

强激光冲击对7075铝合金等离子弧焊接头电化 学腐蚀行为的影响

王江涛^{1,2} 张永康^{1,3} 陈菊芳² 周金宇² 卢雅琳² 张朝阳¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²江苏理工学院材料工程学院, 江苏 常州 213001

³东南大学机械工程学院, 江苏 南京 210096

摘要 采用极化曲线、电化学交流阻抗谱、X射线衍射仪(XRD)测试残余应力、扫描电镜(SEM)测试腐蚀形貌从实验上研究了强激光冲击对7075铝合金等离子弧焊接头电化腐蚀行为的影响。研究表明,激光冲击后7075铝合金焊接头表面残余应力由拉应力变成压应力,从而使得铝合金等离子弧焊接头的自腐蚀电位和点蚀电位提高,激光冲击4次后自腐蚀电位正移700 mV,点蚀电位正移约为1000 mV,极化曲线上出现了电位范围至712.9 mV的阳极钝化区间。经过激光冲击处理细化晶粒,7075铝合金焊接头的显微孔洞数量和气穴的体积减少,组织致密性提高,溶液中Cl⁻等原子的渗入被有效阻止,从而降低了腐蚀速率,使自腐蚀电流密度降低了1个数量级。激光冲击使焊接头处晶粒沿 β 相分布变得均匀, β 相与 α 基相构成的微电偶的活性降低,钝化电阻比冲击前提高了近30倍,浓差极化现象大为改善。

关键词 激光技术; 等离子弧焊接头; 激光冲击; 电化学阻抗谱; 极化曲线; 点蚀电位; 浓差极化

中图分类号 TG174.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1203006

Effect of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy Plasma Arc Weldments

Wang Jiangtao^{1,2} Zhang Yongkang^{1,3} Chen Jufang² Zhou Jinyu² Lu Yalin² Zhang Chaoyang¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China

³School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China

Abstract The effect of laser shock processing (LSP) on electrochemical corrosion behavior of 7075 aluminum alloy plasma arc weldments has been studied by using polarization curves, electrochemical impedance spectroscopy, residual stress tested by X-ray diffraction technique and scanning electron microscope (SEM) morphology of corrosion surface. The results show that the surface residual stress of weldments with LSP has been changed from tensile to compression, which leads to the improvement of the free-corrosion potential and pitting potential. The free-corrosion potential of weldments with 4 times LSP impacts is about 700 mV higher than that without LSP, and the pitting potential also occurs in about 1000 mV, besides the polarization curves exhibit an anode passivation zone in a wide range of potential with 712.9 mV. After grains being refined by LSP, the number of the microscopic holes and the volume of cavitation have been reduced, and the compactness of its surface microstructure has been improved. The infiltration of atoms such as Cl⁻ in the NaCl solution has been effectively prevented, thereby the

收稿日期: 2015-04-13; 收到修改稿日期: 2015-07-01

基金项目: 国家“863”计划子项目(2012AA040104)、国家自然科学基金(51275221, 51105182)、江苏省高校自然科学基金(12KJB460002)、江苏省光子制造重点实验室开放基金(GZ201202, GZ201101), 江苏省青蓝工程项目, 校科研预研项目(KYY12040)

作者简介: 王江涛(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: jiasqq1225@126.com

导师简介: 张永康(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造与检测等方面的研究。

E-mail: zykseu@163.com

corrosion rate can be reduced, and the corrosion current density has been decreased by one orders of magnitude. The grains have been well-distributed along the β -phase in weldments with LSP. The activity of micro-galvanic made up of β phase and α base phase has been reduced, and the impact of passive resistance is nearly 30 times higher than that without LSP. Concentration polarization has been greatly improved.

Key words laser technique; plasma arc weldments; laser shock processing; elctrochemical impedance spectroscopy; polarization curves; pitting potential; concentration polarization

OCIS codes 140.3460; 160.3900; 350.3850

1 引 言

高强高韧的7075铝合金是现代航空、航天和武器装备等发展必不可少的关键材料,而铝合金板是一种用量较大,加工技术高度集中的新型关键性结构材料^[1]。作为铝合金板的重要连接方式,等离子弧焊接由于能量高度集中,射流速度大,电弧力强,能直接穿透被焊工件,实现单面焊双面成形^[2],被广泛使用于制备铝合金结构件中。在使用过程中,腐蚀是该类产品结构失效的重要原因之一^[3]。为了提高铝合金等离子弧焊接接头的抗腐性,需要对焊接头进行焊后处理。激光冲击技术(LSP)是一项能够改善金属材料表面性能的新技术,由于能够提高材料表面的硬度、耐磨性和耐蚀性等性能^[4-7],已广泛应用于焊缝的焊后处理。目前对于激光冲击强化后7075铝合金焊接头的腐蚀性能研究比较少,本文针对LSP不同冲击次数下7075铝合金的电化学腐蚀行为进行研究,对比分析激光冲击前后焊接头抗腐蚀能力的变化,揭示激光冲击对铝合金焊接头抗腐蚀性能的影响机理,为7075铝合金焊接头的推广应用提供理论支持。

2 试验方法

试验材料为板厚为4 mm的7075铝合金,其化学成分(质量分数,%)如表1所示。把4 mm厚的铝合金板线切割成150 mm×150 mm的试样,去除切割缺陷,用丙酮清洗干净。

表1 7075 铝合金和焊丝ER4047的组分表(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 7075 aluminium alloy and ER4047 welding rod (mass fraction, %)

Composition	Si	Mn	Zn	Cu	Mg	Fe	Cr	Ti	Al
7075 aluminium alloy	0.3~0.4	0.3~0.4	5.5~5.6	1.9~2.0	2.1~2.3	0.5~0.6	0.15~0.19	0.2~0.24	other
ER4047 welding rod	11.4	0.15	0.2	0.3	0.1	0.8	---	---	other

2.1 等离子弧焊接

在等离子弧焊接过程中,使用纯氩气保护,氩气流量为10 L/min,使用专用铜质夹具进行装夹,选择ER4047作为焊丝,其成分如表1所示。焊接速度选取为50 mm/min,焊接电流为60 A。焊接完成后,焊缝经外观检查,未发现有未焊透、裂纹等焊接缺陷。焊接后沿焊缝中心线将铝板对称切割成尺寸为30 mm×30 mm的试样,抛光处理后放置到盛有乙醇的槽内,用超声波进行清洗。

2.2 激光冲击

将清洗后的铝合金板烘干,采用Gaia-R系列高能脉冲Nd:YAG激光器进行激光冲击,其冲击原理如图1所示^[8]。激光冲击时采用厚度为0.1 mm的美国3M公司专用铝箔作为激光能量吸收层,便于涂敷和清洗,采用流动水作为激光冲击时的约束层,流水厚度为1~2 mm。激光冲击光斑直径为3 mm,脉冲能量为4 J,激光波长为1064 nm,重复频率为0.5 Hz,采用60%的搭接率分别对试样进行1~4次冲击。

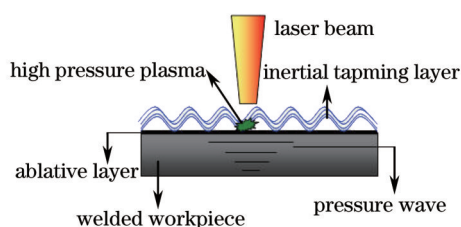


图1 激光冲击工艺

Fig.1 Laser peening process

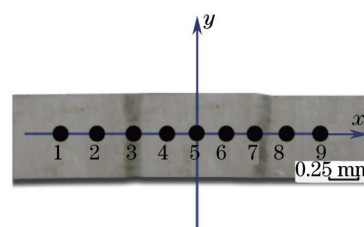


图2 XRD测量点布局

Fig.2 Diagram of XRD measured point

2.3 X射线衍射残余应力测试

激光冲击试验后,用乙醇清洗去除试样表面残留,采用X-350A型X射线应力仪(XRD)测试除母材(BM)之外的5组试样表面的残余应力,测量点分布如图2所示。

2.4 微观形貌测试

激光冲击后,将试样的端面用砂纸打磨、抛光后,在扫描电镜(SEM)下进行焊缝区的微观组织观察,组织形貌如图3所示。从图3(a)可以看出铝合金焊接基材组织较为均匀。图3(b)反映出铝合金焊接熔合区不仅有较大的焊接缺陷(如气孔等),而且析出了较多的粗大 β 相。经激光冲击后的焊缝熔合区缺陷减少、 β 相变得细小而且更加均匀,如图3(c)所示。

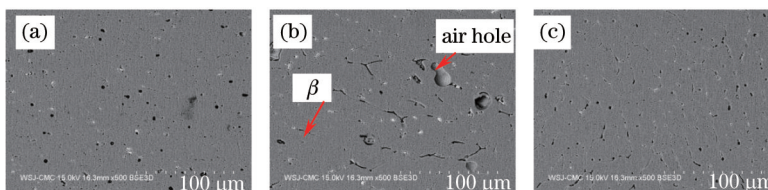


图3 铝合金焊接头的扫描电镜微观组织形貌。(a)母材;(b)焊缝熔合区;(c)激光冲击后的熔合区

Fig.3 SEM microstructure of aluminium alloy welded joints. (a) Base material; (b) nugget zone; (c) nugget zone with LSP

分别将未冲击的焊接头和4次冲击后的焊接头在熔合区取样,制备直径为3 mm大小的透射试样,双喷后用JEM-2100透射电镜(TEM)观察微观组织的变化,结果如图4所示。其中图4(a)和(b)分别为未冲击试样和经过4次冲击试样的明场像,从图4(a)可以看出焊接头中存在粗大的 β 相;而激光冲击后, β 相变得细小而均匀,如图4(b)所示。在激光冲击强化的过程中,当冲击强度超过靶材的动态屈服强度时,激光诱导的冲击波与材料相互作用而产生了力学效应导致表面发生了微塑性变形^[9-10],将粗大的 β 相晶粒击碎,达到细晶强化的效果^[11-13]。同时,激光冲击后,发生了晶格滑移,产生大量位错,导致试样局部位错密度升高,如图4(d)所示,导致焊接头的综合力学性能提高。

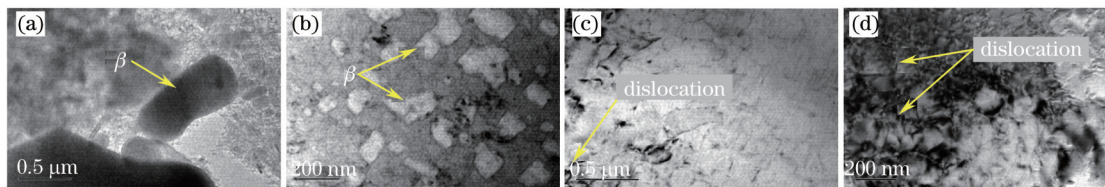


图4 铝合金焊接头的TEM微观组织形貌。(a)未处理焊接头;(b)4次冲击处理焊接头;(c)未处理焊接头的位错分布;(d)4次冲击处理焊接头的位错分布

Fig.4 TEM microstructure of aluminium alloy welded joints. (a) Without LSP; (b) 4 times LSP impacts; (c) dislocations in welded joints without LSP; (d) dislocations in welded joints for 4 times LSP impacts

2.5 焊缝无损检测

为了进一步研究激光冲击前后微观缺陷的变化情况,采用超声波对同一焊缝冲击前后进行检测,根据超声波在被测材料中传播时所显示的声学性质来探测其缺陷。图5是Phascan数字超声相控阵探伤仪检测结果。从图5(a)中可以发现,激光冲击前,焊缝的缺陷较多,而且缺陷尺寸较大;从图5(b)可以看出,激光冲击后,焊接缺陷减少,而且尺寸也明显减小。

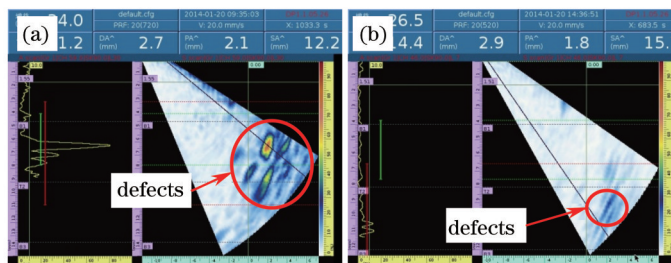


图5 铝合金焊接头的超声检测结果。(a)焊缝冲击前;(b)激光冲击后焊缝

Fig.5 Ultrasonic scan results of specimen of aluminium alloy welded joints. (a) Specimens before LSP; (b) specimens after LSP

2.6 电化学腐蚀

将测试后的铝合金焊接头沿熔接线对称截取规格为 10 mm×10 mm×4 mm 的立方体试样作为工作电极,其中尺寸为 10 mm×10 mm 的端面为工作面,另一个端面与铜导线连接,所有非工作面用环氧树脂胶涂封。工作面经 500、1000、1500 号砂纸逐级打磨后,采用粒度为 2.5 μm 金刚石抛光膏精抛,用丙酮除油,最后利用超声波进行清洗。试样吹干后置于干燥器内。电化学腐蚀采用型号为 CHI660C 的电化学工作站测量。采用三电极体系,辅助电极为石墨电极,参比电极为饱和甘汞电极,电解质为质量分数为 5% 的 NaCl 溶液,实验温度为 25 ℃~27 ℃,试样工作面积为 1 cm²。

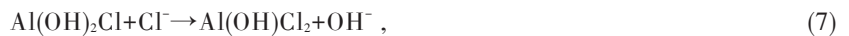
极化曲线实验以动电位扫描法测定试样的,扫描速率为 10 mV/s,测试前将试样放入 NaCl 溶液中待稳定后再进行测试。电化学阻抗实验测试频率范围为 0.01~100000 Hz,测试时施加 5 mV 的扰动电位。

3 实验结果与分析

3.1 动电位极化曲线分析

本次实验试样分为 6 组,分别是 7075 铝合金板材、7075 铝合金未冲击焊接焊接头、1~4 次的激光冲击 7075 铝合金焊接头,电化学极化曲线测试结果如图 6 所示。其中图 6(a)为 7075 铝合金板材(即母材)和 7075 铝合金未冲击焊接头的对比(冲击次数 $N=0$);图 6(b)为 7075 铝合金未冲击焊接头(冲击次数 $N=0$)和 1 次的激光冲击 7075 铝合金焊接头(冲击次数 $N=1$)的对比;图 6(c)为 1~4 次的激光冲击 7075 铝合金焊接头的对比;图 6(d)为以 4 次激光冲击 7075 铝合金焊接头为例的极化过程分析解释图。

从图 6(a)可以看出,激光冲击前,7075 铝合金焊接头的耐腐蚀性能低于母材,自腐蚀电位 E_{corr} 负移了 0.2025 V,腐蚀电流密度 i 提高了 1 个数量级,腐蚀速度加剧,抗腐蚀明显能力下降。而图 6(b)是 7075 铝合金焊接头激光冲击前后的极化曲线的对比,冲击后 7075 铝合金焊接头试样($N=1$)的极化曲线形状发生了改变,自腐蚀电位正移 0.377 V,腐蚀电流密度下降,冲击后焊接头在抗腐蚀性优于母材。阳极极化倾向相对较小,自腐蚀电位以上的阳极电流密度随阳极极化电位的升高而快速增加,说明阳极溶解顺利,激光冲击后试样表面活化较好。由图 6(c)可以看出随着激光冲击次数的增加,7075 铝合金焊接头合金自腐蚀电位正移非常明显,激光冲击次数从 $N=1$ 提高到 $N=4$ 时,7075 合金焊接头的自腐蚀电位 E_{corr} 正移了 0.5157 V,点蚀电位 E_{pp} 正移了约 1 V,钝化电位 E_{pa} 正移约 0.47 V,钝化区间增大约 0.7 V,腐蚀电流 i_{corr} 降低了 1 个数量级,抗腐蚀性提高。具体参数如表 2 所示。铝合金焊接头在质量分数为 5% NaCl 溶液中电化学反应过程中阳极反应过程如下:



从图 6(d)可以看出,激光 4 次冲击后铝合金焊接头在质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中阳极电化学反应有 AB、BC、CD 三个区域,其中 AB 段为动态活性溶解区,在阳极,Al 活性溶解以离子形式进入溶液,主要反应为(1)、(2)和(3)式^[14]。BC 段为钝化区,随着电压的继续升高使得部分 $\text{Al}(\text{OH})_2$ 快速分解成钝化膜 AlOOH ,成为离子迁移和扩散的阻力层,将金属和溶液分开,此时电流出现钝化,进入钝化区,主要反应为(4)、(5)式^[15]。而 CD 段为过钝化区,电压继续升高,钝化膜破裂,发生点蚀,溶液中富集的 Cl^{-} 开始向晶内发展,反应结果为产生了大量 AlCl_3 ,主要反应为(6)、(7)和(8)式^[15]。随着激光冲击次数的增加,不仅点蚀电位发生了正移,钝化电流也出现了平稳下降。

从表 2 可以看出,焊接后铝合金焊接头的抗腐蚀能力明显低于母材,主要原因是焊缝处晶粒粗大,组织缺陷增多。激光冲击后,焊接头的抗腐蚀性能得到改善,因为激光冲击处理可以细化晶粒,减少 7075 铝合金

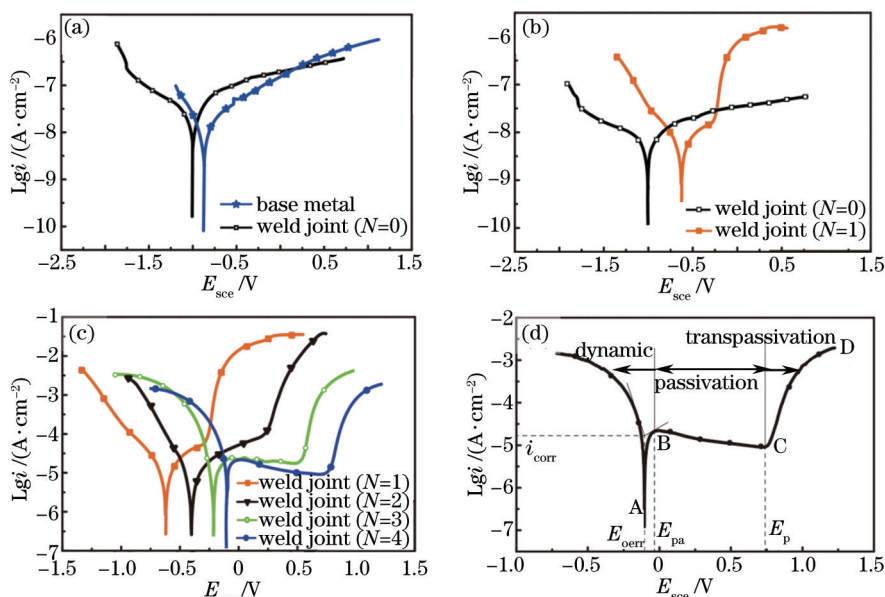


图6 不同LSP冲击次数(N)下7075铝合金焊接头及母材在质量分数为5%NaCl溶液中的极化曲线。(a)母材与未冲击焊接头极化曲线对比;(b)未冲击与1次冲击焊接头极化曲线对比;(c)不同冲击次数下焊接头极化曲线对比;(d)4次冲击焊接头极化过程分析

Fig.6 Polarization curves of 7075 Aluminum alloy weldments and base material by different times LSP (N) in 5% NaCl solution.

(a) Comparison between base material and welded joint without LSP (N=0); (b) comparison between welded joint without LSP (N=0) and with LSP (N=1); (c) comparison of welded joint with different times LSP (N); (d) analysis of polarization process to welded joint with LSP (N=4)

表2 7075铝合金焊接头在5% NaCl溶液中Tafel参数

Table 2 Tafel parameters of 7075 Aluminum alloy welded joint in 5% NaCl solution

	E_{corr} / V	$i_{corr} / (\mu A \cdot cm^{-2})$	E_{pa} / V	$\Delta V / V$	E_{pp} / V
Base metal	-0.7875	0.113	---	---	---
N=0	-0.9985	8.874	---	---	---
N=1	-0.6208	8.695	-0.4496	0.1608	-0.2888
N=2	-0.4062	2.242	-0.2204	0.4422	0.2218
N=3	-0.2155	1.304	-0.1057	0.5988	0.4931
N=4	-0.1051	0.732	0.0189	0.7129	0.7318

焊接头显微孔洞的数量,减小气穴缺陷的体积,有效地阻止溶液中Cl⁻等离子的渗入,降低腐蚀速率,提高抗腐蚀能力。图7为未冲击焊接头和4次冲击后铝合金焊接头在外加电压电化学腐蚀3h后的SEM形貌图。从图7(a)可以看出,未激光冲击的焊接头在电化学腐蚀后,形貌比较粗糙,成多孔状形貌;点蚀现象比较严重,布满密集的腐蚀坑,腐蚀坑分布密集几乎占到了整个面积的50%;腐蚀坑的体积较大,表现为直径尺寸大,最大可以达到150 μm。用三维形貌扫描仪PS50沿AA方向进行测量发现,腐蚀坑的深度达到50 μm以上。在扫面电镜下观测,发现在未出现腐蚀坑的地方存在大量的微裂纹和二次裂纹,如图7(a)中的B区放大图所示。而从图7(b)可以发现,经过4次激光冲击后的铝合金焊接头在电化学腐蚀3h后表面相对比较平滑,腐蚀坑的个数明显减少,腐蚀坑的体积也减小很多;点蚀坑分布稀疏而且腐蚀坑直径小且深度浅,甚至大部分地方未发生明显腐蚀。未出现腐蚀坑的地方未出现微裂纹和二次裂纹,如图7(b)中的C区放大图所示,这主要是由于激光冲击后表层材料晶粒得到细化,表面层变得致密,有效阻止了Cl⁻的侵入。

图8为铝合金等离子弧焊接头在不同激光冲击次数下测试的表层残余应力图和深度方向的残余图。由于铝合金是高层错能金属^[16],多次激光冲击引起大量塑性变形,在材料内部产生大量的高密度位错,导致晶格发生畸变,从而使焊缝处的残余拉应力变成了压应力。未冲击前,残余拉应力的存在造成局部自腐蚀电位的降低^[17],使得未冲击焊缝自腐蚀电位达-998.5 mV。激光冲击波诱导的残余压应力,提高了钝化膜AlOOH的横向压缩力,使得金属的抗腐蚀性大大增加^[18-23],在4次激光冲击后,焊接头的拉应力由43 MPa变为压应力75 MPa,如图8(a)所示。随着激光冲击次数的增加,表面残余压应力不断增加,增加幅度并不大。

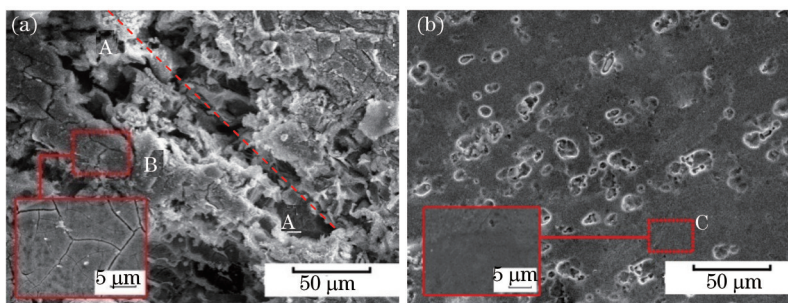


图7 激光冲击7075铝合金焊接接头电化学腐蚀3 h后的SEM图。(a) 未冲击;(b) 4次冲击

Fig.7 SEM photograph of weldments with different peening numbers. (a) Without LSP; (b) with 4 LSP impacts

但随着冲击次数的增加,塑性变形层的深度却在逐步加深,分别为0.2,0.5,0.77和1.13 mm,如图8(b)所示。由于塑性变形层和残余压应力场的深度随冲击次数的增加而增加,焊接头的内部原子失去电子的机会逐渐减少,产生微电偶、微裂纹、剥落的可能性也在减小,导致4次激光冲击后自腐蚀电位正移约800 mV,钝化区间增加500 mV,钝化电流密度下降一个数量级。因此,激光冲击后残余压应力的增加和残余压应力场深度的增加是铝合金焊接接头耐腐蚀性提高的重要原因之一。

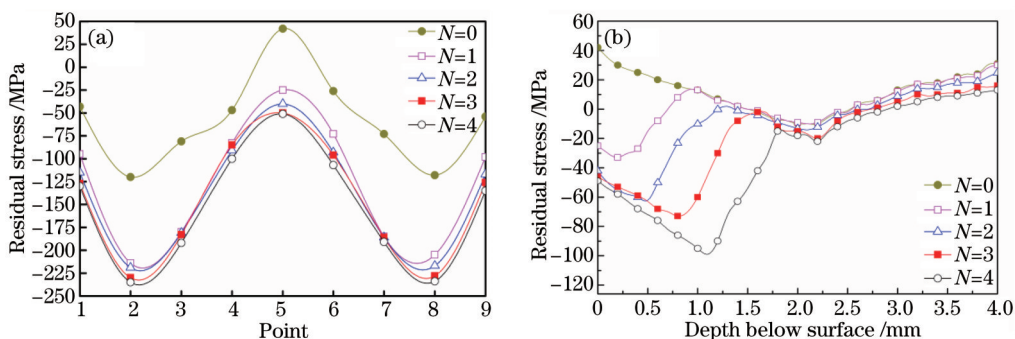


图8 不同激光冲击次数的铝合金焊接接头表面XRD残余应力。(a) 表面残余应力;(b) 深度方向残余应力

Fig.8 XRD measurements about surface residual stresses of welded joint with different peening numbers.

(a) Residual stresses at surface; (b) residual stresses at depth

3.2 阻抗曲线

电化学腐蚀过程动力学相当复杂,包括电量的转移、化学变化和组分浓度变化等过程。利用电化学阻抗谱技术可以很便捷地解释电化学腐蚀过程。按照前文分组方法,激光冲击处理后的试样在5%(质量分数)NaCl水溶液中进行电化学阻抗(EIS)测试,实验测得的EIS如图9所示,其中 Z' 为阻抗的实部,对应阻抗的电阻部分; Z'' 为阻抗的虚部,对应阻抗的电容部分。在图9中,7075铝合金的Nyquist图在复平面上由一端阻抗弧和一段与轴成一定角度的直线组成,其中高频段的圆弧对应合金表面Al的电化学活性溶解阻抗,中低频段的直线对应Cl⁻存在时外层氧化膜的阻抗^[24]。高频段的容抗弧直径与腐蚀速率有密切关系,直径越大,抗腐蚀能力就越强^[25]。

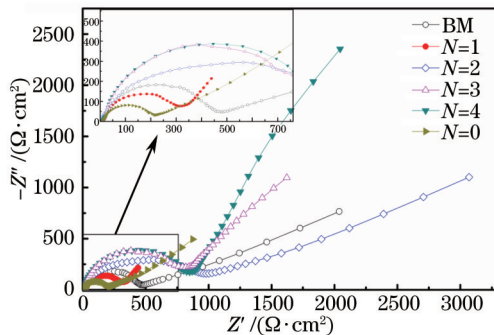


图9 7075铝合金焊接样品不同冲击次数的EIS谱

Fig.9 EIS plot of weldments sample on 7075 aluminum alloy with different peening numbers

从图9中可以看出,当激光冲击次数 $N=0$ 时,容抗弧直径最小,几乎是母材的一半,这说明焊接头的抗腐蚀能力远低于母材,当 $N=1$ 时,容抗弧直径有所增大但仍然小于母材,而 $N \geq 2$ 时,激光冲击后的焊接头容抗弧直径超过了母材,甚至在 $N=4$ 时,容抗弧的直径接近于母材的两倍,即随着激光冲击次数的增加,铝合金焊接头抗腐蚀越来越好。直线部分属于低频段阻抗,从图9可以看出腐蚀的控制步骤为扩散控制,主要表现的是扩散效应,斜率越大,它的扩散速率越快^[26]。此时7075铝合金焊接头表面均匀溶解,相应腐蚀产物 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 增多,腐蚀产物附着在铝合金表面上减缓溶解,其扩散控制腐蚀过程^[27]。由图9可以看出当 $N=4$ 时,扩散控制最好,腐蚀产物附着率最高,从而导致钝化时间最长,这和极化曲线分析结果相吻合。

根据该电化学反应体系中腐蚀过程的特点,结合参考文献[28],建立如图10所示的等效电路。图10中 R_1 、 R_{ct} 、 R_p 分别为参比电极和工作电极间的溶液电阻、电荷传递电阻、钝化电阻; C_{dl1} 和 C_{dl2} 分别为双电层电容和电极表面弥散效应膜电容; W 为电极表面浓差极化阻抗。

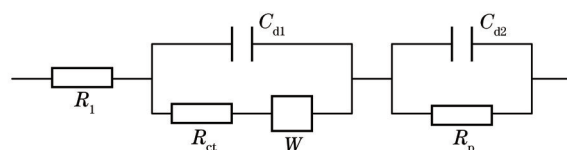


图10 电极反应的等效电路图

Fig.10 Equivalent circuit model of electrode reaction

图11为用专业阻抗拟合软件做出的拟合结果与图9中实测结果的对比图,从图中可以看出,拟合值和对比值比较吻合。根据图10计算得到表3中的相关数据。

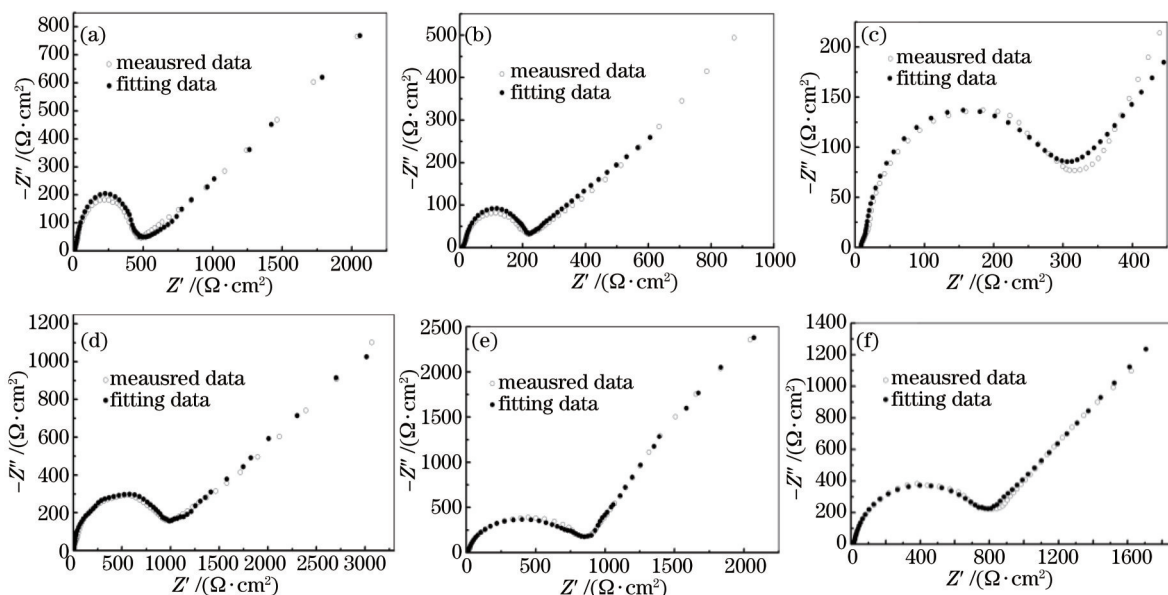


图11 电极反应的等效电路拟合值与实测值对比图。(a) 母材; (b) 焊接头($N=0$); (c) 焊接头($N=1$); (d) 焊接头($N=2$); (e) 焊接头($N=3$); (f) 焊接头($N=4$)

Fig.11 Comparison between measured values and the fitted values in the equivalent circuit model of electrode reaction.

(a) Base material; (b) welded joint ($N=0$); (c) welded joint ($N=1$); (d) welded joint ($N=2$); (e) welded joint ($N=3$); (f) welded joint ($N=4$)

从表3中可以看出溶液电阻 R_1 的值基本维持在 $7.8 \sim 9.3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内,而激光冲击后焊接头的电荷传递电阻 R_{ct} 由冲击前的 $246.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 提高至4次冲击后的 $864.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而钝化电阻 R_p 比冲击前提高近30倍,主要原因是冲击后表面组织和表面膜变得更加稳定、致密^[29]。在表3中可以看出,浓差极化现象最为严重的是未冲击处理焊接头试样($N=0$),此时由于在焊接过程中,沿晶界析出的 β 相比较粗^[30], β 相与基相 α 构成的微电偶的活性较大,焊缝出现大量缺陷(如气孔等)使得化学反应速度加剧,致使浓度差较大,浓差极化系数 W 达到 $0.004125 \text{ S} \cdot \text{s}^5 \cdot \text{cm}^{-2}$ 。而强激光冲击后,焊接头处的晶粒得到高度细化,沿 β 相分布变得均匀,降低了 β 相与 α 基相构成的微电偶的活性,浓差极化现象大为改善, W 降为 $0.000934 \text{ S} \cdot \text{s}^5 \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

表 3 图 10 各参数在不同冲击次数下焊接头 EIS 的拟合结果

Table 3 EIS fitting results of the parameters in Fig.10 for different peening numbers

	$R_1 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{dl} / (10^{-5} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$C_{dl} / (10^{-5} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$W / (10^{-3} \text{ S} \cdot \text{s}^5 \cdot \text{cm}^{-2})$
BM	8.799	482.723	1.134	1.906	5.808	1.259
N=0	7.810	246.101	285.701	3.955	1.232	4.125
N=1	8.538	366.107	2134.453	2.894	3.828	1.772
N=2	8.582	838.832	4320.007	3.667	3.841	1.674
N=3	8.922	855.319	8256.167	1.946	3.001	1.418
N=4	9.255	864.142	8307.969	1.207	4.178	0.934

4 结 论

通过对 7075 铝合金焊接头激光冲击处理及电化学腐蚀的研究,得出如下结论:

1) 激光冲击能够改善焊接头的表面应力状态,使残余拉应力变为压应力,从而使得铝合金焊接头的自腐蚀电位和点蚀电位正移,激光冲击 4 次后自腐蚀电位正移 700 mV,点蚀电位正移约 1000 mV,钝化区间增加 550 mV。

2) 随着激光冲击次数的增加,内部缺陷在逐渐减少,焊接头处的晶粒得到高度细化,显微孔洞数量和气穴的体积减少,有效地阻止了溶液中 Cl⁻ 等离子的渗入,降低了腐蚀速率,腐蚀电流降低了 1 个数量级。

3) 强激光冲击后,焊接头处的晶粒沿 β 相分布变得均匀,降低了 β 相与 α 基相构成的微电偶的活性,浓差极化现象大为改善。

4) 随着激光冲击次数的增加,铝合金焊接头表面组织和表面膜变得更加致密和稳定,钝化电阻提高了近 30 倍,耐腐蚀性能得到提高。

参 考 文 献

- 1 Ke Yinglin, Dong Huiyue. Pre-stretching process and its application in reducing residual stress of quenched 7075 aluminum alloy thick-plates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 639-645.
柯映林,董辉跃. 7075 铝合金厚板预拉伸模拟分析及其在淬火残余应力消除中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4): 639-645.
- 2 Lei Yucheng, Zheng Huijin, Cheng Xiaonong. Simulation of molten pool for vertical keyhole plasma arc welding in aluminium alloy [J]. Transactions of the China welding Institution, 2003, 24(1): 44-47.
雷玉成,郑惠锦,程晓农. 铝合金等离子弧立焊穿孔熔池的计算机模拟[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 44-47.
- 3 Huang Tsaihsang Frankel G S. Kinetics of sharp intergranular corrosion fissures in AA7178[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 858-876.
- 4 Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503004.
李少哲,张凌峰,荆清蒲. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503004.
- 5 Zhang Yongkang, You Jian, Lu Jinzhong, et al.. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- 6 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao, et al.. Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (10): 1352-1356.
吴 边,王声波,郭大浩,等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1352-1356.
- 7 Zhang Qinglai, Qiang Yang, An Zhibin, et al.. Study on electrochemical corrosion of magnesium alloys by laser shock processing in NaCl solution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903002.
张青来,钱 阳,安志斌,等. 基于激光冲击的镁合金在 NaCl 溶液中电化学腐蚀的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903002.
- 8 Omar Hatanleh, Adrian DeWald. An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4822-4829.
- 9 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin, et al.. Microstructural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2662-2666.
鲁金忠,罗开玉,冯爱新,等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2662-2666.

- 10 Zhou Jianzhong, Zhong Hui, Huang Shu, *et al.*. Surface micro-dimple effect and electrochemical corrosion behaviors of AZ31B magnesium alloy treated by laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303007.
周建忠, 钟 辉, 黄 舒, 等. AZ31B 镁合金激光表面微凹坑效应及其电化学腐蚀行为[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303007.
- 11 Zhu Ying, Fan Bowen, Guo Wei, *et al.*. Influence of laser shock peening times on microstructure and hardness of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 444-448.
朱 颖, 范博文, 郭 伟, 等. 激光冲击次数对 TA15 微观组织和硬度的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 444-448.
- 12 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yalin, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403002.
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403002.
- 13 Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- 14 Xiong Qingren, Li Weiwei, Fu Anqing, *et al.*. Effect of residual stress on electrochemistry corrosion resistance of X80 UOE pipe[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 749-753.
熊庆人, 李为卫, 付安庆, 等. 残余应力对 X80 UOE 钢管耐电化学腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 749-753.
- 15 Nestor Perez. Electrochemistry and Corrosion Science[M]. Zhu Yongchun *et al.* Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
奈斯特·派雷兹. 电化学与腐蚀科学[M]. 朱永春等译. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- 16 Lu Jinzhong. Investigation of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties and Micro-Plastic Deformation Mechanism of LY2 Aluminum Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010: 64-75.
鲁金忠. 激光冲击强化铝合金力学性能及微观塑性变形机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010: 64-75.
- 17 Zhang Yongkang, Zhang Leihong, Zuo Dunwen, *et al.*. Residual stress of 3A21 aluminium sheet by laser shock processing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(S):16-20.
张永康, 张雷洪, 左敦稳, 等. 激光冲击成形下 3A21 铝板料表面残余应力[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S):16-20.
- 18 Fan Yong, Wang Shengbo, Wu Hongxing, *et al.*. Research of residual stress induced by laser shock processing on 7075 aerial aluminium alloy[J]. Applied Laser, 2003, 23(1): 6-7.
范 勇, 王声波, 吴鸿兴, 等. 7050 航空铝合金激光冲击强化残余压应力研究[J]. 应用激光, 2003, 23(1): 6-7.
- 19 L Zhang ,Y K Zhang, J L Lu, *et al.*. Effects of laser shock processing on electrochemical corrosion resistance of ANSI 304 stainless steel weldments after cavitation erosion[J]. Corrosion Science, 2013, 66(1): 16-20.
- 20 R M Pidaparti, R R Patel. Correlation between corrosion pits and stresses in Al alloys[J]. Materials Letters, 2008, 62(30): 4497-4499.
- 21 R M. Pidaparti, A S Rao. Analysis of pits induced stresses due to metal corrosion[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1932-1938.
- 22 Wang Cheng, Lai Zhilin, He Weifeng, *et al.*. Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0103001.
汪 诚, 赖志林, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0103001.
- 23 Luo Mi, Luo Kaiyu, Wang Qingwei, *et al.*. Numerical simulation of laser shock peening on residual stress field of 7075-T6 aluminium alloy welding[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0414003.
罗 密, 罗开玉, 王庆伟, 等. 激光冲击 7075-T6 铝合金焊缝的残余应力场数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0414003.
- 24 Ji Kai, Zu Guoyin, Yao Guangchun. Corrosion behavior of a new weldable aluminum alloy:6005A[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(7): 990-994.
季 凯, 祖国胤, 姚广春. 新型可焊 6005A 铝合金的腐蚀行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 990-994.
- 25 Fratila A L, Apachitei I, Duszczyc J. Characterization of cast AlSi(Cu) alloys by scanning Kelvin probe microscopy[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(26): 5892-5896.
- 26 Cui Yan, Zhao Xiaoli, Guo Ruisong. Improved electrochemical performance of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ and carbon co-coated LiFePO_4 synthesized by freeze-drying process[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(3): 922-926.
- 27 Ma Jingling, Wen Jiuba, Lu Xianwen, *et al.*. Electrochemical impedance spectroscopy of aluminum alloy anode during corrosion process[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(6): 373-376.

- 马景灵,文九巴,卢现稳,等. 铝合金阳极腐蚀过程的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 373-376.
- 28 Cao Chunan, Zhang Jianqing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- 曹楚南,张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- 29 J Z Lu, K Y Luo, Y K Zhang, *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultrahigh plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. Acta Materialia, 2010, 58 (11): 3984-3994.
- 30 Xie Yedong, Nong Qi. Effects of post-weld heat treatment on microstructures and mechanical properties of aluminum alloy 6061 welded joints[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(15): 127-129.
- 谢业东,农 琪. 焊后热处理对6061铝合金焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(15): 127-129.

栏目编辑: 宋梅梅