

激光与光电子学进展

激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响

周文¹, 葛茂忠^{1*}, 王大明², 项建云³¹江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001;²中国航发常州兰翔机械有限责任公司, 江苏 常州 213022;³常州工业职业技术学院现代装备制造学院, 江苏 常州 213164

摘要 为了研究激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响,对 GH3039 高温合金试样进行了不同次数的激光冲击。采用表面轮廓仪、显微硬度计及 X 射线衍射仪等表征了激光冲击前后 GH3039 高温合金的表面粗糙度、显微硬度、残余应力、微观结构及物相组成。结果表明:与母材相比,在激光一次、二次和三次冲击后,试样的表面粗糙度平均值分别增加了 28.5%、54.1% 和 109.1%,表面显微硬度分别增加了 21.4%、26.5% 和 28.6%,试样的近表层平均晶粒尺寸分别减小了 54.5%、57.1% 和 59.3%;激光冲击处理将试样表面的残余应力由拉应力(75 MPa)转变为压应力(一次冲击后为 -275 MPa、二次冲击后为 -302.4 MPa 和三次冲击后为 -335 MPa);激光冲击试样的变形层深度由 1.2 mm 左右(一次冲击)增加到 1.5 mm 左右(三次冲击);随着冲击次数的增加,衍射峰的半峰全宽明显增大,这归因于晶粒细化和微观应变的增加。

关键词 激光技术; GH3039; 激光冲击处理; 表面完整性

中图分类号 TN249 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314001

Effect of Laser Shock Peening on Surface Integrity of GH3039 Superalloys

Zhou Wen¹, Ge Maozhong^{1*}, Wang Taiming², Xiang Jianyun³¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China;²China Airlines Changzhou Lanxiang Machinery Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213022, China;³School of Modern Equipment Manufacturing, Changzhou Institute of Industry Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract In order to study the effect of laser shock peening (LSP) on the surface integrity of GH3039 superalloys, the GH3039 superalloy samples have been treated by LSP for different times. The surface roughness, microhardness, residual stress, microstructure and phase composition of GH3039 superalloys before and after LSP were characterized by the surface profiler, microhardness tester and X-ray diffractometer. The results indicate that compared with those of the base metal, after one, two, and three impacts, the surface roughness of LSP samples is increased by 28.5%, 54.1%, and 109.1%, the surface microhardness is increased by 21.4%, 26.5%, and 28.6%, and the average grain size in the near surface layer is decreased by 54.5%, 57.1%, and 59.3%, respectively. The residual stress of the

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-18; 录用日期: 2020-06-16

基金项目: 江苏省科技成果转化项目 (BA2018070)、江苏省自然科学基金面上项目 (BK20151171)、江苏省研究生实践创新计划项目 (20820111943)

*E-mail: gmzxjy@126.com

sample surface is transformed from tensile stress (75 MPa) into compressive stress (−275 MPa for one impact, −302.4 MPa for two impacts, and −335 MPa for three impacts). The deformation layer depth of the LSP sample increases from around 1.2 mm (for one impact) to around 1.5 mm (for three impacts). With the increase in the number of impacts, the full widths at half maximum of diffraction peaks increase obviously, which is attributed to grain refinement and micro-strain enhancement.

Key words laser technique; GH3039; laser shock peening; surface integrity

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

高温合金 GH3039 作为一种固溶强化镍基合金,具有耐高温、耐腐蚀和良好的成形性能,常用于制作航空发动机的热端零件^[1]。由于航空发动机零部件常工作在高温高压环境下且需承受交变载荷的作用,尤其在推重比不断增大的情况下,提高航空发动机关键器件的可靠性并延长其使用寿命,具有重要的社会意义和军事价值。

零件的表面完整性影响其抗疲劳性能,表面完整性主要包括表面粗糙度、微观组织、残余应力和显微硬度等内容^[2]。由 GH3039 高温合金制备的航空发动机关键结构件在服役一段时间后出现疲劳裂纹,严重影响了飞机的安全性和使用寿命^[3]。针对此问题,在不改变材料的前提下,采用表面改性技术改善制件的表面完整性是提升其抗疲劳性能的重要手段。

作为一种新型的表面改性技术,激光冲击处理(Laser shock peening, LSP)技术利用能量密度达 GW/cm²量级、脉宽为 ns 量级的强激光束辐照靶材表面,诱导形成高压冲击波,使靶材发生具有超高速变率的塑性变形,实现冲击强化区域的晶粒细化并形成残余压应力,进而改善靶材的抗疲劳、抗应力腐蚀等性能^[3-6]。目前,许多学者开展了激光冲击

钛合金^[7-8]、铝合金^[9-13]以及不锈钢^[14]等金属材料的表面完整性研究。GILL 等^[15]研究发现,在激光冲击之后,IN718SPF 高温合金的表面粗糙度由 1.2 μm 增加到 4.18 μm。孔德军等^[16]研究发现,激光冲击 GH4169 的表面残余压应力达到 −400 MPa,应力层深度达到 0.9 mm。关于不同冲击次数下激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响研究鲜有报道。本文采用激光冲击处理技术,对 GH3039 高温合金薄板进行了表面改性处理,从残余应力、表面粗糙度、微观结构、显微硬度和物相组成等方面,研究了不同冲击次数下激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响。

2 试验

2.1 试验材料

本文采用冷轧态的 GH3039 高温合金薄板作为激光冲击试样,表 1 为 GH3039 高温合金的化学成分。GH3039 高温合金具有良好的强度、韧性和延展性,其室温下的力学性能如表 2 所示。采用线切割机沿板材轧制方向将 GH3039 高温合金薄板加工为尺寸为 50 mm×35 mm×2 mm 的试样。试样分为四组:S₁为未处理试样(母材),S₂为一次冲击试样,S₃为二次冲击试样,S₄为三次冲击试样。考虑到试验误差的影响,每个试验组设定三个试样。

表 1 GH3039 高温合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH3039 superalloy (mass fraction, %)

Chemical composition	C	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	Si	S	Mn	P	Ni
Value	≤0.08	19-22	0.35-0.75	0.35-0.75	1.8-2.3	0.90-1.30	3.00	≤0.80	≤0.012	0.40	0.02	Bal.

表 2 室温下 GH3039 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH3039 at room temperature

Mechanical property	Tensile strength / Yield strength / MPa	Elongation / %
Value	876 / 764	40

2.2 激光冲击试验

激光冲击处理试验在广东工业大学完成。试验采用美国 LSPT 公司研制的 Procudo200 型激光喷丸系统,冲击参数如表 3 所示。约束层采用 2 mm 厚的流动自来水,吸收层选用 0.1 mm 厚的黑胶带。冲击强化方式为单面冲击。

表 3 激光冲击工艺参数

Table 3 Technological parameters used for laser shock peening

Parameter	Value
Pulse energy / J	8
Laser pulse duration / ns	20
Laser wavelength / nm	1053
Repetition rate / Hz	10
Spot diameter / mm	3
Overlapping rate / %	30

2.3 表面粗糙度和残余应力测量

采用美国 NANOVEA 公司研制的 PS50 型非接触式 3D 光学轮廓仪测量试样的表面形貌和表面粗糙度,每个试样取三个不同的区域测量粗糙度并

计算其平均值。

利用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量激光冲击前后试样表面的残余应力,采用侧倾固定侧倾角 (Ψ) 法测量,定峰方法为交相关法^[4],辐射为钴靶 K_{α} , X 光管电压为 25 kV, X 光管电流为 5 mA,准直管直径为 2 mm,计数时间为 1 s,衍射角扫描步距为 0.1° ,应力常数为 $-322 \text{ MPa}/(^{\circ})$,应力测试晶面为 (311), Ψ 分别取 0° 、 24.2° 、 35.3° 和 45° ,扫面起始角为 158° ,终止角为 150° ^[4]。利用 LK2005A 型电化学工作站测量深度方向的残余应力,对试样进行电解抛光,电解质是硝酸乙醇溶液,同时配合使用 X-350A 型 X 射线应力测定仪,每隔 $50 \mu\text{m}$ 逐层测量残余应力,每层取三个点进行测量并取平均值记录数据。电解抛光试验的参数如表 4 所示。

表 4 电解抛光试验的工艺参数

Table 4 Technological parameters for electro-polishing experiment

Parameter	Voltage / V	Electric current / A	Electrolysis rate / ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Room temperature / $^{\circ}\text{C}$
Value	18-22	6-8	0.8	20

2.4 微观组织和显微硬度的测量

在试样的激光冲击区域,用线切割机切取出尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样,对试样依次进行镶嵌、打磨、抛光、腐蚀和清洗以制作金相试样^[3]。采用 ZEISS Primotech 光学显微镜测量金相试样的微观结构。利用软件 Imager Pro-Plus 6.0 分析激光冲击处理前后 GH3039 高温合金的晶粒尺寸。利用线切割机切取尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样,用无水乙醇进行超声清洗以去除表面污渍。将试样沿深度方向切开,镶嵌并打磨抛光。采用 HXD-1000TMS/LCD 型显微硬度仪,沿截面方向测量试样的显微硬度,测量载荷为 100 g,加载时间为 10 s,前 10 个点间隔 $50 \mu\text{m}$ 进行测量,后 15 个点间隔 $100 \mu\text{m}$ 进行测量,每个点测量三次取平均值计入。采用线切割机分别在母材与激光冲击试样中切取尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的试样,利用丙酮对试样进行超声清洗。采用 PANalytical X'Pert 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对母材和冲击试样进行物相分析,测量参数如下:辐射为 CuK_{α} , X 光电管电压为 40 kV, X 光电管电流为 40 mA,扫描起始角为 20° ,终止角为 80° ,扫描速度为 $2(^{\circ})/\text{min}$ 。

3 结果与分析

3.1 表面粗糙度

表面粗糙度是表征零件表面加工质量的重要

指标。图 1 所示是母材和不同激光冲击次数下 GH3039 高温合金表面的三维形貌。如图 1(a) 所示,母材表面平坦,高度变化均匀。如图 1(b) 所示,一次激光冲击后,试样表面出现凹坑和凸起,表面粗糙度增大。如图 1(c) 所示,二次激光冲击后,试样表面的凹坑深度加大,表面起伏程度加大。如图 1(d) 所示,三次激光冲击后,试样表面粗糙,高度变化不均匀程度进一步加剧。

利用三维形貌仪自带的分析软件测量不同试样的表面粗糙度。GH3039 高温合金在不同激光冲击次数下的表面粗糙度如图 2 所示。由图 2 可知,在激光冲击处理前,各试样表面粗糙度的测量结果相近,其平均值为 $0.0372 \mu\text{m}$;一次激光冲击后,试样表面粗糙度的测量结果平均值为 $0.0478 \mu\text{m}$,与未冲击试样相比,表面粗糙度增加了 28.5%;二次激光冲击后,粗糙度平均值增加至 $0.0573 \mu\text{m}$,与母材相比,增幅约为 54.1%,与一次冲击试样相比,增幅为 19.9%;三次激光冲击后,试样表面粗糙度的测量值大幅增加,其平均值为 $0.0778 \mu\text{m}$,与母材相比,表面粗糙度增加 109.1%,与一次冲击试样、二次冲击试样相比,表面粗糙度的涨幅分别为 62.7%、35.8%。由此可以发现,激光冲击次数对 GH3039 高温合金表面粗糙度有显著影响;随着激光冲击次数的增加,GH3039 高温合金表面粗糙度增大。激光束诱导产生的瞬时冲击波的能量分布不均,作用于试样表面

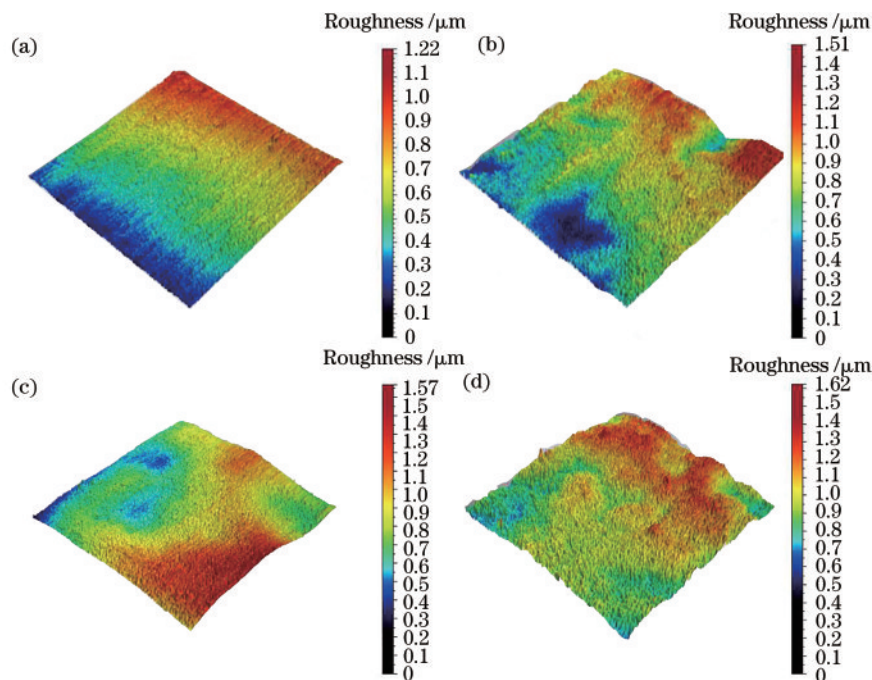


图 1 不同条件下的表面三维形貌图。(a)未冲击;(b)一次冲击;(c)二次冲击;(d)三次冲击
Fig. 1 Surface 3D morphologies under different conditions.
(a) Without LSP; (b) 1 impact; (c) 2 impacts; (d) 3 impacts

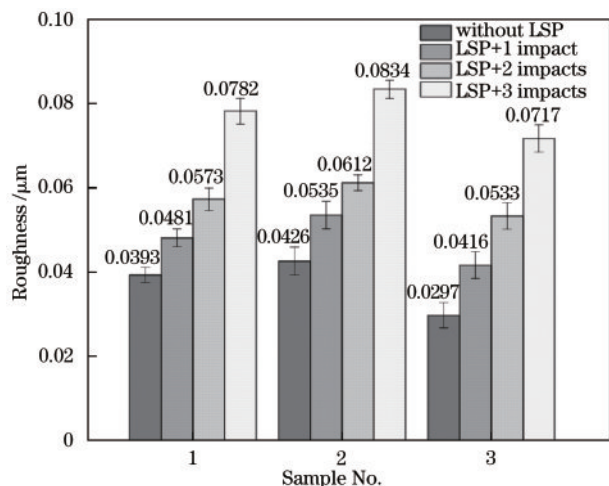


图 2 不同冲击次数下表面粗糙度的测量结果
Fig. 2 Measurement results of surface roughness under different numbers of impacts

后导致材料表面受力不均,材料表面形成峰谷高度差;多次激光冲击时,不同的光斑形成重复搭接,试样表层的凹陷区域不断加深,出现不均匀的塑性变形,导致试样表面粗糙度增加;此外,黑胶带和靶材之间的气泡以及靶材力学性能的不均匀性均有可能导致激光冲击后试样表面粗糙度增大。

3.2 显微硬度

图 3 是不同激光冲击次数下 GH3039 高温合金沿

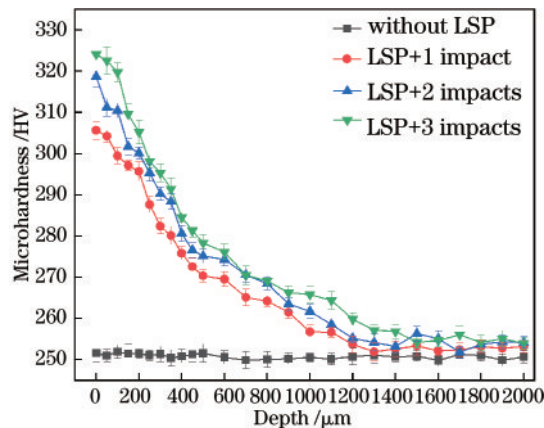


图 3 不同冲击次数下 GH3039 高温合金沿深度方向的显微硬度

Fig. 3 Microhardness along depth direction of GH3039 superalloy under different numbers of impacts

深度方向的显微硬度分布曲线。可以观察到,随着激光冲击次数的增加,试样的表层显微硬度明显增大。

未冲击时,试样的表层显微硬度平均值为 252 HV;一次冲击后,试样的表层显微硬度平均值为 306 HV,与母材相比,增长幅度约为 21.4%;二次冲击后,表层显微硬度为 319 HV,相比母材和一次冲击试样,分别增长了约 26.5%、4.2%;三次冲击后,表层显微硬度为 324 HV,相比母材和二次冲击试样,分别增长了约 28.6%、1.6%。由此可知,

激光冲击次数的增加能够显著提高试样表面的显微硬度值,但不同冲击次数下显微硬度值的增幅呈减小趋势,这主要归因于单次激光冲击导致试样表层材料发生形变硬化,再次激光冲击时,试样表层材料的动态屈服强度增大,试样再次发生塑性变形需要消耗更多的激光能量,在冲击波能量一定的情况下,用于材料有效塑性变形的能量减少,故试样表面硬度的增幅减小。

由图 3 可知, GH3039 高温合金沿深度方向的显微硬度呈梯度分布,合金的显微硬度值随着深度的增加而减小并逐渐趋近于试样基体的硬度值;试样经过一次、二次和三次冲击后,硬化层的深度分别达到 1200, 1400, 1500 μm 左右,这表明随着激光冲击次数的增加,硬化层的深度逐渐增大。

3.3 残余应力

表 5 是不同激光冲击次数下 GH3039 高温合金表面某点的残余应力测量值。可以看出,母材的表面残余应力为 47.3 MPa,一次冲击、二次冲击以及三次冲击后试样的表面残余应力值分别为 -269.7, -303.6, -334.4 MPa;激光冲击前后试样表面的应力由拉应力转变为压应力,说明激光冲击处理能够改变试样表面的应力状态。

表 5 不同冲击次数下 GH3039 高温合金的表面残余应力测量值

Table 5 Surface residual stress of GH3039 superalloy under different numbers of impacts

Number of impacts	Without LSP	1 impact	2 impacts	3 impacts
Surface residual / MPa	47.3	-269.7	-303.6	-334.4

图 4 为不同冲击次数下 GH3039 高温合金沿深度方向的残余应力分布图。由图 4 可知,未冲击试样的残余应力平均值约为 75 MPa,一次冲击、二次冲击和三次冲击试样的表面残余应力平均值分别为 -275, -302.4, -335 MPa。母材的残余应力为拉应力,应力数值随着深度的增加变化不大;冲击试样的残余应力为压应力,残余压应力随深度的增加而减小,应力状态逐渐趋近于材料原有的应力状态。随着激光冲击次数的增大,试样的残余压应力增加,但不同冲击次数下试样残余压应力的增长幅度不同。这可能是由于激光冲击后试样的表面粗糙度增加,对于相同脉冲能量诱导产生的冲击波,作用于试样表面凸出轮廓上的能量增多,有效输入

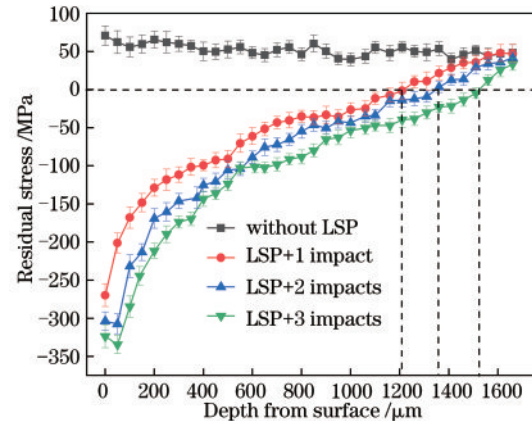


图 4 不同冲击次数下 GH3039 高温合金沿深度方向的残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution along depth direction of GH3039 superalloy under different numbers of impacts

能量减少,试样局部区域的塑性变形程度降低,相应的残余压应力减小;其次,多次激光冲击时,上道激光冲击诱导的形变硬化导致变形抗力增加,从而试样塑性变形所需的能量增加。另外,与一次冲击不同,多次冲击后残余压应力的最大值出现在次表层。激光冲击诱导产生的冲击波加载作用消失后,表面残余压应力由于反向稀疏波产生塑性卸载作用。单次激光冲击时,卸载作用对表面残余应力的影响不明显,而多次激光冲击时,由于塑性卸载作用的累积效应,表面残余应力明显减小^[17]。

从图 4 还可以看出,一次冲击、二次冲击和三次冲击后试样的残余应力层深度分别在 1200, 1350, 1500 μm 左右。随着激光冲击次数的增加,试样的残余应力层深度逐渐增大^[18]。残余应力层深度增加的原因主要是当冲击次数达到一定量时,试样表层的塑性变形趋于饱和,激光诱导产生的冲击波传播至试样更深处,引发更深层的塑性变形,故残余压应力层的深度增加。

3.4 微观结构

图 5 为不同激光冲击次数下 GH3039 高温合金的微观结构。由图 5(a)、(b)可以看出, GH3039 母材的组织由单相奥氏体和少量的 MC 碳化物组成, MC 碳化物分布于晶体内部和晶界处;轧制表层的晶粒尺寸较小,平均晶粒尺寸大约为 47.39 μm 。

图 5(c)所示为一次冲击试样沿深度方向的微观结构,可以看出,试样沿深度方向的晶粒尺寸呈梯度分布,距表层越远,晶粒尺寸越大。这是由激光诱导产生的冲击波在材料内部的传播特性导致的,冲击波作用于表层时衰减程度最小,冲击波能

量最大,引发试样表层发生剧烈的塑性变形,同时晶体内部产生高密度位错;随着冲击波的持续作用,高密度位错经历交织缠结、湮灭和重排等过程,最终演化为亚晶界,晶粒得到细化;而冲击波在材料内部的传播能量随着深度的增加而减小,导致材

料的塑性变形减小,晶粒的细化程度逐渐降低^[3]。图 5(d)所示为一次冲击试样表层微观结构的局部放大图。可以看出,晶粒尺寸明显减小,平均晶粒尺寸约为 21.56 μm ,相比图 5(b),一次激光冲击后试样表层的晶粒明显细化。

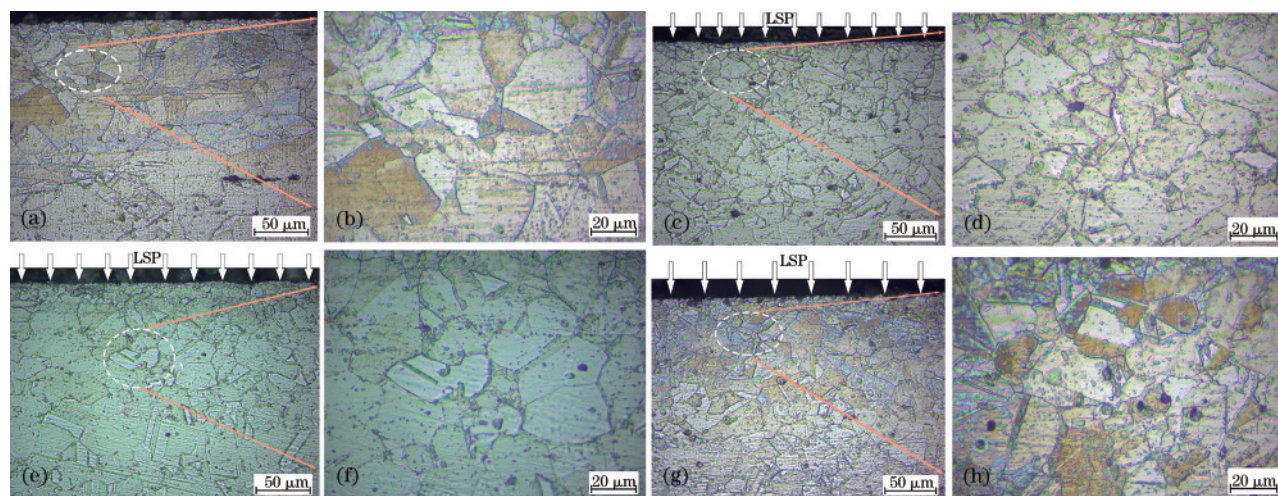


图 5 不同冲击次数下 GH3039 高温合金的微观结构及局部放大图。(a)(b)未冲击;(c)(d)一次冲击;(e)(f)二次冲击;(g)(h)三次冲击

Fig. 5 Microstructure of GH3039 superalloy and local magnification under different numbers of impacts.

(a)(b) Without LSP; (c)(d) 1 impact; (e)(f) 2 impacts; (g)(h) 3 impacts

图 5(e)、(f)分别为二次冲击后 GH3039 微观结构及其局部放大图。由图 5(e)可知,随着深度的增加,试样的晶粒尺寸逐渐增大,与图 5(c)相比,激光冲击诱导的晶粒细化层的深度增大。从图 5(f)可以观察到,二次冲击后,平均晶粒尺寸约为 20.32 μm 。由图 5(g)和图 5(h)可知,三次冲击后试样的晶粒细化层的深度显著增大,平均晶粒尺寸约为

19.27 μm ,相比于一次冲击和二次冲击,晶粒尺寸的变化幅度较小。由此说明,在相同工艺参数下,多次激光冲击导致试样近表层的动态屈服极限增大,塑性变形趋于饱和,激光冲击对材料的晶粒细化作用逐渐减弱。

3.5 物相分析

图 6 为不同激光冲击次数下 GH3039 高温合金

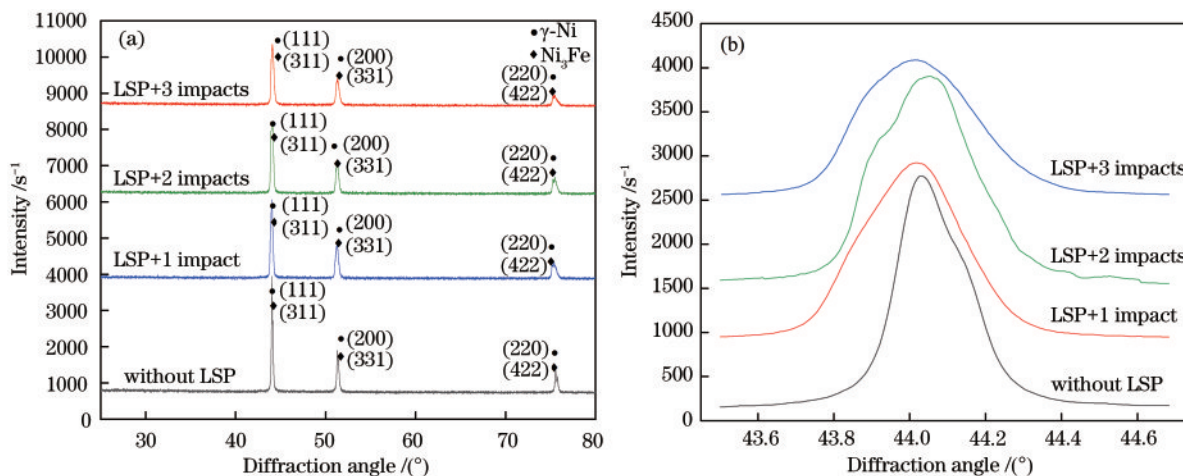


图 6 不同冲击次数下 GH3039 高温合金的 XRD 图谱及局部放大图。(a)XRD 图谱;(b)局部放大图

Fig. 6 XRD patterns of GH3039 superalloy and local magnification under different numbers of impacts.

(a) XRD patterns; (b) local magnification

的 XRD 图谱。由图 6(a)可知,激光冲击前后试样的衍射峰没有改变,说明激光冲击既没有改变材料的物相组成,也没有诱导新的物相产生。其原因是激光冲击处理属于冷加工,激光冲击处理是利用高能脉冲激光诱导产生高压冲击波,进而诱导靶材发生具有超高应变率的塑性变形,从而实现形变强化。

图 6(b)为不同激光冲击次数下试样衍射图谱的局部放大图,表 6 为 43.6°~44.6°范围内衍射峰的位置和对应的半峰全宽(FWHM)。结合图 6(b)和表 6 可以看出,相比于母材,在不同冲击次数下,激光冲击试样的衍射峰强度均有所减小,衍射峰的半峰全宽明显增宽。这是由于激光诱导产生的冲击波使材料内部发生剧烈的塑性变形,试样表层的晶粒细化且微观应变增加。此外,由图 6(b)可知,随着激光冲击次数的增加,衍射峰的半峰全宽明显增大,材料表层的晶粒细化程度增加。

表 6 不同冲击次数下 43.6°~44.6°范围内衍射峰的半峰全宽
Table 6 Full widths at half maximum of diffraction peaks in 43.6°~44.6° range under different numbers of impacts

Number of impacts	Without LSP	1 impact	2 impacts	3 impacts
FWHM /rad	0.139	0.252	0.283	0.301

4 结 论

以 GH3039 高温合金为研究对象,采用激光冲击处理技术对其进行表面改性处理。研究发现,激光冲击处理使得合金的表层显微硬度和表面粗糙度均有所增加,金属内部的残余应力状态发生明显改变,合金的表面完整性得到提升。与母材相比,激光冲击试样的晶粒明显细化,但随着冲击次数的增加,GH3039 晶粒的细化程度减弱。在不同激光冲击次数下,GH3039 中未产生新的物相或发生物相转变。随着冲击次数的增加,衍射峰强度减小,半峰全宽明显增大,这归因于晶粒细化和微观应变的增加。

参 考 文 献

- [1] Shi C X, Zhong Z Y. Forty years of superalloy r & d in China [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33 (1): 1-8.
师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金 40 年 [J]. 金属学报, 1997, 33(1): 1-8.
- [2] Huai Y Y, Zhao J B, Qiao H C, et al. Investigation of laser shock peening on the surface integrity of Ti17 thin-walled titanium alloy [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(12): 73-77.
槐艳艳, 赵吉宾, 乔红超, 等. 薄壁钛合金 Ti17 激光冲击强化表面完整性研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 73-77.
- [3] Tang Y, Ge M Z, Wang T M, et al. Effect of laser shock peening on fatigue life of GH3039 superalloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56 (22): 221401.
汤洋, 葛茂忠, 王太明, 等. 激光冲击处理对 GH3039 高温合金疲劳寿命的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221401.
- [4] Wang J, Li M, Wang J X, et al. Effects of laser shock processing on fatigue life of 304 stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (1) : 0102003.
汪军, 李民, 汪静雪, 等. 激光冲击强化对 304 不锈钢疲劳寿命的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(1) : 0102003.
- [5] Liu Y, Lu J Z, Luo K Y, et al. Effect of laser shock processing on tensile property and fracture morphology of CP-Ti under elevated temperature condition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (9) : 0902005.
刘月, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 升温条件下激光冲击强化对工业纯钛拉伸性能和断口形貌的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43(9) : 0902005.
- [6] Ge M Z, Xiang J Y, Tang Y. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth rate of TC4 repaired parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7) : 071405.
葛茂忠, 项建云, 汤洋. 激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7) : 071405.
- [7] Hou L H, Ren X D, Zhou W F, et al. Change of surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser shock processing at middle and high temperatures [J]. Laser Technology, 2016, 40(2) : 288-291.
侯丽华, 任旭东, 周王凡, 等. 中高温条件下激光冲击处理 Ti-6Al-4V 表面完整性变化 [J]. 激光技术, 2016, 40(2) : 288-291.
- [8] Sun H, Zhu Y, Guo W, et al. Effect of laser shock peening on residual stress and microstructure of TC17 titanium alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4) : 041405.

- 孙浩, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 钛合金残余应力及显微组织的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041405.
- [9] Sun R J, Zhu Y, Li L H, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and residual stress of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011413.
- 孙汝剑, 朱颖, 李刘合, 等. 激光冲击强化对电弧增材 2319 铝合金微观组织及残余应力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011413.
- [10] Salimianrizi A, Foroozmehr E, Badrossamay M, et al. Effect of Laser Shock Peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 77: 112-117.
- [11] Cao Z W, Xu H Y, Zou S K, et al. Investigation of surface integrity on TC17 titanium alloy treated by square-spot laser shock peening [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(4): 650-656.
- [12] Xiong Y, He T T, Guo Z Q, et al. Effects of laser shock processing on surface microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained high carbon steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 570: 82-86.
- [13] Kattoura M, Mannava S R, Qian D, et al. Effect of laser shock peening on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 102: 121-134.
- [14] Rubio-González C, Felix-Martinez C, Gomez-Rosas G, et al. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 914-919.
- [15] Gill A, Telang A, Mannava S R, et al. Comparison of mechanisms of advanced mechanical surface treatments in nickel-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 576: 346-355.
- [16] Kong D J, Miao H. Effects of laser shock processing on tempering stability of residual stress of GH4169 alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, 31(9): 146-150.
- 孔德军, 缪宏. 激光冲击处理对 GH4169 合金应力回火稳定性的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(9): 146-150.
- [17] Li Y H. Theory and technology of laser shock peening [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- 李应红. 激光冲击强化理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [18] Zan Y X, Jia W J, Zhao H Z, et al. Effect of laser shock processing on residual stress and microstructure of Ti834 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(11): 3535-3540.
- 咎垚旭, 贾蔚菊, 赵恒章, 等. 激光冲击对 Ti834 合金残余应力及显微组织的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(11): 3535-3540.