

激光冲击强化铝合金焊接接头的性能

徐国建¹ 钟立明¹ 王 虹² 傅新皓³ 王志一⁴ 杳名宗春⁵

¹ 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870
² 天纳克同泰(大连)排气系统有限公司, 辽宁 大连 116100
³ 鞍山煜宸科技有限公司激光工艺部, 辽宁 鞍山 114044
⁴ 朝阳重型机器有限公司, 辽宁 朝阳 122000
⁵ 最新激光技术研究中心, 日本爱知县 安城市 4460026

摘要 以水为透明约束层,采用调 Q(脉冲高峰值功率)的 YAG 激光对 A6061-T6 铝合金熔化极惰性气体保护焊接接头焊趾附近进行了激光冲击强化,并对比研究了 A6061-T6 铝合金焊接接头在激光冲击强化与焊态下的性能。试验结果表明,激光冲击强化的铝合金焊接接头与焊态下的相比,其冲击强化区的维氏硬度得到明显提高,焊接接头疲劳寿命得到较大幅提升;焊态下的试样疲劳断口位于焊缝或焊缝近旁,激光冲击强化下的试样疲劳断口位于基体金属上;激光冲击强化后在材料近表面获得了较大的残余压应力,其最大值约为-145 MPa;与基体金属相比,激光冲击强化后的表面粗糙度增大。

关键词 激光技术;激光冲击强化;焊接接头;表面粗糙度;维氏硬度;疲劳寿命

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0603007

Performance of Aluminum Alloy Welded Joints by Laser Shock Processing

Xu Guojian¹ Zhong Liming¹ Wang Hong² Fu Xinhao³
Wang Zhiyi⁴ Muneharu Kutsuna⁵

¹ School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China
² Tenneco Tongtai (Dalian) Exhaust System Co. Ltd., Dalian, Liaoning 110870, China
³ Anshan Raycham Technology Co. Ltd., Anshan, Liaoning 114044, China
⁴ Chao Yang Heavy Machinery Co. Ltd., Chaoyang, Liaoning 122000, China
⁵ Advanced Laser Technology Research Center Co. Ltd., Anjo-shi, Aichi-ken 4460026, Japan

Abstract In the present work, laser shock processing (LSP) using a Q-switch YAG laser facility with high pulsed peak power under water environment is implemented near the toes of A6061-T6 Aluminum alloy metal-inert gas (MIG) welded joints. And the properties of A6061-T6 aluminum alloy MIG welded joints is analyzed before and after laser shock processing through the comparative method. The results show that after laser shock processing, Vickers hardness and fatigue life of the welded joints have been significantly improved, fatigue fracture of the welded joint without laser shock processing is located in or near the welded while it is located on the base material after laser shock processing, and a larger near-surface residual compressive stress with a maximum value of about -145 MPa is obtained. Compared with the base material, the surface roughness deteriorates after laser shock processing.

Key words laser technique; laser shock processing; welded joint; surface roughness; Vickers hardness; fatigue life

OCIS codes 140.3390; 140.3540; 140.3580; 160.3900

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家外国专家局“高端外国专家项目”(GDW20122101064)

作者简介: 徐国建(1959—),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺方面的研究。E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

1 引 言

激光冲击强化(LSP)能够在金属材料的近表面层产生压应力,所以能显著提高零部件的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力^[1-4]。

激光冲击强化在美国已应用到航天航空领域关键零部件的处理,如发动机叶片及机翼等,2004年美国为F-22战斗机建设了价值2亿美元的激光冲击强化生产线;日本已将激光冲击强化应用到了核电炉心焊接接头的处理^[5-6]。1990年后,我国的大专院校及科研院所也进行了全面的激光冲击强化研究^[7-9],但是到目前为止,还没有将该项技术广泛应用到实际生产中。

本文以水为透明约束层,采用调Q脉冲高功率的YAG激光对航天航空及高铁领域使用比较广泛的A6061-T6铝合金焊接接头进行了激光冲击强化处理,用对比分析的方法研究了激光冲击强化与焊态下的性能。主要目的是降低焊接接头焊趾处的应力集中系数,提高焊接接头的疲劳寿命。

2 试验过程

2.1 试验设备

试验系统如图1所示。该系统由调Q脉冲高功率的YAG激光器、水冷机、光路传导和聚焦系统、水槽、夹具及三维运动装置等组成。

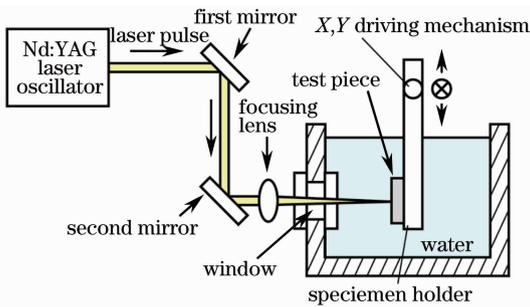


图1 激光冲击强化系统示意图

Fig.1 Diagram of laser shock processing system

2.2 试验材料

试验板材为A6061-T6铝合金,母材化学成分组成为 $w(\text{Al})=97.46\%$, $w(\text{Si})=0.59\%$, $w(\text{Cu})=0.21\%$, $w(\text{Fe})=0.31\%$, $w(\text{Mn})=0.09\%$, $w(\text{Mg})=1.04\%$, $w(\text{Cr})=0.15\%$, $w(\text{Zn})=0.09\%$, $w(\text{Ti})=0.06\%$,尺寸为 $260\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,V型坡口(钝边高度为2 mm,根部间隙为1 mm,坡口角度为 60°)。

填充材料选用A4043-WY,化学成分为 $w(\text{Al})=94.48\%$, $w(\text{Si})=4.59\%$, $w(\text{Fe})=0.56\%$,

$w(\text{Cu})=0.19\%$, $w(\text{Mn})=0.01\%$, $w(\text{Mg})=0.02\%$, $w(\text{Zn})=0.06\%$, $w(\text{Ti})=0.09\%$ 的实芯焊丝,直径为 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 。

2.3 试验方法

采用熔化极惰性气体保护焊接A6061-T6铝合金,最佳焊接工艺参数为焊接电流230 A、电弧电压21 V、焊接速度0.5 m/min、焊丝干伸长15 mm及保护气体(Ar)流量25 L/min。

铝合金焊接试样以焊趾为中心两侧各5 mm左右区域黑漆涂敷,干燥后夹持在三维运动系统上,并放到水槽中,采用调Q脉冲高功率的YAG激光器进行激光冲击强化试验。参数为脉冲激光能量100 mJ、光斑直径0.6 mm、脉冲时间8 ns、脉冲密度 27.3 pulse/cm^2 、激光峰值能量密度约为 3 GW/cm^2 (此时冲击波产生的压力约为 $2.5\text{ GPa}^{[10]}$)、点与点之间的搭接率为30%,以焊趾为中心两侧各3.5 mm左右区域进行激光冲击强化。

激光冲击强化后,使用激光显微镜测量工件表面粗糙度,扫描电子显微镜(SEM)观察表面状态。线切割方法截取横断面试样、进行研磨及抛光,数显维氏硬度计研究焊接接头的硬度分布,疲劳试验机测试焊接接头的疲劳寿命,X射线测试仪测量焊接接头的残余应力分布。

3 试验结果与讨论

3.1 焊接试样

采用上述的最佳焊接工艺参数获得的A6061-T6铝合金焊接接头形貌如图2所示。通过观察焊缝外观及分析横断面可知,焊缝成形美观并获得了

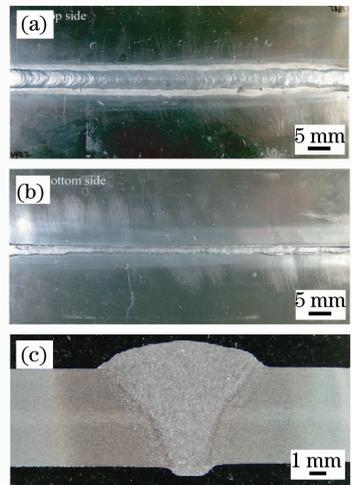


图2 焊接接头形貌。(a)正面;(b)背面;(c)横断面
Fig.2 Morphologies of the welded joint. (a) Top side; (b) back side; (c) cross-section side

足够的熔深,没有焊接缺陷存在。

3.2 处理后表面状态

铝合金焊接接头经过激光冲击强化后,其表面形貌的金相照片及扫描电镜照片见图3。在焊接接头冲击强化区域形成良好的冲击痕迹[图3(a)和(b)白色区域],其表面产生了较大的塑性变形[见图3(c)扫描电镜照片],这是因为在试验中激光诱导产生的等离子体在工件表面形成高压应力,在该压力作用下表面产生了较大的塑性变形。

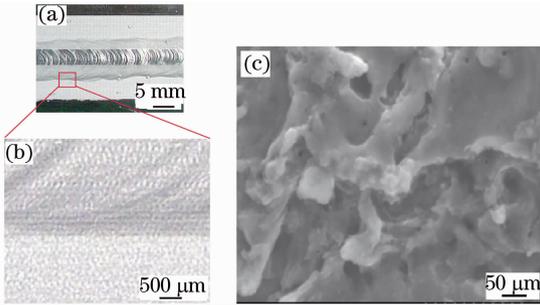


图3 激光冲击强化后的表面形貌。(a) 焊接接头;
(b) 显微照片;(c) 扫描电镜照片

Fig. 3 Surface morphologies after laser shock processing.

(a) Welded joint; (b) photomicrograph; (c) SEM photo

铝合金焊接接头激光冲击强化区和基体区的表面粗糙度如图4所示,图中横坐标的0点位置为激光冲击强化区与基体的分界线。冲击处理后的表面粗糙度约在 $-16\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间,冲击强化区与基体交界处的粗糙度约在 $-26\sim 24\ \mu\text{m}$ 之间;基体表面的粗糙度约在 $17\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间。综上所述,激光冲击强化后的表面粗糙度最大值约为 $50\ \mu\text{m}$;而基体表面的粗糙度约为 $3\ \mu\text{m}$ 。这是由于铝合金焊接接头焊趾附近在激光诱导形成的等离子体作用下产生较大的塑性变形,所以与基体表面相比,其粗糙度变大;在交界处的粗糙度值达到最大。与基体金属相比,虽然A6061-T6铝合金焊接接头激光冲击强化后的表面粗糙度变大,但是并没有影响焊接接头疲劳寿命的提高。

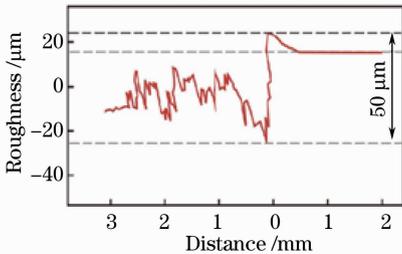


图4 激光冲击强化后表面粗糙度分布

Fig. 4 Surface roughness distribution after LSP

3.3 硬度

铝合金焊接接头在水平方向上的硬度分布如图5所示。A6061-T6是热处理强化铝合金,由于熔化惰性气体保护焊接过程中的过时效热处理作用,焊接接头的硬度低于基体金属。对激光冲击强化后的焊趾附近硬度进行了分析,分析位置(距表面0.2、0.5、2 mm)的硬度曲线如图5所示。由分析结果可知经过激光冲击强化后,其硬度显著提高,但是随着深度的增加,其硬度的提高效果逐渐下降。

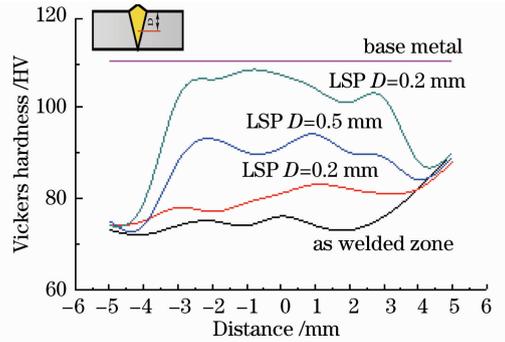


图5 水平方向上硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution in the horizontal direction

焊接接头垂直方向上硬度分布如图6所示,测量位置为焊缝焊趾处。根据测试结果,激光冲击强化的有效深度约为1.5 mm。分析可知在激光冲击强化过程中,激光诱导产生的等离子体压力作用使金属材料的近表面产生较大的加工硬化效应。材料经激光冲击强化后,表层硬度的提高以及较深的硬化层证明激光冲击强化完全可以改善材料的表面性能。

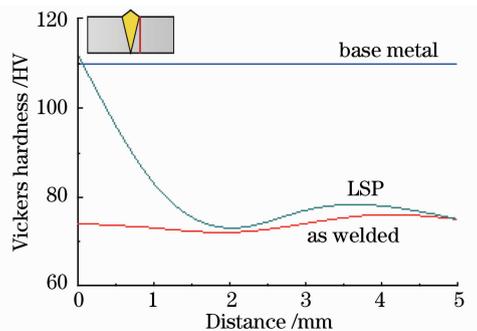


图6 垂直方向上硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution in the vertical direction

3.4 残余应力

材料表面应力状态对材料的疲劳强度有一定的影响,Grevey等^[11]首次测量到激光冲击强化区存在表面残余压应力。残余压应力可明显延缓疲劳裂纹的产生和扩展,有效提高材料的疲劳强度。因此,激光冲击处理后产生残余压应力,可使铝合金焊接接头的抗疲劳寿命得以延长。采用侧倾固定 ψ 法测

量铝合金焊接接头激光冲击强化后的近表面残余应力,其结果如图 7 和图 8 所示。由结果可知,激光冲击强化区产生的表面最大残余压应力约为 -130 MPa ,在深度方向上产生的最大残余压应力约为 -145 MPa ,残余压应力的深度约为 0.6 mm 。

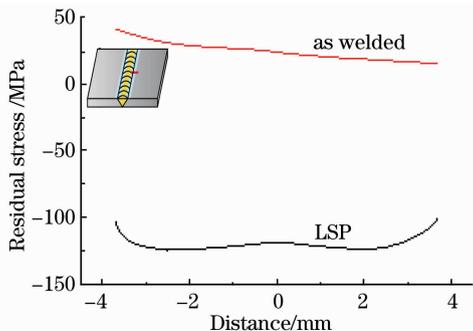


图 7 冲击强化后焊趾附近表面残余应力
Fig. 7 Residual stress near welded toe at the surface after LSP

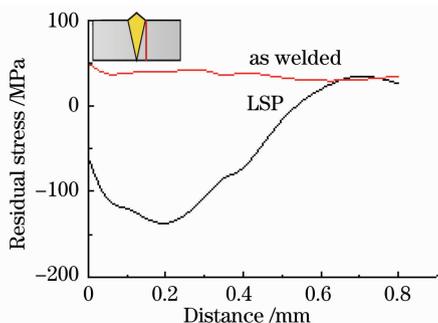


图 8 冲击强化后焊趾深度方向残余应力
Fig. 8 Residual stress along the depth from welded toe after LSP

铝合金焊接接头焊趾处黑漆吸收层受激光辐照产生高压等离子体,等离子体由于受到透明覆盖水的约束作用,从而形成高压冲击波轰击材料表面,当冲击波的强度高于材料的动态屈服强度时,可使表面一定深度内发生一定量不可逆的塑性变形,发生塑性变形的区域与周围区域保持几何相容性,周围区域存在始终保持将已发生塑性变形的区域压缩回原始状态的趋势,因此在激光冲击强化的近表面区域形成的较大压应力,抵消了一部分由于焊接作用产生的焊接拉应力,因而在激光冲击强化区域近表面形成了残余压应力。

3.5 疲劳试验

焊接接头疲劳试验试样尺寸如图 9 所示。疲劳试验参数为载荷应力比 $R = -1.0$ 、加载频率为 2000 min^{-1} 。

激光冲击强化前后铝合金焊接接头疲劳试验结

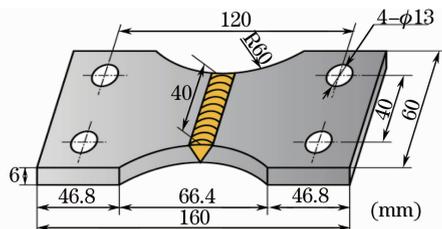


图 9 疲劳试验试样尺寸示意图

Fig. 9 Dimensions of fatigue test specimen

果如图 10 所示。由疲劳试验结果可知,经过激光冲击强化后,焊接试样的疲劳寿命提高一倍以上,由此证明激光冲击强化具有明显提高疲劳寿命的效果。

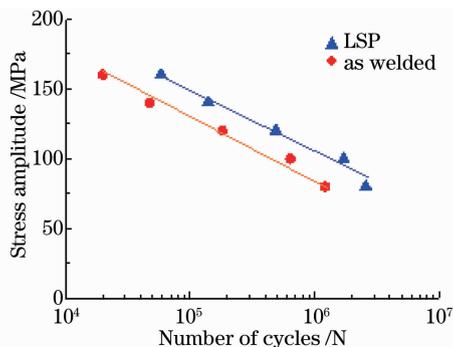


图 10 铝合金焊接接头疲劳 S-N 曲线

Fig. 10 Fatigue S-N curves of aluminum alloy welded joint

疲劳试验断口位置的部分外观形貌和横断面照片分别如图 11 和图 12 所示。由图 11 的外观形貌照片可知,焊态下疲劳断口位于焊接接头的焊趾或焊缝上,激光冲击强化的断口位于基材上。由图 12 的横断面金相照片可知,焊态下焊接接头在应力集中的焊趾附近处存在着大量疲劳裂纹,而经过激光冲击强化的焊接接头不存在任何疲劳裂纹,这是由于激光冲击强化在焊趾附近及近表面产生较大残余压应力,从而抑制裂纹产生的缘故。

stress (MPa)	as welded specimens	LSP specimens
120		
100		
80		

图 11 疲劳试验后试样外观

Fig. 11 Appearances of specimens after the fatigue test

焊接接头焊趾处是应力集中系数较高的位置,焊接结构在工作过程中,疲劳裂纹往往是由焊接接头的焊趾处产生、扩展进而导致整个结构的破坏,所以降低焊接接头焊趾处的应力集中系数,能够有效

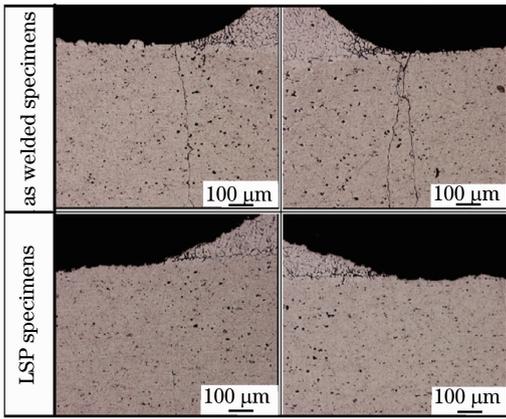


图 12 疲劳试验后试样横断面显微照片

Fig. 12 Cross sections of specimens after the fatigue test
地提高焊接接头的疲劳寿命。由试验结果可知，激光冲击强化完全达到了这一目的。

4 结 论

1) 激光冲击强化的 A6061-T6 铝合金焊接接头与焊态下的相比，其维氏硬度得到明显提高，焊接接头疲劳寿命提高 1 倍以上。

2) 与焊态下相比，A6061-T6 铝合金激光冲击强化区的材料近表面产生较大的残余压应力，其深度约为 0.6 mm、最大值约为 -145 MPa；焊接接头疲劳断裂位置位于基体金属上。

3) 与基体金属相比，A6061-T6 铝合金激光冲击强化后的表面粗糙度变差，但是并没有影响焊接接头疲劳寿命的提高。

参 考 文 献

1 Montross C S, Tao Wei, Lin Ye, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(10): 1021—1036.

2 Hatamleh O, Lyons J, Forman R. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(3): 421—434.

3 Zhou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming. The effects of laser shock processing on mechanical properties of welded joints (I) [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(3): 79—81.

邹世坤, 王 健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响(I)[J]. *焊接学报*, 2001, 22(3): 79—81.

4 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten Inert-Gas welded AZ31B magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1203007.

葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203007.

5 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.

6 See D W, Dulaney J L, Clauer A H, *et al.*. The air force manufacturing technology laser peening initiative [J]. *Surface Engineering*, 2002, 18(1): 32—36.

7 Zhou Jianzhong, Zhang Xingquan, Wang Guanglong, *et al.*. A new technology of plastic forming plate by laser peening [J]. *Engineering Science*, 2005, 7(11): 94—97.

周建忠, 张兴权, 王广龙, 等. 金属板料激光喷丸成形新技术 [J]. *中国工程科学*, 2005, 7(11): 94—97.

8 Yin Sumin, Zhang Chao, Wang Yun, *et al.*. Numerical analysis for the structure effect on stainless steel welding treated by laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503005.

殷苏民, 张 超, 王 匀, 等. 激光冲击对不锈钢焊接结构影响的数值分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503005.

9 Yan Shixing, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1003004.

闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1003004.

10 Berthe L, Fabbro R, Peyre P, *et al.*. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma[J]. *J Appl Phys*, 1997, 82(6): 2826—2832.

11 Grevey D, Maiffredy L, Vannes A B. Laser shock on a TRIP alloy: mechanical and metallurgical consequences[J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27(8): 2110—2116.

栏目编辑: 韩 峰