

微量钪对 Al - Zn - Mg - Zr 焊接接头组织性能的影响

尹志民¹ 肖 静¹ 雷学锋^{1,2} 何振波^{1,3} 聂 波^{1,3}

(1 中南大学材料科学与工程学院,长沙 410083)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(3 东北轻合金有限责任公司,哈尔滨 150060)

文 摘 采用铸锭冶金法制备了 Al-6.0Zn-2.0Mg-0.12Zr 和 Al-6.0Zn-2.0Mg-0.2Sc-0.12Zr 两种合金板材,以 Al-Mg-Sc-Zr 焊丝为焊接填充材料,对 3 mm 厚的上述两种合金板材进行氩弧焊接,之后对两种接头的显微组织和力学性能进行对比研究。结果表明:第一,微量 Sc 可以显著提高 Al-Zn-Mg-Zr 合金基材的拉伸性能,基材强度的提高来源于晶粒细化强化、Al₃(Sc, Zr) 粒子的析出强化和 Al₃(Sc, Zr) 粒子引起的亚结构强化;第二,焊接过程中,不含 Sc 的合金焊接接头热影响区内 β 相 (MgZn₂) 粒子和晶粒明显粗化,含 Sc 的合金焊接接头热影响区内 β 相 (MgZn₂) 粒子也明显粗化,但晶粒大小没有明显变化,由于 Al₃(Sc, Zr) 粒子稳定性高,不容易粗化和团聚,对位错和亚晶界仍然起钉扎作用,热影响区仍然保持未再结晶组织,过时效软化现象相对于传统的铝镁合金来说不是很严重;第三,微量 Sc 可以明显提高 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接接头的强度,与不加 Sc 的合金焊接接头相比,添加 Sc 的合金拉伸强度从 395 MPa 提高到 447 MPa,强度系数从 0.7 提高到 0.8。强度的提高主要来源于晶粒细化强化、Al₃(Sc, Zr) 粒子的析出强化和由于 Al₃(Sc, Zr) 粒子的高稳定性导致的抗热循环软化能力的提高。

关键词 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接,钪,显微组织,力学性能

Effects of Minor Sc on Microstructure and Mechanical Properties of Al - Zn - Mg - Zr Alloy Welded Joint

Yin Zhimin¹ Xiao Jing¹ Lei Xuefeng^{1,2} He Zhenbo^{1,3} Nie Bo^{1,3}

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Northeast Light Alloy Co Ltd, Harbin 150060)

Abstract Two kinds of Al-6.0Zn-2.0Mg-0.12Zr and Al-6.0Zn-2.0Mg-0.2Sc-0.12Zr alloy plate were prepared by ingot-metallurgy. The alloy plates mentioned above with 3 mm thickness were welded by argon shield welding method, the mechanical properties and microstructures of the two welded joints filled with Al-Mg-Sc welding wire were studied comparatively. The results show that firstly, minor Sc can raise the mechanical properties of Al-Zn-Mg-Zr base alloy greatly. The reason for the increment is the fine grain strengthening, precipitation strengthening and the substructure strengthening caused by Al₃(Sc, Zr). Secondly, β phase (MgZn₂) and grain in the heat-affected zone of Sc-free alloy become coarse obviously because of the welding heat and the β phase (MgZn₂) of the alloy with Sc addition becomes coarse also but size of grain has no visible change. Al₃(Sc, Zr) are rather stable against coarsening and stabilize the microstructure by inhibiting dislocation recovery and recrystallization and overaging softening is not serious comparing with traditional aluminium alloy. The third, adding of minor Sc can raise the strength of welded joint remarkably: the tensile strength of alloy with Sc is raised from 395 MPa to 447 MPa and welding coefficient increases from 0.7 to 0.8 as well. The reason for the high strength of welded joint with minor Sc addition is the fine grain strengthening, precipi-

收稿日期: 2007-08-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助 (G2005CB623705)

作者简介: 尹志民, 1946 年出生, 教授, 主要从事高性能铝合金的研究。E-mail: yin-gp@mail.csu.edu.cn

tation strengthening and the increasing resistance to thermal cycling softening caused by Al₃(Sc, Zr).

Key words Al-Zn-Mg-Zr alloy welding, Sc, Microstructure, Mechanical properties

0 引言

Zn、Mg总含量为8%左右的Al-Zn-Mg合金金属中强耐蚀可焊铝合金,在航空航天领域有广泛用途。这种合金经过固溶、时效,基本上均匀分布着主要强化相,合金强度高塑性好。然而,Al-Zn-Mg合金经过焊接后,热影响区内相和T相聚集,导致焊接后合金性能大大降低^[1]。优化基材合金成分、合理选择配用焊丝和余高补强是提高焊接构件强度的有效途径。俄罗斯全俄轻合金研究院与全俄复合材料研究院在中强可焊Al-Zn-Mg合金基础上,用钪、锆作添加剂,开发了一种牌号为01970的高焊接性的Al-Zn-Mg合金,之后又陆续研究开发了称之为01970、01981的合金^[2~4]。有关微量Sc、Zr对

Al-Zn-Mg合金组织性能的影响已经有了一些报道,但是这种合金的焊接特性的还鲜有报道。本文在研制Al-Zn-Mg-Zr和Al-Zn-Mg-Sc-Zr两种合金板材的基础上,以Al-Mg-Sc-Zr焊丝为焊接填充材料,研究了微量Sc、Zr对Al-Zn-Mg合金焊接接头组织和性能的影响。

1 实验

1.1 材料

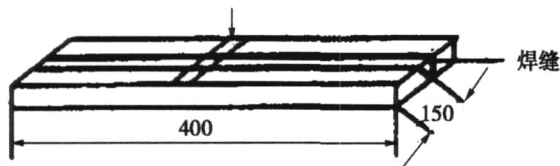
采用自制的含钪铝合金焊丝焊接,其主要化学成分见表1。基材为经过固溶-时效处理的Al-6.0Zn-2.0Mg-0.12Zr和Al-6.0Zn-2.0Mg-0.2Sc-0.12Zr合金板材,试板尺寸及坡口见图1。

表1 焊丝的化学成分

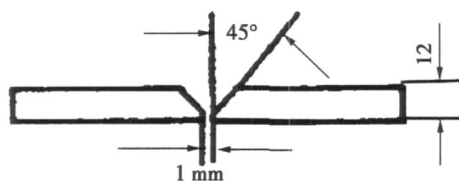
Tab 1 Chemical composition of solder wire

%(质量分数)

材料	Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Zr	Sc	Si	Fe	Al
焊丝	-	6.3	-	0.06	0.20	0.15	0.30	0.12	0.12	余量
基材 1 [#]	6.2	2.2	0.30	-	0.11	0.12	-	0.15	0.20	余量
基材 2 [#]	6.2	2.2	0.30	-	0.11	0.12	0.20	0.15	0.20	余量



(a) 焊接试板尺寸



(b) Y型坡口示意图

图1 焊接接头示意图

Fig 1 Sketch map of welded joint of studied alloys

1.2 方法

焊丝及焊件表面清理:用丙酮或酒精擦拭后,再用钢丝刷将焊接区域表面刷净,在8h内施焊完毕。具体焊接工艺参数见表2。

表2 焊接工艺参数

Tab 2 Parameters of MIG welding

焊件厚度	钨极直径	焊丝直径	喷嘴直径	焊接电流	氩气流量
/mm	/mm	/mm	/mm	/A	/L·min ⁻¹
3	5	3	12~16	200~280	12~16

1.3 测试

将焊接接头根据GB/T2652—1989加工成拉伸

试样,采用Instron 8019电子万能拉伸机进行拉伸测试;采用布氏硬度计沿焊接接头垂直焊道方向进行硬度测试;在金相显微镜上对焊接接头各区域组织进行金相观察。在焊接接头不同区域取样,机械减薄至0.12mm后,在HNO₃-CH₃OH=1:2溶液中于-20℃条件下双喷穿孔,制成电镜样品,电镜观察在Tecnai G² 20 ST型透射电镜上进行,电压200kV。

2 实验结果

2.1 焊接接头力学性能

2.1.1 硬度分布

研究合金焊接接头上距焊缝中心不同距离处的硬度分布如图2所示。

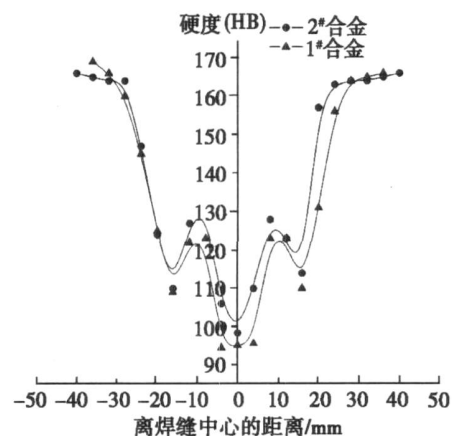


图2 合金焊接接头上的硬度分布

Fig 2 Hardness distribution of welded joint

从图 2可以看出,两种合金硬度分布规律是一致的,焊接接头的硬度都以焊缝为中心,呈近似对称。合金焊缝中心处的硬度最低,随距焊缝中心距离的增大,硬度逐渐增高,在距焊缝中心 18 mm 左右处出现一个硬度低值,随后硬度又逐渐增高,直至基材的硬度。此外,添加 Sc 的 2[#]合金焊缝中心的硬度比未加 Sc 的 1[#]合金焊缝中心的硬度提高了 5~10 HB,而在整体上 2[#]合金的硬度也要比 1[#]合金略高。

2.1.2 拉伸性能

合金板材焊接接头拉伸性能如表 3 所示。表 3 数据表明,添加 Sc 的 2[#]合金接头强度和伸长率比 1[#]合金有明显提高。

表 3 1[#]、2[#]合金焊接接头拉伸性能

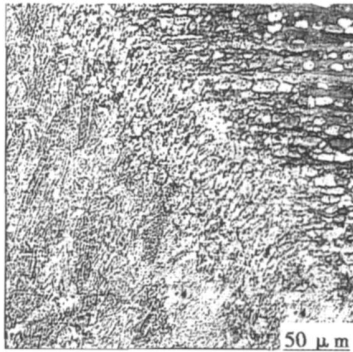
Tab 3 Tensile properties of welded joint

合金	σ_b /MPa	δ_5 /%	焊接系数 /%	断口所在部位
1 [#] 基材	532	12.5	76.9	-
1 [#] 接头	409	6.8	76.9	热影响区
2 [#] 基材	557	11.1	80.4	-
2 [#] 接头	447	7.6	80.4	热影响区

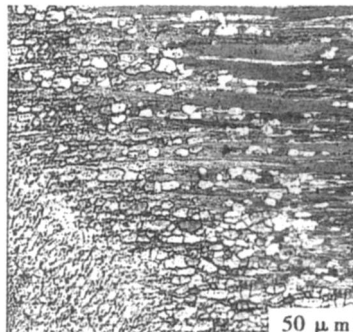
2.2 焊接接头显微组织

2.2.1 金相组织

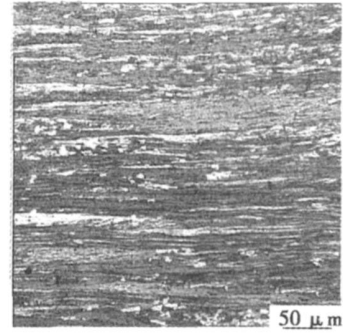
研究合金焊接接头不同部位的金相组织如图 3 所示。



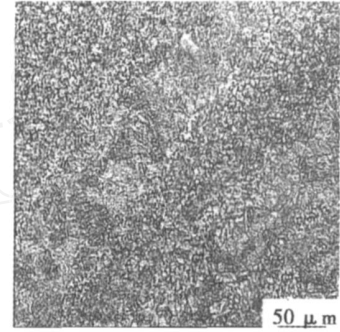
(a) 1[#]接头,焊缝区



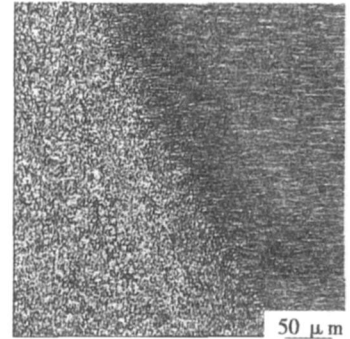
(b) 1[#]接头,焊缝向热影响区过渡



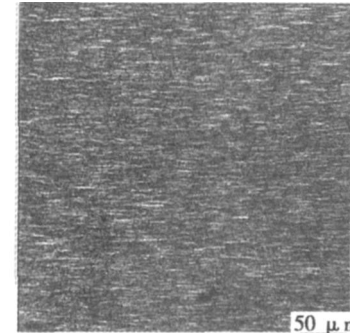
(c) 1[#]接头,热影响区向基材过渡



(d) 2[#]接头,焊缝区



(e) 2[#]接头,焊缝向热影响区过渡



(f) 2[#]接头,热影响区向基材过渡

图 3 合金焊接接头金相组织

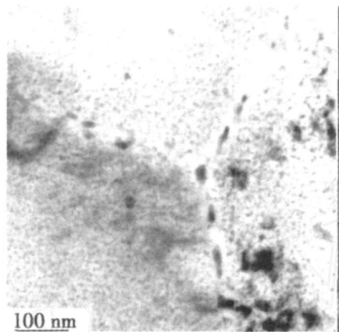
Fig 3 Optical microstructures of welded joint

从图 3 可见焊缝中心存在着细等轴晶、等轴枝晶,羽毛状和雪花状的枝晶 [图 3 (a)];狭窄的熔合区内主要由细小的等轴晶组成 [图 3 (c)],但是添加 Sc 的 2[#]合金等轴晶更加细小 [图 3 (b)]和 [图 3 (d)];比较热影响区和基材的晶粒组织,可看出,1[#]合金热影响区内靠近熔合线的部分发生了再结晶,热影响区靠近基材区的组织是加工组织包夹着再结晶

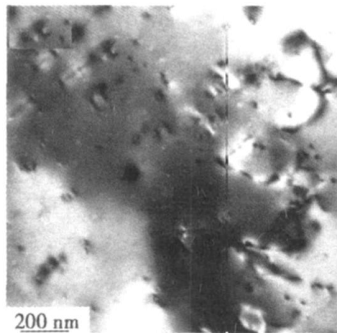
组织,同基材区的晶粒相比,晶粒发生了明显的长大。 $2^{\#}$ 合金由于添加了 Sc,基材显示为纤维状组织,相对于未加 Sc的合金,晶粒明显的细化 [图 3 (f)]。与此同时,由于添加 Sc抑制了再结晶,提高了合金在焊接热循环过程中的热稳定性,热影响区基本上还是类似于基材的纤维状组织 [图 3 (e)]。

2.2.2 透射电子显微组织

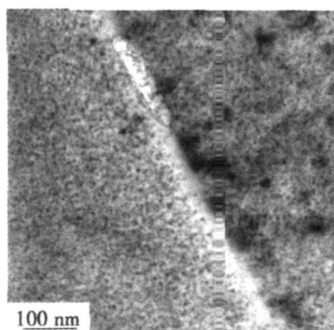
合金焊接接头不同部位的透射电子显微组织如图 4所示。



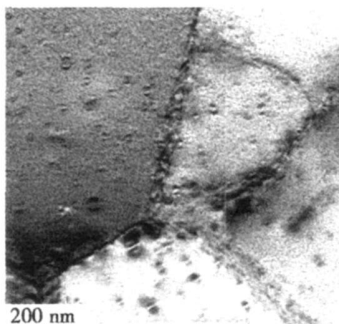
(a) $1^{\#}$ 接头,基材区



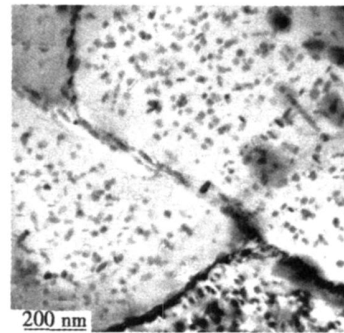
(b) $1^{\#}$ 接头,热影响区



(c) $2^{\#}$ 接头,基材区



(d) $2^{\#}$ 接头,热影响区 (双束条件)



(e) $2^{\#}$ 接头,热影响区

图 4 合金焊接接头 TEM组织

Fig 4 TEM microstructures of welded joint

比较图 4(a)和 (b)可以看出,在焊接热的作用下, $1^{\#}$ 合金焊接接头热影响区内 α 相 ($MgZn_2$) 粒子较之基材内的 α 相粒子明显粗化,晶粒也明显粗化。 $2^{\#}$ 合金焊接接头热影响区内晶粒大小没有明显变化,但热影响区内 α 相 ($MgZn_2$) 粒子较之基材内的 α 相粒子也明显粗化,与此同时,双束条件下还可以观察到合金内部存在蹄印状的粒子 [图 4(d)],根据文献 [5],蹄印状的粒子就是 A_1 (Sc, Zr) 粒子。

3 分析和讨论

3.1 微量 Sc和 Zr对焊缝组织和性能的影响

铝合金板材焊接后,焊接接头分为焊缝区、热影响区和基材区,如图 5所示。在焊接加热时,焊接热输出的热量使焊丝熔化,焊件冷却时,焊缝处得到的是凝固组织,由于焊件冷却速度很快,凝固组织也相当于过饱和固溶体组织,因此该区的硬度最低^[6-8]。采用 Al-Mg-Sc-Zr焊丝做填充材料时,在焊接熔池金属非平衡凝固过程中会形成 A_1 Sc、 A_1 Zr、 A_1 (Sc, Zr) 等第二相粒子,这些粒子的晶格类型 ($L1_2$) 及晶胞尺寸均与基体极为相似^[9-10],错配度非常小的这些初生相能作为很好的非均匀形核的核心质点,使焊缝晶粒得到了细化。焊缝强度主要来源于 Mg的固溶强化、添加 Sc引起的细晶强化和含 Sc、Zr的一次铝化物的析出强化。

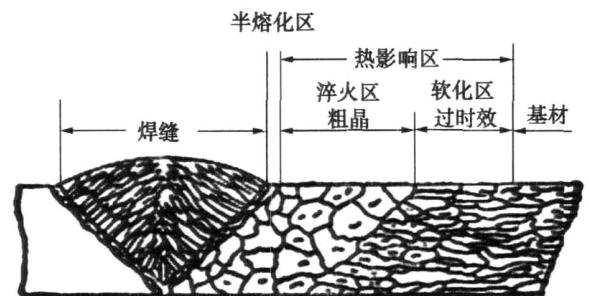


图 5 合金焊接接头示意图

Fig 5 Sketch map of welded joint

3.2 微量 Sc和 Zr对热影响区的影响

焊接过程中,焊接接头上从焊缝到基材不同区域

所经历的温度是不同的,焊缝区温度在 800 以上,熔合区到基材的温度则依次降低。当焊接热循环温度高于铝锌镁合金的固溶温度时,基材将重新固溶一次,焊接完成后在室温下停放,这部分会发生自然时效;当焊接热循环温度低于铝锌镁合金的固溶温度而高于铝锌镁合金的时效处理温度,基材中的强化相会发生聚集长大,原来的未再结晶组织会发生再结晶和晶粒长大。添加 Sc 会在合金中形成的二次铝化物 $Al_3(Sc, Zr)$, 这种粒子比 Al_3Zr 更加稳定,由于它对位错和亚晶界起钉扎作用,提高了板材的再结晶温度,使发生再结晶的程度减小^[11~15] [图 2(e)],含 Sc 的合金热影响区没有发生再结晶。

3.3 微量 Sc 对焊接接头性能的影响

基材实验结果表明,添加 Sc 的基材合金硬度、拉伸强度和伸长率均高于不含 Sc 的合金,这是添加 Sc 引起的细晶强化、加工热处理过程中获得的亚结构强化和 Al_3Sc 、 Al_3Zr 、 $Al_3(Sc, Zr)$ 等二次铝化物的析出强化所造成的。且含 Sc 合金的焊接接头拉伸强度和伸长率也高于不含 Sc 合金的,保留余高的焊接接头拉伸时样品都断在热影响区内,说明添加 Sc 主要是提高了基材的再结晶温度,使基材在焊接过程中发生再结晶的程度减小,从而保留了比较高的变形抗力,由于添加 Sc 引起的晶粒细化,焊接接头变形抗力提高,延伸率也同步提高(表 1)。

4 结论

(1)微量 Sc 可以显著提高 Al-Zn-Mg-Zr 合金基材的拉伸性能,基材强度的提高来源于晶粒细化强化、 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子的析出强化和 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子引起的亚结构强化。

(2)焊接过程中,不含 Sc 的合金焊接接头热影响区内 β 相 ($MgZn_2$) 粒子和晶粒明显粗化,含 Sc 的合金焊接接头热影响区内 β 相 ($MgZn_2$) 粒子也明显粗化,但晶粒大小没有明显变化。由于 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子稳定性高,不容易粗化和团聚,对位错和亚晶界仍然起钉扎作用,热影响区仍然保持未再结晶组织,过时效软化现象相对于传统的铝镁合金来说不是很严重。

(3)微量 Sc 可以明显提高 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接接头的力学性能,焊接接头强度的提高主要来源于晶粒细化强化、 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子的析出强化和由于 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子的高稳定性导致抗热循环软化能力的提高。

参考文献

1 Marzena L G, Sonia H C et al Structural parameters of

7020 alloy after heat treatment simulating the welding process Materials Characterization 2001; 46: 251 ~ 257

2 Jiang Feng, Yin Zhimin, Huang Baiyun et al Homogenization and recrystallization of Al-6Mg alloys with and without Sc and Zr Journal of Rare Earths, 2004; 22 (5): 600 ~ 603

3 陈苏里,姜锋,尹志民等.含钪与不含钪铝镁钪合金焊接接头的组织与性能.中国有色金属学报,2006; 16(5): 836 ~ 840

4 Lathabai S, Lloyd P G The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast Al-Mg alloy Acta Materialia, 2002; 50 (17): 4 275 ~ 4 292

5 Wang Sheng, Li Zhou Microstructures and properties of welded joint of 7A52 alloy welded by the solder wire containing Sc and Zr Ordnance Material Science And Engineering, 2005; 28 (3): 26 ~ 30

6 Selvi Dev a, A. Archibald Stuart a Effect of scandium additions on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg alloy welds Materials Science and Engineering A, 2007; (2): 1 ~ 7

7 Riddle YW, Hallen H, Ryum N. Highly recrystallization resistant Al-Mg-Mn alloys using Sc and Zr Materials Science Forum, 2002; 396 (1): 563 ~ 568

8 Riddle YW, Hallen H, Ryum N. Highly recrystallization resistant Al-Mg-Mn alloys using Sc and Zr Materials Science Forum, 2002; 396 (1): 563 ~ 568

9 Yin Zhimin, Yang lei, Pan Qinglin et al Effect of minor Sc and Zr on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg based alloys Trans Nonferrous Met Soc, 2001; 11 (6): 822 ~ 825

10 何振波. Al-Mg(Sc, Zr)合金焊接接头组织与性能试验研究.轻合金加工技术,2004; 34(8), 44 ~ 47

11 Ocenasek V, Slamova M. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloy Materials Characterization, 2001; 47 (2): 157 ~ 162

12 Gao Fengfu, Fuauan Tian, Hong Wang Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy Journal of Materials Processing Technology, 2006; 180: 216 ~ 220

13 Ma T, Ouden G Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding Materials Science and Engineering A, 1999; 266: 198 ~ 204

14 Balasubramanian V V, Ravisankar G, Madhusudhan Reddy Effect of pulsed current and post weld aging treatment on tensile properties of argon arc welded high strength aluminium alloy Materials Science and Engineering A, 2007; 459: 19 ~ 34

(编辑 吴坚)