

超声冲击处理 2A12 铝合金焊缝表层微观组织结构变化

Microstructure Changes of 2A12 Aluminum Alloy Weld Bead Surface Layer by Ultrasonic Impact Treatment

朱有利¹, 李占明¹, 何嘉武², 汪 勇¹
(1 装甲兵工程学院 装备再制造工程系, 北京 100072;
2 装甲兵工程学院 科研部, 北京 100072)
ZHU You-li¹, LI Zhan-ming¹, HE Jia-wu², WANG Yong¹
(1 Faculty of the Remanufacturing Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China; 2 Department of Scientific Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

摘要：采用超声冲击工艺对母材为 2A12 铝合金焊接接头进行了焊后处理。利用扫描电镜、X 射线衍射分析了超声冲击处理前后焊缝表面层的微观组织结构特征。结果表明, 超声冲击处理可以在焊缝表面形成约为 300 μ m 的致密塑性变形层, 晶粒明显细化。对 X 射线衍射峰的观察分析表明, 处理后焊缝表层材料衍射峰明显宽化, 这是超声冲击处理使焊缝表层材料粒子细化和晶格结构的微观应变引起的。利用谢乐方程和威尔逊公式对超声冲击处理后焊缝表层的晶粒度和微观应变进行了定量分析, 结果表明, 处理层的晶粒平均尺度为 123nm, 平均微观应变为 0.134%。最后, 对晶粒细化的机理进行了分析。

关键词: 超声冲击处理; 焊缝; 铝合金; 微观组织结构
中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)07-0079-04

Abstract: 2A12 aluminum alloy welded joint was strengthened by Ultrasonic Impact Treatment (UIT). The microstructure characterization of the welded bead surface layer with and without UIT was studied by SEM observation and X-Ray Diffraction (XRD) analysis. Results show that the metalurgical structure of the near surface material of the weld zone was densified due to ultrasonic impact treatment. The depth of plastic deformation extended up to about 300 μ m from the surface. The grain refinement behavior was obvious. XRD analysis show that the diffraction peaks after UIT was broadened significantly, which was related to grain refinement and lattice distortions. Quantitative estimation of the grain size and of the lattice distortions after UIT was evaluated by Scherrer equation and Williamson formula based on the peak broadening. Results show that the average grain size after UIT is about 123nm and the average micro-strain value is about 0.134%. At last, the mechanisms of grain refinement were discussed.

Key words: ultrasonic impact treatment; weld bead; aluminum alloy; microstructure

2A12 高强度铝合金因具有比强度高、加工性能好、价格低廉等突出优点, 在航空结构领域得到了广泛的应用^[1]。但由于 2A12 铝合金焊接接头存在强度低、疲劳性能差、软化区过宽、延性小以及焊接热裂敏感等一系列问题, 易导致焊接结构失效, 使得其应用受到了限制^[2]。多数金属材料的失效始于表面, 因此通过改善焊接接头表层的组织结构来提高焊接结构的综合力学性能是一种有效的途径, 如, 喷丸、锤击、碾压和等离子喷涂等^[3-5]。这些技术各具优缺点, 适用于不

同的场合。超声冲击处理(UIT)是一种旨在改善焊接接头抗疲劳性能的新技术, 在国内外得到了较快的发展和应用。近年来, UIT 技术在国际上已经由单纯的焊后处理开始向用于改善金属工件表面和次表面性能, 提高工件的抗疲劳性能, 抗应力腐蚀性能, 耐磨性和抗接触疲劳性能的方向发展^[6-8]。研究表明, UIT 通过在焊趾或焊缝表面引入残余压应力、改善焊趾几何形状减少应力集中程度等提高焊接接头的疲劳强度^[9,10]。实际上, UIT 不仅会降低焊接残余应力和应

力集中,而且由于剧烈的塑性变形,还会使焊缝表层材料产生微观组织结构变化,这些变化将对焊接接头的性能产生重要的影响。本工作采用扫描电镜和 X-射线衍射等材料分析技术研究了 UIT 对 ER5356 铝镁合金焊丝焊接的 2A12 铝合金焊缝表层微观组织结构的影响,并分析了造成这些组织结构变化的原因,及其对改善 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的作用。

表 1 2A12 铝合金和 ER5356 焊丝化学成分(质量分数/%)

Table1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy and ER5356 welding wire (mass fraction/%)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Al
2A12	0.50	0.50	3.849	0.309	1.216	—	0.30	0.15	0.10	Bal
ER5356	0.25	0.40	0.10	0.01	4.555	0.07	0.10	0.10	—	Bal

1.2 焊接工艺

将尺寸为 100mm×50mm 的 2A12-T4 高强铝合金板材接口处加工成 60°的 Y 型坡口,用专用打磨工具清除坡口附近的氧化皮,用丙酮清洁坡口周边位置,将实验板材平放于工作台上,在不加约束的情况下,采用手工交流氩弧焊(TIG)双面焊接。焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Process parameters in welding

Intensity /A	Voltage /V	Speed /(mm·min ⁻¹)	Shielding gas /(L·min ⁻¹)
120	16	300	5.8

1.3 超声冲击处理工艺

将焊后实验板材固定于工作台上,沿焊缝进行全覆盖超声冲击处理,冲击枪沿垂直于焊缝的方向以 1.0~1.5m/min 的速度往复冲击 3—5 次。超声冲击处理采用了 ZJ-II 型超声波冲击设备,冲击时工作电流为 0.8~1.0A,超声振动频率为 20kHz。

1.4 实验仪器与方法

将焊态和经超声冲击处理后的焊缝区域沿横向利用线切割制取试样,样品表面用超声清洗去污。之后依次采用 360,600,800,1000,1200# 水砂纸粗磨,再进行机械抛光,并采用体积比为 HF:HCl:HNO₃:H₂O=1:1.5:2.5:95 的混合酸腐蚀。用 QUANTA 200 型扫描电镜观察焊缝显微组织;在 D8Advance 型 X 射线衍射仪上对处理和未处理的焊接接头试样表面进行 XRD 分析(Cu 靶,管压 40kV,管流 40mA,步进扫描步长 0.03°)。

2 实验结果与讨论

2.1 组织形貌分析

图 1 是焊态和超声冲击处理后的焊接接头焊缝区

1 实验仪器与方法

1.1 实验材料

焊接使用的铝合金基材为 2A12 铝合金板材,供货状态为 T4 态,板厚 4mm。采用 ER5356 铝镁合金焊丝进行焊接,焊丝直径 2.5mm。铝合金板材与焊丝的主要化学成分见表 1。

SEM 照片。可见,未处理的焊缝为树枝晶铸态组织,这种铸态组织晶粒粗大且不均匀、组织不致密,气孔、缩松等微观缺陷较多,如图 1a 所示。缩松、气孔等缺陷的存在不仅减少焊缝的有效截面积,而且会造成局部应力集中,是焊件断裂的裂纹源之一。超声冲击处理后,焊缝表面形成约为 300μm 的致密塑性变形层,没有观察到明显的缩松、气孔等焊接缺陷(图 1b)。这是由于超声冲击处理使焊缝内部原有的缩松、气孔被闭合或压小,在焊缝表面形成致密塑性变形层,这有利于焊接接头疲劳强度的提高。

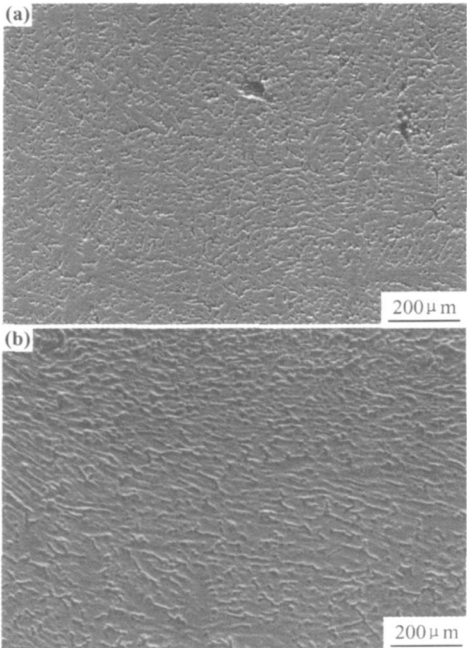


图 1 UIT 前后焊缝 SEM 照片

(a) 未处理; (b) 超声冲击处理

Fig. 1 SEM micrographs of welded zone before and after UIT (a) untreated; (b) UIT

2 2 XRD 分析

图 2a 是超声冲击处理前后焊缝表面铝合金多晶体各晶面的 XRD 图谱。由图可见, 超声冲击处理后衍射峰强度明显减弱、宽化, 同时向高衍射角方向移动, 如图 2b 所示。根据 X 射线衍射原理, 多晶体晶粒细化和点阵畸变的增加会使 X 射线衍射线形宽化。这表明超声冲击处理过程中, 由于冲击力的作用使焊缝表层金属发生了剧烈的塑性变形, 晶粒逐渐细化, 并在焊缝中造成微观应力, 致使粒子晶格发生畸变。

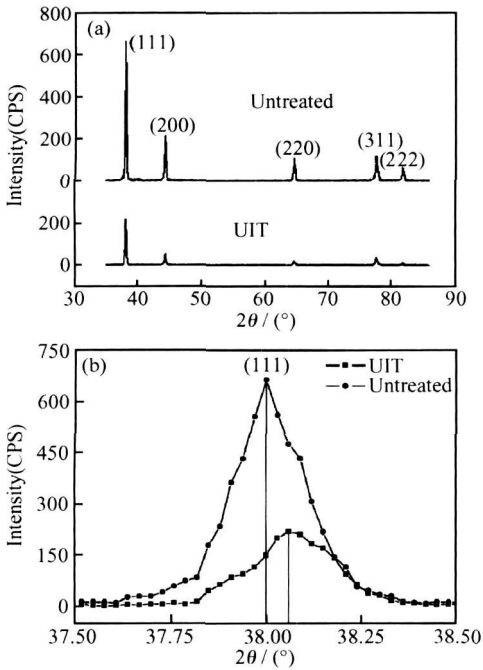


图 2 UIT 前后焊缝 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of welded zone before and after UIT

为了证明超声冲击处理使 2A12 铝合金焊缝表层材料产生晶粒细化的效应, 对测得的 XRD 数据进行了计算分析。用 XRD 测定超微粒子的衍射峰形时, 晶粒细化和点阵畸变所引起的宽化量 $\beta_1(2\theta)$, $\beta_2(2\theta)$ 可分别用谢乐方程 (1) 和威尔逊公式 (2) 表示为^[11, 12]:

$$\beta_1(2\theta) = \frac{K\lambda}{d \cos\theta} \tag{1}$$

$$\beta_2(2\theta) = 4\varepsilon \tan\theta \tag{2}$$

式中: $\beta_1(2\theta)$ 和 $\beta_2(2\theta)$ 分别为晶粒细化和点阵畸变所引起的衍射峰宽化。 θ 是 Bragg 角; d 是多晶体粒子平均粒径; λ 是入射 X 射线波长; ε 是粒子平均应变值; K 是常数, 衍射峰宽以半峰宽计算时 $K = 0.9$, 衍射峰宽以积分宽计算时 $K = 1$ 。

晶粒细化和点阵畸变对入射 X 射线衍射峰宽度的影响还与衍射峰形状有关。如果受宽化效应影响的衍射峰为柯西函数曲线形状^[13], 衍射峰的总宽度为两

种衍射宽度的代数和。如果衍射峰为高斯函数曲线形状, 衍射峰的总宽度为两种衍射宽度的方根值。实验证实应用理学 D8 Advance 型 X 射线衍射仪测得的晶体粒子的衍射峰近似为柯西函数曲线形状。因此, 上述两种衍射峰宽化产生的总衍射宽度 $\beta(2\theta)$ 等于:

$$\beta(2\theta) = \beta_1(2\theta) + \beta_2(2\theta) \tag{3}$$

令 $X = 2\sin\theta/\lambda$ $Y = \beta(2\theta) \cos\theta/\lambda$ $K = 0.9$ 由式 (1), (2), (3) 合并整理可得:

$$Y = \frac{0.9}{d} + 2\varepsilon X \tag{4}$$

利用 X 射线衍射仪测定衍射峰宽度数据, 以 $X = 2\sin\theta/\lambda$ 为自变量, 计算出 5 个衍射峰的 X 值。根据 $Y = \beta(2\theta) \cos\theta/\lambda$ 计算与 X 值相对应的 Y 值, 可以作出如图 3 所示 $Y-X$ 直线图。进行线性拟和得出直线方程是 $Y = 0.9/123 + 0.00268X$ 。根据直线方程的截距计算出超声冲击处理后 2A12 铝合金焊接接头表层粒子粒径约为 123nm。由直线斜率得出平均微观应变为 0.134%。

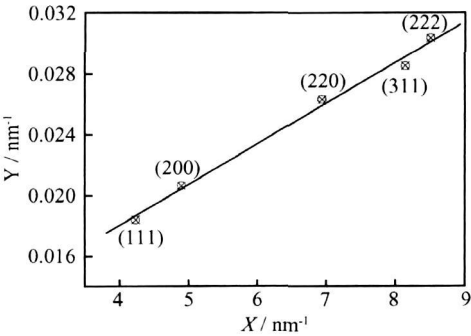


图 3 UIT 后焊缝的 X-Y 图

Fig. 3 X-Y plot of welded zone after UIT

以上分析计算结果定量地证明了超声冲击处理使 2A12 铝合金焊缝表层材料产生了明显的晶粒细化和点阵畸变。晶粒越细小, 越难造成裂纹形核所需要的应力集中, 同时晶粒细化和点阵畸变的增加, 会限制和阻碍晶粒中位错的移动, 抑制裂纹扩展, 这些都有利于提高晶体的滑移阻力, 延长裂纹成核扩展的寿命, 从而提高材料的抗断裂性能。

2 3 晶粒细化机理分析

超声冲击是利用超声变幅杆驱动冲击针产生往复的机械运动对焊接接头表面进行高速冲击, 使焊缝表层金属发生强烈的塑性变形。铝合金具有面心立方晶体结构, 层错能很高。塑性变形时, 在外加载荷作用下, 因位错开动所需要的临界力小于孪生, 其主要塑性变形机制是位错滑移, 主滑移系由 {111} 滑移面和 $\langle 110 \rangle$ 滑移方向组成, 共 12 个滑移系。冲击处理时, 材

料表层位错密度增高,当位错密度达到一定程度时,产生位错的湮灭和重组,为降低结构的能量,源源不断的位错沿着滑移面运动,由于多滑移系的开动,在不同滑移面上运动着的位错必然相遇,并发生相互交割、缠结形成位错胞。随着变形量的继续增大,位错胞数量增加,尺寸减小,最终变为均匀细小亚晶或晶粒。

以上分析表明,超声冲击处理使焊接接头表层金属产生剧烈的塑性变形,位错增殖、滑移、交割和缠结最终导致晶粒细化和点阵畸变增加。

3 结论

(1) 通过超声冲击处理,2A12 铝合金配用 ER5356 焊丝焊缝表面能够形成了致密的塑性变形层,消除了表层的气孔、缩松等微观缺陷。

(2) 超声冲击处理后衍射峰明显宽化,强度减弱。同时,衍射峰向高衍射角方向移动。证明了 UIT 后晶粒的细化和微观应变的增加。实验和计算表明,UIT 后 2A12 铝合金焊缝表面晶粒尺度约为 123nm,平均微观应变为 0.134%。

(3) 剧烈的塑性变形导致位错增殖、滑移、交割和缠结是超声冲击处理铝合金焊接接头晶粒细化的主要微观机制。

(4) 超声冲击处理使焊缝表面形成致密的塑性变形层,气孔、缩松等缺陷减少,晶粒明显细化、晶界稠化和点阵畸变的增加,会有利于提高焊接接头的抗疲劳性能。

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] 范成磊,方洪渊,田应涛,等. 随焊冲击碾压对 LY12CZ 铝合金接头组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2004, (6): 24- 28.
- [3] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] 张文博,徐开国,张汝春. 焊接接头疲劳强度的研究及其工艺的改进[J]. 煤矿机械, 2005, 3: 70- 73.
- [5] 王炳英,霍立兴,王东坡,等. 等离子喷涂法改善焊接结构的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 97- 100.
- [6] BOHDAN N MORDYUK, GEORGIY I PROKOPENKO. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 308: 855- 866.
- [7] AN X, RODOPOULOS C A, STATNIKOV E S, et al. A study of the surface nanocrystallization induced by the resonant ultrasonic impact treatment on the near surface of 2024-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(3): 355- 364.
- [8] CHANG MIN SUH, GIL HO SONG, MIN SOO SUH, et al. Fatigue and mechanical characteristics of nanostructured tool steel by ultrasonic cold forging technology [J]. Materials Science and Engineering, 2007, 443: 101- 106.
- [9] SOUGATA ROY, JOHN W FISHER, BEN TYEN. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1239- 1247.
- [10] 王东坡,霍立兴,张玉凤,等. 超声冲击法改善 LF21 铝合金焊接接头的疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 5: 754- 759.
- [11] ATEF KORCHEF, YANNICK CHAMPION, NABIL NJAH. X-ray diffraction analysis of aluminum containing Al8Fe2Si processed by equal channel angular pressing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427: 176- 182.
- [12] 丛秋滋. 多晶二维 X 射线衍射[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [13] 刘存业,刘荣泰,邓昭镜,等. α -三氧化二铁磁性超微粉粒粒分析[J]. 西南师范大学学报, 1990, 15(1): 57- 60.
- [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] 范成磊,方洪渊,田应涛,等. 随焊冲击碾压对 LY12CZ 铝合金接头组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2004, (6): 24- 28.
- [5] KRISHNASWAMY R K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high density polyethylene (HDPE) pipes [J]. Polymer, 2005, 46: 11664- 11672.
- [6] 李明,温茂萍,何强,等. TABA 基高聚物粘结炸药的蠕变特性研究[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 150- 153.
- [7] DEAN G D, BROUGHTON W. A model for non-linear creep in polypropylene [J]. Polymer Testing, 2007, 26: 1068- 1081.
- [8] 罗文波,杨挺青,安群力. 非线性粘弹体的时间-温度-应力等效原理及其应用[J]. 固体力学学报, 2001, 22(3): 219- 224.
- [9] 王初红,罗文波,赵国荣,等. 应力对聚丙烯蠕变行为的时间-温度等效性的影响[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2006, 28(4): 31- 34.
- [10] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [11] 刘伟,高宗战,岳珠峰. MDYB-3 有机玻璃疲劳性能温度效应研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 874- 876.

基金项目: 留学回国人员科研启动基金 教外留司[2005]373

收稿日期: 2008-04-01; 修订日期: 2008-07-20

作者简介: 朱有利(1962—),男,教授,从事材料疲劳断裂和装备延寿技术研究,联系地址:北京市丰台区杜家坎21号装甲兵工程学院表面工程研究所(100072),E-mail: lizhanming1@163.com

基金项目: 863 项目(2007AA04Z404)

收稿日期: 2008-04-16; 修订日期: 2009-03-17

作者简介: 刘伟(1981—),男,讲师,博士研究生,主要从事疲劳和断裂方面的研究,联系地址:西北工业大学410信箱(710072),E-mail: lw_npu@mail.nwpu.edu.cn