

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.004

超薄镍基合金 P-MPAW 焊缝成形特征 及微观组织演变

吴鑫, 何建萍, 王 龙

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:为了获得成形良好的超薄镍基合金焊接接头及其细化的微观组织,课题组基于恒定的平均电流,设计不同脉冲电流参数,采用脉冲微束等离子弧焊(P-MPAW)对100 μm厚的镍基高温合金板材进行焊接实验。然后借助超景深显微镜对焊缝的宏观形貌及微观组织进行观察,分析脉冲参数下焊缝成形特征,并采用直线截点法计算焊缝中心的平均晶粒尺寸。结果表明:不同脉冲参数匹配下形成5种焊缝形貌,随着基值电流和脉冲频率的增加,焊缝熔池趋于连续均匀变化趋势。当基值电流为0.8 A、占空比为30%以及脉冲频率为100 Hz时,焊缝中心的平均晶粒尺寸最小。因此,脉冲微束等离子弧焊下,较小的占空比和基值电流以及较大频率的脉冲参数匹配,可获得成形良好且晶粒细化的焊缝。

关 键 词:脉冲微束等离子弧焊;超薄镍基合金;焊缝成形;微观组织;直线截点法

中图分类号: TG456.2; TH131.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2020)05-0019-05

Forming Characteristics and Microstructure Evolution of Ultra-Thin Nickel Base Alloys Welds by P-MPAW

WU Xin, HE Jianping, WANG Long

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to obtain the well-formed ultra-thin nickel base alloy welded joints and their fine microstructure, different pulse current parameters were designed based on a constant average current. The welding experiment of nickel base superalloy plate with thickness of 100 μm was carried out by pulse micro plasma arc welding (P-MPAW). The macroscopic morphology and microstructure of the weld joint were observed with the help of the super depth of field microscope (SDFM), the weld forming characteristics under the pulse parameters were analyzed. The average grain size of the weld joint center was calculated by the straight-line method. The results show that the five kinds of weld joints are formed under different pulse parameters, and the weld pool tends to change continuously and uniformly with the increase of the base current and pulse frequency. When the pulse current parameter is 0.8 A, the duty cycle is 30% and the pulse frequency is 100 Hz, the average grain size of the weld center is the smallest. Therefore, a well-formed and fine-grained weld joint can be obtained with a smaller duty cycle and base current and a larger frequency of pulse parameters under P-MPAW.

Keywords: microplasma arc welding with pulsed current; ultra-thin nickel base alloy; weld forming; microstructure; straight-line method

镍基合金是21世纪最重要的工程材料之一,因其具有卓越的高温性能和耐腐蚀性能,已被广泛应用于

航空航天、石油化工和核电等领域^[1-2]。焊接镍基合金时,其热导率小,熔池流动性差,有较大过热倾向,热输

收稿日期:2020-01-08;修回日期:2020-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775327);上海市科委基础研究重点项目(14JC1402700)。

第一作者简介:吴鑫(1993),男,河南项城人,硕士研究生,主要研究方向为超薄镍基高温合金的脉冲微束等离子弧焊。通信作者:何建萍(1964),女,上海人,博士,教授,主要研究方向为精密焊接过程的机电光焊一体化复杂系统的智能化控制。E-mail: janejphe@sues.edu.cn

入过高容易导致焊缝晶粒粗大产生焊接热裂纹。为了获得具有优异性能的焊缝微观组织,国内外学者做了许多研究。

Geng 等^[3]在数值模拟的支持下,研究了线性摩擦焊接工艺参数对接头组织和力学性能的影响,建立了模型化的晶粒尺寸方程。Kuo 等^[4]采用脉冲和连续激光焊接方法对 Inconel690 合金进行焊接,发现选择合适的激光峰值功率,在提高焊缝力学性能的同时还能改善焊缝表面粗糙度。沈利霞^[5]采用光纤激光器对 GH3030 进行焊接,研究了焊接接头的宏观形貌和微观组织,表明了焊接热输入大小决定了焊缝形貌。王涛等^[6]研究了脉冲 TIG 焊接工艺参数对 Inconel601H 合金焊缝晶粒大小的影响,表明合适的焊接参数可以改善焊缝晶粒粗大的问题。张晓鸿等^[7]研究了脉冲 TIG 焊接工艺参数对镍基高温合金焊缝组织的调控,发现不同工艺参数对焊缝晶粒大小和典型相的分布调控效果明显。叶欣等^[8]研究了不同热输入对 3 种不同状态母材的焊缝热影响区的晶粒结构及大小的影响。

微束等离子弧焊具有焊接速度快、焊缝窄、热影响区小及焊接变形小等特点^[9-10],有利于超薄板材的焊接。在加脉冲电流的情况下,其工艺参数可调性好,从而能够更精细地控制热输入;同时对熔池有搅拌作用,有助于熔池排出有害气体,细化焊缝晶粒^[11-12]。因此课题组采用脉冲微束等离子弧焊(P-MPAW)对超薄镍基合金进行焊接实验,研究工艺参数对焊缝微观组织的影响。

1 试验方法

试验材料选用 Inconel 718 镍基合金超薄板进行对接焊接,试样尺寸为 80 mm × 50 mm × 0.1 mm。母材成分如表 1 所示。焊接试验中所用焊机为法国沙福焊机,纯氩气作为离子气和保护气。焊枪结构参数为:钨棒直径 1.0 mm,喷嘴孔径 1.0 mm,钨棒内缩 2.0 mm。工件装配参数为压板间距 3.0 mm。焊接工艺参数为:离子气和保护气流量分别为 0.5 L/min 和 6.0 L/min,焊距高度 1.0 mm,焊接速度 4.2 mm/s。

表 1 Inconel-718 化学成分

Table 1 Chemical composition of Inconel-718 %				
Ni	Cr	Fe	Nb	Mo
53.14	18.77	17.50	5.25	3.18
Ti	Al	Co	其它	
0.94	0.56	0.23	余量	

为了研究不同脉冲参数下焊缝微观组织的特征,

本实验设置 13 组脉冲电流参数,并保证每组脉冲参数的平均电流为 2.0 A。平均电流公式为

$$\bar{I} = \frac{I_p \times T_p + I_b \times T_b}{T} \quad (1)$$

式中: $\bar{I}$ 是平均电流; I_p 和 I_b 分别是峰值电流和基值电流; T_p 和 T_b 则分别是峰值电流持续时间和基值电流持续时间; T 为脉冲周期。

根据式(1)可计算得到峰值电流。焊接脉冲参数如表 2 所示。

表 2 脉冲电流参数

Table 2 Pulse current parameters

占空比/%	基值电流 I_b /A	峰值电流 I_p /A	脉冲频率 f /Hz
30	0.80	4.80	1, 5, 25, 100
30	1.20	3.86	1, 5, 25, 100
30	1.60	2.92	1, 5, 25, 100
70	0.80	2.52	100

焊前对板材砂纸打磨,用丙酮清洗,以去除合金表面氧化层及油污。焊后沿垂直焊缝方向取样,对样品进行镶嵌、磨抛和金相腐蚀。腐蚀剂组成为 CuCl_2 (0.5 g) + HCL (10 ml) + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (10 ml)。用光学显微镜对焊缝宏观形貌及微观组织进行观察,通过 3 次重复试验,用直线截点法测定焊缝平均晶粒直径。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝形貌特征

本焊接试验是基于脉冲电流参数的平均电流为 2.0 A 进行的,即各组脉冲电流参数下,一个脉冲周期中的平均热输入相同。焊接时,脉冲电流参数的不同,使得一个脉冲周期行程里的各点的焊接热输入不同,从而产生不同的焊缝形貌。

如图 1 所示,不同脉冲参数下,出现了 5 种焊缝形貌,图 1(a) 为熔池不连续焊缝,熔池呈椭圆形,相邻熔池间未融化区域是基值电流作用位置;图 1(b) 为熔池连续且宽度不一致焊缝,主要是基值电流的升高,使得焊缝熔化;图 1(c) 为熔池重熔焊缝,峰值电流作用位置的熔池发生了重叠,且重熔的长度小于半个熔池长度;图 1(d) 为鱼鳞状熔池焊缝,相邻峰值电流作用位置熔池重叠长度大于半个熔池长度;图 1(e) 为熔池连续均匀的焊缝。

2.2 脉冲参数对焊缝形貌的影响

如图 2 所示是占空比为 30% 下的焊缝成形情况。用数字序号 I、II、III、IV 和 V 代表图中红、橙、黄、绿和蓝,分别表示图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)、图 1(d) 和图 1(e) 中的 5 种形貌。从图中可以看出,频率为 1 Hz

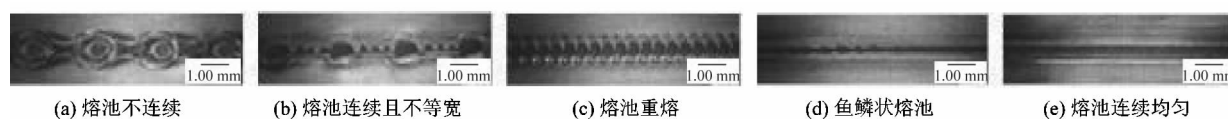


图1 5种焊缝形貌

Figure 1 Five kinds of weld appearance

时,随着基值电流增大,焊缝形貌从图1(a)变化到图1(b),这是因为基值电流的增大使其作用位置的母材温度达到熔点;基值电流为0.8 A时,随着脉冲频率的增大,焊缝形貌的变化过程为:图1(a)→图1(c)→图1(d)→图1(e)。这是因为脉冲频率的增大使得相邻两个峰值电流作用位置越来越近,从而使相邻熔池越来越近。

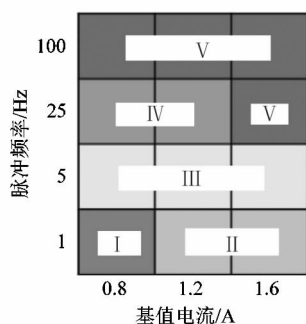


图2 占空比为30%的焊接成形

Figure 2 Weld forming with 30% duty cycle

从图2可知,脉冲频率对焊缝形貌的影响较大。随着脉冲频率的增大,相邻峰值电流作用下的熔池逐渐靠近,焊缝形貌从熔池不连续到重熔,最后到熔池连续均匀。基值电流对焊缝形貌的影响是有限的,只在脉冲频率为1 Hz和25 Hz时焊缝形貌发生了变化。2者的区别为:在基值电流同为0.8 A时,脉冲频率为25 Hz工况下的焊缝形貌为鱼鳞状,好于脉冲频率为1 Hz工况下的焊缝形貌;当基值电流增大到足以使上一个峰值电流作用下的熔池保持熔化状态直到下一个峰值电流的出现,脉冲频率为25 Hz工况下的焊缝形貌实现了从鱼鳞状到连续均匀的过渡。

2.3 脉冲参数下的微观组织变化

Inconel-718 镍基高温合金母材的微观组织如图3所示。从图中可见母材基体为奥氏体,有部分孪晶,经计算,晶粒平均直径约为9.10 μm 。

2.3.1 脉冲频率对焊缝微观组织的影响

图4为占空比30%、基值电流0.8 A,脉冲频率分别为0, 5, 25和100 Hz下的焊缝中心的微观组织。

如图4(a)所示,脉冲频率为0 Hz,即恒定电流;此时焊缝中心有较多的柱状枝晶和少量等轴晶,枝晶的

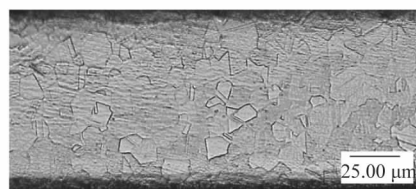


图3 母材显微组织

Figure 3 Base metal microstructure

生长方向,从焊缝熔池的底部和焊缝的两侧向着熔池表面的热源集中的位置生长。图4(b)到图4(d),随着脉冲频率的增加,出现越来越多的等轴晶,而且晶粒的大小变化和分布均有一定规律。在焊缝中,从熔合线到焊缝中心液态金属的凝固方式有所不同,这与生长速度和温度梯度密切相关,焊缝中心均分布着大量的等轴晶,这是因为从熔化边界到焊缝中心,温度梯度与生长速度的比值逐渐降低。

采用直线截点法测得图4(a)~图4(d)的平均晶粒直径分别为8.03, 7.17, 7.52和5.89 μm 。由上述可知:①焊缝中心区晶粒尺寸均小于母材的平均晶粒直径(9.10 μm),这是因为微束等离子弧焊的快速加热和快速冷却的焊接特点,使得焊缝晶粒细化;②脉冲电流作用下的焊缝中心的晶粒尺寸均小于直流焊接下的晶粒尺寸,这是因为脉冲电弧焊接过程中的基值电流作用阶段,热输入突然减小导致液态金属过冷,使得形核率增加,进而实现晶粒的细化;③当脉冲频率为25 Hz时,平均晶粒直径出现小幅度增大,这是因为频率的增大,基值电流和峰值电流交替作用持续时间减小,导致焊缝金属加热速度和冷却速度减小,这将有利于熔池中晶粒的长大;当脉冲频率增大到100 Hz时,平均晶粒直径又出现了大幅度减小,原因是脉冲频率的继续增大会使焊缝金属加热速度和冷却速度进一步减小,使得晶粒有长大的趋势,但是在更高的脉冲频率下,脉冲电弧对熔池具有强烈的搅拌作用,使原本长大晶粒破碎,形成新的形核质点,达到细化晶粒的作用。

由上分析可知,脉冲频率对焊缝微观组织晶粒的细化作用是很明显的。随着脉冲频率的增加,焊缝中心晶粒的尺寸整体呈现出越来越小的变化趋势。然而,可能存在一个较小的频率范围,使得晶粒的尺寸有

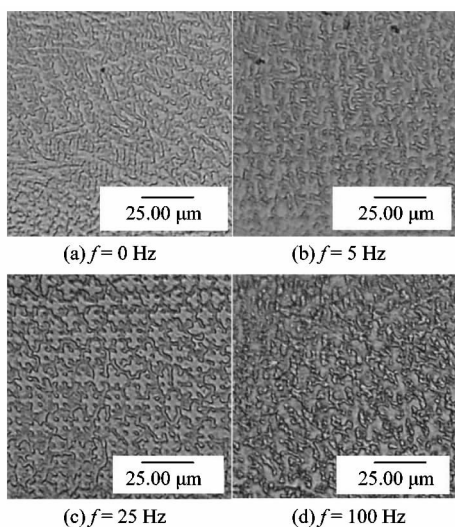


图4 不同脉冲频率下的组织
Figure 4 Microstructure at different pulse frequencies

变大的趋势,例如,脉冲频率为25 Hz左右。

2.3.2 基值电流对焊缝微观组织的影响

图5所示为占空比30%、脉冲频率100 Hz时,不同基值电流的焊缝中心的微观组织。为了便于比较,可以把图4(d)与图5放到一起讨论。

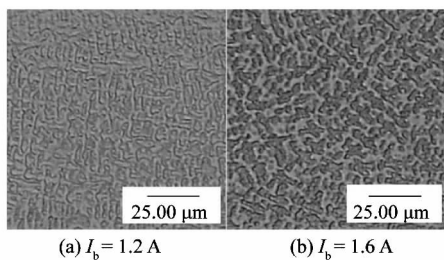


图5 不同基值电流下的组织

Figure 5 Microstructure at different base currents

图4(d)、图5(a)和图5(b)分别对应基值电流0.8、1.2和1.6 A,其焊缝中心的平均晶粒直径分别为5.89、7.13和8.32 μm 。随着基值电流的增大(同时峰值电流减小),焊缝中心的平均晶粒尺寸增大,原因是:在基值电流较小(此时峰值电流比较大),即是基值电流与峰值电流差异较大时,大的峰值电流也就意味着电弧的等离子流力较大,这将对焊缝熔池产生强烈的搅拌作用,增强熔池内液态金属的对流,而熔池内液态金属的对流可以造成糊状区枝晶前端的破碎,这些破碎的晶粒在焊接电流切换到较小的基值阶段容易留存在熔池中,增加了熔池中的形核质点;同时较小的基值电流也增加了熔池的冷却速度,从而增大了过冷

度,进而增加熔池的形核率。因此,当基值电流增大(峰值电流减小)时,电弧对熔池搅拌作用的减弱以及熔池冷却速度的减小,均促进焊缝中心熔池的晶粒增大。

由上分析可知,在恒定的平均电流下,基值电流越小(峰值电流越大),即基值电流和峰值电流差异越大,越有利于晶粒的细化。

2.3.3 占空比对焊缝微观组织的影响

图6所示为占空比70%、脉冲频率100 Hz、基值电流0.8 A时的焊缝中心的微观组织。从图可见,焊缝中心分布着较多的等轴晶,等轴晶之间分布着细小的胞状晶,经测量,70%占空比下的平均晶粒直径为6.87 μm ,明显大于图4(d)的平均晶粒直径5.89 μm 。

图6与图4(d)具有相同的基值电流和脉冲频率,随着占空比的增大,焊缝中心的平均晶粒直径在增大。当占空比增大时出现:①峰值电流减小(平均电流不变),导致电流对熔池的搅拌作用减弱,使得来自糊状区碎晶粒减少;②峰值电流作用时间变长,对熔池的热输入增加,熔池在冷却结晶时,释放较多的热,容易促进晶粒的长大;③基值电流与峰值电流差异变小,导致熔池受基值电流和峰值电流下的电弧压力差减小,熔池上下震荡幅度减弱,熔池中容易形成较大的原子集团,发生均匀形核,使得晶粒偏大。

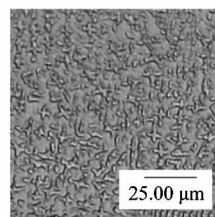


图6 70%占空比下的焊缝的微观组织
Figure 6 Microstructure of welds with 70% duty cycle

由上分析可知,在恒定的平均电流下,占空比越大,峰值电流越小(在基值电流不变的情况下),焊缝晶粒尺寸有长大的趋势。

3 结论

1) 脉冲微束等离子弧焊下,超薄镍基高温合金的焊接接头有5种典型的焊缝形貌,分别为熔池不连续焊缝、熔池连续且不等宽焊缝、熔池重熔焊缝、鱼鳞状焊缝和熔池连续均匀焊缝。基值电流和脉冲频率的增大,均促使焊缝形貌发生变化。焊缝形貌变化趋势表现为从熔池不连续→熔池重熔→熔池连续均匀焊缝。

2) 脉冲电流作用下, Inconel 718 合金的焊接接头的微观组织得到细化。基值电流为 0.8 A、占空比为 30% 和脉冲频率为 100 Hz 时, 镍 718 焊缝中心的晶粒相对较小。

3) 在保持平均电流一定的情况下, 通过对比不同脉冲参数下的金相组织, 发现基值电流和占空比的增大不利于焊缝晶粒的细化; 脉冲频率增大时, 频率在 25 Hz 左右的小范围内会出现晶粒的粗化, 除此之外, 提高脉冲频率是细化焊缝晶粒的重要手段。

4) 当恒定电流对焊缝晶粒的影响达到极限时, 保持平均电流不变的情况下, 设置脉冲电流参数, 可以实现对焊缝晶粒大小的进一步控制。

参考文献:

- [1] 谢道彪. GH4169 高温合金对接板的组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 1-4.
- [2] 王冰瑶. GH4169 镍基高温合金 MIG 焊接头组织与性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 1.
- [3] GENG Peihao, QIN Guoliang, LI Tongyi, et al. Microstructural characterization and mechanical property of GH4169 superalloy joints obtained by linear friction welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 100-114.
- [4] KUO T Y. Effects of pulsed and continuous Nd-YAG laser beam waves on welding of Inconel alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(5): 557-565.
- [5] 沈利霞. 镍基高温合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(2): 60-63.
- [6] 王涛, 郑振大, 董天顺, 等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对 Inconel601H 镍基合金焊缝晶粒大小的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 113-116.
- [7] 张晓鸿, 马朋召, 张康, 等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 93-101.
- [8] 叶欣, 华学明, 吴毅雄. 718 合金 TIG 焊热影响区组织变化[J]. 焊接学报, 2015, 36(8): 97-100.
- [9] 王昂洋, 何建萍, 王晓霞, 等. 微束等离子弧焊电弧温度场的分布特征及参数影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 77-81.
- [10] 赵家瑞, 胡绳荪, 孙栋, 等. 高频脉冲微束等离子焊接电弧行为及其工艺的研究[J]. 焊接学报, 1989, 10(4): 209-214.
- [11] MANTI R, DWIVEDI D K, AGARWAL A. Pulse TIG welding of two Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17: 667-673.
- [12] YANG Mingxuan, QI Bojin, CONG Baoqiang, et al. Effect of pulse frequency on microstructure and properties of Ti-6Al-4V by ultrahigh-frequency pulse gas tungsten arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1/2/3/4): 19-31.

(上接第 18 页)

发生。通过纤维复合材料渐进损伤的模型在 ABAQUS 中模拟碳纤维在综丝眼中的运动, 为方便研究建立了碳纤维丝束细观模型并通过试验验证了该模型的可行性; 比较了镀铜和镀铝对碳纤维丝束织造时损伤的情况, 得出结论: 开口过程中, 在综丝眼内镀铜可以有效减小碳纤维丝束的摩擦损伤。因此在综丝眼内镀铜为碳纤维织造时减少磨损和减小起毛、断经现象的发生提供了参考意见。

虽然在综丝眼内镀铜可以减小碳纤维丝束在开口时的滑动摩擦损伤, 但是在综框高速运动的过程中还无法更大程度地减小碳纤维的磨损, 还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨建恒, 侯建荣, 韩笑. 国产碳纤维织物织造工艺技术探讨[J]. 高科技纤维与应用, 2012, 37(4): 35-40.
- [2] 宋娃丽, 庞旭, 杜书亮. 碳纤维板材加固梁式桥应用研究[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(2): 85-89.
- [3] SHARMA M, GAO S I, SHARMA H, et al. Carbon fiber surfaces and composite interphases[J]. Composites Science and Technology, 2014, 102: 35-50.
- [4] 杨洁. 织造中碳纤维的摩擦磨损行为研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019: 35-46.
- [5] GALUSZYNSKI S, ELLIS P, 李楠. 纱线与综眼的摩擦力[J]. 纺织器材, 1985(5): 46-50.
- [6] GALUSZYNSKI S, 张球娣. 综眼中的摩擦力[J]. 国外纺织技术: 纺织分册, 1984(11): 38-41.
- [7] 李瑛慧, 谢春萍, 刘新金. 三原组织物拉伸力学性能有限元仿真[J]. 纺织学报, 2017, 38(11): 41-47.
- [8] 刘倩楠, 张涵, 刘新金, 等. 基于 ABAQUS 的三原组织机织物拉伸力学性能模拟[J]. 纺织学报, 2019, 40(4): 44-50.
- [9] 赵丁凡, 李晶, 陈晨, 等. 树脂基碳纤维丝束本构方程的研究[J]. 合成纤维, 2019, 48(5): 25-28.
- [10] 马燕颖. 纤维增强复合材料结构损伤的数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 13-25.