

水浴 PTIG 微变形电弧增材制造工艺

段梦伟， 彭 勇， 周 琦， 强 伟
(南京理工大学 材料成型与控制重点实验室, 南京 210094)

摘 要: 针对 TIG 电弧增材制造过程中焊件与基板变形累积的问题, 提出了水浴 PTIG 微变形电弧增材工艺. 阐述了水浴 PTIG 电弧增材工艺的原理和系统组成, 对比了水浴和空冷两种工艺条件下增材制造的熔敷速率、基板变形和成形质量. 结果表明, 水浴条件下的有效熔敷速率稳定在 144 g/h, 是空冷条件下的 2.7 倍. 水浴条件下基板平面度为 2.114, 较空冷时降低 24%. 水浴对直壁体的高度方向成形精度影响较大, 对宽度方向影响甚微, 水浴时直壁成形件的高度标准差为 2.6 mm, 低于空冷 (3.1 mm), 宽度方向均为 0.3 mm.

关键词: 水浴 PTIG; 增材制造; 熔敷速率; 基板变形; 成形精度

中图分类号: TG 444+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2018390235

0 序 言

电弧增材制造^[1-2]是基于离散、堆积的思想, 按照零件三维模型数据, 通过电弧熔化焊丝进行逐层堆焊, 制造实体零件的工艺. 相比于传统制造技术, 该工艺可以减少工序、缩短制造周期、节约原材料, 是一种新的近净成形制造方法, 对于复杂结构件的制造具有显著的优势^[3-4]. 然而, 目前电弧增材还很难达到工业级量产的精度和效率要求, 主要是由于需要时间来层间温度控制, 且热量累积会导致基板变形, 进而影响成形件的尺寸精度. 基于此背景, 文中提出了一种水浴 PTIG 微变形电弧增材方法, 可有效提高熔敷效率, 降低成形件变形, 提高成形精度.

1 水浴 PTIG 微变形电弧增材制造原理

水浴 PTIG 微变形电弧增材系统的工作原理是在增材过程中, 利用循环冷却水将基板中产生的热量及时带走, 降低基板温度, 一定程度上解决基板因受热不均产生的变形问题, 工作原理如图 1 所示. 焊枪固定在机器人上, 通过机器人编程, 使得焊枪按照预设路径熔化焊丝, 形成所需零件. 基板通过夹具固定在工作水箱中, 基板上表面与液面齐

平, 工作水箱接通冷却水箱, 通过调节冷却水箱的水流速度, 使得基板处于恒温水浴场中, 基板和工件通过与周围水流的热交换, 实时降低自身温度, 达到减小变形和提高精度的目的.

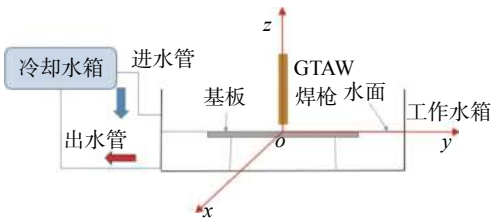


图 1 水浴增材原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of water bath additive manufacturing principle

2 试验方法

水浴 PTIG 微变形增材系统模型如图 2 所示. 试验系统主要由机器人 TIG 焊接设备和循环冷却装置两部分组成. 机器人 TIG 焊接系统包括 Yaskawa DX100 机器人、Fronius MagicWave 4000 焊机、Tbi AT420 焊枪. 循环冷却装置包括 600 mm×500 mm×150 mm 工作水箱和华泰冷却水箱.

试验以 304 不锈钢为基板, 直径 1.2 mm 的 ER-316L 不锈钢为焊丝. 基板尺寸为 500 mm×150 mm×6 mm, 试验前首先校平基板, 然后采用钢丝轮对工件表面进行机械清理, 再用酒精化学清理, 而后将其固定于工作水箱中, 使上表面恰好与液面持平, 焊丝的化学成分如表 1 所示.

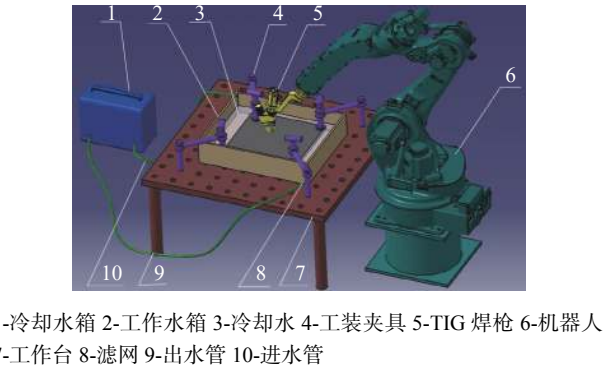


图 2 水浴增材系统三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of water bath additive manufacturing system

表 1 ER316L 不锈钢焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of ER316L stainless steel wire

C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	Fe
0.025	1.91	19.10	2.57	12.58	0.42	余量

试验对水浴 PTIG 微变形增材与常规空冷 PTIG 增材成形件进行对比. 两组试验采用同一焊接参数 (表 2), 保护气体流量为 12 L/min, 占空比为 80%. 成形件的焊接位置如图 3 所示, 熔敷 10 层金属, 熔敷长度 110 mm. 在增材过程中保持送丝方向不变, 每熔敷一层金属后, 焊枪抬升一定高度, 之后进行下一层金属的熔敷, 层间温度控制为 50 ℃.

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

脉冲电流 I_1/A	电弧电压 U/V	送丝速度 $v_s/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	脉冲频率 f/Hz	基值电流 I_2/A
140	14	1.1	15	2	28

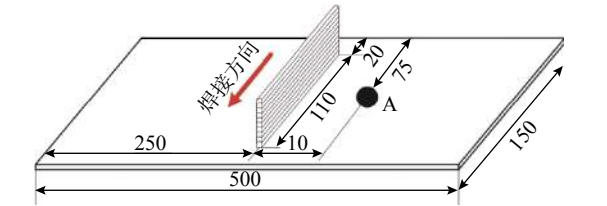


图 3 熔敷位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding position

3 试验结果与分析

3.1 熔敷速率

试验中熔敷速率 v 计算式为

$$v = \frac{\pi \rho L v_s D^2}{4(t_1 + t_2) v_f} \quad (1)$$

式中: ρ 表示焊丝的密度; L 表示单道熔敷长度; v_s 表示送丝速度; D 表示焊丝直径; v_f 表示焊接速度; t_1 表示单道熔敷时间; t_2 表示熔敷表面冷却至层间温度的时间.

试验记录每道熔敷最上表面温度冷却至层间温度 50 ℃ 的时间, 如图 4 所示.

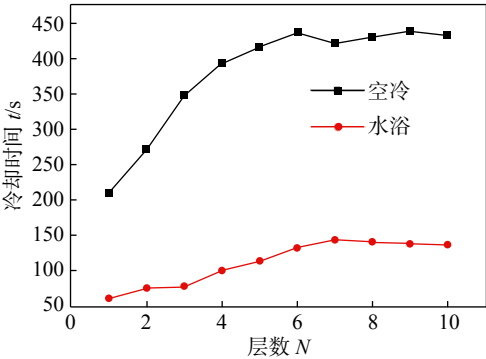


图 4 不同工艺条件下熔覆层冷却至 50 ℃ 的时间

Fig. 4 Cooling time of the depositing layer's temperature to 50 ℃

从图 4 中可以看出空冷条件下的冷却时间远长于水浴条件, 且前 6 层的冷却时间随着层数的增加而变长, 当层数达到 6 层之后, 冷却时间趋于稳定. 这是由于常规空冷条件下, 当熔敷高度较低时, 基板与熔敷金属温差较大, 最上层熔敷金属可以通过传导的方式及时向基板散热, 随着高度的增加, 一方面, 基板的热量累积使其与熔敷金属的温差减小, 热传导作用减弱. 另一方面, 随着高度的增加, 最上层熔敷金属距离基板越来越远, 通过基板的导热效果逐渐降低, 空气开始成为其主要散热对象, 因为气体对固体的热交换效率较低, 导致冷却时间增加. 当高度达到一定数值 (6 层) 后, 系统的热量收支达到平衡, 冷却时间趋于稳定.

图 5 显示了水浴和空冷条件下熔敷速率的变化, 从图中明显可以看出, 水浴条件下的金属熔敷速率明显大于空冷条件, 且随着层数的增加, 熔敷速率呈降低趋势, 当层数到达 6 层之后, 空冷条件下的熔敷速率稳定在 54 g/h, 水浴条件下的熔敷速率稳定在 144 g/h. 采用红外测温仪器测得最上层熔敷金属冷却到 50 ℃ 之后, 基板上距离焊缝中心 10 mm 处 (测温点如图 3 所示 A 点) 的温度, 如图 6 所示. 根据图中两条温度变化曲线得出, 水浴对基板的散热效果突出, 也证实了当层数达到一定值

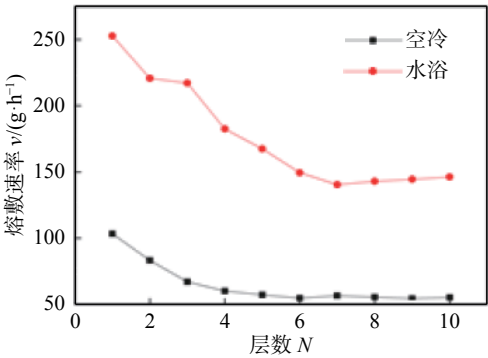


图 5 熔敷速率对照图

Fig. 5 Comparison chart of fusing rate

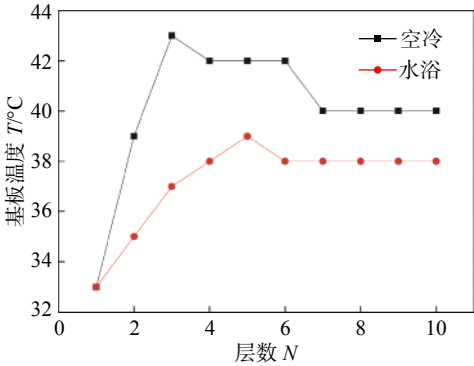


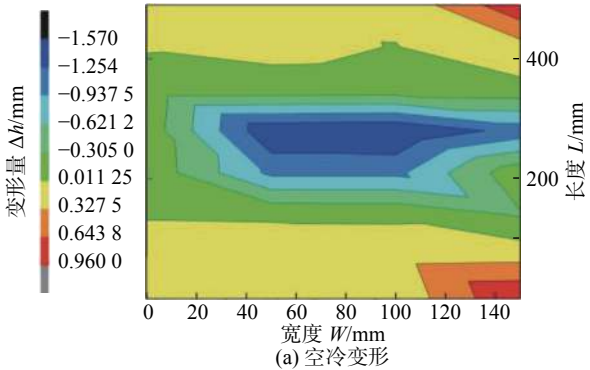
图 6 基板温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation curve of the base plate

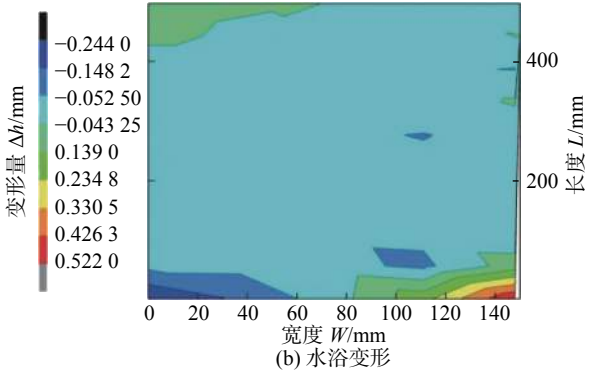
时, 基板温度趋于稳定。

3.2 基板变形

利用海克斯康三坐标测量仪对两块基板的变形量进行测量, 将测量点的三维坐标拟合, 绘制变形曲面如图 7 所示。图 7a 显示了常规空冷状态下的基板变形, 从图中可以看出, 基板在长度方向上的变形较为明显, 中间低两端高, 呈“V”形; 而在宽度方向上只有熔敷区域变形相对明显, 呈现中间凹两端凸起, 但是凸起程度要缓和于长度方向, 熔敷区域的两侧基板在宽度方向上的变形近乎为零。图 7b 所示为水浴条件下基板变形, 从图中可以看出, 基板的端部区域在长度和宽度方向上存在轻微变形, 而中部的熔敷区域在长度和宽度方向都较为平坦。主要由于空冷状态下基板熔敷区域受到重复的热输入, 导致该区域热量聚集过快, 与基板上其他区域温差过大, 由于热应力引起熔敷区凹陷变形。水浴条件下, 由于基板处在恒温水浴场, 基板熔敷区累积的热量有相当一部分通过与该区域直接接触的冷却循环水发生热交换而散失, 另一部分将热量传递给两侧温度较低区域, 然后两侧的基板再与冷却水发生热量交换, 进一步使基板平均温度降低。



(a) 空冷变形



(b) 水浴变形

图 7 基板变形图

Fig. 7 Diagram of substrate deformation

空冷与水浴两种条件下, 基板的两端都存在变形, 主要由于该区域在增材制造过程中受到固定夹具的压紧力作用, 待焊接结束卸下夹具之后, 基板内部分布不均的残余应力致使两端翘起产生变形。

测得空冷试验板的平面度为 2.774 mm, 水冷试验板的平面度为 2.114 mm, 进一步说明水浴条件下基板变形较小, 平整度较好。

3.3 尺寸稳定性

与激光增材相比, 电弧增材成型件的尺寸精度较差, 因此, 形状精度控制是电弧增材制造的关键问题。图 8 为两种冷却条件下的成形件外观。将两个直壁体构件最上表面按照长度方向等分为 12 个点, 分别测该点的高度及宽度, 结果见图 9。水浴条件下直壁体的整体高度要略高于空冷条件下的直壁体, 高度方向上的标准差值为 2.6 mm, 低于空冷条件下的 3.1 mm, 所以说水浴条件下的直壁体在高度方向上的稳定性更优; 水浴和空冷条件下直壁体宽度方向的标准差均为 0.3 mm, 说明水浴对直壁体的宽度影响不大。

空冷条件下直壁体的收弧端高度为 2 mm、宽度为 7.4 mm; 水浴条件的直壁体收弧端高度为 4 mm、宽度为 7.1 mm, 这说明空冷条件下收弧端的塌陷更为严重, 水浴对收弧端的塌陷问题有一定的改善。



图 8 成形件形貌
Fig. 8 Shape of the forming parts

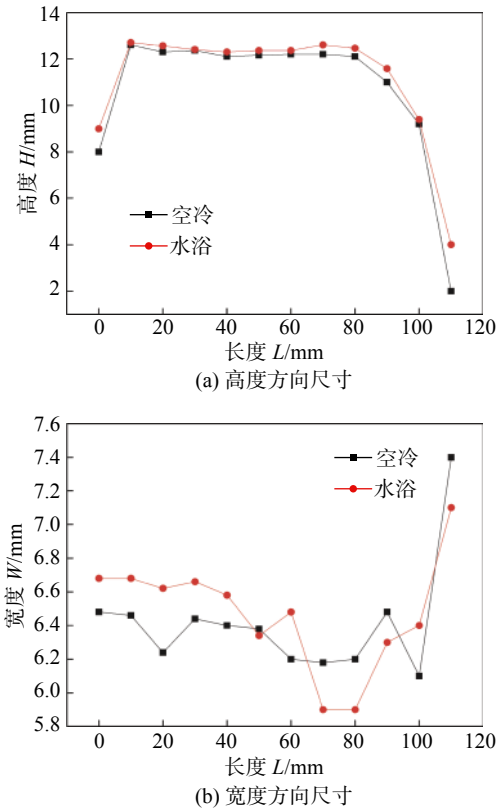


图 9 直壁体构件尺寸
Fig. 9 Dimensions of straight wall parts

作用。由于热量随焊逐渐累积,致使焊缝收弧端的高温停留时间较长,熔池因重力作用而向下流淌,导致该区域下塌严重。由于冷却水的加入,循环冷却水将基板以及直壁体上的热量及时带走,缩短收弧侧的高温停留时间,从而改善该区域的下塌程度。

4 结 论

(1) 文中提出了水浴 PTIG 微变形电弧增材制造工艺,有效的降低了基板变形,提高了熔敷效率和焊件的形状精度。

(2) 与空冷条件下相比,水浴电弧增材的熔敷速率更大。随着焊道层数的增加,熔敷速率呈降低趋势,当层数达到 6 层后,水浴条件下的熔敷速率稳定为 144 g/h,是空冷条件下熔敷速率的 2.7 倍。

(3) 水浴条件下基板变形更小,基板平面度较空冷降低 24%。

(4) 水浴条件下,直壁体在高度方向上的尺寸精度较空冷有所提高,而水浴对宽度方向的尺寸影响较小。另外,水浴对直壁构件收弧端的塌陷现象有改善作用。

参考文献:

[1] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315 – 3322.

[2] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 465 – 481.

[3] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5 – 7.

Wang Huaming. High performance metal component material manufacturing technology opening a new chapter in national defense manufacturing[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(3): 5 – 7.

[4] 田彩兰, 陈济轮, 董 鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015(2): 57 – 60.

Tian Cailan, Chen Jilun, Dong Peng, *et al.* Research status and prospect of wire and arc additive manufacturing technology abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2): 57 – 60.

作者简介: 段梦伟, 男, 1993 年出生, 博士研究生. 主要从事受控电弧智能增材的研究工作. Email: duanmengwei24@163.com

通讯作者: 彭 勇, 男, 讲师. Email: ypeng@njjust.edu.cn

seam, the particles constituted the material which liked the metal matrix composite. It is the reason why joint strength reached maximum 34.1 MPa which similar to the strength of the graphite substrates. The thermal expansion coefficient gradient transition structure that formed in the joint after brazing resulted in low stress level in the joint and high quality joint was obtained. The performed investigation will provide necessary technical support for the construction of molten salt reactor.

Key words: Graphite–Hastelloy N alloy joint; Brazing; Joint's Microstructure; Mechanical property

Micro-deformation P-TIG wire and arc additive manufacture under water bath DUAN Mengwei, PENG Yong, ZHOU Qi, QIANG Wei (School of Material and Science Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). pp 113-116

Abstract: Aiming at the problem of the accumulation of welds and substrates' deformation during wire feeding TIG additive manufacture, the article proposes the process of micro-deformed P-TIG wire and arc additive manufacture. The principle and system composition of the water bathed PTIG arc additive process are described. The deposition rate, substrate deformation and forming quality of the material are compared under the two conditions of water bath and air cooling. The results show that the deposition rate in the water bath is stable at 144 g/h, which is 2.7 times of that under air cooling. The flatness of the substrate under the water bath condition is 2.114, which is 24% lower than that in the air cooling. The height difference between the diameter of the straight wall is 2.6 mm, which is lower than the air cooling (3.1 mm) and the width direction is 0.3. The water bath has a great influence on the forming precision of the straight wall in the height direction.

Key words: water bath PTIG; additive manufacturing; deposition rate; substrate deformation; forming precision

High frequency hybrid twin-electrode TIG welding method and digital power supply design WU Tongli, WANG Kehong, YANG Jiajia, ZHOU Xiaoxia (School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). pp 117-121,128

Abstract: A new high quality and low consumption type of non-melting welding method was put forward, and a high frequency hybrid T-TIG power supply was developed,

which could output two type current waveforms simultaneously. One was high frequency square current waveform with base current of 0~300 A, peak current of 0~100 A, frequency of 0~80 kHz, duty ratio of 0~100%, current rate of change up to 50 A/ μ s. The other was variable polarity square wave pulse current waveform with output current amplitude of 0~500 A, frequency of 0~100 Hz, duty ratio of 0~100%, current rate of change up to 300 A/ms. The test results of the power source indicated that the design of high frequency hybrid T-TIG power source has reached the anticipated design object, and the high frequency square current still has a rapid rising and falling edge change rate at the frequency of 80 kHz. At last, the welding test was carried out by using aluminum alloy plate, and the test results shown that the welding process was stable and the weld molding was good.

Key words: variable polarity; high frequency; square wave pulse; twin electrode; argon arc welding

Research on vision-based post-welding quality inspection of power battery WU Boyao^{1,2}, QIN Lei³, ZHANG Qingmao^{1,2}, MA Qiongxiong^{1,2} (1. Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices and Applications, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 3. United Winners Laser Co., Ltd., Shenzhen 518055, China). pp 122-128

Abstract: In order to inspect the post-welding quality of the power battery, this paper proposes a post-weld quality inspection method. This method combines the dynamic threshold and the global threshold, the runs processing and the PCA-SVM classification model for the problems of low contrast, complex background and interference. Firstly, a hybrid threshold algorithm combining dynamic threshold and global threshold is proposed to segment weld seam and defects. Secondly, get a more real edge of the weld seam though use morphology and runs processing to eliminate the interference around the weld seam; Finally, a 7-dimensional feature vector is designed from three aspects: gray features, geometric features and moments. The support vector machine model with principal component analysis is used to inspect pinholes. The results show that the proposed method can achieve good inspection quality.

Key words: hybrid threshold; runs processing; principal component analysis; support vector machine