

多次激光冲击强化对 $\Theta\Pi866$ 马氏体不锈钢组织及残余应力的影响

张青来¹ 赵 博¹ 张冰昕² 李兴成³ 刘 惠¹

¹江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

²上海交通大学密西根学院, 上海 200240

³江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213000

摘要 采用钕玻璃脉冲激光器进行了航空发动机用 $\Theta\Pi866$ 耐热马氏体不锈钢激光冲击强化实验研究。结果表明, 不锈钢组织由马氏体板条和析出碳化物组成, 多次冲击表层产生高密度位错缠结, 回火后仍保留其缠结结构, 产生大量的纳米析出相。多次冲击可使表层引入更高幅值的残余压应力, 幅值达 -715.4 MPa, 且残余压应力值随光斑搭接次数增加而增加。500~650 °C 回火处理后残余压应力下降幅度达到 50%, 具有良好的热稳定性, 冲击次数对其影响较小。

关键词 激光技术; $\Theta\Pi866$ 不锈钢; 激光冲击强化; 残余压应力; 热处理; 微观结构

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.1102009

Effect of Multiple-Laser Shock Processing on Microstructure and Residual Stress of $\Theta\Pi866$ Martensitic Stainless Steel

Zhang Qinglai¹ Zhao Bo¹ Zhang Bingxin² Li Xingcheng³ Liu Hui¹

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai 200240, China

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213000, China

Abstract Laser shock processing tests of $\Theta\Pi866$ heat-resistant martensitic stainless steel for aero-engine were carried out with a Nd glass laser. The results show that the microstructure of stainless steel is composed of martensite laths and carbide precipitation. High density dislocation entanglement occurs in the surface layer during multi-impacts. After tempering treatment, the tangled microstructures still exist and more nano-sized precipitation occurs. Higher-amplitude compressive residual stress is produced in the surface layer by multi-impacts, whose amplitude can be reached to -715.4 MPa, and residual compressive stress increases with the increase of the lap times. After tempering treatment at the temperature from 500 °C to 650 °C, the residual compressive stress decreases by 50%, which shows good thermal stability and weak effect of the impact times.

Key words laser technique; $\Theta\Pi866$ stainless steel; laser shock processing; compressive residual stress; heat treatment; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 240.6700

1 引 言

$\Theta\Pi866$ (俄罗斯牌号)耐热马氏体不锈钢(中国牌号 1Cr16Co5Ni2Mo2WVNbN)具有良好的抗疲劳、抗蠕变和抗热松弛等性能,最高使用温度达 650 °C,广泛用于俄罗斯飞机发动机叶片及紧固件等关键部件,也

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51175231)

作者简介: 张青来(1962—),男,博士,教授,主要从事镁合金、钛合金及激光加工技术方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

是我国某航空发动机国产化使用的重要材料之一^[1-4]。研究表明,航空发动机部件疲劳裂纹起源于表层,通过激光冲击强化(LSP)可改善其表层的应力状态,以提高部件的抗疲劳性能^[5-6]。LSP作为表面改性技术,利用激光在纳秒时间内产生的超高压,使材料表层产生剧烈的塑性形变、高幅值的残余压应力和晶粒细化。激光冲击次数对材料表层强化效果具有不同的影响。5次激光冲击后 TC17 钛合金表面显微硬度提高了20.7%,表面残余应力达到-644.3 MPa^[7]。激光冲击次数增加导致 Ti5Al4Mo4Cr2Sn2Zr 钛合金表层残余应力幅值提高,激光3次冲击表面形成纳米晶层(晶粒大小30~60 nm)^[8]。TA15 钛合金位错密度随冲击次数的增加而增加,并发生塞积、增殖和缠结等现象^[9]。1次和3次激光冲击后 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢疲劳寿命分别为未强化试样的3.8倍和5倍^[5],冲击诱导的高幅值残余应力和表层微观组织变化是疲劳强度提高的主要原因^[6,10]。激光冲击诱导的残余应力在高温条件下发生松弛。经800℃/5h处理后,IN718 镍基合金激光冲击表层的残余应力松弛幅度达82%,与保温温度和时间呈正相关^[11]。LSP处理后 K24 超合金产生的残余压应力达到-600 MPa,经500℃/16h回火处理后仍大于基体的残余压应力,回火稳定性较好^[12]。

以 $\Theta\Pi866$ 耐热马氏体不锈钢作为研究对象进行激光冲击强化实验,研究冲击次数对激光冲击强化表层残余应力及微观结构的影响,通过回火处理研究高温下冲击表层微观组织演变和残余应力稳定性。

2 实 验

2.1 实验材料与实验方法

选用俄罗斯牌号 $\Theta\Pi866$ 耐热马氏体不锈钢。采用真空-电弧重熔熔炼,然后开坯,热轧成直径为80 mm的棒材,其化学成分如表1所示。从考虑实际应用角度,LSP实验前需要对 $\Theta\Pi866$ 不锈钢试样进行热处理,其工艺为^[2-3]:1) 1090℃正火50 min,空气冷却到680℃回火1 h,空气冷却;2) 1100℃淬火50 min,油冷680℃回火1 h,空气冷却。

表1 $\Theta\Pi866$ 不锈钢化学成分

Table 1 Chemical composition of $\Theta\Pi866$ stainless steel

Chemical composition	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	W	V	Mo	N	Nb	Co
Mass fraction / %	0.16	0.27	0.25	0.003	0.010	2.02	15.57	0.76	0.23	1.47	0.0665	0.29	5.0

图1所示为热处理态 $\Theta\Pi866$ 马氏体不锈钢的显微组织。经1100℃淬火和680℃回火处理后,不锈钢由板条回火马氏体和少量铁素体组成,其中马氏体板条成排地平行排列,回火时析出纳米级颗粒状碳化物,弥散分布在马氏体板条和晶粒内部,局部有粗大的碳化物 NbC 相^[1][图1(a)箭头所指]析出。

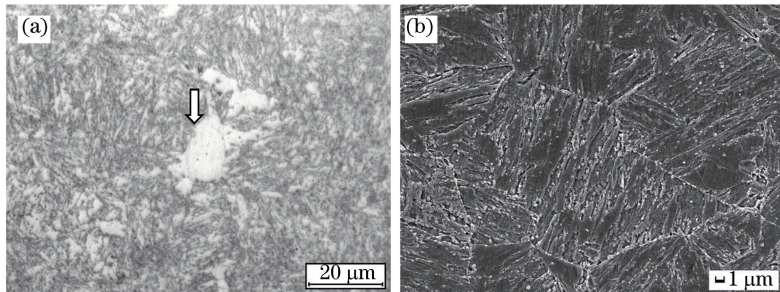


图1 未激光冲击强化马氏体不锈钢显微组织。(a) 金相组织;(b) 扫描电子显微镜图像

Fig. 1 Microstructure of martensitic stainless steel without LSP. (a) Metallographic structure; (b) SEM image

激光冲击实验选用100 μm厚铝箔作为吸收层,选用流动的去离子水作为约束层,光斑搭接率为50%。实验采用 SGR-60-II 型 Nd:YAG 高功率激光器^[13],激光能量为6 J,脉宽为20 ns,波长为1064 nm,光斑直径为3 mm,功率密度为4.24 GW/cm²。激光功率密度 $I = 4E / \pi\tau D^2$,其中 E 为激光脉冲能量, τ 为脉宽, D 为光斑直径。

运用 D/MAX2500PC 型 X 射线衍射仪进行不锈钢物相鉴定。采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测试靶材表面残余应力。利用 LEICA DM2500M 型正置透反射光学显微镜(OM)、JEOL JSEM-7001F 热场发

射高分辨率扫描电子显微镜(SEM)和 JEM-2100 型高分辨透射电子显微镜(HRTEM)观察冲击前后表层微观结构。透射试样制备方法为从激光冲击强化变形层(约 0.8 mm)中切割出金属片,用不同型号水砂纸打磨至 0.1 mm 以下厚度,冲裁直径为 3 mm 的圆片,置于 Gatan 手动磨盘中将圆片研磨至约 35 μm 厚再离子减薄。

3 结果与分析

3.1 TEM 结构

为了观察激光冲击及退火处理对不锈钢微观结构的影响,将原始试样、单次激光冲击试样和 4 次激光冲击后进行 500 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 真空热处理试样进行 TEM 微观结构分析对比。

3.1.1 原始结构

图 2 所示为未激光冲击原始试样的 TEM 照片。由图 2 可观察到,不锈钢呈典型的板条状马氏体组织,板条内与边界处存在位错堆积及缠结,是金属材料屈服于高应变塑性变形后常见的显微结构,图 2(b)中箭头所示,沿着马氏体板条边界还观察到粗大的 M_{23}C_6 析出相^[14]。

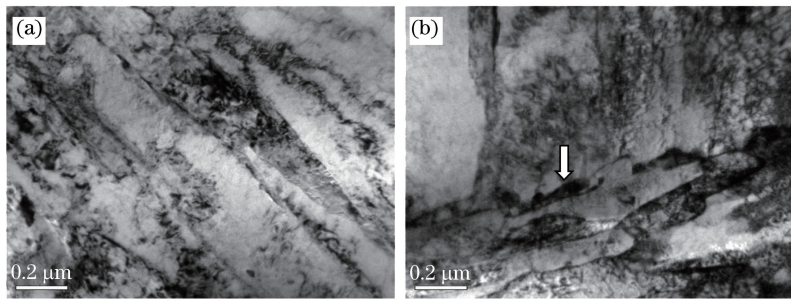


图 2 未激光冲击强化不锈钢 TEM 结构。(a) 马氏体板条;(b) 碳化物析出相

Fig. 2 TEM images of stainless steel without LSP impact. (a) Martensite laths; (b) carbide precipitation

3.1.2 LSP 对不锈钢组织的影响

如图 3 所示,试样经过单次激光冲击前后不锈钢组织没有发生明显的改变,仍由板条回火马氏体和析出的碳化物组成,激光冲击靶材表层产生了高密度位错,位错之间相互作用形成缠结结构,大量的位错堆积形成板条状的位错边界,如图 3(a)、(b)所示。由图 3(c)可观察到大量的微米或纳米级析出相,这是由于强激光诱导的高压冲击波引起材料内部剧烈的塑性变形而产生位错增殖,进而形成大量的高密度位错,使得晶粒发生细化。另一方面,析出相的存在可以成为位错运动时的阻碍,形成位错钉扎效应,可以延缓裂纹的萌生和提高耐疲劳性能,如耐热马氏体 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢发动机叶片疲劳寿命得到明显提高^[5]。

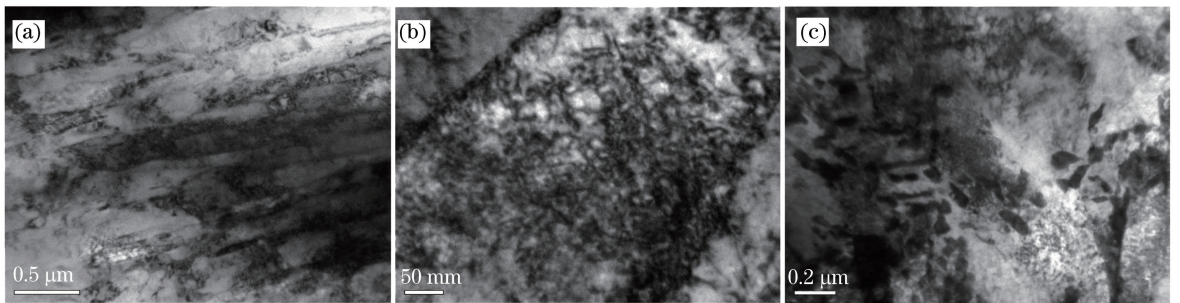


图 3 单次激光冲击强化不锈钢 TEM 结构。(a) 马氏体板条;(b) 高密度位错;(c) 析出相

Fig. 3 TEM images of stainless steel after single LSP impact. (a) Martensite laths; (b) high density dislocation; (c) precipitation

3.1.3 退火处理对 LSP 强化层组织的影响

图 4 为经连续 4 次激光冲击 500 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 真空热处理后不锈钢表层 TEM 结构。经过 500 $^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 的热处理后,可以明显地分辨位错线,位错之间的缠结程度有所降低,这是由于热处理加速了原子的扩散,导致位错部分恢复,但是靶材表层仍有大量位错,位错的缠结和堆积程度仍然很高,如图 4(a)所示。选区电子衍射图

像中的衍射花样已成环形,是典型的纳米结构,即靶材表层呈纳米化结构,如图 4(b)所示。因此,激光冲击强化靶材的组织结构具有一定的热稳定性,仍保留着较高的密度和缠结的位错结构。

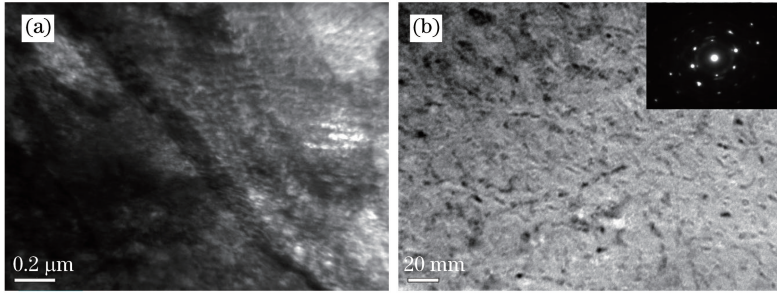


图 4 500 °C 保温 1 h 热处理后 4 次激光冲击强化不锈钢 TEM 结构。(a) 马氏体板条; (b) 纳米析出相
Fig. 4 TEM images of stainless steel after heat treatment at 500 °C for 1 h and subsequent four LSP impacts.
(a) Martensite laths; (b) nano-precipitation

3.2 残余应力

实验中激光器光斑搭接率为 50%,对靶材表面进行多次激光冲击强化时,不同的光斑搭接区域受到不同次数的激光冲击。以一次冲击为例,其搭接区域可分为 1 次(Zone 1)、2 次(Zone 2)、3 次或 4 次搭接区(Zone 3)(由于 3 次和 4 次搭接区面积太小,测量应力时很难区分,故作为一个区域 Zone 3 来处理),如图 5 所示。不同区域承受不同次数的冲击,发生不同程度的塑性变形,其表面粗糙度、硬度、残余应力等也会有所不同。

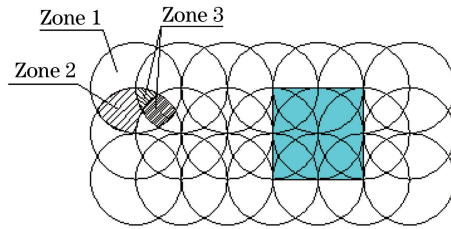


图 5 多次冲击区域示意图
Fig. 5 Schematic of multiply impacted area

残余应力测试结果表明,未冲击区靶材表面残余应力为 -71 ± 11 MPa,而经 500 °C 和 650 °C 保温 1 h 处理后表面残余应力分别为 -63.5 ± 20 MPa 和 -67.3 ± 13 MPa。因此,500~650 °C 热处理对靶材表面残余应力幅值没有明显的影响,这种残余压应力的产生可能是由于机械加工和抛光导致的。

3.2.1 冲击次数对残余应力的影响

图 6 所示为多次激光冲击的不锈钢靶材表面残余应力与冲击次数的关系。由图 6 可知,当激光功率密度恒定时,冲击次数的增加可使靶材表面引入更高幅值的残余压应力。当冲击次数超过 2 次,对残余压应力幅值的影响明显变弱,且光斑搭接的不同区域测得的残余应力结果各不相同。当冲击次数为 1 次时,

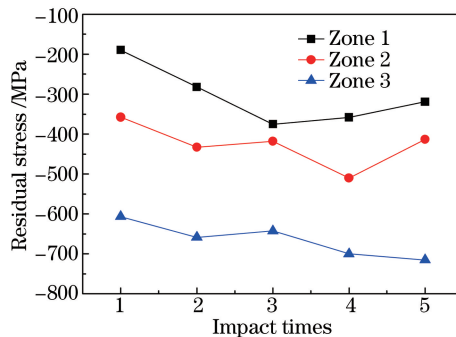


图 6 激光冲击强化后不锈钢表面残余应力与冲击次数的关系
Fig. 6 Relationship between surface residual stress and impact times for LSP impacted stainless steel

Zone 1、Zone 2 和 Zone 3 区残余压应力分别为 -189.8 、 -357.9 、 -606.6 MPa, 即 Zone 3 区残余应力值比 Zone 1 区增加了 416.8 MPa, 增幅达到 220% 。当进行 2 次和 5 次冲击时, Zone 3 区残余压应力值分别为 -658.8 MPa 和 -715.4 MPa, 5 次冲击后表层残余压应力仅为 2 次冲击后的 8.6% 。因此, 1 次或 2 次激光冲击强化可以使材料表层产生足够的残余压应力幅值, 性价比更高。

3.2.2 残余应力热稳定性

研究多次激光冲击后 $\Theta\Pi 866$ 不锈钢表层的组织结构和残余应力热稳定性时, 由于 $\Theta\Pi 866$ 不锈钢的最高使用温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对 1 次、3 次和 5 次冲击试样进行 $500\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 的真空热处理, 对 1 次、2 次和 4 次冲击试样进行 $650\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 的真空热处理, 测试并分析表面残余应力的变化情况。热处理后激光冲击靶材表面残余应力测量结果如图 7、8 所示。

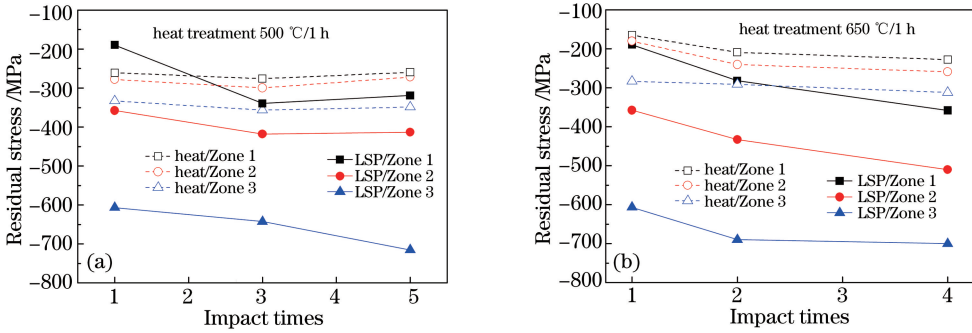


图 7 回火处理后多次激光冲击不锈钢表面残余应力

Fig. 7 Surface residual stress of stainless steel after multiple LSP impacts and tempering

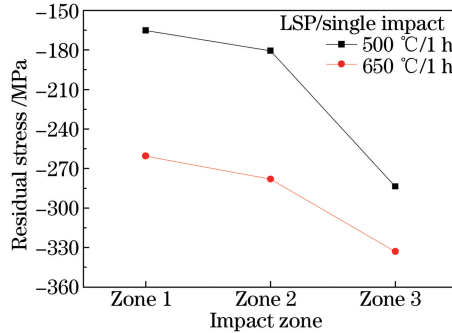


图 8 回火温度对单次激光冲击不锈钢表面残余应力的影响

Fig. 8 Influence of temperature on surface residual stress of stainless steel after single LSP impact

由图 7 和图 8 可观察到, 热处理导致激光冲击诱导的不锈钢靶材表面残余压应力值大幅度降低, 且热处理温度越高, 残余压应力下降幅度越大, 说明激光冲击诱导的残余压应力并不是很稳定。经 $500\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 回火处理后, 以 5 次冲击试样为例, Zone 3 区残余压应力值从 -715.4 MPa 降低到 -348.7 MPa, 下降幅度达到 51.3% , 而 Zone 1 区残余压应力则从 -319.1 MPa 降低到 -259.4 MPa, 降低了 18.7% , 如图 7(a) 所示。经 $650\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 回火处理后, 对 4 次冲击试样来说, Zone 3 区残余压应力值从 -700.0 MPa 降低到 -312.1 MPa, 下降幅度达到 55.4% , 而 Zone 1 区残余压应力则从 -358.2 MPa 降低到 -227.8 MPa, 降低了 36.4% , 如图 7(b) 所示。同时可观察到, 回火温度的提高将导致冲击表面残余压应力的减小, 而且随着光斑搭接次数的增加, 以单次冲击试样为例, 表面残余压应力降幅明显减小, 如图 8 所示。残余应力的部分释放可归咎于高温软化效应导致的靶材屈服强度降低, 以及靶材内部的残余应力重新分配。同时实验证明了激光冲击次数对靶材表面残余压应力的热稳定性影响较小, 如图 7 所示(虚线)。

由此可得出, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温热处理使靶材表面残余压应力显著降低, 但依然能够保留较大的数值, 说明激光冲击诱导的残余压应力具有良好的热稳定性, 1 次或 2 次激光冲击强化可使靶材表层产生足够幅值的残余压应力。

3.3 XRD 物相分析

图 9 为多次激光冲击不锈钢表层 X 射线衍射图谱。激光冲击诱导不锈钢表层产生新的衍射峰, 形成新

的析出相,而且冲击次数的增加导致更多析出相的形成[图 9(a)].随着激光冲击次数的增加,马氏体 M(110)衍射峰强度逐渐降低,峰宽增大,塑性变形更明显,当冲击次数超过 3 次时,峰高与峰宽变化不大[9(b)],说明冲击表层材料发生的塑性变形趋于稳定.衍射峰宽化通常可归功于位错密度的增加和晶粒细化.根据 Hall-Petch 公式 $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ (σ_0 为常数,相当于单晶体金属的屈服强度; K 为常数,表示晶界对强度影响的程度; d 为多晶体中各晶粒的平均直径),晶粒细化可提高金属强度,即细晶强化^[15].

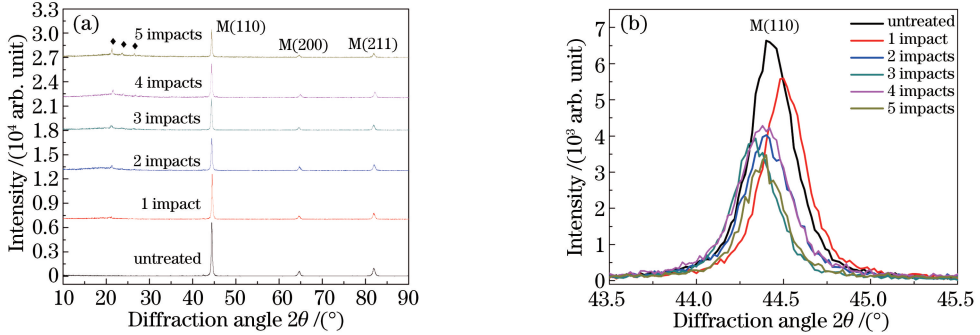


图 9 激光冲击强化表层 X 射线衍射图谱。(a) 冲击次数的影响; (b) M(110) 峰强度

Fig. 9 X-ray diffraction patterns of surface layer by multiple LSP impacts. (a) Influence of impact times; (b) intensity of M(110) peak

图 10 是经 500 °C 或 650 °C/1 h 回火处理后多次激光冲击的靶材表层 X 射线衍射图谱。500 °C 或 650 °C/1 h 回火处理后,冲击表层均产生了新的衍射峰,即碳化物 $M_{23}C_6$ 析出,如图 10(a) 所示。关于激光冲击次数的影响,现以 500 °C/1 h 回火试样为例进行讨论。由于激光冲击次数的增加,析出相对应的衍射峰有所降低,说明析出相的数量减少,导致峰强减弱,这与发生的塑性变形和晶粒细化有关,如图 4(b) 和图 10(b) 所示。

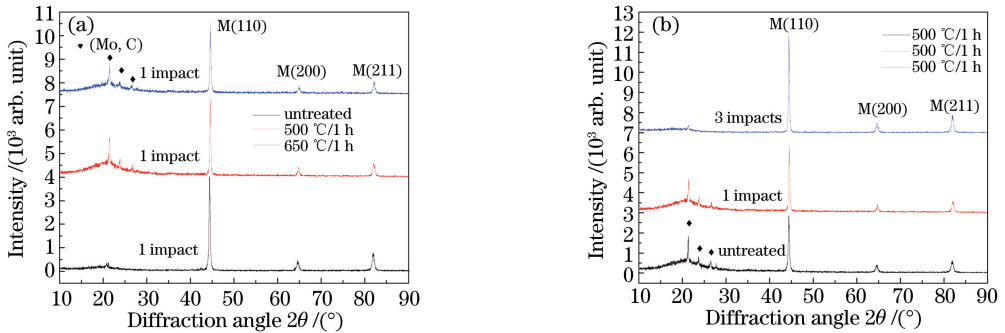


图 10 回火处理后多次激光冲击强化表层 X 射线衍射图谱。(a) 不同回火温度下的衍射图谱; (b) 不同冲击次数下的衍射图谱

Fig. 10 X-ray diffraction patterns of surface layer after multiple LSP impacts and tempering. (a) Patterns at different temperatures; (b) patterns under different impact times

4 结 论

采用钕玻璃脉冲激光器对航空发动机用 $\Theta\Pi 866$ 马氏体不锈钢进行多次激光冲击强化实验及分析,得出如下结论。不锈钢组织由板条回火马氏体和析出的碳化物组成,多次冲击表层产生高密度位错缠结,回火后仍保留其缠结结构,并观察到大量的纳米析出相。多次冲击可使表层引入更高幅值的残余压应力,如 1 次、2 次和 5 次冲击表面残余压应力分别为 -606.6, -658.8, -715.4 MPa,而且残余压应力值随光斑搭接次数增加而增加。500 °C 和 650 °C 回火处理使残余压应力明显降低,其下降幅度达到 50%,但仍保留较大的数值,冲击次数对残余压应力的热稳定性影响较小。

参 考 文 献

- 1 Sun Tiefeng, Li Xuming, Song Xiyu, *et al.* The influence of forging technology on the structure and property of 1Cr16Co5Ni2Mo1WVNbN steel[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29(3): 38-42.
孙铁峰, 李许明, 宋玺玉, 等. 锻造工艺对1Cr16Co5Ni2Mo1WVNbN钢组织和性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(3): 38-42.
- 2 Guo Shujuan, Yan Wei, Zhang Xiuli. Influence on the microstructure and properties of the chemical composition of martensitic stainless steel $\Theta\Pi866$ [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(14): 1671-1674.
郭淑娟, 闫伟, 张秀丽. 化学成分对马氏体不锈钢 $\Theta\Pi866$ 组织与性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(14): 1671-1674.
- 3 Yang Gang, Liu Zhengdong, Cheng Shichang, *et al.* Effect of heat treatment on impact toughness of heat-resistant steel $\Theta\Pi866$ [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(5): 30-34.
杨钢, 刘正东, 程世长, 等. 热处理工艺对耐热钢 $\Theta\Pi866$ 冲击韧性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(5): 30-34.
- 4 Zhao Xingdong, Bian Lihong, Sun Guidong, *et al.* Effect of forging technics on alloy structure and property[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2004, 21(4): 32-35.
赵兴东, 边丽虹, 孙贵东, 等. 锻造工艺对 $\Theta\Pi866$ 合金组织和性能的影响[J]. 沈阳航空工艺学院学报, 2004, 21(4): 32-35.
- 5 Wang Cheng, Lai Zhibin, He Weifeng, *et al.* Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103001.
汪诚, 赖志斌, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对1Cr11Ni2W2MoV不锈钢高周疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103001.
- 6 He Weifeng, Li Yinghong, Li Wei, *et al.* Laser shock peening on vibration fatigue behavior of compressor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1551-1556.
何卫锋, 李应红, 李伟, 等. 激光冲击强化提高压气机叶片疲劳性能研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1551-1556.
- 7 Li Jing, Li Jun, He Weifeng, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2889-2895.
李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17钛合金激光冲击多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889-2895.
- 8 Zhou L C, Li Y H, He W F, *et al.* Effect of multiple laser shock processing on microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(5): 1067-1072.
- 9 Zhu Ying, Fan Bowen, Guo Wei, *et al.* Influence of laser shock peening times on microstructure and hardness of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 444-448.
朱颖, 范博文, 郭伟, 等. 激光冲击次数对TA15微观组织和硬度的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 444-448.
- 10 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun, *et al.* Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 316-320.
曹子文, 邹世坤, 刘方军, 等. 激光冲击处理1Cr11Ni2W2MoV不锈钢[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 316-320.
- 11 Zhang Haifeng, Huang Shu, Sheng Jie, *et al.* Thermal relaxation of residual stress and grain evolution in laser peening IN718 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203008.
章海峰, 黄舒, 盛杰, 等. 激光喷丸IN718镍基合金残余应力高温松弛及晶粒演变特征[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203008.
- 12 Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, Gu Wei, *et al.* Residual stress of K24 super alloy surface by laser multiple processing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 309-313.
鲁金忠, 张永康, 顾韡, 等. 激光复合处理K24超合金表面残余应力[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(2): 309-313.
- 13 Zhang Qinglai, Zhang Qiao, Zhang Bingxin, *et al.* Study on characteristic of warm laser shock peening of AZ80-T6 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1006002.
张青来, 张乔, 张冰昕, 等. AZ80-T6镁合金激光冲击温强化特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1006002.
- 14 Li Xuming, Liu Junhe, Liu Yan, *et al.* The influence of heat treating regime on 1Cr16Ni2MoN steel at structure and property[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29(5): 29-34.

- 李许明, 刘军和, 刘 艳, 等. 热处理制度对 1Cr16Ni2MoN 钢组织和性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(5): 29-34.
- 15 Zhu Xiangqun, Zhou Ming, Dai Qixun, *et al.* Investigation of surface ultra-refinement of austenitic stainless steel induced by laser shock processing[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(17): 1581-1585.
- 朱向群, 周 明, 戴起勋, 等. 奥氏体不锈钢表面激光冲击晶粒超细化的研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(17): 1581-1585.