

含铒铝合金 TIG 焊接头组织与性能

靳立坤¹, 李晓延¹, 贺定勇¹, 蒋建敏¹, 杨东霞², 聂祚仁²

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院; 2. 北京工业大学 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了研究 Er 元素对焊缝的强化作用及机理, 对含 Er 元素铝合金进行 TIG 重熔焊试验, 通过对接头组织结构观察和力学性能测试, 发现在焊缝的晶界处有初生 Al_3Er 相析出, 但与母材相比析出相数量较少, 在晶界处未形成连续的环状, 次生 Al_3Er 相在焊缝中也有析出, 但数量极少, Er 元素将以固溶态和偏析的形式存在. Er 元素对焊接接头的强化作用主要以初生相 Al_3Er 粒子的细晶强化为主, 而次生相对位错和亚晶界的钉扎作用很小. 结果表明, Er 元素对焊缝的强化作用有限, 焊接接头力学性能明显下降, 焊接接头的抗拉强度为 297 MPa, 是母材强度的 72%, 拉伸断裂位置主要是分布在焊缝中心或熔合区附近.

关键词: 初生相; 次生相; 细晶强化; 析出强化

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)08-0085-04



靳立坤

0 序 言

Al-Mg 合金因具有中等强度、高延展性、重量轻、耐腐蚀性好、焊接优良等特点被广泛用于航空航天、汽车、船舶等行业^[1], 随着技术的进步和应用范围的不断扩展, 对 Al-Mg 合金力学性能的要求在不断地提高.

Sc 元素是提高 Al-Mg 合金综合力学性能最为有效的微合金化元素^[2], 但是 Sc 元素作为战略性资源, 价格昂贵, 使含 Sc 元素的 Al-Mg 合金的推广应用受限. 近几年通过大量的试验证明, Er 元素在 Al-Mg 合金中具有同 Sc 元素相同的改性作用, 即 Er 元素通过初生 Al_3Er 相的细化晶粒和次生 Al_3Er 相对位错和亚晶界的钉扎作用来强化 Al-Mg 合金^[3]. 由于焊接工艺与铸造情况有很大的差别, Er 元素在焊缝中是否具有相同的强化作用, 并没有相关报道. 因此试验通过钨极氩弧焊研究了 Er 元素对焊缝重熔组织结构与力学性能的影响, 探究 Er 元素对焊缝的强化机理.

1 试验方法

试验所用母材为在冷轧条件下 1.5 mm 厚的

Al-Mg 合金, 其化学成分见表 1, 试验是在惰性气体保护下通过 TIG 焊在母材上直接重熔一道, 以研究在焊接热源作用下 Er 元素在焊缝的变化, 焊接时焊缝垂直于母材轧制方向.

表 1 母材的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of base metal

Mg	Mn	Zr	Er	Al
4.7	0.7	0.1	0.3	余量

焊接后在垂直于焊缝的焊道上截取金相试样, 经过机械抛光和 Kerell 试剂腐蚀后在 OLYMPUS - PMG3 型金相显微镜下进行金相组织观察, 在 MTS - 810 电子拉伸试验机上进行拉伸试验, 测试焊接接头的拉伸力学性能. 在 HXD - 1000TM 显微硬度机上垂直于焊缝从焊缝中心到母材测试试样显微硬度, 使用 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪对试样进行 X 射线衍射, 分析焊缝中 Al_3Er 相的析出, 对焊缝表面进行 SEM 扫描及对析出相进行能谱分析, 在 JEM - 2010 型透射电镜下进行微观组织的观察, 使用电子探针分析焊缝中 Er 元素分布是否均匀.

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头力学性能

2.1.1 显微硬度

图 1 为焊缝的显微硬度分布, 焊缝和热影响区

收稿日期: 2010-06-24

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划基金资助项目
(2009AA03E516, 2009AA0303801)

出现了明显的软化现象,焊缝宽度为 7 mm,焊缝的显微硬度达到了 81 HV,从焊缝中心 3.5 ~ 11 mm 是焊缝的热影响区,热影响区显微硬度逐渐升高,直至到达母材区后硬度值稳定下来,硬度值达到了 108 HV. TIG 焊焊缝的热影响区很宽,对焊缝周围母材的再结晶影响很大,含铒铝合金可以提高合金回复再结晶 20 ~ 30 °C,提高合金的抗软化作用. 但是由于焊接时热输入量较高,超过了含铒铝合金的回复再结晶温度,在焊缝的热影响区,发生了回复再结晶现象,因此焊缝的硬度出现了明显的下降.

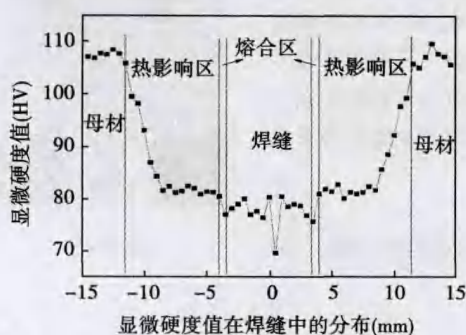


图 1 焊缝合金显微硬度

Fig. 1 Micro-hardness of welding alloy

2.1.2 拉伸力学性能

表 2 为焊接接头和母材的拉伸力学性能,为了消除焊缝中缺陷的影响,拉伸前对试样进行了表面加工处理,一共进行了 5 组拉伸试验,取平均值,焊接接头的抗拉强度为 297 MPa,达到母材的 72%,焊接接头的强度出现了明显的下降,拉伸断裂处发生在焊缝的中心或熔合区. 因此含 Er 元素铝合金的焊缝中心和熔合区是焊接接头的薄弱位置.

表 2 TIG 焊接接头拉伸试验结果

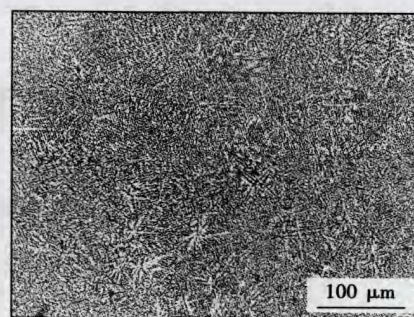
Table 2 Tensile test average results of TIG welding joints

区域	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置
焊接接头	297	熔合区或焊缝中心
母材	412	

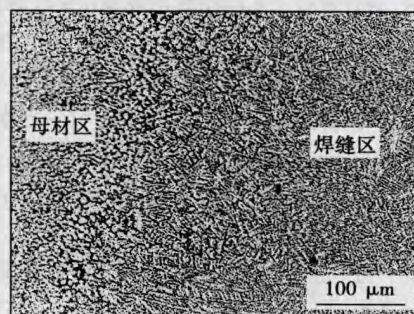
2.2 焊缝微观组织分析

2.2.1 金相组织分析

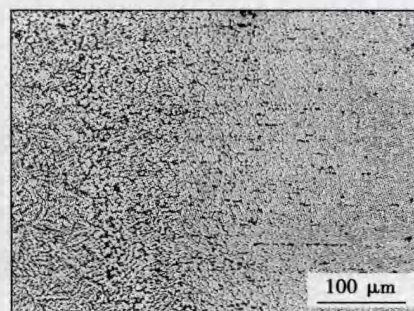
图 2 为铝合金焊缝金相组织形貌,图 2a 为焊缝中心,焊缝中有许多大小不等的等轴树枝晶,较大的等轴树枝晶呈雪花状,并且在等轴树枝晶周围存在着大量细小柱状晶,柱状晶分布方向并无明显的规律性. 图 2b 是熔合区附近的金相形貌,在熔合线附近靠近焊缝一侧存在大量粗大的柱状晶,图 2c 是焊缝的热影响区,纤维状组织已经明显发生了再结晶.



(a) 焊缝中心



(b) 熔合区



(c) 热影响区

图 2 焊接接头金相组织形貌

Fig. 2 Optical micrographs of welding

2.2.2 X 射线衍射及能谱分析

图 3 为对焊缝的 SEM 形貌观察,焊缝中有大量的形状不规则第二相粒子沿晶界析出,析出相尺寸大小为 2 ~ 3 μm,由于对焊缝进行了腐蚀,第二相粒

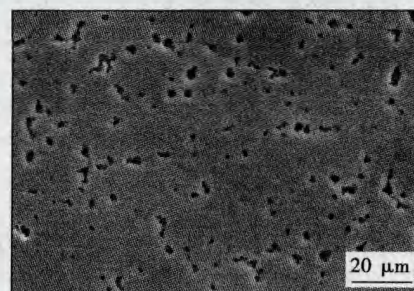


图 3 焊缝金属 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrograph of welding

子很多已经剥落,对还未剥落的粒子进行能谱分析,其化学成分如表3所示。

表3 扫描电镜下第二相能谱分析
Table 3 EDS analysis of second phase with SEM

元素	质量分数(%)	原子分数(%)
Mg	7.96	9.82
Al	78.92	87.66
Mn	0.46	0.25
Er	12.66	2.27
总量	100.00	100.00

第二相粒子主要是 Al, Mg 和 Er 三种元素组成。通过对焊缝进行 X 射线衍射分析(图4),在 X 射线衍射图谱中 Al_3Er 相的衍射峰都可以对应上,证明在焊缝中确实存在初生 Al_3Er 相,因此可以证实扫描电镜观察到析出物为初生 Al_3Er 粒子,在第二相的能谱分析中还有少量的 Mn 元素,可能是由于发生了元素偏聚现象,在第二相中聚集了一定数量的 Mn 元素,这与析出热力学和动力学有关。

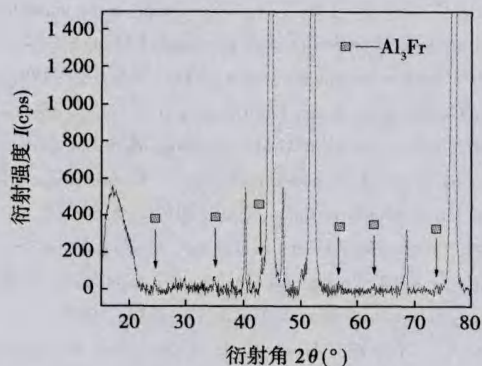


图4 焊缝合金 X 射线衍射谱
Fig. 4 XRD diffraction patterns of welding

由于焊缝金属温度高,冷却速度过快,通过电子探针面扫描分析在焊接热源下 Er 元素分布情况,见图5。图5中发现焊缝中 Er 元素除少量大尺寸粒子分布在晶界形成初生 Al_3Er 相,其它 Er 元素均匀地分布在焊缝中,没有发生明显的偏聚现象。聚集的 Er 元素形成 Al_3Er 粒子,以近似的圆形分布,进一步证实在焊缝晶界处有初生 Al_3Er 相析出。

2.2.3 透射电镜的组织观察

图6a,b 分别是焊缝和母材的透射电镜形貌,在图6a中析出相数量极少,图6b中则有大量的细小析出相,析出相主要以颗粒状形式存在,大小为 10~15 nm,对第二相能谱分析(表4),粒子的主要元素是 Al, Er, Zr, 结合文献[4],可以确定在焊缝中出

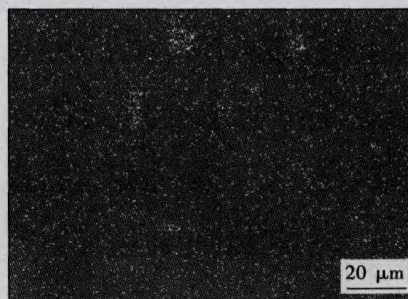
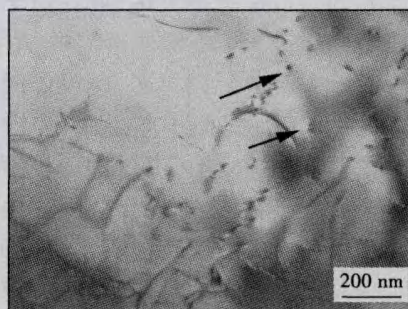
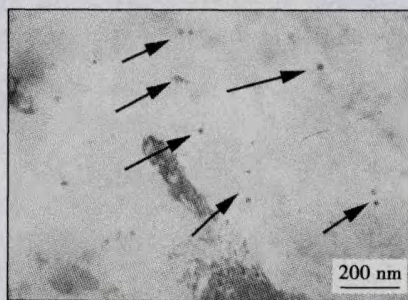


图5 Er 元素的面扫描
Fig. 5 Er element mapping



(a) 焊缝TEM形貌



(b) 母材TEM形貌

图6 焊缝金属及母材的透射电镜形貌

Fig. 6 TEM micrograph of welding alloy and base metal

表4 透射电镜下第二相能谱分析
Table 4 EDS analysis of second phase with TEM

元素	质量分数(%)	原子分数(%)
Mg	3.73	4.53
Al	83.48	91.32
Zr	9.00	2.91
Er	3.80	1.23
总量	100.00	

现的颗粒状物质是次生 Al_3Er 粒子或 $\text{Al}_3(\text{Er}, \text{Zr})$ 相粒子,只是由于焊缝金属冷却过快,固溶在铝基体中的 Er 元素没有得到充分析出,Er 元素将主要以固溶态的形式存在,因此与母材相比析出的次生相 Al_3Er 粒子或 $\text{Al}_3(\text{Er}, \text{Zr})$ 相粒子数量较少。

3 分析与讨论

3.1 Er 元素在焊缝中存在的形式

Al-Er 合金的共晶点成分是 6% 左右, 试验母材中 Er 元素的含量只有 0.3% 左右, 之所以可以生成初生的 Al_3Er 是因为 Er 元素在晶界处发生成分过冷和成分起伏波动使 Er 元素在晶体的边界处达到了共晶成分点, 且 Al-Er 合金的凝固范围小, 所以有初生的 Al_3Er 相析出。在随后的固溶处理过程中固溶在基体的 Er 元素将会析出大量的次生 Al_3Er 相^[5] 但是焊接与铸造是有很大的区别的, 由于焊缝金属冷却速度较快, 在焊缝晶界处析出的初生 Al_3Er 还没有来得及长大就会凝固下来, 所以焊缝中的初生 Al_3Er 相的尺寸相比母材中的要小, 焊缝中的初生 Al_3Er 相尺寸为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 是母材中初生 Al_3Er 相的二分之一左右^[6], 由于合金冷却速度过快, 在 Al-Er 合金的共晶点存在时间很短, 所以生成的 Al_3Er 晶粒数量较少, 由上述两种原因使得在焊缝晶界处形成的初生相数量比在铸态条件下减少许多, 在焊缝晶界处形成不连续的环状。次生 Al_3Er 相在焊缝中析出极少, 这与焊接条件下, 焊缝金属冷却速度过快, 冷却后未进行均匀化处理等因素有关。在焊缝中 Er 元素除部分以初生 Al_3Er 相和极少量的次生 Al_3Er 相外, Er 元素还将以其它形式存在, 通过电子探针面扫描分析证明 Er 元素在焊缝中没有发生明显的偏聚现象, 因此 Er 元素在焊缝中以固溶态的形式存在。

3.2 Er 元素对焊缝力学性能的影响

在 Al-Mg 合金铸态条件下, Er 元素的强化作用主要是通过初生的 Al_3Er 相的异质形核作用, 细化晶粒, 晶粒越细, 强度也就越高, 即所谓的细晶强化机制。同时在母材中也可以发现有大量的次生 Al_3Er 相从固溶体中析出, 次生相具有对位错和亚晶界的强烈钉扎作用, 从而起到析出强化的作用^[6]。

试验中焊缝主要析出相是初生 Al_3Er , 次生相极少, Er 元素的强化作用主要是通过初生 Al_3Er 相的细晶强化, 但是由于焊缝中初生 Al_3Er 相数量比母材中少, 在晶界处没有形成连续环状, 阻碍晶粒长大的作用要比在母材中的作用小, 细晶强化作用有限。焊缝中次生 Al_3Er 相析出量极少, 难于对焊缝中的位错和亚晶界产生强烈的钉扎作用, 试样在受力时焊接接头易发生位错滑移, 焊后时效过程中焊缝中亚晶粒也容易长大, 因此没有起到次生相的析出强化作用。此外, 在焊缝中除了细小的等轴树枝晶外,

还有大量排列无序的细小柱状晶, 柱状晶的存在将使焊缝抗拉强度明显的下降, 在熔合区靠近焊缝一侧存在大量垂直于熔合线的粗大柱状晶, 熔合线非常明显, 因此焊缝中心和熔合线附近是焊接接头最为薄弱的位置。

4 结 论

(1) 在焊缝中除生成初生 Al_3Er 相的 Er 元素以较大尺寸粒子分布在晶界外, 其它 Er 元素均匀分布在焊缝中。

(2) 重熔焊 Er 元素在焊缝中的析出相主要是以初生 Al_3Er 相形式存在, 次生 Al_3Er 相析出量极少。接头强度主要通过细晶作用来强化, 而次生 Al_3Er 相在提高 Al-Mg 合金强度中起主要作用, 因此要提高含钇 Al-Mg 接头强度, 需要通过填丝焊或改进焊接工艺等方面提高次生相在焊缝中的析出量。

参考文献:

- [1] Wu Z G, Song Min, He Y H. Effects of Er on the microstructure and mechanical properties of an as-extruded Al-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 504: 183-187.
- [2] Yin Zhimin, Jiang Feng, Pan Qinglin, et al. Microstructures and mechanical properties of Al-Mg and Al-Zn-Mg based alloys containing minor scandium and zirconium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 515-520.
- [3] Yang Junjun, Nie Zuoren, Jin Tounan, et al. Effect of trace rare earth element Er on high pure Al[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(5): 1035-1039.
- [4] Wen S P, Xing Z B, Huang H, et al. The effect of erbium on the microstructure and mechanical of Al-Mg-Mn-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 516: 42-49.
- [5] 徐国富, 杨军军, 金头男, 等. 微量稀土元素 Er 对 Al-5Mg 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(5): 768-773.
Xu Guofu, Yang Junjun, Jin Tounan, et al. Effects of trace rare-earth element Er on microstructure and properties of Al-5Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006 16(5): 768-773.
- [6] 季小兰, 刑泽炳, 聂祚仁, 等. 钇对 Al-4.5Mg-0.7Mn 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2006, 30(4): 462-465.
Ji Xiaolan, Xing Zebing, Nie Zuoren, et al. Effects of trace erbium on structure and tensile properties of Al-4.5Mg-0.7Mn alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(4): 462-465.

作者简介: 靳立坤, 男, 1982 年出生, 硕士研究生。主要从事于含钇铝合金焊接性能方面的研究。Email: jinlikun2008@163.com

通讯作者: 李晓延, 男, 教授, Email: xyli@bjut.edu.cn