

# 表面状态对 2524 铝合金激光焊接组织和 结晶裂纹的影响

蔡 华 孔晓芳 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 2524 铝合金是高抗损伤容限的新型航空高强铝合金。采用高功率光纤激光器焊接 2 mm 厚 2524 铝合金, 研究了原始包铝表面、去除包铝层表面氧化膜和去包铝层时的焊接结晶裂纹倾向, 借助光学显微镜和电子显微镜分析了焊缝组织形态。结果表明, 去氧化膜时结晶裂纹倾向最大, 去包铝层后结晶裂纹倾向最小。不同表面状态对结晶裂纹的影响与焊缝组织晶粒大小、共晶形态及其数量密切相关。2524 铝合金表面包铝层的存在稀释了合金元素, 共晶数量较少, 对裂纹“愈合”作用减弱, 因此结晶裂纹倾向大; 而包铝层表面氧化膜在焊接时卷入焊接熔池, 成为异质形核核心, 焊缝组织细小、晶界共晶分布不连续, 从而可降低结晶裂纹倾向。

**关键词** 激光技术; 光纤激光焊接; 2524 高强铝合金; 表面状态; 结晶裂纹; 显微组织

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0203002

## Effect of Surface Status on Microstructures and Solidification Cracking Susceptibility in Laser Beam Welding of 2524 Aluminum Alloy

Cai Hua Kong Xiaofang Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Aluminum alloy (AA) 2524 is a new aircraft material with high damage tolerance and high strength. Bead-on-plate welding of AA2524 with a thickness of 2 mm using a high power fiber laser is presented. Solidification cracking susceptibility and microstructures of the joints for the original alclad-including surface (OS), oxide-film removed (OR) surface and alclad removed (AR) surface are investigated by optical microscopy (OM) and electron microscope. The results indicate that the OR and the AR joints have the maximum and minimum solidification cracking susceptibility, respectively. Different surface status joints have different grain sizes, morphologies and quantities of eutectic, leading to the different solidification cracking susceptibilities. The alclad on the surface of AA2524 can dilute the alloying elements in joints, reduce the quantity of eutectic and weaken the healing effect, thus increasing the solidification cracking susceptibility. The oxide-film on the surface of alclad can be involved in welding pool, act as heterogeneous nucleation site playing an important role in refining grain size, promote a discontinuous eutectic distribution and reduce the solidification cracking susceptibility.

**Key words** laser technique; fiber laser welding; 2524 high strength aluminum alloy; surface status; solidification cracking; microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

### 1 引 言

2524 铝合金是由 Alcoa 公司研发的新型航空高性能铝合金, 通过降低 Fe、Si 杂质及适当调整

Cu、Mg 主合金元素含量, 在保证合金强度和其他性能与 2024 铝合金相当的同时, 合金疲劳韧性提高 15%~20%, 抗疲劳损伤容限增加 2 倍<sup>[1]</sup>。该合金

收稿日期: 2012-07-26; 收到修改稿日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)和国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 蔡 华(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事铝合金激光加工方面的研究。

E-mail: shuangyaoqing@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法 & 外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040111702)

已成功用于波音 777, 空客 A380 等大型民用客机<sup>[2,3]</sup>, 也是我国大飞机制造备选铝合金之一。

激光焊接能量密度高、热输入量小、柔性强、自动化程度高、焊接结构变形小, 可实现铝合金结构高效高质连接<sup>[2,4~6]</sup>。空中客车公司成功地将激光焊接技术用于 A300 系列飞机下机身 6000 系列铝合金壁板制造, 取代铆接, 使其重量减轻 8%~20%, 制造成本降低 25%<sup>[2,7]</sup>。

铝合金属于典型共晶型合金, 具有很高的裂纹敏感性。铝合金激光焊接裂纹具有高温沿晶断裂特征, 焊缝中表现为结晶裂纹<sup>[4,8~10]</sup>。易偏析的合金元素在晶界富集形成低熔点共晶是铝合金激光焊接产生结晶裂纹的重要原因<sup>[4,8]</sup>。左铁钼等<sup>[4]</sup>研究铝合金激光焊接发现, 随着焊接速度增加, 晶粒组织虽细化, 但由于高速焊接容易获得方向性极强的柱状组织, 形成“束状晶”, 增加裂纹倾向。Martukanitz 等<sup>[9]</sup>激光焊接 2195 铝合金 (Al-Cu-Li), 接头有垂直于焊接方向且沿热流方向扩展的横向裂纹, 裂纹产生于熔池凝固的固液阶段。Fabregue 等<sup>[10]</sup>激光焊接填充 AlSi12 焊丝的 6056 铝合金 (Al-Mg-Si), 增大填丝速度提高焊缝 Si 含量, 增多晶界低熔点共晶数量, 通过“愈合”减少甚至消除裂纹。此外, 铝合金极易被氧化, 在潮湿和温度波动环境中形成疏松氧

化膜吸附水分, 焊接过程中水分受热分解导致氢气孔或氧化膜气孔缺陷<sup>[11]</sup>, 因此, 铝合金焊前均做化学铣削等预处理去除表面氧化膜以减少或消除气孔缺陷<sup>[2,4~6]</sup>。目前仅文献<sup>[12]</sup>采用激光双光束焊接未做表面预处理的铝合金, 但该文是从双光束焊接参数对含氧化膜表面的铝合金接头气孔缺陷影响来开展分析的。

目前尚未有针对表面含氧化膜的铝合金激光焊接接头组织特性及其结晶裂纹倾向的研究报道, 也尚未见 2524 高强铝合金激光焊接的研究报道。本文采用高功率光纤激光器焊接 2524 铝合金薄板, 研究不同表面状态下焊缝结晶组织形态、共晶形貌及其数量, 分析表面状态对激光自熔焊结晶组织及焊缝结晶裂纹倾向的影响。

## 2 试验材料及方法

试验材料为包铝 2524-T3 铝合金, 试样尺寸 150 mm×50 mm×2.0 mm, 化学成分见表 1。通过 OLYMPUS SZ61 型体视镜及 HITACHIS-3400 型扫描电镜 (SEM) 观测材料正反表面分别覆有约 70 μm 包铝层, 如图 1 所示; 利用 JSM-7001F 场发射扫描电镜 FSEM 观测材料包铝层外有约 5 μm 厚的氧化膜, 相应的能谱分析 (EDS) 如图 2 所示。

表 1 2524 铝合金名义化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Nominal chemical composition of 2524 aluminum alloy (mass fraction, %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA2524	0.06	0.12	4.0~4.5	0.45~0.7	1.2~1.6	0.05	0.15	0.1	Bal.

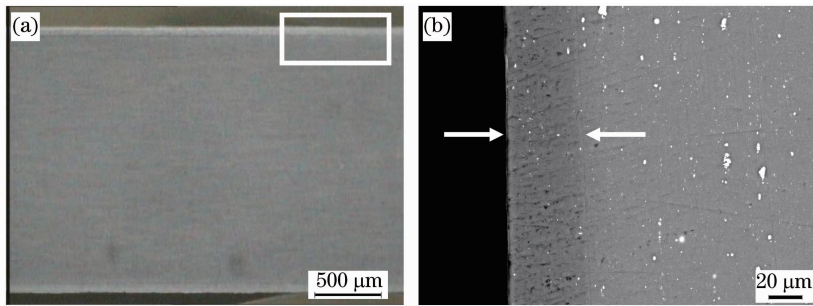


图 1 包铝 2524 铝合金横截面形貌。(a)体视镜中包铝层形貌;(b)扫描电镜中包铝层形貌

Fig.1 Cross section of alclad on AA2524 aluminum alloy. (a) Stereoscope morphology of alclad; (b) morphology of alclad scanning electron microscope

焊前对试样表面进行处理, 形成原始试样、去氧化膜试样和去包铝层试样。具体处理过程如下: 原始试样仅用丙酮去除表面油污; 去氧化膜试样经丙酮去油污后采用体积分数为 30% 的 NaOH 溶液化学铣削去除正反表面各 0.01 mm, 经体积分数为 30% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液光化中和 20 s 后清水冲洗, 吹

干, 置于恒温干燥箱备用; 去包铝层试样经丙酮去油污后采用体积分数为 30% 的 NaOH 溶液碱洗去除正反表面各 0.1 mm, 经体积分数为 30% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液光化中和 20 s 后清水冲洗, 烘干, 置于恒温干燥箱备用。

焊接试验采用 IPG Photonics 公司生产的

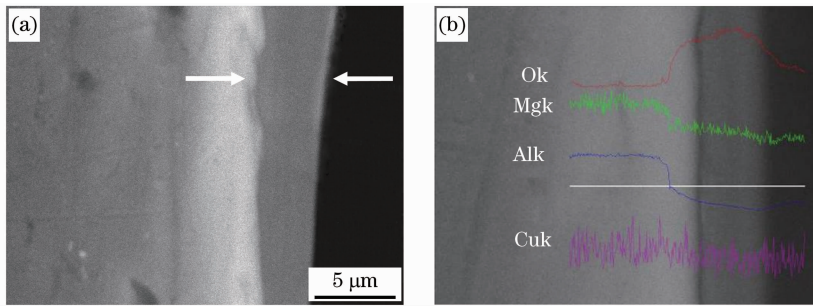


图 2 2524 铝合金表面氧化膜形貌。(a) FSEM;(b)氧化膜能谱分析结果

Fig.2 Morphology of oxide-film on the surface of AA2524. (a) FSEM; (b) EDS of oxide-film

YLS-6000 型掺镱光纤激光器, 波长 1060 ~ 1070 nm, 聚焦镜焦距 250 mm, 聚焦光束直径 0.25 mm。激光平板扫描焊接三种表面状态试样, 激光功率 3 kW, 焊接速度 4 m/min, 正面保护气体 He 气, 流量 8 L/min, 背保护 Ar 气, 流量 10 L/min。

焊后采用 OLYMPUS SZ61 型体视镜观察接头表面宏观形貌, 利用 PMG-3 金相软件测量焊缝表面裂纹长度。接头横向取样磨抛, 采用体积分数分别为 0.5% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO<sub>3</sub> + 95.5% H<sub>2</sub>O 的混合酸进行腐蚀。分别采用 OLYMPUS GX51 型光学电镜和 JEOL JSM-7001F 型扫描电镜观察接头显微组织, 利用 Genesis 7000 型能谱仪做

成分分析。利用 OLYMPUS M3 金相软件采用截距法统计焊缝组织平均晶粒尺寸; 利用 Matlab 软件灰度分析焊缝扫描电镜背散射电子组织照片, 统计焊缝共晶比例。

### 3 试验结果

#### 3.1 裂纹宏观形貌与裂纹总长

图 3 为 2524 铝合金激光焊接接头典型宏观形貌。纵向裂纹出现在焊缝中脊, 横向裂纹出现在焊缝两外侧, 且垂直于热流扩散方向并向焊缝中心方位扩展。纵向裂纹能从上至下贯穿整个焊缝, 合金焊接裂纹倾向大。

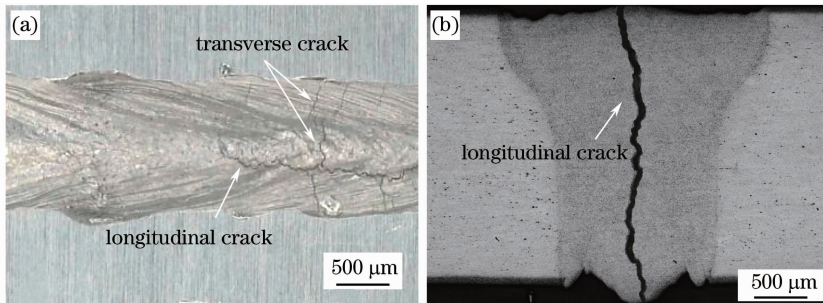


图 3 2524 铝合金焊接接头典型裂纹。(a) 表面; (b) 横截面

Fig.3 Typic cracks in AA2524 weld samples. (a) Surface; (b) cross section

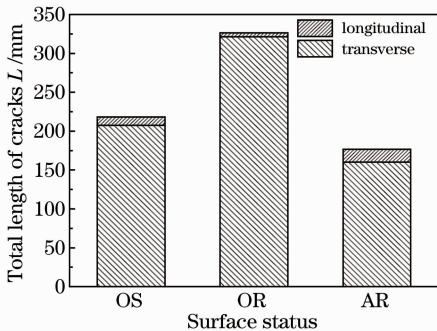


图 4 不同表面状态下 2524 铝合金激光焊接接头表面裂纹总长度

Fig.4 Total length of cracks on AA2524 weld joints under different surface status

图 4 为原始状态(OS)、去氧化膜(OR)状态及去包铝层(AR)状态焊接接头裂纹长度。去包铝层状态接头纵向裂纹总长最长, 去氧化膜状态横向裂纹总长最长。从裂纹总长度来说, 去氧化膜状态结晶裂纹倾向最大, 原始状态次之, 去包铝层状态结晶裂纹倾向相对最小。

#### 3.2 接头组织特征

图 5 为不同表面状态焊接接头宏观金相组织。由于试验用 2524 铝合金表面氧化膜由工业纯铝的包铝层氧化而得, 该氧化膜致密, 且厚度仅 5 μm, 不易于吸收空气中的水蒸气, 三种表面状态接头均未观察到宏观气孔。



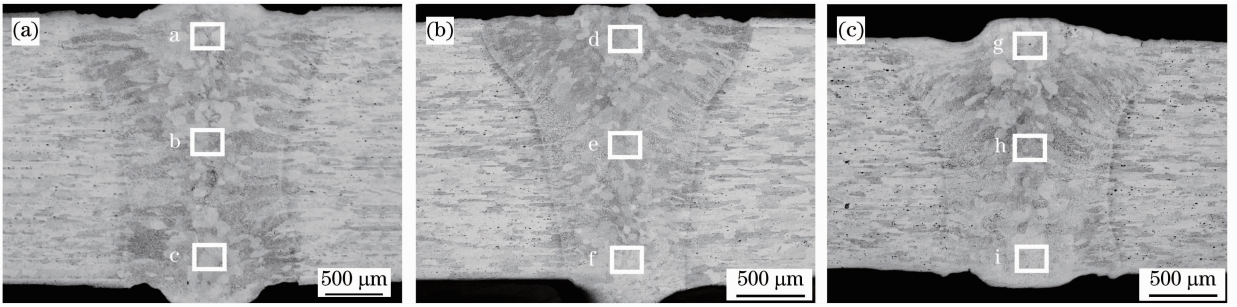


图 5 不同表面状态 2524 铝合金焊接接头宏观金相组织。(a)原始状态;(b)去氧化膜;(c)去包铝层

Fig. 5 Metallographic microstructure of AA2524 welds in different surface status. (a) OS; (b) OR; (c) AR

图 6 是 2524 铝合金激光焊接接头典型金相组织。其中图 6(a)为焊缝中心,图 6(b)为熔合线附近。焊缝中心为等轴树枝晶,接头靠近熔合线附近组织呈典型柱状晶。由于晶体优先沿温度梯度最大、散热最快的与熔池结晶等温面相垂直的方向生

长,熔合线附近晶粒都呈垂直于熔合线生长。又因凝固时熔池的最大温度梯度方向不断变化,柱状晶生长方向发生变化。与焊缝边界相比,焊缝中心因温度梯度变小,成分过冷度增大,形成等轴树枝晶。

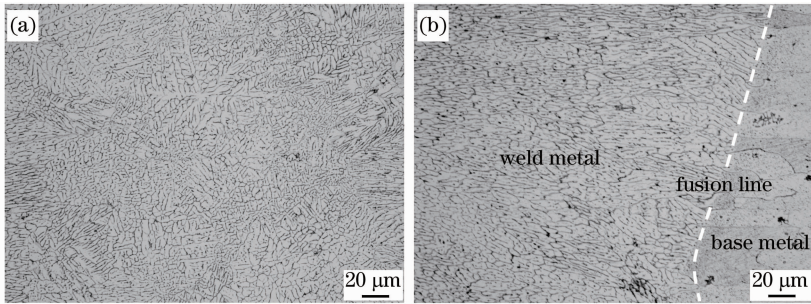


图 6 2524 铝合金激光焊接接头典型金相组织(原始状态)。(a)焊缝中心;(b)熔合线附近

Fig. 6 Typical microstructure of AA2524 laser weld joints (OS). (a) Weld metal; (b) fusion line nearby

图 7 是焊缝晶界典型共晶组织的 FSEM 背散射电子显微形貌。经能谱仪分析结果初步推断,图中晶内为灰色  $\alpha(\text{Al})$  初晶,晶界析出灰白色  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$

相,亮白色  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  相,灰色  $\alpha(\text{Al})$ ,即焊缝组织为亚共晶组织——初晶  $\alpha(\text{Al})$  和晶界析出细小共晶组织  $\alpha(\text{Al}) + \text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg}) / \theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  [13]。

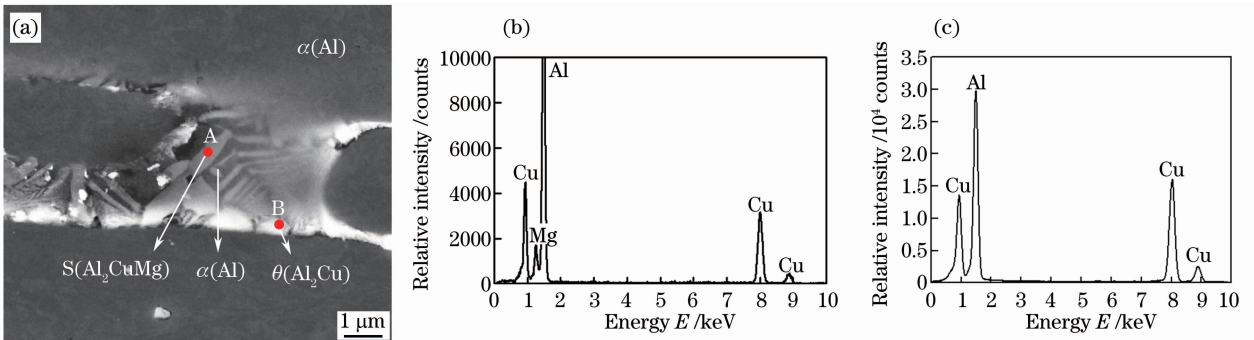


图 7 (a)焊缝晶界典型共晶形貌及(b)其点 A 处与(c)点 B 处组成物相的 EDS 分析结果

Fig. 7 (a) Typical eutectic morphology and EDS analysis of composition phases at (b) point A and

(c) point B on grain boundary in weld metal

### 3.2.1 原始状态接头组织形貌

原始状态下焊缝中心等轴树枝晶晶粒平均截距为  $5.13 \mu\text{m}$ ,焊缝边界柱状树枝晶平均间距为  $3.66 \mu\text{m}$ ,焊缝晶界平均共晶含量为  $6.66\%$ 。

电子显微组织。如图 8(b)所示,焊缝中心中部沿晶界有连续共晶组织析出,共晶组织绝大部分呈窄长薄膜状连续析出于焊缝中心等轴树枝晶晶界,极少部分呈较宽厚状富集于等轴树枝晶晶界。焊缝中心上、下部共晶组织形貌明显改变[图 8(a)、(c)],除

图 8 为原始状态焊缝中心局部 FSEM 背散射

少部分呈窄长薄膜状较连续析出于等轴树枝晶晶界外,大部分沿晶界呈棒状不连续析出。此外,相比于

焊缝中心中部,原始状态焊缝中心上、下部晶粒明显细化。

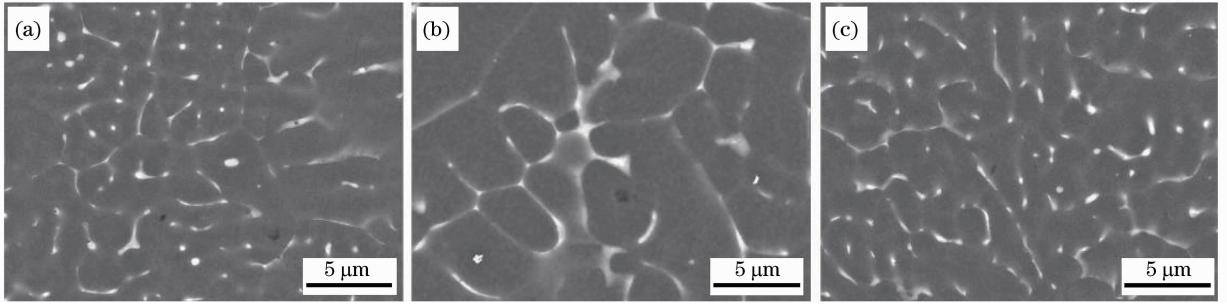


图 8 原始状态 2524 铝合金焊缝中心 FSEM 背散射电子显微组织(图 5 局部放大)。(a)上部;(b)中部;(c)下部  
Fig. 8 High magnification FSEM backscattered electron image of AA2524 weld metals in original surface status in Fig. 5. (a) Top part; (d) middle part; (c) bottom part

### 3.2.2 去氧化膜状态接头组织形貌

去氧化膜状态焊缝中心等轴树枝晶晶粒平均截距为  $4.90 \mu\text{m}$ ,焊缝边界柱状树枝晶平均间距为  $3.59 \mu\text{m}$ ,焊缝晶界平均共晶含量为  $7.01\%$ 。

散射电子显微组织。焊缝中心上部、中部及下部沿晶界均有连续共晶组织析出,共晶组织基本呈窄长薄膜状连续析出,少部分呈较宽厚状富集于等轴树枝晶晶界。焊缝中心上部、中部及下部晶粒尺寸均无明显变化。

图 9 为去氧化膜状态焊缝中心局部 FSEM 背

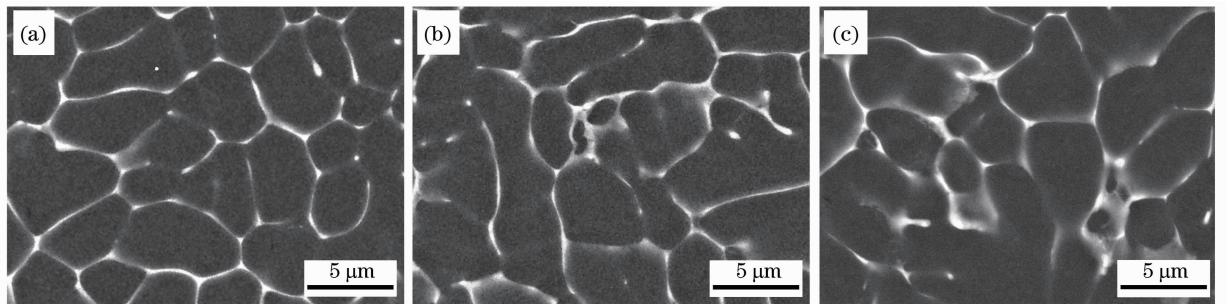


图 9 去氧化膜 2524 铝合金焊缝中心 FSEM 背散射电子显微组织(图 5 局部放大)。(a)上部;(b)中部;(c)下部  
Fig. 9 High magnification FSEM backscattered electron image of AA2524 weld metals in oxide-film removed surface status in Fig. 5. (a) Top part; (b) middle part; (c) bottom part

### 3.2.3 去包铝层状态接头组织形貌

去包铝层状态焊缝中心等轴树枝晶晶粒平均截距为  $5.70 \mu\text{m}$ ,焊缝边界柱状树枝晶平均间距为  $3.89 \mu\text{m}$ ,焊缝晶界平均共晶含量为  $7.31\%$ 。

散射电子显微组织。焊缝中心上部、中部及下部均沿晶界连续析出共晶组织,共晶组织除呈窄长薄膜状连续析出外,还有较多呈宽厚状大量富集于等轴树枝晶晶界。焊缝中心上部、中部及下部晶粒尺寸基本相当。

图 10 为去包铝层状态焊缝中心局部 FSEM 背

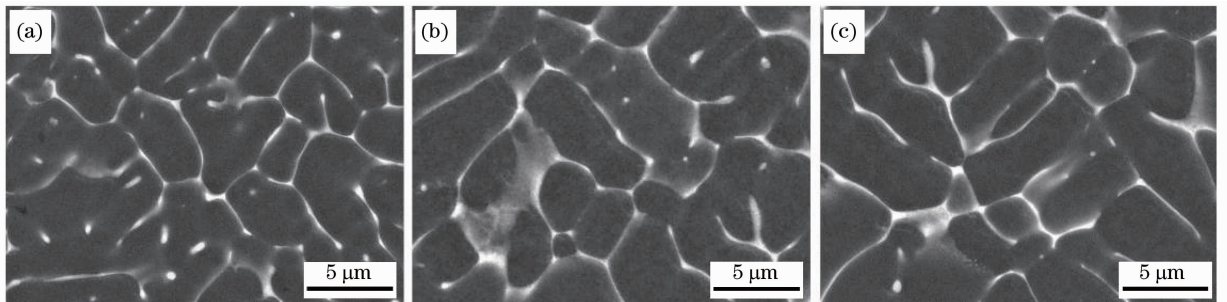


图 10 去包铝层 2524 铝合金焊缝中心背散射电子显微组织(图 5 局部放大)。(a)上部;(b)中部;(c)下部  
Fig. 10 High magnification FSEM backscattered electron image of AA2524 weld metals in alclad-removed surface status in Fig. 5. (a) Top part; (b) middle part; (c) bottom part



## 4 分析与讨论

三种表面状态焊缝边界柱状枝晶间距均小于各自焊缝中心等轴树枝晶尺寸。这是由于焊接过程中熔池边界温度梯度远高于熔池中心,熔池边界冷却速度高于熔池中心,从而冷却速度相对更快的焊缝边界晶粒尺寸较小。此外,由于去除表面包铝层后试样较薄,在相同激光功率及焊接速度下,单位板厚所受热输入较高,使去包铝层后焊缝中心等轴树枝晶及焊缝边界柱状枝晶间距均最大。

晶粒尺寸与晶粒生长方向都会影响焊接接头裂纹倾向。从焊缝中心平均晶粒尺寸来说,去包铝层焊缝中心平均等轴树枝晶最大,原始状态次之,去氧化膜状态最小。细化晶粒能从一定程度上减小焊接结晶裂纹,因此沿焊缝中心等轴树枝晶晶界开裂并扩展的纵向裂纹长度呈现的结果是:去包铝层状态最长,原始状态次之,去氧化膜状态最短。

焊缝边界柱状枝晶间距过小时,柱状枝晶能生长成柱状晶束,柱状晶生长方向性增强<sup>[4]</sup>。焊缝边界柱状枝晶间距越小,柱状晶生长方向性越强。从焊缝边界晶粒生长方向性来看,去氧化膜状态柱状晶生长方向性最强,原始状态次之,去包铝层状态最小。当受焊接应力时,柱状晶方向性更强的接头更易沿柱状枝晶晶界开裂的横向裂纹扩展,故而柱状枝晶间距最小、生长方向性最强的去氧化膜状态接头横向裂纹长度最长。

除晶粒尺寸及其生长方向性外,接头共晶组织数量及其形态也影响接头裂纹倾向。从焊接接头总裂纹长度综合来说,去包铝层状态结晶裂纹倾向最小,原始状态次之,去氧化膜状态结晶裂纹倾向最大。

从共晶组织数量上来看,由于去除材料表面工业纯铝的包铝层,减小了对 Cu、Mg 合金元素的稀释作用,去包铝层接头共晶数量最多。在熔池凝固的固-液阶段枝晶交织长合,相对较多的低熔点共晶存在于晶界,部分填补已形成的“收缩孔隙”,起一定“愈合”作用,减少焊接裂纹,故而去包铝层表面状态焊接结晶裂纹倾向相对最小。

从共晶形态及局部晶粒尺寸来看,原始状态焊缝中心上、下部的大部分晶界不连续,晶粒尺寸明显细小。在原始状态下,合金表面含主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的氧化膜,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  熔点  $1970\text{ }^\circ\text{C}$ , 由于激光焊接快速加热冷却,焊接熔池剧烈搅拌对流<sup>[14]</sup>,受激光辐照后少量小尺寸、高熔点的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  卷入焊接熔池,改善焊缝晶界低熔点共晶析出形貌,促进  $\alpha(\text{Al}) + \text{S}$

( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) /  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  共晶呈棒状不连续析出,减少低熔点共晶沿晶界膜状展开;此外还可成为熔池凝固时异质形核核心,起细化晶粒作用[图 8(a)、(c)]。晶粒细化及晶界共晶呈棒状不连续析出,能减小裂纹扩展,故而原始表面焊接热裂倾向小于去氧化膜表面。但同时,原始表面氧化膜仅厚约  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,能进入焊接熔池的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质点很少,在熔池搅拌作用很大的激光焊接中,也仅在焊缝中心上、下部分观察到由高熔点的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质点引起的晶粒细化和晶界共晶组织形貌显著变化,在焊缝中心中部位置未能观察到晶粒尺寸及晶界共晶形貌变化。

## 5 结 论

1) 2524 铝合金激光焊接裂纹倾向大。焊缝裂纹包括沿焊缝中脊等轴树枝晶晶界开裂的纵向裂纹及沿焊缝两侧柱状晶晶界开裂的横向裂纹。

2) 表面状态影响 2524 铝合金激光焊接热裂纹倾向。相同激光功率及焊接速度下,去氧化膜状态结晶裂纹倾向最大,原始状态次之,去包铝层状态最小。

3) 表面状态对结晶裂纹的影响与焊缝组织晶粒大小、共晶形态及其数量有关。2524 铝合金表面包铝层的存在稀释焊缝合金元素,减少共晶数量,减弱裂纹“愈合”作用,因此结晶裂纹倾向大;包铝层表面氧化膜在焊接时卷入焊接熔池,成为异质形核核心,细化焊缝组织,促进晶界共晶分布不连续,从而降低结晶裂纹倾向。

4) 包铝层表面氧化膜极薄且致密,含氧化膜的 2524 铝合金激光焊接接头无焊接气孔。

## 参 考 文 献

- 1 T. S. Srivatsan, D. Kolar, P. Magnusen. The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524 [J]. *Mater & Design*, 2002, **23**(2): 129~139
- 2 J. Schumacher, I. Zerner, G. Neye *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage panels [C]. *Proceeding of ICALEO*, 2002. 2567~2576
- 3 J. C. Williams, E. A. Starke. Progress in structural materials for aerospace systems [J]. *Acta Materialia*, 2003, **51** (19): 5775~5799
- 4 Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai *et al.*. *Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 47~165  
左铁钊, 肖荣诗, 陈 铠 等. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 47~165
- 5 Xiao Rongshi. Laser beam welding of aluminum alloys [C]. *SPIE*, 2008, **6825**: 682505
- 6 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min *et al.*. Research on high speed high power  $\text{CO}_2$  laser welding of 6061-T6 aluminum alloy with filler wire [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503001

- 翟玉峰, 黄 坚, 李 敏等. 6061-T6 铝合金高速高功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接性的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0503001
- 7 P. F. Mendez, T. W. Eagar. New trends in welding in the aeronautic industry[C]. 2nd Conference of New Manufacturing Trends, 2002. 1~10
- 8 B. Hu, I. M. Richardson. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **429**(1-2): 287~297
- 9 R. P. Martukanitz, R. Jan. A Fundamental Study of Laser Beam Welding Aluminum-Lithium Alloy 2195 for Cryogenic Tank Applications[R]. USA: NASA, 1996
- 10 D. Fabregue, A. Deschamps, M. Suery *et al.*. Two- and three-dimensional characterizations of hot tears in an Al-Mg-Si alloy laser weld[J]. *Scripta Materialia*, 2008, **59**(3): 324~327
- 11 X. Cao, W. Wallace, J. P. Immarigeon *et al.*. Research and progress in laser welding of wrought aluminum alloys. II. metallurgical microstructures, defects, and mechanical properties [J]. *Materials and Manufacturing Process*, 2003, **18**(1): 23~49
- 12 K. Chen, W. X. Yang, R. S. Xiao. Direct laser welding of an Al-Li alloy plate without prior surface cleaning[J]. *Laser Eng.*, 2012, **22**(5-6): 361~369
- 13 S. C. Wang, F. Lefebvre, M. J. Starink *et al.*. VPPA welds of Al-2024 alloys; analysis and modelling of local microstructure and strength[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2006, **431**(1-2): 123~136
- 14 Y. Kawahito, N. Matsumoto, Y. Abe *et al.*. Laser absorption of aluminium alloy in high brightness and high power fibre laser welding[J]. *Welding International*, 2012, **26**(4): 275~281

栏目编辑: 宋梅梅