

激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢 高周疲劳性能的影响

汪 诚 赖志林* 何卫锋 薛彦庆 周留成

(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 高周疲劳是航空发动机部件的主要故障之一。通过对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢进行不同次数的激光冲击强化(LSP)处理,研究冲击次数对激光冲击强化材料高周疲劳性能的影响。对不同处理状态的试件进行常温振动疲劳试验,采用 X 射线衍射(XRD)应力分析仪、扫描电镜(SEM)、金相显微镜等手段研究冲击次数对材料组织和力学性能的影响。试验结果表明,随着 LSP 冲击次数的增加,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢表面粗糙度增大,组织细化层厚度没有变化,残余应力梯度变小,残余压应力层深度增加,1 次冲击后,残余压应力层深为 1.8 mm,3 次冲击后为 2.5 mm。表面残余压应力随着冲击次数增加而逐渐趋于饱和,饱和值接近于 $-100\% \sigma_{0.2}$ 。振动疲劳试验结果表明,疲劳寿命随着 LSP 次数增加而提高,但提高幅度减小。在 $\sigma_{\max} = 640$ MPa 应力水平下,1 次冲击后试样疲劳寿命是未强化试样的 3.8 倍,3 次冲击后试样疲劳寿命是未强化试样的 5 倍。经分析,多次冲击时的冲击波叠加效应使得冲击波传播到材料的更深层,从而使材料组织变形层和残余应力影响层更深,高周疲劳寿命提高更大。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 1Cr11Ni2W2MoV; 高周疲劳性能; 冲击次数; 残余应力

中图分类号 TG665; TG142.24; V252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0103001

Effect of Multi-Impact on High Cycle Fatigue Properties of 1Cr11Ni2W2MoV Stainless Steel Subject to Laser Shock Processing

Wang Cheng Lai Zhilin He Weifeng Xue Yanqing Zhou Liucheng

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

Abstract High cycle fatigue is one of the main failures of aero-engine. The improvement of HCF properties by laser shock processing (LSP) with multiple impacts is researched. Vibration fatigue tests of different 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel samples are conducted at room temperature. X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and metallography microscope are used to investigate the influence on microstructure and mechanical performances with different impacts. The results show that with the laser impact times increasing, the residual stress and the roughness increase, while the depth of microstructure refining layer doesn't change. The surface compressive residual stress is driven to saturation and the saturation value is up to $-100\% \sigma_{0.2}$. The depth of compressive stress has a wider increase with the impact times increasing. Vibration tests show that the fatigue properties improve with the impact times increasing. By the superimposed effect of shock waves in multi-impact processing, the shock wave can translate into deeper materials, which make a great contribution to the greater depth of compressive residual stress and deformation microstructure, and to the further improvement of fatigue properties with multiple impacts at room temperature.

Key words laser technique; laser shock processing; 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel; high cycle fatigue; impact time; residual stress

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 160.4236; 350.3850

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 汪 诚(1974—),男,硕士生导师,副教授,主要从事等离子体动力学和激光冲击强化表面改性等方面的研究。

E-mail: warrant_74@126.com

* 通信联系人。E-mail: lzl6637076@163.com

1 引 言

高周疲劳(HCF)在航空发动机上是一个普遍的现象,经常导致发动机重要部件(风扇、压气机和涡轮)的过早故障,在某些情况下将导致飞行事故的发生。特别是在军用航空发动机工作过程中,工作状态变化和气动激振频率非常宽,易造成盘/叶片高频共振,由此引起的疲劳损伤不断导致严重事故的发生,因此,HCF是航空发动机设计和使用中需要重点解决的问题之一。据统计,美国在1982~1996年间HCF占A等发动机故障的56%。HCF对飞机的安全性、适用性和准备状态有重要的负面影响,而且同时还增加维修成本。在1994年,HCF消耗了850000个维修工时,HCF引起的维修成本支出估计为每年超过4亿美元^[1]。为了减少航空发动机高周疲劳引发的故障,美国于1994年正式开展“高周疲劳科学和技术计划”,将激光冲击强化技术对零部件表面强化作为重点研究内容^[2]。

作为一种革命性的金属表面强化方法,激光冲击强化(LSP)能显著提高材料抗疲劳、耐磨损和防应力腐蚀等性能^[3-4]。20世纪70年代Fairand等^[5]研究了激光诱导的冲击波对材料性能的改善以来,LSP便引起国内外众多学者的关注,并获得了大量研究成果^[6]。为了进一步推广激光冲击强化在航空发动机上的应用,国内外很多学者对激光功率密度、光斑搭接、光斑大小、脉宽等参数对航空发动机材料性能的影响进行了很多研究^[7-8],但关于激光冲击次数对材料性能,特别是对高周疲劳性能的影响研究较少。Lu等^[9-11]对LY12铝合金、ANSI 304不锈钢、AISI 8620钢进行了不同次数的激光冲击强化试验,研究发现,多次冲击能够细化晶粒并有效提高材料的耐磨损性能。

本文选用常用于制造发动机压气机盘、叶片、压气机风扇轴、涡轮轴等重要零部件的材料1Cr11Ni2W2MoV不锈钢,进行激光冲击强化试验和高周疲劳试验,研究冲击次数对激光冲击强化马氏体不锈钢高周疲劳性能的影响。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

1Cr11Ni2W2MoV,属于马氏体不锈钢,具有马氏体相变硬化能力及良好的综合力学性能,广泛用于制造在600℃以下工作的航空发动机叶片、盘和轴等重要零部件^[12]。在1000℃~1020℃油淬,540℃~

560℃空冷的热处理条件下,材料组织为回火索氏体,材料的密度 $\rho=7.8\text{ g/cm}^3$,泊松比 $\nu=0.277$, $E=196\text{ MPa}$, $\sigma_b=1080\text{ MPa}$, $\sigma_{0.2}=885\text{ MPa}$ 。LSP试件尺寸及处理区域如图1所示。

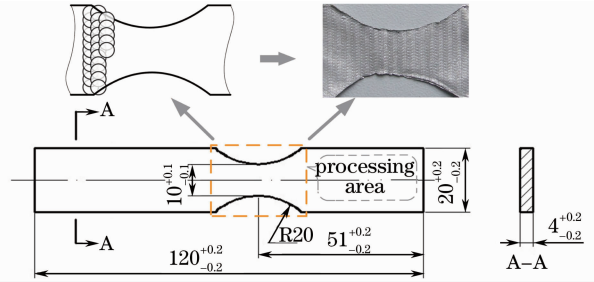


图1 试件尺寸及处理区域和LSP处理后的铝箔形貌
Fig.1 Test piece of experiment and processing area and foil shape after LSP

2.2 试验方法

残余应力测试设备采用X-350AX射线应力测定仪,试验执行GB7704-87标准,采用侧倾固定 Ψ 法测量。测试过程中相关参数设置为:管压25 kV,管流7 mA,Cr-k α 辐射,准直管3 mm,衍射晶面为(211)。每个试样沿中心线方向选取5个点测量,取平均值。粗糙度测试采用MC012-2301A型表面形状测量仪,选用 R_a (轮廓算术平均值)、 R_z (微观不平度加上点高度)两个参数来评定表面粗糙度。采用Olympus GX71型金相显微镜观察金相组织,采用FEI Quanta400型扫描电镜(SEM)观察强化前后试样表层组织微观特征。

高周疲劳试验在电磁式UD振动台上进行,测试仪器为:YX5939数据采集系统,BF12023AA电阻应变计,激光位移测距仪。试验采用控制叶尖振幅的方法进行,通过应变片测量标定,以确定振幅与应力值的对应关系(应变—材料 E —应力—叶尖振幅)。正式试验前,采用3片未处理的试件进行系统调试,确定应施加的应力水平为 $\sigma_{\max}=640\text{ MPa}$ 。采用成组对比的方法,按同样的条件,对未冲击、1次冲击和3次冲击三种状态试件进行常温一阶弯曲振动疲劳试验。

2.3 激光冲击强化参数优化

激光诱导的等离子体冲击波压力超过许贡组极限(HEL, F_{HEL})时,材料内部的影响层将产生塑性变形,根据Johnson等^[13],许贡组极限计算式为

$$F_{\text{HEL}} = \frac{(1-\nu)\sigma_{\text{Y}}^{\text{dyn}}}{(1-2\nu)}, \quad (1)$$

式中 ν 为材料的泊松比, $\sigma_{\text{Y}}^{\text{dyn}}$ 为材料的动态屈服强度。

钢材动态屈服强度根据(2)式计算^[14]：

$$\frac{\sigma_Y^{\text{dyn}}}{\sigma_{0.2}} = 8.84 - 2.42 \lg \sigma_{0.2}. \quad (2)$$

经计算,1Cr11Ni2W2MoV 的动态屈服强度 σ_Y^{dyn} 为 1512 MPa, F_{HEL} 为 2451 MPa。

根据 Fabbro 等^[15]的理论,激光冲击波的峰值压力 $F_P > F_{\text{HEL}}$ 时,靶材开始产生塑性变形, $F_P = 2F_{\text{HEL}}$ 时,材料内部的塑性变形达到饱和。激光冲击波的峰值压力 F_P 计算采用与实际压力相近的水为约束层模式下的冲击波峰值压力估算公式^[16]：

$$P = 1.02 \sqrt{I_0}, \quad (3)$$

式中 I_0 为激光功率密度。通过计算得功率密度阈值为 5.77 GW/cm²。考虑水约束层的击穿,选功率密度区间为 5.77~9 GW/cm²。

激光冲击强化采用高功率调 Q 脉冲 Nd:YAG 固体激光器;强化参数为:激光波长 1064 nm,激光能量 8 J,脉宽 10 ns,光斑直径 4 mm,激光功率密度 6.37 GW/cm²,搭接率 50%;以水(厚度 2 mm)为约束层,铝箔(厚度 0.1 mm)为吸收保护层。激光冲击强化和冲击区域光斑搭接如图 1 所示,对强化区域分别进行 1 次和 3 次激光冲击强化。在进行 3 次冲击试验时,为防止铝箔在多次冲击时破损,每次冲击完后更换铝箔。

3 试验结果与分析

3.1 残余应力测试结果分析

采用 XRD 结合电化学腐蚀剥层的方法对 1 次 LSP、3 次 LSP 和未强化试件残余应力沿深度方向的分布进行测试,测试结果如图 2 所示。结果显示,未强化试样的表面残余应力为 -504 MPa,这是机械加工产生的应力,其深度一般为 30 μm ,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢达到了 50 μm 。机械加工产生的残余压应力很薄,在振动过程中会迅速释放,对高周疲劳性能影响不大。

1 次和 3 次 LSP 的表面残余应力值分别为 -805 MPa 和 -872 MPa,与未强化的试样相比,表面残余压应力分别增加 301 MPa 和 368 MPa。3 次 LSP 试样与 1 次 LSP 试样相比,表面残余压应力有进一步的提高,但增加幅度较小。另外,由图 2 知,1 次 LSP 和 3 次 LSP 处理后 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢表层 300 μm 内的残余应力都相差不大,可见随着冲击次数的增加,表层残余压应力逐渐趋于饱和。Peyre 等^[16]提出,对于金属材料,通过强化手段在表面引入残余压应力,所能达到的最大值为其屈

服极限的 -60%~-70%。1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢残余应力测试结果显示,通过激光冲击强化获得的残余压应力饱和值接近 -100% $\sigma_{0.2}$ 。

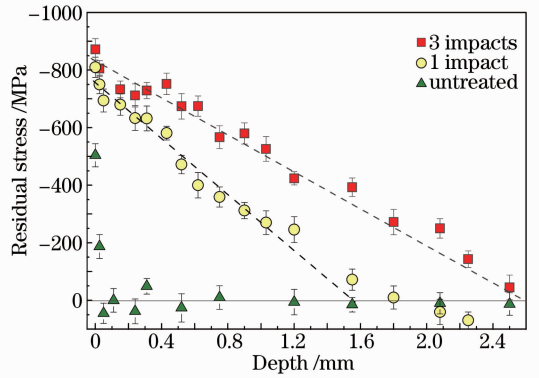


图 2 不同次数强化后残余应力沿层深分布

Fig. 2 Residual stress distribution with different impact times

从图 2 中观察残余应力的深度分布,1 次 LSP 的残余应力深度为 1.8 mm,3 次 LSP 的残余压应力深度达到了 2.5 mm,多次冲击对材料残余压应力的层深提高较大。残余应力是材料中发生了不均匀的弹性变形或不均匀的弹塑性变形的结果,或者说是材料的弹性各向异性和塑性各向异性的反映。激光冲击作用使吸收层气化电离产生等离子体膨胀,产生的高压冲击波向靶材内部传播,引起材料弹塑性变形,残留数值较大、层深较深的残余压应力层。多次冲击时,由于冲击波的叠加作用,弹塑性变形不断叠加,重复冲击时,在塑性变形剧烈的表层冲击波能量消耗较少,从而冲击波的压力在材料更深处仍保持较大值,引起材料塑性变形的深度增加。因而随着冲击次数的增加,残余应力梯度变化小,残余压应力深度增加。由图 2 中 1 次 LSP 和 3 次 LSP 残余应力沿深度方向分布的趋势线可知,增加冲击次数,相同层深处的残余应力增加幅度随着深度的增加而增加。

研究表明^[3,16],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,从而提高材料的高周疲劳性能。3 次 LSP 处理后残余压应力层深更深,达到 2.5 mm,对材料的疲劳裂纹扩展抗力更大。

3.2 微观组织

图 3 为三种状态试样的金相组织。由图中可知,激光冲击强化前后,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢组织没有发生改变,为保持马氏体位相的回火索氏体。

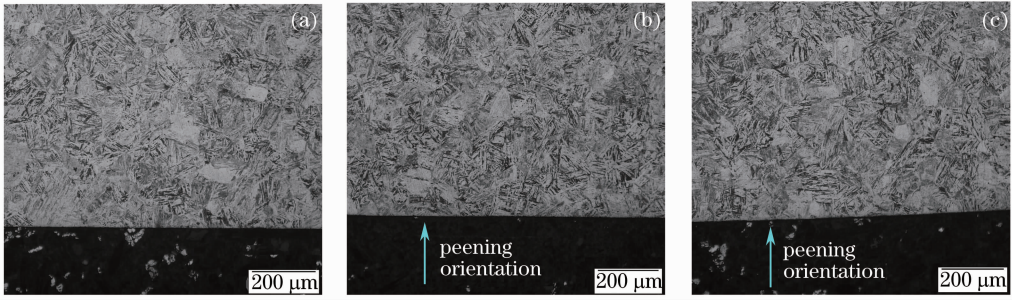


图 3 不同状态试样截面金相组织。(a) 未强化;(b) 1次 LSP;(c) 3次 LSP

Fig. 3 Metallography photographs of different samples. (a) Untreated; (b) 1 impact LSP; (c) 3 impact LSP

图 4 为不同状态试样表层组织 SEM 图。与未强化试样[图 4(a)]相比,试样经 1 次和 3 次 LSP 处理后在表层产生了明显的组织细化层[图 4(b)和 (c)],且厚度都为 4 μm。可见,在强化参数确定的情况下,LSP 次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢组织

细化层厚度没有影响。由图 4(c)可知,3 次 LSP 处理后,在组织细化层下有一层厚度较厚的索氏体变形层,厚度约为 15 μm。而 1 次 LSP 处理后的试样未出现变形层。可见,索氏体变形层是由于多次冲击时冲击波叠加效应的结果。

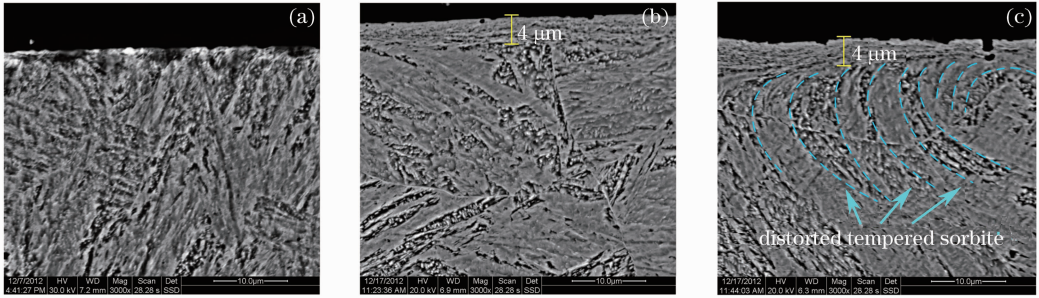


图 4 不同状态的 SEM 图。(a) 未强化;(b) 1次 LSP;(c) 3次 LSP

Fig. 4 SEM morphology of different samples. (a) Untreated; (b) 1 impact LSP; (c) 3 impact LSP

研究表明^[3,8],LSP 所获得的细化组织,缺陷较少,可以提高材料滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和开裂,增加裂纹扩展的阻力,从而提高材料的高周疲劳性能。材料组织变形形成了加工硬化效果,提高了材料的强度,从而提高了材料的疲劳性能。

3.3 表面粗糙度分析

表面粗糙度是表面微观形状误差,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参数之一,对材料的强度、疲劳性能有重要影响^[17]。常用参数 R_a 和 R_z 来评定。

1 次、3 次 LSP 处理和未强化试样粗糙度对比如图 5 所示。原始表面 $R_a=0.501 \mu\text{m}$, $R_z=3.109 \mu\text{m}$, 1 次 LSP 处理后 $R_a=0.703 \mu\text{m}$, $R_z=4.304 \mu\text{m}$, 3 次 LSP 处理后 $R_a=0.925 \mu\text{m}$, $R_z=5.172 \mu\text{m}$ 。随着激光冲击次数的增加,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢表面粗糙度增大。

激光冲击过程中冲击波在材料表层产生强烈的弹塑性变形,形成了微小坑,无数小坑使得试样表面

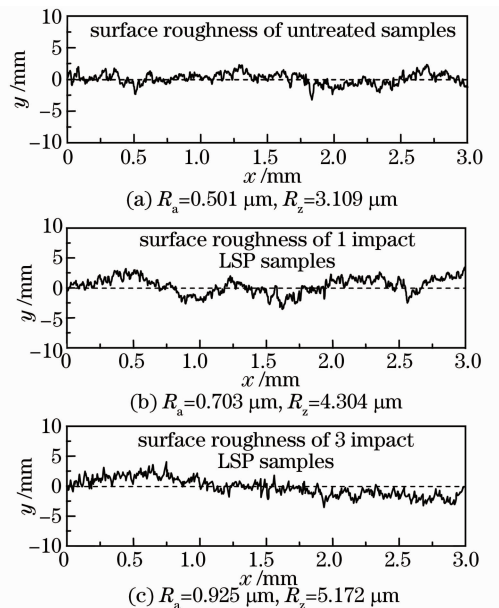


图 5 不同状态试样的表面粗糙度。(a) 未强化;(b) 1次 LSP;(c) 3次 LSP

Fig. 5 Surface roughness of samples. (a) Untreated; (b) 1 impact LSP; (c) 3 impact LSP

凹凸不平,表面粗糙度变大,而激光冲击次数越多,激光冲击波叠加的冲击效果越强,微小坑也就越多,表面粗糙度越大。激光冲击强化引起的粗糙峰示意图如图 6 所示, R_y 是轮廓最大高度, R_{ms} 是轮廓单元的平均宽度。

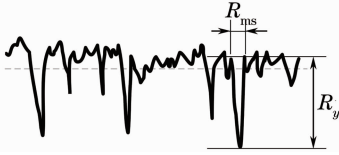


图 6 激光冲击强化引起的粗糙峰示意图

Fig. 6 Schematic of sample surface after LSP

表面粗糙度可引起微观应力集中,粗糙峰谷底的应力可用缺口应力公式表示^[18]:

$$\sigma = 2k \left[1 + \ln \left(1 + \frac{\chi}{R} \right) \right], \quad (4)$$

式中 χ 是从缺口根部算起的距离,即轮廓最大高度 R_y 。 R 是缺口曲率半径,与轮廓单元的平均宽度 R_{ms} 成正比。可见,激光冲击强化造成的试样表面粗糙峰谷底的应力集中程度与轮廓最大高度 R_y 成正比,而与 R_{ms} 成反比。粗糙度参数 R_a 、 R_z 反映了轮廓单元的平均宽度和轮廓最大高度,随着激光冲击次数的增加, R_a 、 R_z 增大,应力集中程度增加。在交变载荷作用下,表面粗糙度的粗糙峰谷底容易出现应力集中,形成疲劳源,产生疲劳裂纹并不断扩展,从而降低材料的疲劳强度。因此,粗糙度是影响材料高周疲劳性能的重要因素。由图 5 所示,随着激光冲击次数的增加,表面粗糙度值增大,粗糙峰谷底越深,曲率半径越小,应力集中更严重,表面的抗疲劳破坏能力愈差。

3.4 高周疲劳性能

3 种状态试件各 15 件,在相同条件下对试件进行室温下一阶弯曲振动疲劳试验,在 95% 置信度下,

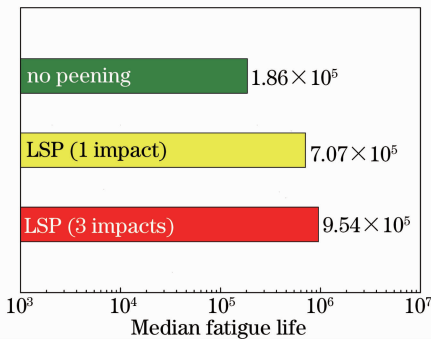


图 7 不同状态 1Cr11Ni2W2MoV 试件的疲劳寿命 ($\sigma_{\max} = 640$ MPa)

Fig. 7 Fatigue lives of different 1Cr11Ni2W2MoV samples ($\sigma_{\max} = 640$ MPa)

按照“HB/Z112-86 材料疲劳试验统计分析方法”对试验数据进行分析和处理,得到中值疲劳寿命结果如图 7 所示。在 $\sigma_{\max} = 640$ MPa 应力水平下,未处理试样的中值疲劳寿命为 1.86×10^5 ; 1 次 LSP 处理后试样的中值疲劳寿命是 7.07×10^5 ,是未强化试样的 3.8 倍,3 次冲击进一步提高了 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的中值疲劳寿命,为 9.54×10^5 ,是未强化试样的 5 倍。随着激光冲击次数的增加,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢疲劳寿命提高,但提高幅度随着冲击次数的增加而减小。

经分析,残余压应力、组织细化层和变形层对高周疲劳性能有积极影响,而粗糙度会降低材料的高周疲劳性能。由前文测试结果可知,1 次 LSP 后残余压应力深度为 1.8 mm,3 次 LSP 后形成的残余压应力层深度增加到 2.5 mm,残余压应力数值也更大。1 次 LSP、3 次 LSP 处理后形成的表面细化层厚度基本相当,但 3 次冲击后材料内部产生了回火索氏体变形层,提高材料的强度。同时,3 次冲击对材料粗糙度影响较大,易形成应力集中,降低材料的疲劳性能。可见,残余压应力和组织变形层是 3 次冲击时高周疲劳性能优于 1 次冲击的主要原因。

虽然 3 次冲击粗糙度值较大,会降低材料的高周疲劳性能,但在表面高残余压应力作用下,表面粗糙度将微动局限于粗糙峰谷底,同时,3 次激光冲击强化形成的残余压应力分布较深,能够更好地抑制裂纹的萌生和扩展,从而进一步提高了试件的疲劳寿命。

4 结 论

本文通过对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢进行 1 次和 3 次激光冲击强化,获得以下结论:

1) 随着激光冲击强化次数增加,1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢表面粗糙度增大,组织细化层厚度没有改变,残余压应力层影响层深度增加,表面残余压应力逐渐饱和,饱和值接近于 $-100\% \sigma_{0.2}$;

2) 3 次 LSP 过程中,由于多次冲击时冲击波的叠加,在 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢内部形成了回火索氏体变形层;

3) 在 $\sigma_{\max} = 640$ MPa 应力水平下,1 次和 3 次冲击后试样疲劳寿命分别是未强化试样的 3.8 倍和 5 倍,多次激光冲击强化进一步提高了高周疲劳性能。多次冲击形成的层深更深的残余压应力和组织变形层是常温疲劳性能进一步提高的主要原因。

参 考 文 献

- 1 Propulsion Directorate. High Cycle Fatigue (HCF) Science and Technology Program[S]. USA: AFRL-PR-WP-TR-2001-2010, 2001.
- 2 Universal Technology Corporation. High cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report[C]. AFRL-PR-WP-TM-2004-2040, 2003.
- 3 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.
- 4 Yan Hong, Hua Yinqun, Chen Ruifang, *et al.*. Study on the tribological and wear behavior of FeNi alloy treated by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 364—367.
颜红, 花银群, 陈瑞芳, 等. 激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 364—367.
- 5 B P Fairand, A H Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. Appl Phys, 1979, 50(3): 1497—1502.
- 6 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, *et al.*. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15—19.
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应
用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15—19.
- 7 R D Tenaglia, D F Labrman. Preventing fatigue failures with laser peening[J]. The AMPTIAC, 2003, 7(2): L327. 8.
- 8 Ma Zhuang. Basic Research for Application of Laser Shock Processign on Aero-Engine Components[D]. Xi'an: Engineering Academy of 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]. 空军工程大学工程学院博士学位论文, 2008.
- 9 J Z Lu, K Y Luo, Y K Zhang, *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 3984—3994.
- 10 J Z Lu, K Y Luo, Y K Zhang, *et al.*. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 5354—5362.
- 11 J Z Lu, K Y Luo, F Z Dai, *et al.*. Effects of multiple laser shock processing (LSP) impacts on mechanical properties and wear behaviors of AISI 8620 steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 536: 57—63.
- 12 China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China Aeronautical Materials Handbook [M]. Beijing: China Standard Press, 2002.
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, 2002.
- 13 J N Johnson, R W Rohde. Dynamic deformation twining in shock-loaded iron[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42: 4171—4173.
- 14 Qian Weichang. Armor Pirecing Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984.
钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- 15 R Fabbro, P Peyre, L Berthe, *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing[J]. J Laser Appl, 1998, 10(6): 265—279.
- 16 P Peyre, R Fabbro, P Merrien, *et al.*. Laser shock processing of aluminum alloys: Application to high cycle fatigue behavior[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A210: 102—113.
- 17 Wang Kai. Surface Texture [M]. Beijing: China Planning Press, 2004.
汪恺. 表面结构[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- 18 Lin Jizhong, Liu Shuhua. Fracture and Fatigue of Metal[M]. Beijing China Railway Press, 1989.
林吉忠, 刘淑华. 金属材料的断裂与疲劳[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.

栏目编辑: 宋梅梅