

10CrNi3MoV 高强钢水下激光熔化沉积成形及组织性能研究

张志强^{1,2}, 王佳骥^{1,2}, 胡奉雅^{1,2}, 郭宁^{3,4,5}, 吴笛^{3,4}, 成奇^{3,4}, 付云龙^{3,4,5}

(1. 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 辽宁 鞍山 114009)

(2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009)

(3. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(4. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209)

(5. 中国广核集团-哈尔滨工业大学先进核能与新能源研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 我国自主研发10CrNi3MoV高强钢, 凭借其较高的强度、良好的韧性以及优异的抗爆性和耐腐蚀性能, 成为制造潜艇耐压壳体的重要结构材料。本工作采用响应曲面法研究了激光功率、扫描速度及送丝速度对水下单道沉积层稀释率和沉积角的影响, 得到了优化的水下单道沉积工艺参数。在此基础上, 研究了水环境对单道沉积层成形、微观组织及显微硬度的影响。与陆上相比, 由于水下激光熔化沉积过程的冷却速度更快, 因此水下沉积层的沉积角较大, 而稀释率较小。此外, 水下沉积层的微观组织较为细小, 导致水下沉积层的显微硬度较高。

关键词: 10CrNi3MoV 钢; 水下激光熔化沉积; 成形; 组织性能

中图分类号: TG456.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)03-0693-09

1 引言

海洋工程结构常年在海上作业, 面临极为恶劣的工作环境^[1]。除了承受结构本身的工作载荷外, 还需应对风暴、波浪、潮流等因素引起的附加载荷, 以及海水腐蚀、砂流磨蚀、地震或寒冷地区冰流的侵袭^[2-4]。此外, 海洋工程结构^[5-6]的主要部分通常位于水下, 一旦发生重大结构损伤或倾覆事故, 将会造成严重的生命财产损失。因此, 针对海洋工程的水下原位修复技术研究^[7-9]显得尤为紧迫。

水下激光焊接技术^[10-12]是常用的水下原位修复技术之一, 该技术主要可分为直接水下激光焊接和局部干法水下激光焊接两种类型。陆军装甲兵学院的秦航等人^[13]研究了中碳钢直接水下激光焊接的焊缝成形行为及其性能。研究表明, 在直接水下激光焊接过程中, 激光与工件表面之间会在水中形成一个“激光通道”, 而这一通道的稳定性对焊接过程的稳定性至关重要。不同的激光功率对应着不同的水深阈值, 当水深超过该阈值时, 水对激光的屏蔽作用将显著增强, 进而导致焊接过程无法顺利进行。

直接水下激光焊接技术受水深影响较大, 难以在较深水域中进行焊接操作^[14-16]; 而局部干法水下激光焊接则能够在更深的水域中实施焊接。天津大学姚杞^[17]采用水下局部干法激光焊接技术, 对1 mm厚的304不锈钢进行了实验, 重点研究了水深和保护气流量对焊缝成形及力学性能的影响。实验结果表明, 在固定水深条件下, 气流量增加会使焊缝的熔宽增大、熔深变浅; 而在气流量固定的情况下, 水深增加同样会导致焊缝熔宽变宽、熔深变浅。与常规激光焊接相比, 水下激光焊接由于改变了焊缝的散热方向和散热速度, 在相同焊接工艺条件下, 焊缝的熔深较浅。

水下激光焊接技术主要用于实现材料的二维连接, 而水下激光熔化沉积技术则能够直接制造材料结构并进行三维修复。哈尔滨工业大学 Cheng 等人^[18]研究了工艺参数对薄壁铝合金管水下激光熔化沉积的影响。他们还采用改进的水下激光熔化沉积焊炬, 成功实现了稳定的局部干腔, 制备了成形良好、无裂纹和气孔的TC4薄壁件^[19]。东南大学 Wang 等人^[20]利用水下激光熔化沉积技术成功修复了HSLA-100低合金高强钢的损伤区域。与陆上激光修复相比, 水下冷却速率较高, 热量积累较少,

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4601800); 中国广核集团-哈尔滨工业大学先进核能与新能源研究院项目(CGN-HIT202219)

作者简介: 张志强, 男, 1990年生, 博士, 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009, 电话: 0412-6721002, E-mail: zhangzhiqiang@ansteel.com.cn

从而使得 HSLA-100 增材修复试样中形成了更细小的马氏体。他们还对 TC4 钛合金进行了增材修复,通过有效控制氢含量,避免了氢致裂纹的产生,并通过优化激光功率和扫描速度策略,获得了较少冶金缺陷的试样^[21]。

10CrNi3MoV 钢作为船体结构钢,是我国自主研发的舰船材料,已广泛应用于常规潜艇的建造。该钢材含有 Ni、Cr、Mn、V、Cu 等合金元素。凭借其较高的强度、良好的韧性以及优异的抗爆性和耐腐蚀性能,10CrNi3MoV 钢成为制造潜艇耐压壳体的重要结构材料^[22-24]。

目前,关于 10CrNi3MoV 高强钢水下激光熔化沉积的研究较少。本工作采用水下激光熔化沉积技术,首先通过响应曲面法研究了工艺参数变化对水下沉积层稀释率和沉积角的影响,从而获得了优化的水下沉积层制备参数。在此基础上,采用相同的工艺参数制备了陆上沉积层,研究了水环境对沉积层成形、微观组织及显微硬度的影响,为水下激光熔化沉积技术的研究与应用提供了技术支持。

2 实验

本实验所用基体材料为 10CrNi3MoV 高强钢,其长宽高分别为 120、100 和 5 mm,其化学成分如表 1 所示。所用丝材为 JS590 焊丝,丝材直径为 1.2 mm,水下局部干法送丝式激光沉积试验系统如图 1 所示。包括半导体激光器、机械手、水冷机、水下激光沉积焊炬、送丝系统、空气压缩机及保护气瓶等。其中半导体激光器的最大输出

功率为 5 kW,水下激光沉积焊炬分为内外两层,外层由空气压缩机输入空气排水,创造局部干燥环境,内层由高压气瓶输入氩气排空气,保护熔池,减轻氧化。采用前置送丝方式,焊丝熔化的效率较高且过程稳定,送丝角度为 30°,既可以确保丝材熔化,同时基体吸收足够热量。

在试验开始前,使用砂纸对 10CrNi3MoV 基材进行打磨以去除其表面污物,随后利用乙醇将表面清洗干净,而后尽快进行试验。

响应曲面法(response surface methodology, RSM)是通过设计响应值与影响因子之间的一阶或二阶模型,从而实现真实函数关系的一种近似。为获得 RSM 在最优值周围的一个精确逼近并识别出最优试验条件或输入变量的最优水平组合,一般不采用一阶模型而是采用二阶模型来逼近^[2]。其中 Box-Behnken 设计是常用的一种多因素三水平的新型科学试验设计方法,适用于 2~5 个因素的优化试验。其优势在于运用了非线性拟合模型从而准确度较高,近年来被许多国内外研究者广泛采用^[14]。

本实验输入变量设定为激光功率(P)、扫描速度(V)及送丝速度(W),响应值设定为沉积层的稀释率(%)和沉积角(°)。将上述 3 种因素作为响应曲面法的研究因素,分别记为 X1、X2 和 X3。通过线性变换后以-1、0、1 分别代表其低、中及高水平。各因素的取值范围分别为:激光功率 2750~3250 W,焊接速度 8~14 mm/s,送丝速度 30~50 mm/s。进行编码,其结果如表 2 所示。

采用线切割沿垂直于沉积层方向切取金相试样并使

表1 10CrNi3MoV 高强钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 10CrNi3MoV high strength steel (wt%)

Si	C	Mn	Mo	Cr	Ni	V	S	P	Fe
0.17~0.37	0.07~0.14	0.30~0.60	0.02~0.27	0.90~1.20	2.30~3.00	0.04~0.10	≤0.012	≤0.02	Bal.

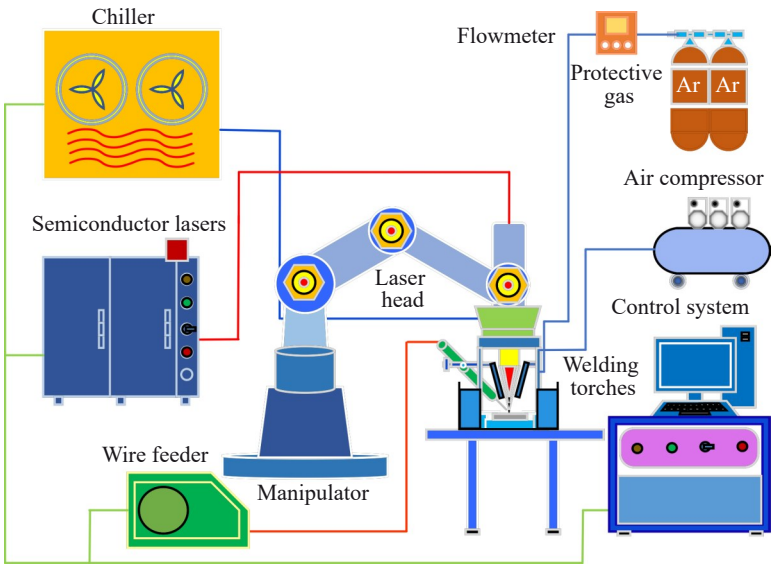


图1 局部干法水下送丝式激光沉积试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the local-dry underwater wire-feeding laser deposition test system

表2 水下激光沉积层工艺参数

Table 2 Process parameters of underwater laser deposition layers

Process parameter	Canonical level value		
	-1	0	1
Laser power, P/W	2750	3000	3250
Scanning speed, $V/mm\cdot s^{-1}$	8	11	14
Wire feeding speed, $W/mm\cdot s^{-1}$	30	40	50

用不同规格的砂纸对试样打磨至划痕方向一致,然后使用 0.5 μm 金刚石抛光剂对试样抛光至表面无划痕,最后使用 4vol% 硝酸乙醇溶液对抛光后的试样腐蚀。采用光学数码显微镜对腐蚀后试样横截面进行分析,利用扫描电镜对微观组织进行研究。采用手动转塔显微硬度计沿着沉积层中心线自上向下进行测量,加载载荷 4.9 N,加载时间 10 s,相邻硬度点间距为 0.1 mm,分析水下和陆上沉积层的显微硬度变化规律。

3 结果与讨论

3.1 公式

如表 3 所示,对建立的数学分析模型进行正态概率分布检验,从图 2 中可见,数据点均在直线两侧波动或者处于直线上,稀释率和沉积角都遵循正态分布,表明所建立的数学分析模型是可靠的。

3.2 数学模型优化

利用 Design-Expert 软件对稀释率模型进行方差分析,如表 4 所示,其中 df 指自由度; R^2 指决定系数; F 指 F 统计量。模型的显著性检验 P 小于 0.05,表示该模型显著,具有统计学意义, P 值越小则模型越显著。 P 、 V 、 W 、 VW 、 W^2 等的 P 值均小于 0.05,表明它们是显著的影响因素。失拟项表示模型与实验拟合的程度,即两者之间的差异,本模型的失拟项为 0.2653,表明失拟项不显著,对于模型有利。

为提高回归方程的拟合度,将不显著的影响因素均删除,对修改后的数学模型进行方差分析,如表 5 所示。稀释率的数学模型的 P 值 < 0.0001,数学模型的显著性提

表3 实验设计与沉积层的稀释率和沉积角

Table 3 Experimental design and the dilution rate and deposition angle of deposited layers

Experiment No.	Process parameter			Dilution rate/%	Deposition angle/(°)
	Laser power/ W	Scanning speed/ $mm\cdot s^{-1}$	Wire feeding speed/ $mm\cdot s^{-1}$		
1	2750	8	40	12.35	78.03
2	2750	11	30	22.73	45.7
3	2750	11	50	8.47	85.27
4	2750	14	40	15.14	51.49
5	3000	8	30	21.11	46.9
6	3000	8	50	12.33	83.35
7	3000	14	30	32.83	31.13
8	3000	14	50	11.89	62.03
9	3250	8	40	19.29	53.4
10	3250	11	30	27.08	39.34
11	3250	11	50	11.67	61.64
12	3250	14	40	18.01	49.07
13	3000	11	40	15.02	59
14	3000	11	40	17.42	61.32
15	3000	11	40	16.04	60.25
16	3000	11	40	13.88	58.22
17	3000	11	40	14.07	62.15

高。模型中所有影响因素的 P 值均小于 0.05,表明修改后模型中所有的因素均显著。另外,Adj R^2 与 Pred R^2 的差值小于 0.2,说明回归方程的拟合度较高,因此可以用该回归模型代替实验真实值来对实验结果进行分析。

对于稀释率,修改后的回归模型如下:

$$\eta=14.05958+8.68\times10^{-3}P+4.58625V-1.88582W-0.10133VW+0.028226W^2$$

在运用 Design-Expert 软件对沉积角模型开展方差分析过程中,如表 6 所示。结果表明模型的显著性检验 P 小于 0.05,这说明该模型显著。 P 、 V 、 W 、 PV 、 PW 、 V^2 、 W^2 的 P 值也都小于 0.05,表明它们是显著的影响因素。此

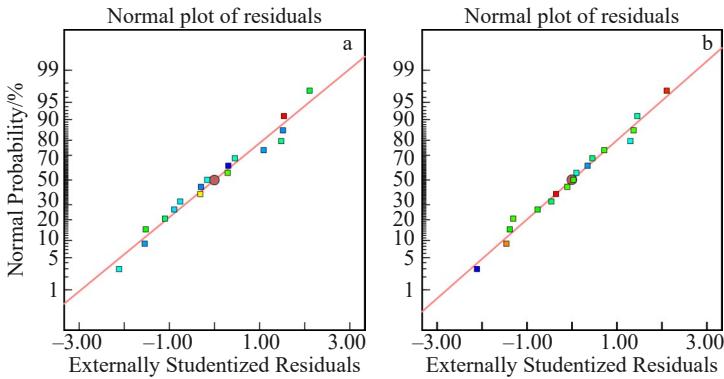


图2 稀释率和沉积角数学模型的适用性

Fig.2 Applicability of the mathematical model: (a) dilution rate and (b) deposition angle

表4 优化前稀释率方差分析

Table 4 Analysis of variance of dilution rate before optimization

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	584.47	9	64.94	21.42	0.0003*
<i>P</i>	37.67	1	37.67	12.43	0.0097*
<i>V</i>	20.45	1	20.45	6.75	0.0356*
<i>W</i>	440.90	1	440.90	145.45	<0.0001*
<i>PV</i>	4.14	1	4.14	1.37	0.2807**
<i>PW</i>	0.33	1	0.33	0.11	0.7509**
<i>VW</i>	36.97	1	36.97	12.19	0.0101*
<i>P</i> ²	1.37	1	1.37	0.45	0.5229**
<i>V</i> ²	9.25	1	9.25	3.05	0.1242**
<i>W</i> ²	32.35	1	32.35	10.67	0.0137*
Residual	21.22	7	3.03	-	-
Lack of fit	12.57	3	4.19	1.94	0.2653**
Pure error	8.65	4	2.16	-	-
Cor total	605.69	16	-	-	-
Standard deviation=1.74			<i>R</i> ² =0.9650		
Mean=17.02			Adj <i>R</i> ² =0.9199		
Coefficient of variation=10.23			Pred <i>R</i> ² =0.6456		
			Adep precision=17.540		

Note: * -significant, ** -non-significant, Adj *R*²-Adjusted *R*², Pred *R*²-Predicted *R*², Adep Precision-Adequate precision, Cor Total-Corrected total sum of squares

表5 优化后稀释率方差分析

Table 5 Analysis of variance of dilution rate after optimization

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	569.73	5	113.95	34.85	<0.0001*
<i>P</i>	37.67	1	37.67	11.52	0.0060*
<i>V</i>	20.45	1	20.45	6.25	0.0295*
<i>W</i>	440.90	1	440.90	134.86	<0.0001*
<i>VW</i>	36.97	1	36.97	12.19	0.0063*
<i>W</i> ²	33.74	1	33.74	11.31	0.0083*
Residual	35.96	11	3.27	-	-
Lack of fit	27.31	7	3.90	1.80	0.2968**
Pure error	8.65	4	2.16	-	-
Cor total	605.69	16	-	-	-
Standard deviation=1.81			<i>R</i> ² =0.9406		
Mean=17.02			Adj <i>R</i> ² =0.9136		
Coefficient of variation=10.62			Pred <i>R</i> ² =0.7938		
			Adep precision=20.161		

Note: * -significant, ** -non-significant

外,本模型的失拟项为0.4062,表明失拟项不显著,对于模型而言是有利的,Adj *R*²与Pred *R*²的差值小于0.2,说明回归方程的拟合度是比较高的。

为了进一步提升回归方程的拟合效果,于是对模型

表6 优化前沉积角方差分析

Table 6 Analysis of variance of deposition angle before optimization

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	3318.90	9	368.77	128.49	<0.0001*
<i>P</i>	406.70	1	406.70	141.71	<0.0001*
<i>V</i>	577.32	1	577.32	201.16	<0.0001*
<i>W</i>	2087.23	1	2087.23	727.28	<0.0001*
<i>PV</i>	123.32	1	123.32	42.97	0.0003*
<i>PW</i>	74.56	1	74.56	25.98	0.0014*
<i>VW</i>	7.70	1	7.70	2.68	0.1454**
<i>P</i> ²	3.242×10 ⁻³	1	3.242×10 ⁻³	1.130×10 ⁻³	0.9741**
<i>V</i> ²	19.69	1	19.69	6.86	0.0344*
<i>W</i> ²	19.88	1	19.88	6.93	0.0338*
Residual	20.09	7	2.87	-	-
Lack of fit	9.67	3	3.22	1.24	0.4062**
Pure error	10.42	4	2.60	-	-
Cor total	3338.99	16	-	-	-
Standard deviation=1.69			<i>R</i> ² =0.9940		
Mean=58.13			Adj <i>R</i> ² =0.9862		
Coefficient of variation=2.91			Pred <i>R</i> ² =0.9488		
			Adep precision=40.787		

Note: * -significant, ** -non-significant

进行了优化,删除不显著的影响因素,如表7所示。随后,对修改后的数学模型进行方差分析,沉积角的模型中所有的影响因素的*P*值均小于0.05,表明修改后模型中所有的因素均显著。另外,Adj *R*²与Pred *R*²的差值减小,回归方程的拟合效果进一步提升,说明优化后的回归模型可以有效地替代实验真实值,用于对实验结果的分析。

对于沉积角,修改后的回归模型如下:

$$\alpha=85.46067-0.040877P-19.75137V+8.53562W+7.40333\times10^{-3}PV-1.727\times10^{-3}PW-0.24047V^2-0.021742W^2$$

3.3 工艺参数对稀释率和沉积角的交互影响

利用上述建立的工艺参数与稀释率的回归模型,可以对该工艺参数范围内的稀释率进行仿真,得到一定工艺参数下的稀释率,同时分析工艺参数对稀释率的交互影响规律。

各个因素的扰动图如图3a所示,由图可知,增大激光功率对于稀释率的提高有积极的作用,这是由于随着激光功率增大,基体吸收的能量增多,熔池也增大,熔池凝固后形成的熔化区的面积增大,根据稀释率的计算公式,稀释率增大。扫描速度增大会使稀释率先降低后升高,在一定范围内,扫描速度增大会使激光的线能量降低,基体的熔化量减少,造成稀释率降低;但是其它工艺参数不变的情况下,扫描速度增大,还会使得单位长度的

表7 优化后沉积角方差分析

Table 7 Analysis of variance of deposition angle after optimization

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value
Model	3311.20	7	473.03	153.18	<0.0001*
<i>P</i>	406.70	1	406.70	131.70	<0.0001*
<i>V</i>	577.32	1	577.32	186.95	<0.0001*
<i>W</i>	2087.23	1	2087.23	675.88	<0.0001*
<i>PV</i>	123.32	1	123.32	39.93	0.0001*
<i>PW</i>	74.56	1	74.56	24.15	0.0008*
<i>V</i> ²	19.78	1	19.78	6.40	0.0322*
<i>W</i> ²	19.96	1	19.96	6.46	0.0316*
Residual	27.79	9	3.09	-	-
Lack of fit	17.37	5	3.47	1.33	0.4015**
Pure error	10.42	4	2.60	-	-
Cor total	3338.99	16	-	-	-

Standard deviation=1.76

Mean=58.13

Coefficient of variation=3.02

$R^2=0.9917$

Adj $R^2=0.9852$

Pred $R^2=0.9682$

Adep precision=45.136

Note: *-significant, **-non-significant

送丝量减少,从而导致沉积区域也减小,最终使得稀释率增大。随着送丝速度增大,稀释率急剧下降。这是由于送丝速度增大,用于熔化焊丝的激光能量增加,而用于熔化基体的能量减少,使得沉积区增大,而熔化区减小,由稀释率的计算公式可知,稀释率减小。由图3b~3d可知,当送丝速度参与变化时,稀释率的变化范围更大,说明送丝速度对于稀释率的影响更为显著。

同理,利用上述建立的工艺参数与沉积角的回归模型,可以对该工艺参数范围内的沉积角进行仿真,得到一定工艺参数下的沉积角,同时分析工艺参数对沉积角的交互影响规律。各个因素的扰动图如图4a所示,由图可知,激光功率和扫描速度的增大均对沉积角有消极作用,即随着激光功率和扫描速度增大,沉积角减小。激光功率增大,有利于提高基体与沉积层之间的润湿性,金属丝在基体上的铺展性更好,从而使得沉积角减小;其它工艺参数保持不变时,扫描速度增大,单位长度的熔丝量减少,沉积层的高度下降,使得沉积角减小。送丝速度的增大对沉积角有积极作用,这是由于送丝速度增大,沉积层的高度升高,另外,单位体积的热输入减小,基体与丝材之间的润湿性会下降,使得丝材在基体上的铺展性变差,

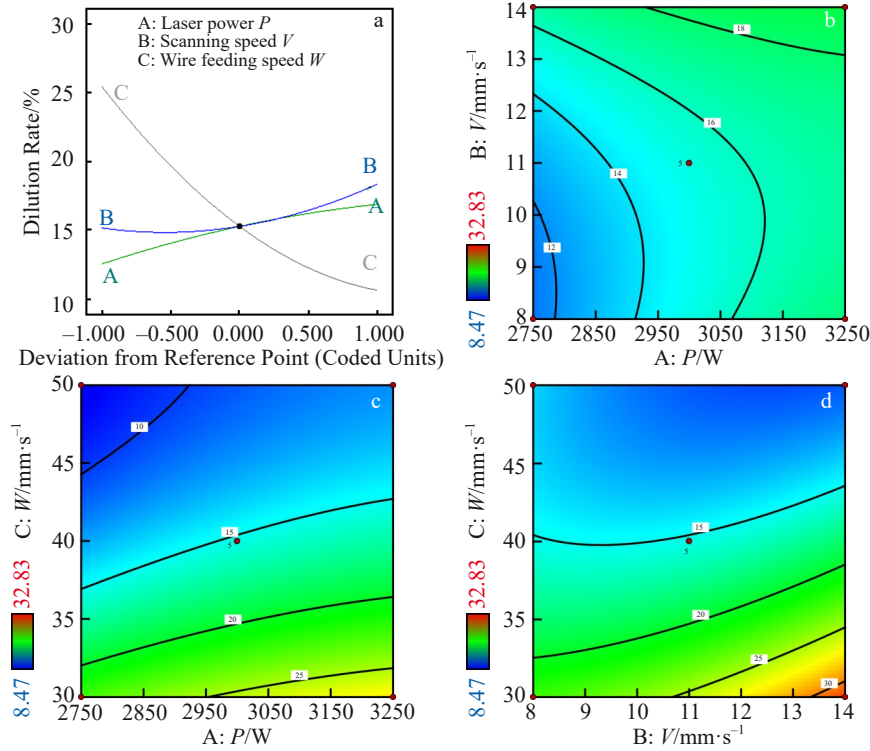


图3 激光沉积参数对稀释率的影响

Fig.3 Effect of laser deposition parameters on dilution rate: (a) perturbation plot; (b) *P*-*V* interaction effect on dilution rate; (c) *P*-*W* interaction effect on dilution rate; (d) *V*-*W* interaction effect on dilution rate

导致沉积角增大。由图4b~4d可知,当送丝速度参与变化时,沉积角的变化范围更大,说明送丝速度对于沉积角的影响更为显著。

3.4 优化模型的验证及最优参数的选取

稀释率和沉积角数学模型的实际值与预测值的对比结果如图5所示,模型的预测值基本分布于45°线附近,

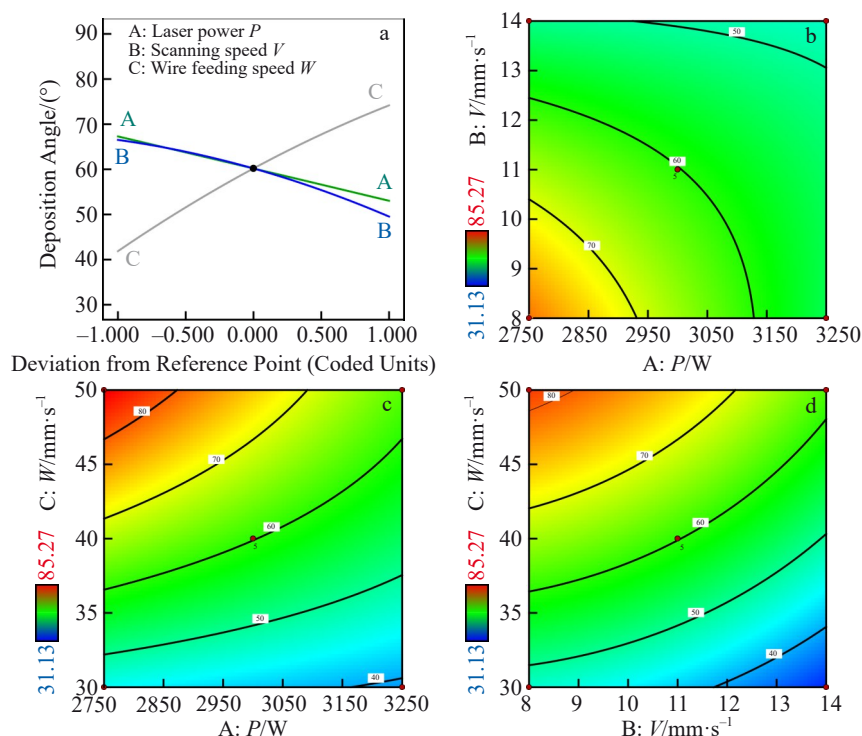


图4 激光沉积参数对沉积角的影响

Fig.4 Effect of laser deposition parameters on deposition angle: (a) perturbation plot; (b) P - V interaction effect on deposition angle; (c) P - W interaction effect on deposition angle; (d) V - W interaction effect on deposition angle

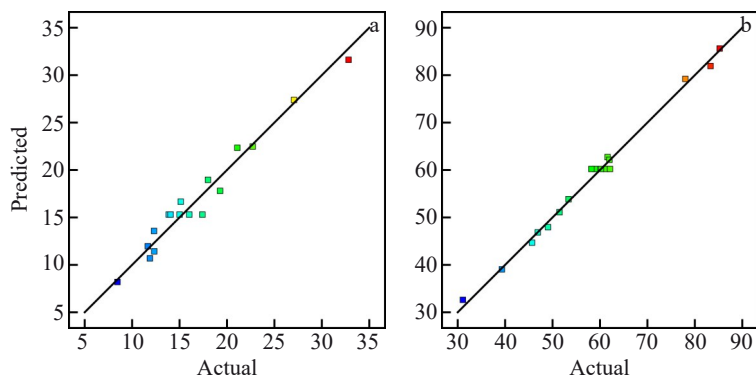


图5 稀释率和沉积角的预测值与实际值对比

Fig.5 Comparison of predicted and actual values of dilution rate (a) and deposition angle (b)

预测值与实际值较为接近,验证了所建立的稀释率和沉积角模型的合理性,说明这两个回归模型可以很好地体现稀释率和沉积角与局部干法水下激光单道沉积的工艺参数之间的关系,模型的可靠性高。

对于丝基激光沉积工艺,虽然小的稀释率有利于降低基体对沉积层的影响,但是小的稀释率往往会使得沉积层的高度较高,从而导致沉积角较大。在多道次激光沉积过程中,沉积角过大时,前道沉积层会对后道金属丝的沉积造成扰动,出现金属丝偏离激光光斑中心的情况,使得后道次的沉积质量变差。通过综合考虑激光沉积的工艺参数对稀释率和沉积角的影响,选定稀释率的范围为22.73%~27.08%,沉积角的范围为39.34°~45.07°。利

用优化后的模型,分别计算了不同工艺参数下稀释率和沉积角的预测值,并与真实值进行了对比,结果如表8所示。其中,实验编号2的工艺参数:激光功率为2750 W,焊接速度为11 mm/s,送丝速度为30 mm/s;实验编号10的工艺参数:激光功率为3250 W,焊接速度为11 mm/s,送丝速度为30 mm/s;可以看出,两组参数下实际值与真实值相近,误差均很小。

3.5 水环境对沉积层成形的影响

在前面优化工艺参数的基础上,选取激光功率为2750 W,焊接速度为11 mm/s,送丝速度为30 mm/s进行陆上单道激光沉积试验,研究基体周围的水环境对沉积层宏观形貌、几何特征、微观组织和硬度的影响。水下和

表8 预测值与实际值对比分析			
Table 8 Comparison and analysis of predicted and actual values			
Experiment No.		Dilution rate/%	Deposition angle/(°)
2	Actual	22.73	45.07
	Predicted	23.77	44.66
	Error /%	0.335	0.335
10	Actual	27.08	39.34
	Predicted	28.11	39.04
	Error /%	0.332	0.097

陆上的宏观形貌和横截面如图6和图7所示。水下和陆上单道沉积层均连续,鱼鳞纹细小,无裂纹等宏观缺陷。与陆上沉积层相比,水下沉积层的铺展性更差。水下和陆上横截面均不存在气孔和未熔合等缺陷,沉积层与母材之间均产生了良好的冶金结合。分别计算水下和陆上沉积层的沉积角和稀释率,水下沉积层的沉积角和稀释率为45.7°和22.73%,陆上沉积层的沉积角和稀释率为33.4°和49.3%。由于基体周围水环境存在,水下沉积层的冷却速度加快,热量积累较少,基体与沉积层之间的润湿性较差,沉积层的铺展性也就变差,因此水下沉积层的沉积角变大,稀释率减小。

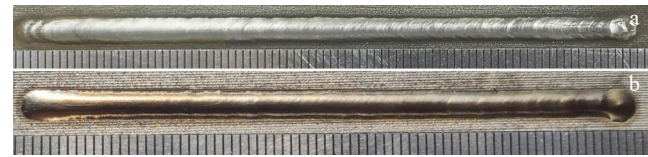


图6 陆上和水上沉积层的宏观形貌
Fig.6 Macroscopic morphologies of the in-air (a) and underwater (b) deposition layers

3.6 水环境对沉积层微观组织的影响

图8a为陆上沉积层的微观组织。陆上沉积层的微观组织主要由多边形铁素体(PF)、粒状贝氏体(GB)和板条马氏体(LM)组成。随着沉积层温度降低,奥氏体首先达到铁素体转变温度。由于温度较高,冷却速度较缓慢,在满足铁素体形成温度和冷却速度的条件下,部分高温奥氏体转变为PF。在缺少有效夹杂物的情况下,奥氏体在进一步冷却过程中转变为贝氏体铁素体。随着冷却过程进行,碳元素在邻近奥氏体区域富集,增强了奥氏体的稳定性。当温度冷却至室温时,发生了奥氏体向马氏体的不完全转变,部分奥氏体转变为马氏体,部分奥氏体被保留下来,最终在贝氏体铁素体基体上形成了马氏体-奥氏体组元,即形成了GB。剩余的奥氏体在冷却至室温时,达到奥氏体向马氏体的临界转变温度,进而转变为LM。

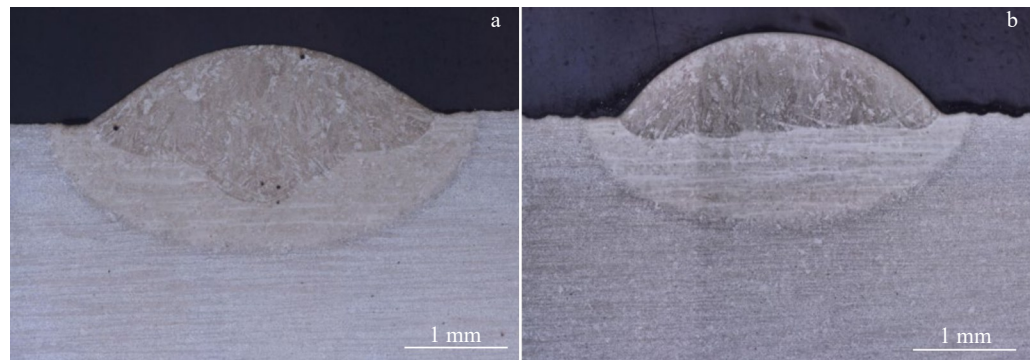


图7 陆上和水上沉积层的横截面形貌
Fig.7 Cross-section morphologies of the in-air (a) and underwater (b) deposition layers

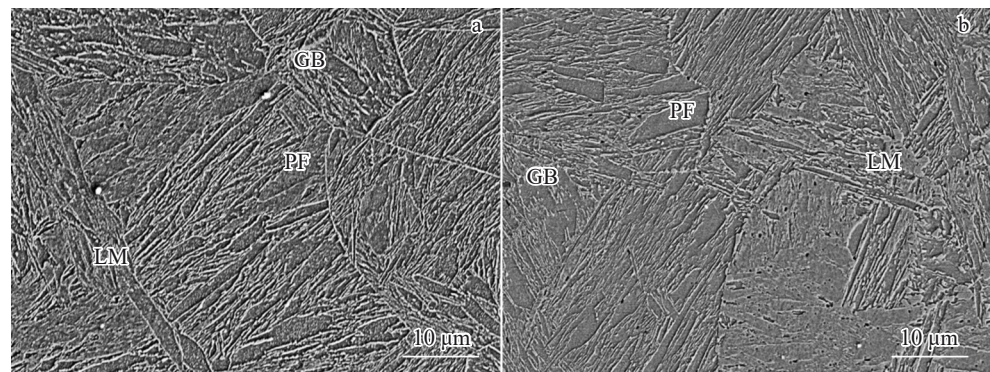


图8 陆上和水上沉积层的微观组织
Fig.8 Microstructures of the in-air (a) and underwater (b) deposition layers

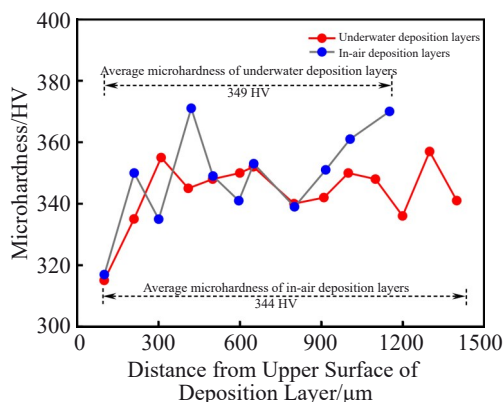


图9 陆上和下水沉积层的显微硬度

Fig.9 Microhardness of in-air and underwater deposition layers

与陆上沉积层类似,水下沉积层的微观组织同样主要由PF、GB和LM组成,如图8b所示。不同的是水下沉积层的微观组织较为细小。对于陆上激光熔化沉积,熔池表面的热损失主要是通过热辐射和对流,熔池外的热损失主要是通过自然对流;对于局部干法水下激光熔化沉积,基体表面的水被排开了,因此熔池的热损失也是通过热辐射和对流,不同的是,基体处于水环境中,水的自然对流系数大于空气中的,因此,局部干法水下激光熔化沉积过程中沉积层的冷却速度大于陆上的。

3.7 水环境对沉积层显微硬度的影响

水下和陆上沉积试样的显微硬度如图9所示。水下沉积层的显微硬度范围为316~374 HV,而陆上沉积层的显微硬度范围为314~356 HV。此外,水下和陆上沉积层的平均硬度分别是349和344 HV。水下沉积层的平均显微硬度和最高显微硬度均高于陆上沉积层的。与陆上沉积试样相比,水下沉积层的微观组织更为细小。组织越细小,沉积层的显微硬度越大,因此水下沉积层的显微硬度高于陆上的。

4 结论

1) 随着激光功率的增大,稀释率也随之增加;在一定范围内,扫描速度的增加会导致稀释率降低;而随着送丝速度的增大,稀释率则急剧下降。

2) 激光功率和扫描速度的增大会使沉积角减小,而送丝速度的增加则对沉积角产生积极影响。

3) 通过综合考虑激光沉积的工艺参数对稀释率和沉积角的影响,选定稀释率的范围为22.73%~27.08%,沉积角的范围为39.34°~45.07°。

4) 与陆上相比,水下激光熔化沉积过程的冷却速度更快,因此水下沉积层的沉积角较大,稀释率较小。同时,水下沉积层的微观组织更加细小,从而导致其显微硬度较高。

参考文献 References

- [1] Fan Changjun(范昌俊). *Science & Technology of Baotou Steel*(包钢科技)[J], 2025, 51(1): 72
- [2] Han Chaoshuai(韩超帅). *Fatigue Assessment of Ship and Marine Structures Under Random Multi-loads*(多种随机载荷作用下的船舶与海洋工程结构物疲劳评估方法研究)[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018
- [3] Liu Feiyang(刘飞洋), Li Tianke(李田科), Wang Ruixin(王睿鑫) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(3): 791
- [4] Zhou Huimin(周慧敏), Huang Xuqiang(黄须强), Kong Lingfei(孔令菲) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(4): 1170
- [5] Wu Haien(吴海恩). *Cleaning World*(清洗世界)[J], 2025, 41(2): 82
- [6] Zhang Xiangang(张先刚). *Marine Equipment/Materials & Marketing*(船舶物资与市场)[J], 2023, 31(9): 30
- [7] Luo Chuanwei(罗传威), Zhao Yizhi(赵一志), Zhao Wei(赵伟) et al. *Environmental Technology*(环境技术)[J], 2025, 43(3): 71
- [8] Liu Jun(刘军), Zhang Chuanxu(张传旭), Qu Jie(曲杰). *Ocean Engineering Equipment and Technology*(海洋工程装备与技束)[J], 2023, 10(4): 24
- [9] Pan Dongmin(潘东民), Ma Hongxin(马洪新), Liang Guanghui(梁光辉) et al. *Tianjin Science & Technology*(天津科技)[J], 2009, 36(2): 17
- [10] Xue Long(薛龙), Mao Xuesong(毛雪松), Huang Jiqiang(黄继强) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2024, 45(4): 120
- [11] Wang Wei(王伟), Wang Zeming(王泽明), Wei Lianfeng(魏连峰) et al. *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2020, 50(7): 74
- [12] Wang Huiqun(王惠群), Wang Jiachun(王家淳), Luo Yu'ang(罗毓昂). *Laser Technology*(激光技术)[J], 2001, 25(1): 48
- [13] Qin Hang(秦航), Cai Zhihai(蔡志海), Zhang Ping(张平) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2019, 32(3): 130
- [14] Guo Ning(郭宁), Xing Xiao(邢霄), Feng Jicai(冯吉才) et al. *The 20th National Welding Academic Conference*(第二十次全国焊接学术会议)[C]. Lanzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2015: 1
- [15] Wen X, Jin G, Cui X F et al. *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 111: 814
- [16] Feng X R, Cui X F, Jin G et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 333: 104
- [17] Yao Qi(姚杞). *Study on Underwater Laser Welding of Stainless Steel*(不锈钢水下激光焊接研究)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014
- [18] Cheng Q, Guo N, Fu Y L et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 67: 56
- [19] Fu Y L, Guo N, Wang G H et al. *Materials & Design*[J], 2021, 197: 109196
- [20] Wang Z D, Sun G F, Chen M Z et al. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 39: 101884

- [21] Wang Z D, Sun G F, Lu Y *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 408: 126778
- [22] Cui Lihui(崔黎辉), Shen Junchang(沈俊昶), Li Caiju(李才巨) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(3): 191
- [23] Zhang Yibin(张毅斌), Sa Shiyong(撒世勇), Tong Fasong(童法松). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2013, 42(12): 25
- [24] Zhang Penghui(张彭辉), Li Xianchao(李显超), Tong Hongtao(仝宏涛) *et al.* *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2022, 42(6): 1075

Forming, Microstructure and Properties of 10CrNi3MoV High-Strength Steel by Underwater Laser Melting Deposition

Zhang Zhiqiang^{1,2}, Wang Jiaji^{1,2}, Hu Fengya^{1,2}, Guo Ning^{3,4,5}, Wu Di^{3,4}, Cheng Qi^{3,4}, Fu Yunlong^{3,4,5}

(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, China)

(2. Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009, China)

(3. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(4. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

(5. Harbin Institute of Technology, CGN-HIT Advanced Nuclear and New Energy Research Institute, Harbin 150001, China)

Abstract: China has independently developed 10CrNi3MoV high-strength steel, which has become a crucial structural material for manufacturing submarine pressure hulls due to its high strength, excellent toughness, superior explosion resistance, and outstanding corrosion resistance. In this study, the response surface method was used to investigate the effects of laser power, scanning speed, and wire feeding speed on the dilution rate and deposition angle of the underwater single-pass deposition layer. Then the optimized underwater single-pass deposition process parameters were obtained. Based on this, the influence of the water environment on the formation, microstructure, and microhardness of the single-pass deposition layer was investigated. Compared with that in air, the faster cooling rate in the underwater laser melting deposition process leads to a larger deposition angle and a slower dilution rate in the underwater deposition layer. Additionally, the microstructure of the underwater deposition layer is finer, which results in a higher microhardness.

Key words: 10CrNi3MoV steel; underwater laser melting deposition; forming; microstructure and property

Corresponding author: Fu Yunlong, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: fuyl@hit.edu.cn