

激光冲击强化与超声喷丸对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳性能的影响

赖志林 汪 诚 李应红 周留成 何卫锋 聂祥樊 孙 冬

(空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘要 为了比较激光冲击强化与超声喷丸对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳性能的影响,对未处理、超声喷丸处理和激光冲击强化处理三种状态试件进行常温振动疲劳试验,并通过 X 射线衍射、扫描电镜和透射电镜等手段分析两种技术提高疲劳寿命的机理。试验结果表明,在选定的工艺参数下,超声喷丸和激光冲击强化处理后,疲劳寿命分别提高了 88.2% 和 280.1%,形成的表面残余应力分别为 -545 MPa, -810 MPa,残余压应力深度分别为 0.4 mm, 1.8 mm,表面硬度由 392 HV 分别提高到 434 HV、405 HV;超声喷丸形成的组织细化层和纳米晶层较深。经分析,激光冲击强化对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢常温疲劳性能的提高优于超声喷丸主要与其产生的高残余压应力和低粗糙度影响有关。

关键词 激光技术;激光喷丸;超声喷丸;1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢;疲劳寿命;残余应力;纳米晶层

中图分类号 TG665; TG142.24; V252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.051403

Effects of Laser Shock Peening and Ultrasonic Shot Peening on Fatigue Property of 1Cr11Ni2W2MoV Stainless Steel

Lai Zhilin Wang Cheng Li Yinghong Zhou Liucheng He Weifeng
Nie Xiangfan Sun Dong

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University,
Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract In order to compare the effects of laser shock peening (LSP) and ultrasonic shot peening (USP) on fatigue property in 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel, vibration fatigue tests of three different samples are conducted at 20 °C, X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) are used to investigate the mechanism of fatigue property improvement. Experimentally, the fatigue lives of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel after USP and LSP are increased by 88.2% and 280.1%, respectively. The surface residual stress after LSP is -810 MPa and the one after USP is -545 MPa, and the compressive residual stress depth after LSP and USP is 1.8 mm, 0.4 mm, respectively. The surface microhardness after LSP and USP increases from 392 HV to 434 HV and 405 HV, respectively. The microstructure studies demonstrate that USP has an advantage in microstructure refinement and surface nanocrystallines. We come to the conclusion that the residual stress and the small influence to the roughness make great contributions to the superiority of LSP in the improvement in fatigue property of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel over USP at 20 °C.

Key words laser technique; laser shock peening; ultrasonic shot peening; 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel; fatigue life; residual stress; nanocrystalline

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 160.4236; 350.3850

1 引 言

1Cr11Ni2W2MoV 钢是马氏体型热强不锈钢,具有马氏体相变硬化能力及良好的综合力学性能,广泛用

收稿日期: 2013-01-28; **收到修改稿日期**: 2013-01-30; **网络出版日期**: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)资助课题。

作者简介: 赖志林(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化和表面改性等方面的研究。

E-mail: lz16637076@163.com

导师简介: 李应红(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事等离子体动力学和材料表面改性等方面的研究。

E-mail: yinghong_li@126.com

于制造在 600 °C 以下工作的航空发动机叶片、盘和轴等重要零部件^[1]。航空发动机长期工作在高温、高压以及高速旋转的恶劣环境中,其发动机叶片、盘等零部件不仅要承受离心负荷、弯扭负荷和温度负荷,还要受到振动、腐蚀、热冲击、气流冲击、蠕变、疲劳、接触挤压、微动磨损和外来物打伤等方面的作用,表面易产生微裂纹,进而引发疲劳破坏,严重影响飞行安全^[2]。近年来,利用表面改性技术对材料或构件进行处理,提高表面完整性,已成为工程应用中提高疲劳性能的重要手段之一。超声喷丸(USP)和激光冲击强化(LSP)是两种新兴的材料表面改性技术,通过塑性变形,在一定厚度上残留压应力^[3,4],细化材料表层组织^[5,6],提高材料的力学性能。

超声喷丸,又称表面机械研磨(SMAT)^[7],是将高能量密度的超声波转化为机械能,经过弹丸多次撞击材料表面从而对表面改性、提高材料性能的一种处理工艺。超声喷丸能够提高材料硬度,产生残余压应力,在材料表面制备出纳米晶层,提高材料的综合力学性能^[3,5,7~9]。但该技术存在对材料表面粗糙度影响大、产生的残余应力分布较浅(小于 500 μm)、加工时间长以及对复杂零部件加工困难等缺点^[10~12]。

激光冲击强化又称激光喷丸是一种利用激光诱导冲击波的力学效应强化材料的新技术。激光冲击强化没有弹丸介质,光斑大小和位置可精确控制,能够处理超声喷丸不能处理或难于处理的零件部位,加工时间短,易于实现自动化控制。对材料表面粗糙度影响小,产生的残余压应力深度可达 1~2 mm,是超声喷丸的 3~5 倍,能够弥补超声喷丸处理工艺的缺点^[4,6,13~16]。

对于这两种表面改性新技术的对比研究,Mordyuk 等^[10]对 AISI 321 奥氏体不锈钢进行超声喷丸和激光冲击强化(无吸收保护层、约束层)处理,研究表明超声喷丸处理后产生了马氏体相变、表面纳米层等结构,强化效果优于没有吸收保护层和约束层的激光冲击强化。本文根据某型发动机叶片粗糙度要求,确定激光冲击强化和超声喷丸工艺参数,对未处理、超声喷丸处理和激光冲击强化处理(有吸收保护层和约束层)三种表面处理状态的 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢试件进行振动疲劳试验,从粗糙度、残余应力、显微硬度和微观组织等方面分析这两种改性技术对常温疲劳性能的影响,研究 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳性能提高的机理。

2 试验材料与方法

1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢的化学成份如表 1 所示,在 1000 °C~1020 °C 油淬,540 °C~560 °C 空冷的热处理条件下,材料的力学性能为:拉伸强度 $\sigma_b = 1080 \text{ MPa}$ 、屈服强度 $\sigma_{0.2} = 885 \text{ MPa}$ 、弹性模量 $E = 196 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu = 0.277$ 。为了对比研究超声喷丸和激光冲击强化对材料疲劳性能的影响,设置了三种不同的表面处理状态,分别是:1) 未处理状态;2) 超声喷丸处理;3) 激光冲击强化处理。试件尺寸及处理区域如图 1 所示。

表 1 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	W	Mo	V	Mn	Si	P	S
0.10~0.16	10.5~12.00	1.40~1.80	1.50~2.00	0.35~0.50	0.18~0.30	≤0.6	≤0.6	≤0.03	≤0.02

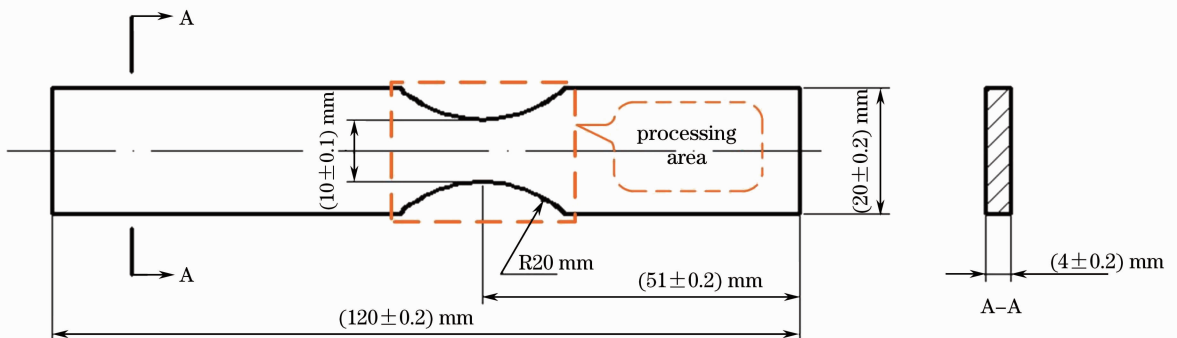


图 1 试件尺寸及处理区域

Fig. 1 Dimension of test piece in experiment and processing area

根据某型发动机叶片粗糙度要求 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$, 通过对粗糙度进行试测, 确定激光冲击强化和超声喷丸的工艺参数。激光冲击强化光源采用 Nd:YAG 固体激光器, 参考何卫锋等^[15] 根据 Fabbro 模型计算的 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢激光功率密度阈值 $4.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 和水的击穿激光功率密度 $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 确定激光冲击强化工艺参数为: 激光波长 1064 nm , 激光能量 6 J , 脉冲宽度[半峰全宽(FWHM)] 10 ns , 光斑直径 3 mm , 搭接率 50% , 激光功率密度 $8.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$; 以水(厚度 2 mm)为约束层, 铝箔(厚度 0.1 mm)为吸收保护层。超声喷丸工艺参数为: 超声波振动频率 20 kHz , 弹丸材料为不锈钢, 弹丸直径 2 mm , 喷丸时间 1000 s 。超声喷丸和激光冲击强化原理如图 2 所示, 试件处理区域见图 1。进行超声喷丸处理时, 将保护胶带粘贴在试件处理区域两端, 防止未处理区域损伤从而影响疲劳性能。

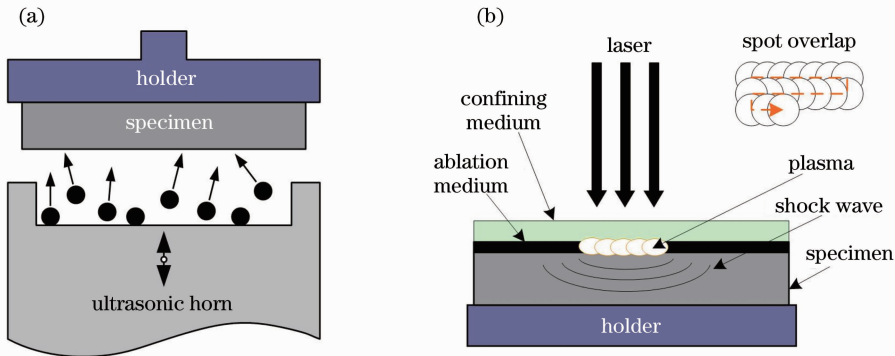


图 2 (a) 超声喷丸与 (b) 激光冲击强化原理示意图

Fig. 2 Principle schematics of (a) ultrasonic shot peening and (b) laser shock peening

振动疲劳试验采用成组对比方法, 试验应力 $\sigma_{\text{max}} = 640 \text{ MPa}$, 试验温度为常温。在梁氏电磁振动台上进行一阶弯曲振动疲劳试验, 测试三种不同状态试件的中值疲劳寿命。试验设备由试件激振系统、试件振幅测量系统和试件应力测量系统组成。测量系统及试件夹持状态如图 3 所示。

粗糙度测试采用 MC012-2301A 型表面形状测量仪, 在试件处理区域, 沿水平中心线方向(图 1), 从左至右测量表面粗糙度, 取样长度为 3 mm 。残余应力测试设备采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪, 试验执行 GB7704-87 标准, 侧倾固定 Ψ 法测量。每个试样沿中心方向按比例选取 5 个点测量, 取平均值。测试相关参数为: 管压 25 kV , 管流 7 mA , Cr-K α 辐射, 准直管 3 mm , 衍射晶面为 (211)。显微硬度测试采用 Duramin-10 型全自动显微硬度计, 沿处理区域垂直中心线方向(图 1)切割取样, 对切割制备好的试样从处理边缘至心部进行测试, 载荷为 200 g , 加载时间为 15 s 。采用 FEI Quanta400 型扫描电镜(SEM)观察三种状态试样表层组织微观特征, 采用 JEM-2010 透射电镜(TEM)观察激光冲击强化处理后的微观组织, 工作电压为 200 kV , 电镜样品采用离子减薄方法制备。

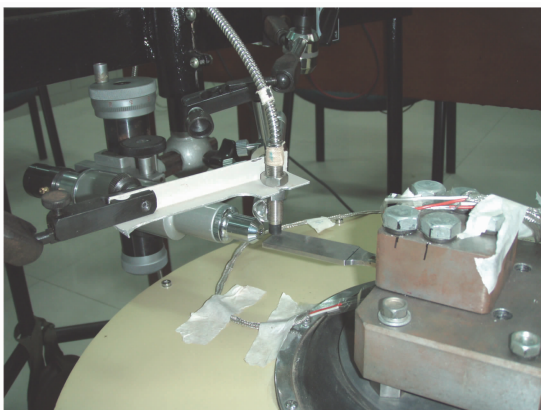


图 3 测量系统及试件夹持状态

Fig. 3 Measuring system and specimen gripping state

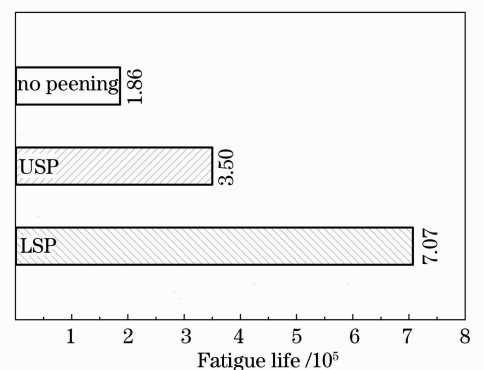


图 4 不同状态 1Cr11Ni2W2MoV 试件的疲劳寿命 ($\sigma_{\text{max}} = 640 \text{ MPa}$)

Fig. 4 Fatigue lives of different 1Cr11Ni2W2MoV samples ($\sigma_{\text{max}} = 640 \text{ MPa}$)

3 试验结果与分析

3.1 振动疲劳实验结果

3种状态试件各12件,在相同条件下进行室温下一阶弯曲振动疲劳试验,按照“HB/Z112-86 材料疲劳试验统计分析方法”对实验数据进行分析 and 处理,得到中值疲劳寿命结果如图4所示。未处理试样的中值疲劳寿命为 1.86×10^5 ; 超声喷丸处理后试样的中值疲劳寿命是 3.5×10^5 ,比未处理试样提高了88.2%; 激光冲击强化处理后试样的中值疲劳寿命是 7.07×10^5 ,比未处理试样提高了280.1%,是超声喷丸对疲劳性能提高幅度的3倍。

3.2 疲劳性能提高机理分析

3.2.1 粗糙度

表面粗糙度也称表面光洁度,是指加工表面上具有的较小间隔和峰谷所组成的微观几何形状特征,它是表征材料表面几何特征的参数之一。它直接影响零件的耐磨性、疲劳强度、接触刚度、抗腐蚀性、密封性以及导电、导流性能等,是影响零件及产品性能的一项重要指标^[17]。因此,零件表面粗糙度对其疲劳性能有着重要的作用。对三种不同状态试样进行粗糙度测试,测试结果如图5所示。

采用轮廓算术平均偏差 R_a 来评定轮廓表面的粗糙度,未处理试样表面粗糙度为 $0.419 \mu\text{m}$,激光冲击强化处理后表面粗糙度为 $0.584 \mu\text{m}$,超声喷丸处理后表面粗糙度为 $0.704 \mu\text{m}$,都满足某型发动机叶片表面粗糙度要求 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ 。

表面粗糙度可引起微观应力集中,根据 El Haddad 等^[18]提出的修正关系,得到表面粗糙度的疲劳极限为

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta K_{th}}{y[\pi(R+a_0)]^{0.5}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma$ 为表面粗糙度微谷深度为 R 时的疲劳极限应力, ΔK_{th} 为裂纹的阈值应力强度因子, y 为微谷的形状因子, a_0 为材料的临界裂纹长度。

由(1)式可知,粗糙度微谷越深,曲率半径越小,越易形成应力集中。表面粗糙度越大, R 、 y 也越大,疲劳极限应力 $\Delta\sigma$ 越小,越易产生疲劳断裂,材料疲劳寿命降低越大;反之则疲劳寿命降低较小。与超声喷丸相比,激光冲击强化对表面粗糙度的影响较小,对疲劳寿命的影响较小。

3.2.2 残余应力

采用 X 射线衍射结合电化学腐蚀剥层的方法对强化区域表层残余应力沿深度方向的分布进行测试,结果如图6所示。激光冲击强化处理后表面残余压应力为 -810 Mpa ,而超声喷丸处理后为 -545 MPa 。超声喷丸处理后残余应力深度为 0.4 mm ,激光冲击强化处理后残余应力深度达到 1.8 mm ,是超声喷丸处理后残余应力深度的4.5倍。另外,由图6中残余应力的趋势线可知,激光冲击强化处理后产生的残余压应力沿深度方向衰减较慢,超声喷丸处理后产生的残余应力沿深度方向衰减较快。

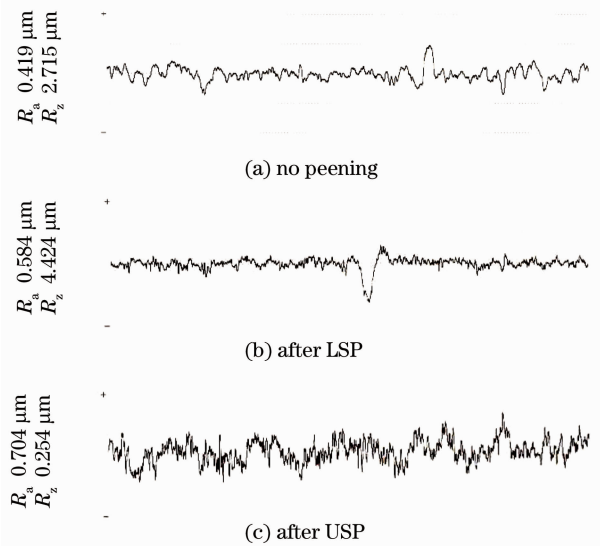


图5 不同状态1Cr11Ni2W2MoV不锈钢试样的表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of different 1Cr11Ni2W2MoV samples

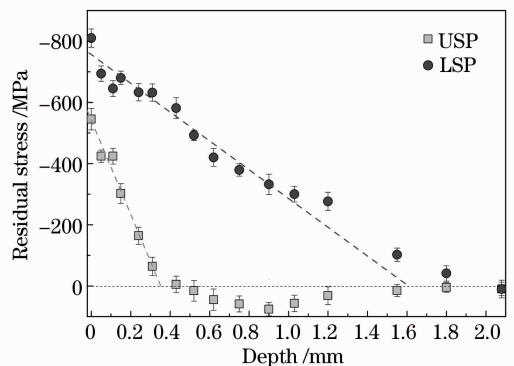


图6 超声喷丸和激光冲击强化处理后残余应力沿深度方向的分布

Fig. 6 Residual stress distribution along the depth direction after USP and LSP

激光冲击强化在金属试件表面产生的残余压应力较超声喷丸大,其原因为:激光冲击强化产生的冲击波压力达数吉帕(GPa),引起材料的塑性变形大,冲击波向材料内部传播的深度也更深。材料在冲击波作用下,以极高的应变率(10^6 s^{-1})发生塑性变形,冲击波加载完毕后,在材料表面残留较大的压应力。超声喷丸虽然经过多次撞击使材料表面不断发生塑性变形,但产生的冲击力较小,且在向材料内部传播的过程中不断衰减,影响深度有限,材料塑性变形仅在一定强度和范围内发生。Chaise 等^[5]对超声喷丸进行的仿真和试验研究也表明,在达到覆盖率的情况下,撞击次数的增加对材料塑性变形的提高很小。因而与激光冲击强化相比,超声冲击强化产生的残余压应力数值较小,深度较浅。

激光冲击强化对疲劳性能的改善优于超声喷丸与其产生的较大、较深的残余压应力有关。材料的疲劳裂纹常产生于材料表面,表面残余压应力与材料使用时的外加载荷应力叠加,降低了材料表面的应力,使裂纹萌生于没有表面缺陷的材料内部,因而裂纹更难萌生。另外,在裂纹已萌生的情况下,表面残余压应力层能够抑制裂纹的扩展。残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响可用 Forman 公式来描述^[9]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m / [(1-R)K - \Delta K], \quad (2)$$

式中 ΔK 为裂纹的门槛应力强度因子, R 为应力比, C 和 m 为常数。残余压应力降低了交变载荷作用下的平均应力,使试件表面实际承受的交变拉应力减小。当材料疲劳强度(σ_R)与试件表面承受应力(σ)的比值 $\sigma_R/\sigma > 1$ 时,就能大大降低疲劳裂纹形成的几率^[9]。当试件中存在残余压应力后,应力比 R 小于无残余压应力时的应力比,疲劳裂纹扩展速率降低。可见,超声喷丸和激光冲击强化形成的残余压应力可降低疲劳裂纹的扩展速率,提高材料的疲劳裂纹扩展抗力。

与超声喷丸相比,激光冲击强化处理时,在极高的冲击波峰值压力和极高的应变率作用下,经过一次冲击,就可以产生较大的表面残余压应力和较深的残余压应力层,能够更好地抑制裂纹的萌生和扩展,提高材料的疲劳性能。

3.2.3 显微硬度

横截面显微硬度测试结果如图 7 所示。激光冲击强化、超声喷丸处理后表面硬度由 392 HV 分别提高到 434 HV 和 405 HV。激光冲击强化形成的硬度影响层深度可达到 2.2 mm,提高了表层显微硬度,而超声喷丸对显微硬度的影响基本在 1Cr11Ni2W2MoV 试件表面很浅一层,约为 0.5 mm,在更深范围内不改变 1Cr11Ni2W2MoV 试件的显微硬度。另外,与残余应力测试结果相比较,可以发现硬度影响层深度与残余压应力深度基本相同。

硬度是评价材料力学性能的一种简单、高效的手段。硬度本身不是一个物理量,而是材料局部区域力学性能在特定条件下的整体表现,反映了固体物质凝聚或结合强弱的程度。从变形机理上,硬度可定义为“抵抗弹性变形、塑性变形和破坏的能力”^[19]。压气机叶片常因硬度较高的沙尘冲刷磨损作用而引起表面质量下降,导致使用过程中疲劳断裂,提高其表层硬度是一种十分有效的抗磨损方法^[20]。所以,提高硬度可以改善发动机叶片的疲劳性能。

3.2.4 微观组织

图 8 为激光冲击强化和超声喷丸处理后材料横截面的 SEM 图。由图 8 可知,在选定的工艺参数下,激光冲击强化和超声喷丸处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢在表面都获得了细化层,且细化层和原索氏体组织有明显的分界线。激光冲击强化处理后,表面细化层厚度为 4 μm ,超声喷丸处理后,表面细化层厚度为 7 μm 。可见,与超声喷丸相比,激光冲击强化在组织细化上没有优势。为了控制粗糙度,因选定的超声喷丸工艺参数强度较低,与已有的研究相比^[3,5,8],本文采用超声喷丸所获得的细化层较薄。

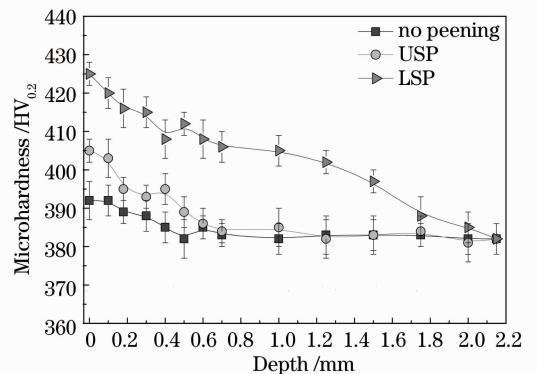


图 7 不同状态 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢试样横截面的显微硬度

Fig. 7 Cross-section microhardness of different 1Cr11Ni2W2MoV samples

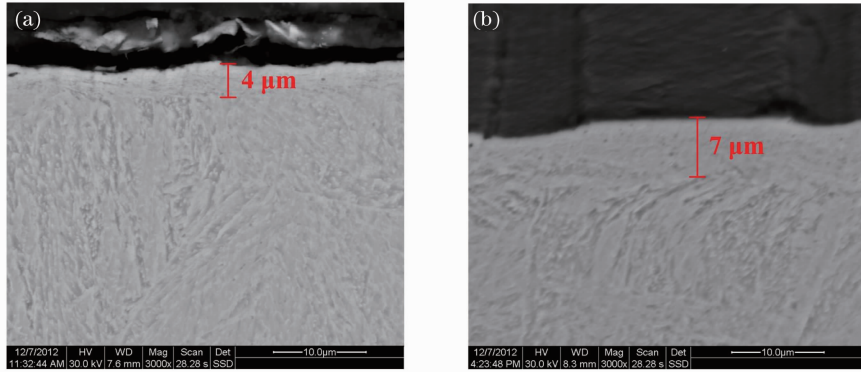


图 8 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢(a)激光冲击强化处理和(b)超声喷丸处理后的 SEM 图
Fig. 8 SEM images of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel (a) after LSP and (b) after USP

Ya 等^[3,5,7,8]采用超声喷丸处理方法在 316L 奥氏体不锈钢^[7]、AISI 304 马氏体不锈钢^[6]等不锈钢材料表面制备出了晶粒尺寸 10~50 nm、厚度 30~50 μm 不等的表层纳米晶层。纳米晶层可以改善材料的表面质量,提高材料的疲劳性能^[3]。对激光冲击强化处理后的试样不同层深组织进行 TEM 观测,结果如图 9 所示。与基体组织[如图 9(c)所示]相比,激光冲击强化处理后 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢在表层形成了纳米晶层[如图 9(a)所示]。由选区电子衍射图样可知,各晶粒的晶体学取向随机。晶粒尺寸为 20~50 nm,厚度约为 3 μm ,与上述采用超声喷丸处理不锈钢所获得的纳米晶层相比^[3,7],晶粒尺寸基本相当,但厚度较薄。在激光冲击强化处理后试样的变形区域形成了大量的位错[如图 9(b)所示],高密度位错等缺陷与弥散碳化物析出相的相互作用阻碍了位错的移动,使材料的塑性流动不易发生,可以提高材料的强度^[21]。

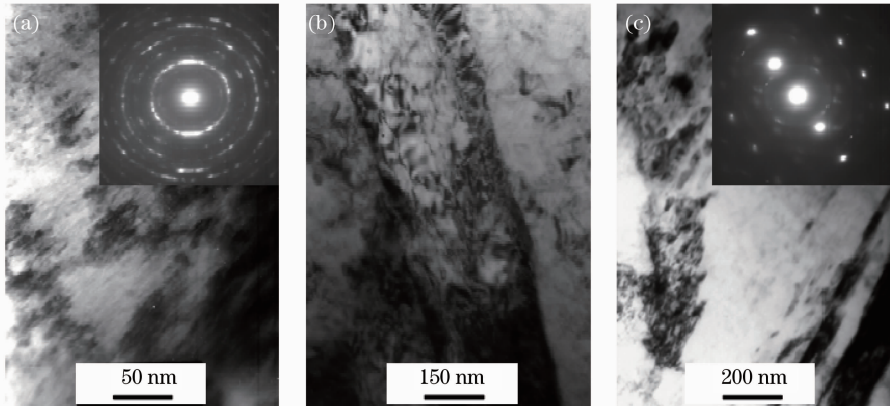


图 9 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢激光冲击强化处理后 TEM 图。(a) 距表面 3 μm 处的纳米晶;(b) 距表面 100 μm 晶界处高密度位错;(c) 距表面 350 μm 处的基体组织

Fig. 9 TEM photographs of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel after LSP. (a) Nanocrystallines at the depth of 3 μm from the surface; (b) high-density dislocation near grain boundary at the depth of 100 μm from the surface; (c) substrate at the depth of 350 μm from the surface

4 结 论

在满足粗糙度要求 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ 的前提下,选定激光冲击强化和超声喷丸工艺参数,通过试验和分析,获得以下结论:

1) 激光冲击强化提高 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的疲劳寿命 280.1%,超声喷丸提高 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的疲劳寿命 88.2%,激光冲击强化对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢常温疲劳性能的提高是超声喷丸的 3 倍。

2) 激光冲击强化处理后产生的表面残余应力为 -810 MPa,而超声喷丸处理后为 -545 MPa。激光冲击强化处理获得的残余压应力层深度达到 1.8 mm,是超声喷丸的 4.5 倍。与超声喷丸相比,激光冲击强化

在提高硬度值和影响深度上均有明显优势。激光冲击强化对显微硬度的影响深度可达 2.2 mm,是超声喷丸的 4 倍。另外,激光冲击强化对粗糙度的影响较超声喷丸小。

3) 激光冲击强化处理后表面细化层和表层纳米晶层厚度较薄。经分析,激光冲击强化对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢常温疲劳性能的提高优于超声喷丸主要与其产生的高残余压应力和低粗糙度影响有关。

参 考 文 献

- 1 Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook, China Aeronautical Materials Handbook [M]. Beijing: Standards Press of China, 2001
中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001
- 2 Li Yinghong, He Weifeng, Li Wei *et al.*. Research on enhancement of aero-engine components fatigue reliability by laser shock processing [C]. The Fifth Aero-Engine Reliability Academic Communication Proceedings, 2009. 564~571
李应红, 何卫锋, 李 伟 等. 激光冲击强化提高发动机部件疲劳可靠性的研究[C]. 第五届航空发动机可靠性学术交流会论文集, 2009. 564~571
- 3 Min Ya, Yongming Xing, Fulong Dai *et al.*. Study of residual stress in surface nanostructured AISI 316L stainless steel using two mechanical methods [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2003, **168**(2): 148~155
- 4 Ma Zhuang, Basic Research for Application of Laser Shock Processing on Aero-Engine Components [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008
马 壮. 航空发动机部件激光冲击强化应用基础研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2008
- 5 Thibaut Chaise, Jun Li, Daniel Nélias *et al.*. Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP) [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, **212**(10): 2080~2090
- 6 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
- 7 Zhang Hongwang, Liu Gang, Hei Zukun *et al.*. Surface nanocrystallization of AISI 304 stainless steel induced by surface mechanical attrition treatment I. structure and property [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(4): 324~326
张洪旺, 刘 刚, 黑祖昆 等. 表面机械研磨诱导 AISI304 不锈钢表层纳米化 I. 组织和性能[J]. 金属学报, 2003, **39**(4): 324~326
- 8 K. Lu, J. Lu. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials: presentation of the concept behind a new approach [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 1999, **15**(3): 193~197
- 9 Inés Fernández Pariente, Mario Guagliano. About the role of residual stresses and surface work hardening on fatigue ΔK_{th} of a nitrided and shot peened low-alloy steel [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(13): 3072~3080
- 10 B. N. Mordyuk, Yu. V. Milman, M. O. Iefimov *et al.*. Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(4): 4875~4883
- 11 Yang Lei, Zhao Xiujuan, Chen Chunhuan *et al.*. Analysis of surface roughness of pure titanium after surface nanocrystallization by high-energy shot peening [J]. *China Surface Engineering*, 2006, **19**(4): 43~46
杨 磊, 赵秀娟, 陈春焕 等. 纯钛高能喷丸表面纳米化后粗糙度的分析[J]. 中国表面工程, 2006, **4**(19): 43~46
- 12 Luan Weiling, Tu Shandong. Recent trends on surface modification technology of shot peening [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(15): 1405~1409
栾伟玲, 涂善东. 喷丸表面改性技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(15): 1405~1409
- 13 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrier *et al.*. Laser shock processing of aluminum alloys: application to high cycle fatigue behavior [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1996, **210**(1): 102~113
- 14 Li Yuqin, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects on technology of aluminizing after laser shock processing in 1Cr11Ni2W2MoV steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703005
李玉琴, 何卫锋, 李应红 等. 1Cr11Ni2W2MoV 钢激光冲击强化后渗铝工艺研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0703005
- 15 He Weifeng, Li Yinghong, Li Wei *et al.*. Laser shock peening on vibration fatigue behavior of compressor blade [J]. *J. 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
- 16 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. The effects of laser shock processing on the vibration fatigue properties of K417 material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201

- 李 伟, 何卫锋, 李应红 等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2197~2201
- 17 Wang Kai. Surface Texture[M]. Beijing: China Plannning Press, 2004
- 汪 恺. 表面结构[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004
- 18 M. H. El Haddad, K. J. Topper, L. P. Pook. Metal Fatigue [M]. London: Oxford Univ. Press, 1974. 130~195
- 19 D. Tabor. Indentation hardness; fifty years on a personal view [J]. *Phil. Mag. A*, 1996, **74**(5): 1207~1212
- 20 Nie Xiangfan, Long Nidong, Liu Hailei *et al.*. Effect of laser shock peening on surface hardness of TC17 titanium alloy [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, (1): 198~200
- 聂祥樊, 龙霓东, 刘海雷 等. 激光冲击强化对 TC17 表面硬度的影响[J]. 机械设计与制造, 2012, (1): 198~200
- 21 Wang Yanan, Chen Shujiang, Dong Xichu. Dislocation Theory and Application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
- 王亚男, 陈树江, 董希淳. 位错理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007