

# 6016 和 5182 铝合金激光焊接接头的组织与织构

黄毅, 黄坚\*, 聂璞林

上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

**摘要** 基于电子背散射衍射(EBSD)技术,对 6016 和 5182 铝合金在相同工艺条件下的激光填丝焊接接头的组织与织构进行分析研究。结果表明:6016 和 5182 焊缝均由柱状晶与等轴晶组成,且柱状晶区域沿 $\langle 100 \rangle$ 方向均存在强烈的织构;焊接接头受成分过冷和异质形核的共同影响;6016 铝合金接头受到异质形核的作用较大,等轴晶占比较大且晶粒取向呈随机分布的状态,柱状晶的主要织构为立方织构( $\langle 100 \rangle \{001\}$ );5182 铝合金接头受异质形核的影响不大,等轴晶存在沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的织构,且主要由柱状晶构成,柱状晶的主要织构为纤维织构( $\langle 100 \rangle // RD$ )、立方织构( $\langle 100 \rangle \{001\}$ )和高斯织构( $\langle 100 \rangle \{011\}$ )。

**关键词** 激光技术; 织构; 铝合金; 激光填丝焊接; 微观组织

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402003

## Microstructures and Textures of 6016 and 5182 Aluminum Laser Welded Joints

Huang Yi, Huang Jian\*, Nie Pulin

Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University,  
Shanghai 200240, China

**Abstract** The laser welding with wire is respectively carried out with 6016 and 5182 aluminum alloy plates to study the microstructure and texture under same welding process based on the electron backscattered diffraction (EBSD) technique. The results show that the weld seams of 6016 and 5182 alloys consist of columnar dendrites and equiaxed dendrites, and strong texture along the crystallographic direction  $\langle 100 \rangle$  is observed in columnar dendrite area. The constitutional supercooling and heterogeneous nucleation have common effect on welded joints. Because the heterogeneous nucleation has large effect on the 6016 aluminum alloy joint, the ratio of the equiaxed dendrites in 6016 aluminum alloy is relatively large, the grain orientation randomly distributes, and the main texture of the columnar dendrites is cube texture ( $\langle 100 \rangle \{001\}$ ). While the heterogeneous nucleation has little effect on the 5182 aluminum alloy joint, the texture of the equiaxed dendrites distributes along  $\langle 100 \rangle$  direction, the 5182 aluminum alloy joint is mainly consisted of the columnar dendrites, and the textures of the columnar dendrites are the fiber texture ( $\langle 100 \rangle // RD$ ), cube texture ( $\langle 100 \rangle \{001\}$ ) and Goss texture ( $\langle 100 \rangle \{011\}$ ).

**Key words** laser technology; texture; aluminum alloy; laser welding with wire; microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

铝合金具有密度小、比强度和比刚度高、塑性成形性能良好等特点,已成为近年来在汽车工业中最受青睐的金属材,在汽车轻量化方面的潜力巨大。然而,作为汽车车身工艺的重要一环,铝合金焊接技术仍存在许多难点,这在一定程度上阻碍了铝合金在汽车工业中的应用<sup>[1-3]</sup>。激光焊接作为一种新的焊接技术,具有线能量高、焊接速度快、变形小、自动

化程度高等优点,但铝合金高的反射率和热导率限制了激光焊接的应用<sup>[4-7]</sup>。因此,积极开展铝合金激光焊接的研究,对推进汽车轻量化和节能减排具有重要意义。

众所周知,织构对材料的性能具有巨大影响<sup>[8-9]</sup>。Barnwal 等<sup>[10]</sup>认为 6061 铝合金中的立方织构和黄铜织构是决定其成形性能的重要因素; Bhargava 等<sup>[11]</sup>通过对不同钢种的研究发现,成形性能下降的主要原因是  $\gamma$  纤维织构的减少; Jiang

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-12-04; 录用日期: 2019-01-08

\* E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn

等<sup>[12]</sup>发现,镁合金的腐蚀速率随着织构强度的增加而下降; Ivanov 等<sup>[13]</sup>通过研究发现,钛合金中(0001)和(0002)方向的织构相较于(01 $\bar{1}$ 2)和(2 $\bar{1}$ 10)方向的织构具有更高的耐腐蚀性能。

目前,多数对于焊接接头晶粒结构和织构的研究主要集中于搅拌摩擦焊,如 Liu 等<sup>[14]</sup>详细研究了搅拌摩擦焊过程中不锈钢微观结构和织构的演变等。另外也有一些关于高能束焊接接头的报道,如: Wu 等<sup>[15]</sup>利用电子束对高纯钛进行了焊接,并发现焊缝中存在较强的织构; Chu 等<sup>[16]</sup>对 6061 铝合金进行了激光填丝焊,焊缝中也存在强烈的立方织构; Cui 等<sup>[17]</sup>研究了激光焊接对 5A90 铝合金织构的影响,结果发现焊缝区域的主要织构为 C(copper)织构( $\langle 111 \rangle \{ 112 \}$ )。

不同的材料焊后可能会出现不同的织构。本文针对汽车工业中较常见的 6016 与 5182 铝合金激光填丝焊接接头展开研究,通过电子背散射衍射(EBSD)的方法,研究了 6016 与 5182 铝合金激光填丝条件下焊接接头的织构和微观组织,期望能对

6016 与 5182 铝合金的激光焊接工艺优化以及焊接接头相关性能的提高提供参考。

## 2 实验材料与方法

本课题组采用的铝合金牌号为 6016 和 5182,分别为 Al-Mg-Si 与 Al-Mg 合金,被广泛用于汽车车身覆盖件<sup>[18]</sup>。两种铝合金的厚度均为 1 mm,采用的焊丝牌号为 5356(直径为 1.2 mm),它们的主要化学成分见表 1。6016 铝合金的热处理状态为 T4,其显微组织为固溶态组织;5182 铝合金的热处理状态为 O。焊接实验采用的是 10 kW 光纤激光器,波长为 1060 nm,激光聚焦后的光斑直径为 0.72 mm。焊前,对焊材进行表面处理,目的是去除表面的氧化膜,之后采用丙酮清洗并烘干。焊接工艺参数如下:激光功率为 3.0 kW,焊接速率为 4.5 m/min,送丝速率为 5.4 m/min,焦距为 +5 mm,激光与试样表面法线之间的夹角为 7°。在焊接过程中采用纯度为 99% 的氩气对熔池进行保护,气体流量为 20 L/min,送气角度与工件表面的夹角为 45°。

表 1 6016 与 5182 母材及 5356 焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metals 6016, 5182 and wire 5356

Material	Mass fraction / %						
	Mg	Si	Ti	Zn	Cu	Fe	Mn
6016	0.25-0.6	1.0-1.5	0.15	0.2	0.2	0.5	0.2
5182	4.90	0.09	0.01	0.05	0.06	0.18	0.24
5356	4.5-5.5	0.25	0.06	0.14	0.06	0.4	0.05-0.2

在焊接接头处,采用标准流程(包括切割、镶嵌、研磨、抛光)制作金相试样,取样位置见图 1,其中 RD 为轧制方向,TD 为轧件的横向,ND 为轧制的法向。采用 Keller 试剂(1% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO<sub>3</sub> + 95% 蒸馏水,体积分数)对金相试样表面进行腐蚀处理。EBSD 试样经机械抛光后再进行电解抛光,以去除表面的应力层。电解抛光所用电解液是体积分数为 10% 高氯酸酒精溶液,电压为 20~40 V,抛光时间为 30~60 s。采用日立 S-3400 钨灯丝扫描电镜对抛光后的试样进行 EBSD 分析。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 焊接接头的成形质量及显微组织

图 2(a)、(b)分别为 6016 与 5182 铝合金激光填丝焊接接头的金相照片,可以看到:焊接接头均完全焊透,且接头横截面为典型的酒杯形状,焊缝在截面上显示成形良好,没有明显的裂纹、气孔等缺陷。由于激光焊接的高能量密度和高冷速,焊接接头的热影响区很窄。此外,焊缝成形饱满,有利于保证焊接接头的力学性能。

图 3、4 分别为 6016 与 5182 铝合金焊接接头的显微组织,可以看出:由于焊缝区域经历了焊接重熔的过程,焊缝区域与母材的显微组织明显不同。图 3(a)和图 4(a)分别为 6016 与 5182 母材的显微组织,为典型的等轴晶组织。熔合线附近区域的组织形貌特征表现为典型的柱状晶,如图 3(b)和图 4(b)所示。6016 与 5182 焊缝中心的显微组织如图 3(c)、图 4(c)所示,从图中可以看出,与母材相

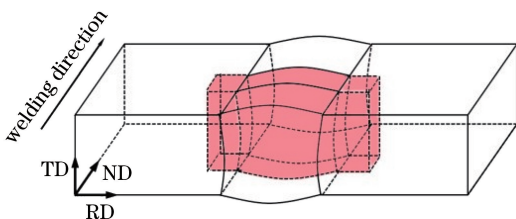


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematic of sampling position



比,焊缝中心的等轴晶组织更大,且存在二次枝晶结构。此外,两种合金的母材或焊缝的晶粒内部、晶界处均存在大量的黑色析出相。通过能谱仪(EDS)分析可知,6016 铝合金焊缝中黑色析出相的化学成分主要为 Al、Fe、Cu、Mg、Si,如图 5(a)所示。有文

献<sup>[19-20]</sup>指出,该黑色析出相为  $Mg_2Si$ 、 $\alpha-Al_{12}Fe_3Si$ 、 $Al_5FeSi$  和  $Al_3Cu_2Mg_0Si_7$  等。图 5(b)为 5182 铝合金焊缝中析出相的 EDS 能谱,该析出相的主要成分是 Al、Mg,结合其分布特点推测其为  $Mg_2Al_3$  和  $Mg_5Al_8$ <sup>[21]</sup>。

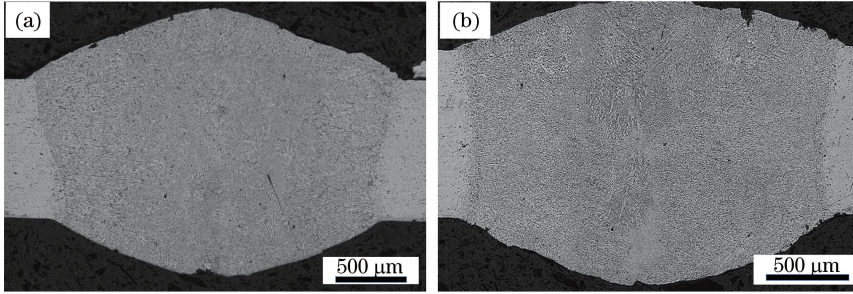


图 2 铝合金焊接接头的金相照片。(a) 6016;(b) 5182

Fig. 2 Metallographs of aluminum alloy welded joints. (a) 6016; (b) 5182

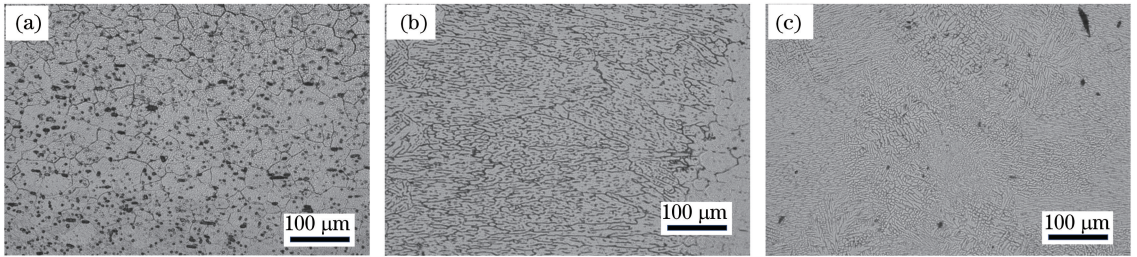


图 3 6016 铝合金焊接接头的显微组织。(a)母材;(b)熔合线;(c)焊缝

Fig. 3 Microstructures of 6016 aluminum alloy welded joint. (a) Base metal; (b) fusion line; (c) weld seam

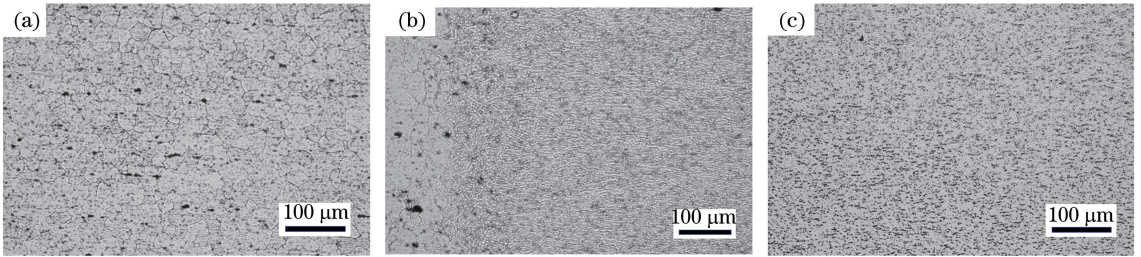


图 4 5182 铝合金焊接接头的显微组织。(a)母材;(b)熔合线;(c)焊缝

Fig. 4 Microstructures of 5182 aluminum alloy welded joint. (a) Base metal; (b) fusion line; (c) weld seam

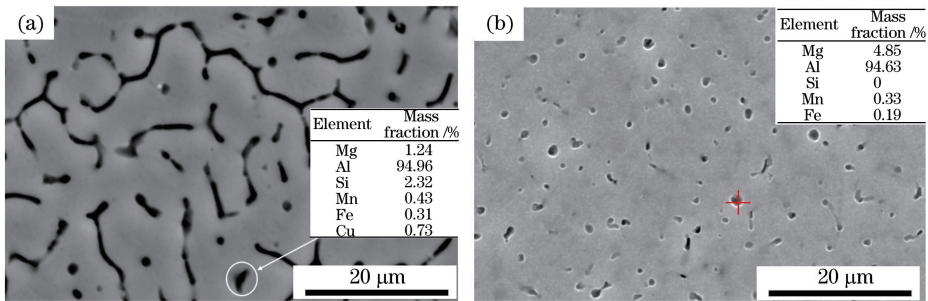


图 5 焊缝中析出相的 EDS 结果。(a) 6016;(b) 5182

Fig. 5 EDS results of precipitated phases in weld seams. (a) 6016; (b) 5182

### 3.2 焊接接头的凝固组织

图 6 所示分别为 6016 与 5182 铝合金激光焊接

接头的 EBSD 晶粒取向反极图。激光焊接的冷速较高,热影响区的宽度很窄,在熔合线附近存在少数较

细小的晶粒,Chu 等<sup>[15]</sup>认为这是由焊接热量导致的再结晶引起的。两种铝合金焊接接头的母材组织均为等轴晶,其中 6016 铝合金母材中晶粒的平均直径为 31  $\mu\text{m}$ ,5182 铝合金母材中晶粒的平均直径为 22  $\mu\text{m}$ 。

随着激光光斑的移动,熔池逐步凝固。由于熔合线附近的液态金属与母材接触,故而散热最快,温度梯度  $G$  最大。同时,因为界面移动速率  $R$  在熔化边界处相对最低,在焊缝中心线处最大( $R=v\cos\alpha$ ,其中: $v$  为焊速; $\alpha$  为界面移动速率与焊接方向之间的夹角),故在熔合线附近处的  $G/R$  值较高,液态金属以柱状晶的方式生长<sup>[22-23]</sup>,如图 6 所示。

焊缝中心处金属的散热条件最差,温度梯度  $G$

最小,在较低的  $G/R$  值下焊缝金属的生长方式会转变为等轴晶生长。同时,较大的成分过冷区域使得固液界面附近可以通过非自发形核的颗粒数量增多,一些异质颗粒存在于焊接熔池中,金属熔体中的原子可以以异质形核的方式依附其上并生长出等轴晶,当颗粒数量和尺寸达到一定程度后,新形成的晶粒会阻碍之前柱状晶的继续生长<sup>[22-23]</sup>。由图 6 可以看出:两种铝合金的平均晶粒尺寸存在明显的区别,6016 铝合金焊缝中等轴晶的占比大,且晶粒尺寸较小,焊缝中心等轴晶的平均直径为 102  $\mu\text{m}$ ;而 5182 铝合金焊缝基本为柱状晶,焊缝中心等轴晶的平均直径为 282  $\mu\text{m}$ 。可见:6016 铝合金激光焊接接头的晶粒细化程度高于 5182 铝合金。

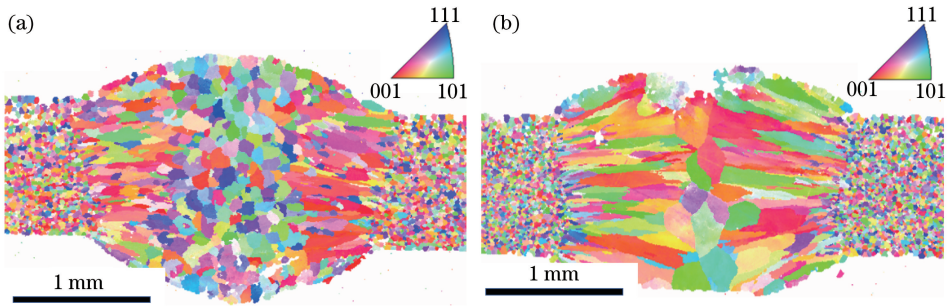


图 6 焊接接头 EBSD 反极图。(a) 6016;(b) 5182

Fig. 6 EBSD inverse pole figures of welded joints. (a) 6016; (b) 5182

大量研究表明<sup>[24-25]</sup>,铝合金中的晶粒可以依靠  $\text{TiAl}_3$  的包晶反应得以细化。通常认为金属熔体中 Ti 的质量分数超过 0.15% 时,包晶反应才能进行<sup>[26]</sup>。Mondolfo 等<sup>[27]</sup>认为,铝合金中存在的 Fe、Mn、Zn、Si、Cu 等元素可以降低 Al-Ti 包晶反应的温度以及 Ti 在铝液中的溶解度。因此,6016 中含有的 Cu、Si 等元素会使包晶点成分向低 Ti 含量方向移动,导致有效的 Ti 含量增加,从而增大了 6016 铝合金的形核率,使 6016 铝合金焊缝组织中的晶粒较细小。另外,Yang 等<sup>[28]</sup>认为  $\alpha\text{-Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$  可以作为  $\alpha\text{-Al}$  异质形核的有效基底,促进异质形核的进行。Easton 等<sup>[29]</sup>采用过冷参数  $P$  与抑制因子  $Q$  来判断形核趋势, $P$  值和  $Q$  值越大,越易形核。 $P$  和  $Q$  的表达式为

$$Q = \sum_{i=1}^n m_{L,i} (k_i - 1) C_{0,i}, \quad (1)$$

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{m_{L,i} (k_i - 1) C_{0,i}}{k_i}, \quad (2)$$

式中: $m_{L,i}$  为铝合金中各种溶质与 Al 的二元相图中液相线的斜率; $k_i$  为各溶质的溶质分配系数; $C_{0,i}$  各溶质的质量分数; $i$  为溶质的编号。

本实验中两种母材与焊丝的  $P$  值和  $Q$  值如图 7 所示。可见,具有高  $P$ 、 $Q$  值的 6016 合金更易于形核,而 6016 合金中 Ti 元素的存在能够促进晶体以异质形核的方式生长。Schempp 等<sup>[30]</sup>也报道了类似的结果。

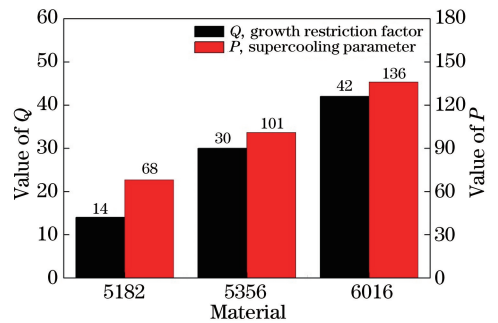


图 7 母材与焊丝的  $Q$  值和  $P$  值

Fig. 7  $Q$  and  $P$  values of base metals and wire

### 3.3 焊接接头的组织分析

图 8 所示为 6016 与 5182 铝合金焊接接头各区域的  $\{100\}$  方向极图。由于两种铝合金母材均经过热处理,故而母材晶粒取向为随机分布的状态,没有明显取向的组织,最大的组织强度  $M_{\text{max}}$  分别为 3.63 和 2.15。



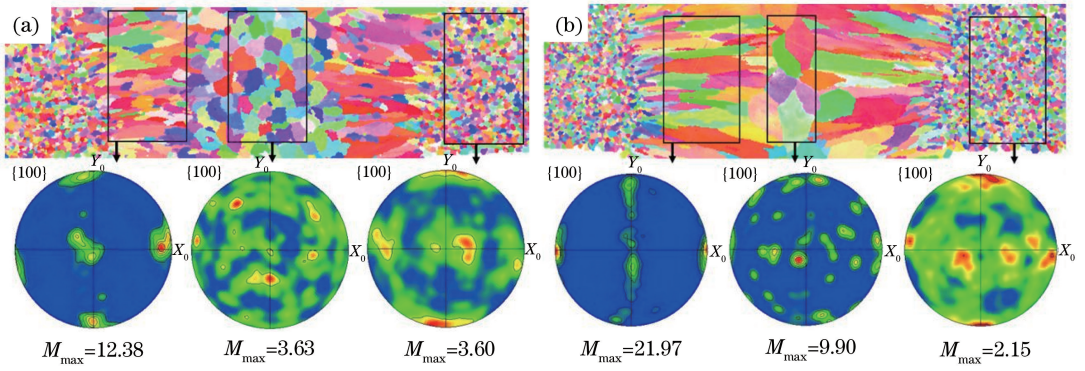


图 8 焊接接头各区域{100}面的 EBSD 极图。(a) 6016;(b) 5182

Fig. 8 EBSD pole figures of planes {100} of different areas in welded joints. (a) 6016; (b) 5182

由于激光焊接的能量密度高,在焊接过程中会产生较大的温度梯度,因此,在激光焊接中更易形成具有方向性的凝固组织,并排挤其他不利取向的晶粒的生长,最终导致特定方向的织构出现。实验结果表明:两种铝合金柱状晶区域均有强烈的<100>方向的织构存在,织构强度分别为 12.38 和 21.97;在焊缝中心的等轴晶区域,6016 铝合金织构也呈随机分布的状态,没有明显取向的织构存在,织构强度与母材相似,这进一步验证了 6016 铝合金中异质形核的机理;5182 铝合金等轴晶的主要织构方向是<100>,织构强度为 9.90,与面心立方结构材料的易生长方向一致,这是因为 5182 铝合金中异质形核的数量较少,晶粒倾向于沿易生长方向生长。

图 9(a)所示为 6016 焊接接头柱状晶区域的取向分布函数(ODF)图,其中  $\phi_1$ 、 $\Phi$ 、 $\phi_2$  均为用来表示取向的相互独立的转动角,即欧拉角。由图 9 可知:6016 焊接接头中的主要织构类型为立方织构<sup>[31]</sup>。上文提到了 6016 合金中 Ti 元素的存在会促进晶体以异质形核的方式生长。TiAl<sub>3</sub>是铝合金中重要的

形核质点,TiAl<sub>3</sub>与  $\alpha$ -Al 基体具有如下的取向关系<sup>[32]</sup>: $(111)_{Al} \parallel (112)_{TiAl_3}$ ,  $[1\bar{1}0]_{Al} \parallel [20\bar{1}]_{TiAl_3}$ ;  $(111)_{Al} \parallel (112)_{TiAl_3}$ ,  $[1\bar{1}0]_{Al} \parallel [\bar{1}10]_{TiAl_3}$ ;  $(200)_{Al} \parallel (200)_{TiAl_3}$ ,  $[011]_{Al} \parallel [021]_{TiAl_3}$ ;  $(100)_{Al} \parallel (100)_{TiAl_3}$ ,  $[001]_{Al} \parallel [100]_{TiAl_3}$ 。

同时,本实验中最大的温度梯度方向为<100>方向,且与铝合金的易生长方向相同。因此,异质形核的铝基体倾向于在{100}面上沿着<100>方向生长,导致 6016 的织构取向为立方织构<100>{001}。而具有较小 Q 值和 P 值的 5182 铝合金受异质形核的影响较小,其生长方向受最大温度梯度方向的影响更大,因此其组织主要由纤维织构(<100> // RD)和高斯织构(<100>{011})组成<sup>[31]</sup>,并有少量的立方织构(<100>{001}),如图 8(b)所示。Yoshida 等<sup>[33]</sup>通过模拟比较了 5 种典型铝合金织构对成形性能的影响。结果表明,立方织构的成形极限明显高于其他类型的织构,即立方织构具有更好的成形性能。

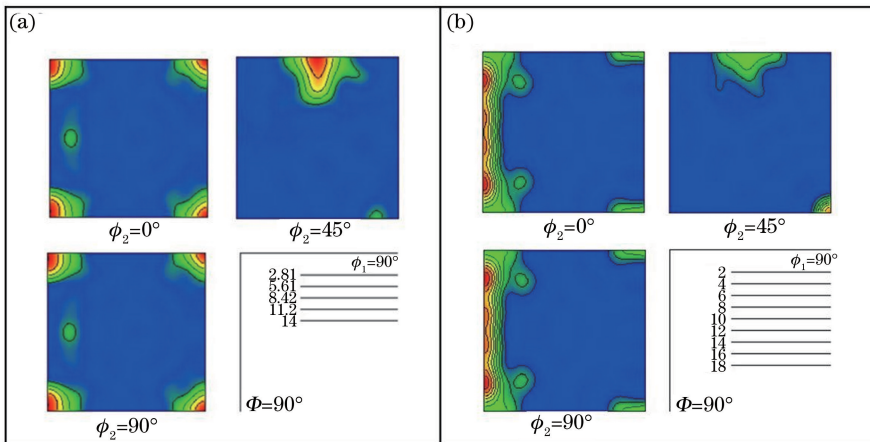


图 9 焊缝柱状晶区的 ODF 图。(a) 6016;(b) 5182

Fig. 9 ODF images of columnar structure in weld seams. (a) 6016; (b) 5182

## 4 结 论

采用 EBSD 技术分别对 1 mm 厚的 6016 和 5182 铝合金激光填丝(焊丝 5356)焊接接头的组织和织构进行分析,并对相同焊接工艺条件下两种焊接接头的织构进行了比较,分析了激光焊接接头组织与织构形成的机理。结果表明:在相同的焊接工艺条件下,6016 和 5182 铝合金焊后的织构和晶粒细化程度明显不同。化学成分的不同会影响焊接接头在凝固过程中异质形核的能力,进而影响焊缝中织构的类型以及焊缝晶粒的细化程度。本研究对铝合金激光填丝焊接接头组织、性能的优化及焊丝的选用具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Rowe J. *Advanced materials in automotive engineering* [M]. UK: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [2] Chen X H, Zhong Z P, Lu X. Research progress and application of joining technology of aluminum alloy for automobile[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 5-8.  
陈晓辉, 钟志平, 陆辛. 车用铝合金连接技术的研究进展与应用[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11): 5-8.
- [3] Svensson L E, Karlsson L, Söder R. Welding enabling light weight design of heavy vehicle chassis [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(6): 473-482.
- [4] Xie Y F S, Huang J, Wang W, *et al.* Ultra-narrow gap laser wire filling welding forming defects of 5083 aluminum alloy thick plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0302008.  
谢余发生, 黄坚, 王伟, 等. 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊成形缺陷研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302008.
- [5] Peng J, Wang X X, Li G, *et al.* Effect of laser welding with filler wire on molten pool dynamic behavior and weld formation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1102004.  
彭进, 王星星, 李刚, 等. 激光填丝焊对熔池动态行为及焊缝成形的影响 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1102004.
- [6] Wang C, Lü J X, Zhang J C, *et al.* Effects of filler wires on A7204 aluminum alloy joint by fiber laser-VPTIG hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302002.  
王灿, 吕俊霞, 张建超, 等. 填充焊丝对 A7204 铝合金光纤激光-VPTIG 复合焊接头的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302002.
- [7] Zhang X Y, Yang W X, Xiao R S. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al-Li alloy 2060 with Al-Mg filler wire [J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 446-450.
- [8] Hu S P, Wang Z. Effects of texture and grain size on press formability of AZ31 magnesium alloy sheets [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(9): 2424-2429.  
胡水平, 王哲. 织构和晶粒尺寸对 AZ31 镁合金薄板成形性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(9): 2424-2429.
- [9] Warwick J L W, Coakley J, Raghunathan S L, *et al.* Effect of texture on load partitioning in Ti-6Al-4V [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(10): 4117-4127.
- [10] Barnwal V K, Raghavan R, Tewari A, *et al.* Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 679: 56-65.
- [11] Bhargava M, Chakrabarty S, Barnwal V K, *et al.* Effect of microstructure evolution during plastic deformation on the formability of transformation induced plasticity and quenched & partitioned AHSS [J]. *Materials & Design*, 2018, 152: 65-77.
- [12] Jiang B, Xiang Q, Atrens A, *et al.* Influence of crystallographic texture and grain size on the corrosion behaviour of as-extruded Mg alloy AZ31 sheets [J]. *Corrosion Science*, 2017, 126: 374-380.
- [13] Ivanov I V, Thoemmes A, Kashimbetova A A. The influence of the crystallographic texture of titanium on its corrosion resistance in biological media [J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 769: 42-47.
- [14] Liu F C, Nelson T W. *In-situ* grain structure and texture evolution during friction stir welding of austenite stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2017, 115: 467-478.
- [15] Wu M Y, Xin R L, Wang Y, *et al.* Microstructure, texture and mechanical properties of commercial high-purity thick titanium plates jointed by electron beam welding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 677: 50-57.
- [16] Chu Q L, Bai R X, Jian H G, *et al.* Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints [J]. *Materials Characterization*, 2018, 137: 269-276.
- [17] Cui L, Li Y, He Y, *et al.* Study on microtexture of laser welded 5A90 aluminium-lithium alloys using electron backscattered diffraction [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18(3): 204-209.
- [18] Zheng H, Zhao X Y. Lightweight automobile and application of aluminum alloys in modern automobile



- production [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(2): 1-5.  
 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 1-5.
- [19] McKenzie P W J, Lapovok R, Thomson P F. Enhanced ductility due to grain refinement by equal channel angular extrusion in automotive aluminium alloy 6016[J]. Materials Science Forum, 2006, 503/504: 657-662.
- [20] Coniglio N, Cross C E, Dörfel I, *et al.* Phase formation in 6060/4043 aluminum weld solidification [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 517(1/2): 321-327.
- [21] Cai H, Lin S Y. Current development situation of 5182 aluminum alloy [J]. Aluminium Fabrication, 2012(6): 21-26.  
 蔡辉, 林顺岩. 5182 铝合金材料的研究现状[J]. 铝加工, 2012(6): 21-26.
- [22] Chalmers, B. Principles of solidification[M]. New York, USA: Wiley, 1964: 117-118.
- [23] Kou S. Welding metallurgy[M]. 2nd ed. New York, USA: Wiley, 2003: 170-172.
- [24] Ganaha T, Pearce B P, Kerr H W. Grain structures in aluminum alloy GTA welds [J]. Metallurgical Transactions A, 1980, 11(8): 1351-1359.
- [25] Kou S, Le Y. Welding parameters and the grain structure of weld metal: a thermodynamic consideration [J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(4): 1075-1082.
- [26] Mohanty P S, Gruzleski J E. Mechanism of grain refinement in aluminium [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(5): 2001-2012.
- [27] Mondolfo L F, Farooq S, Tse C. Grain refinement of aluminium alloys by titanium and boron [C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Solidification Processing, 1987, London, UK: The Institute of Metals, 1988, 133-136.
- [28] Yang W C, Ji S X, Zhou X R, *et al.* Heterogeneous nucleation of  $\alpha$ -Al grain on primary  $\alpha$ -AlFeMnSi intermetallic investigated using 3D SEM ultramicrotomy and HRTEM[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(9): 3971-3980.
- [29] Easton M A, StJohn D H. A model of grain refinement incorporating alloy constitution and potency of heterogeneous nucleant particles[J]. Acta Materialia, 2001, 49(10): 1867-1878.
- [30] Schempp P, Cross C E, Pittner A, *et al.* Influence of solute content and solidification parameters on grain refinement of aluminum weld metal [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(7): 3198-3210.
- [31] Baczynski G J, Guzzo R, Ball M D, *et al.* Development of roping in an aluminum automotive alloy AA6111 [J]. Acta Materialia, 2000, 48(13): 3361-3376.
- [32] Zhang M, Kelly P, Easton M, *et al.* Crystallographic study of grain refinement in aluminum alloys using the edge-to-edge matching model[J]. Acta Materialia, 2005, 53(5): 1427-1438.
- [33] Yoshida K, Ishizaka T, Kuroda M, *et al.* The effects of texture on formability of aluminum alloy sheets[J]. Acta Materialia, 2007, 55(13): 4499-4506.