

文章编号: 0258-7025(2004)03-0371-03

激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响

邹世坤¹, 谭永生¹, 郭大浩², 王声波², 吴鸿兴²

(¹北京航空制造工程研究所, 北京 100024; ²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要 采用 1420 铝锂合金板材制作成中心圆孔疲劳试件和金相试件进行激光冲击处理, 通过冲击区外观电镜扫描、疲劳实验和显微硬度测试, 结果发现, 经激光冲击处理后, 铝锂合金表面没有受强脉冲激光和冲击波的破坏, 而显微硬度明显提高, 疲劳性能大幅度改善, 激光冲击处理后的强化区与光斑相当, 深度约为 1 mm。

关键词 激光技术; 激光冲击处理; 铝锂合金; 疲劳性能; 硬度

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Effect of Laser Shock Processing on Mechanical Properties of Al-Li Alloy

ZOU Shi-kun¹, TAN Yong-sheng¹, GUO Da-hao², WANG Sheng-bo², WU Hong-xing²

(¹Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)
(²Chinese University of Science & Technology, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract In this paper, the fatigue specimens with center hole and metallography specimens made by sheet of 1420 Al-Li alloy were processed by intense pulse laser, then the surface of laser shock processed zone was observed by SEM, and the fatigue test and hardness measurement were processed. Results showed that the surface of 1420 Al-Li alloy sheet was not destroyed by intense laser or shock waves, while laser shock processing could improve the hardness and fatigue properties obviously, and strengthened zone was similar to the laser spot in size, and the hardened depth was up to about 1 mm.

Key words laser technique; laser shock processing; Al-Li alloy; fatigue properties; hardness

1 引言

激光冲击处理技术是利用强脉冲激光导致的压力冲击波在金属材料表层产生应变硬化的一种新型表面强化技术。激光冲击处理技术研究开始于 20 世纪 80 年代, 但限于激光器的高成本和冲击处理的低效率, 该技术一直未能进入实质性的应用。直到 20 世纪 90 年代后期随着激光技术的发展, 这一情形才有所改观, 目前美国已将激光冲击处理成功地用于风扇叶片和工作叶片的强化, 提高叶片抗冲刷性能和疲劳强度; LSP 公司将激光冲击强化用于铆接结构的强化, 以提高结构的抗疲劳性能^[1]; 日本将激光冲击处理用于核反应堆中的压力容器和焊接结构焊缝的强化, 以减小应力腐蚀裂纹的敏感性而提高零件的抗疲劳强度^[2]。

目前飞机使用的主要结构材料仍然是铝合金, 其用量占飞机结构重量的 60%~80%。为进一步减轻重量, 前苏联在 20 世纪 60 年代发展了密度小 ($\rho \leq 2490 \text{ kg/m}^3$)、弹性模量高 ($E \geq 75 \text{ GPa}$) 的铝锂合金, 20 世纪 70 年代开始在飞机上大量使用。合金名义成分为 Al-5Mg-2Li, 它是一种有广泛应用前途的航天、航空用轻型合金结构材料^[3]。在满足同等承载条件下, 1420 铝锂合金用于铆接结构可使结构重量减轻 15%。1420 铝锂合金不仅适用于焊接结构件, 还适用于铆接结构件。

在以前的研究中发现: 2024 铝合金铆钉孔的激光冲击处理能明显提高铆接结构的抗疲劳寿命^[4]。本文对 1420 铝锂合金板材进行激光冲击处理实验, 并研究对其抗疲劳性能和表面力学性能的影响。

收稿日期: 2002-10-29; 收到修改稿日期: 2003-02-09

作者简介: 邹世坤(1974—), 男, 北京航空制造工程研究所工程师, 硕士, 主要研究大功率激光加工工艺。E-mail: zousk@

2 试验条件和表面形貌

将 2.9 mm 厚的 1420 合金板材制作成拉伸试件、中心圆孔试件和金相试件,拉伸试件用于测试实验材料的静态力学性能。1420 铝锂合金化学成分和实验所用 1420 铝锂合金板材实测力学性能分别如表 1 和表 2 所示。对部分疲劳试件和中心圆孔及

表 1 1420 铝锂合金化学成分

Table 1 Chemical component of 1420 Al-Li alloy

Component	Mg	Li	Zr	Fe	Si	H	Al
Content/wt.-%	5.0~6.0	1.9~2.3	0.1~0.5	<0.2	<0.1	<0.1	Base

表 2 实验所用 1420 铝锂合金板材实测力学性能

Table 2 Mechanical properties of the sheet of 1420 Al-Li alloy used in the test

Specimen No.	σ_b /MPa	$\delta_{11.3}$ /%	σ_s /MPa
L_1	449.3	12.7	320.4
L_2	453.8	12.7	313.1
Average value	451.6	12.7	316.8

激光冲击处理过程中,在强脉冲激光到达金属表面瞬间产生高温高压等离子体,但由于吸收层(也称牺牲层)的作用,金属表面除塑性应变外,不会产生强激光或冲击波的热损伤及力学损伤。图 1 是疲

劳试件激光冲击处理前后表面形貌的对比,由图可以看出,材料表面存在大量轧制微裂纹,激光冲击处理后在冲击区没有强激光明显的冲击或烧蚀痕。对金相试件的粗糙度进行测定,结果表明,试件在冲击处理前后的表面粗糙度分别为 $R_a = 0.068 \mu\text{m}$ 和 $R_a = 0.096 \mu\text{m}$,说明激光冲击处理对粗糙度的影响很小,基本上能保持高光洁度的表面不受破坏,所以冲击后能直接对冲击区测试表面显微硬度。

从试验所用 1420 铝锂合金板材实测力学性能可以看出,该材料的屈服强度和抗拉强度相差较大,具有形变硬化的性质。

从试验所用 1420 铝锂合金板材实测力学性能可以看出,该材料的屈服强度和抗拉强度相差较大,具有形变硬化的性质。

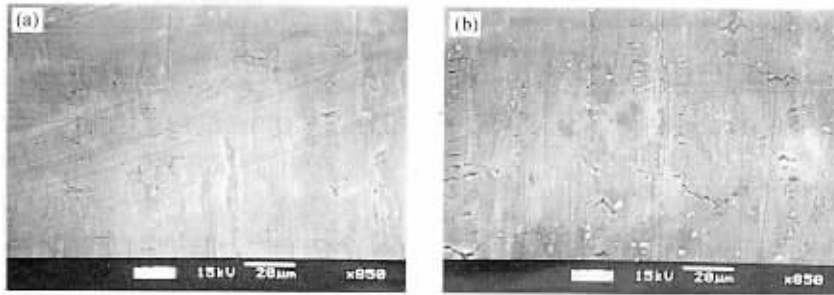


图 1 激光冲击处理前后轧制板材表面形貌

(a) 冲击后;(b) 冲击前

Fig. 1 Appearances of rolling sheet with and without laser shock processing

(a) with LSP; (b) without LSP

3 激光冲击处理区域的显微硬度

对 1420 铝锂合金金相试件磨光面进行激光冲击处理,对比强化区的表面硬度分布,表面显微硬度的测量结果分别如图 2(a),(b)所示。

由图可以看出,经激光冲击强化后,1420 铝锂合金的表面显微硬度从基体的 Hv_{125} 提高到 Hv_{155} 左右,在冲击区产生明显的硬化效果,强化

区直径与光斑相当。在深度方向,硬度在冲击面一侧的表面最高,随层深方向迅速下降,强化深度约 1 mm 左右。

4 激光冲击处理对抗疲劳性能的影响

将 2.9 mm 厚的 1420 合金板材制作成中心圆孔缺口疲劳试件,试件先按光滑试件尺寸加工成形,

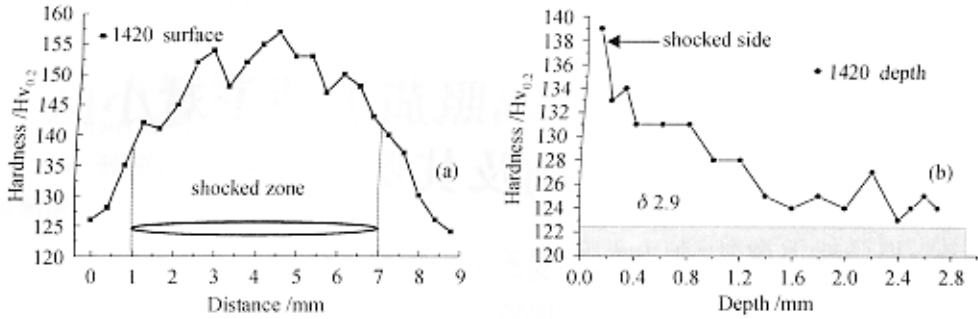


图 2 1420 试件冲击区硬度分布

(a) 表面;(b) 深度

Fig. 2 Distributing of hardness across laser shock processed zone

(a) on the surface; (b) in the depth

然后打 $\phi 2$ mm 左右中心孔,制作成中心圆孔缺口试件,最后进行激光冲击处理,冲击处理时采用 $\phi 6$ mm 的激光光斑双面覆盖中心圆孔,使孔周边双面得到强化,试件冲击前后尺寸如图 3,图中阴影是激光光斑覆盖区域。

23.36 mm², $\sigma_s = 316.8$ MPa,载荷分别对应 $\sigma_{max} = \sigma_s/3, \sigma_s/2.5, \sigma_s/2.2, \sigma_s/2, 4\sigma_s/7$,对试验结果进行数据处理,并绘成 S-N 曲线,并进行拟合后结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,对于该缺口疲劳试件,经强化后的疲劳试件抗疲劳极限强度(10^7 周)为 120 MPa 左右,而未强化的试件仅为 90 MPa 左右,抗疲劳强度提高 30%,在整个区域同等载荷下,强化后的抗疲劳寿命能提高 5 倍左右。试件采用 1.1 倍的高载荷的抗疲劳寿命还高于未处理试件,所以激光冲击处理能明显提高铝锂合金的抗疲劳性能。

激光冲击强化能明显提高 1420 铝锂合金疲劳试件的抗疲劳寿命是因为 1420 疲劳试件中心圆孔附近得到有效的强化,显微硬度明显提高,并且能保持表面低粗糙度,因而能明显提高抗疲劳寿命和抗疲劳强度。

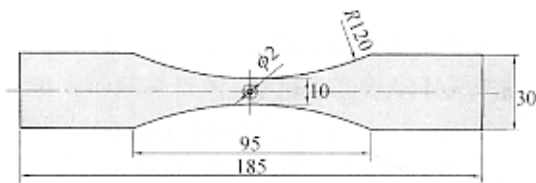


图 3 疲劳试件尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Dimension of fatigue specimens (unit: mm)

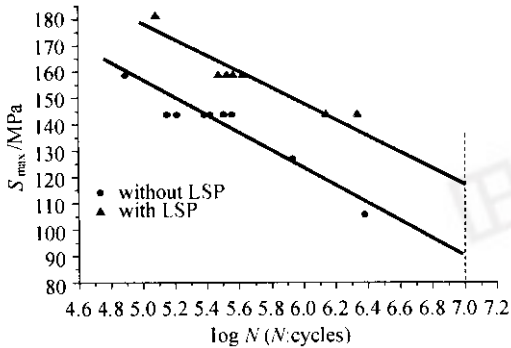


图 4 未强化和强化试件 S-N 曲线对比

Fig. 4 Comparison of S-N curves of shocked and unshocked specimens

疲劳扩展试验开始使用 880MTS 疲劳试验机, MTS TestStar Lis 程序加载,加载精度 0.5%,正弦波形,频率 $f = 30$ Hz,应力比 $R = 0.1$,试验环境为室温,空气。后来使用 10HFP1478 高频疲劳试验机,频率 $f = 70$ Hz,应力比 $R = 0.1$,试验采用的最大载荷 $P_{max} \sim 4229N$ (受力截面积 $S =$

参 考 文 献

- 1 J. L. Dulaney, S. M. Toller, A. H. Clauer *et al.*. Mobile laser peening system [P]. US Patent: 6, 288, 358, 2001
- 2 M. Obata, Y. Sano, N. Mukai *et al.*. Effect of laser peening on residual stress and stress corrosion cracking for type 304 stainless steel [R]. The 7th International Conference on Shot Peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland, 1999. 387~394
- 3 Wang Yajun, Mao Zhiyong, Bai Shaojun. Mechanical properties of 1420 Al-Li alloy welds by EB welding [J]. *Aeronautical Manufacturing Engineering*, 1998, (6):12~13
王亚军,毛智勇,白韶军. 1420 铝锂合金电子束焊接头力学性能 [J]. *航空工艺技术*, 1998, (6):12~13
- 4 Zou Shikun, Wang Jian, Zhao Yong *et al.*. Effects of laser shock processing on the fatigue properties of rivet joint (I) [J]. *Applied Laser*, 2000, 20(6):255~257
邹世坤,王健,赵勇等. 激光冲击处理对铆接结构疲劳性能的影响 (I)[J]. *应用激光*, 2000, 20(6):255~257