

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.05.017

## Al-Cu-Li 合金电子束焊接头的微观组织结构

王少刚 贲海峰 黄燕 韩小敏 陈照峰

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,210016)

**摘要:**采用真空电子束焊接 Al-Cu-Li 合金,分析了焊态下接头的微观组织以及焊后热处理对接头微观组织结构的影响。结果表明,在焊态下,焊缝中心为典型的树枝晶,在树枝晶界分布着共晶组织,其主要组成相为  $\alpha + \theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ),焊缝中的强化相数量较少。经过焊后热处理,接头焊缝区组织发生了显著变化,焊缝中心组织由树枝晶转变为等轴晶,焊态下的晶界偏析现象得以消除,焊缝中析出了数量较多的球状  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) 相以及细针状  $T_1$  ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ) 相,使接头的力学性能明显改善,接头抗拉强度由焊态下的 348 MPa 提高到热处理后的 423 MPa,接头拉伸断口呈韧性断裂特征。

**关键词:** Al-Cu-Li 合金;电子束焊;微观组织;焊后热处理

**中图分类号:** TG456.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2015)05-0730-07

## Microstructure of Al-Cu-Li Alloy Joint with Electron Beam Welding

Wang Shaogang, Ben Haifeng, Huang Yan, Han Xiaomin, Chen Zhaofeng

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of  
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The Al-Cu-Li alloy is welded by using the vacuum electron beam welding (EBW). The microstructure of joint under the as-welded (AW) condition and the effect of post-weld heat treatment (PWHT) on the microstructure of joint are investigated. The results show that under the AW condition, the microstructure of weldment is a typical dendrite, and there are a lot of eutectic structures which are mainly composed of  $\alpha + \theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) phase distributed in the dendrite boundary. The quantity of strengthening phase is less in the weld center. The microstructure of joint obviously changes after PWHT. The dendritic structure in the center of weldment is transformed into equiaxed grains. The segregation phenomenon of grain boundary is eliminated under the AW condition. Many strengthening phases precipitate in the weldment, such as spherical  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) phase and fine needle-like  $T_1$  ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ) phase, and the tensile strength of welded joint is greatly improved. The tensile strength of joint is enhanced from 348 MPa under the AW condition to 423 MPa after PWHT, and the tensile fracture of joint presents the characteristic of ductile fracture.

**Key words:** Al-Cu-Li alloy; electron beam welding; microstructure; post-weld heat treatment

近年来,随着航空航天工业的快速发展,新型铝锂合金正逐步取代传统高强铝合金用于制作飞行器结构。与第 2 代铝锂合金相比,第 3 代 Al-Cu-Li 系合金,具有更加优异的综合性能,如合金的强

度和韧性平衡良好、耐损伤性能优良、各向异性小、热稳定性好、耐腐蚀及成型加工性好等,在航空航天等领域中具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。在工业生产中,铝锂合金大多作为焊接结构件使用,但是由于

**基金项目:**航空科学基金(2015ZE52048)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2015-07-01;**修订日期:**2015-08-20

**通信作者:**王少刚,男,副教授,E-mail:sgwang@nuaa.edu.cn。

Li 元素所具有的特性,采用熔化焊方法焊接铝锂合金时易出现焊缝气孔、热裂纹等缺陷<sup>[4]</sup>,难以获得高质量的焊接接头。真空电子束焊具有能量集中、接头热影响区窄、焊接变形小以及保护气氛好等优点,用于铝锂合金的焊接具有较大优势<sup>[5]</sup>。依据文献查询和实际调研,目前国内外对铝锂合金的电子束焊接研究主要集中在第 2 代合金,如 8090, 1420, 2090 等,对第 3 代铝锂合金的电子束焊接研究文献报道还比较少。已有的研究表明,尽管铝锂合金电子束焊接头的抗拉强度较传统熔化焊的强度有所提高,但由于焊接时受到高温热循环作用,接头区域的微观组织较原始母材发生了较大变化,导致接头强度与母材本身的强度相比有所下降。基于此,本文采用真空电子束焊接 Al-Cu-Li 合金,并在焊后对接头进行固溶+时效热处理,分析研究

焊后热处理对接头微观组织演变的影响,以进一步提高接头的强度系数,可为铝锂合金在实际生产中的应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

试验母材为厚度 2.5 mm 的 Al-Cu-Li 合金轧制板材,热处理状态为 T8 态,其化学成分为 (wt%):Al-3.6Cu-0.8Li-0.7Mg-0.34Ag-0.32Zn-0.29Mn-0.12Zr,拉伸实验测定母材的抗拉强度为 498 MPa。将母材加工成尺寸为 200 mm × 100 mm × 2.5 mm 的焊接试样,焊前分别采用机械和化学方法去除母材表面的氧化膜和污染物。采用对接接头型式,沿着试样长度方向进行焊接,焊接设备为 LARA52 型真空电子束焊机,经过优化的电子束焊接工艺参数见表 1。

表 1 电子束焊接工艺参数

Tab. 1 Electron beam welding parameters

加速电压/ kV	电子束流/ mA	焊接速度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	真空度/ Pa	工作距离/ mm	函数图形		
					形状	频率/Hz	大小(长×宽)/(mm×mm)
100	6.8	750	$5 \times 10^{-2}$	200	∞	1 500	0.6 × 1.2

焊后对 Al-Cu-Li 合金接头进行固溶+时效热处理,热处理工艺制度为:在 XRN-35-5 型硝酸盐炉内进行 535 °C × 30 min 固溶处理,水中淬火,淬火转移时间小于 30 s,随后在 DHG-9109A 型鼓风机干燥箱中进行人工时效,时效温度为 165 °C,时间 24 h。

采用线切割方法垂直于焊接方向截取接头测试分析试样。采用 MM6 型光学显微镜对接头的微观组织进行观察分析;采用 CMT-5105 型万能电子试验机测定接头的拉伸强度,测试条件为:加载速率 1 mm/min,加载载荷 10 kN。采用 Quanta 200 型扫描电镜观察接头拉伸断口形貌,用附带的能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)测定接头熔合区附近合金元素的分布,对接头焊缝金属微区的化学成分进行分析;采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)测定热处理后接头焊缝金属区的相结构组成;采用 JEM 2010 型透射电镜对接头焊缝金属区的微观亚结构进行观察分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊态下 Al-Cu-Li 合金接头微观分析

#### 2.1.1 接头过渡区显微组织

图 1 为 Al-Cu-Li 合金接头过渡区显微组织,

熔合线左侧为热影响区。从图 1 中可以看出,热影响区组织为沿轧制方向的纤维状组织,但组织晶粒有所粗化。由于靠近熔合区的母材部位在焊接过程中受到强烈的热循环作用,使合金中的 T<sub>1</sub>(Al<sub>2</sub>CuLi)相发生溶解,合金元素在晶界附近发生偏析。在熔合线附近的热影响区会形成部分熔化区(Partially melted zone, PMZ),其峰值温度低于固相线温度、高于共晶温度,晶界中的溶质元素含量一般较高、熔点较低,容易发生液化<sup>[6]</sup>,对接头的力学性能可能产生不利影响。

图 2 为熔合线附近靠近焊缝一侧形成的等轴细晶区(Equiaxed grain zone, EQZ)局部放大图。

从图 2 中可以看出,等轴晶粒的尺寸约为

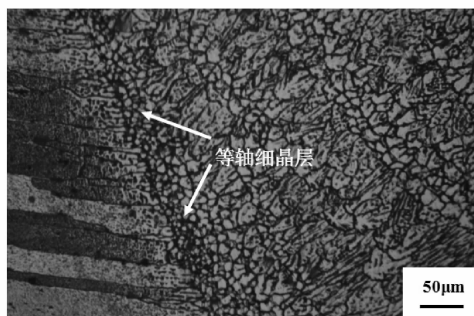


图 1 Al-Cu-Li 合金焊接接头过渡区组织

Fig. 1 Microstructure of transition region for Al-Cu-Li alloy joint

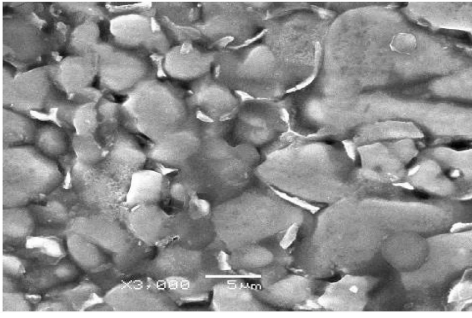


图2 熔合线附近等轴细晶区放大图

Fig. 2 High amplification photo of fine EQZ near fusion line

5  $\mu\text{m}$ 。等轴细晶区的形成主要与 Al-Cu-Li 合金中存在的 Li、Zr 等元素有关<sup>[7]</sup>。研究表明<sup>[8]</sup>，由于共晶组织包围等轴细晶区晶粒的晶界，在应变作用下，不仅等轴细晶区晶粒的晶界容易产生焊接裂纹，而且从焊缝中发展到细晶区的裂纹也容易沿着细晶粒的边界扩展，因此，等轴细晶区的存在使合金具有较高的焊接热裂纹倾向。

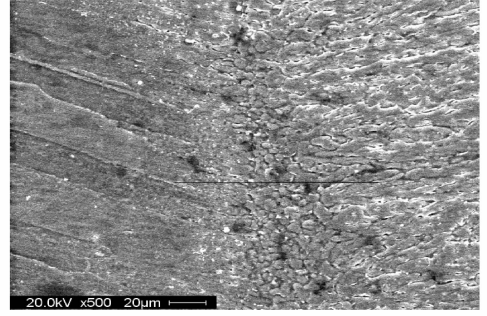
### 2.1.2 接头过渡区合金元素线扫描分析

从结晶学角度来说，当溶质元素均匀分布在固溶体中时，此时的状态最为理想。但是由于焊接过程的特殊性，熔池金属在凝固时常常偏离平衡态，使得合金元素存在一定程度的偏析。为了深入了解 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头不同区域元素的分布情况，对接头熔合区进行合金元素线扫描分析。图3为 Al-Cu-Li 合金接头合金元素线扫描位置以及对应的能谱曲线图。

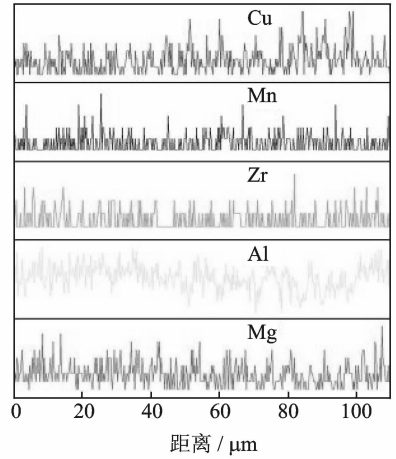
由于 Li 元素较轻，因此从能谱曲线图上并不能反映 Li 元素的变化情况。从图3(b)中可以看出，Al、Mg、Zr、Mn 等元素分布比较均匀，烧损现象以及成分偏析不是很明显。但是在焊缝金属区，Cu 元素多次出现峰值，可能是由于在峰值处存在某种含 Cu 的强化相或者 Cu 元素在晶界发生了偏析，导致峰值的出现。

### 2.1.3 焊缝金属扫描电子显微镜照片与能谱分析

图4为 Al-Cu-Li 合金接头焊缝金属的扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)照片。从图4中可以看出，焊缝金属区为典型的铸态组织，等轴树枝状晶呈网络状分布，造成晶界和晶内化学成分的不均匀性。焊缝金属晶粒内分布有白色球状以及板条状强化相，强化相的数量不多，而在树枝晶界处则断续分布着强化相。对图4中局部区域(A、B点)进行 EDS 分析，测试结果如图



(a) 线扫描位置



(b) 扫描能谱图

图3 接头熔合区元素线扫描位置及能谱曲线图

Fig. 3 Alloy element line scanning position and energy spectrum curves for fusion zone of joint

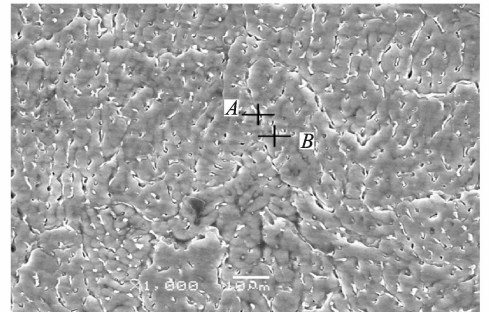
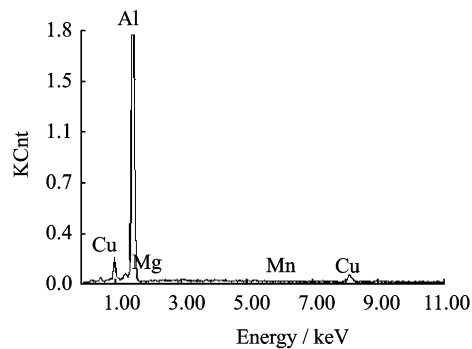


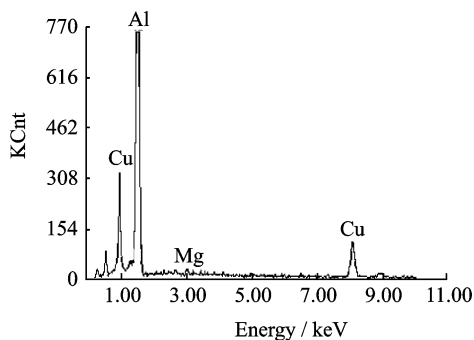
图4 Al-Cu-Li 合金接头焊缝金属 SEM 照片

Fig. 4 SEM photo of weld metal for Al-Cu-Li alloy joint

5 所示，对应点的化学成分见表2。结合图5和表2可以看出，晶界处 Cu 元素的含量明显高于母材，结合 XRD 分析可知，晶界共晶组织的主要组成相为  $\alpha + \theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )。Cu 元素在晶界发生偏析的原动力为畸变能差，与晶粒内部的畸变能相比，晶界处的晶格畸变能较高。



(a) A点



(b) B点

图 5 焊缝金属局部微区能谱分析曲线

Fig. 5 Energy spectrum curves of local micro-zone of weld metal

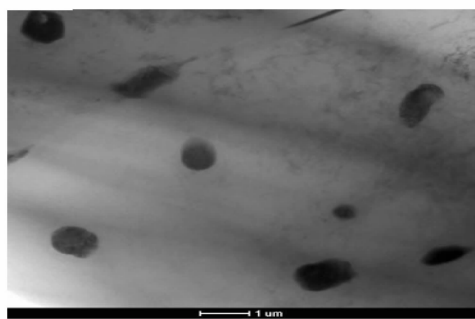
表 2 焊缝金属局部微区化学成分

Tab. 2 Chemical composition of local micro-zone of weld metal

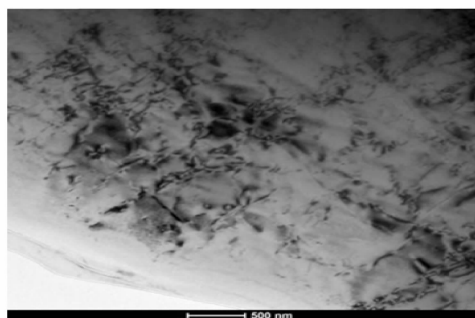
测试微区位置		Al	Cu	Mg	Mn
A 点	wt%	87.97	10.88	0.44	0.71
	At%	94.16	4.94	0.52	0.37
B 点	wt%	79.57	20.16	0.27	
	At%	89.98	9.68	0.34	

2.1.4 焊缝透射电子显微镜图片与分析

图 6 为 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝透射电子显微镜 (Transmission electron microscope, TEM) 形貌。从图中可以看出,在焊态下焊缝中的强化相数量较少,并未观察到原始母材中的主要强化相  $T_1$  相,这是由于焊接时热源中心的温度较高,母材组织中原有的  $T_1$  相在高温下发生了溶解。由图 6 中观察发现,在晶粒内部存在高密度的位错,这是因为焊缝金属冷却结晶过程中,在晶体长大相遇处存在位向差、合金元素发生偏析等使晶体各部分的点阵常数不同,此外还存在局部应力集中,导致容易在晶体内形成大量位错。



(a) 强化相



(b) 位错

图 6 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝 TEM 形貌

Fig. 6 TEM morphologies of weldment for Al-Cu-Li alloy joint

2.2 焊后热处理对 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头微观组织的影响

2.2.1 热处理对接头过渡区组织的影响

图 7 为焊后热处理 (Post-weld heat treatment, PWHT) 后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头过渡区的显微组织。从图 7 中可以明显看出,热处理后原先沿着熔合线分布的等轴细晶层消失,位向一致的柱状晶粒相互之间合并、长大。此外,大量的

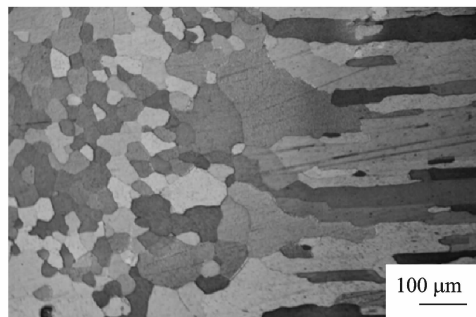


图 7 热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头过渡区金相组织

Fig. 7 Microstructure of transition zone for Al-Cu-Li alloy joint after PWHT

时效强化相在热影响区沉淀析出,使得在焊态下由于焊接热循环导致的热影响区附近的半熔合区过时效软化现象基本得以消除。

### 2.2.2 热处理对接头焊缝区组织的影响

图8为热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝区的微观组织。从图8中可以看出,与焊态下的焊缝组织相比,热处理后焊缝的金相组织发生了明显改变,等轴树枝晶组织已完全消失,焊缝组织为典型的等轴晶,析出的强化相在晶粒内均匀分布。这是由于在 535 °C 固溶处理 30 min 后,使焊缝中的共晶组织大部分溶解到  $\alpha(\text{Al})$  基体中,随后的水淬冷却使  $\alpha(\text{Al})$  固溶体处于过饱和状态,Cu、Li 等原子随机均匀地分布在铝基体中。此外,基体中还含有高浓度的空位。当在 165 °C 低温进行人工时效时,过饱和固溶体发生脱溶分解即原子扩散过程,焊缝组织中的第二相从过饱和固溶体中重新析出。因此,通过焊后热处理,焊缝组织中含有  $\alpha$  相固溶体以及金属间化合物强化相,有利于提高接头的力学性能。

图9为热处理后接头焊缝组织的 SEM 照片。焊态下,铝锂合金电子束焊接头焊缝组织中大量的

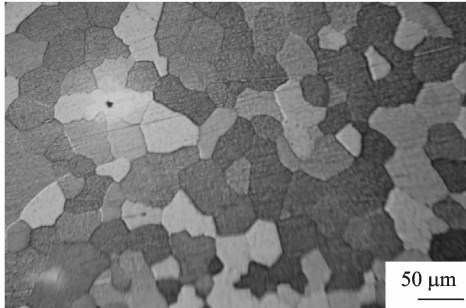


图8 热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝区金相组织

Fig.8 Microstructure of weld metal for Al-Cu-Li alloy

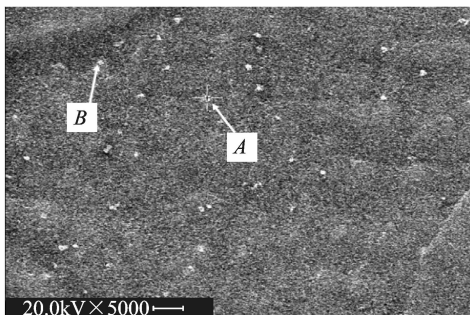


图9 热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝金属 SEM 照片

Fig.9 SEM photo of weld metal of Al-Cu-Li alloy joint after PWHT

溶质元素在树枝晶间以及晶界处发生偏析,导致焊缝中的强化相数目大大减少,使接头的强度不高。从图9中可以看出,热处理后,焊缝中弥散分布着大小不一的析出强化相。为了对时效后的析出强化相进行进一步探究,对焊缝局部区域进行 EDS 能谱分析。图10为图9中 A、B 点局部微区能谱分析曲线,对应微区的化学成分见表3。

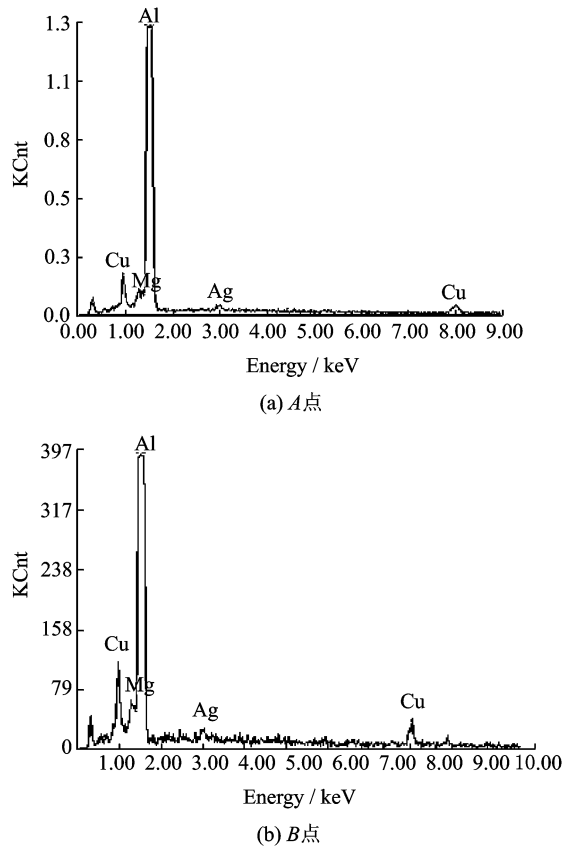


图10 热处理后焊缝金属局部微区能谱分析

Fig.10 Energy spectrum curves of local micro-zone of weld metal after PWHT

表3 热处理后焊缝金属局部微区化学成分

Tab.3 Chemical composition of local micro-zone of weld metal after PWHT

测试微区位置		Al	Cu	Mg	Ag
A 点	wt%	92.20	5.57	0.43	1.81
	At%	96.56	2.47	0.50	0.47
B 点	wt%	91.70	6.58	0.26	1.46
	At%	96.38	2.94	0.30	0.38

图11为热处理后接头焊缝金属的 XRD 分析曲线,由图11中可知,焊后固溶+时效处理后的 Al-Cu-Li 合金接头焊缝金属区含有  $\alpha(\text{Al})$  固溶体、 $\text{Al}_2\text{CuLi}$ 、 $\text{Al}_2\text{Cu}$  以及  $\text{Al}_3\text{Li}$  等强化相。原始母材中同时添加微量的 Mg、Ag 元素,可改变 Al-Cu-Li 合金的时效析出过程,从而促进  $\text{T}_1$  相的沉淀析出

以及  $\theta'$  相的细小均匀析出,使合金具有良好的强韧性平衡。郑子樵等<sup>[9-10]</sup>的研究认为,在时效过程中,Ag 和 Mg 原子能够形成 Ag-Mg 原子团簇,在  $T_1$  相的形核过程中起到“催化”和“桥梁”作用。时效初期,Ag 和 Mg 在基体  $\{111\}_\alpha$  面上发生偏聚,为  $T_1$  相的形核提供结构和成分条件。形核后在  $T_1$  相长大过程中 Ag 和 Mg 原子进一步扩散至  $T_1/\alpha$  界面,使  $\{111\}_\alpha$  面上的错配应变降至最小,从而使随后  $T_1$  相的长大更加容易。

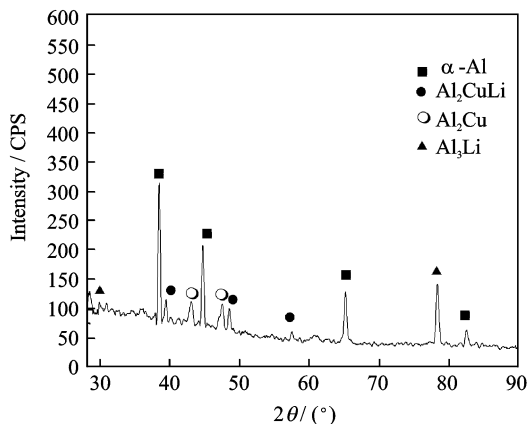


图 11 热处理后接头焊缝金属的 XRD 图谱

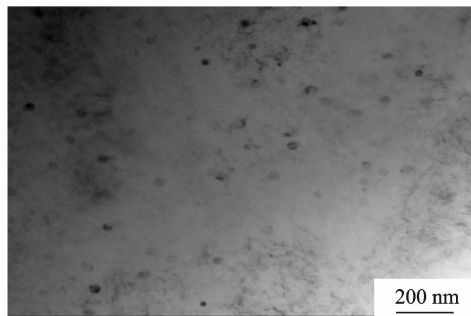
Fig. 11 XRD curve of weld metal after PWHT

### 2.2.3 热处理后接头焊缝 TEM 观察与分析

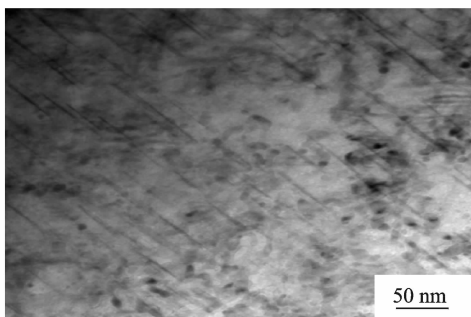
图 12 为热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝的 TEM 组织形貌。与焊态下的焊缝 TEM 组织相比,经过焊后固溶+时效热处理,在焊缝中析出了大量的时效强化相。图 12(a)为热处理后  $\delta'$ ( $Al_3Li$ )相的形貌,从图 12(a)中可以看出,细小  $\delta'$ 相弥散分布在  $\alpha(Al)$ 基体中。 $\delta'$ 相作为 Al-Cu-Li 合金中的主要强化相之一,为 L12 型超点阵结构。 $Al_3Li$ 相为亚稳析出相,研究表明,在淬火过程中,会产生大量的位错和空位,由于空位与 Li 原子的结合能较高,因此  $\delta'$ 相粒子容易在固溶淬火过程中形核,在随后的时效过程中  $\delta'$ 相继续析出和长大<sup>[11]</sup>。从图 12(b)中可以看出,具有方向性的相为 Al-Cu-Li 合金焊缝中析出的半共格强化相  $T_1$  相,其惯析面为  $\{111\}_{Al}$ ,  $T_1$  相与 Al 基体的位向关系为

$$[0001]_{T_1} // [111]_{Al} \quad [10\bar{1}0]_{T_1} // [110]_{Al}$$

由于  $T_1$  相的形核激活能较高,在时效初期不易析出,随着时效时间的延长, $\delta'$ 相长大到一定程度时,其与 Li 原子结合的空位得到释放,增强了 Cu 原子的扩散,使得  $T_1$  相能够大量弥散析出, $\delta'$ 相的析出受到抑制,使小于临界尺寸的  $\delta'$ 相开始溶解,从而有更多的 Li 原子释放出来,加快  $T_1$  相的



(a)  $\delta'$ 相



(b)  $T_1$ 相

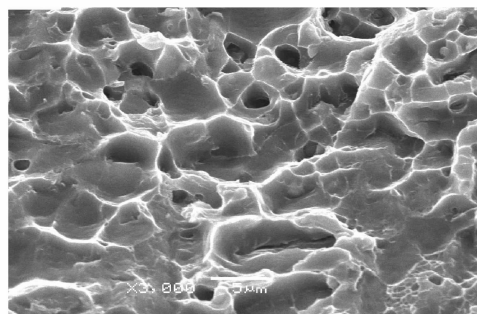
图 12 热处理后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头焊缝的 TEM 形貌

Fig. 12 TEM morphologies of weldment of Al-Cu-Li alloy after PWHT

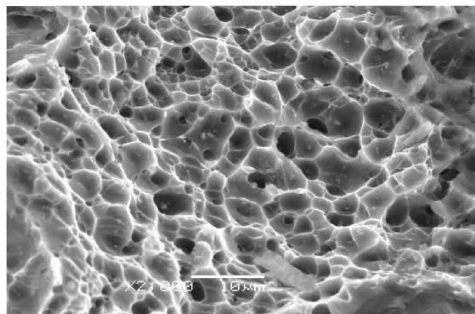
形核析出<sup>[12]</sup>。

### 2.3 接头拉伸强度及断口扫描观察

分别对热处理前后的接头试样进行室温拉伸试验,结果表明,在焊态下接头拉伸断裂发生在焊缝区,接头的抗拉强度为 348 MPa,而经过焊后热处理,接头断裂位于熔合线附近,接头的抗拉强度较焊态下有了明显提高,达到 423 MPa。图 13 为热处理前后 Al-Cu-Li 合金电子束焊接头拉伸断口形貌扫描照片。从图 13 中可以看出,在断口表面分布着许多韧窝,韧窝的大小比较均匀,表明接头在断裂前发生了剧烈的塑性流动。接头经过焊后热处理,在韧窝底部存在大量的强化相或者杂质相



(a) 焊态下



(b) 热处理后

图13 Al-Cu-Li合金电子束焊接头拉伸断口扫描形貌

Fig. 13 Scanning morphologies of tensile fracture for Al-Cu-Li alloy EBW joints

粒子,这是因为在人工时效过程中,焊缝金属中析出了大量的强化相,与焊缝 TEM 组织观察相吻合。

### 3 结 论

(1)焊态下,Al-Cu-Li合金电子束焊接头熔合线附近存在等轴细晶区,焊缝中心为典型的树枝晶,枝晶界共晶组织的主要组成相为 $\alpha + \theta'$ ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ),焊缝中的强化相数量较少。

(2)经过焊后固溶+时效热处理,熔合线附近的等轴细晶区消失,焊缝中心区的组织由树枝晶转变为等轴晶,在焊缝中析出了大量的球状 $\delta'$ ( $\text{Al}_3\text{Li}$ )相以及细针状 $T_1$ ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ )相,使接头的力学性能明显改善,接头抗拉强度由焊态下的348 MPa提高到热处理后的423 MPa。

(3)元素线扫描分析显示,接头过渡区合金元素分布较均匀,电子束焊接过程中元素烧损现象不是很明显。SEM观察表明,接头拉伸断口呈明显的韧性断裂特征。

#### 参考文献:

[1] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 862-871.

[2] Rioja R J, Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(9): 3325-3337.

[3] Giummarra C, Thomas B, Rioja R J. New aluminum lithium alloys for aerospace applications[C]//Proceedings of the Light Metals Technology Conference. Ottawa, Canada:[s. n.], 2007: 24-26.

[4] Xiao R S, Zhang X Y. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(2): 166-175.

[5] Ravindra A, Dwarakadasa E S, Srivatsan T S, et al. Electron-beam weld microstructures and properties of aluminium-lithium alloy 8090[J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(12): 3173-3182.

[6] Rao K S, Reddy G M, Rao K P. Studies on partially melted zone in aluminium-copper alloy welds-effect of techniques and prior thermal temper[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 403(1/2): 69-76.

[7] Lin D C, Wang G-X, Srivatsan T S. A mechanism for the formation of equiaxed grains in welds of aluminum-lithium alloy 2090[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 351(1/2): 304-309.

[8] 李小飞, 李晓红, 熊华平, 等. 铝锂合金的焊缝组织与开裂敏感性研究[J]. *航空材料学报*, 2007, 27(3): 55-59.  
Li Xiaofei, Li Xiaohong, Xiong Huaping, et al. Microstructure and crack susceptibility of aluminium-lithium alloy weldment[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, 27(3): 55-59.

[9] 黄兰萍, 郑子樵. 微量 Ag、Mg 在 2197 合金中的合金化作用[J]. *金属热处理*, 2005, 30(4): 21-25.  
Huang Lanping, Zheng Ziqiao. Alloying role of small additives of Ag and Mg in 2197 Alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, 30(4): 21-25.

[10] 李世晨, 郑子樵, 刘祖耀, 等. Al-Cu-Li-xMg合金时效初期微结构演变的 Monte Carlo 模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(9): 1376-1383.  
Li Shichen, Zheng Ziqiao, Liu Zuyao, et al. Monte Carlo simulation of microstructural evolution of Al-Cu-Li-xMg alloys during initial ageing stage[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(9): 1376-1383.

[11] Tosten M H, VasudÉvan A K, Howell P R. The aging characteristics of an Al-2 Pct Li-3 Pct Cu-0. 12 Pct Zr alloy at 190°C[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19(1): 51-66.

[12] 袁志山, 陆政, 谢优华, 等. 时效制度对 2A97 铝-锂合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(12): 2027-2033.  
Yuan Zhishan, Lu Zheng, Xie Youhua, et al. Effects of aging treatment on microstructure and properties of 2A97 aluminium-lithium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(12): 2027-2033.

