4 Profile of roughness in shocked region as a function of laser power density

3.2 表面微观形貌分析

经过 LSP 处理(激光功率密度 $I = 3.49 \text{ GW/cm}^2$)后, 304 不锈钢表面的微观形貌发生了变化, 冲击区、过渡区以及未冲击区的表面呈现不同的微观形貌特征, 浮现出不同的形变组织。

金属材料发生塑性变形主要有滑移和孪生两种机制, 所形成的形变组织分别为滑移带和形变孪晶。滑移的过程比较平缓, 所形成的滑移带通常在晶粒内均匀、完整地分布着; 孪生则往往突然发生, 所形成的形变孪晶一般不在晶粒内均匀地分布。此外, 滑移时切应变为任意值, 当切应变较大时可在试样表面观察到明显呈台阶状的滑移带; 孪生时切应变为固定值, 且一般很小, 因此从微观上看孪生要比滑移更均匀, 同时孪生的结果会使晶体表面产生浮凸。根据滑移带、形变孪晶的这些特征, 可对材料冲击表面所浮现的形变组织做出基本判定, 从而建立起表面形貌与变形机理之间的联系。

图 5 是经 LSP 处理后的 304 不锈钢未冲击区的表面微观形貌。未冲击区与试样冲击之前的表面形貌基本一样: 表面十分平整, 看不到晶粒轮廓及形

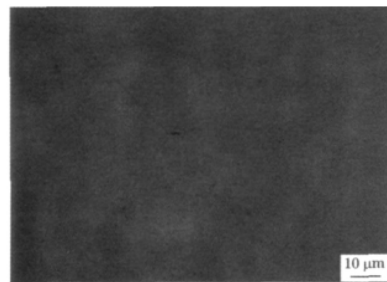


图 5 304 不锈钢未冲击区的表面微观形貌
Fig. 5 Surface morphology of the untreated region of 304 stainless steel

变组织。

图 6 是 304 不锈钢冲击区的表面微观形貌。与未冲击区表面不同,在冲击区表面,各晶粒塑性变形程度不同,相邻晶粒高低不平,显现出晶粒轮廓,同时一些区域还浮现出了条带状的形变组织。其中,大多数的形变组织在晶粒内不是均匀分布的,呈浮凸状,且在微观上变形程度较小、较均匀,具有形变

孪晶的特征,如图 6(b)中 A、图 6(c)、图 6(d)箭头所指区域。此外,观察到少数区域出现了明显呈台阶状的滑移带[见图 6(b)中 B 处]和在晶粒内均匀完整分布的滑移带[见图 6(e)]。

观察结果表明,在 304 不锈钢试样的冲击区表面浮现了很多形变组织,主要是形变孪晶,但仍有少量滑移带。

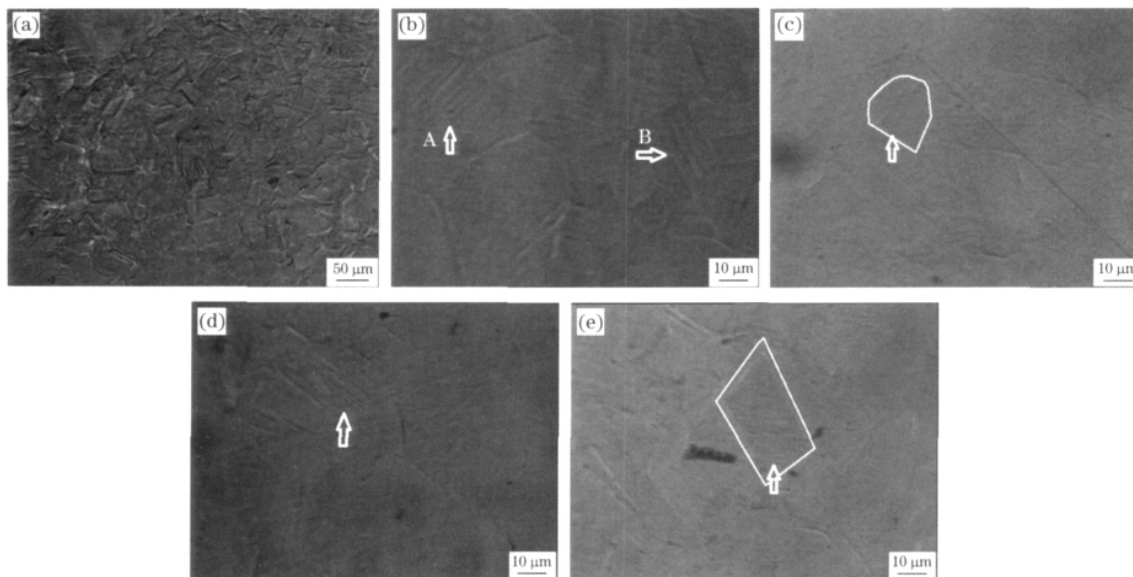


图 6 304 不锈钢冲击区的表面微观形貌。(a)低倍显微照片;(b)~(e)高倍显微照片

Fig. 6 Surface-morphology micrographs of the shocked region of 304 stainless steel.

(a) Low magnificated micrograph; (b)~(e) high magnificated micrographs

为了验证所观察到的形变组织,对样品腐蚀后的微观形貌进行了观察。通过腐蚀前后表面形貌的对比,可对表面观察到的条带状形变组织做出更加明确的判断。由于孪晶区的位向与晶体其余部分的位向不同,孪晶区与腐蚀剂的作用不同于其他部分,在显微镜下,孪晶区是一条较浅或较深的带。孪晶分为退火孪晶和形变孪晶,退火孪晶的宽度与晶粒尺寸在同一个量级,而形变孪晶的宽度一般比晶粒尺寸小一个量级,据此可判别形变孪晶。

图 7 是王水腐蚀前、后试样冲击区的表面微观形貌。图 7(a)、(c)中晶体的形变组织仅在晶粒的局部出现,微观上变形均匀的浮凸状形变组织在腐蚀之后条纹明暗差别很大、清晰可辨[见图 7(b)、(d)],说明这种条带状组织确实为形变孪晶。

由于 304 不锈钢为多晶体,相邻晶粒取向不同,在相同载荷作用下产生的形变量不同,即有利于孪生(滑移)的位向的晶粒先发生孪生(滑移),变形量较大,反之则变形量较小;另一方面,由于晶粒中心与边界扫过的位错数目不同,同一晶粒内的形变也

不均匀。因此,不锈钢冲击区的表面在微观上凹凸不平,显现出了晶粒轮廓。

冲击区所浮现的形变组织是由 LSP 的载荷特征所决定的。当所受切应力大于金属材料的临界滑移切应力或临界孪晶切应力时,材料会以滑移或孪生方式发生塑性变形,并形成滑移带或形变孪晶。对于面心立方(FCC)金属,常温下位错滑移是滞留形变的主要方式,形变孪晶少见。但已有研究表明,冲击加载下材料的孪生-滑移变形机制的转变会受到很多因素的影响,包括应力加载方式、加载应变率、堆垛层错能、晶粒大小和胞结构等^[19]。在 LSP 过程中,激光能量在空间上呈高斯分布,相应的冲击压力在空间上也呈高斯分布。冲击中心区的加载方式近似为平面波应力加载,由于压应力一致,滑移系的激活和移动受到抑制,相邻晶粒协调变形所需应力加大,因形变孪晶的形成只需微区形变(Shockley 不全位错的分离和滑移),孪生成为滞留应变的主要方式。另一方面,在激光诱导的短脉冲、高应变率($10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)加载条件下,形变时间极短,位错的

增殖和长程迁移变得困难,而孪晶形成只需微区形变,为了滞留应变,高应变率加载下的孪生要比低应变率加载表现得更为活跃。所以在冲击区,材料的塑性变形机制主要为孪生,同时仍有少数区域发生滑移;这与实验中试样冲击区表面观察到很多形变孪晶、少量滑移带的结果一致。

图 8 是 304 不锈钢冲击过渡区的表面微观形

貌。可以看到,过渡区变形程度较小,由冲击区向未冲击区呈现逐渐变弱的波浪状变形结构[见图 8(a)];部分区域出现成 110° 夹角的层状堆叠结构[见图 8(b)],由于该结构具有高低不平的台阶状特征、且结构中夹角与 FCC 金属滑移面之间的夹角一致,判断该结构为滑移带。观察发现过渡区浮现的形变组织主要为滑移带。

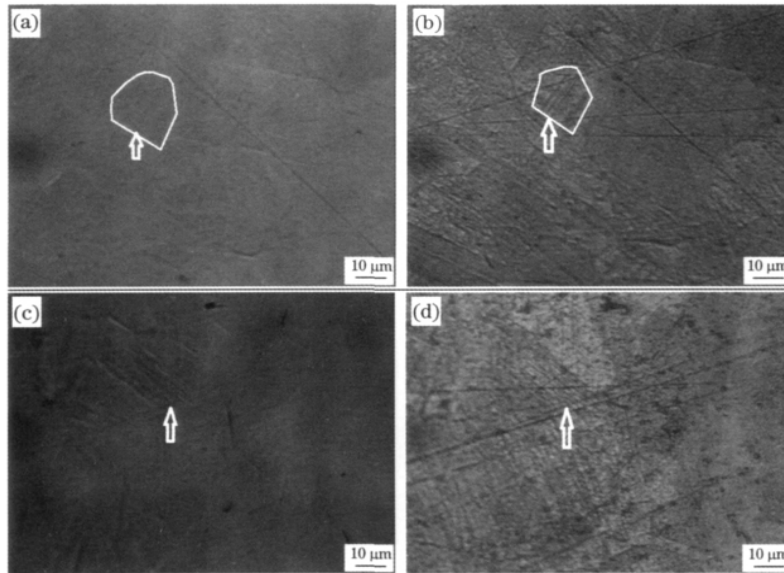


图 7 王水腐蚀前、后 304 不锈钢冲击区的表面微观形貌。(a)、(c)腐蚀前的显微照片;(b)、(d)腐蚀后的显微照片

Fig. 7 Surface morphology micrographs of the shocked region of 304 stainless steel before and after etching by aqua regia. (a), (c) Micrographs before etching sample; (b), (d) micrographs after etching sample

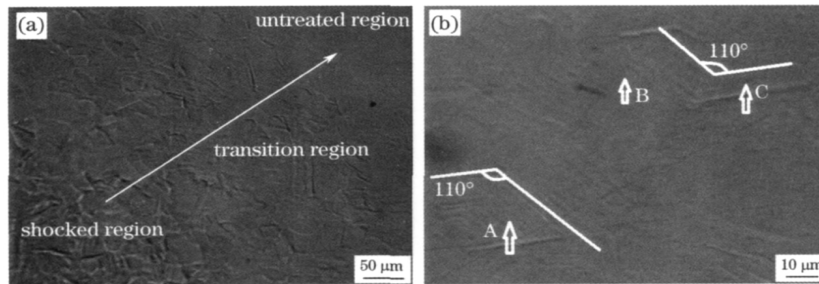


图 8 304 不锈钢过渡区的表面微观形貌。(a)低倍显微照片;(b)高倍显微照片

Fig. 8 Surface morphology micrographs of the transition region of 304 stainless steel.

(a) Low magnification micrograph; (b) high magnification micrograph

图 9 是王水腐蚀前、后试样冲击过渡区的表面微观形貌。图 9(a)中层状堆叠的条带状组织在腐蚀之后并未出现明暗差别很大的条纹,因此该形变组织不是形变孪晶,而是滑移带。

由于冲击压力在空间上呈高斯分布,从冲击中心区到未冲击区的冲击压力逐渐减小,因此相应的变形量逐渐较小,在过渡区的表面形成了由冲击区向未冲击区逐渐变得微弱的波浪状变形结构。

与冲击区类似,过渡区所浮现的形变组织也是由 LSP 的载荷特征所决定。在过渡区,加载应力较小,可能低于材料的临界孪晶切应力,材料难以发生形变孪晶;即便加载应力大于临界孪晶切应力,但过渡区的加载方式近似为球面波应力加载,而形变孪晶的 Hall-Petch 梯度比位错滑移的大很多,此时更容易激活滑移系。因此,过渡区的变形方式以滑移为主,这与实验中观察到过渡区浮现以滑移带为主

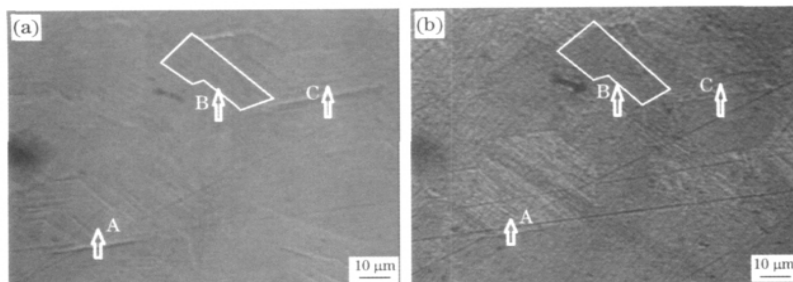


图 9 王水腐蚀前、后 304 不锈钢过渡区的表面微观形貌。(a)腐蚀前的显微照片;(b)腐蚀后的显微照片
Fig. 9 Surface morphology micrographs of the transition region of 304 stainless steel before and after etched by aqua regia. (a) Micrograph before etching sample; (b) micrograph after etching sample

的形变组织相符。同时, FCC 金属的滑移面为 $\{111\}$ 晶面, 该晶面有 4 个取向, 晶面之间相交角为 70.32° (或 109.28°), 因此, 在实验中观察到了如图 5(b)所示约成 110° 夹角的两组滑移带, 它们分别位于不同取向的 $\{111\}$ 滑移面上。

以上分析表明, 在激光诱导冲击波的柔性加载下, 304 不锈钢的冲击区、过渡区、未冲击区呈现出了不同的表面微观形貌特征。冲击区、过渡区表面浮现出很多形变孪晶或滑移带等形变组织, 体现了 FCC 金属的塑性变形特征: 在冲击区内有很多形变孪晶、少量滑移带, 而过渡区的形变组织则主要为滑移带。另外, 通过分析可以发现材料表面浮现的这些形变组织与 LSP 作用下材料的塑性变形机制具有对应关系, 这说明 LSP 后 304 不锈钢的表面形貌

能够反映材料在 LSP 诱导的这种高压、高应变率冲击载荷作用下的内部变形机理。利用光学显微镜对抛光后再 LSP 的试样的原始表面进行观察, 可以简单、有效地获得材料在冲击载荷下的塑性变形特征, 尤其有利于观察滑移带, 从而获得材料在 LSP 作用下的变形机理。

3.3 激光强度对表面微观形貌的影响

为了进一步研究激光强度对材料塑性变形的影响, 观察了不同激光功率密度下不锈钢冲击区的表面微观形貌, 如图 10 所示。随着激光冲击强度的增加 [见图 10(a)~(c)], 材料表面在微观上的凸凹不平程度增加, 晶粒轮廓越来越明显, 表面的形变孪晶或滑移带逐渐增多, 说明材料发生的塑性变形增大。在高功率密度下, 局部区域有晶粒细化、碎化, 个别

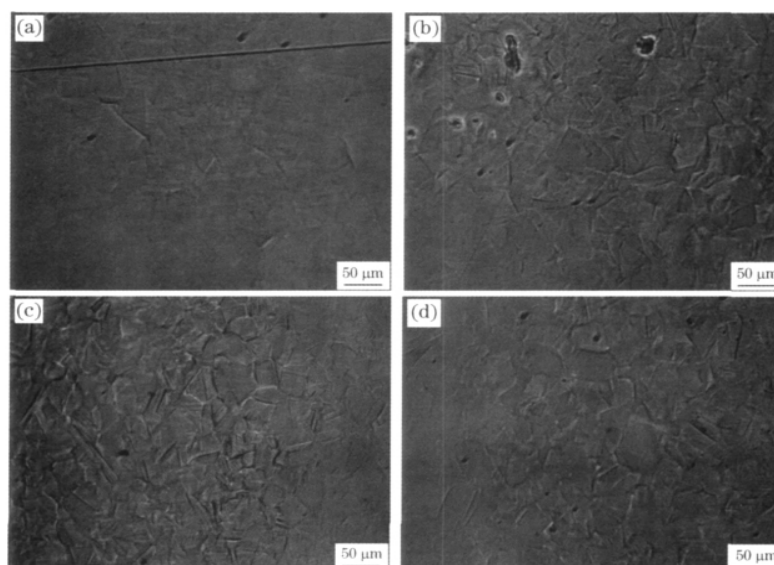


图 10 不同激光功率密度下 304 不锈钢冲击区的表面形貌。(a) $I=1.22 \text{ GW/cm}^2$; (b) $I=2.43 \text{ GW/cm}^2$; (c) $I=5.42 \text{ GW/cm}^2$; (d) $I=9.56 \text{ GW/cm}^2$

Fig. 10 Surface morphology micrographs of the shocked region of 304 stainless steels treated with different laser power densities. (a) $I=1.22 \text{ GW/cm}^2$; (b) $I=2.43 \text{ GW/cm}^2$; (c) $I=5.42 \text{ GW/cm}^2$; (d) $I=9.56 \text{ GW/cm}^2$

晶粒间出现间隙。当激光功率密度超过一定值时,材料表面的凸凹不平程度不再增加,浮现的形变组织不再增加,说明材料的塑性变形程度不再增加[见图 10(c)、(d)]。

图 11 是高、低功率密度下,不锈钢冲击区表面形貌的高倍光学显微照片,可以看到高功率密度下,材料的形变组织(形变孪晶或滑移带)明显比低功率密度下的多。这也说明了材料表面呈现的微观形貌

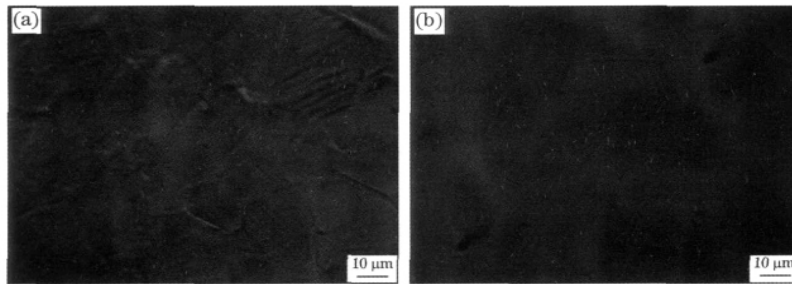


图 11 高、低激光功率密度下 304 不锈钢冲击区的表面微观形貌对比。(a) $I=5.42 \text{ GW/cm}^2$; (b) $I=1.79 \text{ GW/cm}^2$

Fig. 11 Surface morphology micrographs of the shocked region of 304 stainless steels treated with laser power densities. (a) $I=5.42 \text{ GW/cm}^2$; (b) $I=1.79 \text{ GW/cm}^2$

4 结 论

1) 采用光学显微镜观察 304 不锈钢抛光试样经 LSP 处理后的原始表面,发现在激光诱导的冲击波柔性加载下,冲击区、过渡区、未冲击区呈现不同的微观形貌特征:未冲击区十分平整;冲击区则凸凹不平,显现出晶粒轮廓,同时出现很多形变孪晶和少量滑移带;过渡区凸凹不平程度较小,部分区域有层状堆叠的滑移带。

2) 激光冲击后 304 不锈钢的表面形貌反映了冲击加载下多晶 FCC 金属的塑性变形特征,材料表面所浮现的形变组织与 LSP 作用下材料的塑性变形机制具有对应关系。

3) 不同激光强度下,不锈钢的表面形貌不同。激光强度越大,塑性变形量越大,冲击形成的凹坑越深,微观上可观察到的形变组织(形变孪晶或滑移带)越多;但是塑性变形程度的增大存在极限值。

4) LSP 后材料的表面形貌与塑性变形机制具有对应关系,因此采用光学显微镜对 LSP 后材料的原始表面进行观察可能成为一种研究 LSP 塑性变形机制的简易方法。

参 考 文 献

1 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10):

特征与材料的强化机理相关联。

因此,通过直接观察 LSP 后靶材表面的显微形貌来研究材料 LSP 的塑性变形机制,是一种简单、直接、有效的研究手段。采用该方法对 LSP 后的各种材料进行研究,很可能会发现反映材料变形机理的形貌特征,对 LSP 作用下材料的塑性变形有进一步的认识,也可能给 LSP 的工艺参数优化带来帮助。

1021~1036

- 2 A. H. Clauer, D. F. Lahrman. Laser shock processing as a surface enhancement process[J]. *Key Engineering Materials*, 2001, **197**: 121~144
- 3 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 4 P. Ballard. Residual Stresses Induced by Rapid Impact-Applications of Laser Shocking[D]. Paris: Ecole Polytechnique, 1991
- 5 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generated stress waves: their characteristics and their effects to materials [C]. AIP, 1979, **50**(1): 27~42
- 6 X. Q. Wu, C. G. Huang, X. Wang *et al.*. A new effective method to estimate the effect of laser shock peening [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, **38**(5): 322~329
- 7 A. H. Clauer, B. P. Fairand, B. A. Wilcox. Laser shock hardening of weld zones in aluminum alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1977, **8**(12): 1871~1876
- 8 Q. Liu, C. Yang, K. Ding *et al.*. The effect of laser power density on the fatigue life of laser-shock-peened 7050 aluminium alloy [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007, **30**(11): 1110~1124
- 9 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 10 P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel *et al.*. Laser-shock processing of aluminium-coated 55Cr steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behaviour[J]. *J. Mater. Sci.*, 1998, **33**(6): 1421~1429
- 11 A. Sollier, L. Berthe, P. Peyre *et al.*. Laser-matter interaction in laser shock processing[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 463~467
- 12 X. Q. Wu, Z. P. Duan, H. W. Song *et al.*. Shock pressure

- induced by glass-confined laser shock peening; experiments, modeling and simulation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(5): 053112
- 13 Zhong Junwei, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu *et al.*. Tribological behavior of laser shock processing AISI8620 steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0103001
钟俊伟, 鲁金忠, 罗开玉 等. AISI 8620 合金钢激光冲击强化层摩擦学特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0103001
- 14 C. Yang, P. D. Hodgson, Q. Liu *et al.*. Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2008, **201**(1-3): 303~309
- 15 W. Zhang, Y. L. Yao, I. Noyan. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**(1): 10~17
- 16 Zhang Yongkang, Yu Shuisheng, Yao Hongbing *et al.*. Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(8): 5602~5605
张永康, 于水生, 姚红兵 等. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中波导冲击波的实验研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(8): 5602~5605
- 17 K. Y. Luo, J. Z. Lu, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(13-14): 4783~4788
- 18 Zhu Xiangqun. A Study on the Substructural Characteristics and Evolutional Mechanisms of Materials Imposed by High Strain Rate Loading[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2005
朱向群. 高应变率下材料亚结构特征及其变化规律的研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2005
- 19 X. Zhu, M. Zhou, Q. Dai *et al.*. Deformation modes in stainless steel during laser shock peening[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering A*, 2009, **131**(5): 054503
- 20 Zhang Junbao, Chen Aiyong, Song Hongwei *et al.*. Microstructure and properties of surface nanocrystallized AISI 304 stainless steel[C]. The 2006 Beijing International Material Week. Beijing: Chinese Materials Research Society, 2006. 396~400
张俊宝, 陈爱英, 宋洪伟 等. 表面纳米化 AISI 304 不锈钢组织和性能[C]. 2006 北京国际材料周. 北京: 中国材料研究学会, 2006. 396~400
- 21 P. C. Chou, A. K. Hopkins. Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading[M]. Air Force Materials Laboratory, Wright Patterson AFB, OH, 1973
- 22 M. A. Meyers. Dynamic Behavior of Materials[M]. New York: Wiley-Interscience, 1994
- 23 Hu Yongxiang. Research on the Numerical Simulation and Impact Effects of Laser Shock Processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008

栏目编辑: 宋梅梅