

舰船用 6082 铝合金 TIG 焊组织与力学性能分析

孙乎浩¹, 薛松柏¹, 冯晓梅¹, 林中强², 李 阳¹

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016; 2. 浙江宇光铝材有限公司, 武义 321200)

摘 要: 采用 ER4043 和 ER4047 焊丝,对厚度为 12 mm 的舰船用 6082 铝合金进行了 TIG 焊接试验研究,测试了焊缝强度并对其显微组织进行了观察分析. 结果表明,在采用文中推荐的焊接参数条件下,使用 Al-Si 系焊丝的焊接接头力学性能优良,焊缝区组织为树枝状晶的铸态组织,熔合区出现异于焊缝中心的胞状晶;热影响区受焊接热循环作用组织有所粗化. 使用 ER4043 焊接的接头抗拉强度略低于使用 ER4047 的接头,但塑性相对较好并且生成大气孔的倾向相对较低.

关键词: 舰船用铝合金; TIG 焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)02-0091-04

0 序 言

近年来,随着国内外造船业的飞速发展,舰船结构的合理化和轻量化已成为造船业的重要课题^[1]. 特别是自 2008 年金融危机爆发后,国内外造船业与航运业均面临巨大挑战,减轻船重、提高船速和增强船舶稳定性成为日益迫切的需求^[2]. 铝合金因其比强度高、耐蚀性良好、焊接性能及加工性能好等特点^[3],已在大型舰船的上层建筑、舾装件、民用高速客船、军用快艇等方面得到广泛的应用^[4],在舰船轻量化方面发挥着无可比拟的作用.

6082 铝合金属于铝镁硅系可热处理强化变形铝合金,具有中等强度、密度低、较好的耐蚀性、良好的加工性能和焊接性能^[5,6],可用于制造高速船船体、船用大型焊接结构件及航海用零件. 已有研究表明^[7],尽管使用 5 系铝合金焊丝焊接 6082 铝合金可使焊接接头获得较高的抗拉强度,但接头存在 Mg 元素烧损、生成焊接裂纹的倾向大、焊缝抗腐蚀性明显低于母材等问题. 因此美国船级社 (ABS) 和美国焊接学会 (AWS) 推荐优先选择 4 系铝合金焊丝作为 6 系船用铝合金的焊接材料,以提高焊缝的耐蚀性,并且焊接时形成裂纹和气孔的倾向较低^[8],可满足船舶与海洋工程领域的需求.

6 系铝合金常见的焊接方法有钎焊、氩弧焊、搅拌摩擦焊 (FSW) 等^[9,10],但这些焊接方法难以克服

铝合金焊接过程中极易出现的气孔、裂纹等缺陷. 近年来为提高铝合金焊接接头的质量,电子束焊、激光焊等新的焊接工艺和焊接方法在造船业中得到了一定的应用,但因受到生产成本、焊接设备和场地条件等方面因素的限制,钨极氩弧焊 (TIG) 和熔化极氩弧焊 (MIG) 仍是船用铝合金最主要的焊接方法^[4]. 文中针对船用 6082 铝合金选用不同成分的 4 系铝合金焊丝进行了 TIG 焊接试验,分析了其焊接接头微观组织与力学性能,并研究了焊接工艺、焊丝成分对 6082 铝合金焊接接头气孔的影响.

1 试验方法

1.1 试验材料

母材选用挤压处理的船用固溶时效 - T6 状态 6082 铝合金板材,厚度为 12 mm. 焊接材料分别选用国产高品质 ER4043 和 ER4047 焊丝,化学成分如表 1 所示,母材的力学性能如表 2 所示.

表 1 母材和焊接材料的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 6082 and filler metals

合金牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
6082	0.7~1.3	≤0.5	≤0.1	0.4~1.0	0.6~1.2	余量
ER4043	4.5~6.0	≤0.8	≤0.3	≤0.05	≤0.1	余量
ER4047	11.0~13.0	≤0.8	≤0.3	≤0.15	≤0.1	余量

表 2 母材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6082 aluminum alloy

牌号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
6082-T6	275	315	15

收稿日期: 2013-06-21

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金资助项目 (kfj120122); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 金华市科技计划资助项目 (2013-1-076)

1.2 焊接工艺

焊接试验依照美国船级社标准 ABS 22-2006: Rules for Materials and Welding-Part 2: Aluminum and Fiber Reinforced Plastics (FRP) 进行,对长宽高尺寸为 350 mm×350 mm×12 mm 的母材试板采用 V 形对接进行平焊,焊接接头如图 1 所示. 焊接前先对试板焊接坡口及附近区域按照“打磨→丙酮除油→碱洗→酸洗→水洗→烘干”的步骤进行清理,试板焊前进行预热,预热温度为 70~90℃. 焊接时均先用 MIG 焊 $\phi 1.0$ mm 焊丝打底,然后用 TIG 焊 $\phi 6.0$ mm 焊丝填充和盖面,最后反面清根后施行反面封底焊. 道间温度控制在 100℃ 以内,保护气采用 99.99% 的氩气,气体流量 15~20 L/min. 具体的焊接工艺参数如表 3 所示. 焊后焊缝表面成形良好,无表面气孔、裂纹和咬边等缺陷.

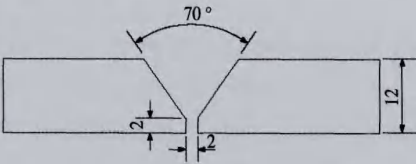


图 1 接头坡口形式 (mm)

Fig. 1 Welding groove of 6082 aluminum alloy

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters

试验 编号	焊接 道次	焊丝	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 v/(cm·min ⁻¹)
1	打底	ER4043, $\phi 1.0$ mm	142	20.0	52
	填充	ER4043, $\phi 6.0$ mm	245	21.0	10
	盖面	ER4043, $\phi 6.0$ mm	240	21.0	11
2	打底	ER4047, $\phi 1.0$ mm	148	20.0	33
	填充	ER4047, $\phi 6.0$ mm	230	20.0	5
	盖面	ER4047, $\phi 6.0$ mm	243	20.0	8

1.3 试验方法

焊后采用线切割方法截取接头试样进行分析,分别截取母材、熔合区、焊缝金属在金相显微镜下观察其微观组织;使用万能电子试验机进行焊接接头的室温拉伸试验.

2 试验结果与讨论

2.1 接头力学性能

依照国家标准 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》将焊接试样加工为标准的拉伸试样,然

后在室温下进行拉伸试验,试验结果如表 4 所示. 使用 ER4043 焊丝焊接 6082 铝合金时,焊接接头抗拉强度平均值为 174.5 MPa,断后伸长率平均值为 7.15%;而使用 ER4047 焊丝时,焊接接头的抗拉强度平均值为 180.5 MPa,伸长率平均值为 3.3%. 对比两组试验结果可以发现,与 ER4043 焊丝相比,使用 ER4047 焊丝焊接 6082 铝合金可使焊接接头抗拉强度提高约 6 MPa,但伸长率却相对出现了大幅下降,降幅达 53%.

表 4 接头力学性能

Table 4 Mechanical properties of welded joints

试验编号	焊丝牌号	抗拉强度 R _m /MPa	断后伸长率 A(%)	断裂位置
1	ER4043	176	7.0	焊缝
		173	7.3	焊缝
2	ER4047	183	3.6	焊缝
		178	3.0	焊缝

研究表明,在焊接可热处理强化铝合金时,热影响区受焊接热循环作用,易发生过时效软化,导致该区域形成一个软化区. 尽管这一软化区容易成为焊接接头最薄弱的部位,但使用 Al-Si 系焊丝时,接头拉伸试样的断裂位置在焊缝区域,这表明焊缝的抗拉强度仍低于软化区,这相对于 Al-Mg 系焊丝有一定的区别.

2.2 显微组织分析

分别截取焊缝、热影响区和母材部分金属制成金相试样,经磨制、抛光后,采用 Keller 试剂(1mLHF + 2.5mL HNO₃ + 1.5mL HCl + 95mL H₂O)进行腐蚀后在金相显微镜下观察. 使用 ER4043 和 ER4047 焊丝的焊接接头金相组织形貌分别如图 2 和图 3 所示. 由图 2a 可见,焊缝区为树枝状晶的铸态组织,靠近焊缝中心区域大多为等轴晶,同时也存在一定数量的树枝柱状晶;图 2b 为熔合区及热影响区组织,熔合线附近的焊缝区组织仍为树枝晶,但其晶粒比焊缝中心区域粗大;热影响区中析出相的形态、尺寸与母材中略有区别,这可能与热影响区在焊接热循环作用下晶粒的长大、原析出相的再次固溶和析出有关;图 2c 为 6082-T6 母材的带状纤维组织,均匀分布的 Mg₂Si 强化相沿挤压方向排列,同时还残留有少量黑色点状的 Mg₂Si 初晶.

使用 ER4047 焊丝时,由图 3a 可见,6082-T6 铝合金焊缝中心为共晶组织,密集的共晶相沿均匀、细密的枝晶网析出,在靠近熔合线的焊缝区域为沿散热方向生长的胞状晶;而由图 3b 可见,在热影响

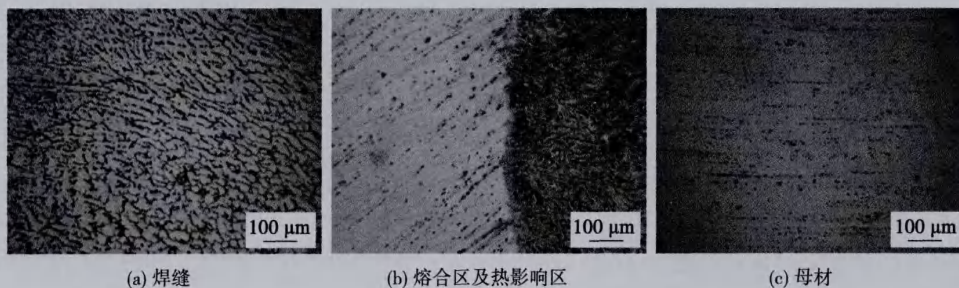


图2 使用 ER4043 的焊接接头显微组织
Fig. 2 Microstructure of ER4043 welded joints

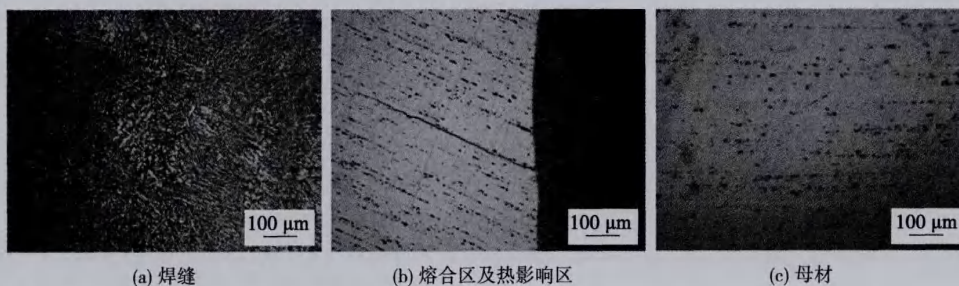


图3 使用 ER4047 的焊接接头显微组织
Fig. 3 Microstructure of ER4047 welded joints

区,受焊接热循环影响,除晶粒有所长大外,析出相也发生了再次固溶、析出和长大,在尺寸及形貌上与母材中的析出相有所区别。尽管此时焊缝组织的晶粒比使用 ER4043 焊丝时细密,但大量针状脆性共晶相的存在割裂了基体,导致焊接接头的拉伸性能下降,造成使用两种不同焊丝的焊接接头强度相当但塑性差别较大。

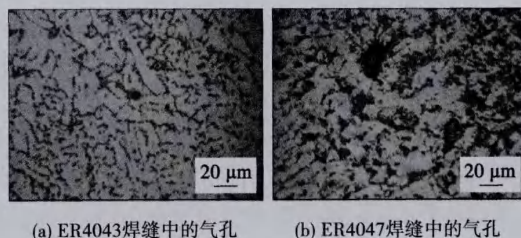


图4 焊接接头中的气孔
Fig. 4 Pores in welded joints

3 焊接接头的气孔分析

3.1 焊接材料与工艺参数对焊缝气孔的影响

使用 ER4043 和 ER4047 焊丝焊接 6082 铝合金时,焊缝中气孔主要出现在熔合线附近及焊缝中心,多为直径不超过 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的肩下气孔和心气孔,这表明 6082 铝合金焊缝中的气孔主要为氢气孔,氢的主要来源为固溶于母材及焊材中的氢,以及母材或焊丝表面氧化膜吸附的水分。焊缝中心气孔如图 4 所示。由图 4a 可见,使用 ER4043 焊丝的焊缝中气孔较小,呈圆点状;由图 4b 可见,使用 ER4047 焊丝的焊缝中气孔相对较大,并呈椭球状。这表明在使用硅含量较高的 ER4047 焊丝时,焊缝中形成大气孔的倾向较大。

为研究焊接速度对 6082 铝合金焊接气孔产生的影响,将焊接速度提高 2 倍后保持其它焊接参数

不变,依照 ABS 22-2006 标准采用 ER4047 焊丝重新进行焊接试验,焊接速度调整后焊接接头中的气孔如图 5 所示。由图 5 可见,大幅提高焊接速度后,焊缝内的气孔数量增多,体积增大,有球化并呈链状分布趋势。这是由于过高的焊接速度使得熔池在高温下的存在时间大大减少,导致析出的氢来不及逸出,在焊缝中的低熔点共晶相处聚集成较大气孔。

3.2 减少气孔的措施

铝合金焊接接头中的气孔对焊缝质量与性能将产生较大的不良影响。铝合金焊接气孔从来源和形成机理方面考虑,减少气孔的措施包括以下几点:(1)降低固溶于母材及焊丝内的氢含量;(2)焊前对母材焊缝表面的油脂、污染物及氧化膜进行清理后及时施焊;(3)使用对焊缝气孔敏感性较小的高

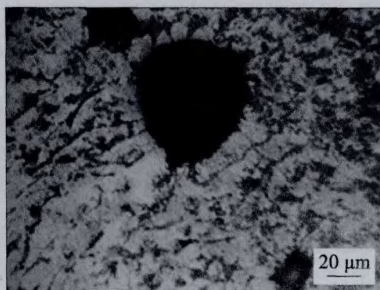


图5 焊接速度调整后接头中的气孔

Fig. 5 Pores in welded joints after welding speeds adjustment

品质抛光焊丝,焊前保证焊丝的干燥、洁净;(4)保证惰性保护气体中的 H_2 , O_2 , H_2O 等符合国家标准,并注意控制环境温度与湿度;(5)采用合理的焊接结构和焊接方法,选择合理的焊接工艺参数,就单项参数而言,电弧电压不宜过高,焊接电流、焊接速度可适当降低。

4 结 论

(1) 使用 Al-Si 系焊丝的船用 6082 铝合金 TIG 焊接头力学性能优良,其中使用 ER4043 焊丝的接头抗拉强度略低于使用 ER4047 焊丝的接头,但塑性相对较好。

(2) 船用 6082-T6 母材为带状的纤维组织,使用 Al-Si 系焊丝时焊缝区为树枝状晶的铸态组织,但使用 ER4047 焊丝时焊缝枝晶网更加密集、均匀。熔合区出现异于焊缝中心的胞状晶;热影响区受焊接热循环作用,晶粒有所长大。

(3) 使用 ER4043 焊丝对船用 6082 铝合金板材进行氩弧焊时,焊缝中生成大气孔的倾向低于 ER4047 焊丝,过高的焊接速度易使焊缝中的气孔数量增多,体积增大。

参考文献:

- [1] Mouritz A P, Gellert E, Burchill P, *et al.* Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. *Composite Structures*, 2001, 53(1): 21-42.
- [2] 徐学光. 造船的“第二次现代化”[J]. *江苏科技大学学报(社会科学版)*, 2008, 8(1): 39-44.
Xu Xueguang. Second round modernization of shipbuilding industry[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Social Science Edition)*, 2008, 8(1): 39-44.
- [3] Ruan Y, Qiu X M, Gong W B, *et al.* Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO_2 flux[J]. *Materials & Design*, 2012, 35(3): 20-24.
- [4] 崔立. 铝合金舰船结构设计中相关问题探讨[J]. *船海工程*, 2008, 37(6): 36-37.
Cui Li. Some problems about the aluminum alloy ships[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(6): 36-37.
- [5] Pereira A M, Ferreira J M, Loureiro A, *et al.* Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2454-2463.
- [6] Kim S J, Lee S J, Jeong J Y, *et al.* Electrochemical characteristics of Al-Mg and Al-Mg-Si alloy in sea water[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3): 881-886.
- [7] 阮野, 邱小明, 宫文彪, 等. 铝合金双丝 MIG 焊焊接接头组织与耐腐蚀性能[J]. *焊接学报*, 2011, 32(2): 109-112.
Ruan Ye, Qiu Xiaoming, Gong Wenbiao, *et al.* Microstructures and corrosion-resistant performance of Al twin wire MIG welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(2): 109-112.
- [8] 汤小红, 庞涛. Al-Mg-Si 6082 合金氩弧焊焊接接头的气孔与合金元素烧损[J]. *焊接学报*, 2010, 31(4): 21-24.
Tang Xiaohong, Pang Tao. Blowhole and alloy element burning loss of Al-Mg-Si 6082 alloy joint welded by argon arc welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(4): 21-24.
- [9] 戴玮, 薛松柏, 蒋士芹, 等. 6061 铝合金中温钎焊接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2012, 33(6): 105-108.
Dai Wei, Xue Songbai, Jiang Shiqin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 6061 Al joints brazed with a low-melting point filler[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(6): 105-108.
- [10] Moreira P M G P, De Jesus A M P, Ribeiro A S, *et al.* Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 and 6061-T6 aluminum alloys: A comparison[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2008, 50(2): 81-91.

作者简介: 孙乎浩,男,1988 年出生,硕士研究生。主要从事焊接新材料设计与制备方面的研究工作。Email: sunhuhao2012@163.com

通讯作者: 薛松柏,男,教授。Email: xuesb@nuaa.edu.cn