

基于响应面法的超高频电弧增材制造工艺优化

贾志宏¹, 万晓慧¹, 郭德伦¹

(中国航空制造技术研究院, 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京, 100024)

摘要: 采用响应面法对超高频电弧增材制造工艺(UHFP-GTAW)进行了优化. 通过建立函数关系得到了焊缝尺寸关于焊接电流、送丝速度及焊接速度的多元二次回归模型, 并运用方差分析验证了回归模型的可靠性. 设置优化条件选取了相应的焊接参数, 并将焊缝尺寸的预测结果与试验结果进行了对比. 结果表明, 模型预测尺寸与实际试验测得的焊缝尺寸误差分别为焊缝宽度 5.4% 和焊层高度 6.6%. 对沉积成形的 GH4169 高温合金薄壁构件分别进行了水平方向和垂直方向的拉伸力学性能测试, 其强度极限分别达到 1 130.93 和 1 126.04 MPa, 断后伸长率分别为 18.1% 和 16.56%, 断面收缩率分别达到 20.6% 和 20.2%.

关键词: 增材制造; 超高频; 响应面法; 工艺优化; 力学性能

中图分类号: TG 455 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190807005

0 序言

电弧增材制造技术(wire and arc additive manufacturing, WAAM)作为一种非常有前景的增材制造方法, 能够将传统氩弧焊的低成本、高效率等优点良好的结合起来, 同时与 MIG 焊相比, 以 TIG 作为热源的电弧增材制造工艺(gas tungsten arc welding, GTAW)过程更加稳定, 且热输入相对更低, 有利于得到成形质量更好的结构件^[1-2].

WAAM 工艺是一种多变量且耦合性较强的工艺过程, 如焊接速度(v)、送丝速度(v_s)、电流值大小(I)、电弧脉冲频率(f)等诸多因素可以影响到焊缝的形貌尺寸乃至整个结构件的最终成形质量^[3]. 因此, 对沉积过程进行路径规划以及焊接参数的优化是影响增材制造成形件质量的重要因素. Ding 等人^[4-6]通过模型计算和试验分析, 对 WAAM 工艺进行路径规划, 同时运用响应面法做了一部分焊接参数优化的相关工作, 其研究结果指出, WAAM 工艺往往对成形精度的要求比较高, 这不仅关系到增材过程的沉积效率, 同时也会影响成形件的综合性能表现. 基于优化后的焊缝截面模型, 其指出对于多道搭接的增材路径, 当相邻焊缝中心的距离约为焊缝宽度的 73.8% 时, 沉积过程较稳定, 成形件质量较好, 并结合相关的经验公式优化焊接参数,

沉积成形出了相应的叶轮构件, 具有较大的参考价值. Fu 等人^[7]采用响应面法(response surface method, RSM)对电弧增材工艺进行了参数优化设计, 以焊接速度、送丝速度、电弧脉冲时间和频率以及电压作为输入变量, 运用 Box-Behnken 法得到五因素三水平的试验设计组, 其结果表明, 以优化后的焊接参数进行沉积的成形件具有良好的表面质量, 焊缝尺寸波动小, 材料组织均匀且具有较好的力学性能. Geng 等人^[8]运用响应面法建立焊接参数与焊缝尺寸之间预测模型, 其预测的焊缝高度和焊缝宽度的数值大小与试验测得的实际焊缝数据误差分别为 4.5% 和 7.1%, 证明该方法的计算模型可靠有效.

通过响应面法对超高频电弧增材制造工艺进行了参数优化, 对比了优化后的焊接参数成形所得到的焊缝尺寸与理论尺寸的误差, 并以此沉积成形得到 GH4169 高温合金薄壁构件, 在进行热处理之后还测试了试样的力学性能, 考察在优化参数下成形的构件, 其力学性能如何, 为后续超高频电弧增材工艺的制定提供参考依据.

1 试验设计及工艺

1.1 试验设计

当试验过程中的参数变量与其响应变量存在非线性关系时, 响应面法能够通过建立多元二次回归方程模型, 拟合因子和响应量之间的函数关系,

找到在已知优化范围内的最佳试验方案^[9]。试验运用 Design-Expert 软件,选取对焊缝形貌影响最为显著的 3 个因素——焊接电流 (I_b)、送丝速度 (v_s) 及焊接速度 (v),作为输入变量,焊缝宽度 (D) 及焊层高度 (H) 作为响应量进行优化设计,然后以试验组参数沉积成形 GH4169 高温合金焊缝并统计尺寸数据,寻找相对最优的参数配比。

经过前期试验和选择,试验若采用中心复合设计 (CCD) 法对焊接参数进行设计,处于 CCD 空间模型轴点处的若干组焊接参数的数值,超出预先选定的优化范围过多,焊接参数的不匹配导致焊缝成形质量并不理想或单道焊缝的沉积过程难以顺利完成,故转而采用能够使参数范围合理且效率更高的 Box-Bekhen(BBD) 法,设计了三因素、三水平的试验组,所选的焊接参数及其数值范围如表 1 所示。相关研究表明,电流频率在 0 ~ 80 kHz 范围内变化时,金属的熔深和熔宽在 60 kHz 时达到最大值^[10],这样有利于焊缝成形时截面轮廓呈较扁而平缓的抛物线状,有利于后续金属沉积层的熔覆。超高频电流的频率若过大,则熔宽的下降可能会导致焊缝变细;频率过小则可能会影响超高频电流对成形件组织晶粒的细化作用,故此处选取脉冲频率 (f) 为 60 kHz。

表 1 焊接参数及优化范围
Table 1 Weld parameters and their limits

焊接参数	优化范围		
	-1	0	1
基值电流 I_b/A	160	200	240
送丝速度 $v_s/(cm \cdot min^{-1})$	200	300	400
焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	25	35	45

表 1 中焊接参数的选取主要以送丝速度为出发点,为提高电弧增材成形速率,根据试验经验,取送丝速度最小为 200 cm/min。试验所用的 HPVP 600A 型号超高频脉冲焊接电源最大电流为 300 A,因此当脉冲幅值为 60 A 时,最大基值电流为 240 A。

该电弧增材工艺分为两个阶段,初始阶段在预热底板之后,为了使成形焊缝足够宽、后续成形的板件有效厚度能够保持不低于 5 mm(根据航标板状拉伸试样所允许的最小厚度选取),焊接电流需设到最大,焊接速度取 30 cm/min,送丝速度为 200 cm/min,待焊缝形貌稳定后,电流大小逐渐减至 160 A 以降低热输入,且根据此时电流的熔丝能力,送丝速度最高取 400 cm/min,开始稳定的沉积阶段。当送丝速度一定,焊接速度在 25 ~ 45 cm/min 范围内时,焊丝的熔覆过程相对稳定。若送丝速度和焊接速度过大或电流过小,则会由于焊丝未及时熔覆而导致焊缝形貌变形,影响成形质量和薄壁件的有效厚度;若焊接速度过小或电流过大,则会显著增加系统的热输入,增加构件的残余应力,而且在送丝速度比较大而焊接速度较小的情况下,会出现“顶丝”的现象,焊丝直插进熔池,可能会造成送丝嘴甚至焊枪的位置偏移,从而影响弧长(一般地,钨极距离焊缝表面的距离,即弧长必须至少保持在大于等于 5 mm 的范围,金属的熔覆成形过程最稳定)。若设备熔丝能力较弱、送丝速度较小,才可以考虑保持弧长在 3 mm 左右,具体需要参考焊层高度来制定。所以综合以上考虑,制定了表 1 的优化范围。

1.2 试验设备及材料

试验其它参数设置如表 2 所示。设计后的试验组焊接参数如表 3 所示。试验采用 UHFP-GTAW 工艺 (ultra-high frequency pulsed gas tungsten arc welding, UHFP-GTAW),焊机为 HPVP600A 型号超高频脉冲焊接电源,焊接设备为 OTC 六轴联动焊接机器人,焊丝采用 $\phi 1.2$ mm 的 GH4169 高温合金焊丝,底板为尺寸 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 15 mm 的低碳钢板,使用纯度 99.99% 的氩气作为保护气。试验前底板须预热到至少 200 $^{\circ}C$ 以尽量接近连续沉积时系统的热环境条件。试验组焊缝的长度统一为 10 cm,且每隔 3 cm 取一点测量其焊缝宽度及焊层高度,取 3 个点并计算平均值。17 组焊缝的平均尺寸数据如表 3 中的焊缝宽度及焊层高度所示。

表 2 试验参数设置
Table 2 Parameters of power supply used in the experiments

脉冲幅值 I_m/A	占空比 $\delta(\%)$	弧长 l/mm	焊接电流 I/A	熄弧时间 t_1/s	预通气时间 t_2/s	滞后气时间 t_3/s	保护气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
60	50	5.0	20	1.6 ~ 2.0	2.0	6.0	15

表 3 试验设计组参数及测量数据
Table 3 Experimental design matrix and the measured data

序号	编码矩阵			输入变量			响应量(mm)	
				A: 基值电流 I_b/A	B: 送丝速度 $v_s/(cm \cdot min^{-1})$	C: 焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	焊缝宽度 D	焊层高度 H
1	0.000	0.000	0.000	200	300	35	6.12	2.34
2	-1.000	0.000	1.000	160	300	45	5.91	2.57
3	0.000	0.000	0.000	200	300	35	6.08	2.46
4	1.000	0.000	1.000	240	300	45	6.36	2.53
5	-1.000	1.000	0.000	160	400	35	6.18	2.84
6	0.000	0.000	0.000	200	300	35	6.23	2.44
7	0.000	0.000	0.000	200	300	35	6.2	2.48
8	1.000	1.000	0.000	240	400	35	6.33	2.6
9	0.000	1.000	-1.000	200	400	25	6.21	2.65
10	0.000	1.000	1.000	200	400	45	5.97	2.76
11	1.000	-1.000	0.000	240	200	35	6.13	2.34
12	-1.000	-1.000	0.000	160	200	35	5.86	2.36
13	0.000	0.000	0.000	200	300	35	6.15	2.52
14	1.000	0.000	-1.000	240	300	25	6.82	2.56
15	0.000	-1.000	1.000	200	200	45	5.94	2.23
16	-1.000	0.000	-1.000	160	300	25	6.4	2.53
17	0.000	-1.000	-1.000	200	200	25	6.01	2.12

2 结果与讨论

2.1 数学模型建立与拟合结果分析

方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 主要检验模型及其失拟度的显著性 (significant or not significant), 根据 Adeq. Precision 值的大小判断模型的可行性. 而设计模型的建立主要依据表 3 中输

入变量与响应量的数据, 其函数关系可以统一表示为 $y = f(I_b, v_s, v)$, 若将响应量 y 扩展为二阶多项式回归方程的形式, 则如公式 (1) 所示, 即

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

在计算得到各项系数之后, 焊缝宽度和焊层高度与 3 个输入变量间的函数关系式分别如式 (2)、式 (3) 所示, 式中各系数已保留到小数点后两位.

$$D = +8.57 - 0.04I_b + 0.01v_s - 0.06v + 9.66 \times 10^{-5}I_b^2 - 1.86 \times 10^{-5}v_s^2 + 6.20 \times 10^{-4}v^2 \quad (2)$$

$$H = +2.18 - 6.13 \times 10^{-3}I_b + 4.79 \times 10^{-3}v_s - 1.05 \times 10^{-3}v + 4.38 \times 10^{-5}I_b v + 1.86 \times 10^{-5}I_b^2 - 5.28 \times 10^{-6}v_s^2 + 9.75 \times 10^{-5}v^2 \quad (3)$$

从表 4 中可以看出, 焊缝宽度的模型 F 值为 10.74, 概率 $P > F$ 的值为 0.000 7 (小于 0.05), 故模型为显著, 具有统计学意义, 且拟合回归方程的决定系数 R^2 值为 0.865 7 (> 0.80), 比较接近于 1, 从这两点来看说明模型的拟合方程可以接受. 失拟度 (lack of fit) 值为 4.5, 结果为不显著, 说明模型可靠. 此外, 拟合的结果还可以用预估决定系数 $R^2(\text{pred R-squared})$ 和校正决定系数 $R^2(\text{adj R-squared})$ 之间的接近程度来判断. 校正决定系数 R^2 是

扣除了回归方程中所受到的包含项数的影响的相关系数, 因而可以更准确的反应模型的好坏^[11]. 二者相差越小, 说明模型越可靠. 表 3 中的 Pred R-Squared 和 Adj R-Squared 值分别为 0.704 8 和 0.785 0, 数值比较接近, 从这一点看拟合方程同样可以接受. 在焊缝宽度的表达式中, A, B, C, A^2, B^2, C^2 为响应量的显著因素, AB, AC, BC 的 P 值分别为 0.63、0.91 和 0.50, 为非显著因素, 因此在 model 选项卡中将其消去, 以确保模型精度. 模型的信噪

比 (signal to noise ratio)Adeq Precision 值的大小须大于 4 方可接受, 从表 4 可知, 焊缝宽度的回归模型信噪比为 13.365, 故该模型可以用于预测. 同理可以分析焊层高度的回归模型方差结果, 如表 5 所示. 焊层高度的模型 F 值为 15.28, 概率 $P > F$ 的值为 0.000 2(小于 0.05), 模型为显著, 拟合回归方程的决定系数 R^2 值为 0.922 4(> 0.80), 接近于 1, 说明模型的拟合方程可以接受. 失拟度值为 0.86, 结

表 4 焊缝宽度的回归模型方差分析结果
Table 4 Resulting ANOVA table for regression model of bead width D

来源	平方和	自由度	均方	模型显著性 F	失拟项 $P > F$
模型 Model	0.73	6	0.12	10.74	0.000 7 (显著)
$A-I_b$	0.21	1	0.21	18.47	0.001 6
$B-v_s$	0.07	1	0.07	6.24	0.031 5
$C-v$	0.20	1	0.20	17.63	0.001 8
A^2	0.10	1	0.10	8.93	0.013 6
B^2	0.14	1	0.14	12.87	0.005 0
C^2	0.016	1	0.016	1.44	0.058 2
残差	0.11	10	0.011		
失拟度	0.098	6	0.016	4.50	0.083 5 (不显著)
绝对误差	0.015	4	3.63×10^{-3}		
总离差	0.84	16			
标准差	0.11	决定系数	0.865 7		
均值	6.17	校正决定系数	0.785 0		
试验精确度	1.72	预估决定系数	0.704 8		
权重	0.41	信噪比	13.365		

表 5 焊层高度的回归模型方差分析结果
Table 5 Resulting ANOVA table for regression model of bead height H

来源	平方和	自由度	均方	模型显著性 F	失拟项 $P > F$
模型	0.23	7	0.033	15.28	0.000 2 (显著)
$A-I_b$	6.125×10^{-4}	1	6.125×10^{-4}	0.29	0.005 6
$B-v_s$	0.21	1	0.21	98.74	$< 0.000 1$
$C-v$	6.125×10^{-4}	1	6.125×10^{-4}	0.29	0.005 6
AC	1.225×10^{-3}	1	1.225×10^{-3}	0.57	0.03 4
A^2	3.727×10^{-3}	1	3.727×10^{-3}	1.74	0.019 5
B^2	0.012	1	0.012	5.48	0.044 0
C^2	4.003×10^{-4}	1	4.003×10^{-4}	0.19	0.075 5
残差	0.019	9	2.139×10^{-3}		
失拟度	9.975×10^{-3}	5	1.995×10^{-3}	0.86	0.574 1 (不显著)
绝对误差	9.280×10^{-3}	4	2.320×10^{-3}		
标准差	0.046	决定系数	0.922 4		
均值	2.50	预估决定系数	0.862 0		
试验精确度	1.85	预估决定系数	0.748 6		
权重	0.062	信噪比	11.424		

果为不显著,说明模型可靠. 预估决定系数和校正决定系数分别为 0.748 6 和 0.862 0, 数值比较接近, 从这一点看拟合方程同样可以接受. 在焊层高度的表达式中, $A, B, C, AC, A^2, B^2, C^2$ 为响应量的显著因素, AB 项和 BC 项的 P 值分别为 0.84 和 0.49, 为非显著因素, 因此在 model 选项卡中将其消去, 以确保模型精度. 焊层高度的回归模型信噪比为 11.424, 同样可用于预测.

图 1 为焊缝宽度与焊层高度模型的残差正态概率分布, 从图中可以看出, 两个模型的残差分布均近似沿着一条直线, 说明回归模型拟合得较好, 误差分布较均匀, 没有偏差较大的奇异点, 模型可以较准确地预测响应量值. 为了能够更准确地预测焊缝尺寸随焊接参数变化的趋势, 还需要了解各输入变量及其交互项 (如 AB, AC, BC 等) 对响应量本质的影响, 一方面这样有助于优化靠近上述中心点附近的设计区域, 另一方面当试验中的焊缝几何尺寸偏离预定尺寸时, 变量的分析可以为焊接参数的微调提供理论指导. 如图 2 所示, 图 2a, 2b 分别给出的是焊缝宽度和焊层高度

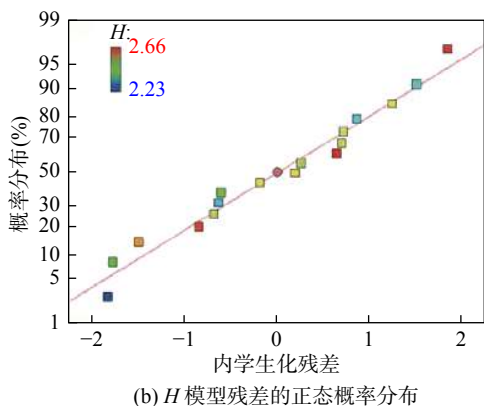
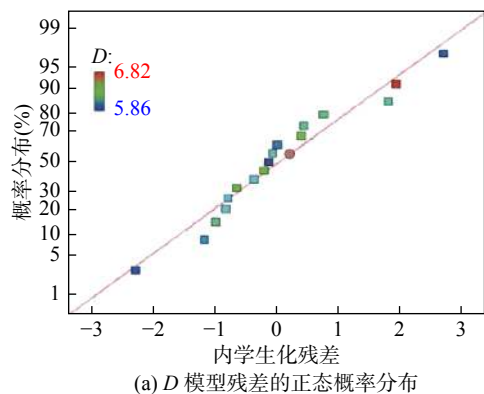


图 1 模型残差的正态概率分布

Fig. 1 Normal probability plot of residuals for the model. (a) weld width; (b) welding layer height

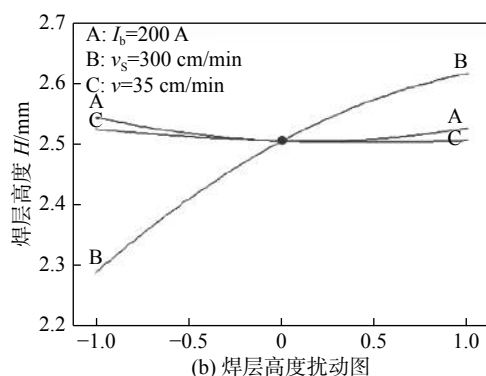
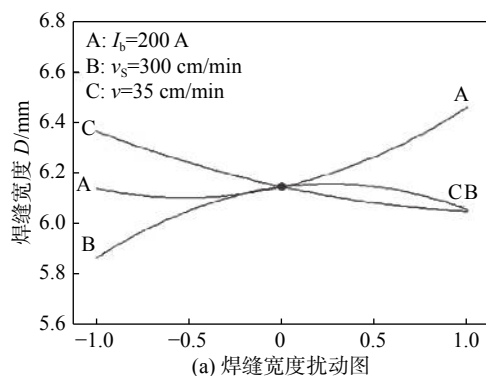


图 2 焊缝宽度和焊层高度分别作为中心参照点偏离量的函数扰动趋势图

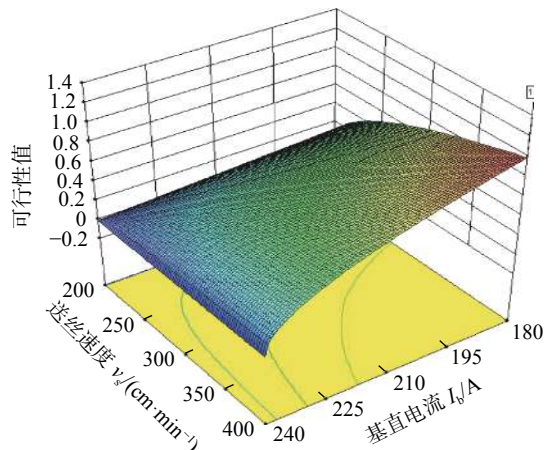
Fig. 2 Plot of width and height perturbation as a function of deviation from reference point respectively. (a) weld width; (b) weld layer height

在各输入变量偏离中心点后, 其对应的变化趋势. 图 2a 中, 基值电流 $I_b(A)$ 和焊接速度 $v_s(C)$ 对焊缝宽度的影响呈相反的趋势, 当 A 值偏离中心参照点时, 随着电流的增大, 焊缝宽度逐渐增大, 而当焊接速度升高时, 焊缝宽度大小则呈现递减的趋势, 送丝速度对焊缝宽度的影响趋势较平缓, 随着送丝速度的增加, 焊缝宽度略呈现先增大后减小的趋势. 同理, 从图 2b 中可以看出, 电流和焊接速度的大小对焊层高度的影响较平缓, H 值的波动主要来源于送丝速度的变化, 当送丝速度偏离中心点的程度增大时, B 值越大, 则焊层高度越大, 反之, 值越小.

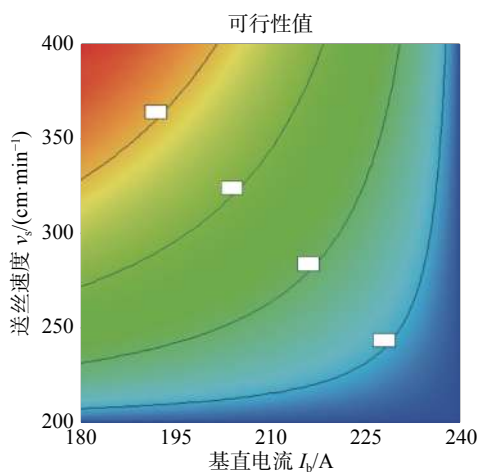
2.2 焊接参数的择优选取

在分析和验证模型的可靠性之后, 对焊接参数进行优化. 为减少焊缝沉积成形过程中的热输入, 对电流的期望是尽量将其减小, 故在“Criteria”选项卡中设置基值电流 I_b 为 minimize; 为提高沉积效率, 送丝速度设为 maximize; 焊接速度在优化范围选取即可保证沉积过程的稳定进行, 设为“in range”. 该条件下方案的可行性指数分布如图 3 所示, 在靠近图中的红色区域处取得最优参数, 方案可行

性值为 1. 以此条件优化后得到的结果为基值电流为 180.00 A, 送丝速度为 400.00 cm/min, 焊接速度为 33.10 cm/min, 预测的焊缝宽度为 6.054 mm, 焊层高度为 2.628 mm. 经试验验证, 该参数下沉积成形的焊缝形貌及尺寸如图 4 所示. 其焊缝宽度和焊层高度分别为 6.381 和 2.454 mm, 与优化模型预测出的尺寸偏差分别为 5.4% 和 6.6%, 误差大小可以接受, 证明优化结果可靠.



(a) 方案可行性的概率分布三维模型图



(b) 方案可行性的概率分布等高线图

图 3 当焊接速度 $v = 33.10$ cm/min 时, 送丝速度和基值电流对方案可行性的影响

Fig. 3 Effect of base current and wire feed speed on desirability while $v = 33.10$ cm/min. (a) three-dimensional pattern of desire probability; (b) contour map of desire probability

2.3 构件成形及性能测试

以优化后的焊接参数: $I_b = 180.00$ A, $v_s = 400.00$ cm/min, $v = 33.10$ cm/min, 其它参数按表 2 设置, 沉积成形尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的薄壁构件, 如图 5a 所示. 成形件实际厚度略大于 6 mm, 在优化范围内, 薄壁件的侧面平整度较好, 但由于过热仍有较多不平整的地方, 侧壁层层

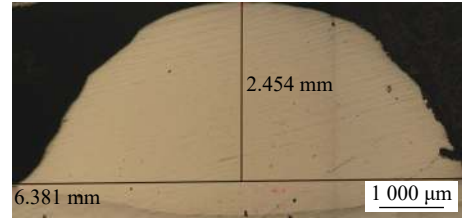


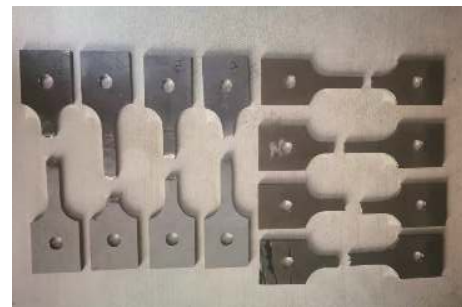
图 4 $I_b = 180.00$ A, $v_s = 400.00$ cm/min, $v = 33.10$ cm/min 的条件下, 焊缝截面尺寸的光镜照片

Fig. 4 Cross-section OM image of single-layer figuration while the optimized parameters are used: $I_b = 180.00$ A, $v_s = 400.00$ cm/min, $v = 33.10$ cm/min

堆积的结构特点十分明显. 在对薄壁件进行了 GH4169 高温合金的标准固溶时效热处理之后, 还对其力学性能进行了测试, 测试试样如图 5b 所示. 试验测得的构件拉伸力学性能结果如表 6.



(a) 成形件形貌



(b) 板状拉伸试样 (88 mm × 22 mm × 2 mm)

图 5 采用优化参数成形的 GH4169 高温合金薄壁件和拉伸力学试样

Fig. 5 Thin-wall part of GH4169 superalloy with the optimized parameters and the tensile test specimens. (a) morphology of forming part; (b) tensile test specimens

拉伸试样分别为横向和纵向, 即焊接速度方向和垂直沉积方向. 由表 6 可以看到, 构件在水平方向 (H) 和垂直方向 (Z) 上强度极限的平均值分别达到了 1 130.93 和 1 126.04 MPa, 高于铸件的性能, 但与锻件性能相差约 300 MPa 左右的水平. 断后伸长率和断面收缩率平均在 20% 左右, 塑性良好. 表中数据均为拉伸试验结果的平均值, 为验证数据结

表 6 用优化参数成形的 GH4169 薄壁件力学测试结果
Table 6 Results of tensile test of GH4169 thin-wall part deposited with optimized parameters

取样方向	屈服强度 $R_{0.2}/\text{MPa}$	强度极限 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
横向(H)	902.57	1 130.93	18.1	20.6
纵向(Z)	890.87	1 126.04	16.56	20.2

果的可靠性,还分别计算了两组试样的屈服强度、强度极限、断后伸长率和断面收缩率的标准方差,其标准差结果依次为:横向 1.73/3.92/1.98/0.49;纵向 0.06/0.49/1.16/0.07,数据波动均在可接受范围内,证明结果可靠。

3 结论

(1) 文中建立了焊接参数与焊缝尺寸之间的回归模型,计算了各输入变量对响应量的耦合作用,并通过方差分析验证了该模型的可靠性。计算得到优化后的焊接参数为基值电流 $I_b = 180.00\text{A}$,送丝速度 $v_s = 400.00\text{ cm/min}$,焊接速度 $v = 33.10\text{ cm/min}$,并进行了试验验证。验证结果表明,模型预测的焊缝宽度和焊层高度与试验测得的相应数据误差分别为 5.4% 和 6.6%。

(2) 以择优参数成形了 GH4169 高温合金薄壁件,并测试了其拉伸力学性能。构件在水平方向与垂直方向强度极限的平均水平分别达到了 1 130.93 和 1 126.04 MPa,高于铸件的性能且较接近锻件水平,塑性较好。

参考文献

- [1] Daniel Clark, Martin R Bache, Mark T Whittaker, *et al.* Micro-structural characterization of a polycrystalline nickel based super-alloy processed via tungsten inert gas shaped metal deposition[J]. Metallurgical and Material S Transactions B, 2010, 41B: 1346 – 1353.
- [2] Alessandro Busachia, John Erkoyuncua, Paul Colegroveb, *et al.* Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications[J]. Procedia CIRP, 2015, 37: 48-53.
- [3] Jun Xiong, Ziqiu Yin, Weihua Zhang, *et al.* Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 100 – 106.
- [4] Ding Donghong, Pan Zengxi, Dominic Cuiuri, *et al.* A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-wall structures[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 34: 8 – 19.
- [5] Ding Donghong, Pan Zengxi, Dominic Cuiuri, *et al.* Bead modeling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32 – 42.
- [6] Ding Donghong, Pan Zengxi, Dominic Cuiuri, *et al.* Process planning strategy for wire and arc additive manufacturing[J]. Robotics Welding, Intelligence and Automation, 2015, 363: 437 – 449.
- [7] Fu Youheng, Wang Guilan, Zhang Haiou, *et al.* Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel[J]. Internation Journal of Advanced Manufacture Technology, 2017, 91: 301 – 313.
- [8] Geng Haibin, Xiong Jiangtao, Huang Dan, *et al.* A prediction model of layer geometric size in wire and arc additive manufacturing using response surface methodology[J]. Internation Journal of Advanced Manufacture Technology, 2015, 93: 175 – 186.
- [9] Lin W S, Lee B Y, Wu C L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning[J]. Materials Process Technology, 2001, 108: 286 – 293.
- [10] 李玉龙, 从保强, 杨明轩, 等. 2219-T87 高强铝合金 HPVP-GTAW 焊缝成型参数 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(5): 712 – 716.
Li Yulong, Cong Baoqiang, Yang Mingxuan, *et al.* Well arreurance of 2219-T87 high strenght aluminum alloy produced by HPVP-GTAW process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(5): 712 – 716.
- [11] 徐茂, 刘双宇, 李彦清, 等. 基于响应面法的 SPCC 与 65Mn 异种金属激光焊接工艺参数优化 [J]. 应用激光, 2017, 37(3): 362 – 366.
Xu mao, Liu Shuangyu, Li Yanqing, *et al.* Optimization of SPCC and 65Mn dissimilar metal laser welding process parameters based on response surface methodology[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 362 – 366.

第一作者简介: 贾志宏, 1989 年出生, 博士研究生; 主要从事高温合金、不锈钢等材料的超高频电弧增材制造的研究; Email: jzh0204050956@163.com.

通信作者简介: 郭德伦, 研究员, 博士研究生导师, Email: 490906574@qq.com.

(编辑: 崔炜)

technology, not only the rare earth inclusions with beneficial morphology, size and distribution can be formed in the steel, but also the growth of original austenite grain can be restrained during the welding process. It is actually for these reasons that the welding performance of the steel are boosted. In this study, a kind of 0.18% C high-strength steel with rare earth is produced. The thermal cycling processes under 4 kinds of heat input are simulated by the Gleeble-3500 thermal simulator. The microstructure transformation of HAZ is observed by the optical microscope. The impact absorption energy of HAZ is measured by the testing machine. The changes of original austenite grain size under different cooling rates are measured. The results show that when the welding heat input is 25 kJ/cm, the HAZ microstructure is mainly martensite with fine grain size, and then the impact toughness and hardness are the highest level. When the heat input is higher than 50 kJ/cm, the upper bainite and granular bainite are formed, and the grains grow up gradually, resulting in the decrease of both toughness and hardness. The C content of the test steel is 0.18%. During the thermal cycle the coarse martensite structure appears, forming the harden structure without the acicular ferrite structure.

Key words: high strength steel; rare earth; welding heat affected zone; microstructure; properties

Optimization of UHFP-GTAW process based on response surface method

JIA Zhihong¹, WAN Xiaohui¹, GUO Delun¹ (Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China). pp 90-96

Abstract: The ultra-high frequency pulsed gas tungsten arc welding process was optimized by response surface method(RSM). By establishing the functional relation, the regression model of weld bead size on welding current(I_b), wire feed speed(WFS) and travel speed(TS) is obtained, and the reliability of the regression model is verified by variance analysis. The corresponding welding parameters are selected by setting the optimization conditions and the size of weld bead is predicted. The error between the predicted size from the model and the actual size is 5.4% of bead width and 6.6% of bead height, respectively. After the deposition of thin-wall GH4169 superalloy part, the mechanical properties are tested, including the horizontal and vertical tensile properties, the ultimate strength are 1 130.93 MPa and 1 126.04 MPa, respectively, the elongation rate are 18.1% and 16.56%, respectively, the reduction of area are 20.6% and 20.2%, respectively.

Key words: additive manufacturing; ultra-high frequency; response surface method; process optimization; mechanical properties