

文章编号: 0258-7025(2010)10-2658-04

渗铝对 K417 激光冲击强化效果的影响

刘海雷 龙霓东 何卫锋 李玉琴 李伟 李启鹏

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 激光冲击强化(LSP)可以显著提高铸造镍基高温合金 K417 的抗疲劳强度。为提高 K417 在高温下的抗氧化和燃气腐蚀性能必须进行渗铝处理,研究了渗铝对 K417 激光冲击强化效果的影响。由残余应力在 900 ℃ 保温的变化分析表明,虽然冲击后产生的残余压应力在高温下会部分释放,但是根据振动疲劳试验,激光冲击强化后材料疲劳强度为 285.5 MPa,再渗铝后疲劳强度提高到 339.5 MPa。结果表明,渗铝和激光冲击强化工艺可同时使用。

关键词 激光技术;激光冲击强化;渗铝;K417 合金;疲劳强度;残余应力

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103710.2658

Impact of Aluminizing on Effects of K417 Material by Laser Shock Processing

Liu Hailei Long Nidong He Weifeng Li Yuqin Li Wei Li Qipeng

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

Abstract Fatigue resistance on cast nickel-base superalloy K417 by laser shock processing(LSP) can be enhanced. Aluminizing is necessary in order to improve the oxidation resistance and fuel gas corrosion resistance. The impact of aluminizing on the LSP effects of K417 material is researched. According to the changes of residual stress in 900 ℃, although some of the residual compressive stress caused by LSP will be released, the experimental results show that the fatigue resistance of the sample by LSP is 285.5 MPa while that of the sample by aluminizing after LSP is 339.5 MPa. It is indicated that the LSP and the aluminizing can be used in the same process.

Key words laser technique; laser shock processing; aluminizing; K417 alloy; fatigue resistance; residual stress

1 引言

K417 合金是一种低密度、高强度的镍基铸造高温合金,主要应用于制造航空发动机的涡轮叶片,工作温度低于 900 ℃,国外相近牌号为 IN100^[1]。发动机叶片由于振动等因素会产生裂纹,致使叶片疲劳断裂。激光冲击强化(LSP)技术是近几年兴起的新型表面处理技术^[2],已成功应用于多种重要材料的表面强化,效果明显优于喷丸等传统的表面处理技术^[3~6]。LSP 的原理是当高功率脉冲激光辐照金属表面时,使金属表面涂敷的吸收保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发,产生高压的等离子

体冲击波,利用冲击波的力效应使表层材料微观组织发生变化,并在较深的厚度上残留压应力,从而提高材料的抗疲劳性能^[7~12]。为提高 K417 材料的抗疲劳强度,对该材料进行激光冲击强化。已有研究表明,对 K417 试件而言,LSP 效果明显,疲劳强度由强化前的 106.5 MPa 提高到 285.5 MPa^[7]。在实际应用中,为了提高 II 级涡轮叶片工作时的抗高温氧化和高温燃气腐蚀性能需进行渗铝处理,而渗铝对 LSP 效果有何影响还不清楚。因此,本文在已有研究基础上,进行了高温气相渗铝对 K417 材料 LSP 效果影响的研究。

收稿日期: 2010-02-01; **收到修改稿日期:** 2010-04-14

基金项目: 国防预研基金(5132701)资助课题。

作者简介: 刘海雷(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化技术及其应用等方面的研究。

E-mail: liuhailei1985@163.com

导师简介: 龙霓东(1963—),女,副教授,硕士生导师,主要从事表面工程及形状记忆合金等方面的研究。

E-mail: longnd@163.com

2 振动疲劳试验

2.1 试样制备

试验过程中所用试样按照 HB 5277-84《发动机

叶片及材料振动疲劳试验方法》规定制作, K417 标准试样的形状及尺寸如图 1 所示。

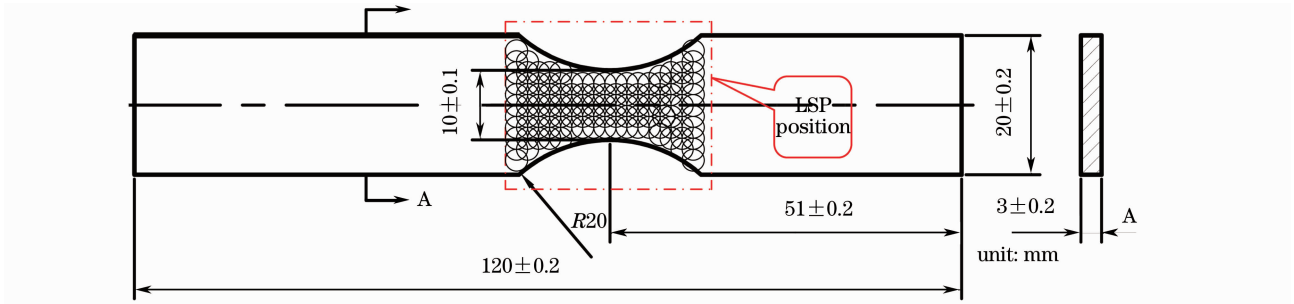


图 1 试样形状及尺寸

Fig. 1 Shape and size of test specimen

试验分两组进行, 每组各取标准试样 15 件, 所有试样处理前都经过表面抛光。第 1 组: 对标准试件进行激光冲击强化。第 2 组: 对标准试件进行激光冲击强化, 然后进行高温气相渗铝。

其中进行试件激光冲击强化的激光功率密度为 7~9 GW/cm², 吸收层为铝箔, 约束层为水。冲击方式为单点连续冲击, 沿宽度方向每排依次冲击, 每两个冲击斑点及上下两排之间均保持一定搭接率, 以保证冲击区域的覆盖率。试样的另一面相同区域同样进行强化。试样的冲击强化部位如图 1 所示。

2.2 试验方法及结果

试验采用升降法测定试片疲劳极限, 试验系统示意图如图 2 所示, 将试件用夹具固定在振动台上, 振动台的振动是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推动。通过计数器测量发出的信号数可计量振动次数。利用电涡流传感器测量试样的动态振动位移、振幅等。

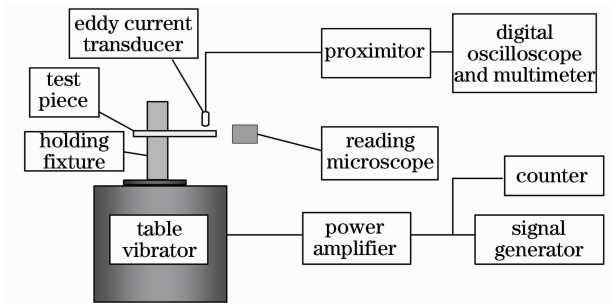


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Test system diagram

试验中先对试片用扫频的方法确定自振频率, 记录试验正式开始时的激振频率, 如果在循环次数达到 10⁷ 之前, 激振频率累积下降 3 Hz, 则试验终

止并判定试片“破坏”。如果循环次数达到 10⁷, 激振频率累积下降小于 3 Hz, 则试验终止并判定试片“越出”。

首先从第 1 组试样中取出 5 件, 进行测试性试验, 取初始应力值为 275 MPa, 取应力级差为 15 MPa。将剩余 10 件试样依次进行振动试验, 第 1 件在 275 MPa 应力值下进行, 如果试样“破坏”则第 2 件在高一级应力水平 (290 MPa) 下测试, 如果试样“越出”则第 2 件在低一级应力水平 (260 MPa) 下测试。如此依次进行试验, 可得到第 1 组试样的升降图如图 3 所示。计算可得第 1 组试样的平均疲劳强度为 285.5 MPa。

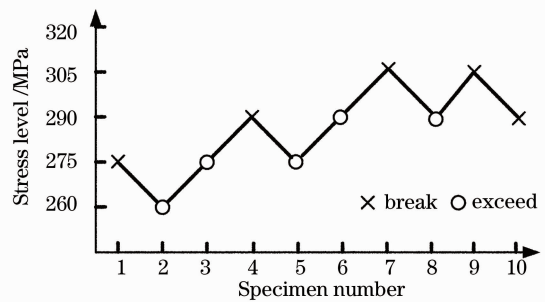


图 3 激光冲击强化后试样升降图

Fig. 3 Up-down graph after LSP

与第 1 组试样相同, 先取出 5 件确定初始应力值为 335 MPa, 应力级差取 15 MPa。将剩余 10 件试样从 335 MPa 开始按照与第 1 组相同的方式进行试验, 得到第 2 组试样的升降图如图 4 所示。计算得第 2 组试样的平均疲劳强度为 339.5 MPa。

由试验结果知, 对强化后的试样渗铝与强化试样相比, 疲劳强度更高, 可见, 渗铝和激光冲击强化工艺可同时使用。

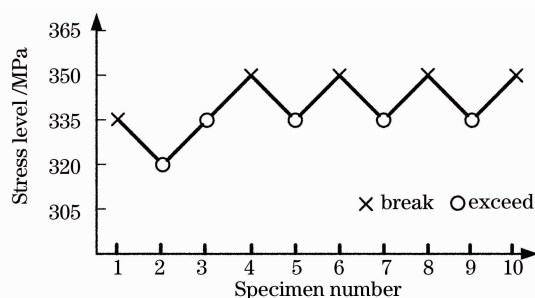


图4 激光冲击强化后渗铝试样升降图

Fig. 4 Up-down graph after LSP and aluminizing

3 试验结果分析

3.1 温度对 K417 残余应力的影响

根据已有研究,激光冲击强化产生的残余压应力对提高材料疲劳强度有重要作用^[7~12]。但 K417 的渗铝是在 900 °C 高温下进行的,高温可能会造成残余压应力的释放。为得出温度对残余压应力的影响,考虑到渗铝后渗铝层会对残余压应力的测试结果产生影响,因此对激光冲击强化后的标准试件在 900 °C 处理,保温时间为渗铝时间 120 min,同时对激光冲击强化区域进行残余应力测试。测试设备为日本理学 MFS-3 型 X 射线衍射仪,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。测试结果见图 5。

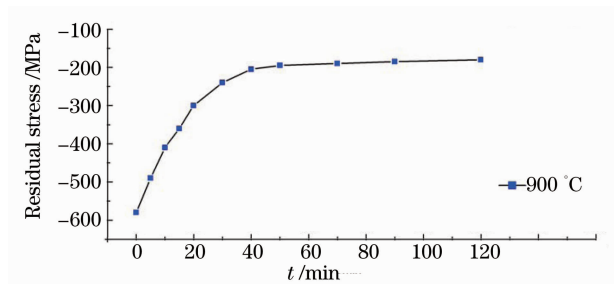


图5 K417 在 900 °C 保温表面残余应力释放

Fig. 5 Residual stress release of K417 heated at 900 °C

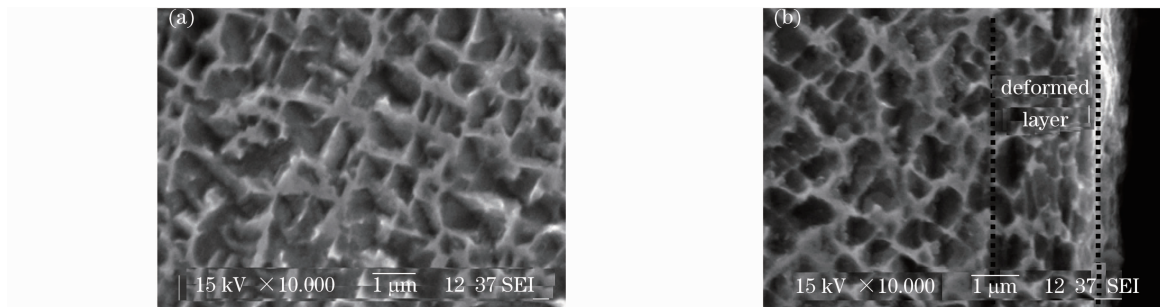


图6 K417 激光冲击强化前(a)、后(b)的 SEM 图

Fig. 6 SEM of K417 material before(a) and after(b) LSP

可见,在 900 °C 温度下,随着保温时间的增长残余压应力逐渐释放,经 120 min 保温后,约 70% 残余应力松弛,此时残留的压应力仍然在消除拉应力组织裂纹萌生及阻碍疲劳裂纹扩展等方面起作用,从而提高疲劳强度。但由于大部分残余压应力的释放,并不是疲劳强度提高的主要原因。

3.2 激光冲击强化后渗铝

如前所述,激光冲击强化是利用冲击波的力效应使表层材料微观组织发生变化,并在较深的厚度上残留压应力。K417 试件激光冲击强化后提高疲劳强度的主要原因是残余应力作用和强化相 γ' 的变化。其中表层存在残余压应力,将极大抵消工作应力引起的拉应力集中,阻止裂纹在表层萌生。此外,表层残余压应力场还能阻碍疲劳裂纹的扩展。图 6 为强化前后 K417 扫描电子显微镜(SEM)下的组织,未强化的 γ' 相呈方形,且分布均匀,如图 6(a) 所示,激光冲击波使表层材料发生剧烈塑性变形,如图 6(b) 所示,试件表层的强化相 γ' 的形状发生了改变,在垂直于冲击方向上, γ' 被拉长,晶粒破碎,从而提高了疲劳强度。

强化后渗铝,虽然由于温度的作用残余压应力大部分释放了,但此时残留的残余压应力对疲劳强度的提高仍有一定的效果。其次,表层基体材料由于 Al 元素的进入,对 γ 相具有固溶强化作用,表层的变形使 γ' 相的分布更加均匀,呈方块状,形态比较规则和细小,从而有利于基体表层材料的固溶强化和沉淀强化。第三,由于剧烈的塑性变形,使表面具有较高的变形存储能,为针状晶的生长提供了热力学动力,也加速了 Ni, Al 的扩散反应,在基体表面形成致密的柱状晶,并与颗粒状结合在一起,与基体的结合增强,从而提高材料的疲劳强度,如图 7 所示。

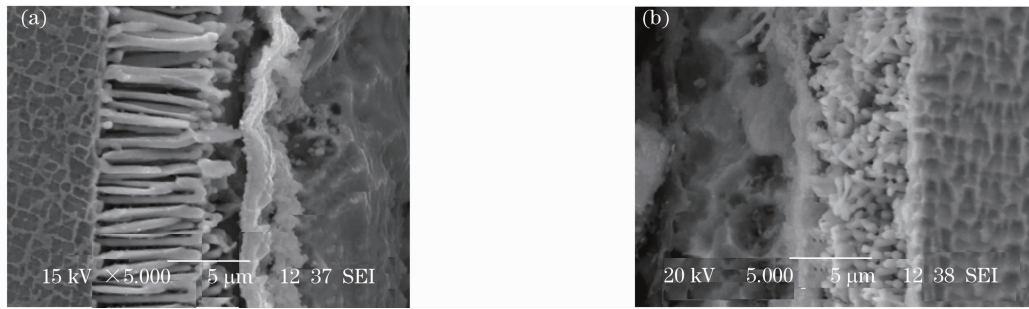


图7 K417 激光冲击强化后渗铝(a)和渗铝(b)的 SEM 图

Fig. 7 SEM of K417 material aluminizing after LSP (a) and aluminizing(b)

4 结 论

渗铝时的高温会造成残余压应力的部分释放,但渗铝对 K417 材料激光冲击强化的效果非但没有负面影响,还使其疲劳强度更高。其中标准试样的疲劳强度为 106.5 MPa,激光冲击强化后疲劳强度提高到 285.5 MPa,强化后渗铝疲劳强度为 339.5 MPa。表明渗铝和激光冲击强化工艺可同时使用。

参 考 文 献

- 1 Wang Donglin, Li Jiabao, Jin Tao *et al.*. Fatigue-life improvement of K417 alloy by shot peening and reery stallization [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, **35**(8): 1294~1298
王东林,李家宝,金涛等. 利用喷丸再结晶方法提高 K417 合金的疲劳寿命[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, **35**(8): 1294~1298
- 2 Ma Zhuang, Li Yinghong, Ren Xudong *et al.*. Strengthening of aerial aluminum alloy with laser shock peening[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, **31**(8): 32~34
马壮,李应红,任旭东等. 航空铝合金激光激波强化工艺[J]. *机械工程材料*, 2007, **31**(8): 32~34
- 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 S. Barradas, M. Jeandin, C. Bolis *et al.*. Study of adhesion of protel copper coating of Al 2017 using the laser shock adhesion test (LASAT) [J]. *J. Mater. Sci.*, 2004, **39**(8): 2707~2716
- 5 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3):1497~1502
- 6 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1068~1072
张永康,陈菊芳,许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1068~1072
- 7 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
- 8 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
- 9 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng *et al.*. Effect of laser shock processing on the fatigue life of nickel-based superalloy[J]. *New Technology & New Process*, 2008, (8): 70~72
李伟,李应红,何卫锋等. 激光冲击强化对镍基高温合金疲劳寿命的研究[J]. *新技术新工艺*, 2008, (8): 70~72
- 10 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd: YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777
吴东江,尹波,张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 11 Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 931~936
陈瑞芳,郭乃国,花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):931~936
- 12 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