线偏振激光斜冲击实验与理论研究

孙博宇[1,2]，乔红超[1,2]，陆莹[1,2]，赵吉宾[1,2]，吴嘉俊[1,2,3]，胡太友[1,2,3]，杨灏[4]

（1.中国科学院沈阳自动化研究所 装备制造技术研究室，沈阳 110016；
2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院，沈阳 110016；
3.中国科学院大学 计算机与控制学院，北京 100049；
4.美国阿拉巴马大学 机械工程系，塔斯卡卢萨 AL35487）

摘 要：目的 研究激光冲击强化中冲击角度对强化效果的影响。**方法** 采用波长为 1064 nm、脉冲能量为 7 J、脉冲宽度为 12 ns 的 YAG 激光器对 TC4 钛合金表面进行冲击强化处理，得到经不同偏振方向、冲击角度冲击后的材料的表面形貌、硬度和残余应力。通过菲涅耳定律分析了不同偏振光斜冲击加工效果的差异。**结果** 随着冲击角度的增大，冲击后形成的微坑深度逐渐减少，且正交偏振光减少的程度大于平行偏振光减少的程度，在超过 30°的时候尤为明显。随着冲击角度的增大，试样表面显微硬度逐渐下降，当用平行偏振光斜冲击时，硬度下降较慢；而用正交偏振光斜冲击且冲击角度超过 15°时，硬度下降较快。随着冲击角度增加，由于“残余应力洞”的影响，中心残余压应力值先增大后减少。**结论** 在一定情形下，选用一定角度的斜冲击可以有效避免残余应力洞的产生。该研究得到的结论可以为复杂结构件激光冲击强化冲击轨迹规划提供一定的参考。

关键词：激光技术；激光冲击强化；冲击角度；偏振方向；钛合金

中图分类号：TN249; TG668 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)01-0126-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.016

Experiment and Theoretic Analysis of Linear Polarized Laser Oblique Shock

***SUN Bo-yu*[1,2], *QIAO Hong-chao*[1,2], *LU Ying*[1,2], *ZHAO Ji-bin*[1,2], *WU Jia-jun*[1,2,3], *HU Tai-you*[1,2,3], *YANG Hao*[4]**

(1.Equipment Manufacturing Technology Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3.School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Dept. of Mechanical Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa AL35487, USA)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of shock angles on the strengthening effect for laser shock peening. TC4 titanium alloy samples were treated by YAG laser system with wavelength of 1064 nm, pulse-energy of 7 J and pulse-width of 12 ns. The surface topography, residual stress and microhardness of the samples shocked in different polarization directions by different shock angles were obtained. The difference of impact processing effect for different polarized oblique laser was analyzed by the Fresnel's law. With the increase of the shock angle, the pit depth of the samples caused by the shock gradually reduced. The depth decrease by the orthogonal polarization laser was more obvious compared with that by the parallel polarization laser, par-

收稿日期：2018-07-16；修订日期：2018-09-24

Received：2018-07-16；**Revised**：2018-09-24

基金项目：国家重点研发计划（2016YFB1102704）；国家基金委-辽宁省联合基金（U1608259）；国家自然科学基金（51501219）

Fund：National Key Development Program (2016YFB1102704), NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259) and National Natural Science Foundation of China (51501219)

作者简介：孙博宇（1992—），男，硕士，主要研究方向为激光加工。

Biography：SUN Bo-yu (1992—), Male, Master, Research focus: laser processing.

通讯作者：乔红超（1982—），男，硕士，副研究员，主要研究方向为激光加工。邮箱：hcqiao@sia.cn

Corresponding author：QIAO Hong-chao (1982—), Male, Master, Associate researcher, Research focus: laser processing. E-mail: hcqiao@sia.cn

ticularly when the angle exceeded 30°. As the shock angle increased, the microhardness of samples gradually decreased. The microhardness decreased slowly for parallel polarized laser. However, the microhardness decreased rapidly for orthogonal polarized laser when the shock angle exceeded 15°. When the shock angle increased, the centeral residual stress increased first and then decreased. The residual stress hole can be solved effectively by choosing the appropriate shock angle in some cases. The conclusions can provide guidance for the laser shock peening trajectory planning of complex structures workpieces.

KEY WORDS: laser technique; laser shock peening; shock angle; polarization direction; titanium alloy

激光冲击强化作为一种先进的材料表面改性技术，由于其强化限制少、可控性强、强化效果好和无热影响区等优点，已经被广泛应用于航空航天材料表面强化领域[1-3]。其原理为激光器输出的脉冲激光辐射到金属表面的吸收层上，吸收层快速吸收激光能量，形成高温、高压且不断膨胀的等离子体，膨胀的等离子体在材料表面形成冲击波压力。由于受到约束层的限制，冲击波向材料内部传播并带动质点运动，当冲击波压力超过材料的动态屈服强度时，材料发生塑性变形[4-5]。因此，残余压应力场在强化后的区域上形成，同时伴随位错、孪晶等微观组态的改变，使得材料表层组织的力学性能得到改善，从而提高材料疲劳寿命、硬度、耐磨性等相关性能[6-8]。但是对于某些复杂结构件，如航空发动机整体叶盘、盘榫连接件、齿轮等零件，由于零件其他部位的遮挡，在加工过程中激光难以垂直入射待强化区域[9-10]，而采用斜冲击的方式进行强化能够一定程度上解决上述问题。目前，国外公开的激光冲击强化技术涉及冲击角度的细节较少，且国内对激光冲击强化冲击角度理论研究不够深入。张永康等[11]对激光斜冲击进行了实验研究，发现随着激光入射角度的增大，强化面积变大，激光能量密度减小，凹坑的深度越来越浅。澳洲学者 Yang 等[12]采用三维有限元仿真，分析了 AA7050-T7452 铝合金弧形圆棒激光冲击强化的动态应力场和残余应力场。研究表明，几何形状和激光冲击强化参数均会影响曲面强化残余应力场的均匀性。王静雪等[13]通过数值模拟的方法研究了不同角度的激光冲击强化对航空铝合金 2024 残余应力场的影响规律。以上研究对推动斜冲击理论研究具有一定意义，但是并没有考虑激光偏振态对加工效果的影响。当激光束以材料法线方向入射时，强化效果与光束的偏振方向关系不大；但以一定角度斜冲击时，激光光束的偏振方向与入射角所在平面的相对位置对加工效果有着很大的影响。

本文以钛合金 TC4 为研究对象，研究了不同冲击角度的平行偏振光和正交偏振光对材料表面形貌、硬度、残余应力的影响。理论分析了不同偏振方向激光斜冲击的影响机制。本研究得到的结论可以为复杂结构件激光冲击强化轨迹规划和参数设置提供一定的参考。

1　实验材料及方法

实验设备采用中国科学院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-LSP-1 型激光冲击强化设备。YAG 脉冲激光器的最大脉冲能量为 7 J，波长为 1064 nm，脉宽为 12~18 ns，重复频率为 2 Hz，从激光器输出的直径为 22 mm 的激光束经全反射和聚焦透镜聚焦在工件表面上，形成直径为 2.4 mm 的光斑。激光器窗口镜前加水平偏振片，如图 1 所示，输出激光为线偏振激光，且偏振方向与水平面平行。线偏振激光不同方向倾斜冲击示意图如图 2 所示，冲击角度为工件法线方向与激光光束传输方向的夹角。工件可以在两个方向倾斜：当工件在水平方向倾斜时，激光振动面与倾斜角度所在平面平行，为平行偏振光冲击试样；当工件在竖直方向倾斜时，激光振动面与倾斜角度所在平面垂直，为正交偏振光冲击试样。采用 6 轴机械手带动工件旋转，调整试样位置，从而确定激光与试样的夹角。本文实验中所用参数为：激光能量 7 J，脉冲宽度 12 ns，冲击角度 0°~60°。

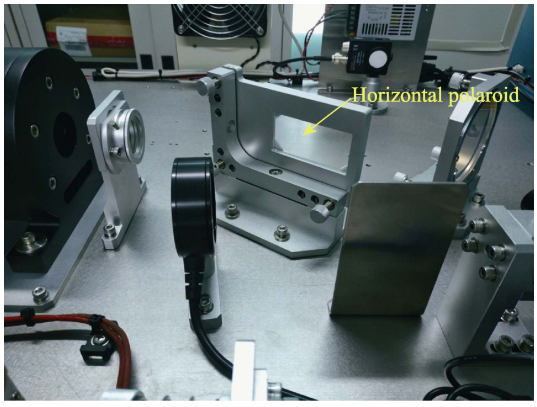


图 1　水平偏振片
Fig.1 Horizontal Polaroid

本次实验选取的材料为 TC4 钛合金板片，表面尺寸为 20 mm×20 mm，厚度为 5 mm。采用黑胶带作为激光冲击强化的吸收层，采用过滤后的自来水作为约束层，通过稳压泵、流量阀和 ACR-HNDS100 白光共焦位移传感器精确调节和测量水层厚度，使水层平稳且厚度为 1.2 mm。同一位置、不同时刻测量的水层厚度波动情况如图 3 所示。图中 Distance1 代表测量头与水层上表面距离，Thickness 代表水层厚度。试验前对 TC4 钛合金板片进行打磨抛光，之后用酒精清洗，并用氮气吹干。前处理之后，对试样进行不同角度激光冲击试验，冲击后的试样如图 4 所示。

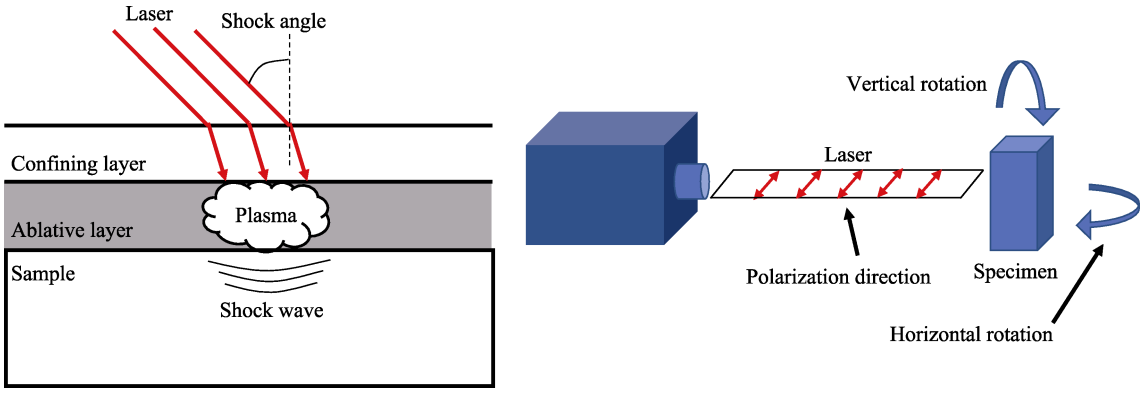


图 2　斜激光冲击原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of the oblique LSP process

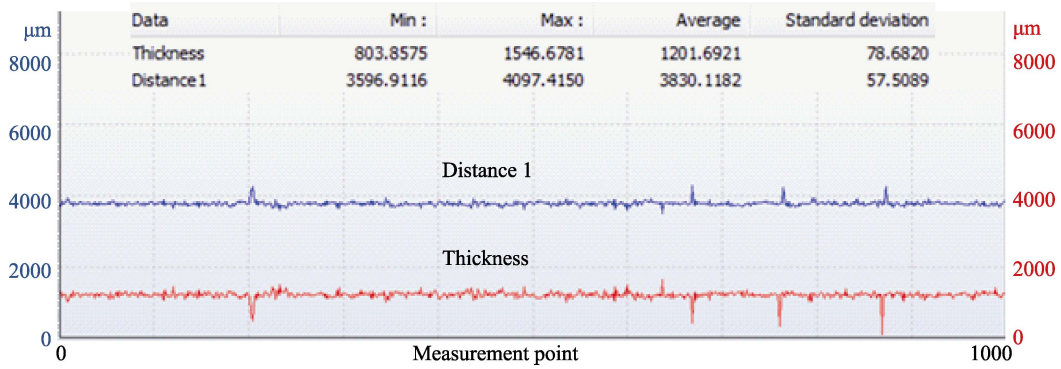


图 3　水层厚度波动情况
Fig.3 Fluctuation of water layer thickness

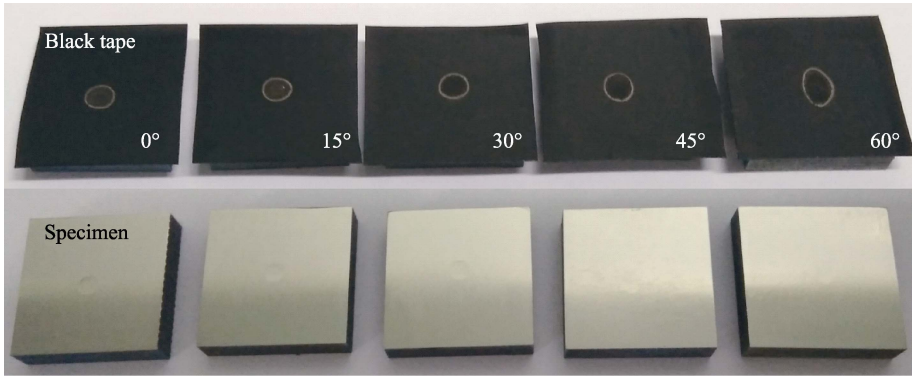


图 4　激光冲击强化后的试样
Fig.4 Specimens after LSP

在激光冲击强化试验后，使用 Alpha-StepIQ 接触式表面轮廓仪获取斜冲击形成的椭圆形凹坑的表面形貌，规定 x 方向为椭圆短轴方向，y 方向为椭圆长轴方向。依据 EN-15305—2008 标准，在 LXRD 大功率残余应力测试仪上进行残余应力测试，选用 Cu-Kα 特征曲线，波长 0.1 541 838 nm，衍射晶面（213），2θ 角为 142°，准直管半径 ϕ 为 1 mm。采用北京时代之峰科技有限公司的 THVS-1 型数字显微硬度仪，每隔 0.5 mm 测量试样 y 方向的表面硬度，载荷为 4.9 N，加载时间为 15 s，每处测量点附近区域测量三次，取平均值。

2　结果及分析

2.1　表面形貌

在激光冲击过程中，当激光辐照在试样表面吸收层上的黑胶带时，黑胶带吸收能量，出现熔化、气化和喷溅等现象（如图 4），此时试样表面产生高压等离子体，等离子体形成应力波进行强化[14]。采用 Duma 光束质量分析仪在焦点处测量激光光强分布，光束质量如图 5 所示。从图 5 中可以看出，激光光束呈圆形，光斑尺寸为 2.4 mm，光强在不同方向分布较为均匀，

水平和垂直方向的光强范围差距不大；光束中间光强呈平顶分布，边缘具有一定的梯度。图 6a、b 分别表示平行偏振光冲击后，试样凹坑长短轴的表面形貌；图 7a、b 分别表示正交偏振光冲击后，试样凹坑长短轴的表面形貌。对于垂直冲击，激光强化后在表面形成约为 2.5 mm 的圆坑，略大于光斑尺寸，原因是冲击波的横向膨胀效应导致未辐照区域也受到冲击[15]。圆坑整体形貌与光强分布曲线较为接近，两个方向圆坑宽度相同，说明光斑对称性较好。从图 6 和图 7 中可以看出，对于不同偏振方向、角度的凹坑，短轴的宽度基本一致，凹坑长轴宽度随着冲击角度的增加而略有增大，但增加程度小于辐照面积的增加。这是由于，光束边缘具有一定能量衰减，尽管斜冲击时，边缘辐照面积增加，但能量过小，使其无法产生塑性变形。图 8 为图 6、7 中不同偏振方向激光斜冲击形成的凹坑中心 1 mm 内的平均深度。从图 8 可以看出，随着角度的增大，坑深逐渐减少。这是因为，随着冲

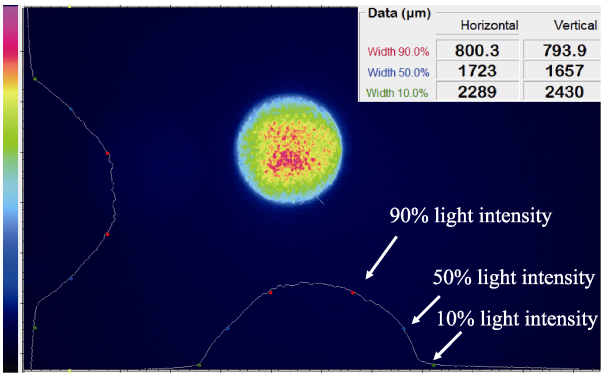


图 5　光束质量
Fig.5 Beam quality

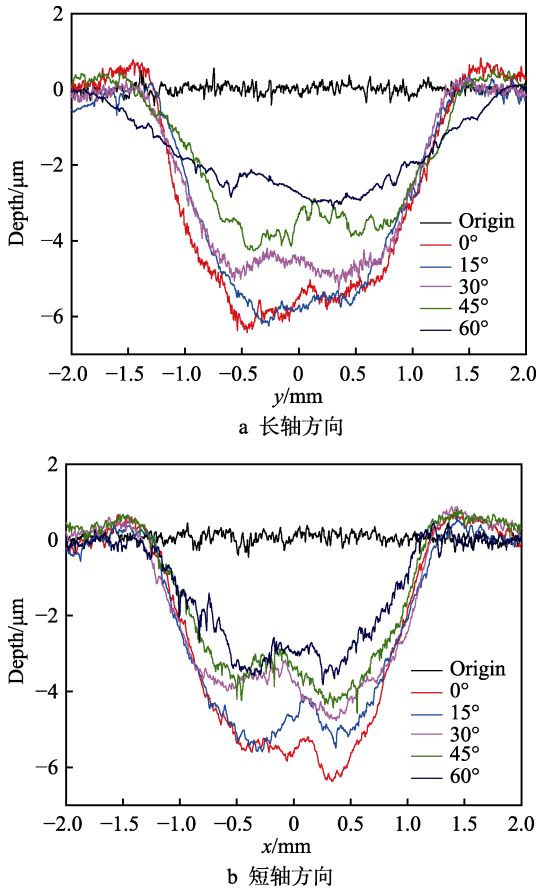


图 6　平行偏振光斜冲击后材料表面形貌
Fig.6 Surface topography of materials after parallel polarized laser oblique shock:
a) long axis direction; b) short axis direction

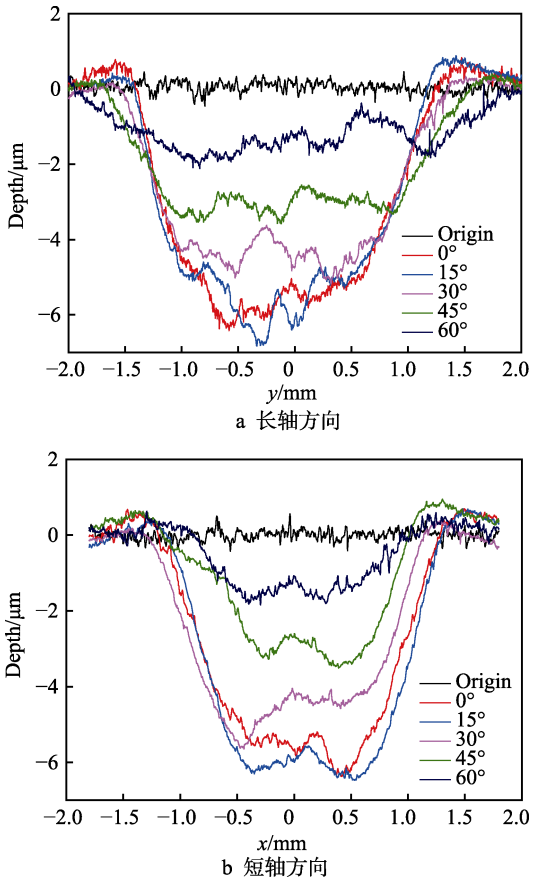


图 7　正交偏振光斜冲击后材料表面形貌
Fig.7 Surface topography of materials after orthogonal polarized laser oblique shock:
a) long axis direction; b) short axis direction

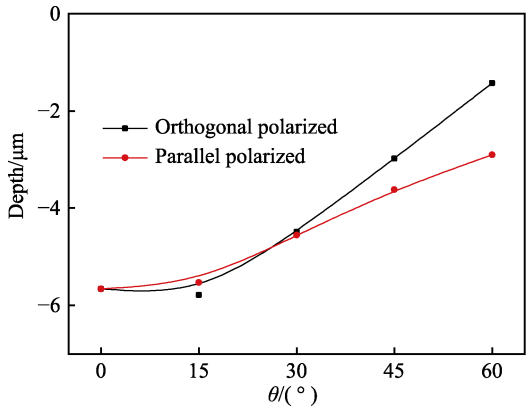


图 8　不同偏振方向激光斜冲击形成的凹坑深度
Fig.8 Depth of pits formed by laser oblique shock in different polarization directions

击角度的增大，辐照区域增大，激光功率密度减少，导致强化效果降低，且正交偏振光减少的程度大于平行偏振光减少的程度，在超过 30°的时候尤为明显。不同角度冲击后微坑对称性较好，说明长轴两端受到的冲击力较为均匀，冲击波传播方向为材料表面垂直方向，偏心情况可以忽略。因此，在大角度斜冲击时，平行偏振光冲击产生的冲击波压力大于正交偏振光冲击产生的。

2.2　显微硬度

图 9 为不同偏振光、角度冲击后，试样凹坑长轴的显微硬度。由图可知，基体的显微硬度在 290HV 左右，垂直冲击后，硬度最大达到 370.8HV。随着冲击角度的增大，辐照区域增大，激光功率密度减少，导致试样表面显微硬度逐渐下降。当平行偏振光斜冲击时，硬度下降较慢，冲击角度为 60°时，最大硬度为 353.4HV；而对于正交偏振光斜冲击，当冲击角度超过 15°时，硬度下降较快，强化效果不明显，且随着角度继续增大，强化区域硬度逐渐接近基体硬度。因此，在大角度斜冲击时，应选择平行偏振光，即保证工件偏转方向与激光偏振方向平行，达到最优的强化效果。

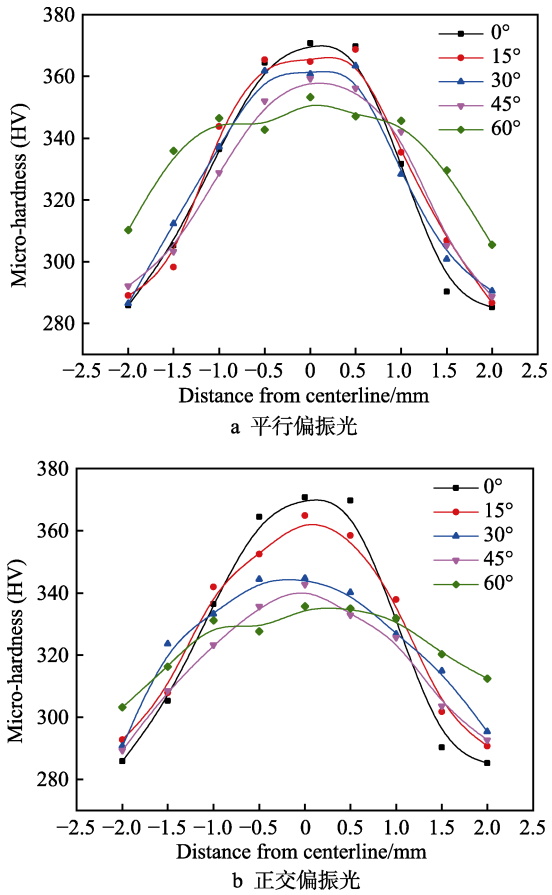


图 9　不同偏振方向激光斜冲击后材料表面显微硬度
Fig.9 Microhardness of material surface after laser oblique shock in different polarization directions: a) parallel polarized; b) orthogonal polarized

不同偏振方向激光斜冲击强化效果差异分析如下：在强化前，激光先穿过一定厚度的水膜，由于以一定角度斜入射，当线偏振激光通过空气和水面的交界处时，入射光分为反射光和折射光两部分，由菲涅耳公式推导[16]可以求出，不同偏振方向的两部分光的强度和振动的取向。

平行偏振光反射光和折射光强度和方向为：

$$r_1=\frac{E_{\theta_2}}{E_{\theta_1}}=-\frac{\tan(\theta_1-\theta_3)}{\tan(\theta_1+\theta_3)} \tag{1}$$

$$t_1=\frac{E_{\theta_3}}{E_{\theta_1}}=\frac{2\sin\theta_3\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_3)\cos(\theta_1-\theta_3)} \tag{2}$$

正交偏振光反射光和折射光强度和方向为：

$$r_2=\frac{E_{\theta_2}}{E_{\theta_1}}=-\frac{\sin(\theta_1-\theta_3)}{\sin(\theta_1+\theta_3)} \tag{3}$$

$$t_2=\frac{E_{\theta_3}}{E_{\theta_1}}=\frac{2\sin\theta_3\cos\theta_1}{\sin(\theta_1+\theta_3)} \tag{4}$$

公式中，r_1、r_2 分别代表不同偏振方向入射光与反射光振幅比，t_1、t_2 分别代表不同偏振方向入射光与透射光振幅比，θ_1 表示入射角，θ_2 表示反射角，θ_3 表示透射角。由公式（1）—（4）可知，以一定角度入射时，正交偏振光反射后产生的反射光的光振幅比平行偏振光的振幅大；正交偏振光透射后产生的透射光的光振幅比平行偏振光的振幅小，且角度越大，不同偏振光透射后振幅相差越大。当入射角度为 60°时，不同偏振方向光强相差 7%以上。由于光强减少，形成的等离子冲击波压力也一定程度地减少，这导致了不同偏振方向激光斜冲击材料后强化效果的差异。

2.3　残余应力

图 10 为垂直冲击后，材料表面每隔 0.5 mm 的残余应力值。由图可知，中心残余应力较低，发生“残余应力洞”现象。Peyre 等人[17]通过实验研究激光冲击强化铝合金时也观察到类似现象，进行深入研究后，得出该现象是由冲击加载区域的边界效应引起的。在强化过程中，辐照边缘会产生诸如稀疏波和剪切波等表面波，这些表面波向激光冲击区域中心汇聚，引起中心的反向塑性应变，降低此处表面残余压应力水平，并导致中心强化效果降低，进而使整体残余应力场分布不均。

图 11 为不同偏振光、角度冲击后，试样中心的残余压应力值。由图可知，随着角度增加，中心残余压应力值先增大后减少，且平行偏振光超过 45°时，残余压应力开始减少，而正交偏振光超过 15°时，残余压应力开始减少。随着冲击角度增大，中心残余应力增加的原因为：1）由于冲击角度改变冲击形状，因此不同方向的稀疏波和剪切波相比，圆光斑汇集到中心的时间不同，原理图如图 12 所示，这能一定程度上抑制“残余应力洞”现象，改善工件表面残余应力

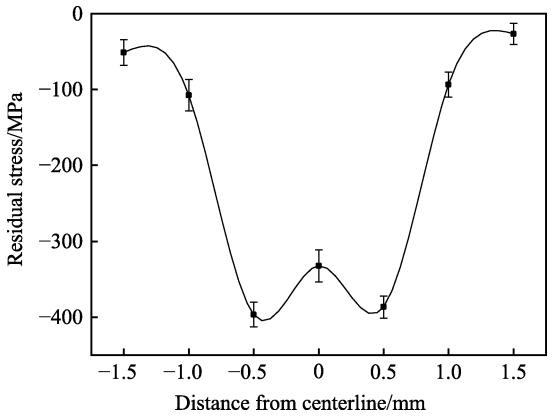


图 10　垂直冲击后材料表面的残余应力

Fig.10 Residual stress of material surface after vertical impact

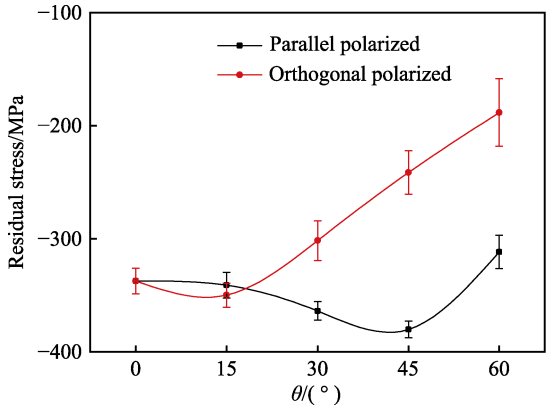


图 11　不同偏振方向激光斜冲击后材料表面残余应力

Fig.11 Residual stress of material surface after laser oblique shock in different polarization directions

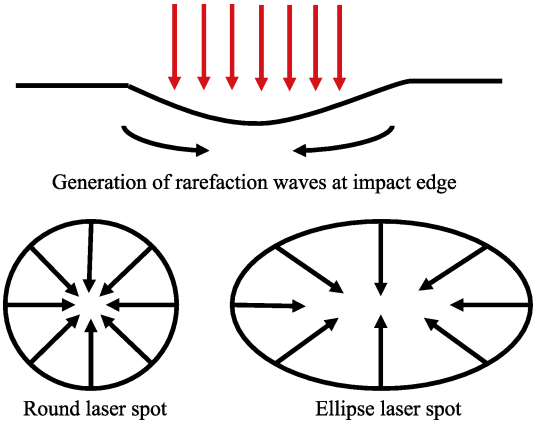


图 12　不同形状光斑形成残余应力洞效果分析

Fig.12 Generation analysis of residual stress hole by spots in different shapes

的分布；2）随着冲击角度增加，激光功率密度减少，在边界形成的稀疏波和剪切波的强度降低，从而降低“残余应力洞”形成的强度。但角度增加过多，冲击面积增加导致冲击波压强过小，使得形成的残余压应力降低。因此，残余压应力随着角度增加，先升高后降低。由于正交偏振光形成的冲击波压力小于平行偏振光形成的冲击波压力，当冲击角度超过 30°时，中心残余压应力减少过快，不利于强化。

在现有的激光冲击强化应用中，为了解决残余应力洞现象，通常采用方形光斑进行控制，方形光斑各点边界到中心距离不同，边缘产生的表面波不具有中心汇集效应[17]。但是方光斑也具有一定的缺点：1）使用光学衍射镜导致光路成本较高；2）光学衍射镜容易造成能量损失，约为 8%；3）容易形成鬼像，降低强化效果；4）对复杂圆形边缘零件无法强化。而椭圆形光斑却无上述的缺点，因此，使用斜冲击是解决残余应力洞现象的有效方法之一。

3　结论

本文对钛合金激光斜冲击进行了实验和理论研究，具体分析了经不同偏振方向、不同冲击角度冲击后，材料的表面形貌、硬度和残余压应力，并理论分析了不同偏振方向激光斜冲击的影响机制。具体结论如下：

1）经不同偏振方向、不同角度冲击的凹坑短轴的宽度基本一致，而凹坑长轴宽度随着冲击角度的增加略有增大。对于坑深，随着角度的增大，坑深逐渐减少，且正交偏振光冲击的减少程度大于平行偏振光冲击的减少程度，在超过 30°的时候尤为明显。不同角度冲击后，微坑对称性较好，说明长轴两端受到的冲击力较为均匀。

2）随着冲击角度的增大，试样表面显微硬度逐渐下降。平行偏振光斜冲击时，硬度下降较慢；而对于正交偏振光斜冲击，当冲击角度超过 15°时，硬度下降较快。并通过菲涅耳定律计算出当入射角度为 60°时，不同偏振方向透射光振幅相差 7%以上。因此，在大角度斜冲击时，应选择平行偏振光，即保证工件偏转方向与激光偏振方向平行，达到最优的强化效果。

3）随着角度增加，中心残余压应力值先增大后减少，且平行偏振光超过 45°时，残余压应力开始减少，而正交偏振光超过 15°时，残余压应力开始减少。通过分析圆光斑斜冲击和方形光斑冲击的特点，得出选用圆光斑斜冲击是有效抑制“残余应力洞”的方法。

参考文献：

[1] YE C, LIU Y, SANG X H, et al. Solid state amorphization of nanocrystalline nickel by cryogenic laser shock peening[J]. Journal of applied physics, 2015, 118(13): 134902.

[2] QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, ZHANG Gong-xuan, et al. Effects of laser shock peening on microstructure and residual stress evolution in Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B alloy[J]. Surface & coatings technology, 2015, 276: 145-151.

[3] SALIMIANRIZ A, FOROOZMEHR E, BADROSSAMAY M, et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6[J]. Optics & lasers in engineering, 2016, 77: 112-117.

[4] 曹子文, 杨清, 高宇. 激光冲击强化 TC17 钛合金室温和高温拉伸性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 85-90.
CAO Zi-wen, YANG Qing, GAO Yu. Tensile properties at room and high temperature of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 85-90.

[5] YE Y X, XUAN T, LIAN Z C, et al. Investigation of the crater-like microdefects induced by laser shock processing with aluminum foil as absorbent layer[J]. Applied surface science, 2015, 339(1): 75-84.

[6] SEALY M P, GUO Y B, CASLARU R C, et al. Fatigue performance of biodegradable magnesium-calcium alloy processed by laser shock peening for orthopedic implants[J]. International journal of fatigue, 2016, 82: 428-436.

[7] CARALAPATTI V K, NARAYANSWAMY S. Analyzing the effect of high repetition laser shock peening on dynamic corrosion rate of magnesium[J]. Optics & laser technology, 2017, 93: 165-174.

[8] 乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1766-1773.
QIAO Hong-chao, ZHAO Yi-xiang, ZHAO Ji-bin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy[J]. Optics & precision engineering, 2014, 22(7): 1766-1773.

[9] SOKOL D W, CLAUER A H, DULANEY J L, et al. Applications of laser peening to titanium alloys[C]// Conference on lasers and electro-optics/quantum electronics and laser science and photonic applications, systems and technologies. Baltimore: Optical Society of America, 2005.

[10] FANG Y W, LI Y H, HE W F, et al. Numerical simulation of residual stresses fields of DD6 blade during laser shock processing[J]. Materials & design, 2013, 43: 170-176.

[11] 张永康, 张雷洪, 周建忠, 等. 激光斜冲实验与理论研究[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1437-1440.
ZHANG Yong-kang, ZHANG Lei-hong, ZHOU Jian-zhong, et al. Oblique angle laser shock experiment and theoretic analyse[J]. Chinese journal of lasers, 2005, 32(10): 1437-1440.

[12] YANG C H, HODGSON P D, LIU Q C, et al. Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening[J]. Journal of materials processing tech, 2008, 201(1): 303-309.

[13] 汪静雪, 章艳, 张兴权, 等. 激光参数对圆杆件残余应力场影响的数值模拟[J]. 中国激光, 2016(8): 132-139.
WANG Jing-xue, ZHANG Yan, ZHANG Xing-quan, et al. Numerical simulation of residual stress field induced in round rod part affected by laser parameters[J]. Chinese journal of lasers, 2016(8): 132-139.

[14] 乔红超, 赵吉宾. 钛合金激光冲击强化参数优化分析[J]. 光学学报, 2013, 33(f6): 136-140.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin. Analysis and optimization on laser peening parameters of titanium alloy[J]. Acta optica sinica, 2013, 33(f6): 136-140.

[15] 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.
ZHANG Ling-feng, REN Feng-zhang, ZHOU He-yu, et al. Experimental study on actual role area of plasma in laser shock processing[J]. Chinese journal of lasers, 2009, 36(5): 1224-1228.

[16] 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
LI Jing-zhen. Handbook of optics[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010.

[17] HU Y X, YAO Z Q. FEM simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots[J]. Acta metallurgica sinica (english letters), 2008, 21(2): 125-132.