

文章编号:1000-8055(2011)11-2409-07

钢制叶片激光冲击强化与渗铝的组合应用

李应红¹, 李 伟^{1,2}, 何卫锋¹, 李玉琴¹, 李启鹏¹

(1. 空军工程大学 工程学院 航空等离子体动力学国防科技重点实验室, 西安 710038;

2. 空军第二飞行学院 空中领航武器控制系, 西安 710306)

摘 要: 采用扫描电子显微镜(SEM), X射线衍射(XRD)等手段研究了激光冲击强化(LSP)对钢制叶片渗铝层的影响, 结果表明渗铝后进行激光冲击强化会对渗铝层造成破坏, 而在渗铝之前进行激光冲击强化则能提高渗层质量. 从残余应力和显微组织变化两方面分析了渗铝高温作用对不锈钢材料激光冲击强化效果的影响, 激光冲击强化产生的残余压应力在 510℃ 渗铝温度环境下保温 150 min 仍有一 295 MPa 稳定存在, 晶粒细化组织也没有明显长大, 激光冲击不锈钢材料的残余应力和微观组织具有良好的热稳定性. 振动疲劳对比试验结果验证了“LSP+渗铝”组合工艺对不锈钢材料的强化效果, 在 660 MPa 应力水平下, 采用该组合工艺试片的疲劳寿命为 3.98×10^6 , 为原渗铝试片疲劳寿命的 14 倍左右.

关 键 词: 航空发动机; 叶片; 激光冲击强化; 渗铝; 振动疲劳

中图分类号: V216.3; TG665

文献标志码: A

Laser shock processing and aluminizing compound technology used on steel blade

LI Ying-hong¹, LI Wei^{1,2}, HE Wei-feng¹, LI Yu-qin¹, LI Qi-peng¹

(1. Aero-Plasma Dynamics National Defense Key Laboratory,
The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Department of Airbone Navigation and Weapon Control,
Second Aviation College of Air Force, Xi'an 710306, China)

Abstract: Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and other techniques were used to detect the influence of laser shock processing (LSP) on aluminizing layer, which is infiltrated into the stainless steel blade for antisepticising. The results show that the aluminizing layer will be destroyed when LSP is implemented after aluminizing. And the quality of aluminizing layer will be improved while LSP is implemented before aluminizing. The influence on the LSP by the high temperature in the course of aluminizing was studied through residual stress test and metallographic analysis. After 150 minutes in the condition of aluminizing temperature 510℃, the residual compressive stress in the LSP zone was still -295 MPa and the refined grain did not grow up remarkably. The residual compressive stress and grain refinement layer induced by LSP had good thermo stability. Finally, the vibration fatigue performance of different states stainless steels was tested. When the maximum stress is 660 MPa, the fatigue life of “LSP before aluminizing” is about 3.98×10^6 , which is about fourteen times than that of aluminizing.

收稿日期:2010-09-13; 修订日期:2011-02-12

作者简介: 李应红(1963—), 男, 重庆奉节人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事激光冲击强化、等离子体流动控制与推进技术等方向研究.

Key words: aero-engine; blade; laser shock processing; aluminizing; vibration fatigue

钢制叶片在航空及地面燃气涡轮发动机压气机、风机等设备上得到了广泛的应用.然而,由于疲劳损伤引起的钢制叶片故障时有发生,影响了设备的安全可靠运行,增加了维修费用^[1].例如:由于振动疲劳引起的某型航空发动机二级压气机钢制叶片叶尖裂纹与掉块故障,长期以来未得到彻底解决,导致有的发动机提前返厂^[2].

激光冲击强化(laser shock processing,简称LSP)是一种新型的表面强化技术^[3-4],通过高功率激光与材料的作用产生高压等离子体冲击波,利用冲击波的力学效应使金属材料表面改性,从而提高金属的抗疲劳、耐磨损以及防应力腐蚀等性能^[3-9].

渗铝是钢制叶片制造中常用的防腐工艺,其工艺过程包含高温下原子的扩散以及复杂的物理化学反应^[1].为了解决某航空发动机压气机钢制叶片叶尖疲劳裂纹与掉块故障,采用LSP对叶片进行处理,必须要考虑渗铝与LSP两种工艺间的交互影响.本文针对某航空发动机压气机1Cr11Ni2W2MoV不锈钢叶片,进行了LSP和渗铝组合应用技术研究.首先,通过LSP对渗铝层的影响分析,确定了两者的工艺顺序;随后,研究了渗铝条件下高温环境对LSP产生的残余压应力和微观组织的影响;最后,通过疲劳对比试验研究了“LSP+渗铝”方式钢制叶片的疲劳性能.

1 LSP对渗铝层的影响

某型航空发动机二级压气机叶片采用1Cr11Ni2W2MoV不锈钢制造,在加工过程中使用了固体粉末包埋低温渗铝工艺.使用的渗剂由供铝剂(纯铝粉)、催渗剂(AlCl_3 或其他卤盐,起活化作用)、填充剂(常用 Al_2O_3 粉末,起防止烧结的作用)组成.渗铝过程中的温度为 510°C ,形成的渗铝层厚度约为 $5\mu\text{m}$ ^[1].

要实现LSP技术在该钢制叶片上的应用,首先必须保证LSP不会对叶片原有的渗铝层造成破坏,确定LSP在叶片加工中的工艺位置.为此,研究了LSP与渗铝不同组合使用方式(包括:“渗铝+LSP”和“LSP+渗铝”)对渗层厚度、致密性以及和基体结合性能等的影响.

1.1 “渗铝+LSP”方式对渗层的影响

对1Cr11Ni2W2MoV不锈钢试样,按照某航

空发动机压气机叶片的实际生产工艺进行渗铝,然后进行LSP处理.LSP所用参数为:激光波长为 1064 nm 、激光脉宽为 10 ns 、激光功率密度为 $6.4\text{ GW}/\text{cm}^2$ 、光斑搭接率为 75% 、约束层为 $1\sim 2\text{ mm}$ 厚度的水,吸收保护层为 0.1 mm 厚铝箔.

“渗铝+LSP”方式的试样渗层典型形貌如图1所示.部分区域渗层完全剥落,受剥落的影响,渗层厚度也发生了明显变化,厚度约为 $2\mu\text{m}$,仅为正常渗层厚度的 40% .表明LSP过程中,高压等离子体冲击波对渗层造成了明显的损伤,如图1所示.

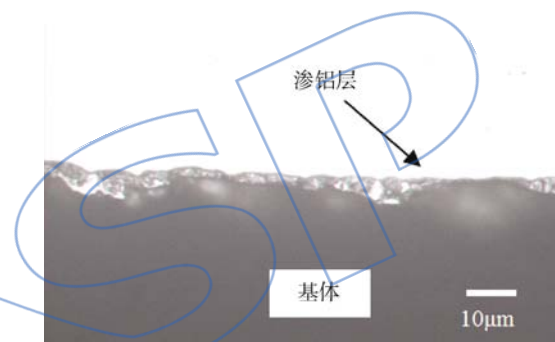


图1 LSP对渗铝层造成的损伤

Fig. 1 Affected aluminizing layer induced by LSP

钢制叶片通过渗铝防腐的机理在于渗铝使叶片表层形成了Fe-Al系金属间化合物^[1].通过对渗铝层的能谱以及相结构的分析结果,可知某型钢制叶片渗铝产生的Fe-Al系金属间化合物为 FeAl_3 .但Fe-Al系金属间化合物特别是 FeAl_3 及 Fe_2Al_5 两相含铝量高,属于脆性相,硬度较高、脆性较大,与基体的结合力不强.Fe-Al系金属间化合物在高压冲击波的作用下容易产生破裂甚至剥落,其破坏机制有两种:一是由于渗铝层硬度高、脆性大,冲击波的作用直接引起渗层的开裂破坏;二是当冲击波在渗层与基体交界面产生反射,反射形成拉伸波,在渗层中产生拉应力^[10],当拉应力大于渗层与基体的结合力时,就会使渗层产生裂纹,严重时会在某些位置(渗层与基体结合较弱或渗层之间存在疏松等缺陷的位置)引起渗层的破裂分离.

LSP对叶片渗层的破坏会对叶片使用造成负面影响:一方面渗层厚度的下降将严重影响钢制叶片的抗腐蚀性能,将使叶片在腐蚀性环境中工作的可靠性下降;另一方面,由于冲击波的作用

在渗层中形成微裂纹,降低叶片的承载能力。

1.2 “LSP+渗铝”方式对渗层的影响

图 2 为按“LSP+渗铝”方式处理的 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢试样扫描电子显微镜观察结果。可观察到渗层厚度均匀,约为 8 μm ,比原渗层厚度增加了 60%左右,且渗层连续、完整且致密,渗层与基体结合良好。

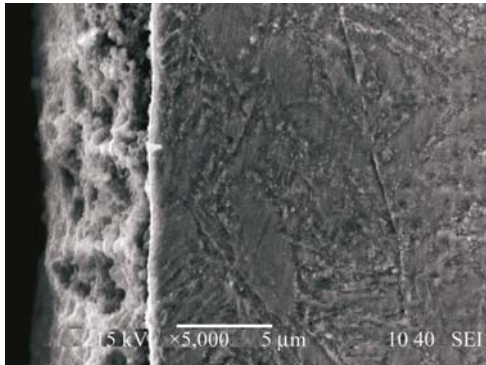


图 2 “LSP+渗铝”方式得到的渗层

Fig. 2 Better quality layer after “LSP+Aluminizing”

对采用原渗铝工艺以及采用“LSP+渗铝”方式加工的试样渗层做进一步的 SEM(scanning electron microscopy)对比观察,如图 3 所示。可观察到采用原渗铝工艺得到的渗层呈蜂窝状分布,渗层疏松,夹杂大量孔洞。

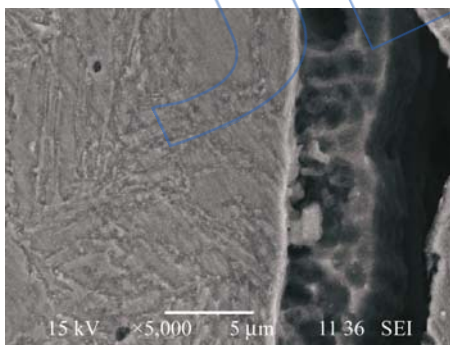


图 3 原渗铝层典型形貌

Fig. 3 Aluminizing layer before LSP

对“LSP+渗铝”方式得到的渗层进行 X 射线物相分析,并与原渗铝工艺所得渗层的 X 射线衍射图谱进行对比,如图 4 所示。“LSP+渗铝”方式得到的渗层的 X 射线衍射谱线与原渗层的谱线基本一致,但其中 Fe 和 Fe-Cr 相的峰值增大。表明“LSP+渗铝”方式形成的 Fe-Al 系金属间化合物仍为 FeAl_3 ,但渗层中的 Fe, Cr 等基体元素比例有所增加。

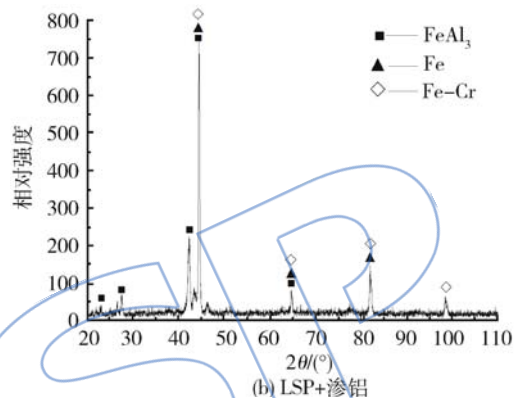
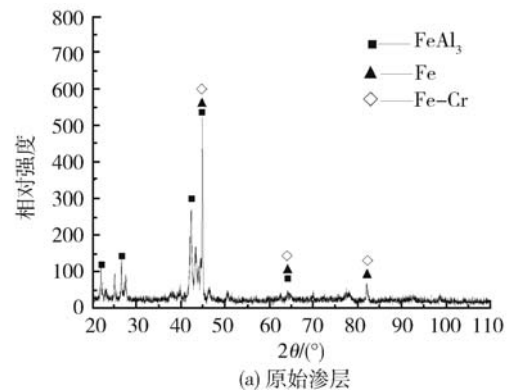


图 4 两种渗铝层的 X 射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction (XRD) photographs of two kinds of aluminizing layers

低温渗铝过程中,渗剂与基体中的元素在 480 $^{\circ}\text{C}$ 便会在界面处发生相互扩散,表层 Al 元素向基体内扩散,同时基体中的 Fe, Ni, Cr 等元素也会向外扩散^[11]. LSP 后表层材料的位错密度增加,晶粒细化^[2-5],为元素的扩散提供理想的通道,扩散系数增大,有利于 Fe 和 Al 等元素的扩散,使渗层致密性增加,与基体结合更加紧密^[12]. 因此,渗铝前进行 LSP 有利于生产质量更好的渗层。

由于“渗铝+LSP”方式会对渗层造成严重的损伤,而“LSP+渗铝”方式能得到与基体结合更加牢固且厚度更大的渗层。因此, LSP 应位于渗铝工艺之前使用。

2 渗铝过程对 LSP 强化效果的影响

LSP 主要通过产生的残余压应力以及晶粒细化组织来改善金属的疲劳性能^[2-6]. 该航空发动机钢制压气机叶片使用环境温度约为 200 $^{\circ}\text{C}$,而渗铝温度为 510 $^{\circ}\text{C}$ 左右,高温环境下将会使 LSP 产生的残余应力松弛,甚至使金属显微组织发生改变,因此,在渗铝温度 510 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,研究温度对 LSP 强化效果的影响。

2.1 LSP 产生的残余应力热稳定性

采用 X 射线残余应力测试方法,研究 LSP 在 1Cr11Ni2W2MoV 材料中形成的残余压应力热稳定性.由于渗层阻碍了 X 射线的入射,且 Al 原子的扩散影响测试结果,因此,测试中使用 510℃ 真空保温来模拟渗铝过程中的温度环境,测试 LSP 后的 1Cr11Ni2W2MoV 材料残余应力在 510℃ 条件下随时间的变化.测试试样和测点如图 5 所示,测点位于 LSP 强化区域中间,测量该区域残余应力的平均值,激光冲击工艺参数与前文相同.

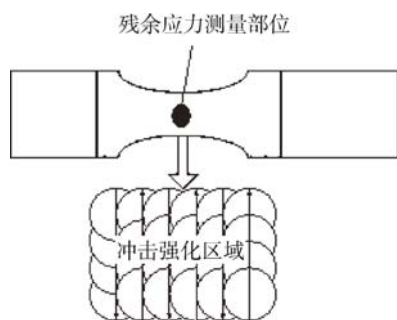


图 5 残余应力测试试样和位置

Fig. 5 Samples and position for residual stress measurement

试验执行 GB7704-87 标准,测量方法为侧倾固定 Ψ 法,定峰方法为交相关法^[13].测试过程中相关参数设置为:管压为 22 kV,管流为 6 mA, Cr 靶 $K\alpha$ 辐射,准直管直径为 1 mm, 2θ 扫描范围为 $126^\circ \sim 134^\circ$,扫描步距为 0.1° ,时间常数为 0.5 s, Ψ 角为 $0^\circ \sim 45^\circ$, X 射线应力常数 K 取为 $-601 \text{ MPa}/(^{\circ})$,正式测试前整套测试系统使用无应力铁粉进行标定.测试结果如图 6 所示.

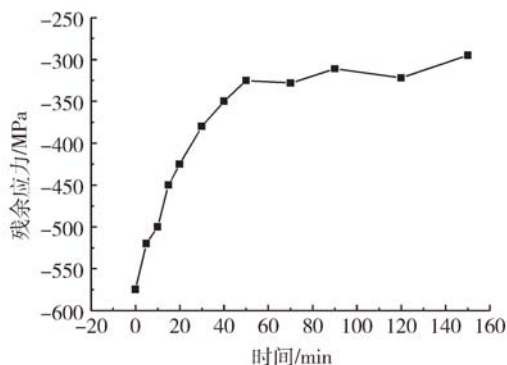


图 6 LSP 产生的残余应力热稳定性测试

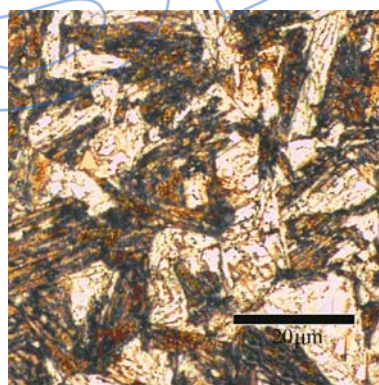
Fig. 6 Heat stability test of LSP induced residual stress

可见,未保温前 1Cr11Ni2W2MoV 材料表面残余压应力为 -574.8 MPa ,数值较高.残余压应力随保温时间的延长逐渐降低,当保温时间超过 50 min 后,虽然残余应力数值仍然继续降低,但降低趋势逐渐缓慢,基本呈稳定状态.经过 $510^\circ\text{C}/150 \text{ min}$ 保温后,残余应力由 -574.8 MPa 降至 -295.0 MPa ,约 49% 的残余应力发生松弛.

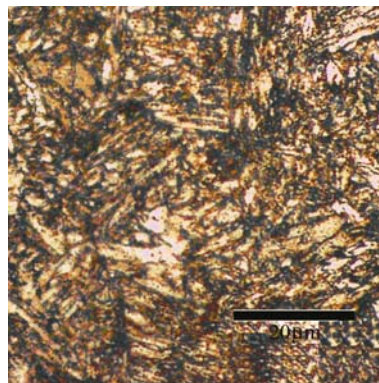
残余压应力能有效抑制裂纹的萌生,降低裂纹的扩展速率.LSP 产生具有一定热稳定性的残余压应力,对金属疲劳性能的改善产生积极作用.

2.2 LSP 产生的细晶组织热稳定性

对 1Cr11Ni2W2MoV 材料进行 LSP 处理,并与未进行 LSP 处理的材料进行金相组织对比观察,结果如图 7 所示,可观察到材料的原始组织为粗大的板条状马氏体,经 LSP 后为细小的针状马氏体,表明经 LSP 后 1Cr11Ni2W2MoV 材料组织发生了明显细化.LSP 过程中金属组织细化是金属表层材料在冲击波的重复作用下多次发生严重塑性变形的结果^[2].



(a) 原始板条马氏体组织



(b) LSP 后的针状马氏体组织

图 7 LSP 对材料金相组织的影响

Fig. 7 Effect of LSP to metallurgical structure

由于经 LSP 处理后的金属表层细化组织中存在着大量的界面和晶格畸变,晶格内部储存了较高的能量,使得这种细化组织处于热力学上的亚稳态,在低温或室温下,由于原子扩散能力不足,这种不稳定状态不会发生明显的改变,但在一定的高温下,原子扩散能力提高,金属表面组织和性能就可能发生一系列的变化.渗铝时的温度是钢制叶片加工和使用过程中的最高温度.因此,本文主要研究 LSP 形成的细晶组织在渗铝作用下的热稳定性.

对 LSP 后的 1Cr11Ni2W2MoV 材料按照叶片实际生产工艺进行渗铝,然后观察渗铝后的金属显微组织,如图 8 所示.

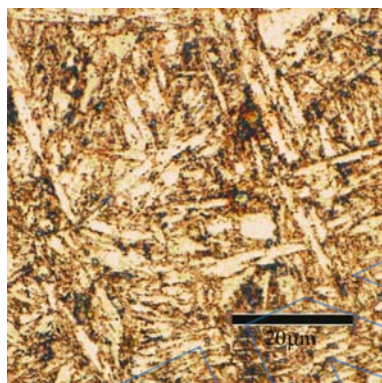


图 8 经“LSP+渗铝”后的金相组织
Fig. 8 Metallurgical structure after “LSP+aluminizing”

由图 8 可知,LSP 对材料组织的细化作用在渗铝之后仍然比较明显.使用 SEM 对“LSP+渗铝”处理后的试样做进一步分析,如图 9 所示.可以看到,强化后渗铝的试样表层存在一个约 100 μm 厚的影响层,从渗层表面向里的板条马氏体由小到大呈梯度变化.

在细晶组织中,存在着大量的三叉晶界和界隅,其能量高于一般晶界,杂质或微量合金元素倾向于存在这些位置并与之产生强交互作用^[14].更加之相互交汇的三叉晶界和界隅往往处于一种平衡状态,若某一晶界发生移动,将会引起其他晶界的联动,这种移动显然比单晶界面移动需要更多的能量,所以虽然细晶组织中界面能较高、晶粒长大驱动力较大,但由于杂质或合金元素对晶界的钉扎作用很强,单位面积晶界移动单位距离需要更多的能量,因此微量杂质或合金元素的存在使得细晶组织中晶界的活动性一般较差.LSP 形成的细晶组织在渗铝后仍然存在,说明材料在渗铝

温度 510 ℃ 时,外界提供的能量不足以使晶界移动.因此,表层细晶组织没有发生明显的长大.

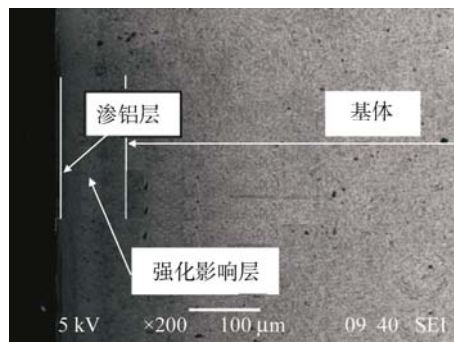


图 9 不锈钢材料“LSP+渗铝”处理后的 SEM 照片
Fig. 9 SEM photograph of stainless steel after “LSP+aluminizing”

LSP 形成的变形细晶组织内含有高密度的位错、晶界、亚晶界等晶体缺陷,这些缺陷能阻碍金属晶体中位错的移动,使金属材料的塑性流动不易发生,从而提高金属的强度及疲劳性能^[2,3,6,15].同时,LSP 在材料中形成的细晶组织和残余压应力具有较好的热稳定性,结合下文的疲劳试验结果,说明激光冲击强化不锈钢在经历渗铝的高温作用后,仍然可以发挥其对疲劳性能的改善作用.

3 振动疲劳对比试验

“LSP+渗铝”工艺有利于形成质量较好的渗层,同时也必须确保该方式能有效对提高钢制叶片的疲劳性能,本文进行了不锈钢试片的振动疲劳对比试验,验证“LSP+渗铝”组合工艺提高材料疲劳性能的有效性.

3.1 疲劳试片制备

选用某航空发动机钢制叶片所用的 1Cr11Ni2W2MoV 材料,按照该叶片的实际加工和热处理工艺对材料进行处理,然后制成标准振动疲劳试片,形状和尺寸如图 10 所示.

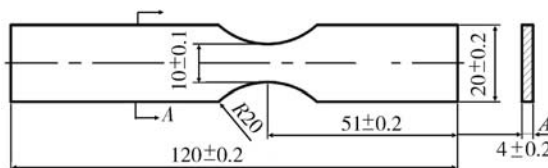


图 10 标准振动疲劳试片(单位:mm)

Fig. 10 Standard vibration fatigue sample (unit:mm)

标准疲劳试片数量为30片,分成三组,每组10片.第一组试片渗铝状态,第二组试片为LSP后渗铝状态,第三组试片为渗铝后LSP状态.

3.2 振动疲劳试验

疲劳试验按“HB5277-84 发动机叶片及材料振动疲劳试验方法”规定的成组对比法进行,即所有的试片都在同一应力水平下进行一阶弯曲振动疲劳试验,记录每个试片的频率与出现裂纹的时间,从而计算试片的疲劳寿命.

在正式试验前,采用3件试片进行了应力和叶尖振幅标定.为了对比研究相同条件下不同处理方式对疲劳寿命的影响,参考叶片的实际工作环境,三种状态所有试片的试验部位最大应力控制在660 MPa,该应力是振动台激振引起的试片一阶弯曲振动时,试片表面考核部位的应力,通过应变片测试与标定,不包括激光冲击强化产生的残余应力.试验数据按“HB/Z112-86 材料疲劳试验统计分析方法”进行处理.

在试验过程中,激光位移传感器若监测到试片自由端振幅突然下降,表示试片可能出现了裂纹,记下此时的试验时间.上调激振加速度,如果在新的位置位移重新稳定,则表明未出现裂纹,如果上调激振加速度后,位移依然下降,则出现裂纹可能性较大,在这种情况下将进行重新扫频,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寿命.为了更好判断裂纹位置和裂纹情况,在振幅下降过程中,增加激振力以保持试验振幅,直到振幅加速下跌的时候停止,以目视及荧光检查裂纹情况.

3.3 试验结果及分析

除去正式试验开始之前用于摸索试验参数所用试片以及非正常断裂试片的疲劳试验数据,每组有效试验数据最少为7件,疲劳试验数据统计分析置信度为95%,三组试片振动疲劳试验结果如图11所示.

由疲劳试验数据可知,与渗铝相比,“渗铝+LSP”试片疲劳寿命显著降低,与前文对渗层的研究吻合,验证了该方式对渗层的破坏作用;而经“LSP+渗铝”方式处理的试片疲劳寿命远高于渗铝试片.渗铝前使用LSP对试片进行强化,可以将660 MPa应力水平下的试片中值疲劳寿命由 2.77×10^5 提高至超过 3.98×10^6 ,寿命增幅超过一个数量级.

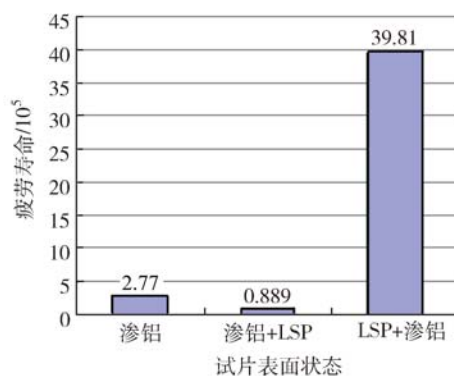


图11 不同表面状态试片的中值疲劳寿命

Fig. 11 Vibration fatigue data of different samples

4 结论

本文研究了钢制叶片LSP与渗铝两种工艺间的交互作用,通过两种状态试片的振动疲劳对比试验,提出了LSP+渗铝组合工艺方案,并验证了其合理性和有效性,得到的主要结论有:

1) “渗铝+LSP”工艺使部分区域渗层剥落,冲击波对渗层造成了明显的破坏;“LSP+渗铝”工艺的渗层厚度约为 $8 \mu\text{m}$,且渗层致密,与基体的结合牢固.因此,不锈钢叶片LSP应在渗铝之前进行.

2) LSP产生的残余压应力数值在 510°C 条件下随保温时间的延长逐渐降低,当保温时间超过50 min后,降低趋势逐渐缓慢,基本呈稳定状态.经过150 min保温后,残余应力由最初的一574.8 MPa降至-295.0 MPa.对材料显微组织的测试结果表明,LSP产生的细晶组织也具有一定的热稳定性.

3) 对两种不同状态的渗铝试片进行了疲劳对比试验.在660 MPa应力水平下,“LSP+渗铝”状态的试片中值疲劳寿命大于 3.98×10^6 ,远高于“渗铝”状态的试片中值疲劳寿命 2.77×10^5 ,寿命增幅超过一个数量级.

致谢:

论文研究得到了贵州黎阳航空发动机公司的支持,试片的渗铝与振动疲劳试验由黎阳公司新艺机械厂完成,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册发动机叶片工艺[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [2] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

- [3] 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.
LI Wei, HE Weifeng, LI Yinghong, et al. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2197-2201. (in Chinese)
- [4] 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.
LI Wei, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19. (in Chinese)
- [5] Fairand B P, Clauer A H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. Appl. Phys., 1979, 50(3):1497-1502.
- [6] Richard D T, David F L. Preventing fatigue failures with laser peening[J]. The Amptiac Quarterly, 2003, 7(2): 3-7.
- [7] Thomas M B. Universal technology corporation high cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report[R]. Dayton, OH: Universal Technology Corporation, AFRL-PR-WP-TM-2004-2040, 2003.
- [8] Michael R H, Adrian T D, Anne G D, et al. Laser peening technology[J]. Advanced Materials & Processes, 2003, 161(8): 65-71.
- [9] Yang J M, Her Y C, Clauer A H. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T6 Al alloy with fastener holes and stop holes[J]. Material Science Engineer A, 2001, 298: 296-299.
- [10] Meyers. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 刘彦, 黄风雷, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [11] 李华飞, 俞敦义, 郑家荣. 热浸镀铝钢的性能及用途[J]. 材料保护, 2001, 34(5): 21-23.
LI Huafei, YU Dunyi, ZHENG Jiashen. The performance and usage of the hot-dip auluminizing steel[J]. Materials Protection, 2001, 34(5): 21-23. (in Chinese)
- [12] 葛利玲, 卢正欣, 井晓天, 等. 0Cr18Ni9 不锈钢表面纳米化组织及其热稳定性对低温渗氮行为的影响[J]. 金属学报, 2009, 45(5): 566-572.
GE Liling, LU Zhengxin, JING Xiaotian, et al. Effect of surface nanocrystallization and thermal stability of 0Cr18Ni9 stainless steel on low temperature nitriding behavior[J]. Acta, Metallurgica Sinica, 2009, 45(5): 566-572. (in Chinese)
- [13] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [14] 王磊. 材料的力学性能[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005.
- [15] HE Weifeng, LI Yinghong, QI Pengli. The effects of laser shock peening on fatigue life in Ni-based superalloy[J]. Advanced Materials Research, 2010, 135: 209-214.