# 5A06 铝合金激光焊接接头显微组织及缺陷分析

邹东利，陈向林，肖大武，何立峰，帅茂兵，李玉斌

(中国工程物理研究院，四川 绵阳 621900)

**摘　要**：研究了 30 mm 厚 5A06 铝合金激光焊接接头的显微组织和力学性能。结果表明：焊缝区存在一定数量的气孔缺陷，缺陷主要位于晶界处，统计表明尺寸小于 100 μm 的焊接缺陷占比超过 50%；焊缝区显微组织由枝状晶组成，单个晶粒内包含多支枝状晶团簇，枝晶间累积取向差小于 5°，枝晶间衬度的差异由 Mg 元素偏析造成；焊缝区与热影响区之间界面明显，热影响区晶粒内小角晶界的含量明显高于焊缝区，且两区域晶粒形貌、尺寸存在明显差异。显微硬度测试表明焊缝内显微硬度值存在一定波动，总体上可达到基材显微硬度值的 90%以上。

**关键词**：铝合金；激光焊接；显微组织；力学性能

**中图法分类号**：TG146.21　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002-185X(2019)09-2951-06

铝合金由于具有质量轻、比强度高、无磁性、耐锈蚀、热稳定性好、易成可循环利用等优点，在航空、航天、国防、交通运输等领域得到了广泛应用[1, 2]。铝合金结构件焊接问题成为工程应用重要研究领域，目前铝合金焊接方法主要有激光焊[3]、MIG 焊[4]、搅拌摩擦焊[5]、扩散焊[6]等。与传统焊接方法相比，激光焊接具有能量高度集中、热影响区域小等系列优点[7]，可极大提升加工效率和接头性能，铝合金激光焊接已经开始工业应用，如空客生产的 A318、A380 飞机机身连接技术、奥迪公司生产的 A2、A8 全铝结构轿车焊接技术等。但是采用激光焊接铝合金仍然存在诸多问题，如提高焊接能量利用问题，易形成焊缝气孔、焊接裂纹和接头软化问题，焊接过程稳定性问题，焊接过程不稳定导致的熔池剧烈振荡出现的咬边、焊缝不连续问题等[8]。特别是随着板厚的增加，激光焊接铝合金的问题更加突出，焊接稳定性和焊接接头质量更差，对激光器功率等级要求更高，大大提高了焊接成本。因此，激光焊接铝合金虽已研究多年，但激光焊接铝合金厚板基础研究还很薄弱，需要进行深入研究。

本实验针对 30 mm 厚的 5A06 铝合金板材进行激光焊接，系统研究焊接接头的微观组织和力学性能，为相关领域大尺寸板材的工程应用提供参考。

## 1　实　验

实验选用 30 mm 厚的 5A06 铝合金为试验材料，其主要化学成分如表 1 所示。5A06 铝合金板材的金相组织如图 1 所示，该合金主要由轧制拉长晶粒组成，晶粒长径比为 3～5，平均等效晶粒尺寸约为 45 μm。

焊接试验在激光焊接系统上进行，激光焊接系统包括德国产光纤激光器，光束振镜摆动装置PFO-33D及四轴三联动数控机床。焊接时激光头保持不动，振镜使光束做圆周运动，同时工作台直线移动，形成摆动轨迹，焊接熔池及热影响区采用氩气进行保护。激光焊接试验功率采用10 kW、速度为2 m/min。

表 1　**5A06 铝合金化学成分**

**Table 1　Chemical composition of 5A06 aluminium alloy (*ω*/%)**

| Mg | Mn | Fe | Si | Al |
|---|---|---|---|---|
| 6~6.8 | 0.5~0.8 | ≤0.4 | ≤0.4 | Balance |

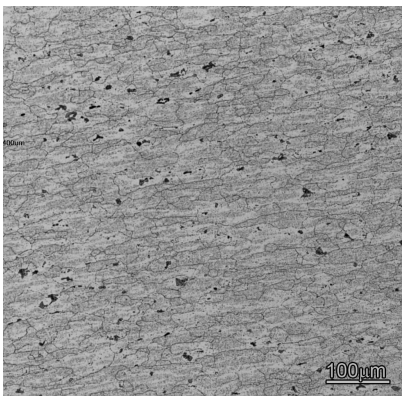



图 1　5A06 铝合金板材的光学照片

Fig.1　OM image of 5A06 aluminium alloy plate

**收稿日期**：2018-09-10

**基金项目**：国家重点研发计划（2016YFB1102104-4）；国家自然科学基金（51401187）

**作者简介**：邹东利，男，1980 年生，博士，副研究员，中国工程物理研究院材料研究所，四川 绵阳 621900，电话：0816-3626742，E-mail: donglizou@126.com

焊接接头缺陷检测在天津三英精密仪器公司生产的三维 X 射线显微镜（nanoVoxel 3000）上进行，用于无损检测焊接接头的内部缺陷。

金相观察在激光共聚焦显微镜（CLSM）上进行。将焊接接头沿横断面切割、研磨、抛光后，用金相腐蚀液进行腐蚀，金相腐蚀液的配比：1.5 mL HF +1.5 mL HCl +12 mL$HNO_3$ + 95 mL $H_2O$，腐蚀时间约 40 s。将制备好的金相试样在扫描电镜（FEI Helios NanoLab 600i）上进行观察，扫描电镜的加速电压设置为 25 kV。

电子背散射衍射（EBSD）标定在 FEI Helios NanoLab 600i 型双束系统上进行，标定时加速电压设置为 25 kV，电流设置为 2.7 nA。EBSD 制样过程包括研磨、机械抛光和电解抛光几个步骤，电解抛光液为 10%高氯酸乙醇溶液，电解时间约 30 s，电压 30 V。

显微硬度采用维氏硬度计进行测试，载荷设置为 200 g，加载时间 15 s。

## 2　结果与讨论

采用三维 X 射线显微镜对 5A06 铝合金焊接接头焊缝区进行透射式逐层扫描，如图 2 所示。由图可见，焊缝区含焊接形成的气孔，缺陷密度较基本组织有着明显增加，说明焊接过程中会引入相关缺陷，导致材料性能发生变化，经过统计焊缝区孔隙缺陷占样品总体积的 0.012%，尺寸小于 100 μm 的孔隙占缺陷总体积的 50%以上，说明焊缝区内形成的孔隙缺陷多以小孔洞为主。

图 3 为 5A06 铝合金焊接接头横断面的光学形貌，按照焊接接头显微组织的差异将其划分为 3 个区域。A 区：基体区；B 区：熔合线区；C 区：熔合区。图 3 中示意地给出了 3 个区域在焊接接头中的分布情况。基体区为未受到焊接影响的基体区域，熔合线区为熔合区与热影响区的过渡区域，熔合区为焊接熔池区域。

5A06 铝合金焊接接头基体 A 区的显微组织如图 4 所示，该区域显微组织与焊接基材无异。图中可见基体区主要由轧制拉长晶粒组成，晶粒内部含有一定数量的小角晶界，经统计小角晶界的含量约占 36%；对

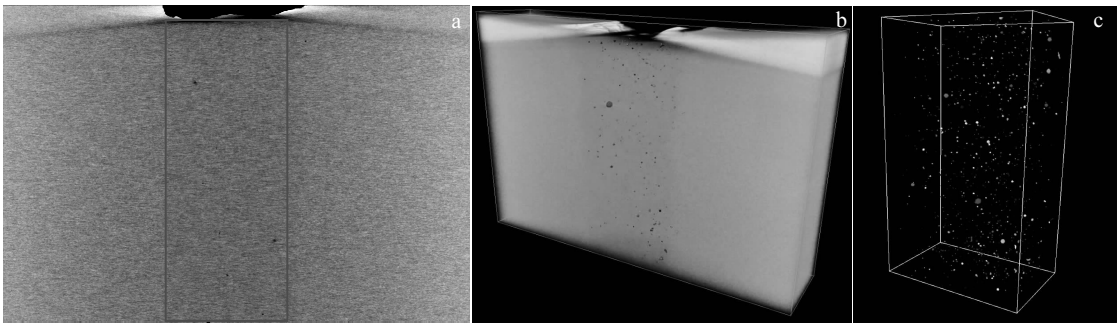



图 2　5A06 铝合金焊接接头缺陷无损检测

Fig.2　Non-destruction testing for defects of 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) tomographic imaging, (b) 3D reconstruction, and (c) defect distribution

基体晶粒进行统计，发现基体晶粒等效圆直径约为 45 μm；沿着基体横断面进行显微硬度测试，基体横断面显微硬度值略有波动，分布区域介于 850～950 MPa 之间，说明基材的力学性能比较均匀。

5A06 铝合金焊接接头熔合线 B 区的显微组织如图 5 所示，该区域跨越了热影响区和熔合区。图中可见，熔合区与热影响区之间具有明显的焊接界面，界面两侧晶粒形貌、尺寸、延伸方向、缺陷密度均发生了明显变化。界面右侧热影响区晶粒为轧制拉长状，晶粒长径比较大，拉长方向与基材轧制方向一致，且晶粒内部小角晶界的含量较高；而界面左侧熔合区晶粒约为等轴状，具有微小的长径比，晶粒拉长方向向

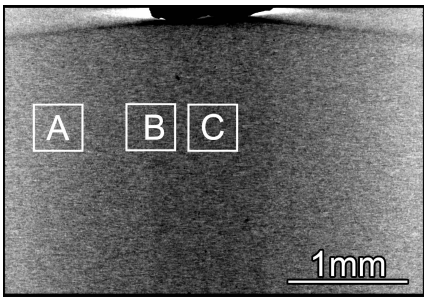



图 3　5A06 铝合金焊接接头横断面形貌

Fig.3　Cross-section image of 5A06 aluminium alloy welded joint

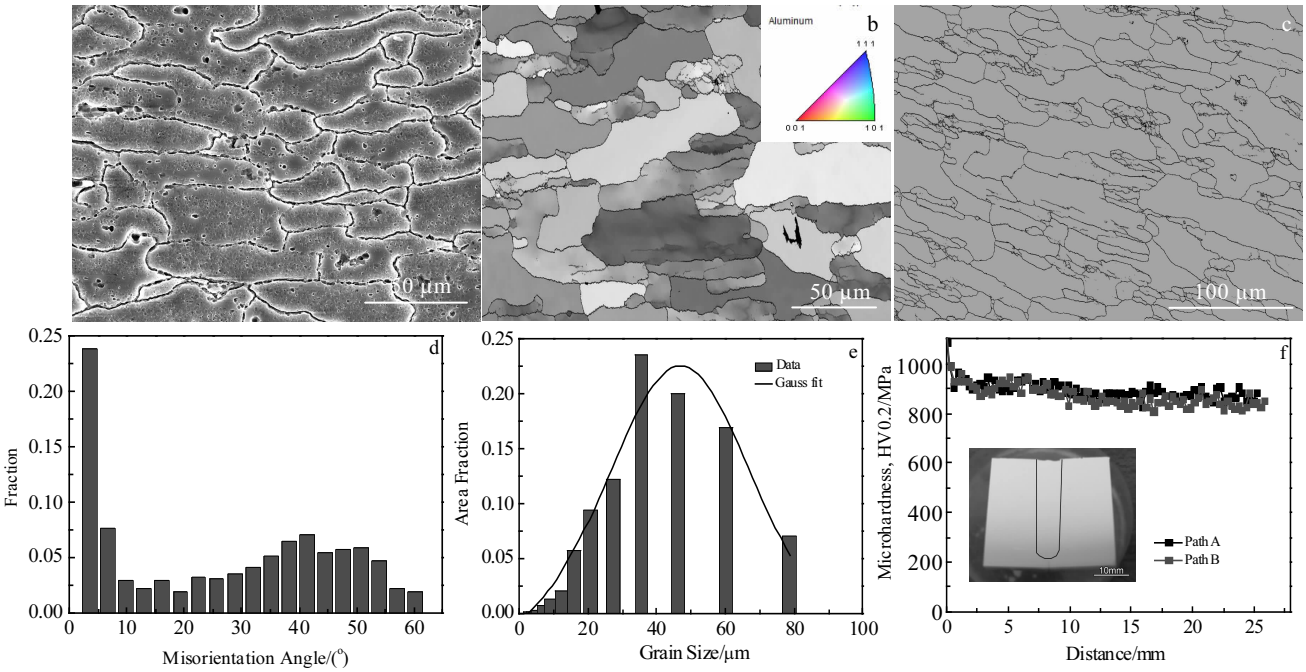



图 4　5A06 铝合金焊接接头 A 区域显微组织及相关性能分析

Fig.4　Microstructures and properties of zone A in 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) SEM image, (b) inverse pole map, (c) grain boundary (black line: high angle boundary, red line: low angle boundary), (d) misorientation angle distribution, (e) grain size distribution, and (f) microhardness

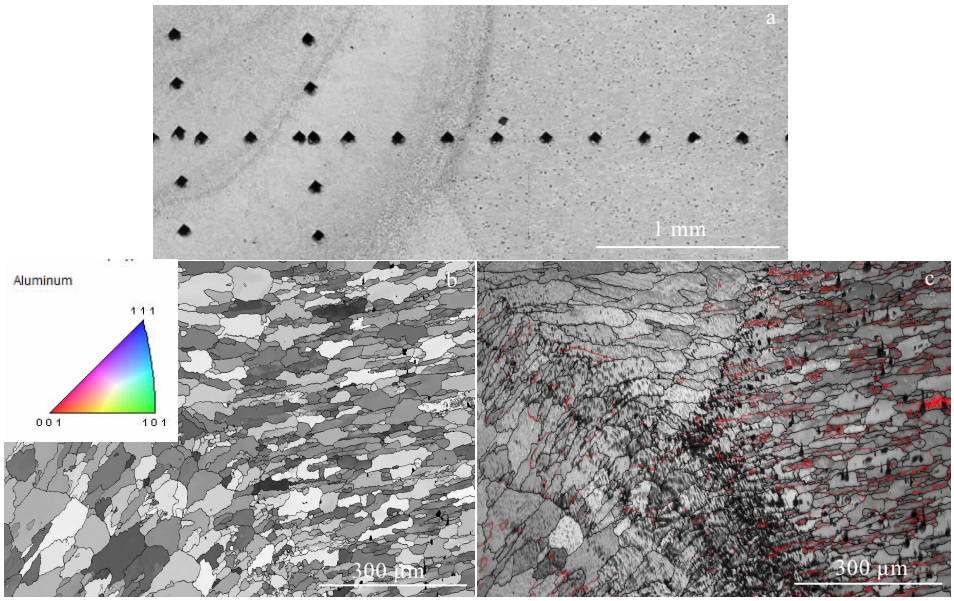



图 5　5A06 铝合金焊接接头 B 区域显微组织

Fig.5　Microstructures of zone B in 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) OM image, (b) inverse pole map, and (c) grain boundary (black line: high angle boundary, red line: low angle boundary)

着焊缝熔池中心进行延伸，完全偏离了基材的轧制方向，这主要与熔合区凝固过程有关。熔合区从中心位置到熔合线温度梯度分布，靠近热影响区的材料优先凝固，而熔合区中心位置最后凝固，导致熔合线附近晶粒形成了向着熔池中心进行偏转。另外，熔合线区左侧焊缝晶粒内小角晶界的密度明显低于热影响区，该区域主要是重熔晶粒，故小角晶界密度明显降低。

5A06 铝合金焊接接头熔合区 C 区的显微组织如

图 6 所示。图中可见，熔合区存在焊接熔化后留下的波纹，观察发现熔合区不同区域显微组织基本相似，均由枝状晶组成，枝状晶之间具有明显的衬度。采用 EBSD 对熔合区微观组织进行标定，发现熔合区晶粒形貌呈等轴状，与基材轧制拉伸晶粒相比，发生了明显变化。取向差统计表明，熔合区小角晶界的含量低于 5%。同时发现一个晶粒内由多个不同衬度方向的枝状晶组成，枝状晶之间累积取向差小于 5°，即晶粒内枝状晶间衬度的差异并非由取向差造成。

为了进一步分析熔合区枝晶间衬度的差异，对枝状组织进行成分分析，如图 7 所示。元素成分分析组合图（图 7b）可以看出，Mg 元素偏析严重，枝晶晶间和枝晶

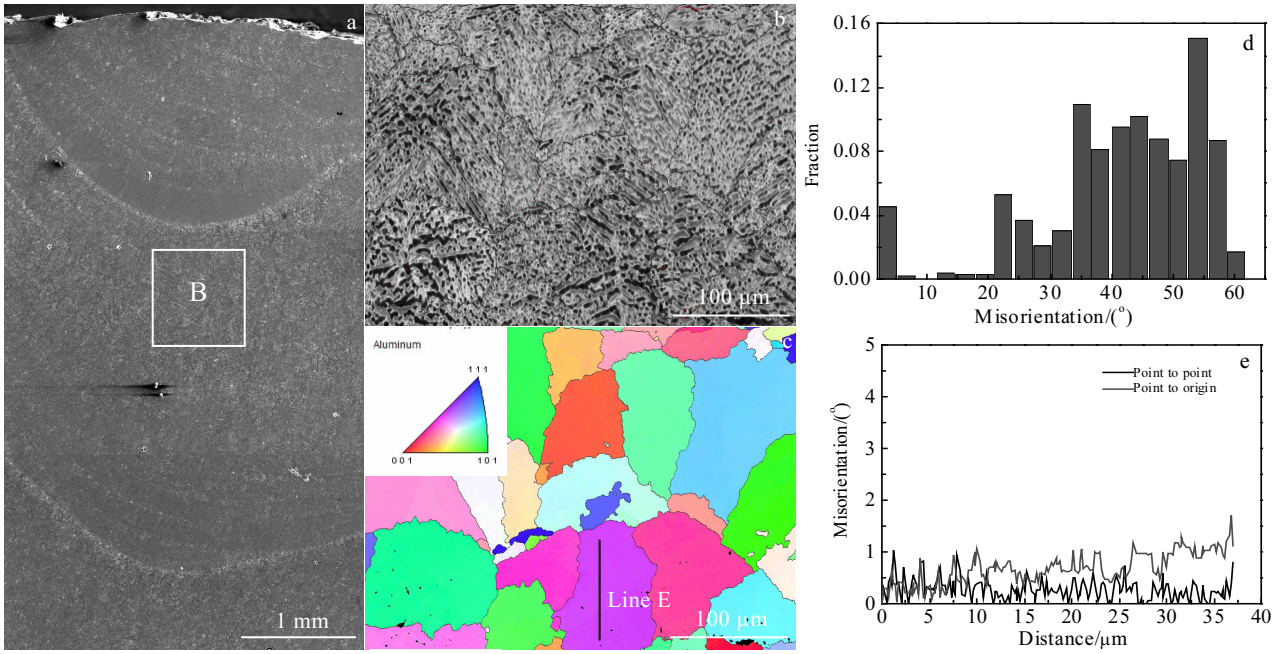



图 6　5A06 铝合金焊接接头 C 区域显微组织及相关性能分析

Fig.6　Microstructures and properties of zone C in 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) SEM image, (b) SEM image of region B in Fig.6a, (c) inverse pole map, (d) misorientation angle distribution, and (e) misorientation along line E in Fig.6c

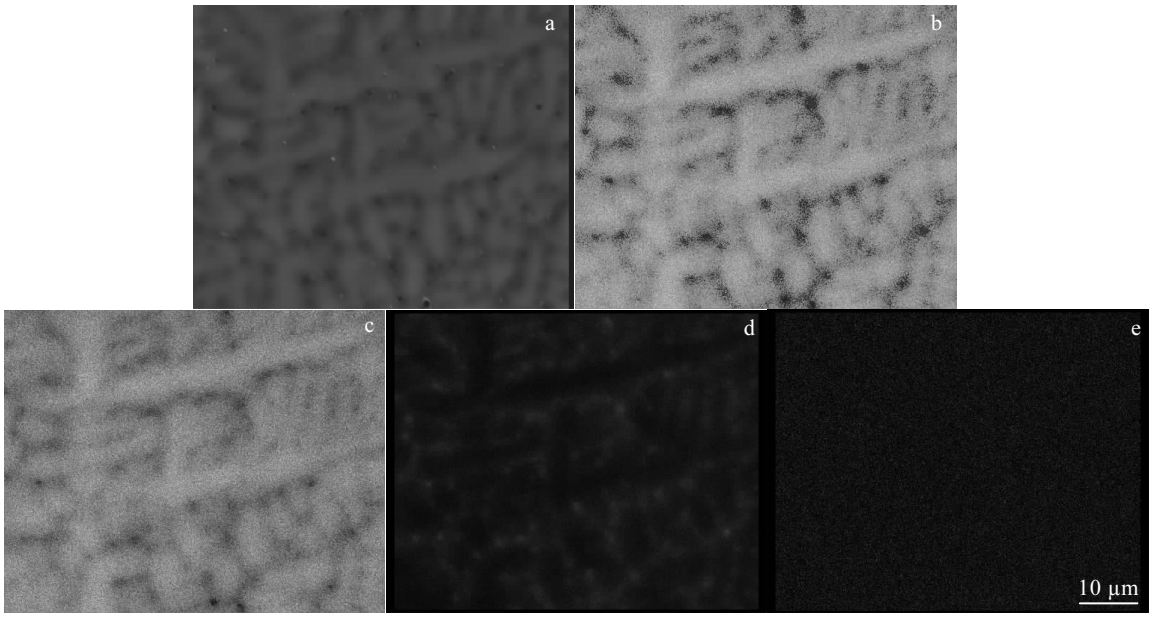



图 7　5A06 铝合金焊接接头焊缝内元素分布

Fig.7　Element distribution in weld seam of 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) SEM image, (b) elemental composition montage image, (c) element Al, (d) element Mg, and (e) element Mn

晶内 Mg 元素存在明显差异，枝晶晶间为富 Mg 区，枝晶晶内为贫 Mg 区，形成了 Mg 元素偏析分布。进一步分析 Mn 元素发现，Mn 元素在枝晶晶间和枝晶晶内偏析不明显。该研究结果表明铝合金熔合区枝晶间衬度的差异是由于 Mg 元素偏析造成的，造成该现象出现的原因主要与液态金属凝固理论有关。按照 5A06 铝合金平衡凝固相图，熔合区熔融的铝液优先发生贫 Mg 枝晶相凝固，使得前沿液相内溶质 Mg 元素的含量增加，温度逐渐降低，多个枝晶逐渐长大，将 Mg 元素向枝晶间推进，最后形成了枝状晶组织，且枝晶间 Mg 元素含量远高于枝晶内。焊接过程中金属溶液的凝固属于非平衡凝固过程，该过程会减弱 Mg 元素的偏析程度，但不能完成消除。

沿着 5A06 铝合金厚板熔合区进行显微硬度测试，其结果如图 8 所示。由图可见，焊缝内材料的力学性能也并非是均匀变化的而是存在一定波动，熔合区次表面 5 mm 的范围内存在显微硬度的极值，显微硬度值在 950～1050 MPa 之间，高于基体的 850～950 MPa，说明该区域硬度值较高，熔合区次表面至止口的 25 mm 范围内，显微硬度值在 800～900 MPa 之间，略低于基体的显微硬度值。一般而言，与基体相比，焊缝区材料强度和硬度会略有降低，造成这种情况原因主要与焊缝区晶粒粗化、缺陷密度降低以及焊接孔隙的形成有关。而试验中焊缝区次表面显微硬度较基体显微硬度升高的原因目前还不十分清楚，可能与焊接工艺、焊接夹杂等有关。

5A06 铝合金焊接接头熔合区缺陷分析如图 9 所示。图中可观察到熔合区孔隙的形貌，该孔隙呈长条形。EBSD 标定表明，孔隙位于三叉晶界处，即晶界处为孔隙形成的择优位置。这是由于晶粒在形核长大过程中，晶界处应力最大，利于孔隙的形成。

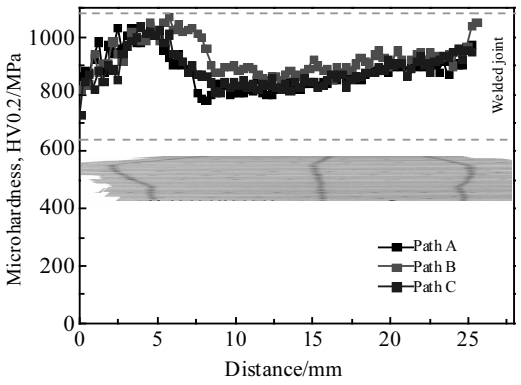



图 8　5A06 铝合金焊接接头焊缝内显微硬度分布

Fig.8　Microhardness distribution in weld seam of 5A06 aluminium alloy welded joint

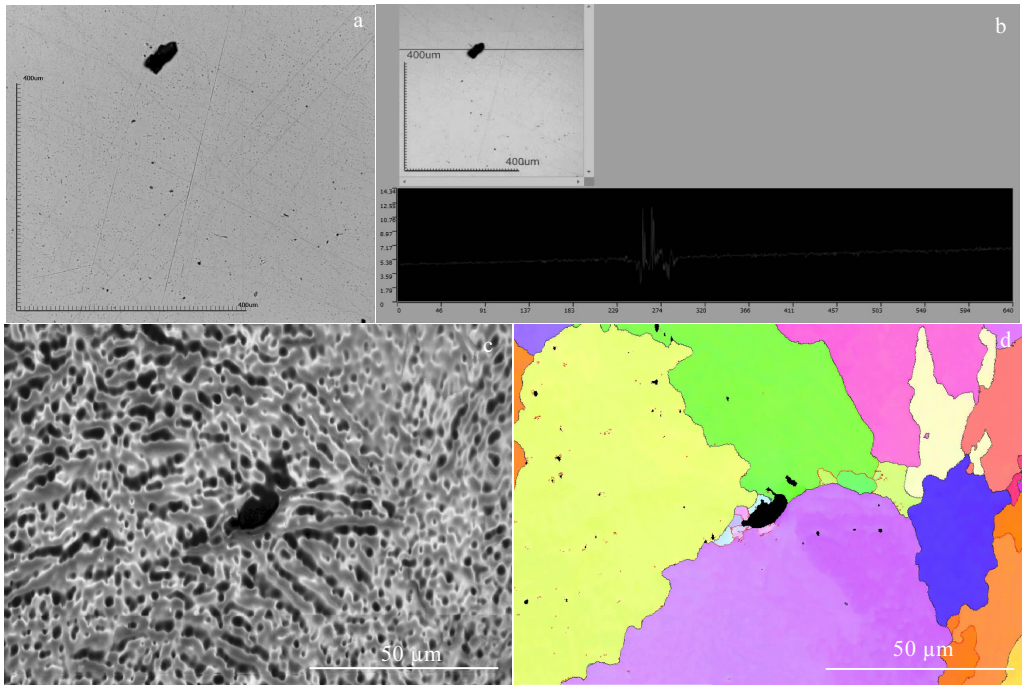



图 9　5A06 铝合金焊接接头焊缝内缺陷分析

Fig.9　Defect analysis in weld seam of 5A06 aluminium alloy welded joint: (a) OM image, (b) coarseness analysis, (c) SEM image, and (d) inverse pole map

## 3 结 论

1) 熔合区气孔、缺陷的数量明显高于基体，其中尺寸小于 100 μm 的缺陷占比超过 50%，焊接孔隙主要位于晶粒的三叉晶界处。

2) 熔合区与热影响区之间存在明显的界面，熔合区晶粒中小角晶界的含量明显低于热影响区和基体。

3) 熔合区由枝状晶组成，多个枝状晶团簇构成了一个晶粒，枝晶间由小角晶界组成，枝晶间衬度的差异由 Mg 元素偏析造成。

4) 熔合区材料的显微硬度值存在一定波动，在熔合区的次表面 5 mm 处存在显微硬度极大值。

**参考文献 References**

[1] Ilangovan M, Boopathy M R, Balasubramanian V. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25: 1080

[2] Singh G, Kang A S, Singh K *et al*. *Materials Today: Proceedings*[J], 2017, 4: 3590

[3] Alshaer A W, Li l, Mistry A. *Optics and Laser Technology*[J], 2014, 64: 162

[4] Bai Y, Gao H M, Qiu L. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20: 2234

[5] Wang Kuaishe(王快社), Wu Nan(吴 楠), Wang Wen(王 文) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1949

[6] Li Wendong(李文东), Zhang Deku(张德库), Wang Kehong(王克鸿) *et al*. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*(真空科学与技术学报)[J], 2017, 37: 437

[7] Zhu Zongtao(朱宗涛), Xue Junyu(薛珺予), Chen Hui(陈 辉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(7): 1977

[8] Zhang Xinge(张新阁), Li Liqun(李俐群), Chen Yanbin(陈彦宾) *et al*. *Chinese Journal of Laser*(中国激光)[J], 2010, 37: 1404

# Microstructure and Defects Analysis of 5A06 Aluminium Alloy Laser Welded Joint

Zou Dongli, Chen Xianglin, Xiao Dawu, He Lifeng, Shuai Maobing, Li Yubin

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties of 5A06 aluminium alloy laser welded joint of 30 mm in thickness were investigated. The results show that some pore defects are found in the weld seam zone, and the welded defects are mainly located at the grain boundary. The proportion of the welded defects with size less than 100 μm is beyond 50%. The microstructure in the weld seam zone is mainly composed of dendritic grains, and several dendritic grains are located in a single grain. The misorientation between the dendritic grains is less than 5°, and the contrast between the dendritic grains is caused by element Mg microsegregation. The obvious interface is observed between the weld seam zone and heat-affected zone, and the content of low angle boundary in heat-affected zone is higher than that of weld seam zone. Meanwhile, the grain morphology and size in the heat-affected zone are different from that in the weld seam zone. Microhardness measurement shows that the definitive fluctuation of microhardness values in weld seam zone is observed, and the microhardness values of weld seam zone reach 90% of the microhardness values of the matrix.

**Key words:** aluminium alloy; laser welding; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Zou Dongli, Ph. D., Associate Professor, Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-3626742, E-mail: donglizou@126.com