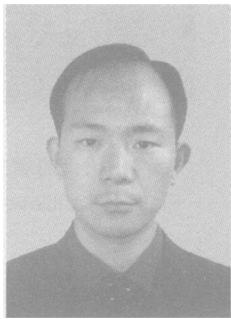


6063 铝合金搅拌摩擦焊接头冲击断裂分析

柴 鹏， 简 波， 季亚娟， 栾国红
(北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心， 北京 100024)



柴 鹏

摘 要：以 6063 铝合金为主要研究对象，简要介绍了铝合金型材的搅拌摩擦焊接工艺及设备，研究了 6063-T651 铝合金的冲击断裂性能、塑性变形能力及其搅拌摩擦焊接头的微观组织。研究表明，搅拌摩擦焊接头中为较细的再结晶组织，且强化相呈弥散分布，其冲击断裂性能和塑性变形能力与母材相近。
关键词：6063 铝合金型材；搅拌摩擦焊接；冲击韧度
中图分类号：TG 453 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2005)09-27-04

0 序 言

6000 系列铝合金的高温屈服强度低，挤压成形性能优良，所以轨道车辆使用的中空挤压型材主要采用 6000 系铝合金^[1]。其中，6063 铝合金强度中等、塑性较好、可挤压成形，故在型材制造中得到了广泛使用。由于型材挤压设备所限，所以大型铝合金挤压型材一般采用焊接等方法拼接。但是，采用熔焊方法焊接铝合金材料存在许多问题，如对零件表面氧化膜敏感、裂纹倾向大、易产生气孔等。对于高速列车用铝合金型材，采用熔焊方法最大的缺点是接头冲击韧度低。对 1999 年发生在英国 Ladbroke Grove 的列车相撞事故进行详细调查后，专家建议，在铝型材的焊接中采用搅拌摩擦焊接技术替代熔焊^[2]。

搅拌摩擦焊技术 (friction stir welding FSW) 是由英国焊接研究所于 1991 年发明的一项固相连接新技术^[3]。搅拌摩擦焊接过程中的主要热量来源是摩擦热与塑性变形能。焊接起始阶段，由于搅拌头与接头金属之间属于“冷”接触，因而摩擦热起主要作用。稳定焊接阶段，由于接头金属已经充分塑性软化，软化金属随着搅拌头的运动实现转移，形成连续的塑性流。从而使搅拌头与接头金属之间的摩擦热减少，所以塑性变形能起着维持搅拌摩擦焊接过程正常进行的重要作用。搅拌摩擦焊接过程中没有金属熔化，焊接温度比较低，因而是一个固态焊接过程。并且焊接过程中伴随着强烈的摩擦、碾压与粉碎作用。采用搅拌摩擦焊接技术焊接铝合金，

能够避免因接头金属熔化造成的气孔、裂纹等冶金缺陷，并对接头表面氧化膜有一定粉碎作用。

搅拌摩擦焊接在铝合金、镁合金等轻金属焊接方面广受关注。经过十多年的发展，目前该技术已在许多项目中得到了成熟的工业化应用^[4]。挤压型材焊接是搅拌摩擦焊接技术应用的重要方面。早在 1996 年，挪威的 Marine 公司和 Maritime 公司就对船用平板和型材搅拌摩擦焊接流水线制造技术进行了研究开发^[5]。文中主要对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击断裂行为进行研究，并结合微观组织等进行对比分析。

1 试验方法

试验材料采用 6063-T651 铝合金，其成分如表 1 所示。试件厚度为 8 mm，采用平板对接方式。选用带螺纹的搅拌头，搅拌针长 7.6 mm，轴肩直径为 24 mm。焊前将接头部分清洗油污，然后固定在专用夹具上。试验设备如图 1 所示。

表 1 6063 铝合金主要化学成分 (质量分数，%)
Table 1 Chemical composition of 6063A1 alloy

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Al
0.6	0.4	0.25	0.10	0.15	其余

基于前文的分析，铝合金列车对焊接接头在受到冲击时的变形能力要求比较高，作者在试验基础上重点分析了 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击韧度，包括冲击功、冲击载荷以及冲击条件下的接头变形能力等。

收稿日期：2004-09-20
基金项目：国防基础科学研究基金资助项目 (K0501020408)

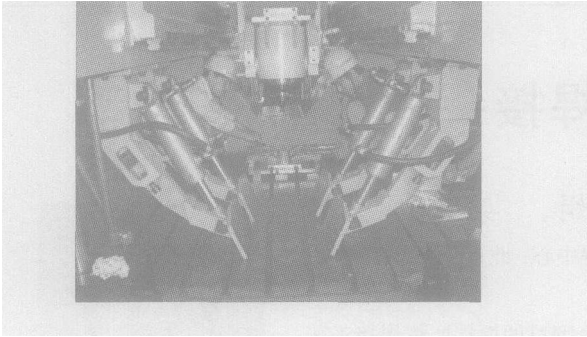


图 1 大型悬臂式搅拌摩擦焊设备
Fig 1 Cantilever type FSW welder

冲击试验在北京航空航天大学研制的 JCSJ30-I 摆锤式示波冲击试验机上进行。冲击试样及冲击位置如图 2 所示。冲击试样按照航空工业总公司标准 HB 5144-96《金属室温冲击试验方法》加工成夏比 U 形缺口。由于试验材料尺寸所限(接头厚度 8 mm 小于标准试样厚度 10 mm),所以按非标准试样(试样断面 5 mm×5 mm)加工。冲击试验采用一点夹持、一点冲击的方法,撞击位置与夹持位置之间相距 27 mm。

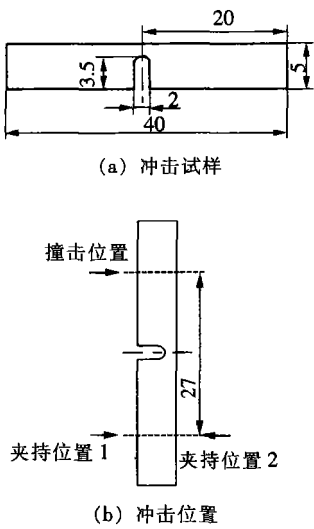


图 2 U 形缺口冲击试样及冲击位置
Fig 2 U type sample and impact position

2 试验结果及分析

2.1 冲击断裂分析

表 2 为 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头各

表 2 冲击试验相关参数及结果
Table 2 Parameters and results of impact tests

缺口位置	最大载荷 F_m /kN	载荷比 $R(\%)$	裂纹萌生功 W_g /J	裂纹扩展功 W_s /J	冲击吸收功 A_{KU} /J	冲击效率 $\eta(\%)$	摆锤高度 h /m	冲击速度 v /(m·s ⁻¹)
BM	0.99	100	1.93	2.41	4.34	100	-	-
HAZ	0.81	82	1.91	1.78	3.70	85	0.742	3.813
WN	0.93	94	2.47	4.37	6.83	157	-	-

区域的冲击试验相关参数及结果,其中 BM 表示母材 (base metal), HAZ 表示热影响区 (heat affected zone, 包含热-机影响区 TMAZ), WN 表示焊核区 (welding nugget)。

由表 2 可知,6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区的最大可承受载荷达到母材的 94% (载荷比)。从裂纹萌生功、裂纹扩展功以及总冲击功对比分析可见,焊核区的三项数值均大于母材金属的相应值,总冲击功甚至超出母材 57% (冲击效率)。因此,相对于母材,6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区的抗脆断能力大大提高。

但是分析 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头热影响区的冲击试验结果可以看出,最大冲击载荷达到母材的 81%,试样发生断裂需要的能量也相对要小一些,总冲击功为母材的 85%。因此热影响区是 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头的弱化区域。如果 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头在受到冲

击时发生断裂,则发生断裂的部位最有可能是接头的热影响区。

图 3 为 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头不同区域试样的载荷-位移曲线。如果将最大载荷点作为裂纹萌生点,则图中最大载荷点 F_m 左侧面积表示裂纹萌生功的大小;最大载荷点右侧面积表示裂纹扩展功的大小。裂纹萌生功与裂纹扩展功之和称为总冲击功。

从图 3 中的载荷-位移曲线的走势看,焊核区、热影响区与母材基本相似。分析最大载荷点的左侧可以发现,对母材做冲击时,很快就达到最大载荷点,只是在最大载荷点附近有所震荡;而对热影响区试件和焊核区试件做冲击时,并没有迅速达到最大载荷点,而是波浪式上升的,渐次达到最大载荷点。所以搅拌摩擦焊接头区域受冲击时达到最大载荷点的形式与母材有所不同。

在最大载荷点的右侧,无论是母材,还是焊核区

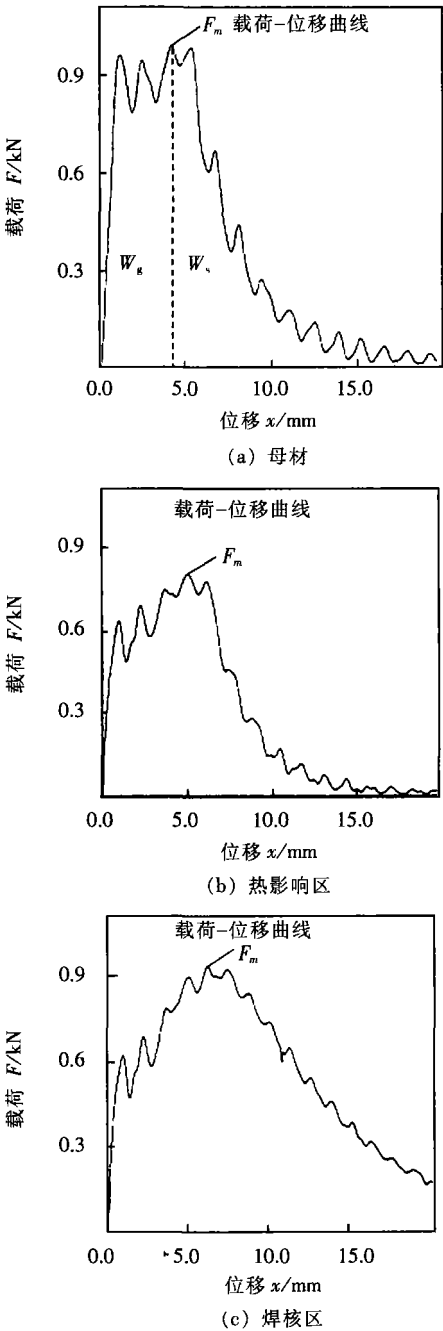


图 3 冲击试验中的载荷 - 位移曲线
Fig. 3 Load displacement curve from impact tests

和热影响区,随着位移的增加,所承受载荷减小,载荷下降平稳,均没有出现因为裂纹不稳定扩展造成的曲线陡降。从图中可知,热影响区与母材在有裂纹的条件下承受载荷的能力比较相近;而焊核区在有裂纹的条件下承受载荷的能力明显提高,说明焊核区均匀分布的再结晶细化晶粒对裂纹扩展的阻力较大。

2.2 冲击断口分析

受冲击时,裂纹总是在试样的最薄弱部位(通常为应力集中区)形成,并且裂纹沿着阻力最小的

路径^[6]进行。因此冲击断口的形貌、轮廓线和粗糙度等真实地记录了断裂过程中诸多信息。对冲击试样断口的分析有助于研究其断裂特征和断裂机制。

从图 4 可以看出,6063-T651 铝合金冲击试样断口包括三个部分,剪切面、纤维区和剪切唇。剪切面形成于缺口底部,这是由于缺口底部在冲击过程中承受拉应力(图 5)。因此当冲击功达到一定值(裂纹萌生功)时,缺口底部在水平剪切力作用下产生 45°剪切面。剪切面呈暗灰色,且比较整齐。

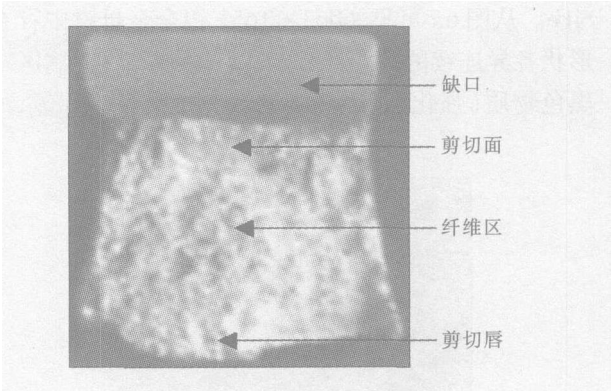


图 4 6063-T651 铝合金冲击断口
Fig. 4 Fracture morphology of 6063-T651 FSW joints

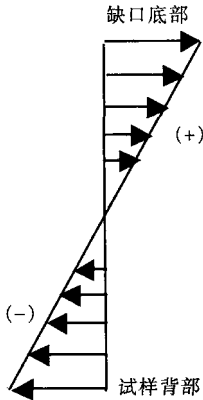


图 5 冲击试样受力状态
Fig. 5 Force state of impact sample

随着冲击功的继续增加,因剪切面产生的裂纹向试样底部和两侧稳态扩展,形成比较大的脚跟形纤维区。当试样即将完全断裂时,在试样底部和两侧分别出现了剪切唇。由于剪切唇比较窄,因此试样两侧的剪切唇不是很明显。

由图 4 可以看出,6063-T651 铝合金型材搅拌摩擦焊接头冲击断口不存在放射区,并且纤维区占了其中很大一部分面积。由于断口上纤维区的大小可以定性地反映试样冲击断裂韧性的好坏^[7],所以从冲击试样断口分析,也可以说明搅拌摩擦焊接头的冲击韧度比较好。

2 3 金相组织分析

在 FSW 焊缝上靠近冲击试样选取金相试样。金相试样经抛光处理后,采用混合酸(即 Keller 试剂, 150mL H₂O, 3 mL HNO₃, 6 mL HCl, 6 mL HF)进行腐蚀。腐蚀后的试样采用光学显微镜观察搅拌摩擦焊接头不同区域的微观组织,放大倍数均为 200。

图 6 所示为焊缝不同位置的显微金相组织,组分主要有三种,基体 α -Al 强化相 Mg₂Si 和 Al₃Fe。从图 6a 可见,6063-T651 铝合金母材中存在形状各异连续黑色条纹;图 6b 表明,热影响区中黑色物质(强化相,经测试发现其中富含铁和氧,所

以有可能是 Al₃Fe 或某种氧化物)的偏聚现象明显减弱;而图 6c 表明,焊核区的黑色物质基本上弥散分布于基体金属 α -Al 之内。

这一组织特征表明,搅拌摩擦焊接过程中的摩擦、搅拌以及挤压作用有利于 6063-T651 铝合金母材中强化相的破碎及弥散分布。而强化相的弥散分布不仅使焊核区具有接近于母材的抗拉强度,并且大大提高了其在冲击条件下的塑性变形能力。

3 结 论

(1) 搅拌摩擦焊接头具有与母材相近的冲击断裂性能,并且可以通过改善热影响区的冲击断裂性能进一步提高接头整体性能。

(2) 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击断口中仅有剪切唇和纤维区,而没有放射区,因此 6063-T651 铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击断裂性能比较好。

(3) 搅拌摩擦焊接有助于接头金属的晶粒细化以及强化相的弥散分布,因此改善了接头的塑性变形能力并提高了接头的冲击断裂性能。

参考文献:

[1] 刘静安, 谢建新. 大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.

[2] Ralph Gay Mark Robinson John Yates *et al.* Al join crashworthiness of joints in aluminium rail vehicles [J]. European Railway Review, 2003 (5): 63 - 67.

[3] Midling O T Morley E J Sandvik A. Norsk hydro rights transferred to TWI friction stirwelding [P]. European Patent Specification EP0752926B1, 1992.

[4] Midling O T. High speed friction stirwelding of aluminium panels for transport applications [A]. Materials science forum [C]. 2003. 426 - 432. 2897 - 2902.

[5] Rollin E Collins. The use of friction stirwelding technology in maritime applications [A]. Aluminium 2001 - proceedings of the TMS 2001 (Aluminium automotive and joining sessions) [C]. TMS, 2001. 189 - 195.

[6] 唐振廷. 冲击试样断口与力-位移曲线之间的关系 [J]. 物理测试, 2004 (4): 1 - 5.

[7] 上海交通大学金属断口分析编写组. 金属断口分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.

作者简介: 柴 鹏, 男, 1976 年出生, 工程师, 硕士研究生。主要从事搅拌摩擦焊接技术研究, 参加并完成了两项“十·五”研究课题, 发表论文 5 篇。

Email chaipeng@cfswt.com

图 6 6063-T651 搅拌摩擦焊接头微观组织分析

Fig. 6 Microstructure analysis of 6063-T651 FSW joints

ing Xi'an University of Technology Xi'an 710048 China; 2 Yichun University Jiangxi Yichun 336000 China). p19-22 26

Abstract The mechanical properties and weldabilities of X80 pipeline steel were investigated by testing hardness tensile strength and impact toughness in this paper. The result showed that the toughness of CGHAZ decreased because of the hardening and embrittling substance appeared in coarse grained heat affected zone (CGHAZ) and there was a softening zone between the intercritical heat affected zone (ICHAZ) and the subcritical heat affected zone (SCHAZ). The effect of the organization on X80 mechanical properties was discussed also.

Keywords pipeline steel; hardening; softening; overmatching

Vision based detection of root gap and deviation between torch and gap centerline in GMAW

GAO Jin qiang^{1, 2, 3}, WU Chuan song¹, LIU Xi zhang², XIA Dian xiu² (1 Key Laboratory of Structure and Heredity of Materials MOE, Shandong University Jinan 250061, China; 2 Post doctorate Work Station Jinan Iron & Steel Group Corp., Jinan 250101, China; 3 Post doctorate Mobile Stations Tianjin University Tianjin 300072 China). p23-26

Abstract Weld seam tracking is an important aspect of welding quality control and GMAW (gas metal arc welding) is widely used in industries. An image of root gap in GMAW was captured using CCD camera and composite filter lens. An algorithm was designed based on the analysis of gray characteristics of the root gap. Root gap edges could be extracted by the algorithm. Thus the gap and the deviation between torch and root gap centerline could be obtained. This work has laid a solid foundation to realize the GMAW weld seam tracking.

Keywords weld seam tracking; root gap; GMAW; image

Impact properties of 6063 Al alloy FSW weld CHAI Peng, JIAN Bo, JI Ya juan, LUAN Guo hong (China FSW Center, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p27-30

Abstract Aluminum extrusions were widely used in rolling stock, automobile and aerospace, et al. In this paper, based on friction stir welding (FSW) technology and equipment for aluminum extrusions, impact properties, plastic deformation capacity and microstructure of 6063-T651 FSW weld were studied. The results showed that there were fine dynamic recrystallized grain in FSW weld, precipitation was dispersedly distributed, and impact properties and plastic deformation capacity of the weld was approximately the same with that of the base material.

Keywords 6063 aluminum extrusion; friction stir welding; impact toughness

Reliability test and analysis of 1.27mm pitch plastic ball grid array soldered joint under thermal shock

HUANG Chun yue^{1, 2}, WU Zhao hua², ZHOU De jian² (1 School of Electromechanical Engineering, Xiidian University, Xi'an 710071, China; 2 Department of Electronic Machinery and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guangxi Guilin 541004, China). p31-34

Abstract The soldered joint reliability of 1.27mm pitch plastic ball grid array (PBGA) package was studied by Taguchi design experiment method under the thermal shock. The stencil thickness, the pad diameter and the chip weight were chosen as the three critical factors for the design of the PBGA test specimens by using a Taguchi orthogonal array. The thermal shock cycling test of PBGA test specimens was carried out. The range analysis and the variance analysis were performed to determine both the best combination of the process parameters and the most influential factors. The failure distribution of PBGA soldered joints was also characterized by using two parameter Weibull distribution. The results show that the thickness of stencil has a significant effect on the reliability of the 1.27mm pitch PBGA soldered joints. The optimal of process parameters are the stencil thickness of 0.15mm, the pad diameter of 0.73mm and the chip weight of 18.0547g. The failure life of PBGA soldered joint follows the two parameter Weibull distribution, whose shape parameter and scale parameter are 0.85 and 6254.88, respectively.

Keywords design of experiment; plastic ball grid array; process parameters; range analysis; variance analysis

The numerical simulation of the brazing process of cemented carbide cirque and steel

YUE Xi shan, SUN Feng lian (College of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China). p35-38 43

Abstract Aiming at brazing crack induced by thermal stress during the process of brazing, finite element method was used to analyze the residual stress of joints between the cemented carbide cirque and steel. The effects of joint shapes and filler metal thickness on the distribution of residual stress were researched. The result showed that notch was disadvantageous to the strength of joints, and the optimal value of filler metal thickness existed. The calculated result was consistent with that of the experiment.

Keywords cemented carbide cirque; brazing; residual stress; numerical simulation

Safe assessment of surface flaw under mismatched weld in offshore pipeline

XIA Jing¹, HUO Li xing¹, BAI Bing ren², CAO Jun² (1 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2 China Offshore Oil Engineering Limited Company,