

局部激光表面处理对 7075 铝合金 疲劳性能影响的研究

俞申伟¹, 李 剑², 方 敏², 齐芳娟²

(1. 南车南京蒲镇车辆有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 7075 铝合金以其独特的性能广泛应用于载运工具各个行业中,但是,铝合金在焊接后会出现疲劳强度降低的现象,这对载运工具的安全性产生了消极影响。针对这一现象,采用局部激光表面处理法来改善 7075 铝合金的疲劳性能。对未处理试样和局部激光表面处理后试样的疲劳裂纹扩展速率的研究表明,局部激光表面处理能有效降低疲劳裂纹扩展速率,提高疲劳寿命。ANSYS 有限元残余应力分析及硬度试验表明,局部激光表面处理后试样上形成的残余应力场和局部软化现象是疲劳裂纹扩展速率降低的主要因素。

关键词: 7075 铝合金; 局部激光表面处理; 疲劳性能; 有限元

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)02-0090-05

近些年来,铝合金以其独特的性能在载运工具各个行业得到了广泛应用,尤其是大型客机和高速列车。载运工具采用铝合金车体或机身,都离不开焊接,铝合金在焊接后会出现焊缝区及热影响区的疲劳性能降低的现象,这些现象会严重影响载运工具的使用寿命^[1-5]。因此,如何提高铝合金焊接结构的疲劳寿命具有重大的经济意义,也成为科研工作者的研究热点之一。

有研究者^[6]指出,改善疲劳性能最简单最有效的方法就是引入合适的残余应力场。基于这样的原理,结合激光技术的发展,从“局部工程”的概念出发提出了“局部激光表面处理”的方法,以期引入合适的残余应力场提高 7075 铝合金结构的抗疲劳破坏能力。

选择航空用 7075 铝合金为实验材料,分别对局部激光表面处理前后试样的疲劳裂纹扩展行为进行了试验研究,并结合有限元残余应力模拟及硬度试验等手段对该方法改善铝合金疲劳行为的机理进行了分析。

1 试验研究

选用 7075 铝合金作为载运工具用铝合金材料的代表来进行相关实验研究。实验所用 7075 铝合金为西南铝业(集团)有限责任公司生产,合金状态为 7075-T6,规格为 6 mm×1 220 mm×2 440 mm,抗拉强度为 530 MPa,屈服强度为 452 MPa,延伸率为 12%。其化学成分如表 1 所示。

表 1 7075 铝合金化学成分

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
标准值	≤0.40	≤0.50	1.20~2.00	≤0.30	2.10~2.90	0.18~0.28	5.10~6.10	≤0.20	余量
实测值	0.29	0.32	1.63	0.20	2.48	0.23	5.69	0.14	量

试验用试样为紧凑拉伸试样,即 CT 试样。试样规格为标准的 CT-100 试样,按照中华人民共和国国家标准(GB/T 6398—2000)“金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法”进行设计加工。CT-100 试样的具体

收稿日期: 2011-12-31

作者简介: 俞申伟 男 1972 年出生 高级工程师

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(211022); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2010209);

河北省人事厅出国留学人员择优资助项目(20100303)

尺寸如图 1 所示。

1.1 激光表面扫描处理

激光扫描设备为武汉华工激光成套设备有限公司生产的 HG-HL-5000 型 CO₂ 激光器。激光表面处理的工艺参数包括:激光的热输入功率、光斑直径、扫描速率、激光处理道的间距等。具体处理工艺条件及安排如表 2 所示。其中的“20 mm”表示激光光斑中心距离缺口尖端 20 mm 的 CT 试样“5 mm”表示激光光斑中心距离缺口尖端 5 mm 的 CT 试样。为了防止铝合金表面对激光的反射,在 CT 试样表面涂了一层吸光涂料。

表 2 CT 试样激光表面处理工艺参数

试样类别	激光功率/W	光斑直径/mm	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	功率密度/(J·mm ⁻²)	数量/个
20 mm	1 000	5	2	100	4
5 mm	1 000	10	1	100	4

1.2 疲劳裂纹扩展试验

疲劳实验使用长春试验机研究所生产的高频拉压疲劳试验机进行。实验时应力比 $R = 0.5$, $\Delta K = 6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $P_{\max} = 5.32 \text{ kN}$, $P_{\min} = 2.66 \text{ kN}$, $a_0 = 20 \text{ mm}$ 。实验共测试 12 个试样,其中母材 4 个,激光处理距离缺口尖端 5 mm 处试样 4 个,激光处理距离缺口尖端 20 mm 处试样 4 个。

在试验过程中要逐一记录裂纹长度 a_i 及相应的载荷循环次数 N_i 。应用拟合 $a-N$ 曲线求导的方法确定 da/dN ,采用七点递增多项式方法处理得到 CT 试样的 $(\Delta K)_i$ 和 $(da/dN)_i$ 数据。

1.3 有限元残余应力模拟

利用 ANSYS 程序对激光扫描过程进行模拟计算。计算采用间接法进行,温度场选用 solid70 单元,结构分析选用 solid45 单元。建模时,考虑到激光表面处理区域温度梯度比较大,对应力变形影响大,采用相对较小的网格,网格大小为 2 mm,其他部位网格大小为 4 mm(过渡区自由划分),厚度方向网格大小为 2 mm。具体网格划分结果如图 2 所示。温度场计算中构件的初始温度为 20 °C,热对流系数为 $HC = 100 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$ 。结构计算中的力学边界条件依据实际情况,未对试样施加任何约束。

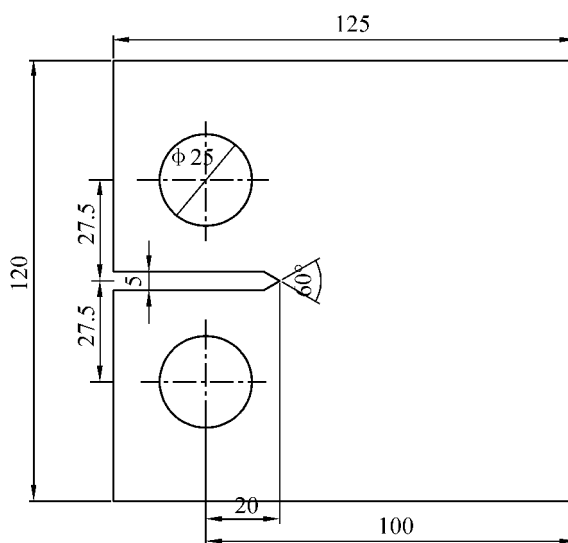


图 1 CT-100 试样尺寸图(单位:mm)

2 试验结果与分析

2.1 疲劳试验结果及分析

图 3 为母材试样和两种激光工艺处理后的试样的疲劳裂纹扩展速率对比图。图 3(a) 所示为母材和 5 mm 处激光扫描试样的 $da/dN-\Delta K$ 关系对比,由图 3 中可以看出,在低 ΔK 区域,经过激光表面处理的试样的裂纹扩展速率明显小于母材试样,随着 ΔK 增加,两种试样裂纹扩展速率之间的差距逐渐缩小,在高 ΔK 区域,两种试样的裂纹扩展速率相近,裂纹开始失稳扩展。图 3(b) 为母材和 20 mm 处激光处理试样的 $da/dN-\Delta K$ 关系对比,由图 3 中可以看出,在裂纹开始扩展阶段,经过激光表面处理的试样的裂纹扩展速率要明显小于母材试样,而随着 ΔK 的增加,两种试样的裂纹扩展速率之间的差距逐渐缩小,但激光处理试样的裂纹扩展速率始终远小于母材试样。两组对比试验的结果都说明局部激光表面处理能有效降低 7075 铝合金的疲劳裂纹扩展速率,提高疲劳寿命。

2.2 残余应力模拟结果及分析

图 4 为局部激光扫描后两种试样 x 方向残余应力沿裂纹扩展路径的分布。

从图 4 中可以看出,5 mm 处理试样表面存在的残余应力较小,仅在缺口尖端存在 5 MPa 左右的残余

压应力,随着离缺口尖端距离的增加,压应力值迅速减小,在激光扫描处变为拉应力,其值仅为 1.5 MPa,随后,随着远离激光扫描线,拉应力转换为压应力,但其值小于 1 MPa。20 mm 处理试样在缺口尖端处存在 9 MPa 的残余压应力,而后随着进入激光扫描区域,压应力迅速转换为拉应力,在激光扫描中心线上,最大拉应力值达到 117 MPa,然后,随着远离激光扫描区域,拉应力又迅速转变为压应力,其值约为 5 MPa。

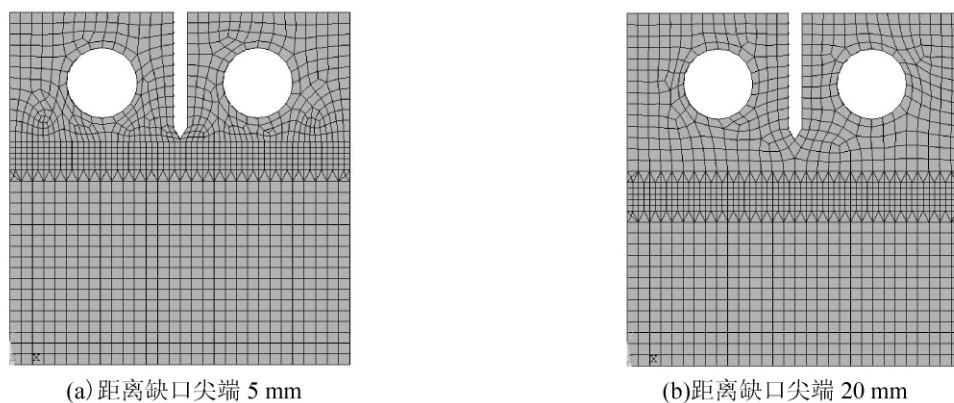
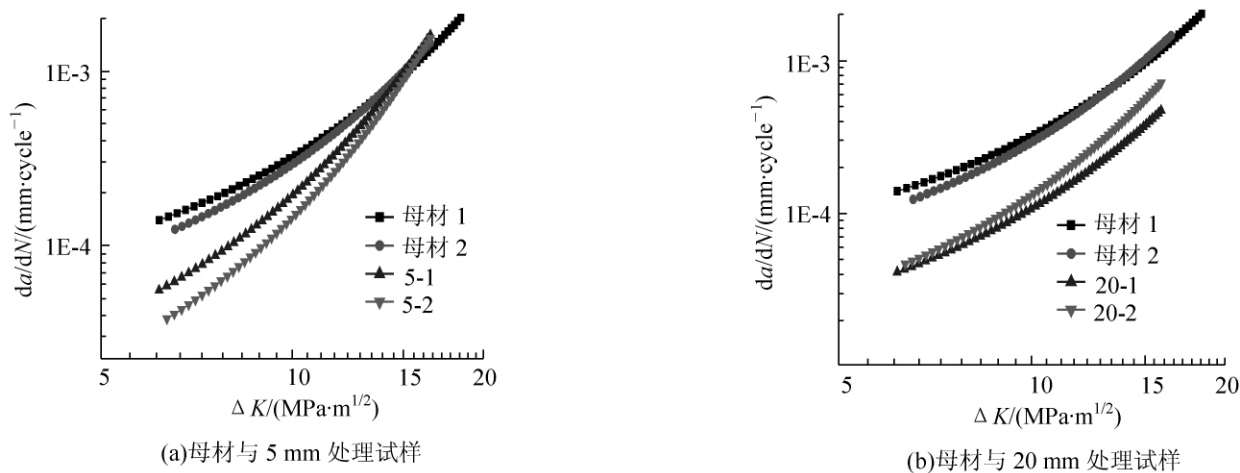
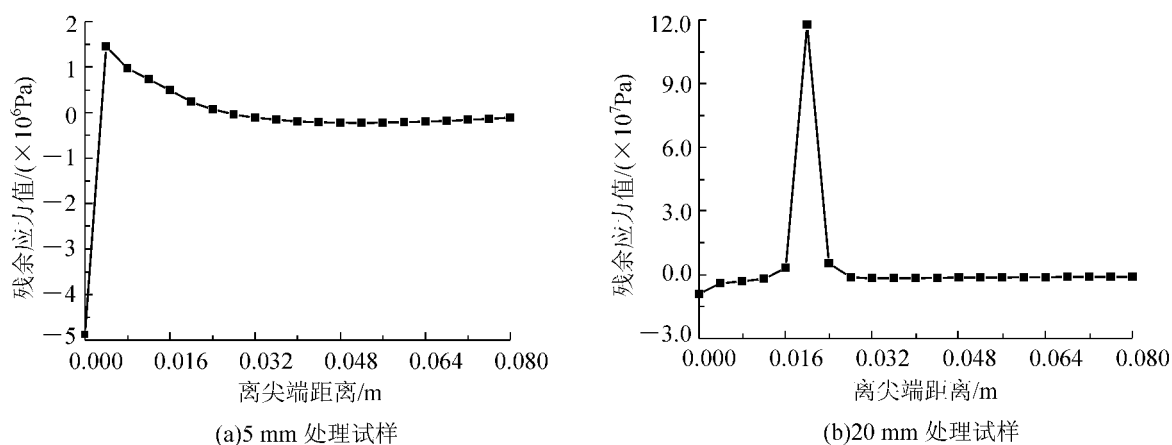


图 2 有限元划分网格结果

图 3 $da/dN-\Delta K$ 关系曲线图 4 x 方向残余应力在裂纹扩展路径上的分布

在疲劳裂纹扩展速率测试过程中,由于残余压应力的存在,相当于降低了实际施加载荷值,从而降低了疲劳载荷的平均应力,如图 5 所示。

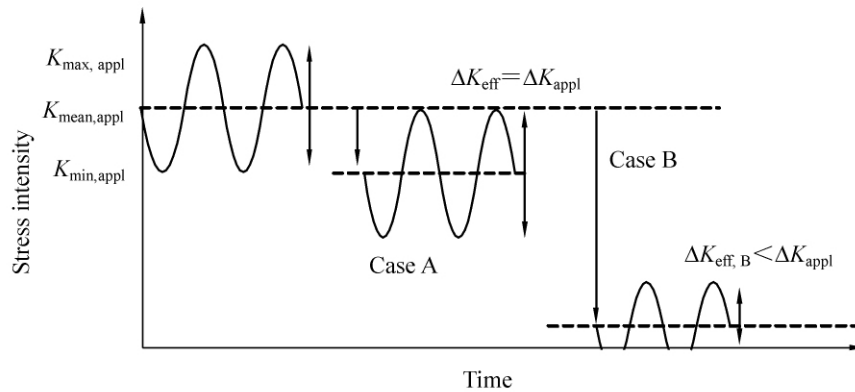


图5 存在残余压应力情况下 ΔK_{eff} 变化示意图

在图5中, ΔK_{eff} 表示有效应力强度因子范围。曲线图表示的是有效应力强度因子范围 ΔK_{eff} 不会随着存在的残余压应力对应力强度因子范围 ΔK_{appl} 影响而产生改变。残余压应力的存在降低了平均有效应力强度因子 $K_{\text{mean, eff}}$ 因此当裂纹扩展到这个范围时, 疲劳裂纹的扩展速率将比只有外加负载时降低。

因此, 对于20 mm处理试样, 残余应力的分析结果可以很好的解释试样疲劳性能提高的原因。但对于5 mm处理试样, 由于残余应力场很小, 难以单纯从残余应力的角度来解释疲劳性能提高的原因。而对其进行的硬度试验表明, 经过激光表面处理, 处理区域的硬度降低。有文献[7]指出铝合金的软化会导致疲劳裂纹扩展延迟现象, 因此, 对于5 mm处理试样, 有可能是局部软化的作用导致了疲劳性能的提高。

3 结论

(1) 疲劳裂纹扩展试验结果表明, 局部激光表面处理能有效降低7075铝合金裂纹扩展速率, 提高疲劳寿命。

(2) 有限元残余应力分析及硬度试验表明: 对距缺口尖端20 mm处理试样, 其存在的残余压应力是其疲劳性能提高的主要原因; 对5 mm处理试样, 由于残余应力较小, 难以对疲劳性能产生大的影响, 其扫描区域的局部软化现象是其疲劳性能提高的主要原因。

(3) 对于局部软化现象对7075铝合金疲劳性能的影响, 未做深入研究。如需探究局部软化现象对铝合金疲劳性能影响的机理, 尚需进一步的实验研究。

参 考 文 献

- [1] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 苗景国. 铝合金材料在现代汽车制造业的应用[J]. 黑龙江冶金, 2009, 29(2): 26-28.
- [3] 刘铭, 张坤, 黄敏, 等. 7475-T735 铝合金抗疲劳性能研究[J]. 稀有金属, 2009, 33(5): 626-629.
- [4] 杨柳青. 汽车覆盖件模具材料激光表面相变硬化工艺与性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学机电工程学院, 2002.
- [5] 马场义雄, 孙本良. 飞机铝合金发展动向[J]. 铝加工技术, 1990(4): 21-31.
- [6] 陆索. 金属疲劳损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [7] WAMAN V V. Assessment of fracture and fatigue crack propagation of laser beam and friction stir welded aluminium and magnesium alloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(5): 399-406.

(下转第110页)

Recognition, 2012, 45(2): 806-820.

[15] Elgammal A, Harwood D, Davis L. Non-parametric Model for Background Subtraction [C]// Proceeding of the 6th European Conference on Computer Vision, Dublin, Ireland: Springer Press, 2000: 751-767.

[16] 梁晓霞, 封筠. 基于 Gabor 变换和灰度梯度共生矩阵的人耳识别研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(1): 78-83.

Target Edge Detection of Optical Flow via Anisotropic Gaussian Kernel

Zhang Zhonghan¹, Kong Haoran²

(1. School of Science, Xidian University, Xi'an, Shanxi, China;

2. Mathematical College, SiChuan University, Chengdu, SiCuan, China)

Abstract: Optical flow method is to estimate the movement of 2 d objects in image sequences. With classic HS algorithm, the smaller contrast between target and background or higher noise will lead to larger false-alarm probability. The use of anisotropic gaussian kernel, with the non-maximum suppression, can better suppress noise while retaining the target edge, and thus improving the accuracy of the gradient partial derivative. It is a better solution for the lack of differential optical flow method and improves the calculation accuracy. Finally, the edge detection method of moving targets in the sequence of images is improved, and the effectiveness of the algorithm is proved through the replacement of the Gabor function and experiments.

Key words: optical flow; horn-schunck algorithm; anisotropic gaussian kernel; non-maximum suppression; Gabor function; edge detection

(责任编辑 刘宪福)

~~~~~  
(上接第 93 页)

## The Effect of Local Laser Surface Treatment on Fatigue Properties of 7075 Aluminum Alloy

Yu Shenwei<sup>1</sup>, LiJian<sup>2</sup>, Fang Min<sup>2</sup>, Qi Fangjuan<sup>2</sup>

(1. CRS Nanjing Puzhen Rolling Stock Co., Ltd, Nanjing 210000, China;

2. Institute of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** 7075 aluminum alloy is widely used in the industries of vehicles for its unique performance, but it has a poor fatigue properties after welding, which may produce a negative effect to the safety of vehicles. Thus, a method to improve the fatigue property for 7075 aluminum alloy by local laser surface treatment (LLST) is studied in this paper. Based on experimental results of the fatigue crack growth rate (FCGR) for the laser treated specimens and untreated specimens, it is shown that LLST can result in significant reduction of FCGR, and thus improve the fatigue life. The residual stress analysis based on ANSYS procedure and hardness test show that the residual stress and partly softening phenomenon are the main reason for the reduction of FCGR.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; local laser surface treatment; fatigue properties; finite element method

(责任编辑 车轩玉)