第35卷第11期 焊 接 学 报 Vol. 35 No. 11
2014年11月 TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION November 2014

铝合金活性 MIG 焊接电弧行为及微观组织分析

路 浩[1]， 邢立伟[1]， 梁志敏[2]
(1. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司技术本部，青岛 266111；
2. 河北科技大学 材料科学与工程学院，石家庄 054300)

摘 要： 提出了活性熔化极气体保护焊新方法，可增加焊接熔深，改善难熔焊接结构的熔合不良，获得高质量的焊接接头. 对铝合金活性熔化极气体保护焊电弧状态进行了分析，发现活性熔化极气体保护焊电弧收缩，电流密度提高. 对铝合金活性熔化极气体保护焊焊接接头微观组织进行了分析，与熔化极气体保护焊方法相比，结果表明，透射电镜和面扫描分析表明活性剂的添加没有改变强化相的种类，不会影响焊缝中各种组元的成分含量，同时也对 Mn，Cr，Ti 等元素的分布没有影响.

关键词： 活性熔化极气体保护焊；铝合金；电弧形态；接头组织
中图分类号： TG 444 **文献标识码：** A **文章编号：** 0253－360X(2014)11－0001－04

0 序 言

活性 TIG 焊(activating flux TIG welding)方法，自20世纪60年代中期乌克兰巴顿焊接研究所发明以来已应用于焊接碳钢、不锈钢、镍基合金及钛合金等多种材料. 但是活性 TIG 焊接方法局限于非熔化极气体保护焊，焊接效率较低. 国内外众多研究机构对活性 TIG 焊接方法的机理开展了大量研究，主要提出了电弧收缩理论，表面张力两种观点. 且对接头组织的影响研究较少[1-7].

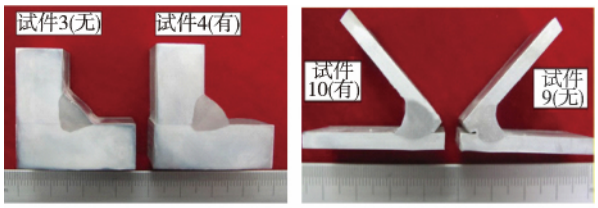
活性 MAG/MIG 焊接方法是一种可以提高焊接效率，提高焊接质量，降低焊接成本的高效优质焊接方法，把活性焊接技术推广到了熔化极气体保护焊领域[8]. 由于铝合金在焊接的过程中，焊缝组织容易受到热输入与微量元素的影响，铝合金的焊接对环境及层间、焊道要求较为洁净. 在活性 MIG 焊接时，氧化物及氟化物的加入，是否会对接头组织产生不良的影响，这对于活性 MIG 焊的实际应用具有重要的现实意义.

文中通过对铝合金活性 MIG 焊接过程电弧行为和接头微观组织的分析，研究了铝合金活性 MIG 焊接电弧特征和焊接接头微观组织. 结果表明透射电镜和面扫描分析表明活性剂的添加没有改变强化相的种类，不会影响焊缝中各种组元的成分含量.

收稿日期： 2013－06－16
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51005069)；四方股份工艺开发资助项目(2012069)

1 A-MIG 焊接工艺

通过大量试验开发了多种适用于熔化极气体保护焊的多组分活性剂[8]. 活性 MIG 焊工艺是在传统 MIG 焊前将很薄的一层表面活性剂涂敷在施焊板材表面、坡口或焊缝层间，然后进行焊接，在保证焊缝质量的基础上，可以增加熔深，提高效率，降低焊接热输入. 在相同间隙、电流等焊接工艺参数下活性 MIG 焊与 MIG 焊的焊接接头宏观对比见图1.



(a) T形接头 (b) 难可达锐角接头

图1 活性 MIG 焊接熔深
Fig. 1 Macroscopic morphology of A-MIG and MIG

图1a为12 mm板厚T形接头，活性剂添加的试件4，焊缝在立板的熔深明显增加. 焊缝与两侧母材熔合良好，渗透检测未发现气孔、夹渣等缺陷.

图1b为45°锐角焊接接头，其中编号为试件9未涂覆活性剂，编号为试件10涂覆活性剂. 锐角焊接结构由于焊枪可达性不好，可能会导致未熔合等焊接缺陷. 可以看到，虽然试件9和试件10都没有焊透，但是活性 MIG 焊试件10的背部熔透情况有明

显改善.

2 A-MIG 焊接电弧特征

2.1 焊接电弧分析试验

为了观察与分析活性 MIG 焊的电弧形态及电信号的影响,建立了电弧及电信号采集分析系统,此系统主要由工控机、电流传感器、电压传感器及 CCD 等设备组成. 系统结构如图 2 所示.

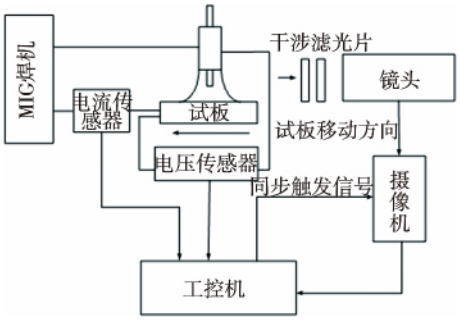


图 2 电弧及电信号采集分析系统

Fig. 2 Schematic diagram of experiment

活性 MIG 焊接电弧形态的采集主要采用平板堆焊的方式进行,在平板一半区域涂覆活性剂,另一半未涂覆活性剂,采集整个焊接过程中焊接电弧形态的动态变化特征.

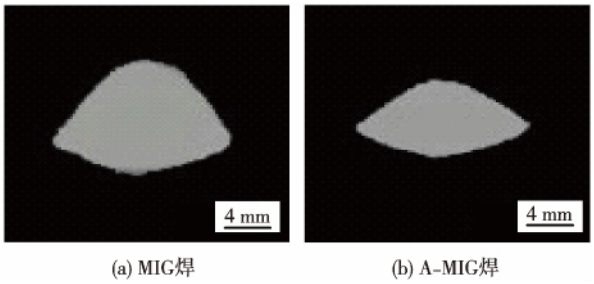
试验选用 6 mm 厚 7N01 铝合金板材加工成 150 mm × 60 mm 试块,采用萨福 ER5356 焊丝. 焊前用不锈钢电动钢丝刷对待焊部位进行仔细清理,之后再用丙酮清洗,最后在自动焊接平台上进行焊接. 保护气体选用纯氩气体,焊丝直径 1.2 mm,保护气体流量 15 ~ 16 L/min.

2.2 焊接电弧形态

采用上述试验方法对不同电流下的电弧正面形态进行的采集大量图片,去噪、阈值化处理后如图 3 所示,可见在活性剂涂覆条件下,电弧形态有一定程度收缩. 通过有无活性剂覆盖焊接过程电弧瞬时形态对比可以看出,跟未涂活性剂的焊接电弧相比,涂有活性剂的电弧在宽度上变化不大,但在高度上明显减小,也即活性 MIG 焊接时,电弧高度显著的降低.

为了更好地说明活性剂对焊接过程的影响,以采集到的电弧形态图为基础,对其进行拟合,研究活性剂对堆焊电弧的体积及热流分布行为影响. 焊接电弧拟合示意图如图 4 所示.

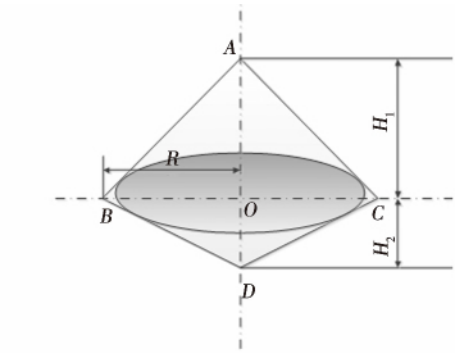
将电弧加热行为近似看作双圆锥形热源,假设电弧温度一致,活性剂的存在对焊接过程中电弧加



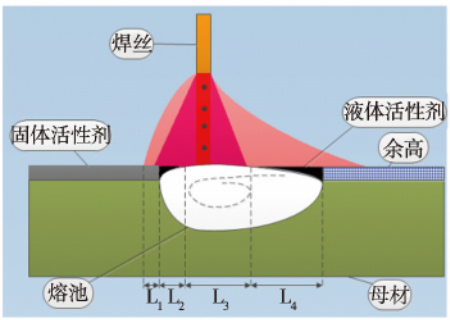
(a) MIG焊 (b) A-MIG焊

图 3 焊接电弧形态对比

Fig. 3 Arc morphology of A-MIG and MIG



(a) 双圆锥形体热流拟合示意图



(b) 阴极斑点区域电弧收缩示意图

注: L_1 为在外围低温电弧作用下未熔化的活性剂; L_2 为覆盖在熔池外围区域的液态活性剂; L_3 为中心高温电弧区; L_4 为即将成为熔渣的液态活性剂层

图 4 电弧模型

Fig. 4 Arc model of A-MIG

热行为具有明显影响,从而直接影响了焊接过程中的热流行为. 假设焊接过程中热效率为 η(取 0.7),焊接电流为 I,电弧电压为 U,假设热流分布均匀,O 点的热流密度可以按照下列公式求出,即

$$Q_0 = \frac{\eta UI}{v} \tag{1}$$

其中

$$v = \frac{\pi}{12}(2R)^2(H_1 + H_2) \tag{2}$$

式中: R 为半径; H_1 为上锥体高度; H_2 为下锥体高度. 使用活性剂的条件下,电弧体积明显缩小,O 点热流密度显著增加,经过计算活性 MIG 焊相对 MIG 焊 O 点热流密度可增加 32% 左右.

试验使用的液态活性剂的密度都小于液态铝合金,且液态活性剂都不与熔池发生作用(图 4b). 所以熔化后的液态活性剂漂浮在液态熔池表面外围 L_1,L_4 区域. 与熔融金属相比,活性剂材料的导电率都比较低,沸点较高,熔池表面只有在 L_3 中心高温区才存在熔池金属和活性剂的蒸发,形成阴极斑点,而被液态活性剂覆盖的 L_2,L_4 区域没有阴极斑点形成. 总之,由于活性剂的存在,减小了阴极斑点发生区域的面积,从而使得根部电弧收缩,焊接熔深增加.

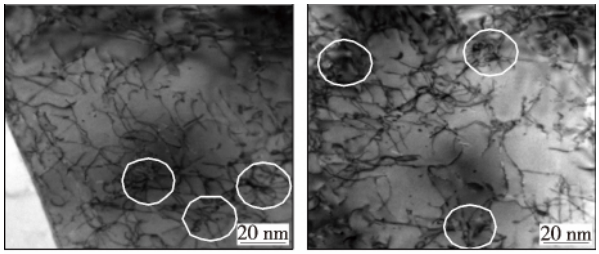
3　焊接接头微观组织

为了明确活性剂添加对接头组织的影响,特别是活性剂添加以后是否会对铝合金焊缝的微观组织带来不利的影响,采用了一系列分析测试手段对 A-MIG 接头组织进行了分析,与 MIG 焊的接头组织进行比对.

3.1　TEM 下的位错分析

在焊缝的中心位置用线切割切出 0.3 mm 厚的薄片,用砂纸慢慢磨到 30 μm 以下,边磨边加水. 然后用打孔器在焊缝中心位置冲出直径 3 mm 的圆片,再用 10% 高氯酸甲醇作为双喷液、在 MS-501B 电解双喷仪下做电解双喷,最后制成合格透射试样并在 Tecnai G2 F20 场发射透射电子显微镜下观察.

涂有活性剂和无活性剂的焊缝金属位错交割程度相近,无明显区别,如图 5 所示.



(a) A-MIG焊　　(b) MIG焊

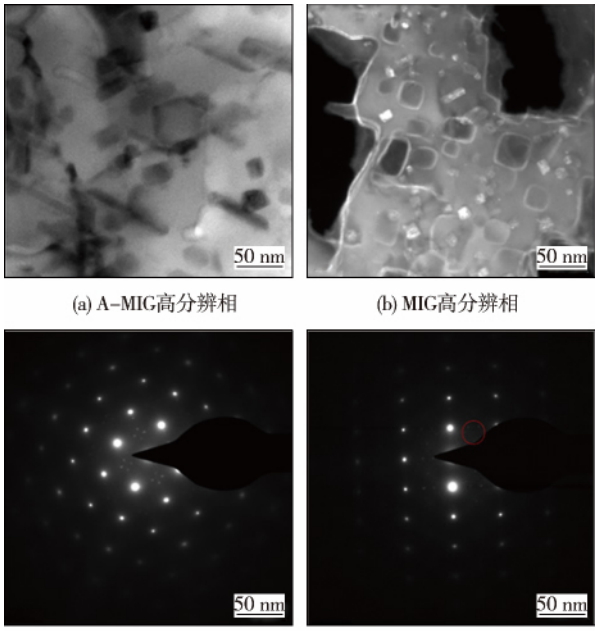
图 5　位错分布示意图

Fig. 5　Dislocation of A-MIG and MIG

3.2　TEM 下的强化相分析

试验用母材为 T4 状态,自然时效的温度较低,原子活动能力弱,脱溶速度很慢,为了获得更多、尺寸更大的强化相以便研究其种类和形态,采用短时人工时效处理焊接接头. 将人工时效参数定为: 180 ℃,10 h. 时效之后样品的明场像及衍射斑点(衍射斑点相同) 如图 6 所示.

图 6a,b 为圆片状强化相和棒状强化相的高分辨形态,经放大可知,圆片状强化相与基体半共格,棒状强化相与基体非共格,再结合图 6c,d 电子衍射图可以判断: 圆片状强化相为中间过渡相 η',棒状强化相为稳定相 η. 所以,活性剂的使用并没有改变焊缝中心强化相的种类.



(a) A-MIG高分辨相　　(b) MIG高分辨相

(c) A-MIG电子衍射斑点　　(d) MIG电子衍射斑点

图 6　高分辨图像及电子衍射图谱

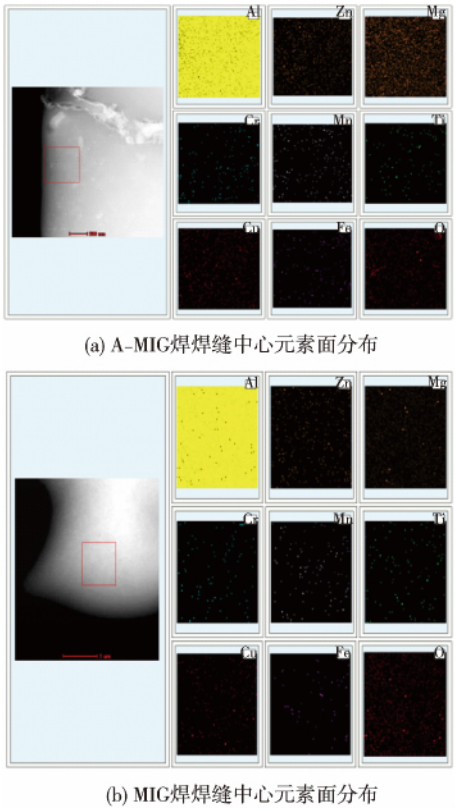
Fig. 6　High resolution microscopy of A-MIG and MIG

在涂有活性剂和没有涂覆活性剂的两个焊缝中心强化相都呈弥散状分布. 涂有活性剂的焊缝中心的 η' 相直径尺寸从 20 ~ 50 nm 不等,棒状 η 相直径约为 20 nm,长度在 100 ~ 200 nm 范围内; 没有涂覆活性剂的焊缝中心圆片状 η' 相直径在 10 ~ 30 nm 范围内变化,棒状 η 相直径约为 20 nm,长度从 30 ~ 60 nm 不等. 总之,涂有活性剂的焊缝中心强化相整体尺寸比没有涂活性剂的焊缝中心强化相尺寸略大. 这主要是因为在涂覆活性剂条件下,焊接热输入提高,电弧根部收缩,电弧能量密度更大,熔池中部受加热程度更加剧烈,从而造成强化相略有长大.

3.3　面扫描分析

为了考察活性剂的使用是否会引起焊缝原有元素的分布变化或者引入新的元素,现对焊缝进行面扫描分析,如图 7 所示. Mn,Cr,Ti 3 种元素可以改善焊缝抗蚀性和材料的可焊性,是有益于焊接过程和接头性能的元素. 从面扫描结果可以看出,在使用活性剂前后,3 种元素都呈弥散状分布在扫描区域中,并无任何偏聚. 除此之外,能提高接头强度的 Zn,Mg 元素以及提高接头耐蚀性的 Cu 元素的分布也基本没有变化. 同时,活性剂的添加对铁、硫等杂

质化合物的分布也没有明显的影响.



(a) A-MIG焊焊缝中心元素面分布

(b) MIG焊焊缝中心元素面分布

图7 焊缝元素面分布

Fig. 7 Element distribution of A-MIG and MIG

为了进一步确定活性剂的添加对上述元素含量上的影响,对接头中心进行能谱分析,考虑试验误差在内,活性剂的使用增加了 Zn,Cu,Mg 及 O 元素的含量,其中 Zn 元素增加的最多,达到 1.5%,Mg 元素增加的最少,但也达到了 0.985%;活性剂的添加还使 Fe 元素的量增加了 0.1%,Ti 元素减少了 0.1%;对 Mn,Cr 元素的含量几乎没有影响.

4 结 论

(1) 活性 MIG 焊接相对 MIG 焊接电弧收缩,电弧热流密度提高,焊接熔深提高.

(2) 活性剂的使用不会影响焊缝中心区域的位错密度,时效之前焊缝中心只有极少量的强化相.在 180 ℃下,人工时效 10 h 后,有 η' 相和 η 相析出,且活性剂的存在可以增大焊缝中心强化相尺寸.

(3) 活性 MIG 焊中活性剂的使用没有改变强化相的种类,强化相略有长大,不会影响焊缝中各种组元的成分含量,同时也对 Mn,Cr,Ti 等元素的分布没有影响.

参考文献:

[1] 刘凤尧,杨春利,林三宝,等. 活性化 TIG 焊熔深增加机理的研究[J]. 金属学报,2003,39(6):661-665.
Liu Fengyao, Yang Chunli, Lin Sanbao, *et al*. Mechanism of increasing A-TIG welding penetration [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(6): 661-665.

[2] 黄 勇,樊 丁,樊清华. 活性剂增加铝合金交流 ATIG 焊熔深机理研究[J]. 机械工程学报,2006,42(5):45-49.
Huang Yong, Fan Ding, Fan Qinghua. Study of mechanism of activating fluxIncreasing of AC A-TIG welding for aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 45-49.

[3] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. 表面活性剂对 TIG 焊电弧现象及焊接熔深的影响[J]. 机械工程学报,2000,42(5):43-46.
Yang Chunli, Ushio Masao, Tanaka Manabu. Effect of surface active flux on welding pool depth and arc phenomenon in TIG welding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 42(5): 43-46.

[4] 张瑞华,樊 丁,余淑荣. 低碳钢 A-TIG 活性剂的研制[J]. 焊接学报,2003,24(2):16-18.
Zhang Ruihua, Fan Ding, Yu Shurong. Weldability of activating flux in A-TIG welding for mild steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 16-18.

[5] 吴 军,邹增大,王新洪,等. SiO_2 活性剂对不锈钢钨极氩弧焊电弧现象的影响[J]. 焊接学报,2007,28(4):85-88.
Wu Jun, Zou Zengda, Wang Xinhong, *et al*. Effect of activating flux on electric arc of TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 85-88.

[6] Fan C L, Yang C L, Liang Y C, *et al*. Optimality analysis multiplex A-TIG welding for nickel-base superalloy [J]. China Welding, 2007, 16(2): 46-50.

[7] 张瑞华,王海涛,王 荣,等. 低碳钢管子全位置 ATIG 焊接法[J]. 焊接学报,2010,31(6):13-16.
Zhang Ruihua, Wang Haitao, Wang Rong, *et al*. A-TIG welding in all-position welding for mild steel pipe [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 13-16.

[8] 路 浩,邢立伟,陈大军,等. 高速列车用耐候钢活性 MAG 焊接技术[J]. 焊接学报,2013,31(11):105-108.
Lu Hao, Xing Liwei, Chen Dajun, *et al*. Research of A-MGA technology for weathering resistant steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 31(11): 105-108.

作者简介: 路 浩,男,1981 年出生,博士,高级工程师. 从事过超声波法焊接残余应力测量,焊接结构力学及可靠性评价等研究,现主要从事高速列车焊接技术开发工作. 发表论文 20 余篇,获得和申报国家发明专利 11 项. Email: lhhit9@163.com

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Arc behavior of A-MIG welding and microstructure of aluminum alloy welded joint LU Hao[1], XING Liwei[1], LIANG Zhimin[2] (1. Technique Headquarters, CSR Qingdao Sifang CO. LTD., Qingdao 266111, China; 2. Faculty of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 054300, China). pp 1 – 4

Abstract: A new welding method-activating flux MIG (A-MIG) welding was proposed in this paper, which can obtain welded joint with high quality and reduce lack of fusion. The arc morphology during this welding method were collected and analyzed. The results show that the current density in A-MIG welding was higher than that in conventional MIG welding. Based on the analysis with scanning electron microscope and transmission electron microscope, the inspection results by comparing A-MIG welding and conventional MIG welding show that the addition of activating flux did not affect precipitated phases and distribution of Mn, Cr and Ti alloying elements.

Key words: activating flux MIG welding; aluminum alloy; arc morphology; microstructure

TGO growth of high temperature thermal barrier coatings HAN Zhiyong, WANG Xiaomei, WANG Zhiping (Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China). pp 5 – 8

Abstract: Growth mechanism of thermally growth oxide (TGO) in thermal barrier coatings (TBCs) was investigated by finite element analysis software ABAQUS. After high temperature oxidation for 100 hours, the thickness of TGO increased from 0.5 μm to 6.7 μm. With the increasing of high temperature oxidation, stresses in the peaks, valleys and interface of TGO were obviously larger than in other places. Meanwhile, cracks were prone to initiate and propagate at these locations, and eventually led to spalling of the entire coating. During high temperature oxidization, the total absorbed energy of coating was 43.6 J, some of which was consumed for coating deformation, and the remaining for changes of coating composition and microstructure, and crack propagation.

Key words: thermal barrier coating; thermally growth oxide; finite element software ABAQUS

Numerical simulation of temperature field in weaving welding based on ladder model ZONG Xuemei, WU Bin, ZHANG Liping, LI Wen (Jiangsu Xuzhou Construction Research Institute, Xuzhou Construction Machinery Group, Xuzhou 221004, China). pp 9 – 12

Abstract: According to the characteristic of weaving welding, an arc swing ladder model was established on basis of strip heat source and numerical simulation of temperature field in Q345 steel plate butt joint with weaving welding was done using commercial software SYSWELD. The transient temperature field and thermal cycle curves in the welded zone were obtained. The results showed that the transient temperature field with arc-weaving ladder model was different from that with strip heat source model, and the weld pool with ladder model was elliptical with small head and big rump when the heat source moved from the middle to both sides. The thermal cycle curves with ladder model were also different from those with strip heat source model, and they had a wave crest both in heating and cooling, which reflected that the weld was affected by the arc weaving upon heating and cooling.

Key words: weaving welding; ladder model; numerical simulation; temperature field

Effect of peak temperature and cooling rate in welding thermal cycle on microstructure and properties of CGHAZ in SA508-3 steel LÜ Xiaochun[1,2], HE Peng[1], QIN Jian[2], DU Bing[2], HU Zhongquan[3] (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Harbin Welding Institute, Harbin 150028, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). pp 13 – 17

Abstract: Because the microhardness and absorbed energy change greatly after CGHAZ experienceing different peak temperature and cooling rate in welding thermal cycle, the CGHAZ in the SA508-3 steel joint is highly unstable. When the peak temperature in the second welding thermal cycle was 600 – 700 ℃, the CGHAZ could get a better match between hardness and toughness. The formation of hidden martensite near grain boundary and grain coarsening should be avoided after the CGHAZ experienced secondary welding thermal cycle which peak temperature was 750 – 950 ℃ and $t_{8/5}$ was 10 s.

Key words: SA508-3 steel; coarse grain heat-affected zone; peak temperature; cooling rate

Effect of pore on super long fatigue life of aluminium alloy welded joint HE Chao, CUI Shiming, LIU Yongjie, WANG Qingyuan (Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China). pp 18 – 22

Abstract: In order to investigate the fatigue behavior and failure mechanism in super long life regime, ultrasonic fatigue tests were performed on 5052 aluminium alloy welded joint. The results show that the fatigue strength of welded joint descended about 73.3% as compared to the base metal with the same fatigue life. Fatigue failure occurred in the very high cycle fatigue regime. Fatigue crack initiated from the welding defects (pores) from the observation of SEM. To clarify the effect of pores on the