

引用格式: CAO Yupeng, WANG Shuai, SHI Weidong, et al. Effect of Laser Shock on Microstructure of the Repair Layer of E690 High Strength Steel by Laser Cladding[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0414001

曹宇鹏,王帅,施卫东,等. 激光冲击对 E690 高强钢激光熔覆修复微观组织的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0414001

激光冲击对 E690 高强钢激光熔覆修复微观组织的影响

曹宇鹏^{1,2,3}, 王帅¹, 施卫东^{1,3}, 仇明³, 花国然¹, 李彬²

(1 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

(2 南通理工学院 机械工程学院, 江苏 南通 226002)

(3 南通中远海运船务工程有限公司, 江苏 南通 226006)

摘要:为研究激光冲击对 E690 高强钢激光熔覆修复层微观组织的影响, 选用专用金属粉末对 E690 高强钢试样预制凹坑进行激光熔覆修复, 并使用脉冲激光对激光熔覆层进行冲击强化处理, 同时采用扫描电镜、透射电镜和 X 射线应力分析仪分别对激光冲击前后激光熔覆层的微观组织和表面残余应力进行检测。结果表明: 激光熔覆修复后, 激光熔覆层组织为等轴晶, 熔覆层与 E690 高强钢基体之间冶金结合良好, 其表面残余应力为均匀分布的压应力。经激光冲击后, 激光熔覆层截面晶粒得到细化, 并观察到大量的形变孪晶, 互相平行的孪晶界分割熔覆层粗大晶粒, 在激光熔覆层的晶粒细化过程中发挥着重要作用; 试样表层位错在 $\{110\}$ 滑移面上发生交滑移, 在晶界周围形成了位错缠结。经激光冲击后, 激光熔覆层冲击区域表面残余压应力数值相较于冲击前提升了 1.1 倍。

关键词:激光加工; 激光冲击; 激光熔覆修复; E690 高强钢; 微观组织; 残余应力

中图分类号: TG668; TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215004.0414001

Effect of Laser Shock on Microstructure of the Repair Layer of E690 High Strength Steel by Laser Cladding

CAO Yupeng^{1,2,3}, WANG Shuai¹, SHI Weidong^{1,3}, QIU Ming³, HUA Guoran¹, LI Bin²

(1 School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226002, China)

(3 Nantong COSCO Shipping Engineering Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226006, China)

Abstract: In order to study the effect of laser shock on microstructure of the repair layer of E690 high strength steel by laser cladding, a special metal powder was selected to perform laser cladding on ready-made pits of E690 high strength steel, and the laser clad layer was subjected to surface mechanical strengthening treatment by laser shock processing. The microstructure and surface residual stress of the repair layer were characterized by a scanning electron microscope, transmission electron microscope and X-ray stress analyzer. The results show that, after laser cladding repair, the repair layer presents an equiaxed grain structure. There is a good metallurgical bond between the laser clad layer and the substrate. The

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 51505236, 51979138), 中国博士后科学基金面上项目 (No. 2019M651931), 国家重点研发计划 (No. 2019YFB2005300), 国家高技术船舶科研项目 (No. 工信部装函[2019]360 号), 江苏省高校自然科学基金项目 (No. 18KJB460023)

第一作者: 曹宇鹏 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光加工检测技术。Email: cyp19812004@ntu.edu.cn

导师: 施卫东 (1964—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为流体机械理论及海洋工程技术。Email: wdshi@ntu.edu.cn

通讯作者: 花国然 (1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光加工技术。Email: huagr@ntu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-11; **录用日期:** 2020-12-21

<http://www.photon.ac.cn>

residual stress on the surface of the repair layer is in a state of compressive stress. Following the laser shock processing, the cross-sectional grains on the repair layer are refined and a large number of deformation twins are observed. Coarse grains of the cladded layer are separated by parallel twin boundaries, which plays an important role in grain refinement process of the laser cladded layer. The dislocations on the surface of the sample experienced a slip on the $\{110\}$ slip surface, forming dislocation entanglements around the grain boundaries. After laser shock, the value of surface residual compressive stress of laser cladded layer increases by 1.1 times compared with that prior to the laser shock processing.

Key words: Laser processing; Laser shock; Laser cladding repair; E690 high strength steel; Microstructure; Residual stress

OCIS Codes: 140.3390; 160.3900; 350.2660; 350.5030

0 引言

海洋工程平台桩腿长期工作在高压、重载及盐碱的环境中,桩腿抬升齿条表面的点蚀、胶合、磨损和腐蚀将导致抬升齿条失效,进而影响海工平台的安全。激光熔覆修复(Laser Cladding Repair, LCR)是一种失效零部件表面修复与再制造的先进技术,具有可控性强、效率高、自动化程度高等优点,是失效工件表面修复和再制造的优良方法;但其修复过程中亦存在熔覆层温度分布不均匀、工艺参数不合理导致的气孔、裂纹、残余应力分布不均匀等熔覆层缺陷^{[1][2]}。激光冲击强化(Laser Shock Processing, LSP)作为金属材料表面强化的新手段,通过对激光熔覆层进行冲击强化处理,达到减少激光熔覆层缺陷、细化激光熔覆层晶粒及改善残余应力分布的目的。近年来,空军工程大学、装甲兵工程学院和江苏大学等单位的众多学者对激光冲击调控铁基、钛基等合金表面激光熔覆层组织性能方面开展了大量实验研究^[3-7],均通过激光冲击显著细化了激光熔覆层的表层晶粒并获得了分布均匀的残余压应力,效果显著。因此,利用激光冲击处理桩腿抬升齿条用材E690高强钢表面的激光熔覆修复层,并调控其微观组织与残余应力,为研究海工平台桩腿修复的工艺优化提供理论基础,具有实际意义。

本文使用专用合金粉末对E690高强钢试样预置凹坑进行激光熔覆修复,并借助X射线应力分析仪、扫描电镜、透射电镜观测激光熔覆修复后微观组织结构和残余应力分布;对激光熔覆层进行激光冲击强化处理,使用X射线应力分析仪检测表面残余应力,采用扫描电镜和透射电镜观察激光熔覆层的微观组织。对比分析激光冲击强化前后激光熔覆层的微观组织结构与残余应力分布,探究激光冲击对激光熔覆修复微观组织及残余应力的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

平板试样如图1所示,基体材料选用E690高强钢,试样尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。考虑到桩腿抬升齿条表面的常见点蚀缺陷,在1号、2号试样中心均预制了典型的圆台形凹坑,凹坑最大直径为 30 mm ,

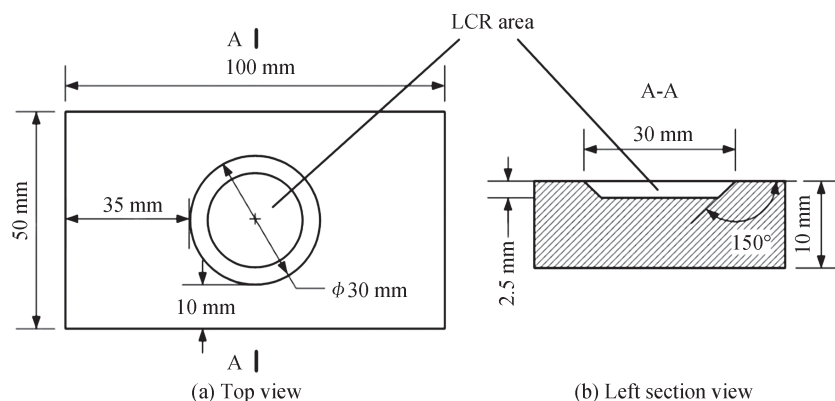


图1 平板试样
Fig. 1 Flat samples

深度为 2.5 mm,圆台形凹坑母线与上表面夹角为 150°。熔覆修复粉末选用 NVE690 高强钢粉末,粉末颗粒度为 45~105 μm ,纯度为 99.9%。基体与粉末的化学成分见表 1。其中 1 号试样只进行激光熔覆修复,2 号试样在激光熔覆修复后对熔覆修复表层再进行激光冲击强化处理。

表 1 基体与粉末化学成分的质量分数(单位:%)

Table 1 Chemical composition quality score of substrate and powder(unit: %)

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Fe
Substrate	0.18	0.50	1.60	0.02	0.01	1.50	3.50	0.70	0.08	Bal.
Powder	0.14	0.27	1.36	0.02	0.01	0.16	0.24	0.13	0.08	Bal.

1.2 试验过程

激光熔覆修复试验使用东南大学激光熔覆修复实验台。该实验台主要组成部分有激光器(TRUMPF LASER Trudiode 3006,最大输出功率为 3 000 W,波长为 1 030 nm)、普雷斯特熔覆头(YC52)、双筒送粉器和一个四轴数控机床(AFS-1280)。激光熔覆修复过程采用同轴氮气保护,保护气流速为 6 L/min,同步同轴送粉气压强为 0.6 MPa,激光模式为 TEM₀₀,扫描路径为预置凹坑圆周到圆心的螺旋线。根据课题组以往研究结果,优选工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光熔覆修复过程工艺参数

Table 2 Process parameters of laser cladding repair process

Pulse width /ns	Laser power /W	Diameter of laser spot /mm	Overlap /%	Powder feeding rate/(g·min ⁻¹)	Laser scanning speed/(mm·min ⁻¹)
15	1 000	2	62.5	6	700

激光冲击试验使用温州大学激光冲击实验台。该实验台包括北京 SGR-extra 镭宝激光器(激光能量最大为 12 J,光斑直径范围为 3~5 mm,激光波长为 1 064 nm,脉宽为 15 ns)、德国 KUKA 六自由度机器人及夹具平台。采用激光单点冲击激光熔覆层(包括单点一次冲击、单点多次冲击),通过 X 射线应力分析仪获得激光冲击加载点表面残余压应力值及分布,根据表面残余压应力值及分布对激光参数进行了优选,本文选用激光冲击的能量为 10 J,光斑直径为 4 mm,搭接率为 50%,在一次冲击完成后回到起始点,以相同激光参数再次进行冲击,重复冲击三次。冲击区域 20 mm×20 mm,使用厚度约为 0.1 mm 的铝箔作为吸收层,厚度约为 2 mm 的去离子水作为约束层。冲击区域与光斑搭接方案如图 2 所示。

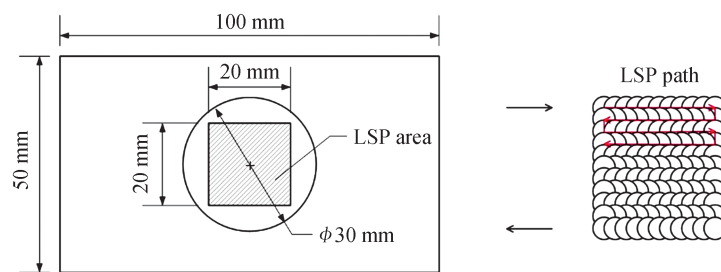


图 2 激光冲击区域与光斑搭接方案

Fig. 2 Laser shock area and light spots overlap

1.3 分析与检测

利用 DPF-2 型电解抛光仪对激光熔覆修复后的试样进行表面抛光,其中 2 号试样在抛光后进行激光冲击强化处理。采用芬兰 Xstress3000 G2R X 射线应力分析仪测量 1、2 号试样表面残余应力,共测量 41 个点,测量点分布如图 3 所示。残余应力测试基本参数为:准直管直径为 1 mm,靶材为 Cr 靶,布拉格角为 156.4°,管电压为 30 kV,管电流为 6.7 mA,曝光时间为 14 s,采用侧倾法(Modified χ)测量。将 1 号激光熔覆修复试样截取成 10 mm×10 mm×2 mm 大小,如图 4(a)所示,利用 Rigaku Ultima IV X 射线衍射仪对激光熔覆层进行物相分析,X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)过程中采用连续扫描方式,2 θ 角范围为 5°~90°,扫描速度为 4°/min,数据点间隔 0.02°。

以激光熔覆层上表面为基准面,沿垂直于激光熔覆修复工艺中激光扫描路径方向将1号、2号试样截取成 $5\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 大小。使用FEI Quanta 650F扫描电镜观察1号、2号试样截面方向微观组织形貌,使用FEI Tecnai G2 F20透射电镜观察1号、2号试样表层的微观组织形貌,利用扫描电镜自带的能谱仪(Energy Dispersive Spectrum, EDS)分析元素的分布情况。试样制备与观察方向如图4(b)所示。

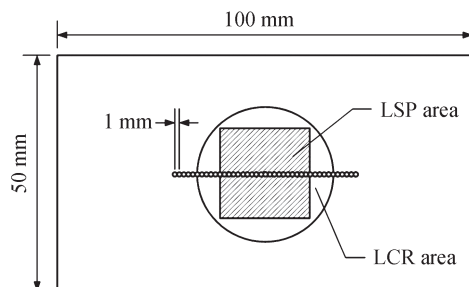


图3 残余应力测量点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of residual stress measurement points

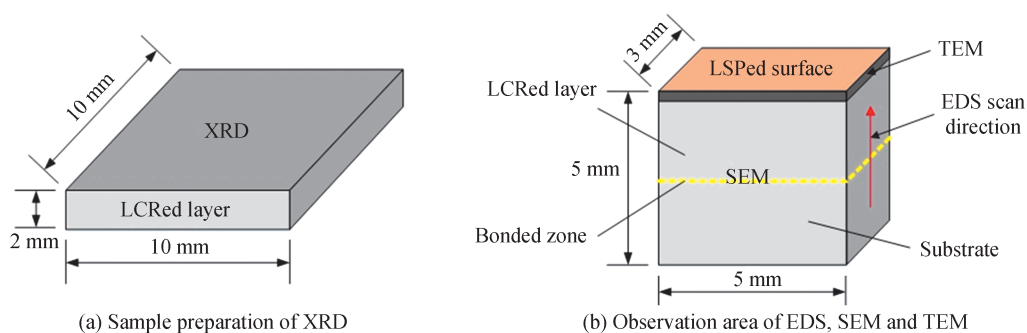


图4 各种测试方法对应的试样制备及观察区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sample preparation corresponding and observation area to various test methods

2 试验结果分析与讨论

2.1 物相分析

通过Rigaku Ultima IV X射线衍射仪对1号试样进行检测,获得了激光熔覆层的XRD图谱。利用Jade软件对XRD图谱依次进行不限定元素的主相检索、限定元素的次相检索和单峰检索,通过对XRD图谱的检索匹配,得到激光熔覆层的XRD物相分析结果如图5所示。由图5可见,激光熔覆层主要由体心立方(Body Centered Cubic, BCC)结构的 α -Fe、FeO、 SiO_2 、 Mn_3C_2 、 Fe_3C 等组成。在熔池刚形成时,熔池中的铁主要以液态铁、面心立方(Face Centered Cubic, FCC)结构的 γ -Fe和BCC结构的 δ -Fe的形式存在^[8],熔池中的Si作

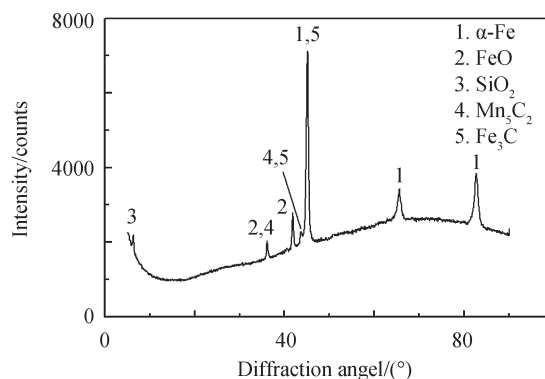


图5 1号试样激光熔覆层XRD图谱

Fig. 5 XRD pattern of repaired layer of sample No.1

为亲氧元素易与O元素结合生成 SiO_2 晶体,并伴随有少部分Fe元素结合O元素生成 FeO ,Mn元素结合C元素生成化合物 Mn_5C_2 。随后熔池迅速冷却,熔池中的铁全部转化为FCC结构的 $\gamma\text{-Fe}$ 形式,随着温度的进一步降低,FCC结构的 $\gamma\text{-Fe}$ 发生晶格改组形成BCC结构的 $\alpha\text{-Fe}$,由于 $\alpha\text{-Fe}$ 中C的溶解度远小于 $\gamma\text{-Fe}$,多余的C原子与Fe原子形成了 Fe_3C 。

2.2 显微组织分析

2.2.1 激光熔覆显微组织观察与分析

图6为1号试样截面扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM)形貌像与能谱线扫图。由图6(a)可以看出,根据组织形态的不同从顶部到底部可以分为四个区域:激光熔覆层、结合区、热影响区和基体。激光熔覆层组织呈现为等轴晶,没有出现裂纹、气孔等缺陷;激光熔覆层与基体之间存在结合区和热影响区,结合区宽约 $10\ \mu\text{m}$,热影响区宽约 $17\ \mu\text{m}$ 。

由图6(b)可以看出,激光熔覆层组织晶粒为等轴晶,晶界明显,晶粒尺寸在 $1\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间,用平均截距法测得表层晶粒平均尺寸为 $3.90\ \mu\text{m}$ 。激光熔覆层的显微组织结构为灰色晶粒结构A、浅白色晶粒结构B、白色球状析出物C和黑色析出物D。利用EDS分别对各种物相的元素含量进行检测,表3为图6(b)中各种物相的检测结果。根据EDS的检测结果可知:灰色晶粒A和浅白色晶粒B主要含Fe;白色球状析出物C主要含C、O、Si、Mn、Fe,其中C和Mn的原子个数比接近2:5;黑色析出物D主要含C、Fe,且C和Fe的原子个数比接近1:3。结合2.1节XRD的物相分析,根据EDS的检测结果可以确定:灰色晶粒A和浅白色晶粒B均为体心立方晶格的铁素体;白色球状析出物C为 SiO_2 、 FeO 和 Mn_5C_2 的混合物,但 SiO_2 和 FeO 的混合比例未知;黑色析出物D为球状 Fe_3C 。在液相转变为固相时,由于要满足两相间的平衡,晶粒从合金熔体中长出时会引起局部成分的变化。在激光熔覆的熔池凝固时,部分先形核凝固的晶粒使熔池中Mn元素含量升高,后凝固的晶粒中富集少量Mn元素,其抗腐蚀性能与先结晶晶粒存在差别,在扫描电镜下两者的形貌存在差异。

由图6(c)可以看出,各主要元素含量在结合区附近没有突变,C、Si、Cr、Mn、Cu等元素含量在基体与激

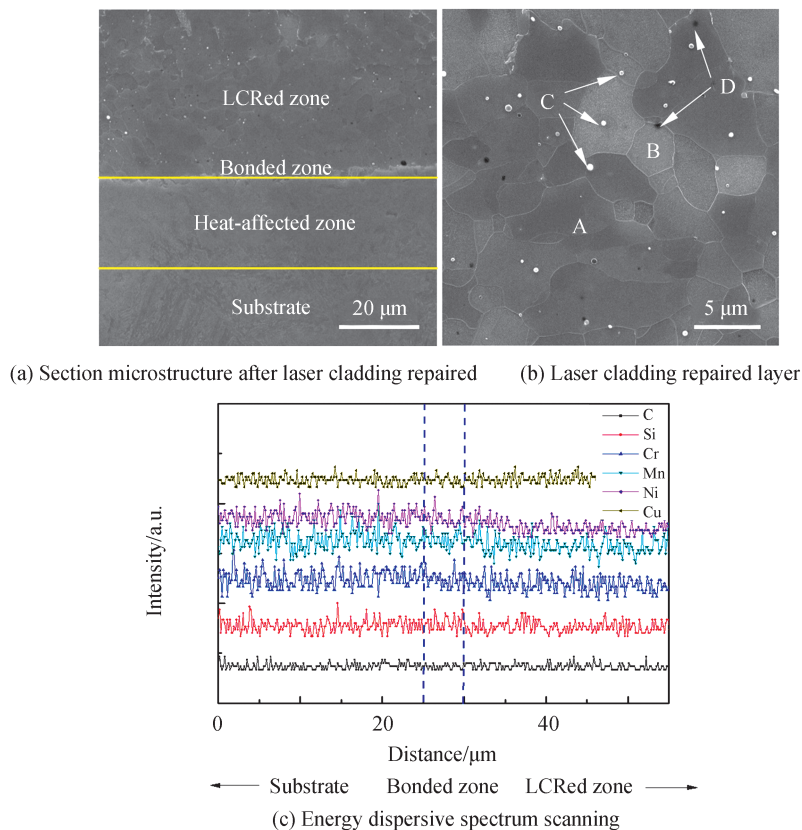


图6 1号试样截面SEM形貌像与能谱线扫图
Fig.6 SEM morphology and energy spectrum scanning of sample No.1

光熔覆层中趋于不变, Ni元素含量从基体到激光熔覆层有少许降低, 但未在结合区附近产生元素含量突变。结合区两侧的元素浓度梯度越低, 宏观成分偏析的程度越轻, 激光熔覆层与基体之间的冶金结合也就越好^[9]。依据能谱线扫描获得的结合区附近元素分布可推知, 激光熔覆层与基体之间冶金结合良好。

表3 1号试样激光熔覆层各区域原子分数EDS分析
Table3 EDS analysis of each area atomic fraction of sample No.1 repair layer

Area	C/%	O/%	Si/%	Mn/%	Fe/%
A	2.14	0.93	0.20	0.91	95.81
B	1.64	0.57	0.36	1.69	95.73
C	10.09	41.14	8.89	24.81	15.05
D	23.49	0.43	0.19	1.81	74.07

现有研究表明, 在利用激光、电子束等高能密度源进行表面处理时, 由于温度场的快速移动, 液相转变为固相时会发生快速凝固^[10]。在快速凝固过程中, 靠近基体一侧的熔体由于散热较快而有正的温度梯度 ($G > 0$), 因此此处晶粒呈定向生长状态, 晶粒生长方向由择优取向(立方晶系在 $[001]$ 晶向)与热流传导反方向共同决定; 而过冷熔体内部由于晶体形核结晶潜热的存在, 形核晶体的温度高于熔体温度, 即存在负的温度梯度 ($G < 0$), 形核后的晶粒在各个方向都具备生长动力, 会发生等轴状生长。在激光熔覆修复过程中由于熔池拥有极快的冷却速度, 在过冷熔体中等轴晶的临界生长速率 V 可以表示为^[11]

$$V = \frac{D\Delta T_0}{\Gamma k} + \frac{a\theta_i}{\Gamma} \quad (1)$$

式中, D 为液相中的扩散系数, ΔT_0 为结晶温度间隔, Γ 为 Gibbs-Thomson 系数, k 为平衡分配系数, a 为热扩散率, θ_i 为单位热过冷度。 $\frac{D\Delta T_0}{\Gamma k}$ 为晶体定向生长时的生长速率, $\frac{a\theta_i}{\Gamma}$ 为由过冷引起的生长速率。由于金属的热扩散系数 a 远大于液相扩散系数 D , 所以 $\frac{a\theta_i}{\Gamma}$ 远远大于 $\frac{D\Delta T_0}{\Gamma k}$ 。因此, 过冷熔体中等轴晶的生长速率要远大于定向生长时的生长速率, 结合区附近的定向生长也因此受到抑制, 故 SEM 形貌像中激光熔覆层中组织为等轴晶。

图7为1号试样表层典型激光熔覆层透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)形貌像。由图可以看出, 激光熔覆层组织为等轴晶。对熔覆层组织中不同取向的晶粒进行选区电子衍射(Selected Area Electron Diffraction, SAED), 衍射花样如图(b)中右上角所示, 标定后可以看出此晶粒属于面心立方晶格的奥氏体, 发生衍射的晶面其晶带轴在 $[356]$ 方向。由于激光熔覆层在凝固过程中冷却速度很快, 少部分奥氏体尚未发生晶格改组凝固过程就已经完成, 这部分奥氏体就残留在激光熔覆层组织中, 形成

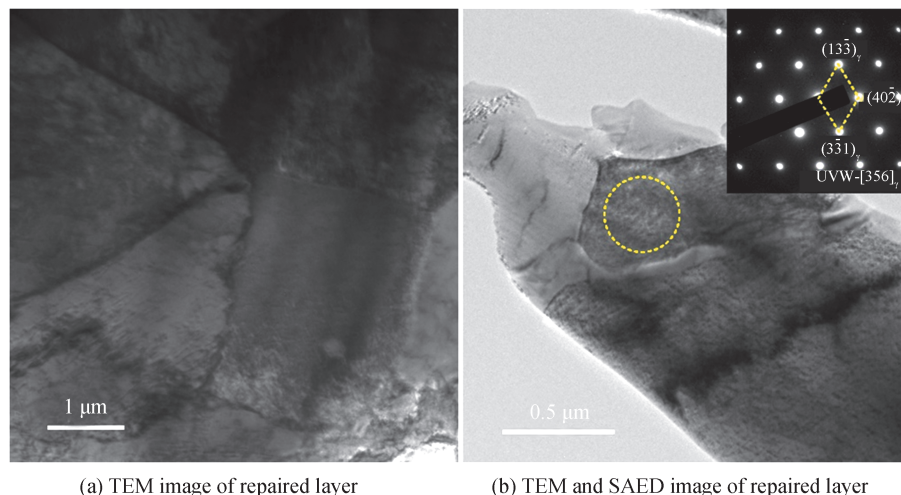
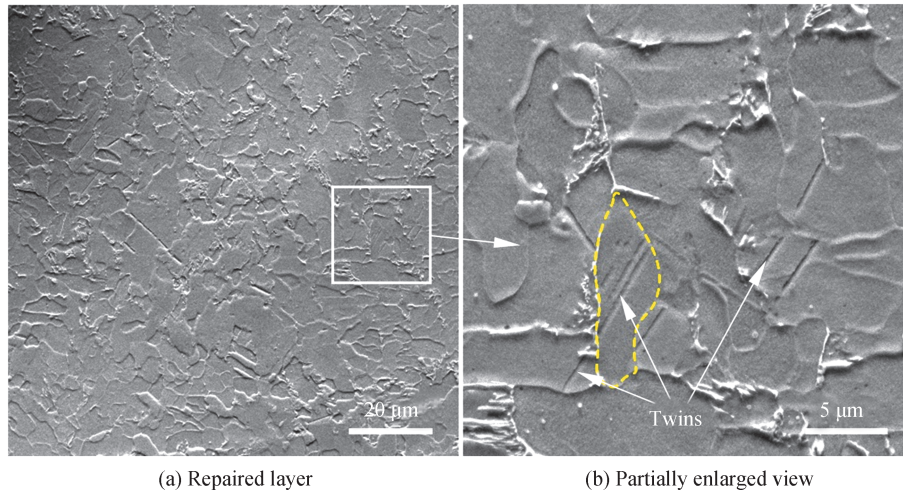


图7 1号试样表面典型 TEM 形貌像
Fig. 7 Typical surface TEM image of sample No.1

块状的残余奥氏体。

2.2.2 激光冲击对激光熔覆层微观组织的影响

图8为2号试样激光冲击后激光熔覆层截面SEM形貌像,其中图8(b)是图8(a)中方框位置的更高放大倍率的形貌像。与1号试样截面SEM形貌(图6)对比可见,晶粒组织在激光冲击后存在协调变形。用平均截距法测得表层晶粒平均尺寸为 $2.56\ \mu\text{m}$,对比激光冲击前1号试样的表层晶粒平均尺寸 $3.90\ \mu\text{m}$,可见激光冲击引起表层晶粒产生细化。众多研究表明,激光冲击引起的位错交织和孪晶交割将大晶粒细分成更小的亚晶,随着应变率的进一步提升,将会发生细小亚晶的动态再结晶,相邻亚晶的晶体学取向逐渐变得随机,亚晶界开始转变成晶界,由此晶粒得以逐步细化^[12,13]。孪晶界处富集杂质原子且孪晶界处原子点阵畸变要大于晶粒内部原子^[14],相较于晶内原子更容易被腐蚀剂腐蚀而形成凹坑,孪晶在SEM形貌像中表现出为划痕状^[15]。结合2.2.1节激光熔覆显微组织分析和图8(b)可以看出,激光熔覆层中下部组织出现形变孪晶(Twins)。2号试样激光熔覆层组织是多晶体结构,相邻晶粒取向不同,在高应变率加载下各个晶粒的变形程度也不同,大部分晶粒通过滑移系开动促使内部位错增殖与运动滞留应变,但有少部分晶粒所受切应力大于临界孪晶切应力,形成了形变孪晶。部分平行排布的孪晶界分割大晶粒,形变孪晶在激光冲击处理激光熔覆层的晶粒细化过程中发挥着重要作用。



(a) Repaired layer

(b) Partially enlarged view

图8 2号试样截面激光熔覆层典型SEM形貌像

Fig. 8 Typical SEM morphology of sample No.2 repaired layer

图9为2号试样激光冲击后表层区域典型TEM形貌像,通过观察可知,激光熔覆层组织经激光冲击后形成大量位错。如图9(a)所示,晶粒内部分布有高密度位错线(Dislocation Lines, DLs),有少部分位错线在晶界(Grain Boundary, GB)附近呈现近似平行排列。其原因为在低温时,体心立方金属只有最密排面 $\{110\}$ 所构成的滑移系参与滑移^[16],大部分位错在运动时产生了交滑移,其位错线方向变得随机,而有少部分位错在滑移系上运动时没有产生交滑移或者只伴随着少量的交滑移,所以这部分位错线以平行于滑移面 $\{110\}$ (Trace $\{110\}$)的形态存在^[17]。由图9(b)中可看出:局部高密度的位错相互交织纠缠在一起,形成了位错缠结(Dislocation Tangles, DTs)。在激光冲击的持续作用下,平行位错阵列和位错缠结会进一步演变为位错墙与位错胞,当应变进一步累积时,位错胞便会逐渐向亚晶粒演变,最终原始晶粒将不断细化^[18]。平行位错阵列和位错缠结在晶粒细化过程中发挥着重要的作用。

图10(a)和(b)是2号试样中典型的板条状马氏体TEM明暗场像。结合激光冲击前的激光熔覆层TEM形貌像(图7),对比观察可知,激光冲击诱导的剧烈塑性变形使激光熔覆层中各个晶粒间发生剪切,不稳定的残余奥氏体转变成板条状的马氏体,即激光冲击引发的形变诱导产生了马氏体相变;由于外部施加应力引发的塑性变形增加了马氏体的形核率,所以表现出的马氏体板条宽度相对于普通热处理形成的板条宽度要更窄^[19]。

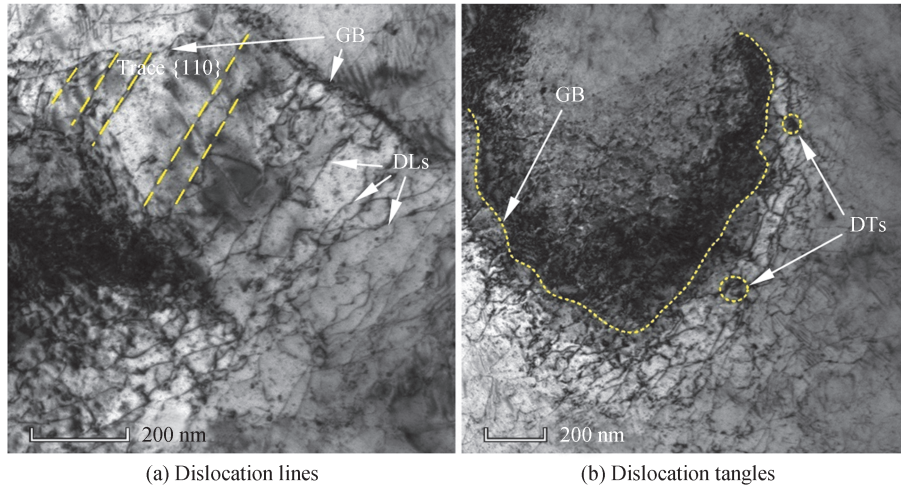


图9 2号试样激光冲击表层区域典型TEM形貌像
Fig. 9 Typical TEM image of the surface area by laser shock on sample No.2

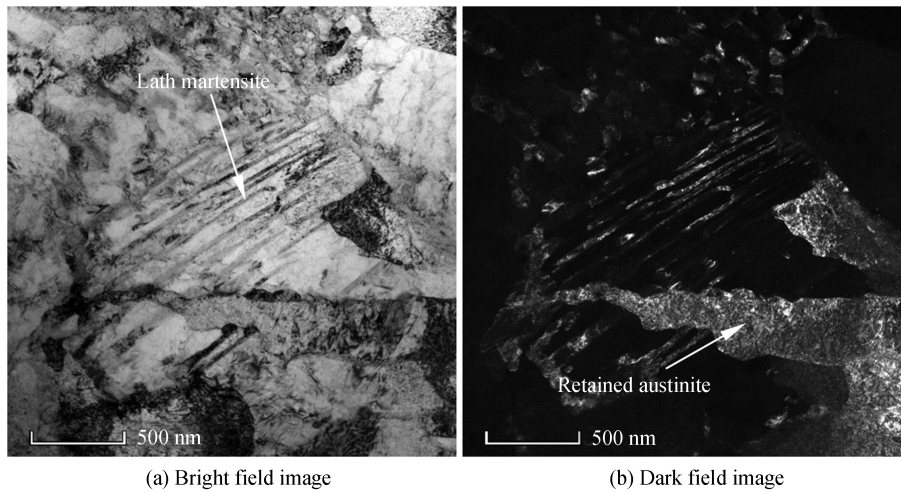


图10 2号试样激光冲击表层区域板条状马氏体形貌像
Fig. 10 Lath martensite image of the surface area by laser shock on sample No.2

2.3 表面残余应力

1、2号试样残余应力的测量结果如图11所示。在未进行激光冲击的1号试样表面,基体表面残余压应力为-111.2 MPa,激光熔覆层表面残余压应力为-212.9 MPa。在进行激光冲击后的2号试样表面,冲击区域与基体间的激光熔覆层残余压应力达到-520.2 MPa,冲击处理区域残余压应力达到-448.3 MPa,相较于

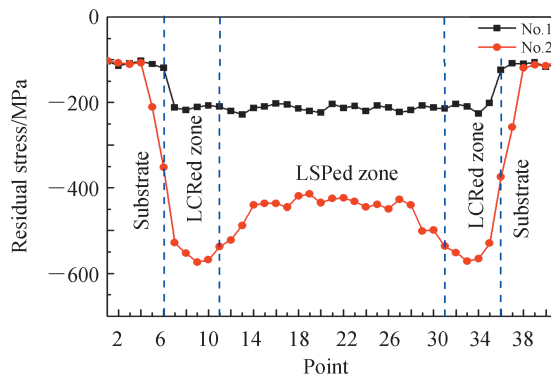


图11 1、2号试样残余应力测量结果
Fig. 11 Residual stress measurement results of sample No.1 and No.2

冲击前激光熔覆层残余压应力数值分别提升了1.4倍和1.1倍。

激光熔覆修复后,激光熔覆层的残余应力主要由三个部分决定:熔池加热过程中的相变应力,熔池凝固过程中的骤冷应力,以及凝固结束后激光熔覆层与基体一起冷却时产生的热应力^[20-21]。熔池中的相变应力数值较小,对激光熔覆层最终残余应力影响不大^[22];熔池凝固时,表层熔覆层温度梯度大,率先硬化并停止收缩,继而内部熔覆层凝固收缩时受到硬化表层熔覆层的限制,使内部熔覆层产生拉应力,表层熔覆层产生压应力,骤冷产生的表层压应力分布情况通常与激光加热的淬透深度有关^[23];在凝固结束后,由于激光熔覆层粉末化学成分与基体相差不大,激光熔覆层与基体在冷却时的形状变化相近^[24],因此该部分热应力趋向零。三部分对激光熔覆层表面的影响决定了其残余应力为压应力状态。基于上述分析,与基体和粉末化学成分相差巨大表层为拉应力的激光熔覆层相比,基体和金属粉末的化学成分相近对抑制激光熔覆层表面残余拉应力有着显著的作用。

激光冲击强化处理后,激光熔覆层残余应力的形成过程可由图12表示。第一阶段冲击波加载时如图12(a)所示:金属材料产生局部塑性变形,冲击波加载在激光熔覆层表面时,沿冲击波传播方向冲击区域发生局部塑性变形,同时表层残余奥氏体发生马氏体相变产生横向体积膨胀^[25],激光熔覆层组织对外有挤压作用,而基体限制激光熔覆层组织向外输送应变。第二阶段冲击波作用消失后如图12(b)所示:经多次激光冲击激光熔覆层冲击区域晶粒逐步细化,硬度大幅提升^[26-27],其表面晶面间距被挤压变小,衍射峰不断向高角度偏移,表现为表面残余压应力值增大;同时,硬化的塑性变形区域与基体一起相互限制材质较软的激光熔覆层组织,致使冲击区域与基体之间的激光熔覆层表面也呈现出较大的残余压应力状态。

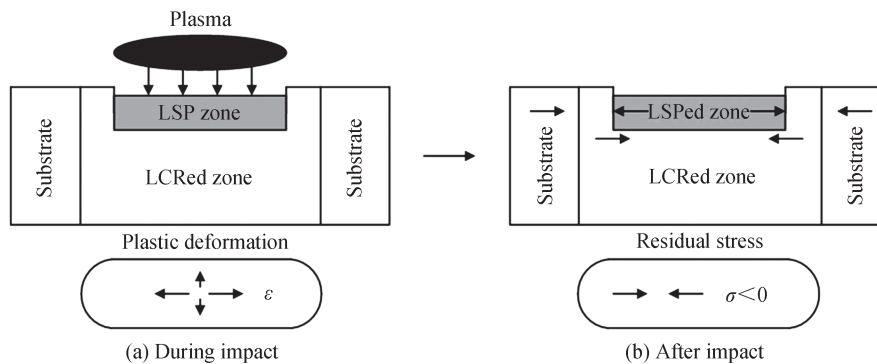


图12 激光冲击诱导残余压应力原理

Fig. 12 Schematic diagram of laser shock induced residual compressive stress

3 结论

激光熔覆层由铁素体基相和少部分残余奥氏体组成,其组织为等轴晶, SiO_2 、 FeO 、 Mn_5C_2 和 Fe_3C 等硬质析出物弥散分布,熔覆层与基体之间存在良好的冶金结合。

在激光冲击后,激光熔覆层表层晶粒得到细化,并伴随有形变孪晶生成,部分位错平行于 $\{110\}$ 滑移面,位错聚集在晶界附近形成位错缠结,形变孪晶和位错缠结均在晶粒细化中发挥着重要的作用,残余奥氏体经激光冲击后转变成板条状马氏体。激光熔覆层经激光冲击后残余压应力相较于冲击前提升了1.1倍。

激光冲击前后,熔覆层表面耐腐蚀性能对比,以及冲击后熔覆层表面与截面的塑性变形方式与组织形态之间的相关性,均待下阶段进一步研究。

参考文献

- [1] XU Binshi, DONG Shiyun, MEN Ping, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0401001. 徐滨士,董世运,门平,等.激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0401001.
- [2] LIU Guizhong, ZHONG Wenhua, GAO Yuan, et al. Formation and resolving method of the structure defect about laser cladding coatings[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(5):89-92. 刘贵仲,钟文华,高原.激光熔覆涂层缺陷的形成及防治[J]. *表面技术*, 2012, 41(5):89-92.

- [3] YAN Shixing, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1003004.
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003004.
- [4] WANG Cheng, LAI Zhilin, AN Zhibin, et al. Properties improvement of laser clad TC4 Titanium alloy by laser shock processing[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2013, 34(3): 331-334.
汪诚, 赖志林, 安志斌, 等. 激光冲击强化对熔覆后 TC4 钛合金性能的提高[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 331-334.
- [5] HE Weifeng, ZHANG Jin, YANG Zhuojun, et al. Fatigue properties research of titanium alloy repaired by laser cladding and laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1103008.
何卫锋, 张金, 杨卓君, 等. 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103008.
- [6] LUO Kaiyu, ZHOU Yang, LU Jinzhong, et al. Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402005.
罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.
- [7] ZHANG Peiyu, WANG Cheng, XIE Mengyun, et al. Effect of laser shock processing on microstructure and properties of K403 alloy repaired by laser cladding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0906003.
张佩宇, 汪诚, 谢孟芸, 等. 激光冲击对 K403 合金激光熔覆修复微观组织和性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0906003.
- [8] LIU Yihu, WU Yongquan, SHENG Tong, et al. Molecular dynamics simulation of phase transformation of γ -Fe \rightarrow δ -Fe \rightarrow liquid-Fe in continuous temperature-rise process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 172-178.
刘益虎, 吴永全, 沈通, 等. 连续升温过程中 γ -Fe \rightarrow δ -Fe \rightarrow 液态 Fe 相变的分子动力学模拟[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 172-178.
- [9] HE Xing, KONG Dejun, SONG Renguo. Influence of power on microstructure and properties of laser cladding Al-TiC-CeO₂ composite coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(11): 3634-3642.
贺星, 孔德军, 宋仁国. 功率对激光熔覆 Al-TiC-CeO₂ 复合涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(11): 3634-3642.
- [10] ZHANG Hui, PAN Yi, HE Yizhu, et al. Laser cladding FeCoNiCrAl₂Si high-entropy alloy coating [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(8): 1075-1079.
张晖, 潘冶, 何宜柱. 激光熔覆 FeCoNiCrAl₂Si 高熵合金涂层[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1075-1079.
- [11] TRIVEDI R, KURZ W. Morphological stability of a planar interface under rapid solidification conditions [J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(8): 1663-1670.
- [12] QI Wenjun, WANG Suncheng, CHEN Xuemin, et al. Effective nucleation phase and grain refinement mechanism of Al-5Ti-1B master alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(2): 179-185.
戚文军, 王顺成, 陈学敏, 等. Al-5Ti-1B 合金的有效形核相与晶粒细化机制[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 179-185.
- [13] LU Jinzhong, WU Liujun, SUN Guifang, 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.
- [14] NI Song, LIAO Xiaozhou, ZHU Yuntian. Effect of severe plastic deformation on the structure and mechanical properties of bulk nanocrystalline metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(2): 156-168.
倪颂, 廖晓舟, 朱运田. 剧烈塑性变形对块体纳米金属材料结构和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(2): 156-168.
- [15] WEI Songbo, CAI Qinwu, TANG Di, et al. In situ SEM study of dynamic tensile in wrought magnesium alloy AZ31B rolling sheet[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(3): 155-160.
魏松波, 蔡庆伍, 唐荻, 等. AZ31B 镁合金轧制板材室温动态拉伸的 SEM 观察[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3): 155-160.
- [16] ZHANG Tingjie. Electron microscopy study on phase transformation of titanium alloys (II)——The crystalline structure of the two basic phases of titanium and its alloys and their possible lattice defects [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1989, (8): 54-60.
张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(II)——钛及其合金的两个基本相的结晶结构和它们可能产生的晶格缺陷[J]. 稀有金属材料与工程, 1989, (8): 54-60.
- [17] XIAO Lin, BAI Juli. Biaxial fatigue behavior and microscopic deformation mechanism of zircaloy-4[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(9): 919-925.
肖林, 白菊丽. Zr-4 合金双轴疲劳行为及其微观变形机理 II. 双轴循环变形亚结构及其组织的发展[J]. 金属学报, 2000, 36(9): 919-925.
- [18] XU Shidong, REN Xudong, ZHOU Wangfan, et al. Research of cell-grain refinement and dislocation strengthening of laser shock processing on GH2036 alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103001.

- 徐士东,任旭东,周王凡,等. GH2036合金激光冲击胞-晶细化与位错强化机理研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103001.
- [19] MOON J, KIM S J, LEE C. Effect of thermo-mechanical cycling on the microstructure and strength of lath martensite in the weld CGHAZ of HSLA steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(25-26): 7658-7662.
- [20] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. An experimental - numerical investigation of heat distribution and stress field in single- and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 154-168.
- [21] ZHANG Mengqing, QIAO Yulin, JI Xiaochao, et al. Effect of coil-scanning-speed on microstructures and properties of NiCrBSi coating by induction cladding method[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(6): 6120-6125.
张梦清, 乔玉林, 吉小超, 等. 线圈扫描速度对感应熔覆 Ni CrBSi 涂层组织与性能的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(6): 6120-6125.
- [22] HUANG Yongjun, ZENG Xiaoyan. Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(20): 5985-5992.
- [23] HOEMBERG D, LIU Q, MONTALVO-URQUIZO J, et al. Simulation of multi-frequency-induction-hardening including phase transitions and mechanical effects[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2016, 121: 86-100.
- [24] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60%WC coating [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222: 244-258.
- [25] DENG Dean, ZHANG Yanbin, LI Suo, et al. Influence of solid-state phase transformation of residual stress in P92 steel welded joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(4):394-402.
邓德安, 张彦斌, 李索, 等. 固态相变对P92钢焊接接头残余应力的影响[J]. *金属学报*, 2016, 52(4):394-402.
- [26] LIU Bo, LUO Kaiyu, WU Liujun, et al. Effect to laser shock processing on property and microstructure of AM50 magnesium alloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8):0814003.
刘波, 罗开玉, 吴刘军. 激光冲击强化对AM50镁合金性能和结构的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(8):0814003.
- [27] CAO Yupeng, GE Liangchen, FENG Aixin, et al. Effect of shock wave propagation mode on residual stress distribution of laser shock 7050 aluminum alloy[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6):195-202+220.
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+220.