

成形参数和搭接量对堆焊成形尺寸的影响

何建斌, 许燕, 周建平, 鲍阳

(新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:为了分析不同工艺参数对堆焊成形尺寸的影响并确定其最优参数组合,在前期研究的基础上,选取与堆焊成形质量密切相关的3个主要工艺参数,即焊接速度、送丝速度和焊接电压,通过正交试验法设计了焊接试验,并采用极差分析法对试验结果进行了分析。结果表明:焊接速度对焊道熔宽影响最大,而送丝速度对焊道余高影响最大,得到最优参数组合为焊接速度4 mm/s,送丝速度80 mm/s,焊接电压20 V。在此基础上,研究了其焊道搭接量模型,确定出两道焊道之间的最佳搭接距离,通过试验验证了搭接模型的可靠性,最后得到的多道堆焊零件表面平整度较好。

关键词:堆焊成形;正交试验;工艺参数;焊道搭接量

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20190140

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)09-0136-04

Influence of Forming Parameters and Weld Overlap on Forming Size of Surfacing

HE Jianbin, XU Yan, ZHOU Jianping, BAO Yang

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China)

Abstract: In order to analyze the influence of different process parameters on surfacing forming size and determine the optimal parameter combination, on the basis of previous research, the three main process parameters were chosen which were closely related to forming quality of surfacing, namely, welding speed, wire feeding speed and welding voltage. The welding experiment was designed through orthogonal experiment method, and the results were analyzed by range analyses. The results show that the welding speed has the largest influence on the weld bead width, while the wire feeding speed has the largest influence on the height of the weld bead. The optimal parameter combination is the welding speed of 4 mm/s, wire feeding speed of 80 mm/s, and welding voltage of 20 V. On this basis, the model of the lap amount of the weld bead was studied, and the optimum lap distance between the two weld beads was determined. The reliability of overlap model was verified by experiments, and the surface smoothness of multi-pass surfacing part was good.

Key words: surfacing forming; orthogonal test; process parameter; weld overlap

金属增材制造技术是增材制造技术的一个重要分支,也是未来制造业转型发展的主要方向^[1-2]。目前,金属增材制造技术基于热源不同有激光增材制造、电子束增材制造和电弧增材制造等技术,而电弧增材制造技术凭借其成形效率高、设备成本低、制造形式灵活以及成形性能好等优点,正在成为一种重要的金属成形技术^[3-4]。其中,基于熔化极气体保护焊工艺的堆焊成形技术在三维成形领域得到了广泛的应用^[5]。

为了提高堆焊成形零件的精度,就有必要研究

单道成形工艺参数与焊道尺寸形貌的关系。单道焊道尺寸的主要评价指标有熔宽、余高等^[6],而影响焊道尺寸的工艺参数主要包括:焊接速度、送丝速度、电弧电压、焊丝干伸长、焊接角度、保护气种类及流量、基板材料和焊丝种类等。因此,如何综合考虑这些参数对堆焊尺寸的影响,选出影响较大且容易控制的因素,对堆焊成形零件精度有着重要的影响^[7-8]。此外,在堆焊成形过程中,两道焊道之间的搭接距离决定了焊道搭接后的平整度,若是欠搭接状态,焊道间便容易产生波谷,尤其在多道堆焊过程中会导致成形件内部出现未熔合区域,零件的性能因此受到影响;而如果是过搭接状态,成形表面会隆起,也会使最终零件的尺寸精度下降^[9]。

本文通过正交试验方法研究了堆焊过程中主要工艺参数对焊道尺寸形状的影响,利用极差分析探

收稿日期:2019-01-11

基金项目:自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJEDU20181006)

作者简介:何建斌(1994-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向:焊

接快速成形和质量控制;电话:17690761598;

E-mail:769744047@qq.com

究各因素对堆焊焊道熔宽、余高的影响大小,得到最优工艺参数组合,并在此基础上建立对应堆焊焊道的搭接模型,通过公式计算得出两道焊道间的最佳搭接距离,以为堆焊成形零件工艺参数和搭接量的选择提供参考。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

试验平台是基于极坐标系统下的堆焊成形平台,整个平台由三部分组成,分别是焊接电源、机床本体以及控制系统。其中,焊接电源主要采用熔化极气体保护焊机 NBC-250f,搭配 SB-10C-500 送丝机以及二氧化碳保护气使用,具有成本低、效率高且成形过程易于控制等优点。机床本体由机架、主轴、径向进给装置、焊枪角度控制器、焊枪以及成形平台组成,通过极轴的旋转、极径的进给带动焊枪在可升降平台的配合下实现三维空间的运动。控制系统由 IPC (industrial personal computer)、运动控制卡和驱动器构成。采用上位机编写的 Pascal 软件通过 IPC 和运动控制卡对机床几个驱动器进行协同控制,从而实现对焊枪的精确控制,平台实物见图 1。

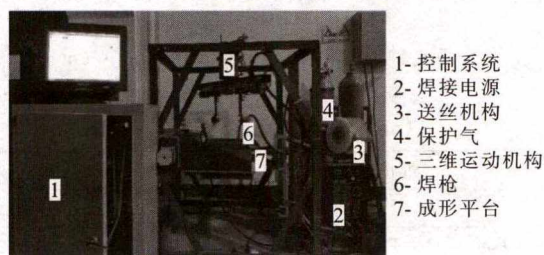


图 1 堆焊成形平台

Fig.1 Schematic diagram of surfacing forming platform

1.2 试验材料

堆焊基板采用 Q235B 基板,在试验之前用砂纸打磨试件表面,去除表面附着氧化物,然后用酒精将表面清洗洗净,待干燥后再进行试验。焊丝为直径 0.8mm 的 ER50-6 型焊丝,两种材料的成分见表 1。

表 1 ER50-6 焊丝和 Q235B 化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of ER50-6 wire and Q235B (wt%)

材料	C	Mn	Si	S	P	Cu
ER50-6	0.06~0.15	1.40~1.85	0.8~1.15	≤0.035	≤0.025	≤0.50
Q235B	0.12~0.20	0.30~0.70	≤0.30	≤0.045	≤0.045	-

1.3 正交试验设计

根据前期试验结果^[10],发现对堆焊焊道尺寸影

响较大的三个参数分别是:焊接速度、送丝速度和焊接电压,选取其中合理的参数范围,设计了 $L_9(3^4)$ 正交试验表,考虑到其他可能影响成形尺寸的未知因素,保留了一个空列,因素水平表如表 2 所示。试验保护气体采用二氧化碳,气体流量为 10L/min,焊丝干伸长度为 10mm,焊枪喷嘴与基板保持 90°垂直。此外,为保证试验准确,每次焊接完成后等待基板恢复至室温后再进行下一组试验。

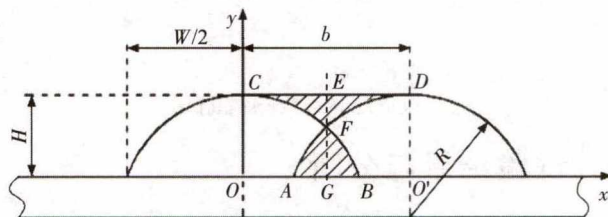
表 2 因素水平表

Tab.2 Table of factor and levels

水平	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	送丝速度/(mm·s ⁻¹)	焊接电压/V
1	4	60	18
2	5	70	19
3	6	80	20

1.4 堆焊焊道搭接模型

焊道之间合适的搭接量有利于提高堆焊成形表面质量,本文通过建立焊道形状尺寸的数学模型,同时设定一定的搭接准则来确定不同焊道尺寸的搭接量计算公式。图 2 为焊道搭接模型,其中, H 为焊道高度, W 为焊道宽度, b 为理想中心距。为便于分析和计算,对模型做出以下假设:①堆焊成形焊道截面是理想对称圆弧,且每条焊道成形的形状均相同;②成形过程中单道焊道截面形状保持不变。



W :焊道熔宽; H :焊缝余高; R :焊道截面半径; b :相邻两条焊缝间的中心距

图 2 焊道理想搭接模型

Fig.2 Bead overlap model in ideal state

在多道堆焊成形过程中,后一道沉积焊道会与前一道焊道存在重叠部分(图 2 的曲边三角形 ABF),由于熔融金属表面张力作用使得上方的曲边三角形 CDF 得到填充,在理想状况下,希望曲边三角形 ABF 与曲边三角形 CDF 的面积相等,即:

$$S_{\Delta CDF} = S_{\Delta ABF} \quad (1)$$

如图 2 所示,两个三角形交点 F 的坐标设为 (x_F, y_F) ,他们的面积为:

$$S_{\Delta CDF} = 2S_{\Delta CEF} = 2 \int_0^{x_F} (R - \sqrt{R^2 - x^2}) dx \quad (2)$$

$$S_{\Delta ABF} = 2S_{\Delta GBF} = 2 \int_{x_f}^{\frac{W}{2}} [\sqrt{R^2 - x^2} - (R-H)] dx \quad (3)$$

求得 F 点的坐标为:

$$x_f = \frac{1}{H} \left[\frac{R^2}{2} \arcsin \frac{W}{2R} - \frac{W}{4} (R-H) \right] \quad (4)$$

从而求得理想的焊道中心距:

$$b = 2x_f = \left[\frac{R^2}{2} \arcsin \frac{W}{2R} - \frac{W}{4} (R-H) \right] \cdot \frac{2}{H} \quad (5)$$

采用对比试验来验证搭接模型的可靠性: 首先采用正交试验得到的最优工艺参数成形一道 80 mm 长的焊道, 测量其熔宽和余高值并根据公式(5)推算出理想搭接量, 然后第二道成形焊道分别按照和第一道焊道欠搭接 ($b+1$) mm、理想搭接 b mm 以及过搭接 ($b-1$) mm 的方式进行三组试验。为了研究成形焊道表面平整度, 引入了以相邻焊道间波峰和波谷的差值(图 3)作为搭接平整性的评价指标, 用符号 f_p 表示, 值越大, 表示成形表面平整性就越差, 反之则越好。对三组试验成形样本进行线切割, 然后用显微镜观测样本截面的 3 条成型轨迹间波峰与波谷间的距离。

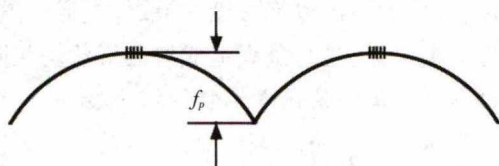


图 3 波峰与波谷示意图
Fig.3 Schematic of crest and trough

2 试验结果与分析

2.1 正交试验

每道焊道成形完成后, 选取成形较好区域对焊道尺寸进行了多次测量, 以 10 mm 为测量间距, 每道焊道平均设置 5 个测量点, 取测量数据的均值作为最终尺寸数据, 正交试验结果见表 3, 得到的焊道见图 4。

以正交试验结果为基础, 为探究最优堆焊工艺参数组合, 须对试验结果进行极差分析, 极差 R 值越大, 则说明该因素对试验指标的影响也越大, 因此通过 R 可以判断因素的主次关系。对表 5 试验数据(熔宽和余高)进行计算, 极差分析结果如表 4、5 所示。为提高熔覆效率, 本试验取较宽熔宽和较高余高作为优先评价指标。由表 4 可以看出, 对于焊道熔宽, 各因素影响的主要次序为焊接速度 > 焊接电

表 3 正交试验结果
Tab.3 Orthogonal experimental results

试验序号	工艺参数				熔宽/mm	余高/mm
	A 焊接速度/(mm·s ⁻¹)	B 送丝速度/(mm·s ⁻¹)	C 焊接电压/V	D 空列		
1	4	60	18	1	6.28	2.54
2	4	70	19	2	7.35	2.77
3	4	80	20	3	7.94	2.92
4	5	60	19	3	5.61	2.10
5	5	70	20	1	6.42	2.41
6	5	80	18	2	5.41	3.16
7	6	60	20	2	5.48	1.74
8	6	70	18	3	4.91	2.33
9	6	80	19	1	5.42	2.76

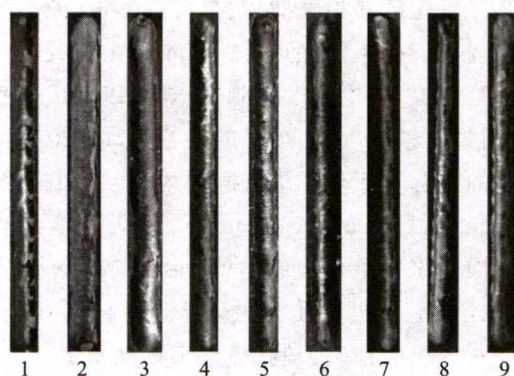


图 4 正交试验结果
Fig.4 Results of orthogonal experiment

表 4 熔宽极差分析
Tab.4 Range analyses of width

水平	焊接速度	送丝速度	焊接电压	空列
k_1	21.57	17.37	16.60	18.12
k_2	17.44	18.68	18.38	18.24
k_3	15.81	18.77	19.84	18.46
\bar{k}_1	7.19	5.79	5.53	6.04
\bar{k}_2	5.81	6.23	6.13	6.08
\bar{k}_3	5.27	6.26	6.61	6.15
R	1.92	0.47	1.08	0.11

压 > 送丝速度 > 空列, 得到最优水平组合为 $A_1B_3C_3$, 对应的最优参数为焊接速度 4 mm/s, 送丝速度 80 mm/s, 焊接电压 20 V。其中焊接速度和焊接电压对于单层单道焊道熔宽影响较为显著, 主要是因为一定送丝速度下焊接速度决定了熔融态金属铺展的时间大小, 而焊接电压的增加会使焊接时的热输入增加, 焊道因此在表面张力的作用下变宽。空列极差最小, 说明其他因素对试验结果影响不大。同理, 对焊道余高影响因素进行分析(表 5), 各因素影响主次为送丝速度 > 焊接速度 > 焊接电压 > 空列, 可以

表5 余高极差分析
Tab.5 Range analyses of height

水平	焊接速度	送丝速度	焊接电压	空列
k_1	8.23	6.38	8.03	7.71
k_2	7.67	7.51	7.63	7.67
k_3	6.83	8.84	7.07	7.35
\bar{k}_1	2.74	2.13	2.68	2.57
\bar{k}_2	2.56	2.50	2.54	2.56
\bar{k}_3	2.28	2.95	2.36	2.45
R	0.46	0.82	0.32	0.12

看出其他因素对焊道余高影响依旧很小。可以得到最优水平组合为 $A_1B_3C_1$ ，对应的最优参数为焊接速度 4mm/s, 送丝速度 80mm/s, 焊接电压 18V。送丝速度对焊道余高影响最为显著, 这是因为当其他因素不变时送丝速度的增大会降低基板的热输入量, 焊道高度因此增加, 此外, 送丝速度的提高也会增加单位时间内总的金属熔敷量, 所以送丝速度对焊道余高的影响较大。电弧电压增大时, 焊道变宽的同时金属熔敷量却不变, 故焊道高度减小, 因此, 电弧电压与焊道余高呈负相关关系。

综上, 在堆焊成形时可选用低焊接速度搭配高送丝速度的方法实现高效率成形, 焊道成形宽度和高度可根据个人实际需求通过调节电压来进行控制, 后文试验采用其中的高电压水平组合进行。

2.2 搭接量试验

采用最优水平组合中高电压组合 $A_1B_3C_3$, 即焊接速度 4mm/s, 送丝速度 80mm/s, 焊接电压 20V 的条件下进行了搭接量试验。图 5 为三种不同搭接量的试验样本截面和搭接焊道表面形貌。从图 5(a) 中可以看出欠搭接组波峰和波谷间距较大, 经测量均值为 0.58mm。理想搭接组搭接较为平整, 间距较小, 均值为 0.22mm, 成形表面基本平整。过搭接组均值为 0.41mm, 成形表面出现了明显凸起, 堆焊过程易产生粘枪现象, 给后续成形过程带来了障碍。

2.3 单层多道零件成形

借助之前正交试验得到的最优工艺参数 (焊接速度 4mm/s, 送丝速度 80mm/s, 焊接电压 20V) 结合该组参数成形焊道计算出的最优搭接距离 ($b=3.39\text{mm}$), 在另一块相同材料的基板上进行了单层多道堆焊试验, 试验结果如图 6 所示, 可以看出成形表面平整度较好, 能满足一些对精度要求不高的零件成形。

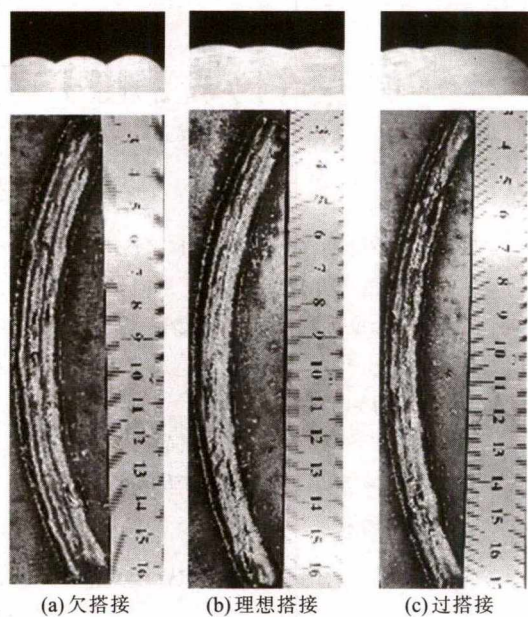


图 5 不同搭接量对比

Fig.5 Comparison of different overlap states

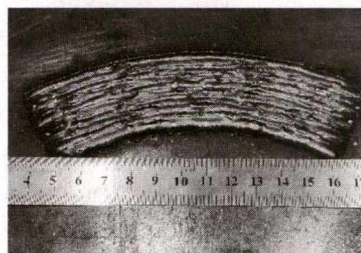


图 6 多道堆焊成形

Fig.6 Multi-pass surfacing forming

3 结论

(1) 采用正交试验的极差分析法, 优化了堆焊成形的工艺参数, 即最优参数为焊接速度 4mm/s, 送丝速度 80mm/s, 焊接电压 20V。对成形焊宽影响显著度大小为: 焊接速度 > 焊接电压 > 送丝速度。而对于成形余高, 影响显著度大小为: 送丝速度 > 焊接速度 > 焊接电压。

(2) 建立了堆焊焊道搭接量模型, 分析了焊道尺寸和相邻焊道间最佳搭接量的关系, 通过试验验证了该模型的可靠性。

参考文献:

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013(4):1-4.
- [2] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016(2):122-128.
- [3] Duda T, Raghavan L V. 3D Metal Printing Technology [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(29):103-110.

(下转第 143 页)

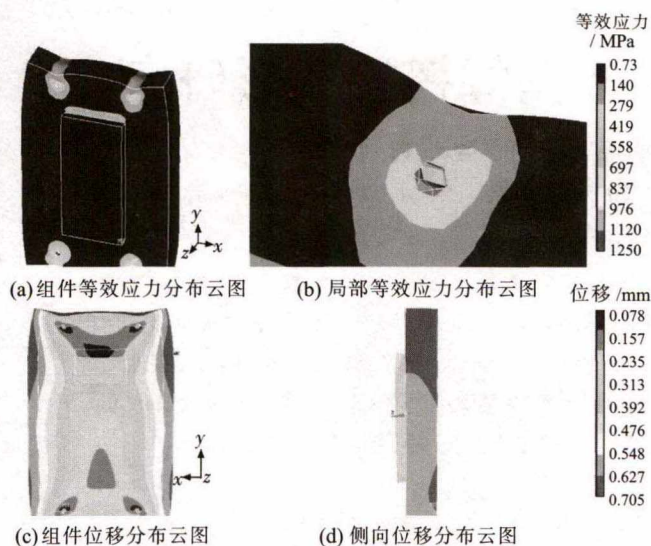


图7 600℃保温8 min的等效应力及位移

Fig.7 Equivalent stress and displacement at 600℃holding for 8 min

过程中为了方便组件的装夹定位,在肩角位置上开有四个装配工艺孔,组对钎焊时先在孔中导入销钉进行定位,再用夹具加紧然后装炉。从模拟的结果可以看出,实时变化的温度场使被焊组件在三个维度上都发生热膨胀。销钉的存在阻碍了这一过程,导致在局部区域产生应力集中和不均匀的变形。

组件的等效应力云图如图7(a)、(b)所示,由定位销钉和温度梯度引发的热应力主要集中在四个销钉附近,应力场梯度较大,以销钉为中心向四周扩展,在组件边缘处应力释放。图7(c)、(d)为应力场引发的组件位移云图,在热应力的作用下,变形主要集中在长度和宽度方向,并且在这两个维度上的位移分布极不均匀。根据组件位移云图7(c)来分析,销钉附近的材料膨胀受限程度较高,距离销钉较远位置可以自由伸展,所以导致在长度和宽度方向上,在不同区间内的位移累加效应截然不同。与此相反,在厚度方向整体位移量相差不大,原因是厚度方向尺寸较小,热应变累加效应不强。

根据模拟结果,在升温过程中波导组件的长度

方向上最大累积变形量可达2mm,这种热应力引起的变形在冷却后会恢复,对组件的最终几何形状和尺寸精度不会产生太大的影响,但有销钉存在的局部区域会留有残余应力和变形。降低销钉与母材之间的预紧力,同时采用面接触夹具在长度和宽度方向上进行弹性强约束,能基本消除热应力引起的局部残余的位移变形。

5 结论

(1) 钎料中的Mg和Si元素沿 α -Al晶界向母材方向扩散,产生明显的晶间渗入现象,导致了钎缝界面处弥散宽化,轧制态母材的粗化晶界和大量位错线为元素扩散提供了通道。

(2) 在母材近缝区发生较大程度的再结晶,晶间渗入等界面传质行为为再结晶提供了形核的必要条件,母材近缝区轧制态的变形晶粒转变为等轴晶。

(3) 数值模拟的应力和应变云图显示,焊接变形主要集中在长度和宽度方向,并且在这两个维度上的位移分布极不均匀,残余变形主要产生在有销钉强约束的位置。降低销钉与组件的预紧力,能有效降低热应力位移,缓解焊接变形。

参考文献:

- [1] 王振江,高增,王鹏,等. 6063铝合金真空钎焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2019,48(5):72-76.
- [2] Chen Yilan, Qi Yuefeng, Liu Xu. Microstructure and mechanical properties of AlSiCu10-10 filler meter brazing 6063 aluminum alloy[J]. China Welding,2018,27(4):52-56.
- [3] 陈学永,马力,黄胜利. 铝合金液冷机箱真空钎焊工艺及变形控制研究[J]. 航空精密制造技术,2019,55(3):49-52.
- [4] 李玉龙,刘达繁,茶映鹏. 6061铝合金超声波点焊温度场数值模拟及试验[J]. 焊接学报,2017,38(4):13-16.
- [5] 朱志明,柴锋,梁丰瑞,等. 低合金钢感应淬火温度场模拟与优化[J]. 钢铁研究学报,2017,29(1):75-80.
- [6] 赵雨涛,康慧,曲平. 基于ANSYS平台的真空钎焊炉加热体的数值模拟[J]. 热处理,2007,22(4):53-56.
- [7] 梁媛媛,朱胜. 机器人MIG焊工艺参数对焊缝尺寸的影响[J]. 沈阳工业大学学报,2013(3):304-308.
- [8] 孙东升,赵来伟,张跃,等. 焊接工艺参数对焊缝成形和组织性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(1):223-225.
- [9] 孟凡军,朱胜,巴德玛,等. 基于GMAW堆焊成形的间隔焊道搭接量模型[J]. 焊接学报,2011(2):69-71.
- [10] 江祥胜,许燕,周建平,等. 基于GMAW堆焊成形的堆焊层焊道搭接量及力学性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46(11):28-31.

(上接第139页)

- [4] 刘勇,任香会,常云龙,等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺,2018,47(19):15-19.
- [5] 周好斌,高东,刘皓. 焊接快速成形技术的发展现状及思考[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2018(2):106-112.
- [6] 陈茂爱,蒋元宁,武传松. 焊接电流波形对波控短路过渡过程及焊缝形状尺寸的影响[J]. 机械工程学报,2014(4):85-91.
- [7] 梁媛媛,朱胜. 机器人MIG焊工艺参数对焊缝尺寸的影响