

纳米 TiC 复合焊丝和 7075 铝合金的脉冲 TIG 焊组织和性能及工艺优化

聂志坚¹, 秦颐鸣^{1,2}, 龙金海¹, 陈基朗¹, 卢悦¹, 唐鑫¹

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 广西产业技术研究院, 南宁 530000)

摘要: 使用纳米 TiC 复合 (Al-Zn-Mg-Cu) 焊丝对 7075-T651 铝合金板材进行交流脉冲钨极氩弧焊 (tungsten inert gas, TIG), 以焊缝抗拉强度为响应值, 通过正交试验分析优化焊接脉冲电流、脉冲频率和焊接速度 3 个参数, 对不同工艺下的焊缝进行拉伸测试、气孔率分析和微观组织分析。结果表明, 在焊接电流过高和焊接速度过低时, 容易导致纳米颗粒聚集, 氢气泡在颗粒处形核并汇集长大, 形成气孔。通过正交试验法探究纳米 TiC 复合焊丝焊接 7075 铝合金的最佳工艺为基值电流 160 A, 脉冲电流 180 A, 脉冲频率 100 Hz, 焊接速度 3 mm/s。在合适的焊接工艺下, 纳米颗粒在基体中的均匀分散, 同时可以抑制晶内析出相长大, 提高焊接接头性能。

关键词: 铝基复合材料; 7075 铝合金; 显微组织; 焊接气孔; 正交试验

中图分类号: TG442 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220303001

Microstructures performance and welding process of pulse TIG welded 7075 aluminum joints prepared with nano TiC aluminum matrix composite filler

Nie Zhijian¹, Qin Yiming^{1,2}, Long Jinhai¹, Chen Jilang¹, Lu Yue¹, Tang Xin¹

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Institute of Industrial Technology, Nanning 530000, China)

Abstract: The nanocomposite welding wire (Al-Zn-Mg-Cu) was used for AC pulse TIG (tungsten inert gas) welding of 7075-T651 superhard aluminum alloy. In response to the design value of tensile strength, the welding process parameters, such as welding pulse current, welding frequency and welding speed, were optimized by orthogonal test method. The tensile properties, welding pores and microstructures of welded joints with different process parameters were analyzed. The results showed that excessive welding pulse current and low welding speed can induce nanoparticles clustering and hydrogen bubbles nucleate at the particles grow up to pores. For tensile strength of welded joints, the optimum process parameters were welding base current 160 A, pulse current 180 A, welding frequency 100 Hz, welding speed 3 mm/s. The suitable process parameters favored the dispersion of nanoparticles and restrained the size of intracrystalline precipitation phases, which could improve the performance of welded joints.

Key words: aluminum matrix composite, 7075 aluminum alloy, microstructure, porosity, orthogonal experiment

0 前言

Al-Zn-Mg-Cu 铝合金是一种常用轻质结构材料, 比强度高且具有一定的耐磨性和耐低温性, 被广泛应用于航空航天、船舶结构和车辆工程等领域^[1-2],

近年来世界各国关注于温室效应等问题, 节能减排是重中之重。轻量化铝合金可以降低能源消耗, 减少排放, 使用比例也越来越高^[3]。随着时代的发展, 工业与生活中使用的工件趋于大型化和复杂化, 这些工件难以一次成形, 因此工程应用上常采用焊接

等连接工艺来进行结构拼装。钨极氩弧焊因操作简单、焊接工艺灵活、焊缝质量高,经常用于铝及铝合金的焊接。在焊接中焊缝的好坏直接影响着工件的使用寿命,关乎整个器械的性能,因此,焊接工艺优化、焊接质量检测手段、焊接缺陷修复等工程化问题得到了大量研究^[4-7]。铝合金本身有导热性强、线膨胀系数大的特性^[8],在焊接铝合金时,焊后焊缝冷却速度快,容易导致焊缝内气体未能及时溢出而产生气孔^[9]。同时,铝合金焊接接头的快速凝固容易引发应力集中现象,从而产生热裂纹等焊接性问题^[10],导致工件整体性能下降,很大程度上限制了在工业领域的应用。为了解决 7075 焊接问题,很多学者做了大量研究,何柔月等人^[11]在 Al-5Mg-1Zn 焊丝中添加 Er 元素,发现焊接后生成的 Al₃Er 粒子作为有效的非均质形核剂,同时 Al₃Er 粒子与亚晶界和位错相互作用可强化焊接接头;胡清华等人^[12]通过正交试验法在 Al-5Mg 焊丝中添加微米 SiC 颗粒的 TIG 焊接工艺,发现在合适的焊接工艺下可以保持颗粒的分散和抑制中间相的析出,从而提高焊接接头的综合性能;王

磊等人^[13]使用激光焊对 7A52 铝合金中厚板进行焊接,焊接抗拉强度达到 325 MPa。在 Al-Zn-Mg-Cu 合金内添加纳米 TiC 颗粒,之后通过拉拔制备为焊丝,使用钨极氩弧焊对 7075 板材进行焊接。通过正交试验法进行试验,对不同工艺焊接后的板材制备焊缝试样,利用万能拉伸试验机、光学显微镜(optical microscope, OM)及场发射扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)等设备,对焊道的性能及微观形貌进行观察,并探究其合适的焊接工艺。

1 材料及设备

试验母材为 7075-T651,购买于西南铝业,其抗拉强度为(560±13) MPa,焊接板材的尺寸为 150.0 mm×75.0 mm×4.0 mm。焊接设备采用唐山松下公司生产的 Panasonic YA-1 UAR61 型工业机器人手臂和 Panasonic YC-500WX-N 型 TIG 焊机来移动焊枪和调节焊接参数。试验过程中使用的填充材料为上海龙烁焊材有限公司提供的纳米 TiC 复合材料焊丝,焊丝和母材的化学成分见表 1,填充材料的微观形貌如图 1 所示。

表 1 焊丝与母材的成分(质量分数,%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	TiC	Al
焊丝	—	—	1.7	—	2.3	—	6.1	—	2.0	余量
7075-T651	<0.4	<0.5	1.2~2.0	<0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	~0.2	—	余量

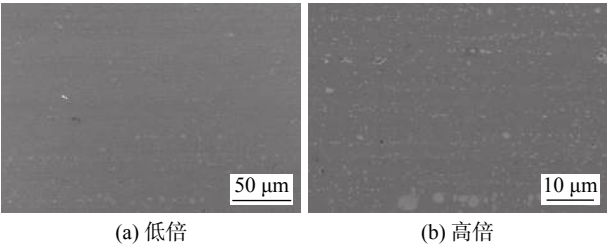


图 1 纳米 TiC 颗粒 7075 复合焊丝

2 试验方法

试验采用全数字 TIG 焊机,焊接方式为平板对接焊,焊接坡口类型为 I 型,对接间隙为 1 mm,喷嘴与工件之间的距离为 13 mm。焊接接头拉伸试验采用国家标准 GB/T 228.1—2010 进行测试,测试仪器为日本岛津公司 AG-I 50 KN 万能试验机,使用线切割切取焊接工件,每个工件取 3 个试样,在拉伸测试后取平均值;焊缝显微组织观察和分析使用 LEICA

DMi8A 光学金相显微镜;获得金相照片后使用 Photoshop 软件进行焊缝拼接,然后使用 Image-Pro Plus 测量焊缝气孔率;试样微观形貌分析和能谱分析使用日本的 JSM4800 场发射扫描电镜和配套的能谱仪。

3 结果与讨论

3.1 焊接工艺对焊缝力学性能的影响

试验采用正交试验法中的 L9(3³) 模型进行试验,以焊接脉冲电流、脉冲频率、焊接速度作为不同的测试因素,每个因素设置 3 个变量,以焊缝抗拉强度作为试验的响应值。试验固定焊接脉冲基值电流为 160 A,占空比 60%,焊接方式为钨极交流脉冲氩弧焊。其它试验参数以及试验结果见表 2,其中 $k_n(n=1\sim3)$ 为每个测试因素所在列的第 n 个变量所对应的抗拉强度的均值, R 为 k_n 3 个均值的极差,拉伸试验后制取其它试样测量焊缝气孔率。

图 2 为平均抗拉强度和气孔率随不同因素的变

表2 正交试验设计的直观分析

工艺 序号	脉冲电流 I/A	脉冲频率 f/Hz	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	抗拉强度 R_m/MPa	气孔率 $P(\%)$
1	180	2	1	269.22	0.47
2	180	20	2	312.21	0.55
3	180	100	3	325.45	0.06
4	200	2	2	299.82	0.04
5	200	20	3	300.46	0.11
6	200	100	1	286.09	0.57
7	220	2	3	267.12	0.09
8	220	20	1	264.85	0.95
9	220	100	2	280.68	0.82
k_1	302.29	278.72	273.39	—	—
k_2	295.46	292.51	297.57	—	—
k_3	270.88	297.41	297.68	—	—
R	31.41	18.69	24.29	—	—

化趋势,分析可知焊接接头的抗拉强度随着脉冲电流增加而下降,其中 200~220 A 的抗拉强度下降幅度更为明显,脉冲电流增大后焊接热输入也随之增加,可能导致焊缝中合金元素烧损,同时焊接熔池增大,金属凝固时间延长导致晶粒粗大,从而导致焊缝的力学性能下降;随着脉冲频率增加,焊接接头的强度略有提升,其中 2~20 Hz 的强度提升更为明显;焊接速度增加对焊接接头力学性能有一定影响,随着焊接速度增加,焊接接头抗拉性能逐渐提高,但是当焊接脉冲电流为 180 A、焊接速度为 3 mm/s 时容易出现未焊透的情况,实际为焊接热输入不足,难以焊透。

焊接热输入计算公式为

$$Q = \eta \frac{UI}{v} \quad (1)$$

式中: η 为焊接热效率系数; U 为焊接平均电压; I 为焊接平均电流; v 为焊接速度。降低焊接脉冲电流和提高焊接速度表现为降低焊接的热输入,在保证焊透的条件下,更低的热输入可以降低焊接对母材的影响,从而提高焊接性能。

由表2数据分析极差,脉冲电流、脉冲频率和焊接速度的抗拉强度极差分别为 31.41, 18.69 和 24.29,测试因素对抗拉强度的影响从大到小排序分别为脉冲电流、焊接速度、脉冲频率。采用统计学原理的分析方法,以焊接接头的抗拉强度作为响应值,对焊接工艺的脉冲电流、脉冲频率和焊接速度进行统计分析,根据统计学计算各个因素对焊接接头的抗拉强度,并进行分析,确定各个工艺参数对抗拉强度的影响程度,计算式为

$$F = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k}{\sum (y_j - \hat{y}_i)^2 / (n - k - 1)} \sim F(n - k - 1) \quad (2)$$

式中: F 为因素显著性水平比; n 为样本量; k 为模型自变量; y_j 为应变量; $\hat{y}_i$ 为估计值; $\bar{y}$ 为样本平均值; $\sim$ 为近似服从。根据式(2)计算所得各个工艺因素对抗拉强度的因素显著性水平比见表3,试验采用置信区间为 90%, F 临界值为 4.05。

由统计学计算可知,脉冲电流和焊接速度的 F 值分别为 6.09 和 4.37 均大于 F 临界值,说明脉冲电流和焊接速度对抗拉强度的影响更为显著,而焊接脉

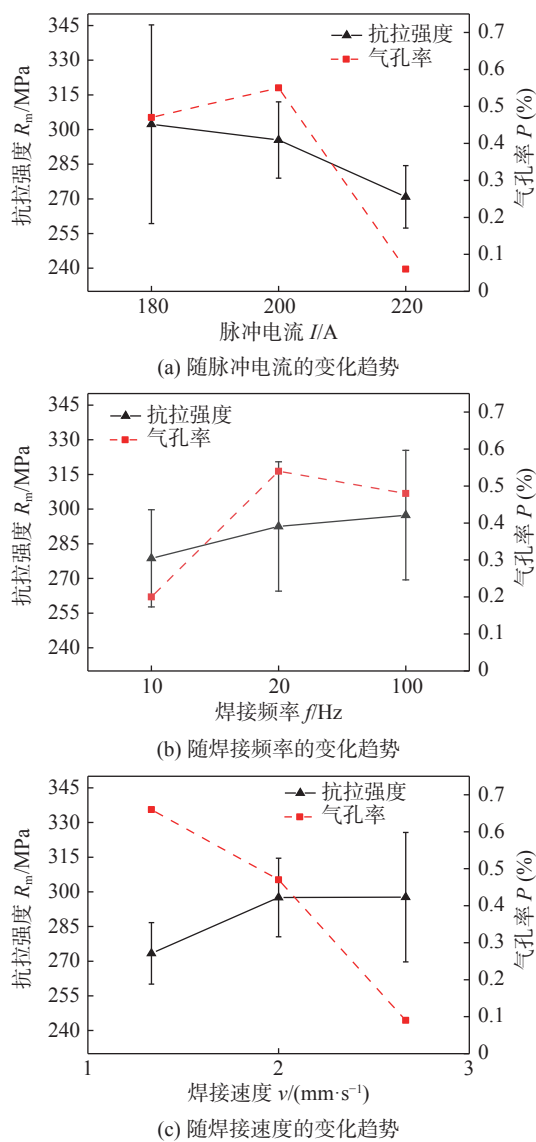


图2 工艺参数对焊缝抗拉强度和焊缝气孔率的影响

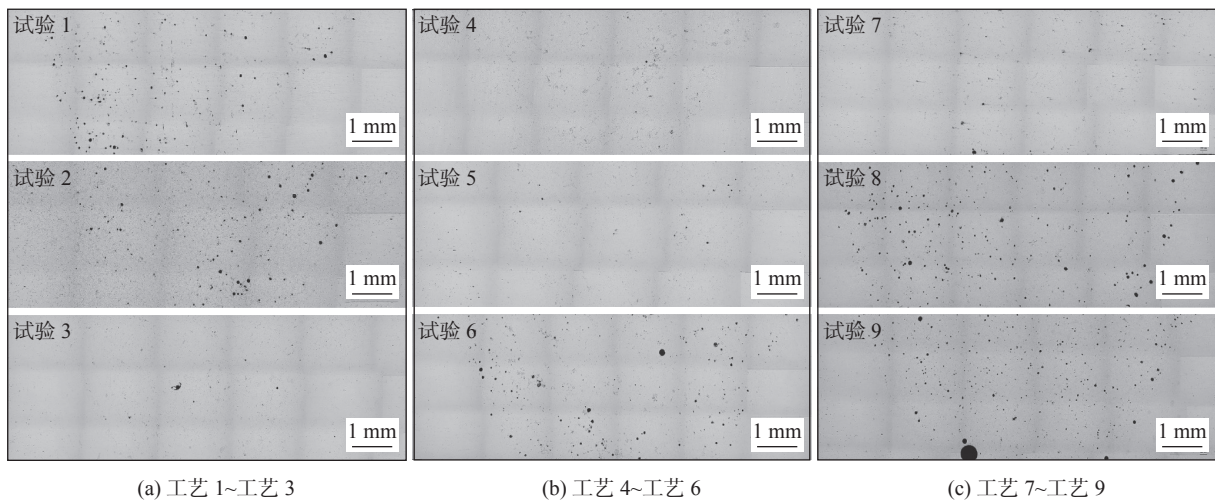


图3 不同焊接工艺焊缝气孔形貌

表3 各因素 F 对抗拉强度的值

工艺因素	F	F 临界值
脉冲电流	6.09	4.05
脉冲频率	2.10	4.05
焊接速度	4.37	4.05

冲频率 F 值为 2.10 小于 F 临界值, 脉冲频率对抗拉强度的影响不显著。由统计学原理归纳可得纳米 TiC 颗粒焊丝焊接材料的焊接最佳工艺应该为脉冲电流 180 A, 焊接速度 3 mm/s, 结合抗拉强度选择脉冲频率为 100 Hz。

3.2 焊接工艺对焊缝气孔的影响

图 3 为不同焊接工艺试样未进行腐蚀的金相形貌, 随着热输入的增大, 焊缝宽度也逐渐增大, 由图 3 可见焊缝中心孔隙率大小趋势为 1 mm/s > 2 mm/s > 3 mm/s。之后使用 Image-Pro Plus 计算多个试样的孔隙率取其平均值, 计算结果见表 2, 结合图表可知, 脉冲电流对焊接气孔也有一定影响, 对于纳米 TiC 复合焊丝焊接 7075 板材而言, 降低焊接脉冲电流可以减少焊缝中的气孔数量。而焊接速度对焊缝气孔率的影响十分明显, 当焊接速度为 1 mm/s 时, 焊缝气孔率平均为 0.66%; 焊接速度为 2 mm/s 时, 焊缝气孔率平均为 0.47%; 当焊接速度为 3 mm/s 时, 焊缝的平均气孔率为 0.09%。可见提高焊接速度能显著降低纳米 TiC 复合焊丝焊接 7075 板材的焊缝气孔率。

为了探究纳米颗粒复合焊丝的焊接工艺对焊接气孔的影响机理, 对焊缝中心组织进行了 SEM 分析,

图4为8号和9号焊接工艺的气孔微观形貌,焊接速度分别为1和2 mm/s,图4中可以观察到纳米TiC颗粒大量分布于气孔周围,且部分颗粒发生团聚。在低速焊接的情况下,焊缝与热影响区温度梯度小,冷却速度慢,纳米颗粒在熔融焊缝中受到脉冲电流的震动作用发生团聚。当熔池开始冷却结晶时,液体金属中的过饱和氢将析出,而纳米陶瓷颗粒表面为氢气泡的非自发形核提供了条件。陶瓷颗粒表面的氢气泡不断汇集与合并,在冷却时纳米颗粒又阻碍了氢气泡的上浮,最终导致焊缝气孔的出现。在高速焊接的情况下,焊丝中的纳米TiC进入熔池后很快凝固,脉冲电流的持续推挤作用降低,可以更好与基体金属结合,强化焊接接头。

3.3 焊接工艺对显微组织的影响

焊接试验的断裂区域均为焊缝中心,所以仅对焊缝的中心组织进行观察与分析。由图5可知脉冲频率对焊缝中心析出相形貌的影响较小,而脉冲电流

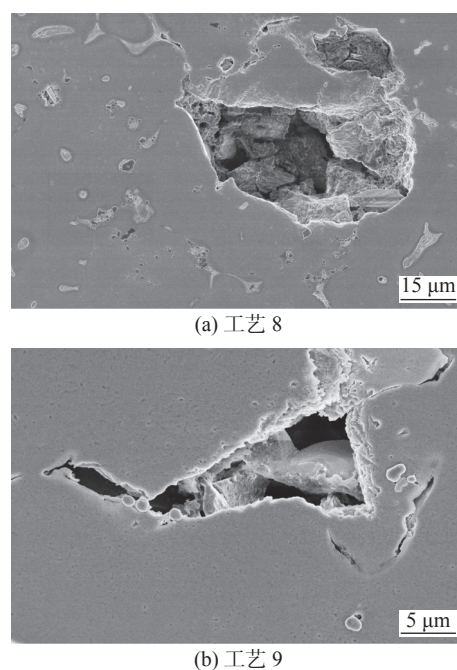


图4 焊缝中心气孔微观形貌

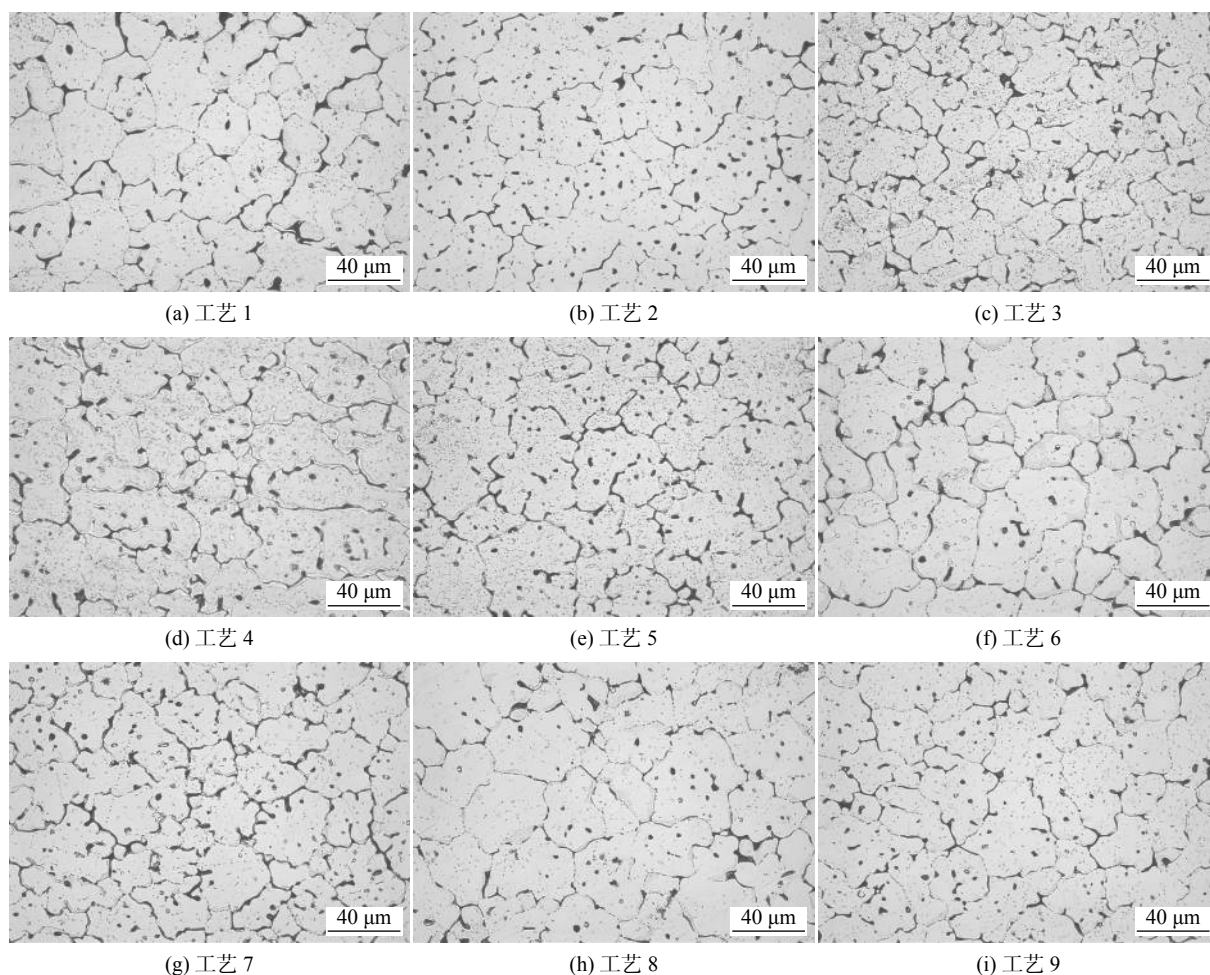


图5 不同工艺焊缝中心金相组织

和焊接速度对其影响较大,随着脉冲电流的升高以及焊接速度的下降,焊缝晶粒内的析出相逐渐长大,基本上呈点状分布于晶粒内部。

图6为不同焊接工艺在偏光下的金相显微组织,

图7为不同焊接速度下的焊缝平均晶粒尺寸,从图中可以观察到随着热输入量的增加,焊缝内部晶粒尺寸逐渐增大,其中以8号工艺的晶粒尺寸最大,3号工艺晶粒最小,焊缝中心多为等轴晶粒。当脉冲电

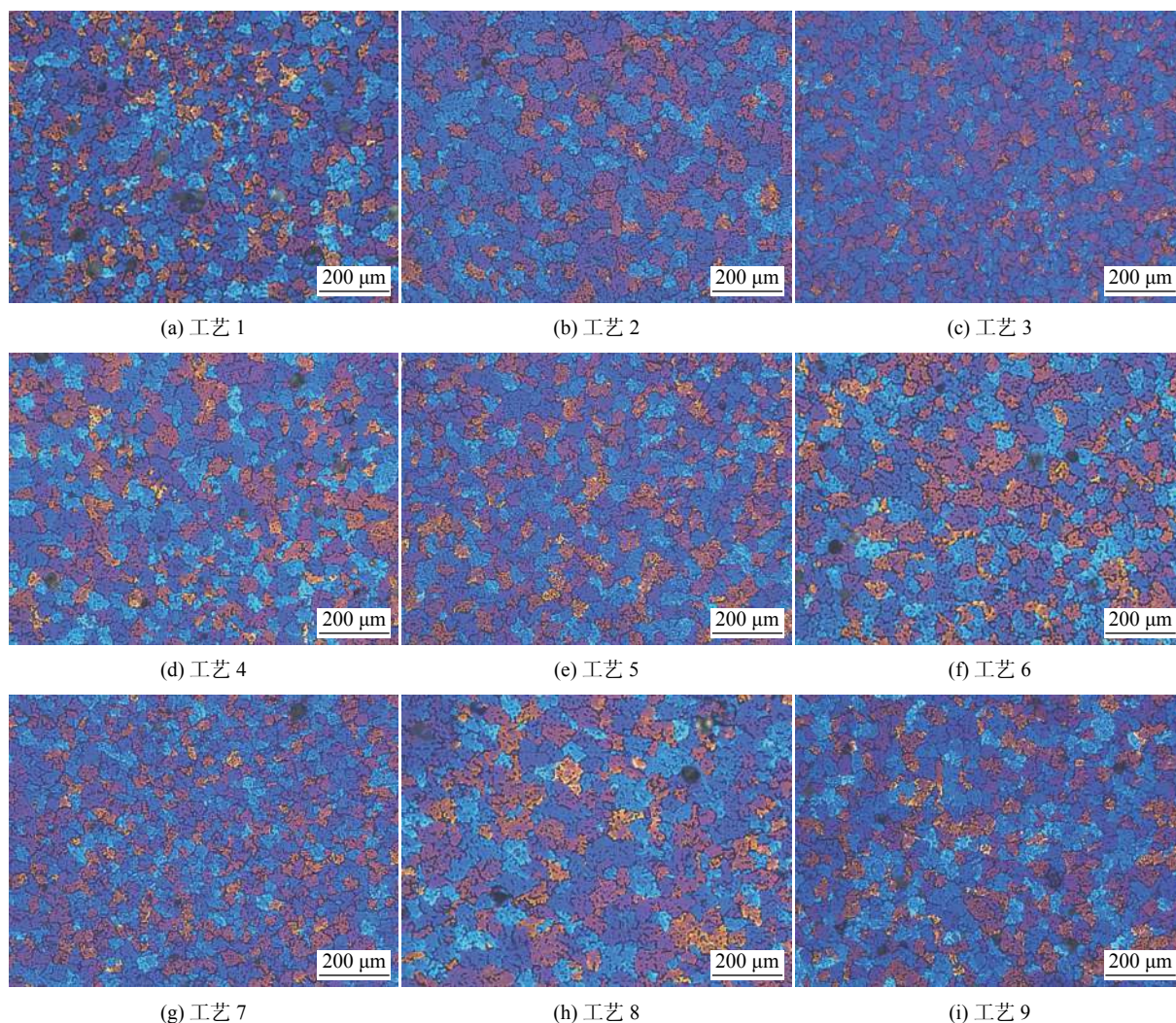


图6 不同工艺焊缝在偏光下的金相显微组织

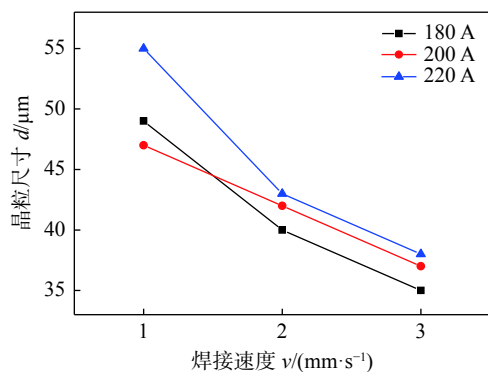


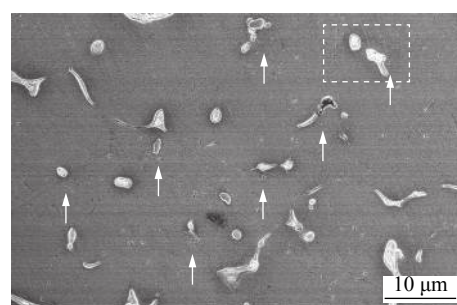
图7 不同焊接速度下的焊缝平均晶粒尺寸

流为 200 ~ 220 A、焊接速度为 1 ~ 2 mm/s 时,晶内粗大的析出相增多,细小的析出相减少,这是由于焊接热输入过大,焊缝中心的温度升高,在焊接冷却时, α -Al 首先在液相中开始形核并长大,当温度继续降低时其它元素在 α -Al 中呈过饱和状态,但是由于焊接速度较慢,正在进行焊接区域的温度继续传递到冷却区,导致冷却缓慢,析出相开始形核且有足够的时间长大;而在较低的焊接电流和较快的焊接速度下, α -Al 晶粒形成后冷却迅速,析出相形核来不及长大,所以析出相的形貌较为细小;同时在较慢的焊接速

度下, TiC 颗粒容易发生团聚, 团聚的颗粒对晶界的钉扎作用会降低, 进一步导致焊缝中心晶粒粗大。

在金相显微镜中难以观察到纳米 TiC 颗粒, 无法判断其分布及形貌, 图 8 对工艺 3 焊缝中心使用扫描电镜进行观察, 图 8a 为 3 号焊接工艺焊缝中心 SEM 图像, 图 8b 为图 8a 的局部放大图, 其中箭头指为纳米颗粒在焊缝中的分布, 在图中纳米颗粒团聚较少, 与基体材料结合良好, 同时可以观察到部分纳米颗粒分布于析出相旁, 抑制了析出相的长大且改变了析出相的形貌。

图 9 为各个工艺的焊缝中心组织的 SEM 图片, 结合图 6 和表 2 可知, 在较高脉冲电流以及较低的焊接速度下, 焊缝中心的析出相较为粗大, 且部分析出相呈长条状, 而长条状析出相会导致垂直于该方向的抗拉强度降低^[14]。经过能谱分析发现图 9e 中粗大的析出相 Cu 含量较高, 图 9h 中的细小析出相 Cu 含量较低, 根据刘政军等人^[15]的研究, 在 7 系铝合金焊



(a) 焊缝中心 SEM 形貌



(b) 图 8a 局部放大

图 8 工艺 3 焊缝中心 SEM 形貌

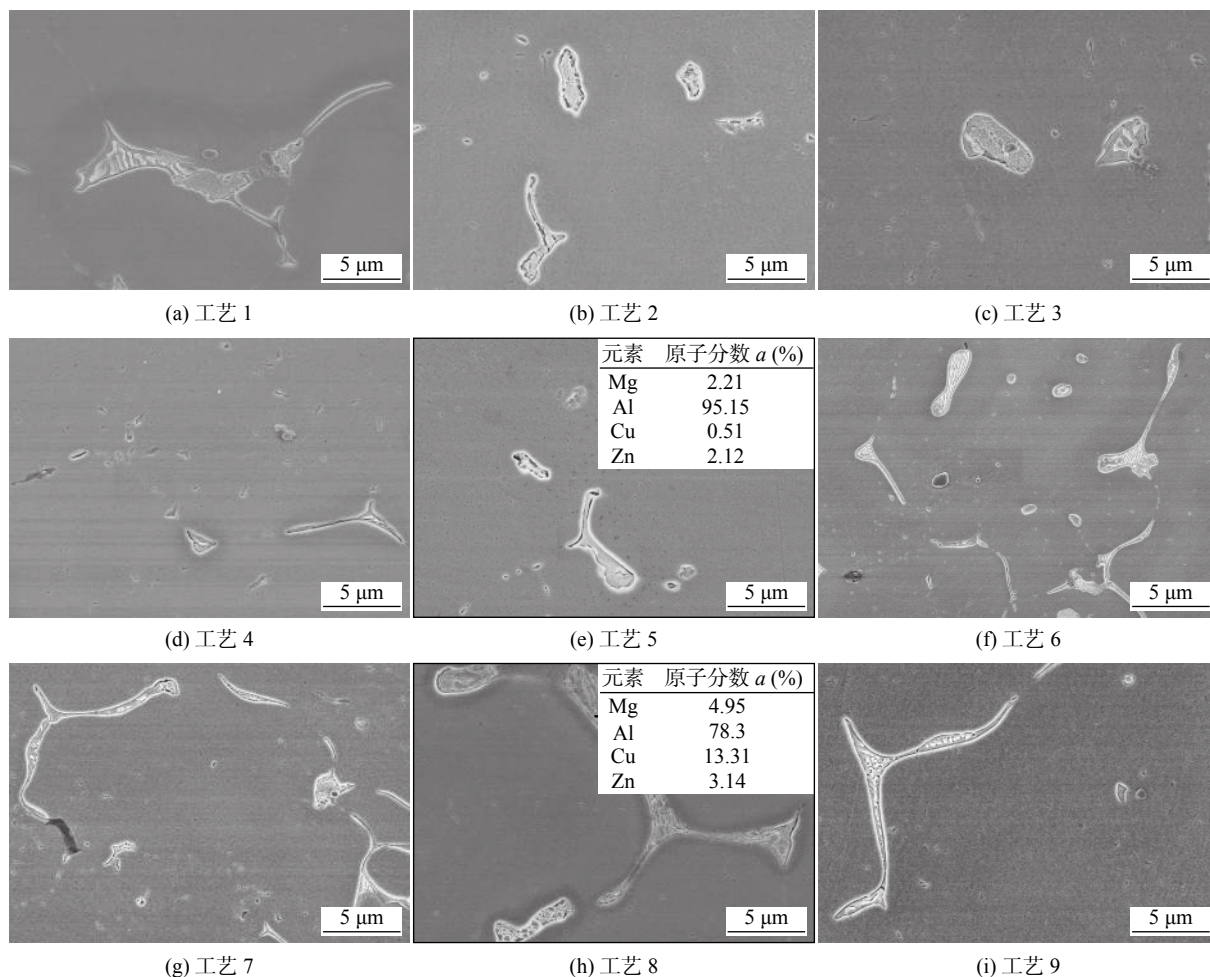


图 9 不同工艺焊缝中心 SEM 形貌

接中, 基体中的 Cu 含量降低会导致基体强度下降, 细小析出相可以抑制焊接产生的结晶裂纹。所以纳米 TiC 复合焊丝中的纳米颗粒在焊缝中心即抑制了析出相的长大, 又对 7075 铝合金的焊接裂纹起着抑制作用。

4 结论

(1) 在最佳焊接工艺下, 焊接接头平均抗拉强度达 325.45 MPa, 其工艺为基值电流为 160 A, 脉冲电流为 180 A, 脉冲频率为 100 Hz, 焊接速度为 3 mm/s。

(2) 当焊接脉冲电流过高和焊接速度过低时, 容易导致纳米颗粒在焊缝中聚集, 液态金属中的氢在颗粒处形核, 汇集长大形成气孔。

(3) 在合适的焊接工艺下, 纳米 TiC 颗粒在焊缝中均匀分散并与基体良好结合, 同时可以抑制晶内析出相尺寸, 提高焊接接头的强度。

参考文献

- [1] 林钢, 林慧国, 赵玉涛. 铝合金应用手册(精)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] Duan Z J, Li C H, Ding W F, et al. Milling force model for aviation aluminum alloy: academic insight and perspective analysis[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1): 54 – 88.
- [3] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 68 – 75.
- [4] Wang G Q, Li Q, Li Y J, et al. Effects of weld reinforcement on tensile behavior and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy TIG welded joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(1): 10 – 16.
- [5] Li Q, Wu A P, Li Y J, et al. Segregation in fusion weld of 2219 aluminum alloy and its influence on mechanical properties of weld[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(2): 258 – 271.
- [6] Li H, Zou J, Yao J, et al. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017(727): 531 – 539.
- [7] 吴雁, 李朝阳, 郭立新, 等. 焊接工艺参数对铝/铝激光焊焊缝形貌及力学性能的影响[J]. *焊接*, 2021(12): 27 – 30.
- [8] 刘政军, 刘继伟, 苏允海, 等. Mg/Al固相连接接头扩散界面区的显微组织[J]. *沈阳工业大学学报*, 2015, 37(4): 377 – 381.
- [9] 黎硕, 王军, 杨上陆, 等. 铝合金激光-MIG复合焊接气孔缺陷研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(6): 595 – 600.
- [10] 罗建. 高速列车车体A6N01铝合金焊接裂纹原因分析[J]. *铸造技术*, 2015, 36(1): 204 – 205.
- [11] 何柔月, 黄启波, 崔洪波, 等. 含微量铟元素Al-5.5Mg-1Zn焊丝焊接7075铝合金TIG焊缝的组织与性能[J]. *材料导报*, 2020, 34(18): 18125 – 18130.
- [12] 胡清华, 张义福, 熊斯, 等. SiCp/Al-5Mg复合焊丝焊接7075铝合金TIG焊接工艺及接头组织性能分析[J]. *稀有金属*, 2019, 43(10): 1023 – 1031.
- [13] 王磊, 许雪宗, 王克鸿, 等. 中厚板7A52铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2020, 41(10): 28 – 31, 37.
- [14] Sokoluk M, Cao C, Pan S, et al. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 98.
- [15] 刘政军, 刘继国, 苏允海. Al-Cu-Mg硬铝合金TIG焊焊接接头的组织与力学性能[J]. *沈阳工业大学学报*, 2015, 37(6): 629 – 633.

第一作者: 聂志坚, 硕士研究生; 主要从事铝合金焊丝制备及焊接性能研究; nzjwyy@163.com。

通信作者: 唐鑫, 教授, 博士研究生导师; xtang@glut.edu.cn。

(编辑: 刘启明)

本文引用格式:

聂志坚, 秦颐鸣, 龙金海, 等. 纳米 TiC 复合焊丝和 7075 铝合金的脉冲 TIG 焊组织和性能及工艺优化[J]. *焊接*, 2023(4): 29 – 36.
Nie Zhijian, Qin Yiming, Long Jinhai, et al. Microstructures performance and welding process of pulse TIG welded 7075 aluminum joints prepared with nano TiC aluminum matrix composite filler[J]. *Welding & Joining*, 2023(4): 29 – 36.