

# Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理

闫世兴<sup>1</sup> 董世运<sup>1\*</sup> 徐滨士<sup>1</sup> 王玉江<sup>1</sup> 肖爱民<sup>2</sup> 鲁金忠<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 装甲兵工程学院再制造技术重点实验室, 北京 100072; <sup>2</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 针对激光熔覆层残余应力过大导致变形、开裂的问题, 采用激光冲击技术对 Fe314 合金熔覆层进行了表面冲击处理, 分析了熔覆层残余拉应力分布形式及消除机理。结果显示, 激光熔覆时采用相对较大的激光比能量, 即慢扫描速度、小光斑直径和低送粉速率工艺可有效降低熔覆层残余拉应力。而激光冲击大幅降低了熔覆层残余拉应力, 随着冲击次数提高, 熔覆层拉应力减小, 但拉应力降低幅度呈逐渐减弱趋势。冲击波力学效应引发的极大应变率使熔覆层表层发生微塑性变形, 形成压应力场, 大幅抵消熔覆层初始态残余拉应力。材料压缩变形时在  $\gamma$ -Fe 晶粒内萌发大量位错线, 位错发生多系滑移并相互缠结形成位错墙, 引发细晶强化作用。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 激光冲击; 残余应力; 晶粒细化

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1003004

## Mechanics of Removing Residual Stress of Fe314 Cladding Layers with Laser Shock Processing

Yan Shixing<sup>1</sup> Dong Shiyun<sup>1</sup> Xu Binshi<sup>1</sup> Wang Yujiang<sup>1</sup> Xiao Aimin<sup>2</sup> Lu Jinzhong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)  
<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Due to the thermal deformation and crack of laser cladding layers induced by residual stress, a treatment of laser shock processing (LSP) is performed to remove the residual stress of Fe314 alloy cladding layer, its mechanics and residual stress distribution are investigated as well. Results show that residual stress can be removed significantly when a high specific energy of laser cladding comprised of slow scanning speed, small spot size and low powder feed rate is adsorbed by melt pool. Furthermore, LSP decreases the residual stress, and with the number of LSP increasing, the residual stress of cladding layer descends gradually while the removing capability attenuates. The mechanics of variation show that a micro-plastic deformation appears on the Fe314 cladding layer surface, which is induced with a huge strain rate of shock wave. A compression stress field is formed and removes the tensile stress of cladding layer. It is observed that mass dislocation lines emerge in the  $\gamma$ -Fe grain due to LSP. Then a dislocation wall is formed and separates one grain into several subgrains. Eventually, the effect of grain refinement is occurred in the Fe314 alloy cladding layer.

**Key words** laser technique; laser cladding; laser shock processing; residual stress; grain refinement

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

激光熔覆技术目前被广泛地应用于高性能复杂结构、致密金属零件的直接成形和表面磨损、腐蚀等失效零件的再制造等领域<sup>[1-3]</sup>。但激光熔覆时局部热输入导致的不均匀温度场引起了局部热效应, 导

致在金属熔池凝固结晶过程中形成了较大的热应力, 凝固结束后在熔覆层中形成残余拉应力和热变形, 对成形件的尺寸精度、静载强度、疲劳强度、抗开裂等性能造成较大的影响。拉应力过大时将引发裂纹缺陷<sup>[4-6]</sup>, 严重危害零件的成形或再制造质量。

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-05-15

基金项目: 总装“十二五”预研项目(51327040401)和国家 973 计划(2011CB013403)

作者简介: 闫世兴(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事激光熔覆再制造方面的研究。E-mail: ysxing1984neu@163.com

导师简介: 徐滨士(1931-), 男, 教授, 从事装备再制造理论方面的研究。E-mail: xubinshi@vip.sina.com

\* 通信联系人。E-mail: syd422@sohu.com

因此,研究激光熔覆层残余应力分布和形成机理不仅对控制残余应力具有实际意义,而且可对预防熔覆层开裂提供工艺指导。

传统消除熔覆层残余应力的措施以退火热处理为主,而对于一些大型再制造零部件而言,尺寸过大,退火操作困难;同时,零件制造时经过某些特殊热处理的基体在退火处理时或将发生组织转变,导致原有工艺附加值流失。而激光冲击强化(LSP)技术凭借高压( $10^9 \sim 10^{12}$  Pa)、极快( $10 \sim 100$  ns)、高应变率( $10^7 \sim 10^8$  s<sup>-1</sup>)、非接触、可控性强等优点被广泛地应用于重要零件的表面强化与应力消除<sup>[7-9]</sup>。该技术是采用短脉冲高功率密度的激光束轰击材料表面诱导高压冲击波,冲击波使材料表层发生压应力场,改善材料表层残余应力状态<sup>[10-12]</sup>。当前,针对LSP与激光熔覆技术复合进行熔覆层表面残余应力状态转变处理的研究较少,缺乏对熔覆层残余应力消除效果评估及消除机理的探讨。因此,本文针对激光熔覆层成形后残余应力过大问题,采用LSP进行了应力消除工艺及机理研究。

## 2 试验材料与方法

激光熔覆试验材料为Fe314合金粉末,成分如表1所示。该粉末具有韧性好、硬度低、抗开裂性能好和体成形性能优异的特点,基体为45钢。熔覆过程采用侧向同步气动送粉方式。设备为大功率连续式Nd:YAG激光器。激光熔覆工艺参数为:激光功率1.2 kW,扫描速度5~8 mm/s,送粉速率16.2~18.0 g/min,光斑直径2~3 mm,载气流量200 L/min,保护气为氩气。激光冲击熔覆层时采用锡箔作为吸收层,预先贴附于熔覆层表面,采用流动水作为约束层。LSP设备为脉冲式Nd:YAG激光器。LSP工艺参数为脉冲能量6 J、脉宽10 ns。激光熔覆与LSP工艺过程<sup>[13]</sup>分别如图1、2所示。两种试验用Nd:YAG激光器输出光斑均为圆形,沿圆形光斑径向激光能量呈现高斯分布特征。

采用侧倾固定 $\Psi$ 法测量Fe314合金激光熔覆层LSP前后的表层残余应力,仪器为X-350A型X射线应力检测仪,测量误差率为10%。测试参数为:管电压22 kV,管电流6 mA,钴靶K<sub>α</sub>特征辐射,准直管直径 $\phi=3$  mm,阶梯扫描步进角0.100 rad,时间常数1 s。对冲击后Fe314合金熔覆层试样分别切割,研磨抛光表层与截面层,采用王水(体积比为3:1的浓盐酸和浓硝酸的混合溶液)腐蚀,在Philips XL30型扫描电镜下观察熔覆层表层及深度

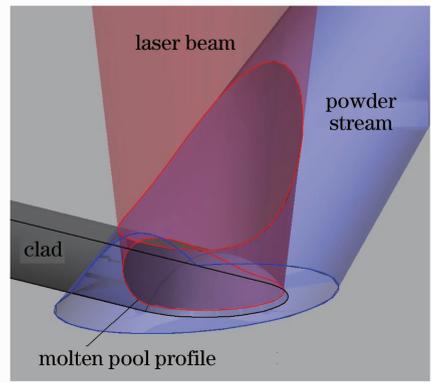


图1 侧向同步送粉式激光熔覆过程示意图

Fig. 1 Schematic view of laser cladding with a lateral synchronous powder feed

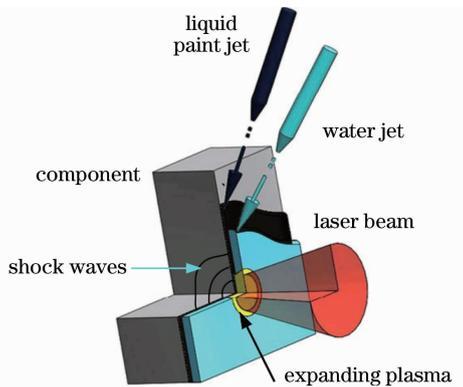


图2 LSP示意图

Fig. 2 Schematic view of LSP

方向组织特征。切取表层熔覆试样,经研磨、离子减薄制备直径 $\phi=3$  mm的透射电镜(TEM)分析试样,采用JEM-2000型TEM观察熔覆层晶粒内部及晶界形态;采用D8型X射线衍射仪(XRD)分析熔覆层物相组成。

表1 Fe314合金粉末成分(质量分数,%)

Table 1 Components of Fe314 powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	B	Si	Fe
Content	0.1	15	10	1	1	bal

## 3 结果与讨论

### 3.1 激光熔覆工艺对残余应力分布的影响

激光熔覆过程极大的加热、冷却速度使熔覆层各部位温度分布严重不均,从而使变形受到约束,在熔覆层内形成较大的宏观残余应力;同时,由于极大的熔池温度梯度和凝固速度,熔池金属结晶时在极小的范围内发生平面晶、柱状晶、细小树枝晶、等轴晶一系列晶体形式转变,组织在短程内分布严重不均,导致在熔覆层内形成较大组织应力,即微观残余应力。这两类残余应力的叠加作用使激光熔覆层成

形后内部残余了极大的拉应力,导致熔覆层裂纹萌生、开裂。而激光熔覆工艺对熔覆层残余应力分布形式与大小具有重要影响。激光熔覆工艺对成形影响的实质表现在传热、传质两方面,即单位时间内进入熔池的激光熔覆有效能量和单位熔覆长度需要的粉末质量,前者可用激光比能量  $\lambda$  表示,而后者可用绝对送粉率  $V_g$  表示,表达式分别为<sup>[14]</sup>

$$\lambda = P/(V_s D), \quad (1)$$

$$V_g = V_f/V_s, \quad (2)$$

式中  $P$  为激光功率,  $V_s$  为扫描速度,  $V_f$  为送粉速率,  $D$  为光斑直径。

表 2 为不同激光熔覆工艺的激光比能量与绝对送粉率,保持激光能量为 1.2 kW,光斑直径为 2 mm 恒定不变。调整扫描速度、送粉速率及光斑直径,测

表 2 不同激光熔覆工艺的激光比能量与绝对送粉速率分布

Table 2 Specific energy and absolute powder feed rate with different laser cladding parameters

No.	Scanning speed $V_s/(mm/s)$	Powder feed rate $V_f/(g/min)$	Spot size $D/mm$	Specific energy $\lambda/(J/mm^2)$	Absolute powder feed rate $V_g/(10^{-3} g/mm)$
1	5	16.2	2	120.0	54.0
2	8	18.0	2	75.0	37.5
3	8	18.0	3	50.0	37.5
4	5	16.2	3	80.0	54.0

根据凝固结晶原理,提高激光比能量,单位时间进入熔池的能量增加,使熔池最高温度、保温时间均增加,进而凝固时熔池相对于外界环境的温度梯度减小,熔池金属过冷度相对降低,使熔覆层底部至顶部的组织转变较均匀,组织应力相对较低。另外,熔覆层高温状态时间延长,熔覆层受热不均部位热变形拘束相对减小,有利于冷却后期残余应力的松弛。因此,适当提高激光比能量,对于熔覆层残余应力控制具有重要作用。

将激光比能量指标细化至具体工艺参数,在扫描速度、送粉速率和光斑直径 3 个参数中,为保持熔覆过程较高的激光比能量,采用慢扫描速度、小光斑直径和低送粉速率工艺,有利于控制熔覆层残余拉应力。

### 3.2 LSP 对熔覆层残余应力影响

图 3 表明,成形后未热处理的熔覆层内部存在较大残余拉应力,该应力状态对熔覆层抗开裂性影响较大。采用 LSP 对 Fe314 熔覆层进行处理,利用爆轰冲击波在材料表面诱发压应力效应,达到削弱或消除熔覆层残余拉应力、改善熔覆层表面组织与力学性能的目的。

图 4 所示为冲击前后激光熔覆层表面不同部位的残余应力分布。可见,搭接熔覆层表面中间残余

试熔覆层层残余应力,结果如图 3 所示。对比序号 1 与 4、2 与 3 试样残余应力分布可见,在绝对送粉率相同时,提高激光比能量可有效降低熔覆层的残余应力,2 号与 3 号试样残余应力差值较大,通过提高激光比能量,残余应力由 540 MPa 降低到 393 MPa。在激光比能量基本相同时,改变激光熔覆的绝对送粉率,如 2 号与 4 号试样,绝对送粉率由  $37.5 \times 10^{-3} g/mm$  升至  $54.0 \times 10^{-3} g/mm$ ,熔覆层残余应力由 393 MPa 下降至 370 MPa。但相对于改变激光比能量,控制绝对送粉率变化,熔覆层应力降低幅度较小。因此,可判断影响熔覆层残余应力分布的主要因素为激光比能量,即熔覆过程中传热影响较大。

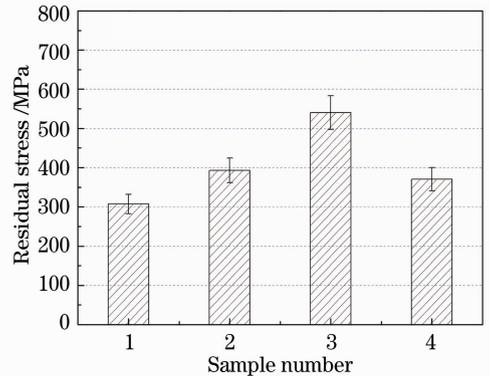


图 3 不同工艺参数下熔覆层表层残余应力分布  
Fig. 3 Residual stress distribution of cladding layers with different parameters

拉应力较高。而两侧边部位置拉应力较低,拉应力范围为 +200~+800 MPa。经 5 次 LSP 后(其余冲击参数为脉冲能量 6 J、脉宽 10 ns、搭接率 50%),表面残余应力范围为 -150~+400 MPa。在熔覆层边部冲击后产生了残余压应力,压应力范围为 0~-150 MPa,其他熔覆区域残余拉应力均大幅度降低。残余拉应力平均下降幅度为 70%,可见 LSP 能够有效消除激光熔覆表层残余拉应力。但由于拉应力过大,冲击后熔覆层残余拉应力虽然大幅度降低,但未得到完全消除。另一方面,从图 4 可以看出

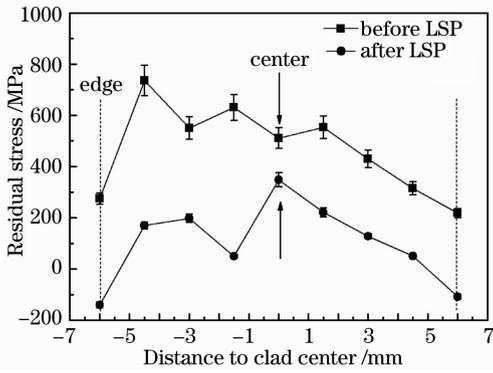


图 4 冲击前后试样表面残余应力对比

Fig. 4 Comparison of residual stress distribution between layer before LSP and after LSP

冲击 5 次后,残余拉应力显著降低,但没有完全消除。进一步研究增加冲击次数对改善表面残余应力状态及改性区域大小的影响。测试结果如图 5 所示。

图 5 为冲击次数与熔覆层残余应力大小及熔覆层残余拉应力下降比率的关系。可见,在冲击次数为 4~20 次的变化区间内,随着冲击次数的增加,熔覆层残余拉应力总体呈下降趋势,最大下降幅度高达 94%,应力降低幅度达 600 MPa,根据图 5 中残余应力分布及应力下降率拟合曲线可见,其余冲击工艺参数不变,适当提高冲击次数,有利于大幅削弱熔覆层表层的残余拉应力。但 LSP 次数对熔覆层残余应力状态影响存在上限,即达到一定冲击次数后,冲击爆轰波诱发的表面压缩应变将达到饱和,压缩变形趋势逐渐减小至停止,对熔覆层原有拉应力的削减效应也将逐渐减小。如图 5 所示,随着冲击次数逐渐增大,熔覆层表面应力分布出现波动,拉应力减小的幅度呈现逐渐降低、平缓的趋势。

上述现象的产生与熔覆层的动态屈服强度变化有关。随着冲击次数的增加,冲击波诱导的熔覆层表

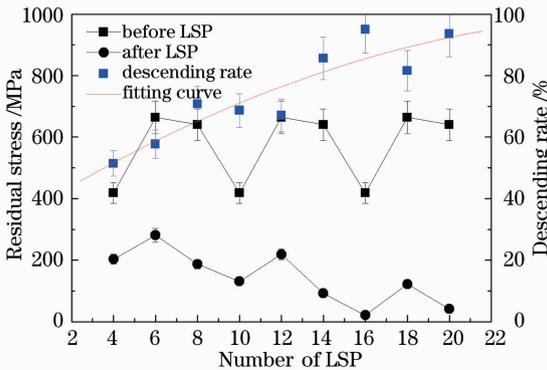


图 5 熔覆层残余拉应力及其下降比例与冲击次数的关系  
Fig. 5 Residual stress distribution versus the number of LSP and its descending rate

层微塑性变形量出现累积,导致变形层出现应变硬化效应,大幅提高了熔覆层的动态屈服强度,其值逐渐趋近单脉冲的冲击波压力,导致后续冲击时熔覆层微塑性变形量逐渐减小,压缩变形减弱直至停止。

### 3.3 熔覆层冲击去应力机理

图 6 所示为材料表层残余压应力产生过程的示意图。在激光辐照吸收层表面时,吸收层物质受热喷射爆炸产生等离子体,等离子体膨胀受到约束层抑制,从而形成向熔覆层内部传播的爆轰冲击波,冲击波使材料表层发生 3 轴应力压缩而产生一维应变。由于在靶材表面冲击波的峰值压力高达吉帕量级,可使靶材表面一定深度的材料沿轴向产生弹塑性变形,同时这部分材料在平行于材料表面的平面内产生伸长变形,其周围的材料受到挤压,如图 6(a)所示。当冲击波压力消失后,该部分材料塑性变形无法恢复,发生塑性变形的材料与周围材料保持几何相容性,周围材料存在将已发生塑性变形的材料压缩回原始形状的趋势,最终在平行于靶材表面的平面内产生压缩变形效应,如图 6(b)所示。冲击形成的压缩变形可部分抵消甚至消除熔覆层初始残余拉应力,从而达到减弱或消除成形熔覆层表层拉应力的技术目的。

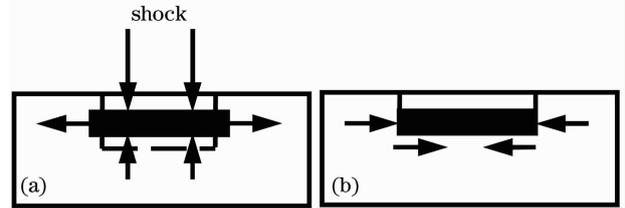


图 6 激光冲击诱导材料压应力场示意图。

(a) 冲击过程; (b) 冲击后

Fig. 6 Schematic of compression stress field induced by LSP. (a) During LSP; (b) after LSP

选取 2 号熔覆试样,对其表面进行 5 次 LSP(其余冲击参数为脉冲能量 6 J、脉宽 10 ns、搭接率 50%)。图 7 为 LSP 后熔覆层表面及深度方向上的显微组织形貌。由图 7(a)可见在表面激光光斑冲击区域(A 区),熔覆层发生了微塑性变形,晶粒在冲击波的压应力作用下发生变形,组织出现致密化特征。晶粒尺寸略小于相邻区域(B 区)的晶粒尺寸,呈现为细小致密的胞状晶形貌,而附近未冲击部位(B 区)熔覆层晶体主要为尺寸相对较大的交叉树枝晶。由于 YAG 激光光斑能量的时空分布特征,光斑中心区域(约  $\phi 600 \mu\text{m}$  的 A 区)的晶粒显著细化,而光斑周围晶粒尺寸呈现逐渐增大的过渡特征。由

7(b)可见,沿着冲击深度方向,可分为组织细化区和原始组织区,组织细化区内晶粒细化特征愈加明显,而原始组织区熔覆层晶粒尺寸变化幅度较小,组织细化区深度约为 200  $\mu\text{m}$ 。图 7(b)中熔覆层深度方向组织变化特征表明,随着至熔覆层表面的距离增加,组织细化区逐渐缩小,组织细化区底部呈现弧

形特征,反映出随熔覆层深度增加 LSP 力学效应逐渐衰弱的特征。同时,由于 Nd:YAG 激光器光斑能量呈高斯分布,即光斑中心能量密度高,边缘低,导致激光诱发的冲击波压力在表层分布不均,深度方向上形成了细化区底部弧形特征。

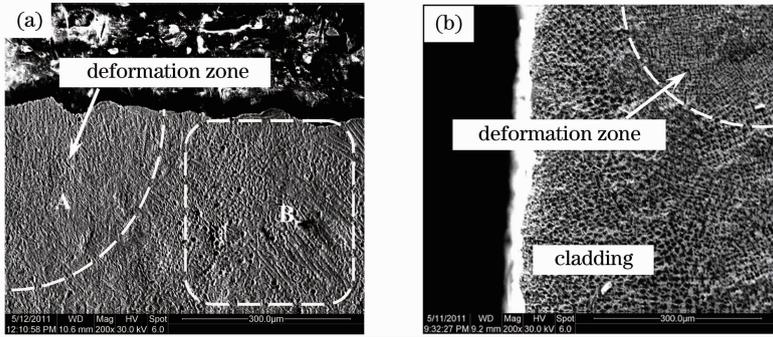


图 7 激光冲击强化层显微组织。(a)表面;(b)截面

Fig. 7 Microstructures of the cladding layer with LSP. (a) Surface; (b) cross-section

图 8 为 Fe314 合金激光熔覆层 X 射线衍射 (XRD) 图谱,可见熔覆层物相主要由  $\gamma$ -Fe 组成,同

时少量分布着 CrB 金属间化合物。 $\gamma$ -Fe 由于强度、硬度相对较低,塑性较好,受冲击波作用时,微塑性变形优先发生在  $\gamma$ -Fe 相内。图 9 所示为熔覆层  $\gamma$ -Fe 晶内与晶界 TEM 形貌,可见冲击波作用下  $\gamma$ -Fe 晶粒内部萌发大量位错线,随着微塑性变形过程进行,位错发生滑移,而多晶结构 Fe314 合金具有多滑移系,位错滑移方向相互交叉,导致一部分位错滑移至晶界部位并塞积于此,提高了晶粒塑性变形能临界值;而另一部分位错滑移在  $\gamma$ -Fe 晶粒内形成位错缠绕结构。这些位错缠绕结构把原始晶粒细分成更小的位错胞块。当变形应变量达到一定程度时,即位错缠绕结构内的位错密度达到一定值时,柏氏矢量不同的位错开始湮灭、重排,形成位错墙,从而将  $\gamma$ -Fe 晶粒细分成各个不同的亚结构,形成细化的晶粒。

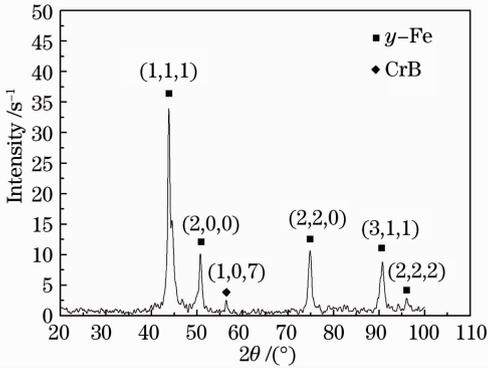


图 8 Fe314 合金激光熔覆层 XRD 图谱

Fig. 8 XRD of Fe314 alloy cladding layer

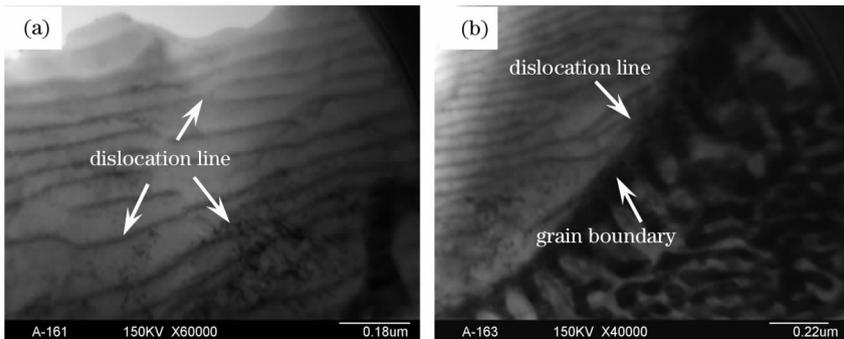


图 9 熔覆层  $\gamma$ -Fe 晶内与晶界形貌

Fig. 9 Characteristics of  $\gamma$ -Fe grain and grain boundary of cladding of cladding

## 4 结 论

1) 激光比能量与绝对送粉率影响熔覆层残余应力分布,而激光比能量大小作用尤为显著,提高激光比能量可有效降低熔覆层残余应力。

2) LSP 可大幅降低熔覆层残余拉应力,随着冲击次数提高,熔覆层拉应力减小,但冲击次数对 Fe314 熔覆层残余应力状态影响存在上限,随着冲击次数逐渐增大,拉应力削弱幅度呈现逐渐减小、平缓趋势。

3) 冲击波力学效应引起的极大应变率使熔覆层表层形成压缩变形效应,大幅抵消了熔覆层残余拉应力。熔覆层受冲击区域表层与一定深度的组织出现细化特征。

4) Fe314 合金激光熔覆层主相由  $\gamma$ -Fe 软质相组成,冲击波诱导材料压缩变形时优先在  $\gamma$ -Fe 晶粒内萌发大量位错,多系滑移的位错线缠结、湮灭、重排形成位错墙,将晶粒分割为多个亚结构,形成细晶强化作用。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Binshi, Liu Shican, Dong Shiyun, *et al.*. Theory and Technology of Remanufactured Equipments Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 294-300.  
徐滨士, 刘世参, 董世运, 等. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 294-300.
- 2 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.  
钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.
- 3 J Dowden. The Theory of Laser Materials Processing [M]. Dordrecht: Springer Science and Business Media BV, 2000. 235-256.

- 4 G A Webster, A N Ezeilo. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes[J]. International J Fatigue, 2001, 23(s1): S375-S383.
- 5 U De Oliveira, V Ocelik, J Th M De Hosson. Residual stress analysis in Co-based laser clad layers by laboratory X-rays and synchrotron diffraction techniques [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3-4): 533-542.
- 6 P Bendeich, N Alam, M Brandt, *et al.*. Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbine blades for the power industry[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 437(1): 70-74.
- 7 P V Yasnii, P O Marushchak, Yu M Nikiforov, *et al.*. Influence of laser shock-wave treatment on the impact toughness of heat-resistant steels[J]. Materials Science, 2010, 46(3): 425-429.
- 8 T Elperin, G Rudin. Thermal stresses in functionally graded materials caused by a laser thermal shock[J]. Heat and Mass Transfer, 2002, 38(7-8): 625-630.
- 9 Guan Haibing, Ye Yunxia, Wu Zhong, *et al.*. Effects of long pulse-width stray light on shock wave induced by laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703007.  
管海兵, 叶云霞, 吴忠, 等. 长脉冲杂光对激光诱导冲击波的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703007.
- 10 C Michaut, E Falize, C Cavet, *et al.*. Classification of and recent research involving radiative shocks[J]. Astrophys Space Sci, 2009, 322(1-4): 77-84.
- 11 B S Yilbas, S B Mansoor, A F M Arif. Laser shock processing: modeling of evaporation and pressure field developed in the laser-produced cavity[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 42(3-4): 250-262.
- 12 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Ma Hui, *et al.*. Dislocation configurations induced by laser shock processing of 2A02 aluminum alloy[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714002.  
罗新民, 张静文, 马辉, 等. 2A02 铝合金中强激光冲击诱导的位错组态分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714002.
- 13 G Singh, R V Grandhi, D S Stargel. Modified particle swarm optimization for a multimodal mixed-variable laser peening process[J]. Struct Multidisc Optim, 2010, 42(5): 769-782.
- 14 Dong Shiyun, Yan Shixing, Xu Binshi, *et al.*. Processing optimization and properties of laser cladding Fe90 coating[J]. J Functional Materials, 2011, 42(s): 15-18.  
董世运, 闫世兴, 徐滨士, 等. Fe90 合金激光熔覆工艺优化及性能研究[J]. 功能材料, 2011, 42(s): 15-18.

栏目编辑: 宋梅梅