

×2.5 mm 和 250 mm × 75 mm × 2.0 mm, 采用对接形式, 没有间隙。

主要工艺参数包括基值电流、脉冲电流、焊接速度和送丝速度等。初步考核的主要指标是单面焊双面成形状况。当脉冲频率与焊接速度匹配合理时, 可以获得由多个焊点相互搭接而成的连续焊缝, 外观呈均匀的鱼鳞波纹, 在频率较低时容易实现^[3]。选择脉冲频

率为 2 Hz, 占空比为 0.5, 焊接速度为 300 ~ 350 mm/min, 确定基值电流为 70 ~ 90 A, 脉冲电流为 120 ~ 140 A, 送丝速度为 720 ~ 920 mm/min, 这时热输入比较合适。具体选定工艺参数及试验结果见表 2。

由表 2 可以看出, 6 号规范可以获得好的焊缝成形, 确定其为平板对接焊接参数, 如表 3 所示。

1.3 存在的问题及解决措施

表 2 焊接工艺参数及试验结果

编号	基值电流 I_1/A	脉冲电流 I_2/A	焊接速度 $v_1/(mm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_2/(mm \cdot min^{-1})$	焊缝成形描述
1	70	120	300	720	成形较好
2	70	130	320	820	背面熔透不连续
3	70	140	350	920	背面未熔透
4	80	120	320	920	背面成形较差
5	80	130	350	720	正面无余高
6	80	140	300	820	成形好
7	90	120	350	820	焊缝较宽
8	90	130	300	920	背面塌陷严重
9	90	140	320	720	正面无余高

表 3 焊接工艺参数

基值电流 I_1/A	脉冲电流 I_2/A	焊接速度 $v_1/(mm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_2/(mm \cdot min^{-1})$	钨极直径 D/mm	脉冲频率 f/Hz	电弧长度 L/mm
80	140	300	820	2.5	2	2.5

采用表 3 中的焊接参数进行焊接试验。取试样进行 X 射线探伤, 结果表明有贯穿整条焊缝的链状气孔, 不能满足使用要求, 断面的宏观形貌如图 1 所示, 可以明显地看出, 气孔集中在焊缝的中下部。

气孔在焊缝中下部集中的问题, 可能是焊缝背面

保护不好, 导致空气的混入, 也可能是熔池中的气体没能逸出造成的。因此, 采取背面开坡口(图 2), 并采用氩气进行保护的措施来尝试解决气孔问题。

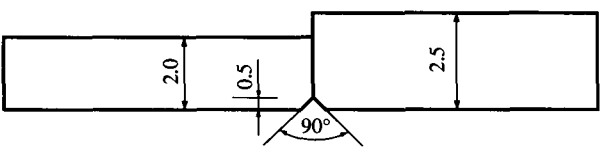
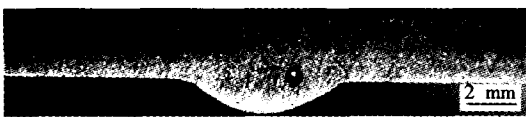


图 2 背面坡口形式



(a) 焊缝纵截面



(b) 焊缝横截面

图 1 气孔形貌图

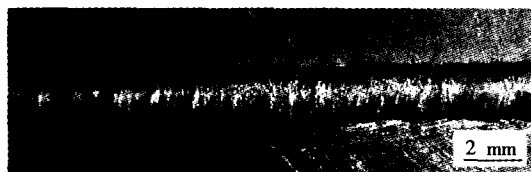
进行以下四组试验来分析焊缝中气孔的形成原因:

- (1) 背面不开坡口, 不加保护气;
- (2) 背面不开坡口, 加保护气;

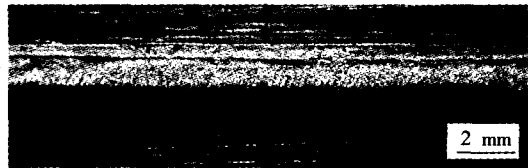
(3) 背面开坡口,不加保护气;

(4) 背面开坡口,加保护气。

试验结果显示,无论背面是否施加保护气,只要背面不开坡口,其气孔缺陷都依然存在,保护气的加入对消除气孔没有效果;而背面开坡口的试件,气孔缺陷完全消除,依据 GB3323—87 标准,焊缝中气孔缺陷评定达到了 I 级标准。由此可见,焊缝中气孔的形成是由于熔池中气体的逸出不及时造成的,背面开坡口相当于局部减薄工件,实现了更好的焊缝熔合,并提高了熔池存在时间和加强了对熔池的搅拌作用,有利于气体的逸出。而背面是否施加保护气的焊缝成形,其结果如图 3 所示。不加保护气时,焊缝背面成形粗糙,而采用氩气保护的背面成形良好,光亮且有鱼鳞纹的痕迹,这是因为保护气体的加入抑制了背面熔化金属氧化膜的产生,提高了金属的流动性,增强了表面张力作用,实现了焊缝表面的光滑成形。



(a) 背面不加氩气保护的焊缝成形



(b) 背面进行氩气保护的焊缝成形

图 3 焊缝的背面成形

2 力学性能试验和组织分析

为分析接头的强度性能,对焊接试样进行了拉伸试验。结果显示,焊缝和接头拉伸试样的断裂发生在靠近铸铝侧的热影响区,分别达到了铸铝母材强度的 77% 和 71%,能够满足所需的性能要求。

图 4 和图 5 为接头宏观照片和焊缝微观形貌照片。由接头宏观图可以看出,气孔缺陷已经消除,焊缝微观组织照片显示焊缝区域为细小、均匀的胞状枝晶。选择焊缝区晶内和晶界两点进行能谱分析,如图 6 所示,成分分析结果如表 4 所示,焊缝区主要成分为铝,并含有少量的镁,几乎不含 Si 元素,镁元素少量富集于晶界,这与金属间化合物 Mg_2Al_3 的熔点较低,易于晶

界偏析有关。



图 4 接头宏观照片

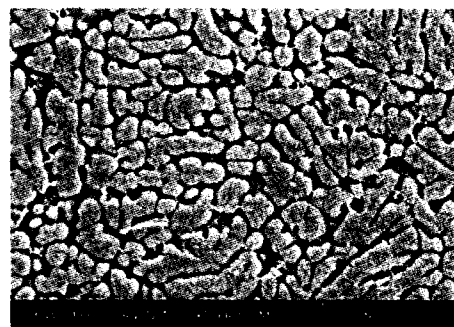
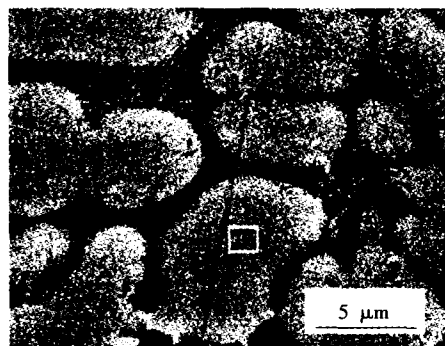
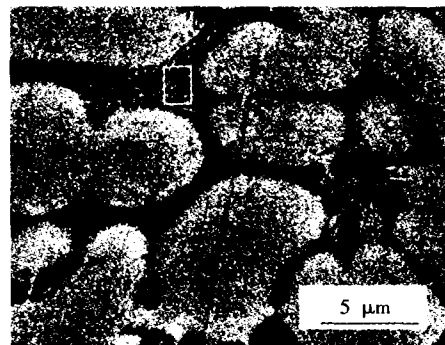


图 5 焊缝微观组织



(a) 晶内成分分析位置



(b) 晶界成分分析位置

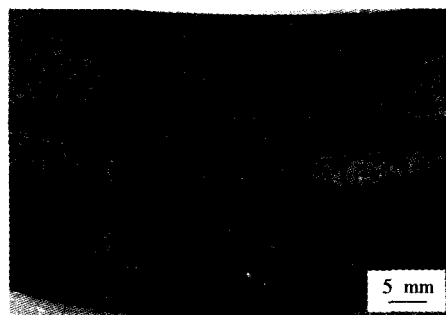
图 6 焊缝能谱分析位置

表 4 晶内和晶界成分分析结果(%)

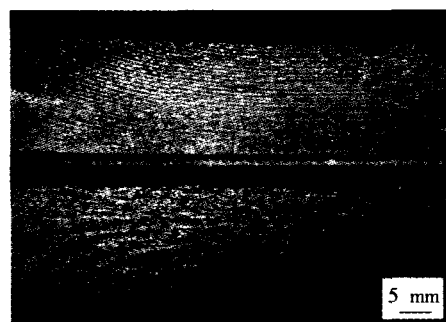
元素	晶内		晶界	
	质量分数	原子分数	质量分数	原子分数
Mg	3.09	3.42	3.39	3.75
Al	96.91	96.58	96.61	96.25

3 筒体的焊接工艺

参考平板焊接工艺进行某型号铝合金航空产品模拟件的焊接,产品的焊接结构是 ZL101A 与 LF6 筒体的对接悬空焊,材料尺寸分别为 $L200\text{ mm} \times D177.5\text{ mm} \times d2.5\text{ mm}$ 和 $L200\text{ mm} \times D176.5\text{ mm} \times d2.0\text{ mm}$ (L —长度, D —外径, d —壁厚),在自行研制的筒体焊接专机上进行焊接试验。焊前准备工作和平板对接一样,背面开坡口并加保护气,焊缝的正反面成形如图 7 所示。



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图 7 筒体焊缝成形

可以看到焊缝成形良好,光洁平直,且正面余高合适,背面熔透均匀,同时筒体试件的 X 射线探伤结果显示,焊缝中气孔缺陷的评定达到 I 级标准。组织分析显示,焊缝的晶粒也是细小、均匀的胞状枝晶。

4 结 论

(1) 焊接薄壁 ZL101A 和 LF6 异种铝合金时,采用低频脉冲交流 TIG 焊,并填充焊丝,可以有效地解决熔合、成形等问题,获得了优良的力学性能,焊缝区为细小的胞状枝晶。

(2) 针对气孔在焊缝中下部集中的问题,采用背面开坡口的措施可以有效地消除气孔缺陷,使焊缝中的气孔缺陷评定达到 I 级标准。同时背面进行氩气保护可以有效提高焊缝背面的成形质量,实现背面成形光亮、均匀。

(3) 筒体悬空焊接时,背面开坡口并同时进行氩气保护,可以获得良好的焊缝成形和优质的筒体焊接质量。

参 考 文 献

- [1] 黄汉中. 铝及铝合金焊接中常见焊接缺陷及其对策[J]. 石油化工设备技术,1997,18(5):51-58.
- [2] 包晔峰,熊家林,王松祥. 工艺因素对铝合金扩散氢的影响[J]. 机车车辆工艺,1996(4):17-21.
- [3] 廖平,陈书杰,杨文杰. 薄板铝合金脉冲交流 TIG 焊工艺[J]. 焊接学报,2003,24(4):65-68.

作者简介: 吕世雄,1957 年出生,博士研究生,高级工程师,主要从事有色金属焊接和特种连接方面的研究。

[上接第 29 页]

相当或相近,在选择焊接材料和实施焊接工艺时,要注意以下几个方面:加强对焊接熔池的保护和净化;细化焊缝金属的晶粒;调控焊缝组织和各组织之间的比例。

参 考 文 献

- [1] 王庆义. 冶金技术概论[M]. 北京:冶金工业出版社,2006. 77-103.
- [2] 上田修三. 结构钢的焊接[M]. 北京:冶金工业出版社,

2004. 23-27.

- [3] 陈伯鑫. 焊接冶金原理[M]. 北京:清华大学出版社,1991. 308-314.

作者简介: 尹士科,1941 年出生,教授级高级工程师,曾获国家科技进步二等奖 2 项,部级科技进步一等奖 3 项,获国家专利 7 项,出版著作和译著共 14 部,发表论文 70 余篇。