

录用定稿 文章编号: 1000-6893 (2011) XX-XXXX-XX

喷丸对激光辅助成形铝合金样件拉-拉疲劳性能的影响

王明星*, 陈光南, 彭青

中国科学院 力学研究所, 北京 100190

摘要: 以2024铝合金板材为对象, 研究了原始、激光辅助成形、以及激光辅助成形后再喷丸等样件的微观组织、显微硬度、残余应力、以及拉-拉疲劳性能。结果表明: 激光辅助成形后, 样件的组织和微结构未发现明显变化, 但其硬度和残余拉应力水平有所下降; 喷丸处理的激光辅助成形样件表层组织改变、显微硬度提高、其拉-拉疲劳寿命显著提高, 不仅高于激光辅助成形样件, 也高于初始样件。

关键词: 铝合金; 疲劳; 激光; 喷丸; 微观组织; 残余应力

中图分类号: (TG146.2) **文献标识码:** A

筋条与蒙皮一体化复杂薄壁结构的工程应用日益广泛, 譬如飞机的整体壁板、火箭的整体燃料箱、船舶的船舷和甲板以及汽车的覆盖件等[1-3]。由于成形困难以及结构完整性和服役安全性要求严格(不允许出现屈曲和微裂纹等变形损伤)[4], 复杂薄壁结构工件的成形问题成为大飞机制造等工程领域的关键难题和研究热点。

目前, 解决这类零件成形难题的主要方法是时效[5]成形和喷丸[6]成形。时效成形方法的成形能力强, 精度高, 但模具成本高、准备周期长、且需要有足够尺寸的热压罐以满足大型结构件的长时间时效[7]。喷丸方法能在成形的同时使零件表面变形强化, 但因其成形能力相对较小(无模喷丸的成形能力更低), 难以成形大尺寸高筋条整体壁板零件[8]。

激光辅助成形^[9-11]方法为解决上述难题提供了新的途径。该方法的基本原理是: 通过三点弯曲或模具弯曲对工件施加弹性弯曲载荷, 在不影

响材料组织和微结构的前提下, 以一定强度的激光束按一定路径扫描工件的弹性能集中区域, 通过降低该区域材料的屈服极限和塑性变形能力, 促使弹性变形能转化为塑性功实现工件塑性成形。初步研究结果表明^[12]: 激光辅助成形具有成形效率高、能耗低的特点, 对板材及高筋条薄壁结构件具有良好的成形能力。本文的主要目的是: 研究激光辅助成形样件的疲劳寿命以及喷丸处理的作用规律, 为激光辅助成形^[9,10]以及激光辅助加喷丸成形技术^[11]的工程应用提供依据。

以常用航空材料 2024 铝合金板材为对象, 分别对原始、激光辅助成形和激光辅助成形后再喷丸等三种不同状态的样件进行微观组织分析、显微硬度测试、残余应力测定和拉-拉疲劳试验, 研究了激光辅助成形及喷丸对铝合金样件疲劳性能的影响规律及影响因素。

1 实验材料及方法

收稿日期: 2010-10-26; 退修日期: 2010-11-24; 录用日期: 2011-01-06; 网络出版时间: 2011-4-26 11:11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20110426.1111.002.html> DOI:

基金项目: 国家自然科学基金 (50901084, 10872199); 中国博士后科学基金 (20090460537)

*通讯作者. Tel.: 010-82544272 E-mail: mingxing1185@yahoo.com.cn

引用格式: 王明星, 陈光南, 彭青. 喷丸对激光辅助成形铝合金样件拉-拉疲劳性能的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(x): xxx-xxx. WANG Mingxing, CHEN Guangnan, QENG Qing. Influence of Shot Peening on Tension-Tension Fatigue Property of Laser Aided Forming Aluminum Alloy Samples [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(x): xxx-xxx.

1.1 试样成分及加工路线

实验选用航空工业最常用的包铝2024-T4铝合金板材, 板材厚度为2.0 mm, 包铝层厚度为0.1mm, 合金的化学成分如表1所示。合金热处理状态为固溶+自然时效, 其常规力学性能为 $\sigma_b=464\text{MPa}$, $\sigma_{0.2}=351\text{MPa}$, $\xi=19.8\%$ 。试样加工路线为: 轧制板材剪板至外形尺寸 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 2\text{mm}$ →对板材样件进行激光辅助成形→采用线切割在激光辅助成形后的铝板上切取疲劳试样→部分试样表面喷丸处理→疲劳实验及其它实验。

表 1 2024-T4 铝合金试样化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 2024-T4 aluminum alloy sample (wt %)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Al
4.61	1.54	0.58	0.19	0.16	0.11	0.02	Bal.

1.2 试样激光辅助成形

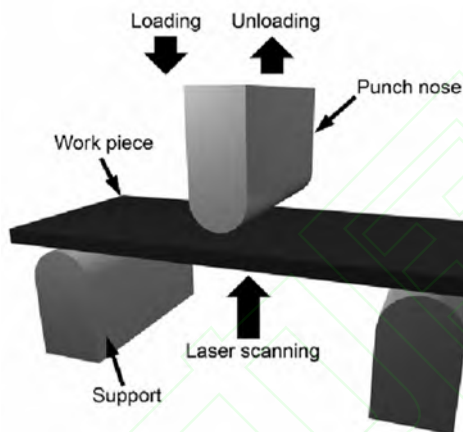


图 1 激光辅助成形示意图

Fig. 1 Schematic of laser aided forming

激光辅助成形的实验过程为: 使用三点弯曲方法对板材样件加载, 所施加应力为试样屈服强度的 90% 以确保其在弹性范围内弯曲, 再激光直线扫描弯曲板材的弹性能集中区域(即压头压下部位的下表面), 最后卸载, 成形过程示意图如图 1 所示, 实验中使用 YAG 激光器, 激光能量密度为 $2.67\text{J}/\text{mm}^2$, 板材最终成形量为 0.7mm。

1.3 试样喷丸处理

对原始样件、激光辅助成形样件分别切取疲劳试样, 疲劳试样几何尺寸及激光扫描路径如图 2 所示。使用气动式喷丸机对部分激光辅助成形

试样进行双面喷丸处理, 弹丸选用 S110 合金钢丸, 喷丸覆盖率为 100%, 喷丸强度为 0.2mmN。

1.4 疲劳实验及其它实验

对原始样件、激光辅助成形样件和激光辅助成形后再喷丸样件分别选取 15-20 个疲劳试样, 进行拉-拉疲劳实验。疲劳实验在 LETRY 100KN 高频疲劳试验机上进行, 试样加载方式为轴向加载, 应力比 $R=0.06$, 试验频率为 102-105Hz, 室温空气中进行, 最大应力为 100-300MPa。

在疲劳试样的相同部位分别截取 $10\text{mm}\times 5\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的试样进行显微组织分析, 试样切取位置及观察面如图 2 所示。使用 XJL-03 型金相显微镜观察材料微观组织变化; 用 STEMI SV11 型立体显微镜观察试样的表面形貌。用 AFO-LI 型三维形貌仪测量试样的表面粗糙度。对不同状态疲劳试样各取三个进行表面残余应力测试, 测试用仪器为 X-350A 型 X 射线应力测定仪, 测试条件为 $\text{CoK}\alpha$ 靶材, (331)衍射晶面, Ψ 角为 $0^\circ\text{-}45^\circ$, X 光射线管电流 6.0mA, 电压 22KV。

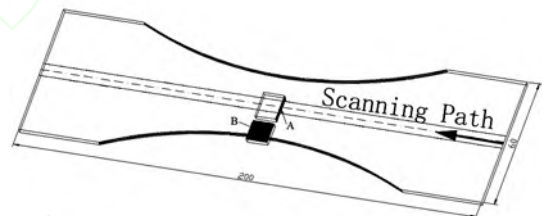


图2疲劳试样及组织观察试样图

Fig. 2 Schematic of the sample for fatigue experiment and microstructure observation

2 实验结果及分析

2.1 2024铝合金微观组织分析

对原始 2024 铝合金样件和激光辅助成形后样件进行微观组织分析, 试样切取位置如图 2-A 所示, 图 3(a)为 2024 合金原始态截面微观组织照片, 图 3(b)为激光辅助成形后激光作用区中心处材料的微观组织照片, 从图中可以看出, 本实验所采用的实验参数下, 材料没有发生重熔、再结晶、相变等现象。采用温度采集系统在激光辅

助成形过程中进行实时跟踪，并结合数值计算获得激光作用区的最高温度为 $100\sim 160^{\circ}\text{C}$ ，虽然最高温度处于 2024 铝合金的时效温度范围，但通常 2024 铝合金热处理规范中时效处理时间为 6-20 小时^[5]，而激光辅助成形过程中激光作用时间短(本实验中只有 20s)，且铝合金是热的良导体，传热速度快，因此在铝合金组织中来不及析出大量的时效强化相。

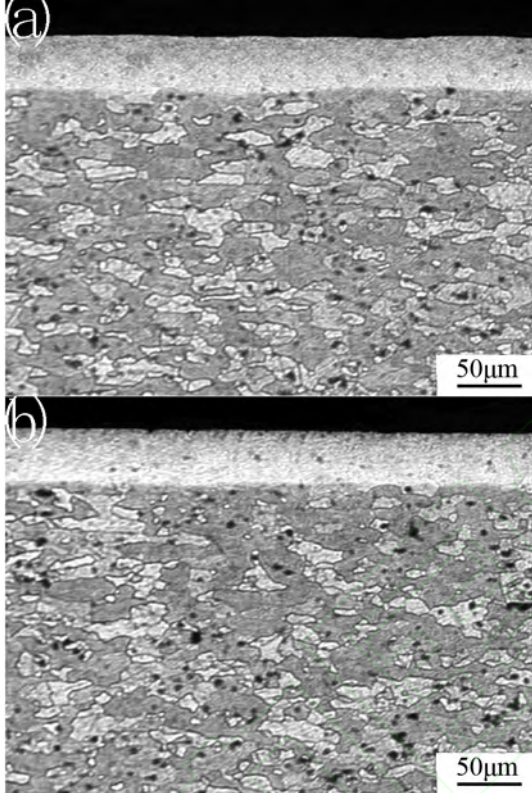


图 3 2024 铝合金试样截面微观组织 (a) 原始样件 (b) 激光辅助成形样件

Fig. 3 Section microstructure of 2024 aluminum alloy (a) as machined specimen; (b) laser aided forming specimen

对激光辅助成形后的疲劳试样进行表面喷丸处理。图 4 为喷丸前后试样的表面粗糙度曲线，未经喷丸试样表面较为平整，其表面粗糙度较小， R_a 平均值为 $0.65\mu\text{m}$ ；喷丸后的试样表面粗糙度较大， R_a 平均值为 $7.42\mu\text{m}$ 。从表面粗糙度曲线中可以看出，喷丸后样件表面形成大小不一的压坑，小压坑直径约为 $120\mu\text{m}$ ，大压坑直径约为 $410\mu\text{m}$ ，且压坑存在重叠和搭接现象。

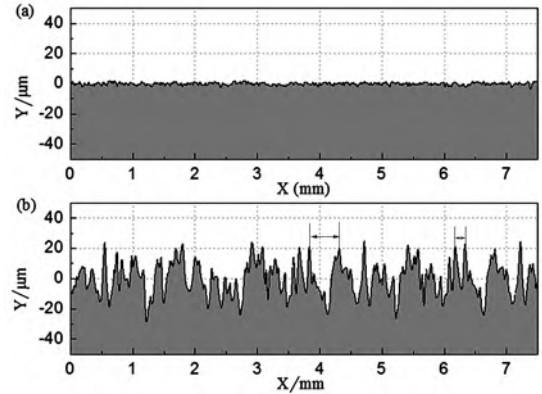


图 4 激光辅助成形后 2024 铝合金试样表面粗糙度曲线

(a) 未喷丸 (b) 喷丸

Fig. 4 Surface roughness of 2024 aluminum alloy after laser aided forming (a) unpeened (b) shot-peened specimen

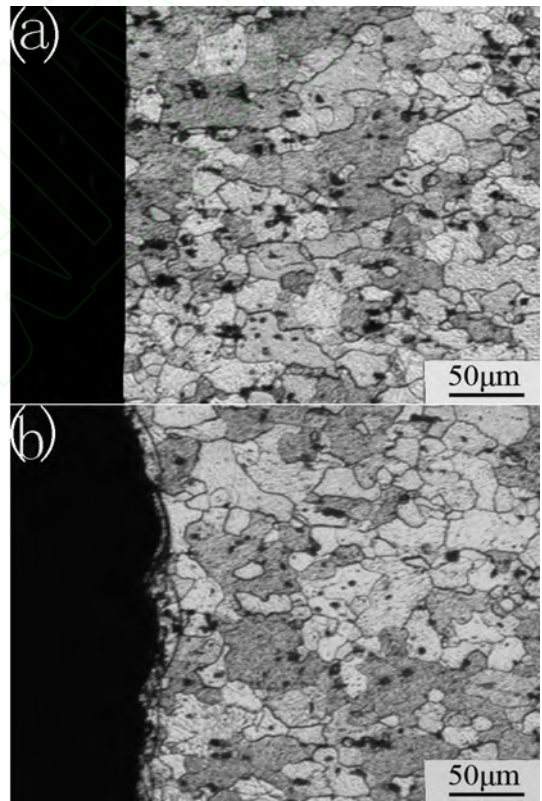


图 5 激光辅助成形后 2024 铝合金样件的表面微观组织

(a) 未喷丸 (b) 喷丸

Fig. 5 Surface microstructure of 2024 aluminum alloy after laser aided forming (a) unpeened (b) shot-peened specimen

在图 2-B 所示位置分别对激光辅助成形样件和激光辅助成形后再喷丸样件切取试样，进行表面微观组织分析。从图 5 的组织对比可以看出，未经喷丸试样边缘平整，喷丸后试样边缘形成约为 $10\mu\text{m}$ 的变形层，边缘晶粒被压痕隔成两段，

晶界连续, 未发生再结晶。

对三种状态试样进行显微硬度测试, 试样位置如图2-A, 测试位置为激光作用区中心处, 自试样表面至内部显微硬度变化规律如图6所示, 由于板材单侧包铝层为 $50\mu\text{m}$, 测试第一点为包铝层硬度, 从第二点起为2024基体硬度。激光辅助成形后试样显微硬度比原始试样有所降低; 喷丸后试样表层显微硬度明显提高, 当深度大于 $600\mu\text{m}$ 时, 其显微硬度与初始试样相当。

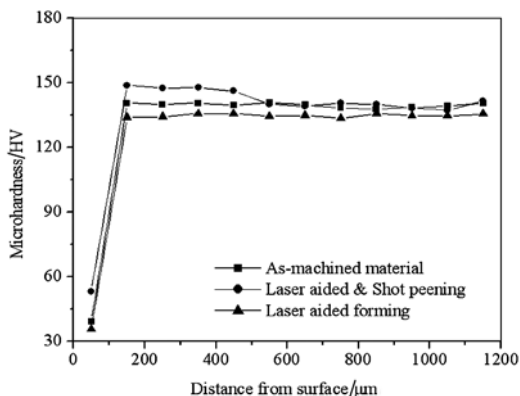


图 6 2024 试样沿深度方向的硬度分布曲线

Fig.6 Microhardness distribution along depth of 2024 aluminum alloy samples

2.2 2024铝合金残余应力分析

表 2 2024-T4 铝合金试样表面残余应力

Table 1 Residual stresses of 2024-T4 sample

	As machined material	Laser aided forming	Laser aided & Shot peening
Residual stresses (MPa)	+74	+58	-73

疲劳试样在拉-拉载荷作用下, 其颈部最细部位所受应力最大, 实验中疲劳裂纹首先在此部位的表面或近表面产生, 分别对三种状态疲劳试样在此处的表面残余应力进行了测试, 测试结果如表 2 所示, 原始 2024 合金试样的表面残余应力平均值为+74MPa, 表现为拉应力; 激光辅助成形试样的表面残余应力平均值为+58MPa, 部分拉应力获得释放从而使其在数值上有所降低; 激光辅助成形后再喷丸试样的表面残余应力平均值为-73MPa, 表面残余应力转变为压应力。

2.3 喷丸对激光辅助成形铝合金试样拉-拉疲劳

性能的影响

分别对原始试样、激光辅助成形试样和激光辅助成形后再喷丸试样分别进行拉-拉疲劳实验, 实验结果如图7所示, 相同应力条件下, 激光辅助成形试样的疲劳寿命略低于原始试样, 激光辅助成形后再喷丸试样的疲劳寿命明显提高。原始试样 1×10^7 周次条件下的疲劳极限为120MPa; 激光辅助成形试样疲劳极限为110MPa, 比原始试样降低10MPa, 相对降低8.3%; 而喷丸处理的激光辅助成形试样的疲劳极限为200MPa, 比原始试样提高了80MPa, 相对提高了75%, 比激光辅助成形试样提高80%。

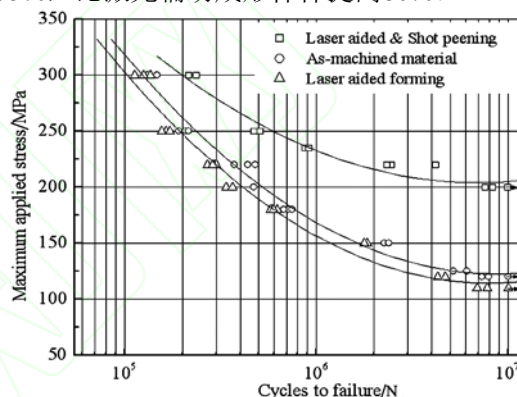


图 7 2024 试样疲劳 S-N 曲线

Fig.7 Fatigue S-N curves of 2024 aluminum alloy samples

激光辅助成形是利用激光的热作用降低材料的屈服极限, 从而促使弹性内能转化为塑性功。铝合金板材在激光热作用下, 热软化效应使材料的显微硬度降低, 且其晶内强度和晶界强度都有所降低。在相同的疲劳参数下, 激光辅助成形试样由于屈服强度低于原始试样, 其抵抗塑性变形的能力较低, 疲劳裂纹更易于萌生^[13], 且晶界强度的降低减弱了其对裂纹扩展的抑制作用^[14], 因此疲劳寿命低于原始试样。

喷丸使激光辅助成形试样表面层产生一定深度的残余压应力, 此残余压应力降低外加交变载荷中的拉应力水平, 即降低“有效拉应力”^[8], 从而提高疲劳裂纹萌生的临界应力水平; 而原始试样和激光辅助成形试样表面形成残余拉应力, 此拉应力在拉-拉疲劳载荷作用下进一步提高“有效拉应力”, 因此喷丸试样的疲劳极限比另两种试样显著提高。另外, 在低周疲劳的高应变幅下残余应力将大幅度地松弛^[15], 因此残余应力

对低周疲劳的作用远小于高周疲劳。从本文的实验结果可以看出, 高周次下喷丸试样疲劳寿命提高的比例较大。

3 结论

激光辅助成形铝合金样件激光作用区的显微硬度低于原始样件, 其拉-拉疲劳寿命略低于原始样件, 激光的热效应对疲劳性能有影响。激光辅助成形样件经喷丸后, 其拉-拉疲劳极限提高80%。

参考文献

- [1] YAN Yu, WAN Min, WANG Hai-bo. Optimization of press bend forming path of aircraft integral panel [J]. Trans.Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20: 294-301.
- [2] Massa L. Spatial linear analysis of the flow in a solid rocket motor with burning walls[J]. Combustion and Flame, 2009,156 (4): 865-888.
- [3] Mike Kolich. A conceptual framework proposed to formalize the scientific investigation of automobile seat comfort[J]. Applied Ergonomics, 2008,39 (1): 15-27.
- [4] Yoon J W, Bray G H, Valente R A F, et al. Childs Buckling analysis for an integrally stiffened panel structure with a friction stir weld[J]. Thin-Walled Structures, 12, 2009, 47(12): 1608-1622.
- [5] Huang Lin, Wan Min, Chi Cailou, et al. FEM Analysis of Spring-backs in Age Forming of Aluminum Alloy Plates[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(6): 564-569.
- [6] Harburn, Brian, Miller, et al. Shot peen forming of compound contours: US Patent, 4329862[P]. 1982.
- [7] Uwe Zerbst, Markus Heinemann, Claudio Dalle Donne. Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures – An overview[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76 (1): 5-43.
- [8] Majzoobi G H, Ahmadkhan A R. The effects of multiple re-shot peening on fretting fatigue behavior of Al 7075-T6[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(1): 102-109.
- [9] 陈光南, 王秀风, 罗耕星, 等. 压弯激光复合成形方法: 中国, CN101140449[P]. 2008.
- Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing, et al. Compression bending and laser compound forming: China. CN101140449[P]. 2008. (in Chinese)
- [10] 陈光南, 王秀风, 罗耕星, 等. 飞机外壳成形件激光精调方法: 中国, CN101004595[P]. 2007.
- Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing, et al. Fine tuning method of aircraft shell: China. CN101004595[P]. 2007. (in Chinese)
- [11] 彭青, 陈光南, 罗耕星. 一种基于预应力的激光和喷丸复合成形方法: 中国, CN10128888[P]. 2008.
- Peng Qing, Chen Guangnan, Luo Gengxing, et al. A compound forming method of laser and shot peening based on pre-stress. China. CN10128888[P]. 2008. (in Chinese)
- [12] 彭青, 陈光南, 吴臣武, 等. 整体壁板激光辅助预应力成形[J]. 航空学报, 2009, 130(8): 1544-1548.
- Peng Qing, Chen Guangnan, Wu Chenwu, et al. Laser-assisted Pre-stress Forming for Integral Panels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 130 (8): 1544-1548. (in Chinese)
- [13] Carpio F J, Araujo D, Pacheco F J, et al. Fatigue behavior of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2003, 208-209: 194-198.
- [14] T. Zhai, X.P. Jiang, J.X. Li, et al. The grain boundary geometry for optimum resistance to growth of short fatigue cracks in high strength Al-alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27 (10-12): 1202-1209.
- [15] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响[J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(6): 231-235.
- Zhang Dingshuan. The effects of residual stresses on the fatigue strength of metal[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2002, 38(6): 231-235. (in Chinese)

作者简介:

王明星 (1981—) 女, 博士。主要研究方向: 轻金属成形工艺与力学性能。

Tel: 010-82544272

E-mail: mingxing1185@yahoo.com.cn

Influence of Shot Peening on Tension-Tension Fatigue Property of Laser Aided Forming Aluminum Alloy Samples

WANG Mingxing*, CHEN Guangnan, PENG Qing

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: With the 2024 aluminum alloy plate as the main object, microstructures, microhardness, residual stresses and tension-tension fatigue properties of as-machined aluminum samples, laser aided forming samples and shot peening samples were studied. The results show that microstructures of laser aided forming sample were not varied obvious, but microhardness and extensive residual stress decreased; and surface microstructures were varied and microhardness was raised in shot peening samples. Shot peening can greatly improve fatigue properties. Tension-tension fatigue lives of shot peening samples were not only higher than laser aided forming samples, but higher than as-machined aluminum samples.

Key words: Keywords: Aluminum alloys; Fatigue; Lasers; Shot peening; Microstructure; Residual stresses

Received: 2010-10-26; Revised: 2010-11-24; Accepted: 2011-01-06; Published online:

URL:

DOI:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50901084 and No.10872199); China Postdoctoral Science Foundation (No.20090460537)

*Corresponding author. Tel.: 010-82544272 E-mail: mingxing1185@yahoo.com.cn