

# 1Cr11Ni2W2MoV 钢激光冲击强化后渗铝工艺研究

李玉琴 何卫锋 李应红 王学德 龙霓东 刘海雷

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 提出了 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢激光冲击强化(LSP)后渗铝提高材料疲劳性能的工艺方法,采用振动疲劳试验方法研究了激光冲击强化后渗铝处理对材料疲劳性能的影响,并与激光冲击强化、渗铝状态进行了对比分析,实验结果表明,激光冲击强化后渗铝工艺方法显著提高材料的疲劳寿命。采用 X 射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)分析研究了激光冲击强化后渗铝对材料微观组织的影响,讨论了这种工艺方法对材料性能提高的机理。结果表明,激光冲击强化后渗铝工艺增加了渗铝层厚度,但不影响其渗铝层的性能,同时使 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢基体表面晶粒呈梯度分布,从而提高了试样疲劳寿命。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;渗铝;1Cr11Ni2W2MoV 钢;疲劳寿命;微观组织

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0703005

## Effects on Technology of Aluminizing after Laser Shock Processing in 1Cr11Ni2W2MoV Steel

Li Yuqin He Weifeng Li Yinghong Wang Xuede Long Nidong Liu Hailei

(Engineering College of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract** A new technology, aluminizing after laser shock processing (LSP), for improving the fatigue performance of 1Cr11Ni2W2MoV-steel is advanced. The fatigue lives of samples are measured by the vibration fatigue experiment. These experimental tests show that the fatigue lives of aluminizing after LSP are greatly improved. The microstructures are examined by means of X-ray diffractometry (XRD), transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM). The mechanism of fatigue life improvement is also discussed. Experimental results show that the thickness of aluminizing layer is found to increase because of this new technology, and the surface crystal of 1Cr11Ni2W2MoV-steel is distributed in a gradient manner.

**Key words** laser technique; laser shock processing; aluminizing; 1Cr11Ni2W2MoV-steel; fatigue life; microstructure

**OCIS codes** 140.3460; 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

1Cr11Ni2W2MoV 钢是马氏体型热强不锈钢。该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 °C 以下工作的发动机叶片、盘和轴等重要零部件<sup>[1]</sup>。在某航空发动机使用过程中,该钢制造的叶片多次出现裂纹与断裂故障。研究表明<sup>[2~6]</sup>,激光冲击强化(LSP)可以细化材料表层组织,明显提高其疲劳寿命。其原理为:短脉冲(几十纳秒)、高峰值功率密度(大于  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>)的

激光辐照金属表面,使金属表面涂覆的吸收保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发,产生高压(大于 1 GPa)的等离子体冲击波,冲击波的力效应使表层材料微观组织发生变化,在较深的厚度上残留压应力,从而显著提高金属材料抗疲劳<sup>[7~12]</sup>、耐磨损<sup>[13]</sup>和防应力腐蚀<sup>[14]</sup>等性能。

在高温环境下工作,不锈钢易氧化和点蚀,而扩散型铝化物涂层因其制备方法简单、成本低和抗氧化性能优良等特点<sup>[15]</sup>,用来对 1Cr11Ni2W2MoV 钢

收稿日期: 2010-12-30; 收到修改稿日期: 2011-02-14

基金项目: 国防预研基金(5132701)资助课题。

作者简介: 李玉琴(1982—),女,硕士,讲师,主要从事激光冲击强化技术及各种表面处理技术等方面的研究。

E-mail: yuqin511@163.com

进行处理,提高其抗氧化、抗腐蚀性能。为了同时改善 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢的疲劳性能和抗氧化、抗腐蚀性能,本文提出了 LSP 和渗铝处理相结合,研究激光冲击强化后渗铝处理这种新的复合处理工艺对 1Cr11Ni2W2MoV 钢疲劳寿命和微观组织的影响,探讨了其使用的可能性。

## 2 试验材料与方法

试验材料为 1Cr11Ni2W2MoV 改性马氏体不锈钢,热处理工艺为:在 1000 °C 下进行油淬,550 °C 空冷。

为了对比研究渗铝及 LSP 后渗铝复合处理工艺对材料力学性能和微观组织的影响,设置了 3 种不同的表面处理状态,分别是:1)光滑状态(未表面处理);2)将试样进行低温包埋渗铝处理;3)试样表面经激光冲击强化后,再进行低温包埋渗铝处理。

LSP 采用 Nd:YAG 固体激光器;强化参数为:激光波长 1064 nm,激光能量 6 J,脉宽 10 ns,光斑直径 4 mm,功率密度 4.77 GW/cm<sup>2</sup>,搭接率 66%。

渗铝采用固体粉末包埋法,将渗剂与处理后的试件置于箱式电阻炉中,510 °C 保温 12 h。

取光滑试样、渗铝处理、激光冲击强化后渗铝试样各 15 件进行疲劳试验。疲劳试样按照 HB 5277-84 制作,其形状尺寸及强化区域如图 1 所示。

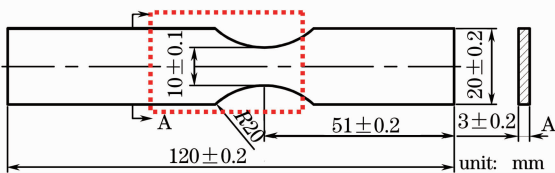


图 1 试件尺寸和强化区域

Fig. 1 Vibration fatigue test specimen and LSP area

疲劳试验在电磁式 UD 振动台上进行,测试仪器:YX5939 数据采集系统,BF120-3AA 电阻应变计,激光位移测距仪。试验系统示意图如图 2 所示,试件固定在振动台上,振动台由信号发生器发出正弦信号经功率放大器进行功率放大输出后驱动。利用电涡流传感器测量试样的振动位移和振幅。

疲劳试验采用成组对比的方法,试件按同样的条件进行试验,在试验应力  $\sigma_{max} = 640$  MPa 的条件下,进行一阶弯曲振动疲劳试验。在试验过程中,应变片和位移监控显示的振幅突变(增加或者下降),表示可能出现了裂纹,记下此时的试验时间。降低(或者增加)激振加速度,如果在新的位置位移重新稳定,则表明未出现裂纹,如果降低(或者增加)激振

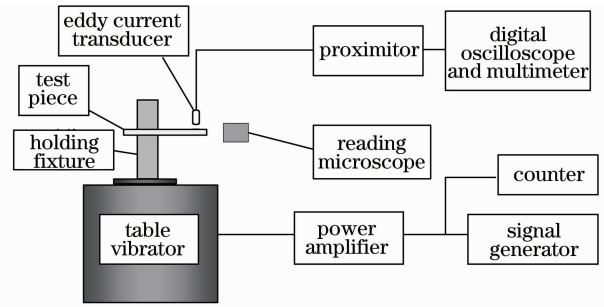


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration fatigue test system

加速度后,位移依然增加或者下降,则可能出现裂纹,重新进行扫频,在新的频率下进行振动,如果频率变化超过 2% 就判断已经出现裂纹,此时的试验时间换算成循环次数,即为试件的疲劳裂纹形成寿命。

采用日本理学 MFS-7000 型 X 射线衍射(XRD)仪对 1Cr11Ni2W2MoV 样品表层相组成进行分析;采用 JEM-2010 透射电镜(TEM)观测表面的微观组织结构;利用 Quanta 200 扫描电镜(SEM)观察渗铝、强化后渗铝试样横截面的形貌。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 振动疲劳试验

对 3 种状态试件在相同条件下进行一阶弯曲振动疲劳试验,在 95% 置信度下,按“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,其中每组试样的有效数据、中值疲劳寿命和对数标准差如表 1 所示。

表 1 不同状态 1Cr11Ni2W2MoV 试样的疲劳寿命

Table 1 Fatigue lives of different kinds of 1Cr11Ni2W2MoV samples

| State  | Unsettled sample | Aluminizing | Aluminizing after LSP |
|--|------------------|-------------|-----------------------|
| Effective dates number                       | 12               | 13          | 14                    |
| Median fatigue life ( $\times 10^5$ )        | 1.86             | 2.77        | >39.81                |
| Logarithm standard deviation                 | 0.22826          | 0.21475     | 0.22673               |
| Percentage ratio to state (unsettled sample) | 1                | 1.49        | >21.4                 |

由表 1 可知,在 95% 置信度,1Cr11Ni2W2MoV 试样 3 种不同状态的中值疲劳寿命分别为:光滑试样的中值疲劳寿命为  $1.86 \times 10^5$ ;渗铝试样的中值疲劳寿命为  $2.77 \times 10^5$ ,是光滑试样的 1.49 倍;LSP

后渗铝试样的中值疲劳寿命大于  $39.81 \times 10^5$  (未断),是光滑试样的 21.4 倍以上。

试验结果表明,渗铝和激光冲击强化后渗铝均可以提高 1Cr11Ni2W2MoV 试样的疲劳寿命,但激光冲击强化后渗铝处理试样的中值疲劳寿命最长,高于其他试样 1 个数量级。

### 3.2 渗层分析

图 3 为渗铝、LSP 后渗铝 1Cr11Ni2W2MoV 试样 X 射线衍射图谱。从图中可以看出,在两种状态下,1Cr11Ni2W2MoV 表层形成的渗铝层均为 FeAl<sub>3</sub> 相,并没有生产新相。

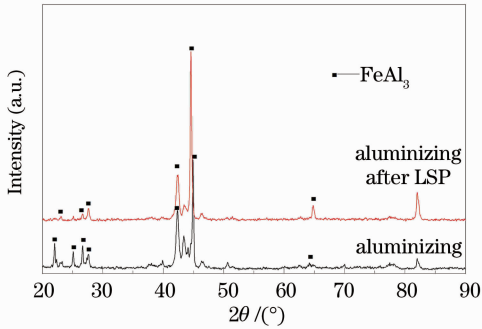


图 3 1Cr11Ni2W2MoV 试样渗铝与强化后渗铝的 X 射线衍射图

Fig. 3 XRD patterns of 1Cr11Ni2W2MoV with aluminizing and aluminizing after LSP

由于不锈钢渗铝防腐蚀的机理在于渗铝使不锈钢表层形成了耐腐蚀的 Fe-Al 系金属间化合物,而 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢试样经渗铝处理、强化后渗铝处理均形成了耐腐蚀的 Fe-Al 系金属间化合物 FeAl<sub>3</sub>,FeAl<sub>3</sub> 在存有氧化性气氛中,表面能生成致密的氧化膜,因此具有良好的抗氧化性,并且 FeAl<sub>3</sub> 除具有一般金属间化合物的多种出色性能以外,还具有优良的耐腐蚀性。由此可见,LSP 后渗铝处理 1Cr11Ni2W2MoV 钢相组成未发生改变,不影响其良好的抗氧化、耐腐蚀性能。

### 3.3 渗层微观组织及对疲劳性能的影响

1Cr11Ni2W2MoV 试样渗铝处理、LSP 后渗铝处理的表层 SEM 图如图 4 所示。

渗铝最外层的铝铁金属间化合物 FeAl<sub>3</sub> 的厚度约 5 μm,组织不够致密[图 4(a)],与基体的结合力不强。激光冲击强化后渗铝试样的表面形成了一层厚度均匀、完整的渗铝层[图 4(b)],厚度约 7 μm,与只渗铝处理相比,渗层厚度增加约 2 μm,渗铝层致密,且与基体的结合完好。

采用 SEM 对激光冲击强化后渗铝试样进行进一步分析,其宏观形貌如图 5 所示。从表面渗铝层到基体之间存在明显的过渡,大致可分成 4 个区域:渗铝层、晶粒细化层、过渡区和基体,其中晶粒细化区、过渡区和基体的放大图如图 5(b)~(d)所示。

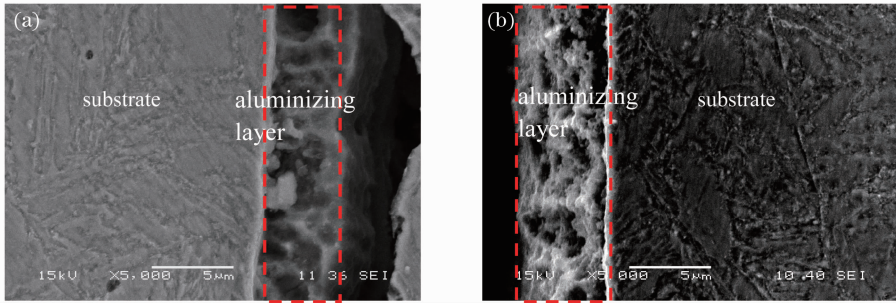


图 4 1Cr11Ni2W2MoV 的 SEM 图。(a)渗铝;(b)LSP 后渗铝

Fig. 4 SEM photographs of 1Cr11Ni2W2MoV. (a) Aluminizing; (b) aluminizing after LSP

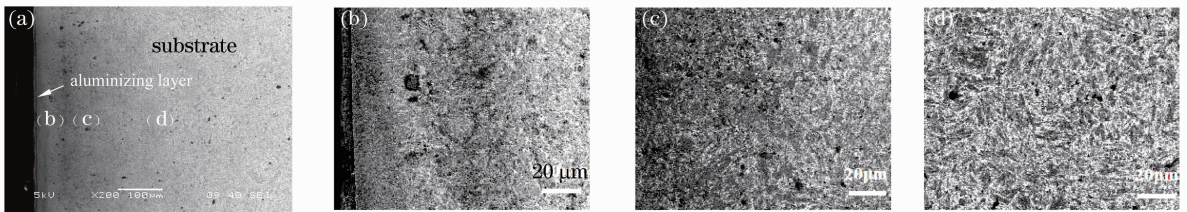


图 5 1Cr11Ni2W2MoV LSP 后渗铝试样的 SEM 图。(a)宏观形貌;(b)晶粒细化区;(c)过渡区;(d)基体

Fig. 5 SEM photographs of 1Cr11Ni2W2MoV with aluminizing after LSP. (a) Macro morphology; (b) grain refinement area; (c) transition area; (d) substrate

1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢经 LSP 后渗铝存在一个约 100  $\mu\text{m}$  的细化层[图 5(b)],材料的晶粒尺寸沿厚度方向呈梯度分布[图 5(b)~(d)],基体表面的板条马氏体板条较小[图 5(b)],板条间距较小,随着距离表面深度的增大,基体的板条马氏体增大,板条间距变宽,当到达图 5(d)位置时,板条间距较大[图 5(d)试样心部]与未处理试样的马氏体板条接近。

与光滑状态和渗铝状态相比,LSP 后渗铝试样的疲劳性能更好。渗铝过程中,510  $^{\circ}\text{C}$  的保温相当于对材料进行了热处理,有利于消除加工产生的残余拉应力,消除了应力突变,使组织更加均匀。因

此,与光滑状态相比,渗铝对疲劳寿命有所提高(50%)。

LSP 不锈钢表层形成了高密度位错[图 6(a), (b)],并在晶界附近大量位错缠结、切割、交错分布,从而引起较强的加工硬化,渗铝时的热作用后表层晶粒细化层依然存在[图 5(b)],另一方面,强化引起高密度位错和晶粒细化,使材料表层界面体积大大提高,表面能增加,为元素的扩散提供了理想的通道,使铝原子吸附、扩散过程更容易进行,从而使得到的渗层更致密,且与基体的结合性更好,在疲劳载荷的作用下,结构致密与基体结合力强的渗层不易开裂,从而有利于试样疲劳性能的提高。

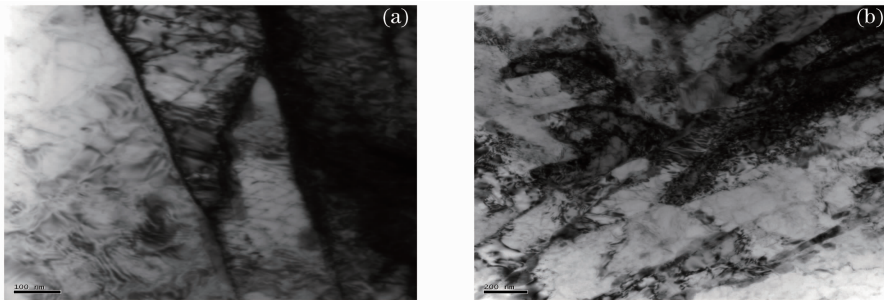


图 6 1Cr11Ni2W2MoV 试样 LSP 前后的 TEM 图。(a)激光强化前晶界;(b)激光强化后形成的高密度位错  
Fig. 6 TEM photographs of 1Cr11Ni2W2MoV before and after LSP. (a) Grain boundary shape before LSP; (b) high density dislocation after LSP

## 4 结 论

1) 1Cr11Ni2W2MoV 材料 LSP 后渗铝工艺可行,效果较佳,可使材料的疲劳寿命达到  $39.81 \times 10^5$ ,比其他表面状态的试样疲劳寿命高了 1 个数量级,疲劳寿命得到显著的提高。

2) 1Cr11Ni2W2MoV 试样 LSP 后渗铝不影响渗铝层的微观组织。

3) 与渗铝相比,LSP 后渗铝处理的 1Cr11Ni2W2MoV 试样的渗铝层厚度增加了约 2  $\mu\text{m}$ ,渗层组织更加致密,与基体的结合更牢固,基体由表及里有一个大约小于 100  $\mu\text{m}$  梯度分布的晶粒细化层,这是提高疲劳寿命的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Chunfeng. The hot working process and mechanical properties of 1Cr11Ni2W2MoV steel for aircraft turbine blade [J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1995, (1): 29~31
- 黄春峰. 1Cr11Ni2W2MoV 钢航空发动机叶片的热加工工艺与力学性能[J]. *金属热处理*, 1995, (1): 29~31
- 2 A. W. Warren, Y. B. Guo, S. C. Chen. Massive parallel laser shock peening: simulation, verification, and analysis [J]. *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division*, 2005, 16(1): 287~295

- 3 A. K. Sharma, R. K. Thareja. Plume dynamics of laser-produced aluminum plasma in ambient nitrogen [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, 243(1-4): 68~75
- 4 A. A. Kolomenskii, H. A. Schuessler. Shock waves and acoustic signals from the optical breakdown and interaction with targets of ultrashort laser pulses [J]. *Journal de Physique IV*, 2005, 125(1): 343~345
- 5 N. J. Zabusky, S. Lugomer, S. Zhang. Micro-fluid dynamics via laser metal surface interactions: wave-vortex interpretation of emerging multiscale coherent structures [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2005, 36(4-6): 291~299
- 6 A. Sasoh, T. Ohtani, K. Mori. Pressure effect in a shock-wave-plasma interaction induced by a focused laser pulse [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(20): 356~371
- 7 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
- 8 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei et al.. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(11): 1735~1740
- 周建忠, 黄舒, 赵建飞等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1735~1740
- 9 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 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(12): 15~19

- 10 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on 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
- 11 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328  
罗新民, 张静文, 赵广志 等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 12 Zhang Jie, Gu Xiang, Zhu Le *et al.*. Numerical simulation of fatigue life of 7050 aluminum alloy processed by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3192~3195  
张 洁, 顾 祥, 祝 乐 等. 激光冲击强化 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3192~3195
- 13 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
- 14 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2632~2637  
吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2632~2637
- 15 Li Mengjin, Sun Xiaofeng, Guan Hengrong *et al.*. High temperature oxidation behavior of (Ni, Pd) Al coating [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, **39**(4): 439~443  
李猛进, 孙晓峰, 管恒荣 等. (Ni, Pd) Al 涂层的抗高温氧化性能[J]. 金属学报, 2003, **39**(4): 439~443