

6061 锻铝合金板材焊接工艺研究

王锐敏 刘重金 李韶华 王文兰
(山西长治清华机械厂, 长治 046012)



摘要: 通过对 6061 锻铝合金板焊接性能和力学性能的工艺研究, 掌握了该种铝合金的基本焊接性能, 验证了所选焊接参数和焊接材料的可行性。试验数据表明, 厚度 25.4mm 板, 选用 $\Phi 3.2\text{mm}$ ER4043 焊丝, 采用熔化极大电流自动焊的焊接方法, 以及合理的焊接规范, 可获得良好的焊缝机械性能, 实际应用效果良好。

关键词: 锻铝合金; 板材; 焊接

Welding Technology Research on 6061 Forged Aluminum Alloy Plates

Wang Ruimin Liu Chongjin Li Shaohua Wang Wenlan
(Changzhi Qinghua Machinery Factory, Changzhi 046012)

Abstract: Aluminum alloy 6061 welding performance has been mastered with the process research on the forged aluminum alloy plate weldability and mechanical properties. The feasibility of the welding parameters and welding materials have been confirmed. The experimental result showed that 25.4mm thickness aluminum alloy plate can get a good weld mechanical properties by using ER4043 $\Phi 3.2\text{mm}$ welding wire. Applied the great current automatic melting welding technology and reasonable welding specifications. The good weld mechanical properties have been gotten. The practical application was good.

Key words: forged aluminum; aluminum alloy slab; welding

1 引言

铝合金材料在军民品模具制造业中应用越来越广泛。某型号复合材料产品生产用系列模具材料需满足热传导快、耐蚀性好、适应潮湿环境能力强的要求, 其主体结构采用焊接连接方式, 对焊缝有气密性要求。因此选用的材料应具有较好的热传导性、抗蚀性和良好的焊接性能。为了满足产品使用性能要求, 设计选用了 6061-T651 锻铝合金板及其型材作为模具的主要材料。为满足产品加工需要, 进一步掌握 6061 铝材焊接工艺性能, 获取合理可行的焊接工艺方法及参数, 开展了相关工艺研究和焊接试验。本文主要是

对基板材料 6061 锻铝焊接特性和力学性能进行了相关工艺研究和总结工作。

2 成分及力学性能

6061-T651 是 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金, 为消除固熔处理后的残余应力做了拉伸处理。其主要合金元素是镁与硅, 组织形成 Mg_2Si 相, 且含有一定量的 Mn 与 Cr, 中和了铁元素的不良作用, 同时添加有少量的 Cu 和 Zn, 提高了合金强度, 在高温下具有良好的塑性及耐蚀性, 没有晶间腐蚀倾向, 冷加工性能好。化学成分见表 1, 力学性能见表 2。

表 1 6061-T651 锻铝化学成分

质量分数，%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其它		Al
								单个	合计	
0.62	0.47	0.35	0.09	1.1	0.2	0.15	0.07	≤0.05	≤0.15	余量

表 2 6061-T651 锻铝力学性能

供货状态	抗拉强度 σ_b /MPa	非比例延伸强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	断后伸长率 δ /%
T651	265	245	9

3 焊接工艺研究和试验

3.1 6061 焊接性分析

6061-T651 铝合金为 Al-Mg-Si 合金，从物理性能上看，它的导热性强、热容量大、线膨胀系数大、熔点低且高温强度小，必须采用能量集中的热源焊接。从化学性能上看，其与氧亲和力极大，任何温度下都会氧化，在母材表面生成氧化铝（ Al_2O_3 ）薄膜，使表层熔点高（ $\sim 2050^{\circ}C$ ），组织致密，密度增大，焊接时妨碍母材熔化和熔合，易造成未焊透或夹渣缺陷，因此焊前需对焊接部位进行严格清理。另外液态铝可溶解大量氢气，固态时却溶解度极小，氢气在焊接熔池快速冷却、凝固结晶过程中，来不及逸出熔池表面而形成气孔。6061 铝合金为可热处理强化铝合金，焊后接头强度因软化会降低。

3.2 试验材料与设备

3.2.1 试验材料

结合产品结构特点及原材料焊接性能分析，试验选用母材 6061-T651 铝合金，板厚 25.4mm，确定选用抗裂性能良好、强度匹配的 ER4043 焊丝，直径 $\Phi 3.2mm$ 。该焊丝属于含硅 5% 的 Al-Si 合金焊丝，其熔点较母材略低，凝固范围广，焊缝成形好，工件变形小。

3.2.2 试验设备

经分析，采用手工 TIG 焊焊接中厚板，熔化母材形成熔池时间长，热量散失较大，焊接速度较低，生产效率低，且焊接变形较大。采用半自动 MIG 焊焊接中厚板，焊丝直接熔化，呈射滴过渡形成熔池，焊接速度快，相对线能量较小，操作人员变化位置方便，焊接熔池易于观察，焊枪位置能及时调整，且焊接效率高，但该方法极易产生气孔等内部缺陷。综其优缺点，试验选用 GM-1000 型硅整流自动弧焊机施焊，这是因为粗丝大电流熔化极氩弧焊热功率大，能量集中以及保护效果好，尤其是在焊接中厚板上有其独特

的优点，而全自动焊还可排除多方面人为因素对接头质量的影响。

3.2.3 保护气体

氩弧具有良好的清理氧化膜作用，且引弧容易，产生的热量较少，很适于铝及铝合金的焊接。故试验选用保护气体为高纯氩，含量 99.99%，满足 GB/T10624—1995《高纯氩》的要求。

3.3 试验内容

根据产品焊接结构特点，确定焊接试验的相关要求：

- a. 试板选用规格尺寸 500mm×150mm×25.4mm，开设 68°坡口，坡口形式见图 1 所示。焊接试验操作以两组试板（SB-1、SB-2）为例进行；
- b. 焊后对焊缝检查：按 QJ176A—1999 标准对焊缝进行 10 倍放大镜表面检查及 X 射线照相内部质量检查；
- c. 焊接接头力学性能检查：拉伸试验按 GB/T2651—2008 标准执行。

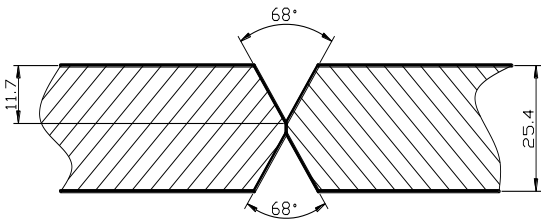


图 1 试板接头形式

3.4 试验

3.4.1 试验流程及参数

焊接采用熔化极自动氩弧焊完成，考虑到试板厚度为 25.4mm，单面单道焊焊缝不易成形且焊接变形量大，单面多道焊又极易造成气孔、未熔合等内部缺陷。综合分析，工艺采用双面单道焊的方法进行焊接试验，操作流程见图 2 所示。

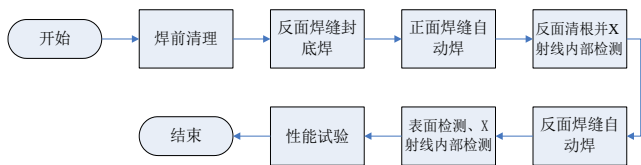


图 2 焊接工艺流程

3.4.1.1 焊接状态

焊接时试板处于水平状态，正、反面各焊一道焊缝，反面焊缝焊前需进行清根处理，清根深度应超过正面焊缝焊根约 2~3mm，以有效避免清根不彻底产生气孔等缺陷。

3.4.1.2 焊前清理

由于铝合金极易氧化，氧化膜及油污等会直接影响焊接接头质量，所以焊接前需对试板及焊丝进行严

格的化学酸洗或机械清理。酸洗需严格执行：除油→热水清洗→冷水清洗→浸亮→冷水清洗→干燥流程。焊接前用铜丝直径 0.25mm 的铜丝刷打磨清除坡口处氧化膜，使焊接区域露出金属光泽。

3.4.1.3 焊接参数

为获得优质的焊接接头，自动熔化极氩弧焊焊接铝合金时，一般采用较低的电弧电压和较大的电流，使熔滴呈亚喷射状过渡，即介乎喷射过渡和短路过渡之间，这种过渡形式可使电弧稳定、飞溅少、熔深大、阴极破碎区宽，焊缝成形美观。

自动熔化极氩弧焊的主要工艺参数有：焊丝直径、焊接电流、电弧电压、焊接速度、氩气流量等，为控制焊接参数选择的有效性，试验中采用两组焊接参数进行试验（表 3），以获取更好的焊缝质量。

表 3 焊接工艺参数

试板厚度/mm	焊丝直径/mm	试板编号	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/m h ⁻¹	氩气流量/m ³ h ⁻¹
25.4	3.2	SB-1	340~410	24~28	8~11	7~8
		SB-2	400~460	28~32	10~12	7~8

3.4.2 试验环境要求

受铝合金材料焊接特点影响，极易产生气孔缺陷，试验中对环境的温度及相对湿度进行了严格控制，环境温度不低于 10℃，相对湿度不大于 75%，无对流风。



图 4 SB-2 焊缝外观

4 试验结果及分析

4.1 焊接接头质量检测

4.1.1 焊接接头外观检测

对试验焊接接头进行宏观检查，采用 10 倍放大镜辅助进行，有效焊缝表面成形良好，有较好的鱼鳞纹分布，无裂纹、咬边、气孔等缺陷，接头外观如图 3、图 4 所示。

4.1.2 焊接接头内部检测

对有效焊缝内部质量进行 X 射线检测，符合 QJ176A—1999《地面设备熔焊通用技术条件》I 级要求。



图 3 SB-1 焊缝外观

4.2 力学性能检测

焊接接头机械性能试样按 GB/T2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》进行取样并完成拉伸试验，拉伸试件图样见图 5，试验结果见表 4。



图 5 拉伸试样图

表 4 焊接接头拉伸试验结果

试板编号	试样编号	σ_b /MPa	平均值/MPa	断裂位置
SB-1	SB-1-1	195	189.3	热影响区
	SB-1-2	186		
	SB-1-3	187		
SB-2	SB-2-1	193	191.3	热影响区
	SB-2-2	200		
	SB-2-3	181		

4.3 试验结果分析

4.3.1 焊接接头强度分析

由试验结果可以看出，接头与母材 σ_b 的比值为 $189.3/265=0.714$ 、 $191.3/265=0.722$ ，焊接接头强度明显低于母材强度，接头拉伸试样均断裂在焊缝热影响区，这说明在电弧热作用下铝合金的组织 and 性能发生了变化，接头强度损失较大。分析其原因，6061 铝合金属于热处理可强化铝合金，熔焊时，母材（坡口）表面与填充金属同时被熔化，构成焊缝的熔化区，临近熔化区的母材承受典型的焊接短时温度循环作用，急剧升高至接近熔点而后缓慢地下降，峰值温度和陡度随焊缝的距离增大而下降。此过程中，这一区域将具有不同的显微组织状态，材料内部出现析出相（晶粒）开始长大，间距变大，再结晶、溶解和沉淀等现象，其宏观表现即是材料的强度降低，塑韧性有所提高，即“软化”现象，也称“过时效”。热处理强化的焊接接头，由于焊缝金属发生相变，晶粒粗大及脆性相析出导致金属纯度及致密性降低，影响接头的耐蚀性能，对于耐蚀性有严格要求的产品可适当考虑增加相应的表面处理，以提高产品的表面耐蚀度。

4.3.2 不同焊接参数对焊缝强度影响分析

从 SB-1、SB-2 两组试板及其接头拉伸试验可得出，两组较接近的焊接参数对焊缝强度影响不大，在对焊前清理、气体保护、焊接环境、焊接参数等严格控制下，均可得到高质量的焊接接头。受 6061 材料限制，焊接热影响区是焊接接头的薄弱区，针对需保证设计强度的部位，要引起高度重视，可适当采用局部厚度补偿。

4.3.3 环境温、湿度对焊接接头的影响分析

铝合金有着导热性强、热容量大、线膨胀系数大

等物理性能，铝合金试件处于低温、高湿环境中时，自身温度会低于环境温度，且表面会吸附空气中大量的水份。试验中焊接坡口经历熔化急速升温、焊后温度速降的过程，电弧产生过程中试件本身、焊丝表面吸附空气中的水份分解会产生大量的氢气，它会大量溶解于液态铝中，固态铝溶解度极小。

氢气在焊接熔池快速冷却、凝固结晶过程中，来不及逸出熔池表面而形成大量气孔，严重影响焊接接头质量。试验得出，环境温度不低于 15℃，相对湿度不大于 75%条件下获得的焊接接头性能及质量最优。

5 结束语

根据焊接试验数据及结果分析，可得出以下结论：

- a. 采用 ER4043 焊丝对厚度为 25.4mm 的 6061 锻铝合金板焊接，可获得良好的焊缝性能。
- b. 温度不小于 15℃，相对湿度不大于 75%的环境条件下，焊接质量较为理想。
- c. 6061 焊接接头强度低于母材，只有母材的 70%左右，“软化”现象较为严重，但通过设计结构局部加强，可获得满足产品所需的结构性能指标。

参考文献

1 陈祝年. 焊接工程师手册. 北京：机械工业出版社，2002.1
2 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册. 北京：机械工业出版社，2001
3 李加良，等. 铝合金中厚板焊接工艺试验. 焊接，2004（10）
4 [德]D.拉达伊. 焊接热效应温度场、残余应力、变形. 北京.机械工业出版社，1997.7