

基于 CMT 电弧增材的焊缝成形尺寸规律研究

刘志森¹, 薛丁琪¹, 韩绍华¹, 邓将华¹, 王琳², 姚立纲¹

(1.福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108; 2.福建海源自动化机械股份有限公司, 福州 350108)

摘要: **目的** 研究焊接参数对焊缝成形尺寸的影响规律。**方法** 基于冷金属过渡技术, 采用正交试验方法得到在不同参数组合下焊缝熔宽、余高和第 2 层增高, 通过多元线性回归拟合, 建立了焊缝熔宽、余高和第 2 层增高与焊接参数之间的回归模型。**结果** 影响焊缝熔宽和余高的主要焊接参数是焊接速度, 影响焊缝第 2 层增高的主要焊接参数是送丝速度, 而层间温度的变化对熔宽会有显著影响, 但是对余高和第 2 层增高的影响不大, 而且焊缝第 2 层的增高与余高在数值上存在较大的差异, 对比预测值和试验值验证了回归模型的准确性。**结论** 通过改变焊接速度可以引起熔宽和余高的显著变化, 层间温度对余高和第 2 层增高不会造成很大影响。

关键词: 冷金属过渡; 焊缝成形尺寸; 正交试验; 多元线性回归

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.004

中图分类号: TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)06-0021-05

Rules of Bead Forming Dimension of CMT-based Wire and Arc Additive Manufacturing

LIU Zhi-sen¹, XUE Ding-qi¹, HAN Shao-hua¹, DENG Jiang-hua¹, WANG Lin², YAO Li-gang¹

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350001, China;

2.Fujian Haiyuan Automatic Equipments Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

ABSTRACT: The effect of welding parameters on bead forming dimension was studied by the cold metal transfer technology (CMT) in this paper. Bead width, height and second layer height under different parameter combinations was obtained by the orthogonal experiments, and the regression model of bead width, height, second layer height and welding parameters was established by the multiple linear regressions. As a result, welding speed is a main welding parameter which influence bead width and height, and wire feeding speed is a main welding parameter that affect bead second layer height. The change of interlayer temperature has a significant effect on bead width, but it has little effect on the increase of bead height and second layer height, and the increase of bead height and second layer height have great difference in numerical value. The accuracy of the model is verified by comparing the predicted values and the experimental values. In conclusion, by changing welding speed can cause significant changes in bead width and height, and second layer height will not be greatly affected by changing interlayer temperature.

KEY WORDS: cold metal transfer; bead forming dimension; orthogonal experiments; multiple linear regressions

电弧增材制造(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM)是基于离散、堆积原理, 以电弧作为热源, 将焊丝熔化, 按照特定轨迹进行堆积, 得

到由全焊缝金属组成的三维实体零件^[1-5]。与传统的材料减法制造相比, 该技术是一种材料加法加工工艺, 是一种自下而上的制造方法^[6-7]。

收稿日期: 2016-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(5130501)

作者简介: 刘志森(1992—), 男, 福建人, 硕士生, 主要研究方向为电弧增材制造技术。

通讯作者: 韩绍华(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为先进制造技术。

对于电弧增材制造技术而言,其金属成形件是由焊缝经过逐层逐道堆积而成的,因此,单道焊缝的成形尺寸对堆焊件的最终尺寸和精度有着重要的影响^[8]。哈尔滨工业大学的柏久阳等人采用二次通用旋转方法,通过二次回归方程建立了焊接参数与焊缝熔宽的关系模型^[9];南昌大学的张光云基于 TIG 焊接方法,分别建立了焊接参数预测焊缝成形尺寸和焊缝成形尺寸预测焊接参数 2 个神经网络模型,但是前者预测效果很好,而后者预测效果不理想^[10]。目前,对于焊缝成形尺寸的研究主要集中在单道焊缝的熔宽和余高上,通过试验发现,在进行多层堆焊时,第 2 层的焊缝增高较第 1 层有着较大的差异,而从第 2 层开始,焊缝增高趋于稳定,所以在第 1 层焊缝的基础上研究焊缝第 2 层增高的变化对后续的试验有着重要的影响,可以为今后在堆焊路径规划和生产指导方面提供数据参考。

冷金属过渡技术(Cold Metal Transfer, CMT)是在短路状态下通过焊丝机械式的回抽运动实现熔滴过渡,由于其具有变形和飞溅小等特点,使得焊缝的成形尺寸波动较小,可以得到均匀一致的焊缝,从而提高零件的成形精度^[11-15]。文中基于 CMT 技术,采用正交试验方法,分别研究焊接参数对焊缝熔宽 W 、余高 H 和第 2 层增高 h 的影响规律,并通过多元线性回归拟合建立焊接参数与焊缝熔宽、余高和第 2 层增高的回归模型,对比预测值与试验值,对模型的准确性进行验证。

1 试验

1.1 设备与材料

试验的运动装置采用的是 ABB 机器人,型号为 IRB2600,焊机采用的是奥地利 Fronius 全数字化 CMT 焊机,加热设备采用的是电磁感应加热装置。试验焊丝选用的是瑞士伊萨进口的直径为 1.2 mm,牌号为 OK Tubrodur 15.50 模具钢焊丝,焊丝主要元素有 C, Si, Mn, Cr, Mo, 分别所占的质量分数为 0.67%, 0.7%, 0.7%, 5.2%, 1.0%, 其余元素为 Fe。基体材料为 Q235B 钢板。

焊接电源采用一元化控制,即只控制送丝速度,而焊接电流和电压可通过调节送丝速度而间接进行控制。其关系见图 1。

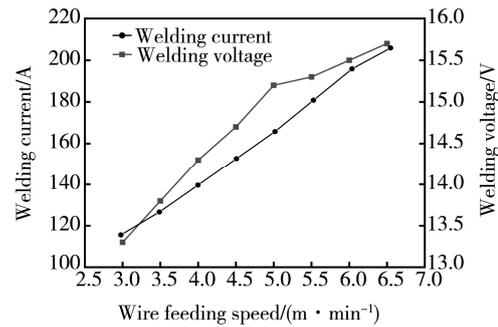


图 1 送丝速度与焊接电流、电压的关系

Fig.1 Wire feeding speed vs the welding current and voltage

1.2 正交试验方案设计

采用正交试验法进行单层和 2 层的堆焊试验,研究焊接参数对焊缝成形尺寸的影响。焊接参数主要考察送丝速度、焊接速度和层间温度,具体的因素水平见表 1,每个因素分别选取 4 个等距的水平,根据因素的水平数选取 $L_{16}(4^5)$ 的正交表,对于 2 个空列,可通过极差分析来判断因素之间是否存在不可忽略的交互作用或是否忽略了对试验结果有重要影响的其他因素。

表 1 因素水平表

Table 1 Level of factors table

水平	送丝速度 $X_1/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $X_2/(mm \cdot s^{-1})$	层间温度 $X_3/^\circ C$
1	3	3	30
2	4	5	130
3	5	7	230
4	6	9	330

为了排除次要因素对试验的干扰,本次试验保证焊丝干伸长为 11 mm,保护气为 80%Ar+20%CO₂,试验堆焊的焊缝长度为 50 mm。焊缝的熔宽、余高和第 2 层增高的测量是由扫描电镜的标尺功能完成的,其焊缝尺寸模型见图 2。

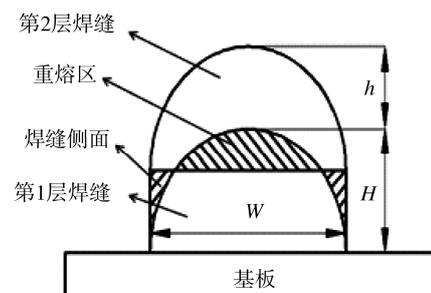


图 2 焊缝成形尺寸模型

Fig.2 Model of bead forming dimension

2 结果与讨论

2.1 试验结果

不同试验方案下的焊缝熔宽、余高和第2层增高的测量结果见表2, 正交试验结果的分析见表3。

从表3可以看出, 焊接参数中对焊缝熔宽和余高影响最大的是焊接速度, 其次是送丝速度和层间温度, 这就说明焊接速度对焊缝熔宽和余高的影响最大, 也就是说焊接速度的变化可以引起熔宽和余高的显著变化。而焊接参数对焊缝第2层增高的影响主次发生了变化, 主要因素是送丝速度, 其次是

焊接速度, 最小是层间温度。进一步分析发现, 层间温度对焊缝余高和第2层增高的极差只有0.25 mm和0.18 mm, 说明层间温度的改变不会引起焊缝余高和第2层增高的显著变化, 这对堆焊过程中层间温度的控制具有很大的指导意义。另外从数值上看, 焊缝余高和第2层增高存在很大的差异, 这是因为在堆焊第2层时由于第1层焊缝表面不平, 金属液会向第1层焊缝侧面流动, 如图2所示。从空列1和空列2的极差可以发现, 其值都远远小于3个焊接参数, 由此可以知道这3个焊接参数之间没有存在不可忽略的交互作用, 也没有忽略对试验结果有重要影响的其他因素。

表2 正交试验测量结果
Table 2 Results of the orthogonal experiments

试验号	X_1	X_2	X_3	空列1	空列2	熔宽/mm	余高/mm	第2层增高/mm
1	1	1	1	1	1	6.86	3.10	2.02
2	1	2	2	2	2	5.97	2.20	1.77
3	1	3	3	3	3	5.47	1.70	1.37
4	1	4	4	4	4	4.98	1.58	1.02
5	2	1	2	3	4	8.32	3.26	2.40
6	2	2	1	4	3	6.19	2.71	2.14
7	2	3	4	1	2	6.34	2.02	1.65
8	2	4	3	2	1	5.26	1.71	1.57
9	3	1	3	4	2	9.80	3.38	2.44
10	3	2	4	3	1	8.35	2.66	2.04
11	3	3	1	2	4	5.74	2.48	1.94
12	3	4	2	1	3	5.16	1.96	1.83
13	4	1	4	2	3	10.57	3.60	2.80
14	4	2	3	1	4	8.25	3.00	2.42
15	4	3	2	4	1	6.56	2.55	2.18
16	4	4	1	3	2	5.06	2.52	2.13

表3 正交试验结果分析
Table 3 Analysis of the orthogonal experiments

指标分析	分析值	X_1	X_2	X_3	空列1	空列2	因素主次
熔宽	k_1	5.82	8.89	5.96	6.65	6.76	$X_2X_1X_3$
	k_2	6.53	7.19	6.50	6.89	6.79	
	k_3	7.26	6.03	7.20	6.80	6.85	
	k_4	7.61	5.12	7.56	6.88	6.83	
	极差R	1.79	3.77	1.60	0.24	0.09	
余高	k_1	2.15	3.34	2.7	2.52	2.51	$X_2X_1X_3$
	k_2	2.43	2.64	2.49	2.50	2.53	
	k_3	2.62	2.19	2.45	2.54	2.50	
	k_4	2.92	1.94	2.47	2.56	2.58	
	极差R	0.77	1.40	0.25	0.06	0.08	
第2层增高	k_1	1.55	2.42	2.06	1.98	1.95	$X_1X_2X_3$
	k_2	1.94	2.09	2.05	2.02	2.00	
	k_3	2.06	1.79	1.95	1.99	2.04	
	k_4	2.38	1.64	1.88	1.95	1.95	
	极差R	0.83	0.78	0.18	0.07	0.09	

2.2 焊接参数对焊缝成形尺寸的影响

焊接参数对焊缝成形尺寸的影响规律见图3, 从图3可以看出,随着送丝速度的增加,焊缝熔宽、余高和第2层增高呈逐渐增大的趋势。分析认为,在堆焊第1层时,送丝速度的增加使单位时间内熔敷的金属量增加,增加的金属需要进一步提高热输入,在没有额外热输入的情况下,余高应该会显著增大,而根据送丝速度和焊接电流的关系可以得出送丝速度的增加会导致焊接电流和电压相应升高,从而使熔宽有所增大,进而导致余高的增大趋势变

缓;由于在第2层堆焊时,金属液在宽度方向上的流动受到了第1层焊缝的限制,导致第2层熔宽较第1层变化不大,使焊缝第2层增高显著增大。

随着焊接速度的增加,焊缝熔宽、余高和第2层增高呈线性减小的趋势,而且熔宽和余高变化曲线斜率的绝对值明显高于送丝速度,但是第2层增高变化曲线斜率的绝对值略低于送丝速度。分析认为,焊接速度的增加使单位时间内熔敷的金属量减少,同时热输入量也降低,在两者作用下导致焊缝熔宽、余高和焊缝第2层增高显著减小。

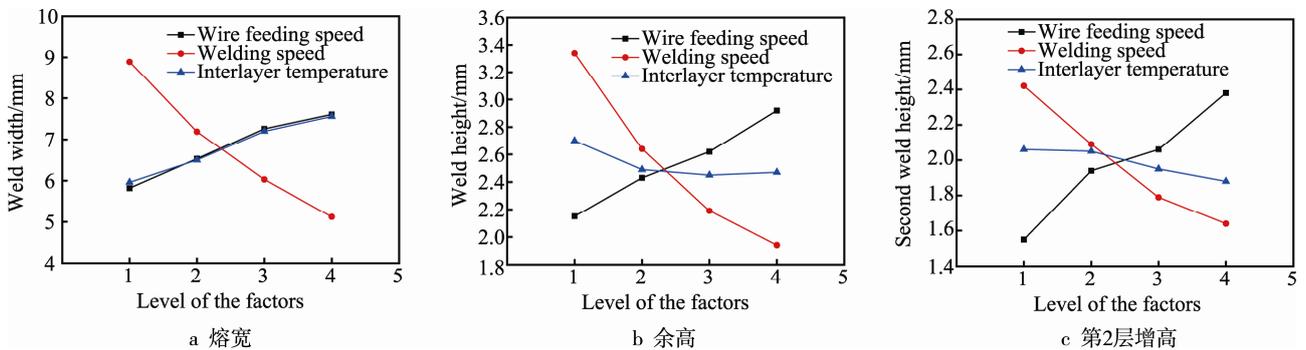


图3 焊接参数对焊缝成形尺寸的影响

Fig.3 Effect of the welding parameters on bead forming dimension

随着层间温度的增加,焊缝熔宽呈逐渐增大的趋势,余高和第2层增高呈逐渐减小的趋势,但是从整体变化趋势来看,层间温度的变化对焊缝成形尺寸的影响不如送丝速度和焊接速度大。分析认为层间温度的增加使熔敷金属的凝固时间变长,增大了金属液的流淌,致使熔宽增大,由于单位时间内熔敷的金属量不变,使余高减小,而第2层金属液的流动受到第1层焊缝的限制,致使焊缝第2层增高的变化不大。

以上只是定性的分析了不同焊接参数对焊缝成形尺寸的影响,下面通过对试验数据进行多元线

性回归拟合分析,得到的拟合方程为:

$$W=6.81445+0.6125X_1-0.624X_2+0.0058X_3 \quad (1)$$

$$H=2.92235+0.25125X_1-0.23162X_2-0.000758X_3 \quad (2)$$

$$h=1.70305+0.2635X_1-0.132X_2-0.000635X_3 \quad (3)$$

通过对比预测值和试验值来验证回归方程拟合准确性,对比结果见图4,可以看出试验值都在对角线附近,由此可以说明该方程能够反映焊接参数与焊缝熔宽之间的关系。

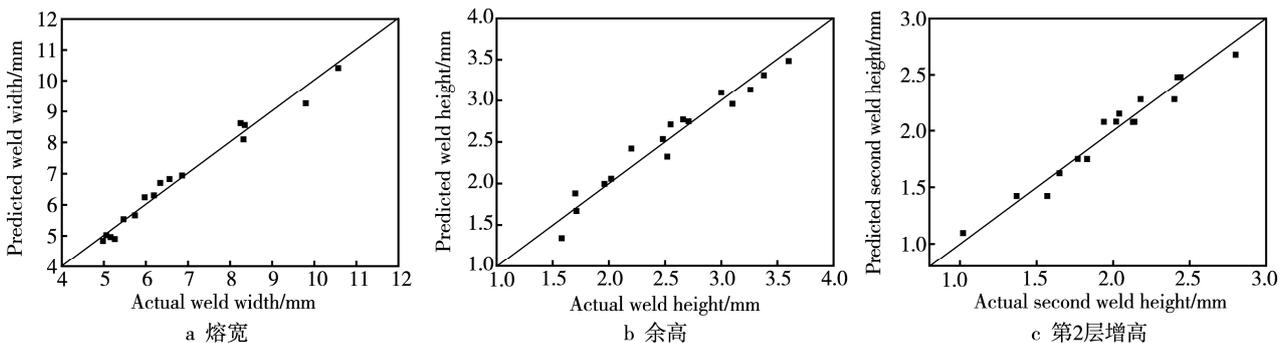


图4 回归方程焊缝成形尺寸试验值与预测值对比情况

Fig.4 Comparison of bead forming dimension the test values and the predicted values of the regression equation

3 结论

1) 通过正交试验得到焊接参数对焊缝熔宽和余高的影响主次分别是焊接速度, 送丝速度和层间温度, 而焊接参数对焊缝第 2 层增高的影响主次发生了变化, 分别是送丝速度、焊接速度和层间温度。进一步分析发现层间温度的改变不会引起焊缝余高和第 2 层增高的显著变化。

2) 考察了送丝速度、焊接速度以及层间温度对焊缝成形尺寸的影响, 并建立多元线性回归方程, 对比预测值和试验值得到方程具有一定的准确性。

3) 在进行第 2 层堆焊时, 由于金属液的流动受到第 1 层焊缝的影响, 整体熔宽不会发生较大的变化, 而因为金属液会向第 1 层焊缝侧面流淌的缘故, 使第 2 层的焊缝增高与第 1 层余高存在较大的差异。

参考文献:

- [1] DING Dong-hong, PAN Zeng-xi, DOMINIC C, et al. Wire-feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1/2/3/4): 465—481.
- [2] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + Arc Additive Manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016: 641—647.
- [3] XIONG Jun, ZHANG Guang-jun, ZHANG Wei-hua. Forming Appearance Analysis in Multi-layer Single-pass GMAW-based Additive Manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9): 1—10.
- [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 Cai-lan, CHEN Ji-lun, DONG Peng, et al. Current State and Future Development of the Wire Arc Additive Manufacture Technology A-broad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2): 57—60.
- [5] PANAGITIOS K, PREETAM D, PEDRO A, et al. Fabrication of Geometrical Features Using Wire and Arc Additive Manufacture[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(6): 1042—1051.
- [6] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17—21.
GENG Hai-bin, XIONG Jiang-tao, HUANG Dan, et al. Research Status and Trends Wire Arc Additive Manufacture Technology[J]. Welding & Joining, 2015(11): 17—21.
- [7] 祁萌, 李晓红, 胡晓睿, 等. 增材制造技术在国外国防领域的发展现状与趋势[J]. 国防制造技术, 2013, 10(5): 12—18.
QI Meng, LI Xiao-hong, HU Xiao-rui, et al. Development Status and Trend of the Wire Arc Additive Manufacture Technology in the Field of National Defense[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 10(5): 12—18.
- [8] DING Dong-hong, PAN Zeng-xi, DOMINIC Cuiuri, et al. Bead Modelling and Implementation of Adaptive MAT Path in Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32—42.
- [9] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87—90.
BAI Jiu-yang, WANG Ji-hui, LIN San-bao, et al. Width Prediction of Aluminium Alloy Weld Additively Manufactured By TIG Arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87—90.
- [10] 张光云. TIG 熔焊成型中焊缝几何尺寸的建模与控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
ZHANG Guang-yun. Bead Geometry Modeling and Control in TIG Welding Forming[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [11] 张洪涛, 冯吉才, 胡乐亮. CMT 能量输入特点与熔滴过渡行为[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 128—132.
ZHANG Hong-tao, FENG Ji-cai, HU Le-liang. Energy Input and Metal Transfer Behavior of CMT Welding Process[J]. Materials Science & Technology, 2012, 20(2): 128—132.
- [12] ZHANG Hong-tao, FENG Ji-cai. Interfacial Phenomena of Cold Metal Transfer(CMT)Welding of Zinc Coated Steel and Wrought Aluminum[J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(11): 1346—1349.
- [13] 刘一博, 孙清洁, 姜云禄, 等. 基于冷金属过渡快速成形工艺[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 1—4.
LIU Yi-bo, SUN Qing-jie, JIANG Yun-lu, et al. Rapid Prototyping Process Based on Cold Metal Transfer Arc Welding Technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 1—4.
- [14] 孙哲, 吕耀辉, 徐滨士, 等. 基于 CMT 焊接快速成形工艺研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(2): 85—88.
SUN Zhe, LYU Yao-hui, XU Bin-shi, et al. Study on Rapid Prototyping Technology Based on CMT Welding[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(2): 85—88.
- [15] TALALAEY R, VEINTHAL R, LAANSSOA, et al. Cold Metal Transfer(CMT) Welding of Thin Sheet Metal Products[J]. Estonian Journal of Engineering, 2012, 18(3): 243—250.