

新型铝合金板材双面焊接头性能研究

孙建通, 李晓延, 张亮, 充文涛, 杨秦政

(北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 针对一种新型 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行双面 MIG 焊接, 观察接头部位组织形貌, 并进行显微硬度测试, 然后基于 visual-weld 进行温度场的仿真计算, 建立接头部位温度场与组织形貌和硬度的关系。然后采用 X 射线法对焊件进行残余应力测试。结果表明, 焊缝中心为粗大等轴树枝状晶, 靠近熔合线存在一个细晶层, 在细晶层内侧为典型的联生结晶形貌, 熔合线外侧出现部分晶界重熔; 焊接件残余应力较小, 两端应力分布趋势相反, 其它部位分布基本相同。由于温度循环和 η 相的影响, 在接头热影响区位置, 硬度值明显高于母材和焊缝。

关键词: 双面 MIG 焊接; Al-Zn-Mg-Cu 合金; 残余应力; 微观形貌; 显微硬度

中图分类号: TG457.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2607-06

随着现代工业的发展, 铝合金材料已经成为车辆、船舶、航天飞行器及化工、电力和机械等行业主要的结构材料之一^[1-4]。在铝合金的应用中, 焊接逐渐成为一种主要的连接工艺, 且应用也越来越多^[5,6]。

在铝合金焊接中, 温度场的变化影响着焊接残余应力、接头组织等变化, 这些因素又影响着接头的力学性能, 进而对工件服役的可靠性能产生影响。因此准确地掌握温度场与接头组织及性能的对应关系, 可以对焊接结构件的使用性能和寿命有很好的预测^[7-9]。

本实验针对一种高强可焊 Al-Zn-Mg-Cu 厚板合金进行双面 MIG 焊接, 并分析接头性能, 研究焊接热循环峰值温度和接头不同区域组织的分布, 分析二者之间的关系。然后对焊接件进行焊接应力和显微硬度测试研究, 分析热循环温度对力学性能的影响, 进而为厚板铝合金构件 MIG 焊接及应用提供参考。

1 实验

所用母材为挤压态 7E75 铝合金, 板材尺寸为 200 mm × 100 mm × 13 mm, 所用焊丝为自行研制的 Al-Mg 合金焊丝。母材及焊丝的化学成分如表 1 所示^[10]。

表 1 母材与焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base and filler material							
	Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Er	Al
Base metal	7.50	3.00	0.70	0.60	0.20	0.15	Bal.
Wire	-	4.70	-	0.70	0.10	0.30	Bal.

铝合金板材在焊接过程中选择刚性固定, 焊接结束后, 原有约束撤去, 对板块进行部位位置防止变形的刚性固定。坡口形式为 X 型坡口, 采用半自动 MIG 双面焊接。具体的焊接工艺参数如表 2 所示。

本实验中残余应力的测试采用加拿大 PROTO 公司生产的 iXRD 应力分析仪, 对焊件不同位置进行应力大小和分布测试, 然后对其分布进行总结和分析。测试前应对焊件测试位置进行电解抛光以消除其它因素引入的应力。电解液成分为单酞烯乙二醚:高氯酸:乙醇=1:2:7, 抛光电压为 25 V, 时间为 30 s。应力测试参数为: 准直器直径 2 mm, 曝光时间 2 s, X 射线入射角 ψ_0 分别为 $\pm 30.00^\circ$, $\pm 20.55^\circ$, $\pm 16.19^\circ$, $\pm 8.69^\circ$, $\pm 0.34^\circ$ 和 0.00° ^[11]。测试点布置如图 1 所示。

焊后在垂直于焊缝的方向上截取金相试样, 经机械打磨并抛光后使用 Kerll 试剂侵蚀接头, 然后在 OLYMPUS-BX51M 型金相显微镜下观察金相组织; 然后采用 HXD-1000TM/LCD 型数显硬度仪对接头横截面进行显微硬度测试, 加载力为 29.4 N, 加载时间为 10 s。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of MIG welding					
No.	Voltage/ V	Current/ A	Wire speed/ mm s ⁻¹	Weld speed/ mm s ⁻¹	Gas flow/ L min ⁻¹
1	25	240	100	5	15
2			Cooling 100 s		
3	25	250	100	5	15

收稿日期: 2016-09-03

基金项目: 国家“973”项目资助(2012CB619503)

作者简介: 孙建通, 男, 1988 年生, 硕士, 北京工业大学材料学院, 北京 100124, E-mail: sunjiantong2013@163.com

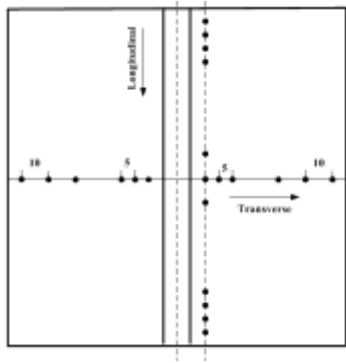


图 1 焊接板件测试点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram for residual stress measurement of Butt-welding

最后采用 Visual-weld 对焊接过程进行仿真计算, 分析焊缝及附近区域的温度变化, 然后根据不同区域的温度变化对焊接接头组织和力学性能进行相关分析^[12,13]。

2 实验结果

2.1 接头温度场

图 2 为焊件正反面垂直于焊缝方向不同位置点在焊接过程中的最高温度。图中可以看出, 在焊接过程中随着到焊缝中心距离增加, 测试点最高温度急剧下降, 当距离增加到一定范围时, 最高温度变化趋于稳定。在焊件进行正反两面焊接时, 由于二者之间存在顺序区别, 所以不同位置点经历的温度循环也存在差异。

本实验所用材料的液相线温度约为 630 °C, 根据图中最高温度在垂直于焊缝方向位置的变化, 大致可以推出不同焊接面焊缝的宽度。在正反两个焊接面的焊缝宽度分别约为 16 和 19 mm, 与实际焊件焊缝宽度基本一致。同时, 焊接材料固相线温度为 535 °C, 图

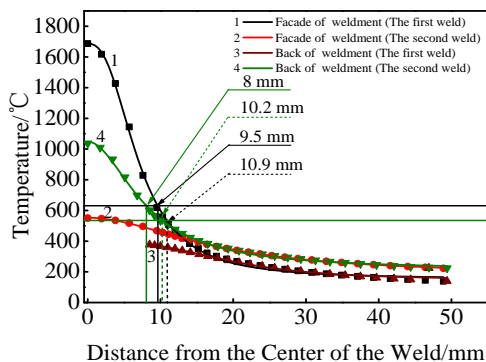


图 2 距离焊缝中心不同距离点的最高温度

Fig.2 Highest temperature of points in difference distances to weld seam

中两个焊接面上该温度点对应的点的位置距焊缝中心分别为 10.2 和 10.9 mm, 因此可以理解为两个焊接面发生部分重熔的范围大致为距焊缝中心 8~10.2 mm 和 9.5~10.9 mm。

2.2 接头微观组织

图 3 为焊件正面的微观组织形貌图。图 3a 为焊缝中心组织, 可以看出该区域组织形貌为树枝状等轴晶。该区域范围内, 焊接熔池凝固过程中, 形成了以 Al_3Zr 为质点的核心, 逐渐形核并长大; 同时由于该区域内温度梯度比较小, 各个方向基本一致, 因此晶粒长大无明显择优取向, 只在尺寸上存在一定差别, 平均尺寸约为 50 μm 。图 3b 为焊接热影响区的金相组织。图中大致可以分为 3 个区域, 联生长区 (熔合线以里范围)、细晶区和部分重熔区。在联生长区, 由于热量传递的方向性, 晶粒沿垂直于熔合线方向呈柱状晶生长且晶粒比较粗大。细晶层宽度约为 40~50 μm , 该区域内由于半熔化的母材、微量元素和激冷的作用, 晶粒呈等轴状, 尺寸比较小, 约为几个微米。半熔化区由于靠母材受焊接热循环作用, 峰值温度超过固相线温度, 出现部分的重熔现象, 与基体轧制的组织混合分布, 呈现出一定的不均匀性, 随着远离焊缝组织, 母材的重熔减弱和消失。

图 4 为背面焊缝的微观形貌。图 4a 为焊缝组织, 相比于正面焊缝, 该区域的组织更为粗大, 树枝状形貌更加明显, 晶粒尺寸约为 70 μm 。图 4b 为热影响区的微观形貌。图中可以看出, 该部位的联生结晶区的

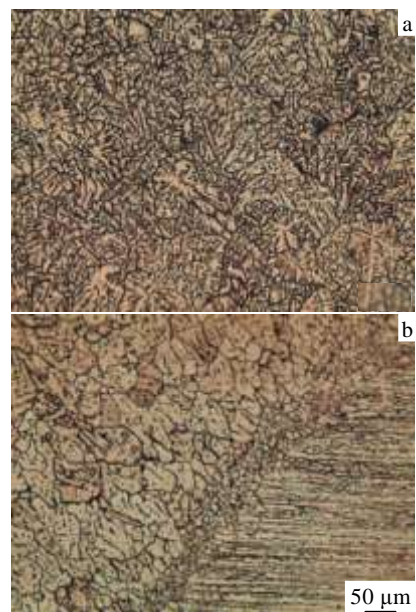


图 3 第 1 道焊缝组织形貌

Fig.3 Microstructures of the first weld seam: (a) center of weld seam and (b) HAZ

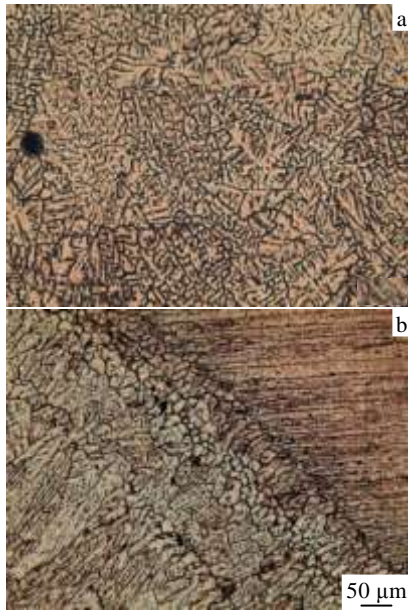


图 4 第 2 道焊缝组织形貌

Fig.4 Microstructures of the second weld seam: (a) center of weld seam and (b) HAZ

联生结晶特征更加明显，组织更加粗大。细晶层较窄，只有几微米宽，相对于第 1 道焊缝，该位置晶粒尺寸较大。靠近焊缝的母材区域，发生部分重熔的区域和第一道焊缝基本一致，与未熔化的母材混合分布，随着到焊缝距离的增加，重熔效果逐渐减弱。

2.3 残余应力分布

2.3.1 焊件纵向上应力分布

在焊接件的纵向上，由于焊缝表面存在余高及较为粗糙，因此测试点的位置平行焊缝且距焊缝中心位置约 15 mm，焊接件的正反面的测试点分布相同。残余应力的测试结果分别如图 5 和 6 所示。

图 5 为纵向应力沿焊件纵向的分布曲线。由图可

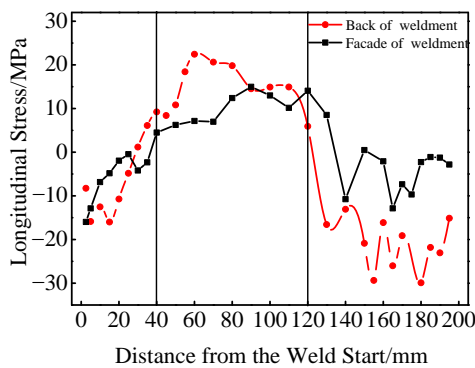


图 5 纵向应力沿焊件纵向分布

Fig.5 Longitudinal stresses distribution along longitudinal

direction of weldment

知，在焊件正、反面，无论是焊接件中间位置还是端部，焊接产生的应力值的大小和分布规律都不同于单层焊接。在两端部位，应力值波动明显且规律性较差，正面和背面的焊接残余应力的变化规律呈反向变化趋势，这种现象在熄弧端更加明显，应力值相对于起弧端较大，约为 30 MPa 的压应力。在中间部位，背面应力值略大于正面，应力分布较稳定，存在一定范围的稳定区间，应力稳定区间为距焊缝起弧端 45~120 mm。

图 6 为横向应力沿焊件纵向分布曲线。由图中可以看出，测试得到的横向应力分布与测试点的纵向应力分布基本相同。不同的是在应力稳定分布段，正面应力为较小的拉应力，值约为 0~20 MPa；在焊接板件背面，应力表现为压应力，值约为 20 MPa，分布趋势与正面基本一致。在焊接板件两端部位，两个焊接面的应力存在很大差异，在背面存在一定范围的应力增大区域，最大可达 100 MPa；在焊接件的正面，应力存在一定的变化，但是变化较小，应力值约为 40 MPa。在中间部位，正面应力值基本上小于背面，相差最大约为 30 MPa；在两端部位，横向应力值相差较大，约为 80 MPa。

2.3.2 焊件横向上应力分布

图 7 和图 8 是残余应力在焊件横向的分布曲线。由图中可知，在焊件该方向上，横、纵向应力的值都相对较小，二者的分布规律也存在差别。

图 7 为纵向应力沿焊件横向的分布曲线。根据纵向应力在该方向随测试位置的变化，大致可以将应力分布分为两个区域，即应力变化区域（距焊缝中心 10~40 mm）和应力稳定区域（距焊缝中心 40~100 mm）。在应力变化区域，应力随测试点位置远离焊缝中心而减小，并逐渐由拉应力转变为压应力，转变位置约为距焊缝中心 20 mm 处。在应力稳定区域，应力值变化较小，且背面应力略大于正面，约为 30 MPa 的压应力。

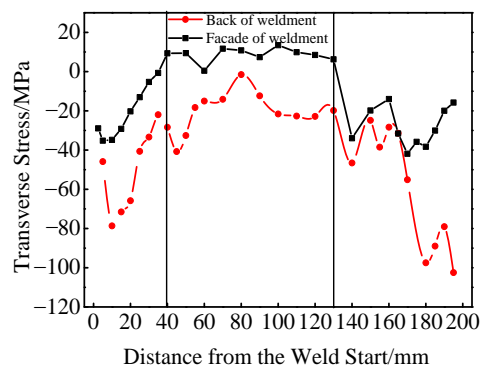


图 6 横向应力沿焊件纵向上的分布

Fig.6 Transverse stress distribution in longitudinal direction of weldment

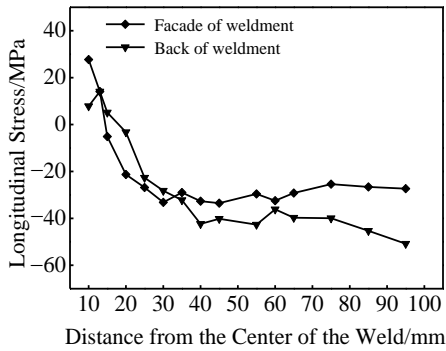


图 7 纵向应力沿焊件横向的分布

Fig.7 Longitudinal stresses distribution in transverse direction of weldment

横向应力在焊件横向的分布规律较差(如图 8 所示),根据应力的分布,大致将应力分布分为两个区域,应力波动区(距焊缝中心 10~25 mm)和应力减小区(距焊缝中心 25~100 mm)。在应力波动区,应力大小随测试点位置的变化规律性较差,而在应力减小区域,随着测试点向焊件边缘移动,应力逐渐减小,在焊件边缘部位,正反面应力分别约为 10 和 30 MPa 的压应力。

2.4 接头显微硬度

图 9 为垂直于焊缝方向的显微硬度分布曲线。图中可以看出,在不同部位,由于受焊接热过程的影响不同,显微硬度也不同。在焊缝部位,正反面的硬度都基本一致,值为 1000 MPa 左右。在随着测试点远离焊缝中心,硬度值迅速增大,这种变化在焊缝正面发生在距焊缝中心 7.0 mm,焊件背面发生在距焊缝中心 6.5 mm 位置,分别在距焊缝中心 9 和 7.5 mm 处达到最大值。在热影响区,正反面硬度值都增大,该区域正面硬度值平均可达到 1500 MPa,在背面,硬度值较小,为 1200~1300 MPa。当测试点在正反面位置距

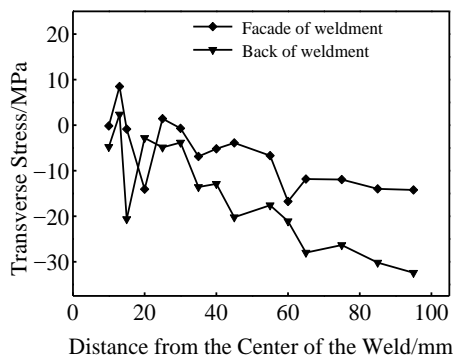


图 8 横向应力沿焊件横向的分布

Fig.8 Transverse stresses distribution in transverse direction of weldment

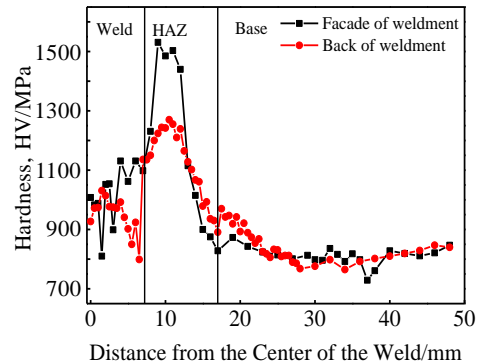


Fig.9 接头部位硬度分布

Fig.9 Distribution of hardness in weld joint

焊缝中心为 12 mm 时硬度降低,当距焊缝中心约为 17 mm 时基本不再变化。在母材区域,正反面的硬度分布几乎相同,不随测试点位置的变化而变化,其值约为 80 MPa。

3 分析与讨论

3.1 接头组织形貌分析

在焊接接头部位,焊缝和熔合线附近组织粗大,分别表现为等轴树枝晶和柱状树枝晶;在靠近熔合线的焊缝侧,还存在一定宽度的细晶层,熔合线另一侧的 HAZ 区域,出现了部分的重熔现象。

这是由于在焊接过程中,熔池存在剧烈的搅拌,其温度梯度较小,无明显的择优散热方向,同时由于焊材中含有微量稀有元素提供了形核质点,所以在该区域晶粒形貌表现为等轴树枝状晶。在熔合线附近,热量扩散的方向性比较明显,垂直于熔合线方向上温度梯度比较大,晶粒沿该方向快速定向长大。细晶层的形成基于焊接过程中融化金属凝固时半熔化的 HAZ 区域提供了形核依附点,同时该区域存在较大的过冷度,这些晶核迅速长大并相互接触,因此方向性比较弱。在焊件靠近熔合线的热影响区,由仿真计算可知,该范围的温度可达 550 °C,超过了母材的固相线温度,会发生部分的重熔。

3.2 接头力学性能分析

对比分析纵、横向应力在焊件纵向的分布,可以看出,焊件的中间部位,应力值比较小,分布相对稳定,正反面的稳定区间基本相同,约为距离起弧端 40~170 mm。在焊缝的两端部,应力的规律性比较差,而且横向应力值比较大,表现为 100 MPa 左右的压应力,且正反面的差值较大;纵向应力的规律性较差,

且二者的分布规律基本相反。

这是由于在第2道焊接进行时, 前一道焊缝已经冷却至 100 °C 左右, 在第2道焊后冷却时, 第1道在承受热处理的同时对第2道的变形存在约束作用。此外, 对比分析两个焊接面的应力分布可知无论是先焊接的正面还是后焊接的背面, 纵向应力值的大小和分布趋势基本相同, 在一定的长度范围内变化较小, 但是在焊接件的端部, 应力随着测试点的变化规律性较差, 且在焊接件的两个面上, 应力变化呈反向趋势。

该区域在焊接过程中经历的温度循环比较复杂, 在焊后冷却阶段塑性变形比较大, 应力分布出现波动。该区域在该方向上不同位置的温度循环不同, 随着测试点向外移动, 经历的温度变低, 在冷却阶段变形比较小, 所以应力随着测试点外移而减小; 该区域内温度变化不明显, 所以应力变化不大。

该区域由于焊接过程经历的温度循环和焊后的塑性变形的大小不同, 因此不同位置应力变化较大, 随着测试点外移, 应力逐渐较小, 然后变为压应力, 再慢慢增大。

综合接头部位不同位置最高温度和硬度分布可知, 在焊件正面距焊缝中心 7.0 和 17.2 mm 位置, 两点在第1道焊接中最大温度 913.2 和 296.2 °C, 在第2道焊接时此位置最大温度 499.8 和 370.7 °C; 在焊件背面, 距焊缝中心 6.5 和 23.0 mm 的位置, 焊接过程中最高温度分别为 700.0 和 311.2 °C。

在接头部位, 焊缝区由于温度梯度等原因, 晶粒组织表现为近似铸态的粗大等轴晶; 微量元素的平衡系数 < 1 , 形核结晶长大时在晶界界面处析出 Al-AlZnMgCu 的离异共晶相, 从而使合金元素在焊缝区分布不均匀, 造成该区域硬度较低。在热影响区, 不同区域的最高温度及温度变化不同, 在靠近熔合线内侧, 由于存在微量元素作为形核质点和较大的过冷度而形成细晶层; 在熔合线外侧, 焊接热循环峰值温度较高的变化和合金元素含量较大, 使得该区域中原有的沉淀相出现了固溶或部分固溶, 使得该区域的硬度值较大。由 X. J. Wu 等人研究可知, 在 7XXX 系铝合金中, 当经历最高温度达到 389.85 °C 时, 合金 η 相溶解^[14,15], 温度低于该温度时, η 相不发生变化, 在热影响区外侧母材区, 整个焊接过程中热循环温度较低, 材料的力学性能几乎不发生变化。

4 结 论

1) 铝合金 MIG 焊接中, 前一道焊接对后一道起一定的预热, 后一道焊接对前一道焊接起到 400~500 °C 的后热作用。

2) 铝合金 MIG 焊接中, 由于热输入及散热的影响, 接头部位组织异常, 焊缝组织粗大, 靠近熔合线的焊缝侧联生结晶晶粒尺寸达 50 μm 以上。

3) 对于双面焊接件, 无论是纵向应力还是横向应力, 相对于单道焊接, 其应力值都比较小, 且焊后的应力基本表现为压应力, 只存在部分小范围区域的较小的拉应力。

4) 在双面焊接平行于焊缝方向, 两个面的焊接应力稳定区域、应力大小基本相同。垂直于焊缝方向上, 靠近焊缝部位, 纵、横向应力随测点距离的变化规律相同; 当测试点位置距焊趾距离达到一定值时, 应力的变化规律相反。

5) 在焊接接头部位, 显微硬度分布异常, 两个焊接面的热影响区范围基本相同。受析出相分布和含量的影响, 在靠近熔合线的附近区域显微硬度偏高。

参考文献 References

- [1] Tang Yuanjing(唐远景), Huang Wei(黄伟). *Light Metal*(轻金属)[J], 1994(5): 61
- [2] Ma Mingtu(马鸣图), Li Zhigang(李志刚), Yi Hongliang(易红亮) et al. *World Non-ferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2006(10): 10
- [3] Wang Enming(王恩明), Zheng Zan(郑赞), wang Liqiang(王立强). *Proceedings of the Eleventh National Welding Conference*(第十一次全国焊接会议论文集)[C]. Harbin: Welding, 2006: 10
- [4] Zhou Wansheng(周万盛), Yao Junshan(姚军山). *Welding of Aluminum or Aluminum Alloy*(铝及铝合金的焊接)[M]. Beijing: China Machine Press, 2006
- [5] Gene Mathers. *The Welding of Aluminum and Its Alloys*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002
- [6] Lee Y L, Pan J, Hathaway R et al. *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*[M]. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- [7] Totten G, Howes M, Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*[C]. Ohio, ASM International, 2002: 27
- [8] Adamowski J, Gambaro C, Lektora E et al. *Archives of Materials Science and Engineering*[J], 2007(28): 453
- [9] Prime M B, Thomas G H, Baumann J A et al. *Acta Materialia* [J], 2006, 54(15): 4013
- [10] Nie Zuoren(聂祚仁), Chen Ziyong(陈子勇), Mo Yuanke(莫远科) et al. *China Patent*(中国专利), 201010596991.6[P], 2010
- [11] Li Qingqing(李庆庆). *Study on Residual Stress Measurement of Aluminum Alloy Welding Joints*(轻金属焊接接头 X 射线

- 残余应力测试技术研究)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013
- [12] J Edwin Rajad, Somasundaram K. *Materials and Manufacturing Processing*[J], 2011, 26: 942
- [13] Cao Shufen(曹淑芬), Chen Tieping(陈铁平), Yi Jie(易杰). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(7): 1685
- [14] Wu X J, Koul A K, Zhao L. *Canada Aeronautics and Space Journal*[J], 1996, 42(2): 93
- [15] Fu Gaofeng, Tian Fuquan, Wang Hong. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006(180): 216

Performance of a New Aluminum Alloy Joint with Butt-Weld

Sun Jiantong, Li Xiaoyan, Zhang Liang, Yan Wentao, Yang Qinzheng

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A new type Al-Zn-Mg-Cu alloy was welded using Tungsten Inert Gas welding method. Microstructures and microhardness of the joint were analyzed. The relationship of the temperature with microstructure and microhardness was established based on the simulation result of the temperature field through the Visual-weld. At last, the residual stress was tested by the X-ray diffraction method. The results show that microstructure in the weld seam is a coarse equiaxed grain zone (EQZ). That zone close to the fusion line is an equiaxed grain zone with small size, which is as called Fine-Grain Layer. For the Fine-Grain layer, microstructure exhibits epitaxial solidification morphology. However, partial grain boundary re-melt appears outside of fusion line. Residual stress in the weldment is small and has almost the same distribution in the stable forming segment of weld seam. However, it has an inverse distribution in the front end of weld seam. With the influence of temperature curve of welding and η phase, microhardness in the hot affected zone is bigger than that in other zones in the weldment.

Key words: Butt-weld of MIG; Al-Zn-Mg-Cu alloy; residual stress; microtopography; microhardness

Corresponding author: Sun Jiantong, Master, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: sunjiantong2013@163.com