

TIG 堆焊成型中工艺参数对钛合金成型尺寸的影响

哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室(150001) 刘宁 范成磊
杨春利 林三宝

摘要 TIG 堆焊成型技术是近年来得到广泛关注的增材制造技术之一。采用正交试验法设计试验方案,对 Ti-6Al-4V 钛合金 TIG 堆焊成型技术中成型尺寸与工艺参数的关系进行了系统的研究,分析得到了焊缝熔宽、余高与工艺参数的关系。通过对试验数据的统计分析,建立了焊缝熔宽、余高与工艺参数之间的数学模型,并对其进行了数学检验。

关键词: TIG 堆焊成型 正交设计 成型尺寸 数学模型
中图分类号: TG444

0 前言

近年来,快速成形技术得到快速的发展。其中,以焊接技术为加工制造手段的堆焊成型技术是快速成形技术中的一个重要分支。采用这种方法可以快速制造出结构致密、无气孔的接近实际零件尺寸的构件。与传统制造方法相比,具有无需模具、节省材料、生产周期短、对环境友好等一系列优点^[1]。

在钛合金堆焊成型技术中,TIG 焊、MIG 焊、等离子弧焊等电弧焊技术由于设备成本低、熔敷效率高,成为首选的方法。P. Almeida^[2]利用冷金属过渡 MIG 方法对 Ti-6Al-4V 钛合金堆焊成型工艺进行了研究。F. Martina^[3]则采用等离子弧焊方法对 Ti-6Al-4V 钛合金进行了堆焊成型。B. Baufeld 和 D. Clark^[1,4-6]采用 TIG 填丝堆焊成型技术分别对 Ti-6Al-4V 钛合金和 718 镍基合金的成型工艺进行了研究,得到了简单的堆焊成型构件。此外,H. Wang^[7]采用变极性 TIG 焊对 4043 铝合金进行堆焊成型试验,得到了较好的试验结果。

与 MIG 焊相比,TIG 焊具有焊接过程稳定、无飞溅和焊缝美观等优点,能够实现高品质焊接。对于成型质量要求颇高的堆焊成型技术来说,TIG 方法无疑具有更大的优势和潜力。

采用正交试验设计的方法,对 Ti-6Al-4V 钛合金 TIG 堆焊成型技术中工艺参数对成型尺寸的影响进行了试验,通过统计分析得到了成型尺寸与工艺参数之间的数学模型,并对其进行了试验验证。

1 试验材料与方法

试验采用尺寸为 300 mm × 150 mm,厚度为 5 mm 的铸态 Ti-6Al-4V 板材作为堆焊成型的基板,堆焊材料采用直径为 1.2 mm 的 Ti-6Al-4V 焊丝,基板和焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 Ti-6Al-4V 基板和焊丝的化学成分(质量分数,%)

材料	Al	V	C	O	N	Ti
基板	6.05	3.91	0.009	0.15	0.006	余量
焊丝	6.01	3.87	0.022	0.16	0.004	余量

试验采用 TIG 焊方法,保护气体为纯氩,保护气体流量为 10 L/min,保护拖罩的气流量为 15 L/min,弧长为 3 mm。

按照正交试验方法进行了试验设计,对 3 个工艺参数分别选取了等间距的 3 个水平,因素水平表如表 2 所示。试验根据因素水平的数量采用 L₉(3⁴) 正交表,得到的试验方案如表 3 所示。

表 2 因素水平表

水平	A(焊接电流) /A	B(焊接速度) /(cm · min ⁻¹)	C(送丝速度) /(m · min ⁻¹)
1	120	30	1.5
2	135	25	2.5
3	150	35	2.0

将试验号随机排列进行了试验,每条堆焊焊缝长度约为 90 mm,保护情况良好,焊缝表面呈银白色光泽。

表3 试验方案及试验结果

试验号	A(焊接电流)/A	B(焊接速度)/(cm·min ⁻¹)	C(送丝速度)/(m·min ⁻¹)	熔宽 B/mm	余高 a/mm
1	1(120)	1(30)	1(1.5)	4.53	1.80
2	1(120)	2(25)	2(2.5)	4.52	2.86
3	1(120)	3(35)	3(2.0)	4.23	1.80
4	2(135)	1(30)	3(2.0)	5.49	1.77
5	2(135)	2(25)	1(1.5)	6.42	1.59
6	2(135)	3(35)	2(2.5)	5.16	1.95
7	3(150)	1(30)	2(2.5)	6.35	2.11
8	3(150)	2(25)	3(2.0)	7.50	1.59
9	3(150)	3(35)	1(1.5)	6.44	1.15
熔宽极差	2.33	0.87	0.45		
余高极差	0.53	0.37	0.79		

之后对焊缝的横截面进行了切割,经过镶嵌、研磨、抛光、腐蚀等得到的试样如图1所示,将试样在OLYMPUS

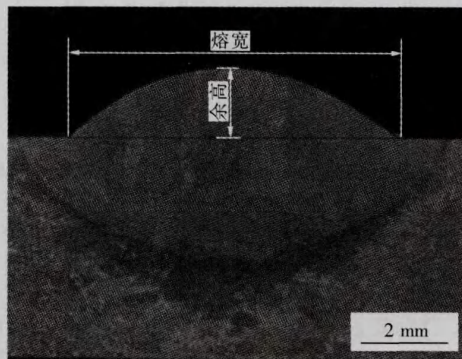


图1 焊缝横截面示意图

SZX12 显微镜下进行了观察,并利用显微镜的标尺功能对焊缝熔宽、余高进行了测量。

2 试验结果和分析

不同工艺参数下的焊缝熔宽、余高的测量结果及极差分析见表3。

2.1 工艺参数对成型尺寸的影响

2.1.1 工艺参数对熔宽的影响

堆焊成型过程中,堆焊焊缝的熔宽是一个极其关键的指标,它直接影响最终构件的尺寸。由表4可以看出,A因素的极差最大,其次是B因素和C因素,这表示焊接电流对单层堆焊焊缝的熔宽影响最为显著,或者说焊接电流是影响熔宽大小最重要的因素。

表4 方差分析表

变差来源	离均差平方和	自由度 ν	均方 MS	统计量临界值 F	P 值 ($P_{\text{rob}} > F$)
类型	9.660 754	3	3.220 251	55.064 970	0.000 3
A-A	8.186 372	1	8.186 372	139.983 600	< 0.000 1
B-B	1.142 033	1	1.142 033	19.528 290	0.006 9
C-C	0.332 350	1	0.332 350	5.683 044	0.062 9

不同工艺参数对熔宽影响的趋势图如图2所示。随着电流的增大,熔宽近似呈线性增大的趋势。随着焊接速度的增大,熔宽呈下降的趋势。随着送丝速度的增大,熔宽也呈下降的趋势。

焊接电流对熔宽影响最为显著,其原因在于影响熔宽最直接的因素是电弧的弧柱直径,弧柱直径越大,

电弧对基板的加热宽度就越大,熔融状态的钛合金表面张力较小,易于铺展,导致熔宽增加。

在电流一定的情况下,焊接速度越小,熔融金属铺展的宽度就越大。理论上,在其它条件不变的情况下,熔宽近似于与焊接速度的平方根成反比。

随着送丝速度的增加,熔敷量增大,而电弧的热输入

保持不变,需要额外的热输入熔化焊丝,导致电弧对基板的热输入降低,这在一定程度上造成了熔宽的减小。

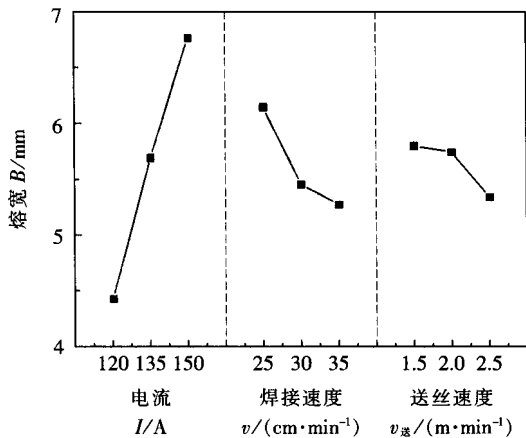


图2 不同工艺参数对熔宽影响的趋势图

2.1.2 工艺参数对余高的影响

由表3可以看出因素主次排序为C,A,B,即送丝速度对余高的影响程度最大,其次是焊接电流和焊接速度。结合图3的不同工艺参数对余高影响的趋势图,可以看出电流和焊接速度的增大都会使余高减小,而送丝速度的增大会使余高增大。

在其它因素不变的情况下,随着电流的增大,会改善熔融金属的润湿和铺展,熔宽增大的同时带来余高的减小。而焊接速度的增大对余高的影响则需要作进一步分析,一方面,在其它条件不变的前提下,随着焊接速度的增大,单位截面上的热输入降低,将产生较小的熔宽和较大的余高;另一方面,随着焊接速度的增

$$\text{熔宽} = -1.20229 + 0.07787 \cdot A - 0.08725 \cdot B - 0.52194 \cdot C \quad (1)$$

式中:A,B,C分别代表焊接电流、焊接速度和送丝速度。单位分别为A;cm/min;m/min。

拟合的准确性可以通过预测值与最初试验值的比较

$$\text{余高} = 3.58977 - 0.01793 \cdot A - 0.03795 \cdot B + 0.89522 \cdot C \quad (2)$$

式中:A,B,C分别代表焊接电流、焊接速度和送丝速度。单位分别为A;cm/min;m/min。

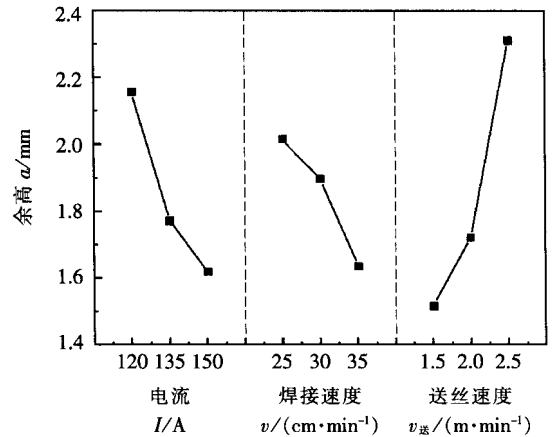


图3 不同工艺参数对余高影响的趋势图

大,单位长度基板上金属的熔敷量降低,这等同于送丝速度的降低,导致余高减小。所以,焊接速度对余高的影响应该是这两方面因素的综合体现。而送丝速度对余高的影响则来源于两方面因素的叠加,一方面,送丝速度增大将使加于基板的热输入降低,从而减小熔宽增大余高;另一方面,送丝速度增大将提高金属的熔敷量,也将增加余高。这也从侧面印证了表3中各因素对余高影响的主次之分。

2.2 成型尺寸与工艺参数关系模型的建立

对熔宽试验数据进行多元线性回归拟合,方差分析表如表4所示,可以看出线性回归模型比较显著,置信度较高。另外,也可以看出焊接电流(即因素A)对试验结果有最显著的影响,而焊接速度(因素B)和送丝速度(因素C)影响逐次降低,这个结果验证了直观分析的正确性。得到的三元线性回归方程如下:

进行一定程度上的评定,如图4所示,拟合效果比较好。

对余高的试验数据进行多元线性回归拟合,方差分析表如表5所示,得到三元线性回归方程,即:

拟合的准确性可以通过预测值与最初试验值的比较进行一定程度上的评定,如图5所示。

表5 方差分析表

变差来源	离均差平方和	自由度 ν	均方 MS	统计量临界值 F	P 值 ($P_{\text{ob}} > F$)
类型	1.628 190	3	0.542 730	23.943 810	0.002 1
A - A	0.434 414	1	0.434 414	19.165 170	0.007 2
B - B	0.216 042	1	0.216 042	9.531 187	0.027 2
C - C	0.977 735	1	0.977 735	43.135 070	0.001 2

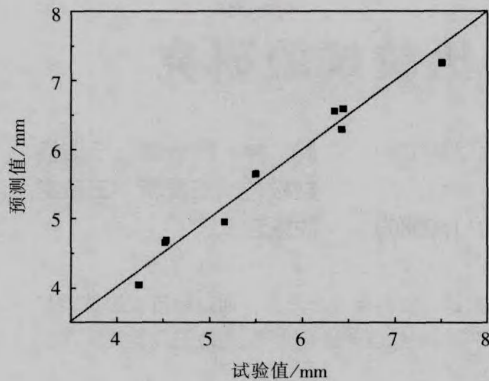


图4 熔宽试验值与预测值对比

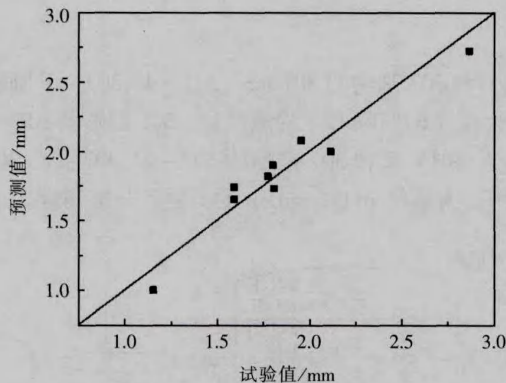


图5 余高试验值与预测值对比

参 考 文 献

- [1] Baufeld B, Van der Biest O, Gault R. Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition [J]. International Journal of Materials Research, 2009, 100(11): 1536 - 1542.
- [2] Sequeira Almeida P M, Williams S. Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) [C]. Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, USA, 2010.
- [3] Martina F, Mehnen J, Williams S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1377 - 1386.
- [4] Baufeld B, Van der Biest O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2009, 10(1): 1 - 10.
- [5] Baufeld B, Van der Biest O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties [J]. Materials & Design, 2010, 31: 106 - 111.
- [6] Clark D, Bache M R, Whittaker M T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1-3): 439 - 448.
- [7] Wang H, Jiang W, Ouyang J, et al. Rapid prototyping of 4043 Al - alloy parts by VP - GTAW [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 93 - 102.

3 结 论

(1) 焊接电流对熔宽的影响最大,而送丝速度对熔宽的影响较小。

(2) 送丝速度对余高的影响最大,随着送丝速度的增大,余高显著增大。

作者简介: 刘 宁,1988 年出生,硕士研究生,主要从事 TIG 填丝堆焊成型技术的研究。

焊接技术问题征集

《焊接》杂志的“焊接技术问答”栏目,将邀请业内资深专家为读者解答一些焊接的基本知识、技术操作要点、安全操作常识及必要措施等问题。如果你在焊接生产中遇有暂时难以解决的技术方面问题,请发邮件至 hbjb@126.com 或寄至“150028 哈尔滨市松北区创新路 2077 号 焊接编辑部”收,请注明“焊接技术问答”字样。