

热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头热力影响区组织和性能的影响

王希靖, 孙桂苹

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050)



王希靖

摘 要: 分析讨论了热处理对高强铝合金热力影响区的组织和力学性能的影响. 结果表明, 经热处理后, 热力影响区的棒状沉淀相逐渐消失, 球状沉淀相弥散分布在热力影响区的晶界和晶粒中. 两种铝合金在热处理后力学性能上都有一定的提高, 7075 铝合金接头的抗拉强度可达 415 MPa, 是母材抗拉强度的 89.5%, 7050 铝合金接头的抗拉强度可达 422 MPa, 是母材抗拉强度的 89.8%, 断裂几乎都发生在前进侧的热力影响区, 并且硬度的最低处在前进侧热力影响区.
关键词: 铝合金; 微观组织; 热处理
中图分类号: TG457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2010)11-0001-04

0 序 言

搅拌摩擦焊 (FSW) 是英国焊接研究所 20 世纪 90 年代发明的一种固相连接技术. 因其具有适用范围广、生产效率高、无需添加焊丝等一系列优点, 该技术已成为 21 世纪国内外研究的热点^[1], 在世界范围内引起了广泛的关注. 7000 系铝合金是各国航空航天工业中不可缺少的重要材料^[2]. 多年来, 人们对该系合金的沉淀析出过程和析出强化问题进行了大量的理论和试验分析^[3]. 通过透射电镜试验法, 对析出相的形貌、析出相的晶体学结构作了大量的分析^[4].

试验证实 7000 系铝合金经搅拌摩擦焊后的试样接头的拉伸试验, 断裂几乎都发生在前进侧的热力影响区. 由此认为, 热力影响区为薄弱点. 文中利用扫描电镜及透射电子显微镜对其热处理前后的微观组织进行了观察和分析. 结果显示, 热力影响区的棒状颗粒逐渐消失, 球状颗粒弥散分布在该区的晶界和晶粒中, 还有一些没有球化的棒状掺杂其中. 焊后热处理使微观组织发生了一定的演变, 也使宏观上的力学性能有明显的提高. 微观组织上的演变影响着焊缝宏观的力学性能, 因此研究分析 7000 系铝合金搅拌摩擦焊接头的微观组织演化有着重要的意义.

1 试验方法

焊接试验使用的材料为 5 mm 厚 7075 7050 铝合金轧制板材, 其化学成分见表 1. 试验用搅拌摩擦焊机为 FSW-3IM-015 搅拌头轴肩直径为 20 mm, 搅拌针直径为 5 mm, 长度为 4.8 mm. 用扫描电镜 SEM-2010 和透射电镜 6700F 对成形良好的焊接接头进行组织形貌观察. 制备透射试样的条件是电解液为 5% 硝酸酒精溶液, 温度为 -25℃. 制备金相试样的腐蚀剂成分为 2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, 190 mL H₂O, 腐蚀时间为 10 s. 热处理工艺为: 固溶温度 466℃×2 h 室温水淬; 120℃×24 h 人工时效. 对于透射制样, 首先对焊接好的板材进行金相取样, 对取好的试样进行打磨、抛光和腐蚀, 并在金相显微镜下观察, 虽然热力影响区相对其它几区很小, 但根据其微观组织上的特点, 就不难证明所取的试样就是热力影响区. 确定所选区域后, 对其进行截取和透射试样的磨制、双抛电解, 制备好的干燥试样在透射电镜上观察.

表 1 铝合金化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of Al alloys

材料	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Zr	Al
7050	6.10	2.30	2.00	0.12	0.15	0.10	0.05	余量
7075	5.50	2.40	1.20	0.40	0.50	0.30	0.08	余量

2 结果与分析

2.1 宏观形貌分析

图 1 为 7075 铝合金接头宏观横断面, 其中 I 区为焊核区, II 区为热力影响区, III 区为热影响区, 从图中可知, II 区与 I 区有较明显的分界线, 其过渡区的组织不连续. II 区在摩擦热以及搅拌头的搅拌作用下, 搅拌针附近的材料发生了塑性变形, 板条状组织有较大幅度的变形和扭曲.



图 1 FSW 接头横截面宏观形貌
Fig. 1 Cross section macrograph of friction stir welded joint

2.2 透射图片分析

图 2 为 7075 铝合金透射电镜照片. 图 2 a) 分别为 7075 母材

7075 母材, 根据合金的时效状态和文献资料, 可认为晶内析出相为 GP 区及少量弥散的 η' 相, 晶界析出相为条状粗大平衡相 η ($MgZn_2$), 过渡相 η' . 分析证实, AlZnMgCu 系合金的沉淀序列为^[3] α 过饱和固溶体 $\rightarrow$ GP 区 $\rightarrow \eta'$ 过渡相 ($MgZn$) $\rightarrow \eta$ 平衡相 ($MgZn_2$) 或 η' 相 (AlZnMgCu). 对于 AlZnMgCu 系合金, 强化效果最大的部分是共格的中间相 η' , 其次是 GP 区, 而非共格的稳定相 η 对强化贡献比 GP 区和 η' 要差一些.

图 2 b) 为 7075 热力影响区, 7075 热力影响区的组织如图 2 d) 所示, 亚晶粒边界由位错缠结而成, 在亚晶粒内有较高的位错密度. 在搅拌针快速经过焊缝时, 位错之间由于相互纠缠而形成位错网络. 当位错聚合成的线缺陷达到一定尺度时, 就出现了亚显微裂纹和显微裂纹. 对于拉伸性能而言热力影响区应是最为薄弱的环节.

图 3 为 7050 热处理后透射电镜照片, 板条状的母材组织中有细小的晶粒析出, 热力影响区的棒状颗粒逐渐消失, 球状颗粒弥散分布在该区的晶界和晶粒中. 对热力影响区进行电子衍射如图 3 c) 所示

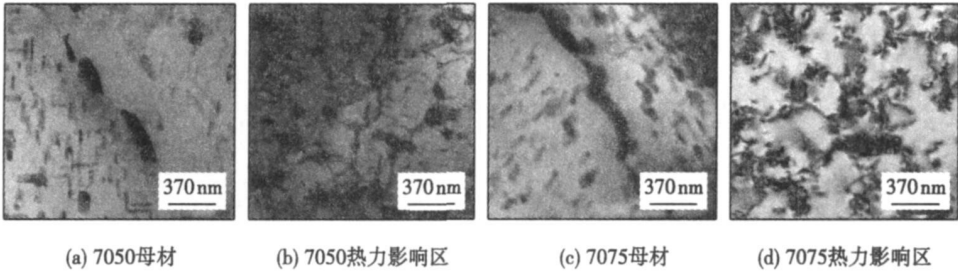


图 2 透射微观组织形貌
Fig. 2 Microstructure of TEM

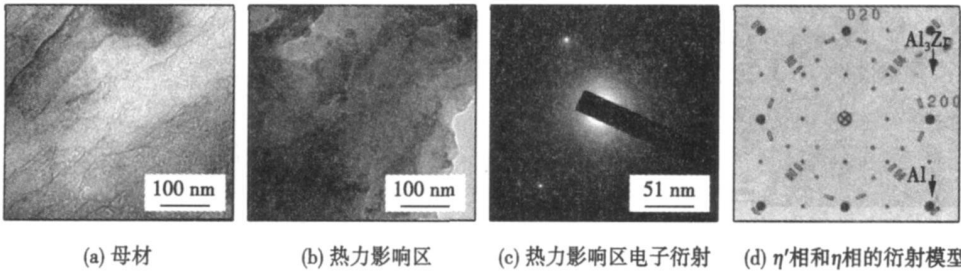


图 3 热处理后 7050 各区透射微观组织形貌
Fig. 3 TEM microstructure of 7050 aluminum alloy joint after heat treatment

示, 与电子衍射花样模型^[4] 相吻合.
图 4 为 7075 热处理后透射电镜图片, 由图 4 可知经热处理后, 材料的微观组织几乎没有针状析出物, 这使得材料在宏观上表现为, 焊缝拉伸强度的增加, 因为针状的组织更有利于裂纹的形成及扩展.

热力影响区除了球状的组织以外, 还有一些没有球化的组织掺杂其中, 这也是试样经热处理后薄弱环节仍在此处的原因. 母材板条组织逐渐消失, 还有一些大颗粒析出. 在图 4 b) 中还可以观察呈花瓣状的析出相, Dwyer 等人^[5] 认为该花瓣状的析出相为

Al_3Zr 粒子,是合金热处理时从基体中析出的,为面心立方晶体结构,与基体共格,图 4 (c)为 Al_3Zr 衍射斑点图,周围的斑点为 Al_3Zr 粒子. 固溶时处于晶界或亚晶界上球化的 Al_3Zr 粒子周围发生了 η 相析出后,由于温度较高,亚晶界、晶界迁移(再结晶)阻力下降,接着发生的过程中再结晶→形成非共格 Al_3Zr → η 相析出和长大交互影响. TEM 图像中在再结晶晶粒内也观察到了大量球形 Al_3Zr 和 η 相. 图 4 (e)为析出相 η 的衍射斑点,其中所指的位置为析出相 η . η 相与基体非共格,其强化效果较弱. 它具有六方

结构,点阵常数为 $a=0.521\text{ nm}$, $c=0.860\text{ nm}$,有 9 种不同的取向. 其形貌常为长条状,直径约为 $0.025\text{ }\mu\text{m}$ 长度约为 $0.1\sim0.3\text{ }\mu\text{m}$; η 相与基体半共格,是最主要的时效强化相. 关于其结构,不同的研究人员的观点不同:金延等人^[6]提出, η 相具有 C 心正交结构,点阵常数 $a=0.492\text{ nm}$, $c=0.701\text{ nm}$; Gjønnes 等人^[7]则认为, η 相具有单斜结构,但点阵常数为 $a=b=0.497\text{ nm}$, $c=0.544\text{ nm}$, $\gamma=120^\circ$. 形貌为圆片状,直径约为 $0.015\sim0.020\text{ }\mu\text{m}$,厚度约为 $0.005\text{ }\mu\text{m}$.

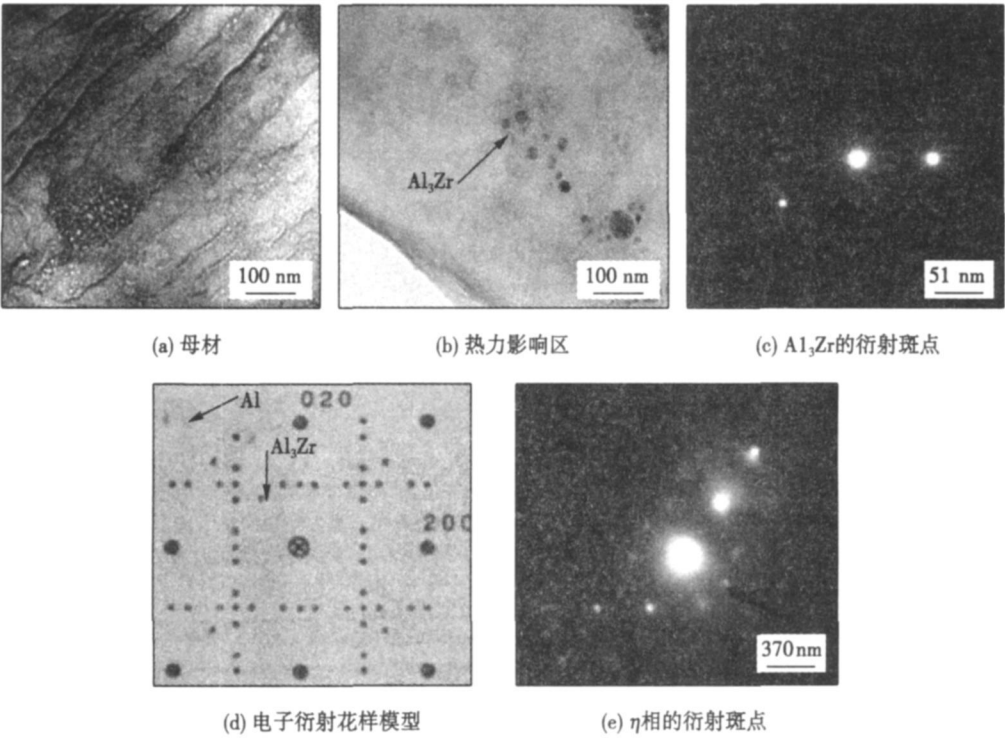


图 4 热处理后 7075 铝合金透射微观组织形貌
Fig. 4 TEM microstructure of 7075 aluminum alloy joint after heat treatment

2.3 热处理对显微硬度的影响

图 5 为 7050 铝合金搅拌摩擦焊试件的热处理

前后显微硬度分布. 热处理后试样的显微硬度较之前明显提高. 这是由于固溶处理在不提高合金元素

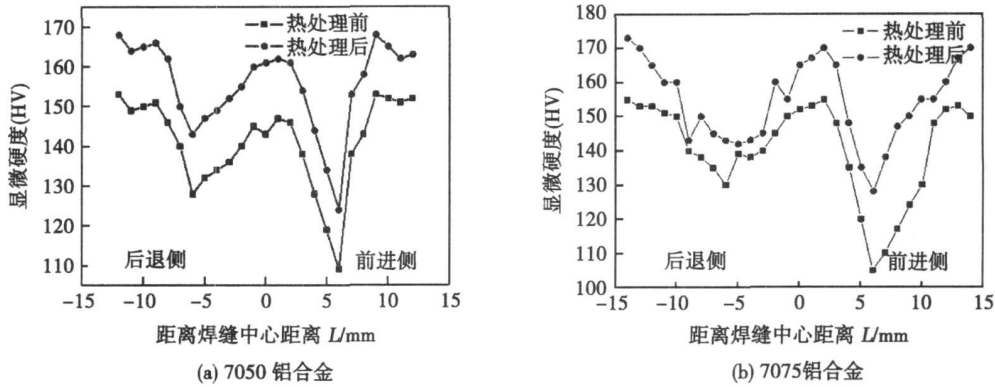


图 5 热处理前后试样的显微硬度分布
Fig. 5 Microhardness distribution of sample after and before heat treatment

总含量的前提下提高了固溶体的过饱和度,使固溶的合金元素浓度增加,同时减少了粗大未溶结晶相,使得显微硬度增加,硬度值分布更为均匀,从而提高材料的综合性能。

热力影响区晶粒度相差大,晶粒相对粗大,因而硬度最低,在承受应力应变时处于相对薄弱的环节。对于两种铝合金组织而言,不同参数的显微硬度都有提高,其中 7050在搅拌头旋转速度为 400 r/min焊接速度为 70 mm/min时,7075在搅拌头旋转速度为 600 r/min焊接速度为 60 mm/min时对应于之前的显微硬度增加的相对幅度较大,提高了 10%左右。这种变化与热处理在微观组织上的影响是分不开的。

2 4 热处理对抗拉强度的影响

接头力学性能如表 2所示,7075在搅拌头旋转速度为 600 r/min焊接速度为 60 mm/min的参数时,焊件的抗拉强度最好,达到母材强度的 84.6%。7050在搅拌头旋转速度为 400 r/min焊接速度为 70 mm/min的参数时,抗拉强度为母材强度的 84.7%。

表 2 热处理前接头的抗拉强度

Table 2 Tensile strength of joint before heat treatment

材料	旋转速度 n/(r min ⁻¹)	焊接速度 v/(mm min ⁻¹)	抗拉强度 R _m /MPa	接头与母材 强度比 (%)
7075	600	60	381.07	84.60
7050	400	70	390.48	84.70

由表 3可知在热处理后试样的强度明显提高,为母材强度的 89.50%,证明在该参数下 7075铝合金经搅拌摩擦焊后其接头力学性能良好,在经过热处理后可获得更高强度的接头。

表 3 热处理后接头的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of joint after heat treatment

材料	旋转速度 n/(r min ⁻¹)	焊接速度 v/(mm min ⁻¹)	抗拉强度 R _m /MPa	接头与母材 强度比 (%)
7075	600	60	415	89.50
7050	400	70	422	89.80

3 结 论

(1)微观组织上复杂的析出相的形貌使得热力

影响区是力学性能最为薄弱部位。

(2)接头经热处理后的热力影响区微观组织几乎没有针状的析出物,热力影响区的棒状颗粒逐渐消失,球状颗粒弥散分布在该区的晶界和晶粒中,还有一些没有球化的棒状掺杂其中,这也是试样经热处理后薄弱环节仍在此处的原因。

(3)显微硬度和抗拉强度都较热处理前有明显的提高。

参考文献:

[1] 贺地求, 邓 航, 周鹏展. 2219 厚板搅拌摩擦焊组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2007 28(9): 13—16
He D i q u Deng H a n g Zh ou P e n g z h a n Microstructure and properties analysis of friction stir welding on thick plate of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution 2007 28(9): 13—16

[2] Werenskold J C Deschamps A Brechet Y Characterization and modeling of precipitation kinetics in an Al-Zn-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering 2000 293(2): 267—274

[3] Engdahl T Warren P J Stiller K Investigation of fine scale precipitation in Al-Zn-Mg alloy after various heat treatment[J]. Materials Science and Engineering 2002 327(1): 59—64

[4] 张 坤, 刘志义, 冯 春. 添加微量 Ag 对高 Zn 超高强铝合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005 15(10): 116—122
Zhang Kun Liu Zh yi Feng Chun Effect of small addition of silver on microstructure and mechanical properties of high zinc super high strength aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2005 15(10): 116—122

[5] Dvrdov V G Rosova T D Zakharov V V et al Scientific Principles of making an alloying addition of scandium to aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering 2000 280(1): 30—36

[6] 金 延, 李春志, 赵英涛, 等. 7050 合金显微结构分析[J]. 金属学报, 1991 27(5): 317—323
Jin Yan Li Chun zhi Zhao Ying tao et al Microstructural analysis of 7050 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica 1991 27(5): 317—323

[7] Gjønnes J Sinson C J An electron microscope investigation of the microstructure in an aluminum-zinc-magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica 1970 18(8): 881—890

作者简介: 王希靖 男, 1956 年出生, 教授, 博士研究生导师. 主要从事搅拌摩擦焊研究. 发表论文 100 余篇.

Email wangxj@bjt.cn

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Effect of heat treatment on microstructure and Properties of thermomechanical affected zone of high-strength aluminum alloy WANG Xijiang SUN Guiping (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050 China). P 1—4

Abstract The effect of heat treatment on microstructure and Properties of high-strength aluminum alloy was investigated. The results showed that the rod-like precipitation disappears gradually and the spherical precipitation is dispersed in the grain boundary and grain of TMAZ after heat treatment. The mechanical Properties of aluminum alloys after heat treatment is improved. The tensile strength of 7075 aluminum alloy can reach to 415 MPa, 89.5% of the base metal. The tensile strength of 7050 aluminum alloy can reach to 422 MPa, 89.8% of the base metal. Both the fracture and the lowest hardness appear in TMAZ of advancing side of joints.

Key words aluminum alloy; microstructure; heat treatment

Effect of friction stir welding heat input on weld appearance and mechanical Properties of 6013-T4 Al alloy joint QN Guoliang, ZHANG Kun, ZHANG Wenbin, WU Chuansong (1. Research Institute of Advanced Welding Technology Jinan 250061 China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095 China). P 5—8

Abstract 2 mm Al6013-T4 alloy thin plates were welded by friction stir welding in experiment and the ratio of rotating speed of the stir pin to the welding speed ω/v was used to indicate the friction stir welding heat input. The effect of friction stir welding heat input on the weld appearance and mechanical Properties of the joint was studied and the microstructure of the joint was analyzed. The results show that the 6013-T4 Al alloy joint by friction stir welding has the better mechanical Properties, the yield strength and tensile strength of the joint can reach up to 75.8% and 83.3%, respectively, and they decrease with the heat input being increased at the different rotating speed of the stir pin. When the ω/v is 3 round/mm or so, the 6013-T4 Al alloy weld appearance will be good with few flashes. The analysis on the microstructure of the joint shows that the microstructure in the base metal is both the microstructure in the heat affected zone is similar to and little larger than that in the base metal. The microstructure in thermal/mechanical affected zone is much coarse and uneven in size, which includes the equiaxed grains and some elongated banded microstructure. In weld nugget zone, the microstructure consists of fine equiaxed grains.

Key words friction stir welding; Al alloy; heat input; microstructure and Properties; weld appearance

Effects of Si and Cu additions on Properties of dissimilar aluminum-galvanized steel weld DONG Honggang HU

Wenjin DUAN Yuping WANG Xudong (School of Materials Science and Engineering Dalian University of Technology Dalian 116085 Liaoning China). P 9—12

Abstract Dissimilar metals of 5A02 aluminum alloy and galvanized steel were joined with lap joint by gas tungsten arc welding (GTAW) with four filler wires respectively. The different contents of Si and Cu were added into the weld through different filler metals. It is found that when the Cu content exceeding a certain amount, the intermetallic compounds (MCs) layer is thicker than 10 μm . When the Cu content is low, the thickness of the MCs layer decreases with the increase of Si content in the weld. The MCs layer can be controlled as thin as about 2 μm . Measurements showed that the tensile strength of the aluminum-galvanized steel weld can reach 136 MPa when the Si content is more than 5%, and it is thought that the pores are the main factor to affect the Properties of the joint. In addition, more Si addition from the filler metal can improve the microstructure in the zone where the weld and base metal of aluminum alloy joined.

Key words aluminum alloy; galvanized steel; tensile strength; microstructure; pore

Microstructure and Properties of GH4169 vacuum diffusion bonded joint LI Zhuoran, YU Kang, LIU Bing, FENG Jical (1. State Key Lab of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China; 2. Shanghai Institute of Space Propulsion Shanghai 200233 China). P 13—16

Abstract The vacuum diffusion bonding process was used to weld GH4169 alloy and the effects of process parameters on the interface structure, interface bonding holes and mechanical Properties of the joints were investigated. The experimental results without interlayer show that with the increase of diffusion time and diffusion pressure in the range of 950—1150 $^{\circ}\text{C}$, both the number and size of interface bonding hole decrease and the maximum tensile strength is 658 MPa, but the discontinuous interface holes still exist. With the Cu interlayer, the solid solution layer exists on the interface and the maximum tensile strength is 745 MPa.

Key words nickel-base alloy; diffusion bonding; interlayer; tensile strength

Radial distribution of variable polarity plasma arc pressure JIANG Yizhi, XU Binshu, LÜ Yachu, LIU Cunpeng (1. National Key Laboratory for Remanufacturing Academy of Armored Forces Engineering Beijing 100072 China; 2. Naval Flying Academy of China Huadao 125101 Liaoning China). P 17—20

Abstract Molten pool and weld formation of variable polarity plasma arc (VPPA) welding are influenced greatly by VPPA pressure. Therefore, researches on VPPA pressure are mean-