

## 优化超硬铝合金水管焊接工艺



铝合金具有比重小、比强度高、易加工成形及抗腐蚀性等特点，在各类高速船舶、铁路车辆和工程机械中广泛应用。但因其与氧亲和力大、导热性比碳钢高 3~4 倍，导致铝合金焊接性较差，易出现（氢）气孔、结晶裂纹及液化裂纹等焊接缺陷。

本文针对 6 系、7 系硬铝、超硬铝合金开展焊接工艺试验，通过分析焊接过程中缺陷产生原因，选择相匹配的焊材合金系，优化焊接工艺，形成可支撑铝合金水管焊接生产的工艺规范。

### 1. 焊接试验

本文主要针对 6 系（6063）铝合金水管之间的管管对接、6 系（6063）铝合金水管与 7 系（7075）铝合金法兰盘之间的管板角接开展试验。

6063 铝合金具有良好的抗腐蚀性及加工成形性，既可用于挤出水管型材，又适用于锻造加工；7075 铝合金力学性能优越，合金元素含量高、热裂敏感性强，焊接过程中易形成结晶裂纹、液化裂纹及气孔，二者主要化学成分如表 1 所示。

**表1 6063、7075 铝合金主要化学成分（质量分数）（%）**

	Si	Cu	Mg	Zn	Al
6063	0.6	0.1	0.9	0.1	余量
7075	0.4	2	2.5	6	余量

### 2. 缺陷分析

（1）焊接气孔 一方面来源于焊丝、铝合金母材在加工过程粘附于表面的油脂等含氢的污染物，或其表面氧化膜中吸附的潮气和水分；另一方面主要为惰性保护气体的气体流量

不当，焊缝中氢主要来自空气中的水分。保护气体流量过小，气流挺度差，排除周围空气能力弱，保护效果不佳；反之，流量过大，气流易变成紊流，易使空气卷入，从而降低保护效果。

焊缝气孔的预防主要从焊接操作规范方面控制。焊前使用丙酮或酒精等有机溶剂擦拭焊缝表面油污，然后再使用不锈钢丝刷清理焊缝表面氧化皮，并选用适中气体流量。

(2) 热裂纹 母材确定后，焊接接头热裂纹的出现主要取决于焊丝的选配。铝合金焊接热裂纹有两种特征：一种为出现于焊缝中心或弧坑内的结晶裂纹，另一种为出现于母材熔合线或多层焊时前层焊缝热影响区内的液化裂纹。

结晶裂纹属于铝合金焊接过程中典型缺陷。铝合金焊接熔池凝固时为二元或多元共晶合金，由于熔池加热和冷却速度快，固相和液相之间的扩散来不及进行，熔合合金无法建立平衡状态，先结晶的为高熔点组元，后结晶的低熔点组元被排挤在焊缝中心，在焊接应力作用下发生开裂，形成焊缝结晶裂纹。

液化裂纹主要取决于母材与焊材合金系的匹配。当焊缝金属的熔点低于母材的熔点时，焊缝金属能顺沿熔合线两侧晶间的液相通道流到母材近缝区，愈合可能产生的液化裂纹，母材熔合线附近不易产生液化裂纹。反之，当焊缝金属的熔点高于母材的熔点时，母材熔合线附近最后凝固，在焊接收缩应力作用下，易在熔合线附近出现液化裂纹。

根据上述分析，本文重点从焊接操作规范和焊材合金系选型两个方面开展试验。

### 3. 试验过程及结果

(1) 焊材合金系的选择 由于本文研究的铝合金水管对密封性能要求高，而对于力学性能要求低（内部承压 $\geq 6\text{MPa}$ 即可），为此本文选择抗焊接裂纹性能优越的 Al-5%Si 合金系焊丝作为本次试验用焊接材料。Al-5%Si 焊丝的液态金属流动性好，特别是凝固时收缩率小，因而有优良的抗焊接裂纹性能，但焊缝强度较低，适用于锻铝、硬铝及超硬铝合金的焊接，焊丝中加入少量钛，可以起到变质作用，细化焊缝晶粒。

选用焊丝牌号为 ER4043， $\phi 3.0\text{mm}$ ，焊丝成分如表 2 所示。

表2 ER4043焊丝成分（质量分数）（%）

Si	Cu	Zn	Mn	Ti	Al
5	0.3	0.1	0.05	0.2	余量

(2) 试验接头形式及焊接参数 焊接接头分为 6063-6063 管管对接、6063-7075 管板角接两种，接头形式如图 1、图 2 所示，试验过程焊接参数如表 3 所示。

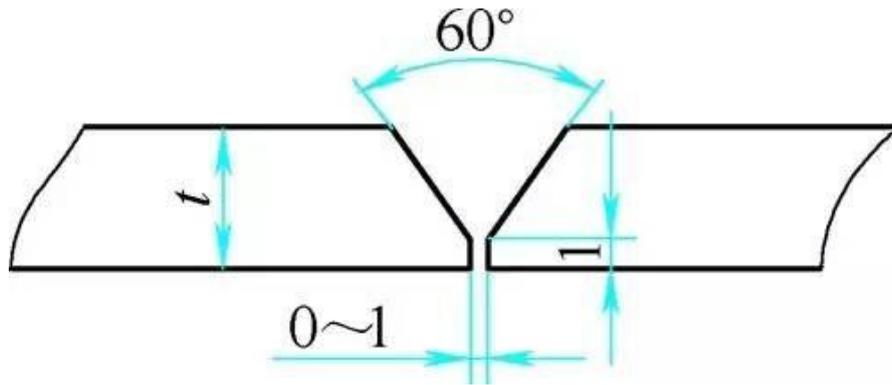


图1 管-管对接接头形式

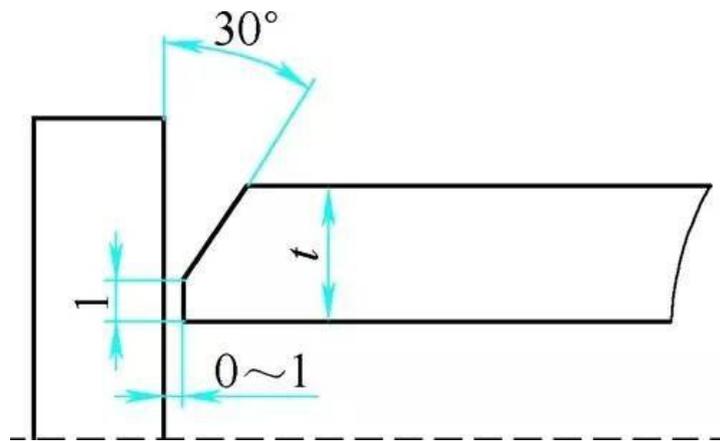


图2 管板角接接头形式

表3 试验过程焊接参数

钨极直径 /mm	焊接电流 /A	氩气流量 /L·min <sup>-1</sup>	极性	脉冲
2.4	140~180	10~15	交流	无

(3) 焊接工艺 焊前准备: ①采用角磨机机械打磨待焊件焊缝两侧 25mm 区域至露出金属光泽, 打磨后用乙醇擦拭打磨区域, 确保打磨区域附件无铝屑、砂砾等异物, 以免焊接过程中产生未熔合缺陷; 同时蒸发表面水汽, 避免焊缝附近出现气孔缺陷。②定位焊时, 采用外力约束构件, 避免焊点收缩引起点焊变形。③利用焊枪预热焊道, 不填焊丝, 预热至焊道处母材表层“微熔”状态, 不熄灭电弧直接填充焊丝焊接; 当室温低于 5℃时, 需要利用加热器加热焊道两侧 25mm 内至 90~100℃之间。

焊接过程: ①焊接过程中, 需保证足够的氩气流量, 避免焊缝氧化。在提升电流的同时, 应适当地提高氩气气体流量。②确保焊丝尖端时刻处于焊枪喷嘴保护气体范围内, 避免过热的焊丝尖端被氧化。③再次起弧焊接时, 由于焊丝尖端失去 Ar 气保护已被氧化, 应切除尖端 5~10mm。④收弧时, 采用“画圈法”填满弧坑, 且熄弧后仍需将焊枪对准弧坑 3~5s,

使用残余气体保护正在凝固的弧坑不被氧化。

(4) 探伤结果 由于力学性能要求低、对接焊缝无熔透要求，采用渗透探伤检测焊缝表面缺陷情况。角焊缝和对接焊缝检测结构均合格，满足 JB/T4730.5—2005 标准要求，探伤结果如图 3 所示。



图 3 对接、角接焊缝探伤合格

(5) 力学性能及宏观熔深观察 按照 GB/T 19869.2—2012《铝及铝合金的焊接工艺评定试验》标准，结合铝合金水管实际应用工况要求，主要进行对接接头拉伸、弯曲力学性能测试，角接接头进行熔深观察。

首先，力学性能测试：180°、D=57mm 背弯表面无裂纹，拉伸试样断裂位置在母材处，抗拉强度满足 NB/T47016—2011《承压设备产品焊接试件的力学性能检测》标准中规定，6063（T6 焊）铝合金抗拉强度最低值 118MPa，本次拉伸试验结果满足标准要求。试样如图 4 所示、试验结果如表 4 所示。



图4 弯曲、拉伸试样

表4 力学性能测试结果

序号	抗拉强度/Mpa		弯曲 D=57mm $\alpha=180^\circ$
	实测	断裂位置	
1	142	母材	无裂纹
2	143	母材	无裂纹

其次，角接焊缝宏观熔深观察：采用 5%NaOH 水溶液、室温环境下腐蚀 3~5min，熔池在 7075 母材一侧，最大熔深为 1.2mm，在 6063 母材一侧最大熔深为 1.5mm。结果表明，Al-5%Si 焊材合金系与 6063 铝合金熔合性要优于 7075，两者熔深均可满足使用要求（见图 5）。



图5 管板角接熔深情况

#### 4. 结语

- (1) 选用 Al-5%Si 合金系焊材可满足 6 系、7 系硬铝、超硬铝合金水管的焊接。
- (2) 焊前焊缝区域清理、预热，焊接过程气体流量及连续送丝等操作规范对于预防焊接气孔、热裂纹等均有良好效果。
- (3) 焊后力学性能及熔深观察结果表明，ER4043 焊丝可以满足铝合金水管的焊接要求。

来源：焊接切割联盟