doi:10.3969/j.issn.1003 -4226.2026.05.016

6061 铝合金 TIG 焊接头组织不均匀性及拉伸性能研究

刘 杰
(湖南交通工程学院机电工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:采用交流钨极氩弧焊(TIG)对6 mm 厚6061 -T6 铝合金板材进行对接焊接,系统分析焊接接头不同区域的显微组织特征、显微硬度分布及拉伸性能。结果表明:焊接接头呈现明显的组织不均匀性,焊缝区主要由 α -Al 等轴晶和晶界 Al -Si 共晶组成,熔合区存在明显的柱状晶生长特征,热影响区可以划分为再结晶区和过时效区两个亚区。焊接接头存在显著的软化现象,热影响区过时效区硬度最低,约为母材的 56%。焊接接头抗拉强度为 218 MPa,达到母材的 70.3%,断裂位置均位于热影响区过时效区,断口呈现典型的韧性断裂特征。

关键词:6061 铝合金;TIG 焊接;显微硬度;抗拉强度
中图分类号:TG457.14 **文献标识码**:A

Study on microstructural inhomogeneity and tensile properties of 6061 aluminum alloy TIG welded joints

Liu Jie
(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Institute of Traffic Engineering, Hengyang* 421001, *China*)

Abstract: Butt welding was performed on 6 mm thick 6061 -T6 aluminum alloy plates using alternating current tungsten inert gas arc welding (TIG). Microstructural characteristics, microhardness distribution, and tensile properties of different regions of welded joint were systematically analyzed. Results indicate that welded joint exhibits significant microstructural inhomogeneity, weld zone is primarily composed of α -Al equiaxed grains and grain boundary Al -Si eutectic, fusion zone displays distinct columnar grain growth characteristics, heat-affected zone can be divided into two sub-zones: recrystallization zone and overaging zone. Welded joint exhibits significant softening, with the lowest hardness in over-aged heat-affected zone, approximately 56% of base material. Tensile strength of welded joint is 218 MPa, reaching 70.3% of base material. Fracture location is consistently in over-aged heat-affected zone, and fracture surface displays typical ductile fracture characteristics.

Keywords: 6061 aluminum alloy; TIG welding; microhardness; tensile strength

6061 铝合金属于 Al -Mg -Si 系可以热处理强化的铝合金,具有中等强度、良好的耐腐蚀性和加工成形性,广泛应用于航空航天、汽车制造、轨道交通等领域。焊接是铝合金结构件制造过程中不可或缺的连接工艺,其中钨极氩弧焊(TIG)因焊接过程稳定、焊缝成形美观、保护效果好等优点,在铝合金焊接中得到广泛应用[1]。

6061 铝合金 TIG 焊接过程中,焊接热循环会导致接头不同区域经历不同的温度和冷却速率,从而产生显著的组织不均匀性。焊缝区经历熔化和快速凝固过程,形成与母材完全不同的铸态组织;熔合区处于母材与焊缝的过渡地带,存在成分和组织的突变;热影响区则受到不同程度的热作用,发生回复、再结晶和析出相的溶解与长大等过程[2]。组织不均匀性会导致焊接接头力学性能下降,特别是热影响区的软化成为限制铝合金焊接结构承载能力的主要因素[3]。现有研究多集中于焊接工艺参数对接头宏观性能的影响,对于接头不同区域组织演变规律及其与力学性能的内在联系仍需要进一步深入探讨。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用母材为 6 mm 厚的 6061 -T6 铝合金轧制板材,其化学成分见表 1。填充焊丝选用直径 2.4 mm ER5356 铝合金焊丝。6061 -T6 铝合金母材的室温抗拉强度 310 MPa,屈服强度 276 MPa,断后伸长率 12%。

表 1　6061 – T6 铝合金母材化学成分

Table 1　Chemical composition of 6061 – T6 aluminum alloy base material　　*w*/%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.62	0.25	0.28	0.12	0.95	0.18	0.10	0.05	余量

1.2　焊接工艺

焊接试验采用 WSME – 315 型交流钨极氩弧焊机。焊接前,将铝合金板材加工成 300 mm × 150 mm × 6 mm 的试样,采用机械加工方法制备 60°的 V 型坡口,钝边高度 1.5 mm,装配间隙 1.0 mm。焊前用丙酮擦拭坡口及两侧 20 mm 范围内的表面,去除油污和氧化膜,然后用不锈钢丝刷进行机械清理。

焊接过程采用单面焊双面成形工艺,TIG 焊接工艺参数见表 2。焊接时采用高纯氩气作为保护气体,流量为 15 L/min,钨极直径为 2.4 mm,电弧长度保持在 2 ~ 3 mm。

表 2　TIG 焊接工艺参数

Table 2　TIG welding process parameters

焊接类别	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm · min^{-1})	送丝速度/(m · min^{-1})
打底焊	120 ~ 130	18 ~ 20	120	0.20
盖面焊	140 ~ 150	20 ~ 22	100	0.35

1.3　性能测试与组织表征

焊接完成后,沿垂直于焊缝方向截取金相试样和拉伸试样。金相试样经砂纸打磨、机械抛光后,用 Keller 试剂(2.5 ml HNO_3 + 1.5 ml HCl + 1.0 ml HF + 95 ml H_2O)腐蚀 15 ~ 20 s,使用 Olympus BX53M 光学显微镜观察焊接接头不同区域的显微组织。

显微硬度测试采用 HVS – 1000Z 型显微硬度计,试验载荷为 100 g,保压时间为 10 s。沿接头横截面中心线上每隔 0.2 mm 测试一个硬度点,测试范围覆盖母材、热影响区、熔合区和焊缝区。使用 Origin 2021 软件绘制显微硬度分布曲线。

拉伸试样按照 GB/T 228.1—2010 标准加工成板状拉伸试样,标距长度为 50 mm,宽度为 12.5 mm。拉伸试验在 CMT5105 型电子万能试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。每个工艺参数下测试 3 个试样,取平均值作为最终结果。使用 Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

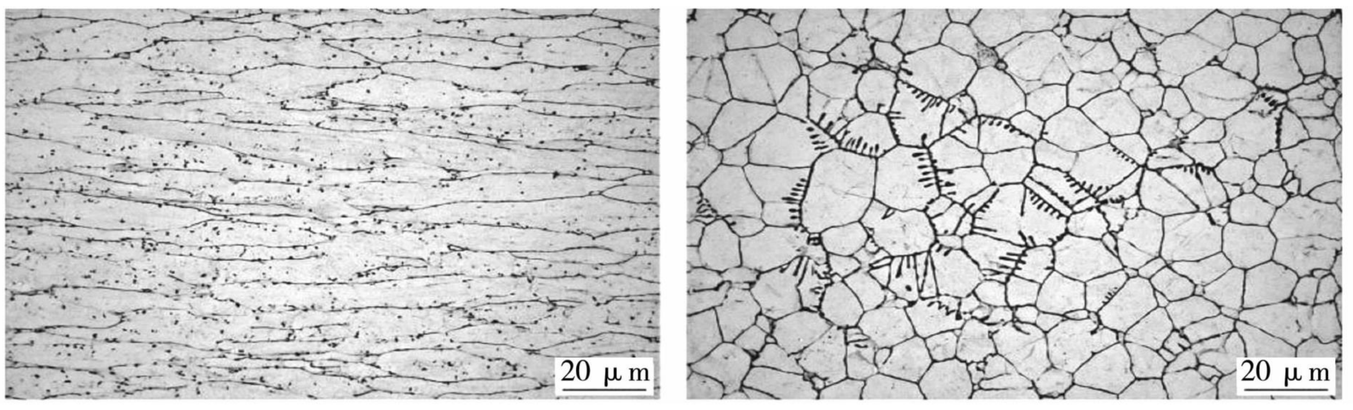
2　试验结果

2.1　焊接接头宏观形貌

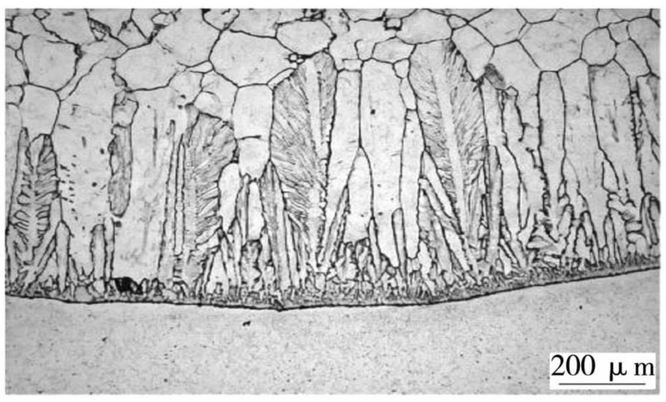
焊接接头表面成形良好,无明显的气孔、裂纹、未焊透等缺陷。焊缝表面呈银白色,鱼鳞纹均匀细密。焊缝熔合线清晰,熔深约为 5.8 mm,熔宽约为 12 mm。焊接接头可以明显分为三个区域:焊缝区(WM)、熔合区(FZ)和热影响区(HAZ)。

2.2　焊接接头显微组织特征

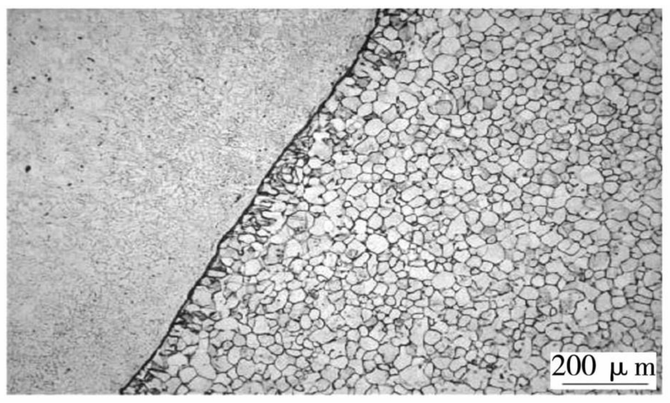
6061 铝合金 TIG 焊接接头不同区域的显微组织如图 1 所示。由图 1 可知,母材组织为典型的轧制态组织,由沿轧制方向拉长的 α – Al 晶粒和弥散分布的强化相 Mg_2Si 组成。焊缝区组织主要由 α – Al 等轴晶和晶界处的 Al – Si 共晶组成。这是因为焊接过程中,熔池金属在快速冷却条件下发生非平衡凝固,首先形成 α – Al 初生相,随着温度降低,剩余液相发生共晶反应,形成 Al – Si 共晶组织并分布在 α – Al 晶界处。焊缝中心区域的等轴晶尺寸比较均匀,平均晶粒尺寸约为 45 μm。熔合区处于焊缝与母材的过渡地带,组织特征明显不同于焊缝区和母材。该区域存在明显的柱状晶生长特征,柱状晶沿垂直于熔合线的方向向焊缝中心生长。这是由于熔合区附近温度梯度大,冷却速率快,晶粒沿着散热最快的方向择优生长所致。热影响区根据组织特征可以进一步划分为再结晶区和过时效区两个亚区。靠近熔合线的再结晶区经历了较高的温度作用(高于再结晶温度),原始轧制组织发生回复和再结晶,形成细小的等轴晶。靠近母材的过时效区温度较低(低于再结晶温度但高于时效温度),强化相 Mg_2Si 发生聚集长大,导致强化效果下降。



(a) 母材　　(b) 焊缝区



(c) 熔合区



(d) 热影响区

图 1 6061 铝合金 TIG 焊接接头不同区域显微组织

Fig. 1 Microstructure of different regions of 6061 aluminum alloy TIG welded joints

2.3 焊接接头显微硬度分布

6061 铝合金 TIG 焊接接头显微硬度分布曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,焊接接头的显微硬度分布呈现明显的不均匀性。母材的平均硬度约为 108 HV。焊缝区的平均硬度约为 72 HV,低于母材硬度。熔合区的硬度介于焊缝区和热影响区之间,约为 78 HV。热影响区的硬度分布呈现先降低后升高的趋势,最低硬度出现在距离熔合线约 1.5 mm 位置,约为 60 HV,仅为母材硬度的 56%。该位置对应于热影响区的过时效区,是焊接接头的软化区。随着距离熔合线长度的增加,硬度逐渐升高,最终恢复到母材硬度水平[4]。

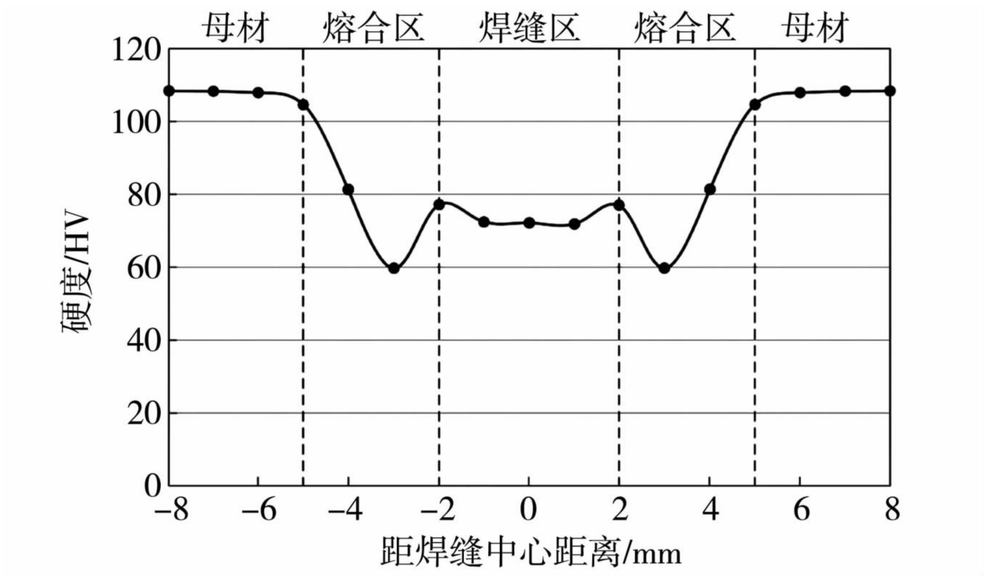


图 2 6061 铝合金 TIG 焊接接头显微硬度分布曲线

Fig. 2 Microhardness distribution curve of 6061 aluminum alloy TIG welded joint

2.4 焊接接头拉伸性能

6061 铝合金母材和 TIG 焊接接头的拉伸性能测试结果见表 3。从表 3 可以看出,焊接接头的抗拉强度为 218 MPa,达到母材抗拉强度的 70.3%;屈服强度为 142 MPa,达到母材屈服强度的 51.4%;断后伸长率为 6.8%,仅为母材断后伸长率的 56.7%。所有拉伸试样的断裂位置均位于热影响区的过时效区,这与显微硬度测试结果一致,表明过时效区是焊接接头的薄弱环节。拉伸断口的 SEM 观察结果显示,断口表面分布着大量韧窝,呈现典型的韧性断裂特征。韧窝的大小和深度不均匀,说明断裂过程中存在明显的应力集中现象[5]。

表 3 6061 铝合金母材和 TIG 焊接接头拉伸性能

Table 3 Tensile properties of 6061 aluminum alloy base material and TIG welded joints

试样类型	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
母材	310	276	12.0
焊接接头	218	142	6.8

3 结语

6061 铝合金 TIG 焊接接头呈现明显的组织不均匀性,焊缝区主要由 α - Al 等轴晶和晶界 Al - Si 共晶组成,熔合区存在明显的柱状晶生长特征,热影响区可以划分为再结晶区和过时效区两个亚区。焊接接头存在显著的软化现象,热影响区过时效区硬度最低,约为母材的 56%。这是由于过时效区温度低于再结晶温度但高于时效温度,强化相 Mg_2Si 发生聚集长大,导致强化效果下降所致。焊接接头抗拉强度为 218 MPa,达到母材的 70.3%,断裂位置均位于热影响区过时效区,断口呈现典型的韧性断裂特征。热影响区的软化是导致焊接接头力学性能下降的主要原因。

参考文献

[1] 胡斌,程林. 基于数值模拟下 6061 铝合金不同焊接速度的 TIG 焊分析[J]. 太原学院学报(自然科学版),2025,43(4):67 - 73.

[2] 胡洋. 6061 - T6 铝合金车架 TIG 焊接数值模拟与工艺优化[D]. 唐山:华北理工大学,2024.

[3] 吕欣泽. AZ31 镁合金/6061 铝合金搭接熔化焊工艺及接头强化机制研究[D]. 大连:大连理工大学,2023.

[4] 张鹏飞,卢嘉玮,张兆年,等. 6061 - T6 铝合金构件焊接残余应力分布[J]. 兰州交通大学学报,2021,40(3):15 - 19.

[5] 王晓军,杨健,路彦龙,等. 6N01 铝合金 K - TIG 焊接头的组织及性能[J]. 焊接技术,2021,50(8):19 - 23.

(收稿日期:2026 - 06 - 08)

作者简介

刘 杰 1986 年生,湖南交通工程学院机电工程学院硕士研究生。