

TIG电弧增材制造AZ31镁合金成形尺寸控制研究

李子淇, 常子金, 姜自昊, 曹千卉, 曾才有, 从保强

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191

摘要: 镁合金作为航天装备结构件轻量化和一体化制造的关键轻质结构金属材料, 电弧增材制造镁合金过程中成形尺寸精确控制一直是研究的重点。基于二次回归通用旋转组合试验设计法, 建立了电弧增材关键工艺参数(基值电流、送丝速度、运动速度)与成形尺寸特征参数间的回归模型, 采用响应面法深入分析了单一参数及耦合作用对增材成形尺寸的影响规律。结果表明: 在试验设计参数范围内, 基值电流的增大对成形高度起抑制作用, 对成形宽度起促进作用; 随着送丝速度的增大, 成形宽度略微减小, 层高呈现增大趋势; 运动速度的增大使得沉积层的层高和层宽均减小。各工艺参数对成形高度影响最大的是送丝速度, 其次是基值电流, 影响最小的是运动速度; 基值电流对成形宽度影响最大, 其次是运动速度, 对成形宽度影响最小的是送丝速度。

关键词: 镁合金; 电弧增材制造; 工艺参数; 成形尺寸

Research on forming dimension control of TIG wire-arc additive manufacturing AZ31 magnesium alloy

LI Ziqi, CHANG Zijin, JIANG Zihao, CAO Qianhui, ZENG Caiyou, CONG Baoqiang

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Magnesium alloys are the key lightweight structural metal materials for the integrated manufacturing of aerospace structural components. Accurately controlling the forming dimension of wire-arc additively manufactured magnesium alloys has always been the focus of research. Based on quadratic regression universal rotation combination design, this work established a regression models between process parameters (such as base current, wire feed speed and travel speed) and forming characteristic dimensions. The effect of single process parameter and coupling on the forming demension was also analyzed by the response surface method. Obtained results show that the increasing base current inhibits the forming height and promotes the forming width within the range of experimental design parameters. With the increase of wire feed speed, the layer width decreases slightly and the layer height increases. As the travel speed increases, the height and width of the deposition layer decrease. The wire feed speed has the most significant influence on the forming height. While, the travel speed shows a minor influence. The base current has the most prominent impact on the forming width, while a weak influence of the wire feed speed on the forming width was found.

Keywords: magnesium alloy; wire-arc additive manufacturing; process parameters; forming dimension

1 序言

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、阻尼性能好等优异的性能, 在汽车工业、航空航天、生

物医学等领域展现出巨大的应用潜力^[1]。随着镁合金应用的推广, 制备大中型复杂镁合金构件的需求更加迫切, 采用传统的锻造、轧制和挤压等方法制

备具有复杂几何形状和优异性能的大尺寸镁合金构件具有极大的挑战性^[2]。电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 是一种基于丝材的定向能量沉积方法, 通常采用电弧作为热源将金属丝材熔化, 基于逐层堆积原理, 实现金属构件的快速成形^[3]。与传统的加工方式相比, 增材制造无需模具、生产周期短、材料利用率高, 在大尺寸轻合金构件成形中有着独特的优势^[4]。

TAKAGI等^[5]采用MIG电弧增材制造工艺研究了焊接电流、焊枪行进速度对AZ31B镁合金构件成形质量的影响, 得出焊枪行进速度降低会导致单道沉积层的宽度和高度增加, 随着焊接电流的增加, 单道沉积层的宽度和高度也增加。HU等^[6]采用CMT工艺提高AZ31镁合金成形稳定性, 结果表明, 在脉冲CMT模式下, 4m/min的送丝速度可以获得良好的熔敷层形貌和润湿角, 实现镁合金的多道次沉积。WANG等^[7]研究了不同的CMT工艺参数对AZ31镁合金薄壁件表面形貌和成形尺寸的影响, 结果表明选取脉冲强、等效热输入低的CMT工艺参数, 能够获得具备良好成形形貌、宽而浅且润湿性好的沉积层。尽管已有研究探讨了单道单层电弧增材成形的工艺参数, 但这些研究多采用固定工艺参数的方法, 尚未充分考虑多工艺参数交互作用下的电弧增材成形。

本研究通过采用二次回归通用旋转组合设计法, 建立了电弧增材关键工艺参数 (基值电流、送丝速度、运动速度) 与成形尺寸之间的回归模型。深入分析关键工艺参数及其交互作用对镁合金电弧增材成形尺寸的影响规律, 为大尺寸镁合金的高效制造提供理论和技术支持。

2 试验材料及方法

本研究采用直径1.2 mm的AZ31镁合金丝材作为填充金属, 以AZ31B镁合金轧制板 (300mm×120mm×10mm) 为基板, 试验前采用机械打磨的方法对基板打磨抛光, 以去除其表面的氧化膜, 使用无水乙醇擦拭表面后吹干。

试验所用的钨极气体保护电弧增材制造系统如图1所示。由图1可知, 该系统主要包括: 自主研发的超音频脉冲方波电流电源 (HPVP-500)、工业机器人 (ABB IRB1410, 重复定位精度0.05mm)、焊

枪 (TOPTIG)、送丝机 (Fronius KD 7000, 可实现在0.2~22m/min速度范围内稳定送丝)、气体保护系统 (纯度99.99%的氩气, 气体流量15L/min) 和工装平台。试验采用直径3.2mm的钨极作为电极, 相关固定参数预设值为: 变极性频率100Hz、变极性占空比80%、高频脉冲电流50A、高频脉冲电流频率40kHz、高频脉冲占空比40%。试验中前3层采用固定增材工艺参数沉积, 获得良好稳定的打底沉积层, 并在此基础上进行不同工艺参数的增材试验, 每组试验增加5层, 沉积长度100mm。

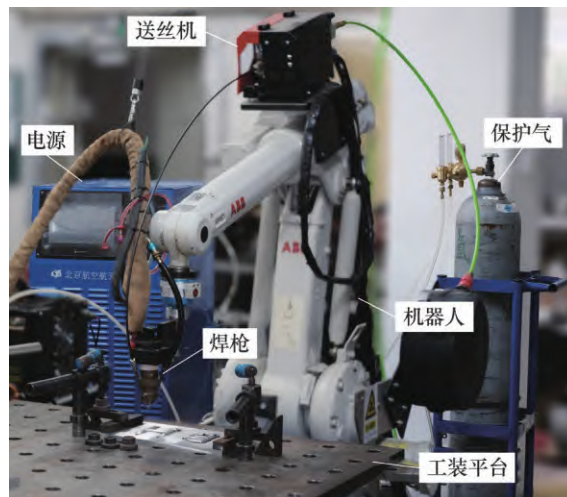


图1 钨极气体保护电弧增材制造系统

本研究采用二次回归通用旋转组合设计的方法, 试验设计为3个因素、2个水平, 确定基值电流、送丝速度、运动速度为影响成形尺寸的主要因素, 使用Design-Expert软件的 Central Composite Design模块分析增材成形尺寸关于不同工艺参数的数学模型及各参数间的交互耦合作用。根据前期镁合金电弧增材成形工艺的试验可知, 基值电流70~120A, 送丝速度2~6m/min, 运动速度100~300mm/min可作为试验因子的范围, 将表1中3个工艺参数的各水平分别转化为规范变量A、B、C, 得

表1 AZ31镁合金TIG电弧增材工艺参数水平编码

工艺参数	水平编码				
	-1.628	-1	0	1	1.628
基值电流/A	71	80	95	110	119
送丝速度 / (cm/min)	237	300	400	500	563
运动速度 / (mm/min)	119	150	200	250	281

到AZ31镁合金TIG电弧增材工艺参数的水平编码值和对应水平的取值。

采用线切割对20组沉积样品的成形稳定区中部进行横截面试样切取,使用Image-Pro Plus软件对试验结果的成形尺寸特征参数进行测量。成形尺寸特征参数包括层高和层宽。层高 H 为单个沉积层的平均高度,由试样总高度除以试样堆积层数计算得到;层宽 W 为有效宽度 W_e ,即不包括增材构件侧面起伏部分的范围内所能截取的最大宽度,AZ31电弧增材构件成形尺寸如图2所示。

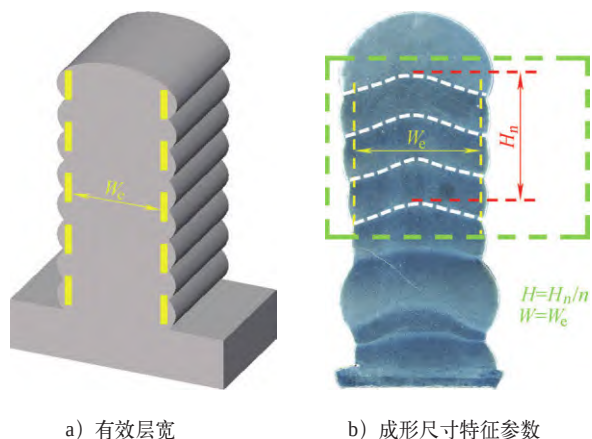


图2 AZ31电弧增材构件成形尺寸

3 试验结果分析与讨论

3.1 成形尺寸模型构建

根据三因素五水平的二次回归通用旋转组合法,得到AZ31镁合金增材试验的具体实施方案,见表2。表2中列出了各工艺参数下层高及层宽的测量值,20组AZ31镁合金单道多层增材试样如图3所示。根据表2的试验结果,使用Design-Expert软件采用回归分析法,建立增材关键工艺参数(基值电流、送丝速度、运动速度)与成形尺寸特征参数(层高 H 、层宽 W)间的回归模型。

AZ31镁合金增材构件层高-工艺参数的回归方程为

$$H = 4.17368 - 0.027942I + 0.019463v_w - 0.035267v_f - 8.4 \times 10^{-5}I \cdot v_w + 9.2 \times 10^{-5}I \cdot v_f - 1.9 \times 10^{-5}v_f \cdot v_w + 8.8 \times 10^{-5}I^2 - 1.72624 \times 10^{-6}v_w^2 + 6.7 \times 10^{-5}v_f^2 \quad (1)$$

AZ31镁合金增材构件层宽-工艺参数的回归方程为

$$W = 7.01833 + 0.124655I - 0.003284v_w - 0.048422v_f - 9.7 \times 10^{-5}I \cdot v_w + 1.08 \times 10^{-4}I \cdot v_f + 8.25 \times 10^{-6}v_w \cdot v_f - 1.46 \times 10^{-4}I^2 + 1.1 \times 10^{-5}v_w^2 + 2.1 \times 10^{-5}v_f^2 \quad (2)$$

表2 AZ31镁合金增材试验方案及结果

试验编号	规范变量 z_j			增材工艺参数 x_j			层高 H/mm	层宽 W/mm
	z_1	z_2	z_3	A 基值电流/A	B 送丝速度 /(cm/min)	C 运动速度 /(mm/min)		
1	1	1	1	110	500	250	2.5	9.0
2	1	1	-1	110	500	150	3.1	11.6
3	1	-1	1	110	300	250	1.6	8.4
4	1	-1	-1	110	300	150	1.9	10.5
5	-1	1	1	80	500	250	3.5	5.3
6	-1	1	-1	80	500	150	4.4	8.3
7	-1	-1	1	80	300	250	2.1	4.9
8	-1	-1	-1	80	300	150	2.6	7.3
9	-1.628	0	0	71	400	200	3.0	6.2
10	1.628	0	0	119	400	200	2.0	9.9
11	0	-1.628	0	95	237	200	1.4	8.5
12	0	1.628	0	95	563	200	3.4	8.4
13	0	0	-1.628	95	400	119	3.7	9.6
14	0	0	1.628	95	400	281	2.2	7.0
15	0	0	0	95	400	200	2.9	8.0
16	0	0	0	95	400	200	2.7	7.5
17	0	0	0	95	400	200	2.8	7.9
18	0	0	0	95	400	200	2.4	8.1
19	0	0	0	95	400	200	2.3	8.3
20	0	0	0	95	400	200	2.0	8.7

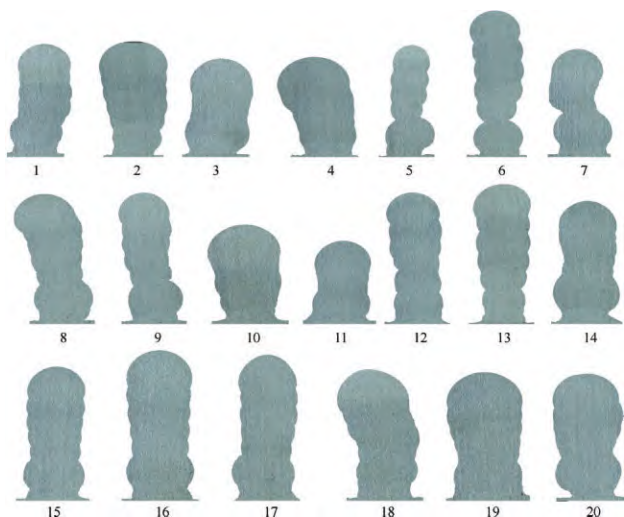


图3 20组AZ31镁合金增材试样截面

式中 I ——增材基值电流 (A) ;
 v_w ——送丝速度 (cm/min) ;
 v_f ——运动速度 (mm/min) 。

AZ31镁合金成形尺寸-工艺参数的回归模型的方差分析结果见表3,采用F检验法对回归方程进行显著性检验, F 检验的结果显示回归方程对应的 p 值均小于0.01,反映回归模型显著水平高,方程具有统计学意义^[8]。由表3可知,两方程的统计量 R^2 分别为92.09%和90.91%,表明模型对试验数据的拟合程度较高, R^2 (调整)综合考虑了模型中试验因子的个数和样本大小,由表3可知, R^2 (调整)与 R^2 较接近,表明建立的回归模型准确度较高。为了判断回归模型的可接受度,需要对模型进行失拟检验,结果显示 $p_{Lif} > 0.05$,表明方程不失拟,回归方程能够在试验设计取值范围内充分说明增材工艺参数与层高、层宽的函数关系。

表3 AZ31镁合金成形尺寸-工艺参数的回归模型方差分析

回归模型	统计量					
	F	p	R^2 (%)	R^2 (调整) (%)	F_{Lif}	p_{Lif}
层高-工艺参数	12.94	0.0002	92.09	84.98	0.6106	0.6993
层宽-工艺参数	11	0.0004	90.91	82.73	4.46	0.0631

3.2 AZ31镁合金构件层高的响应曲面分析

响应曲面和等高线图可以直观地反应不同工艺参数及其交互作用对增材成形尺寸的影响。根据回归方程(1)和(2),在固定一个工艺参数的前提

下可得到另外两个工艺参数对层高影响程度的响应曲面和等高线图,由此可分析工艺参数对单道试样成形高度的影响规律。TIG电弧增材AZ31镁合金构件层高的响应曲面和等高线图如图4所示。由图4a、b可见,响应面随送丝速度的增加呈现上升趋势,这是由于在单位时间内丝材和基板材料的热输入不变的情况下,等量金属丝的热输入降低,熔敷金属在水平方向的流动能力降低,在沉积方向上堆积^[9],于是沿沉积方向的材料沉积高度增加;同时,响应曲面随基值电流的增加呈现下降趋势,因而较小的送丝速度与较大的基值电流有利于获得较低的层高。在取值范围内,随着送丝速度的增加及基值电流的减小,层高将由1.2mm递增到4.5mm,送丝速度对层高的影响较基值电流更为显著。

图4c、d为层高关于基值电流和运动速度的响应曲面和等高线图,基值电流和运动速度的增加对层高起到协同抑制作用,在取值范围内,随着基值电流和运动速度的同步增大,层高将由4.4mm递减到1.8mm。随着运动速度的增加,单位面积上电弧热源停留时间缩短,受加热的金属丝也减少,同时电流的增大促进熔滴铺展,从而降低层高^[10]。当运动速度 < 200 mm/min时,图4d中等高线分布密集,表明此时层高受交互作用的影响比较显著,这意味着低运动速度下交互作用对沉积层高度的影响大于高运动速度。

图4e为运动速度与送丝速度对层高的响应曲面,随着送丝速度的增加及运动速度的降低,层高呈现上升趋势,这主要是因为送丝速度的提高和运动速度的降低增加了单位长度上金属的熔敷量,电弧与沉积层的作用时间也增加,更多的液态金属使得层高增加。随着送丝速度的增加与运动速度的减小,沉积层高度将由1.3mm递增到4.8mm。当运动速度 < 187 mm/min时,图4f中等高线分布密集,层高变化较运动速度 > 187 mm/min时更显著,此时层高受耦合作用影响比较显著,由于此时运动速度较低,单位长度上丝材的沉积量较大,层高上升趋势较低运动速度明显。

3.3 AZ31镁合金构件层宽的响应曲面分析

TIG电弧增材AZ31镁合金构件层宽的响应曲面和等高线图如图5所示。从图5a、b可看出,响应面随增材电流的增加呈现上升趋势,随着电流增大,

电弧能量变大,层宽增加趋势明显;送丝速度的增加使响应曲面呈略微下降趋势,随送丝速度的增加,等量金属丝的热输入降低,金属熔滴铺展程度变小,层宽略微降低。在取值范围内,层宽变化范围为6.2~11mm,基值电流对层宽的影响较送丝速度更为明显。

图5c、d表明响应曲面随着基值电流的增加及运动速度的减小呈现上升趋势,层宽逐渐增加,由3.9mm递增到12mm,这表明基值电流的增加和运动速度的提高存在显著的对抗作用。主要是因为运动速度的降低使得沉积层单位长度上电弧作用时间增加,同时基值电流的增加会促进熔滴充分铺展,容

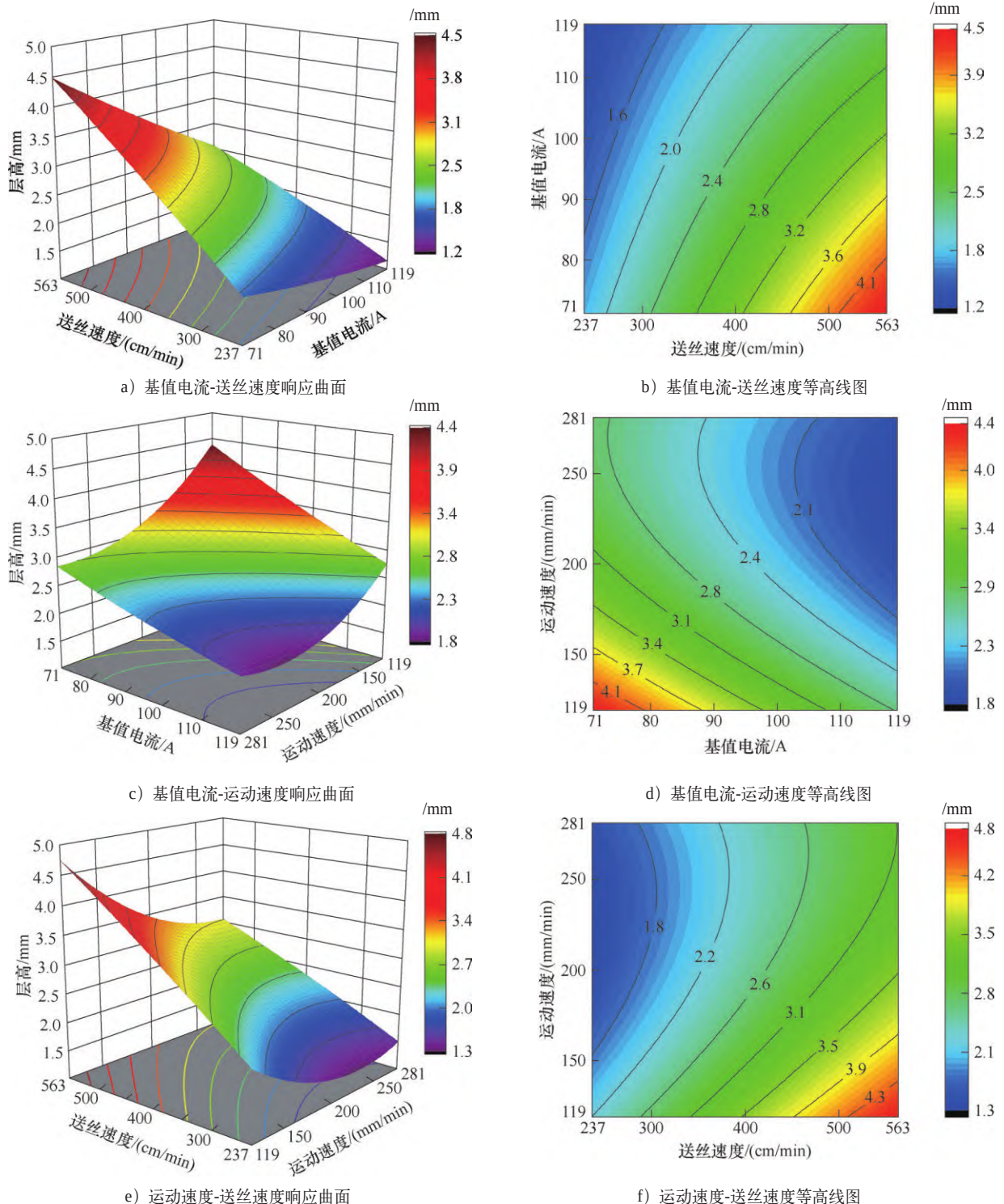
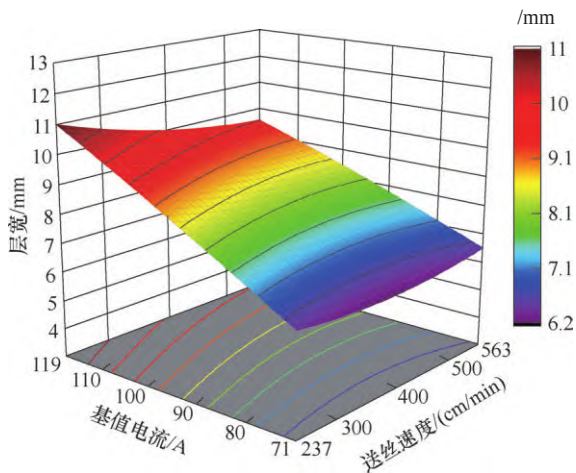


图4 TIG电弧增材AZ31镁合金构件层高的响应曲面和等高线图

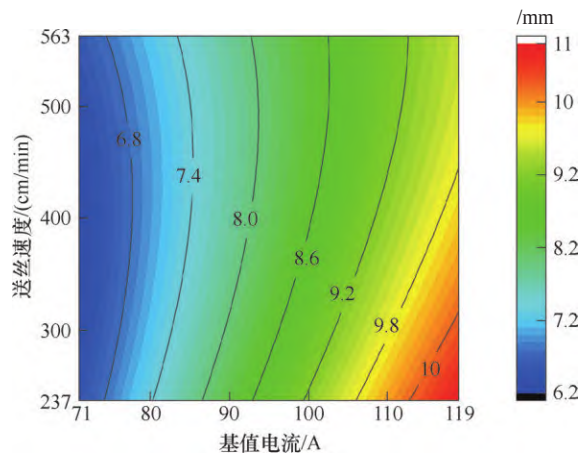
易获得较宽的沉积层。

由图5e、f可知，当送丝速度 $>450\text{cm/min}$ 时，两因素间的交互作用对层宽作用不明显，运动速度对层宽的影响较送丝速度更明显，在该取值范围内

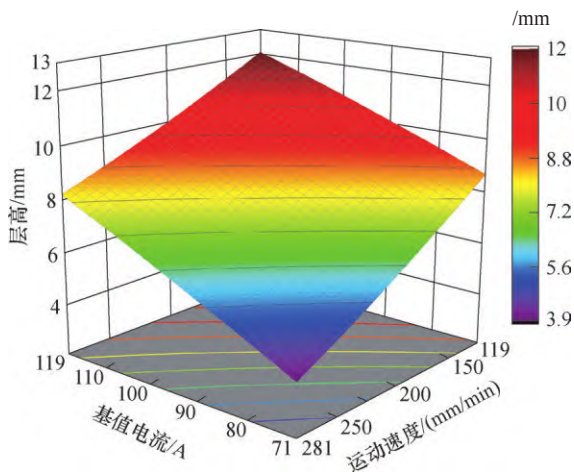
随着运动速度降低，层宽呈增加趋势；当送丝速度 $<450\text{cm/min}$ 时，随着运动速度及送丝速度的减小，单位长度上电弧作用时间更久，等量金属丝的热输入增加，金属熔滴更易铺展，最终表现为层宽



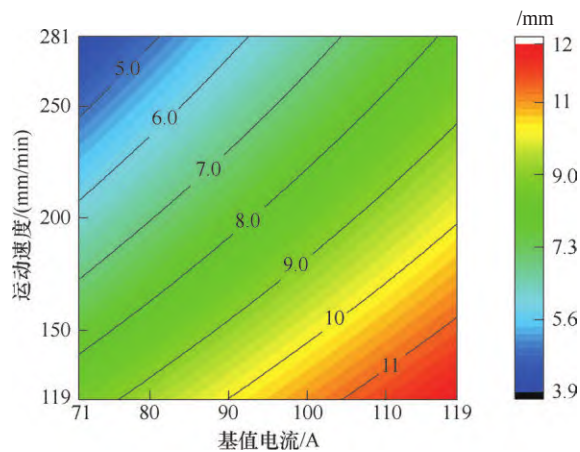
a) 基值电流-送丝速度响应曲面



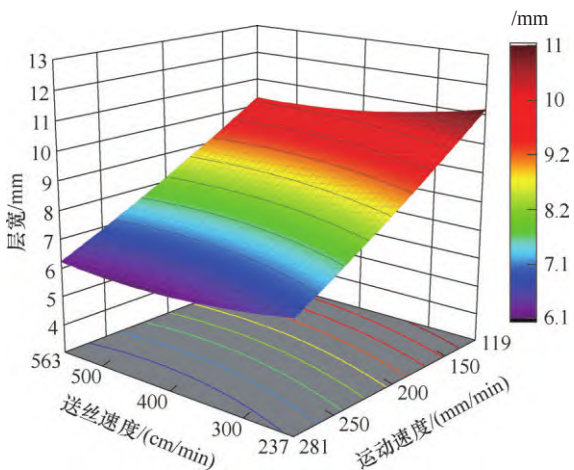
b) 基值电流-送丝速度等高线图



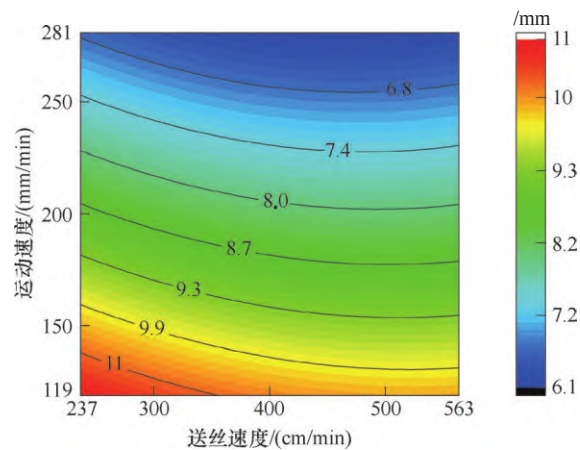
c) 基值电流-运动速度响应曲面



d) 基值电流-运动速度等高线图



e) 运动速度-送丝速度响应曲面



f) 运动速度-送丝速度等高线图

图5 TIG电弧增材AZ31镁合金构件层宽的响应曲面和等高线图

增加。

4 结束语

本研究通过二次回归通用旋转组合设计和响应曲面法建立了TIG电弧增材制造AZ31镁合金工艺参数与成形尺寸的回归模型,分析了增材基值电流、送丝速度、运动速度及其耦合作用对镁合金电弧增材成形尺寸的影响规律,主要结论如下。

1) 在试验设计参数范围内,随基值电流增大,成形高度降低而成形宽度增大;随送丝速度增大,成形宽度略微减小,成形高度呈现增大趋势;运动速度的增大使得沉积层的层高和层宽均减小。

2) 送丝速度是对成形高度影响最显著的参数,其次是基值电流,影响最小的是运动速度;基值电流对成形宽度影响最大,其次是运动速度,影响最小的是送丝速度。

3) 送丝速度的增加和基值电流的减小,对沉积层层高、层宽均存在正向影响;基值电流和运动速度的增加对层高存在负向影响,对层宽存在正向影响;送丝速度的增加及运动速度的降低,对层高、层宽均存在正向影响。

参考文献:

- [1] 丁文江, 曾小勤. 中国Mg材料研发与应用[J]. 金属学报, 2010, 46 (11): 1450-1457.
- [2] LI X, FANG X, FANG D, et al. On the excellent strength-ductility synergy of wire-arc directed energy deposited Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy via manipulating precipitates[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103794.
- [3] 余圣甫, 禹润镇, 何天英, 等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40 (3): 198-209.
- [4] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏观结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49 (6): 129-135.
- [5] TAKAGI H, SASAHARA H, ABE T, et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 498-507.
- [6] HU S, ZHANG H, WANG Z, et al. The arc characteristics of cold metal transfer welding

with AZ31 magnesium alloy wire[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 298-306.

- [7] WANG P, ZHANG H, ZHU H, et al. Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: Processing, microstructure, and mechanical behavior[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116895.
- [8] ROSE R, MANISEKAR K, BALASUBRAMANIAN V, et al. Prediction and optimization of pulsed current tungsten inert gas welding parameters to attain maximum tensile strength in AZ61A magnesium alloy[J]. Materials & Design, 2012, 37: 334-348.
- [9] ROSLI N, ALKAHARI M R, RAMLI F, et al. Parametric optimisation of micro plasma welding for wire arc additive manufacturing by response surface methodology[J]. Manufacturing Technology, 2022, 22 (1): 59-70.
- [10] YEHOV Y, DA SILVA L J, SCOTTI A. Balancing WAAM production costs and wall surface quality through parameter selection: a case study of an Al-Mg₅ alloy multilayer-non-oscillated single pass wall[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3 (2): 32. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>.

MW 20240525