

开放环境下钛合金激光熔覆的局部气氛保护模型

龚燕琪, 傅戈雁*, 石拓, 李刚, 张津超, 余司琪

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 针对开放环境下钛合金在激光熔覆过程中易被氧化的问题, 提出了一种局部气氛保护模型。采用 Fluent 软件分析了不同保护气体流量下局部保护喷嘴可提供的有效保护气氛范围, 并通过三次多项式拟合建立了气流有效保护长度的数学模型; 然后利用响应面法建立了包括保护气体流量在内的工艺参数与熔覆过程中待保护高温区域长度之间的二次回归模型; 对两个模型进行联立分析, 最终建立了开放环境下钛合金激光熔覆的局部气氛保护模型。验证试验所得单道熔覆层形貌良好, 表面呈银白色的金属光泽, 说明熔覆过程中熔池及其周围高温区域得到了有效保护。所建局部气氛保护模型可用于指导开放环境下钛合金激光熔覆过程中保护气体流量的选用。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 钛合金; 开放环境; 局部保护气氛; 响应面法; 光内送粉

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1102006

Local Shielding Gas Model for Laser Cladding of Titanium Alloy in Open Environment

Gong Yanqi, Fu Geyan*, Shi Tuo, Li Gang, Zhang Jinchao, Yu Siqi

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract A local shielding gas model is proposed herein to address the easy oxidation of titanium alloys during the laser cladding process in an open environment. The effective protection ranges provided by the local shielding gas nozzle under different gas flow rates are analyzed with the Fluent software, and the mathematical model of the effective protective length of the airflow is established through the third-order polynomial fitting. Then, the response surface method is used to establish the quadratic regression model between the process parameters, including the shielding gas flow and the length of the high-temperature region to be protected during the laser cladding. The local shielding gas model for titanium-alloy laser cladding in an open environment is established through the analysis of the above two models. The single-pass cladding layer obtained through the verification test exhibits a good morphology and a bright-silver metallic luster on the surface, indicating that the molten pool and its surrounding high-temperature area are effectively protected during the cladding process. The local shielding gas model established can be used to guide the selection of the shielding gas flow rate required in the laser cladding process in an open environment.

Key words laser technique; laser cladding; titanium alloy; open environment; local shielding gas flow; response surface method; inside-beam powder feeding

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 350.3390; 350.3850

1 引 言

钛合金具有高低温性能好、耐腐蚀、比强度和比刚度高等优点, 已被广泛应用于航空航天、石油化工等领域^[1-2]。但是钛合金的化学活性大, 在温度达到 400 °C 后, 会强烈吸收空气中的氧原子, 致使其力学

性能严重降低^[3]。因此, 在钛合金的激光熔覆过程中, 利用稀有气体保护熔池及其附近的高温区域不被氧化是保证成形件性能的关键。

采用稀有气体局部保护喷嘴, 可以在开放环境下实现钛合金的激光熔覆, 并且相比于气体封闭箱^[4-5]具有加工实时性强、设备灵活度高以及加工零

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-06-24; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(61903268)

* E-mail: fugeyan@suda.edu.cn

件尺寸不受箱体限制等优势。保护气体在加工部位形成的局部惰性气氛环境可将熔覆高温区域与空气隔绝,从而可以防止氧气的渗透,保证了熔覆质量。李刚等^[6]基于光内送粉原理设计了同轴保护气罩,并用 Fluent 软件模拟分析了气罩结构以及保护气体流量对氩气质量分布的影响;Bermingham 等^[7]研究了 5 种不同的稀有气体保护拖罩结构对开放环境下丝-电弧增材制造钛合金力学性能的影响,并分析了钛合金的氧化敏感性;张津超等^[8]分析了开放环境下激光熔覆过程中钛合金在不同氩气流量下的氧化行为。目前所查资料显示,在不同的工艺参数下,局部保护喷嘴所需保护气体流量的选用原则尚缺乏深入研究。在激光熔覆过程中,局部喷嘴的保护效果与输入的保护气体流量具有密切关系。当保护气体流量偏小时,局部惰性气氛无法完全覆盖熔池及周围高温区域,导致保护效果较差的区域发生氧化反应;当保护气体流量过大时,稀有气体浪费严重,并且喷嘴出口处的气体流速较大,导致熔池的稳定性降低,熔覆质量变差。此外,熔覆过程中待保护的高温区域尺寸还会受到激光功率等工艺参数的影响,因此,针对不同的工艺参数,需要选取合适的保护气体用量。综上所述,在开放环境下进行钛合金激光熔覆时,建立局部气氛保护模型具有重要意义。

本文基于开放环境下的钛合金激光熔覆方法,使用 Fluent 软件模拟了局部保护喷嘴在不同保护气体流量下所能提供的惰性气氛的尺寸,并通过三次多项式拟合建立了相应的数学关系模型;之后,采用响应面法建立了包括保护气体流量在内的工艺参数与待保护高温区域长度之间的回归模型;最后对两个模型进行联立分析,建立了局部气氛保护模型,为开放环境下钛合金激光熔覆保护气体用量的选择提供了依据。

2 气流保护效果的仿真分析与数值拟合

2.1 保护气流仿真分析

为了建立局部气氛保护模型,首先需要建立进口气体流量与气流保护效果之间的数学关系模型。本单位自主研发了光内送粉喷头^[9],其光束中空,粉束居中,局部气氛保护装置包围粉束,形成环形保护气帘,如图 1 所示。

根据光内送粉喷头以及局部保护喷嘴的结构特征建立同轴喷嘴流道模型,应用 Fluent 18.0 软件研究平板拘束状态下惰性气流的保护效果。各气体(包括载粉气、准直气以及保护气)的进口边界条件

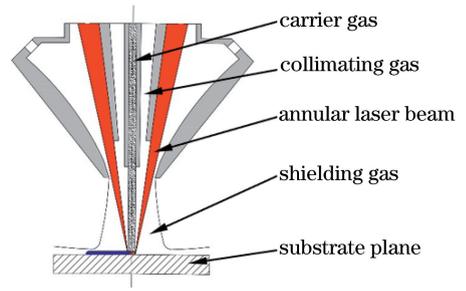


图 1 同轴熔覆喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of coaxial cladding nozzle

均采用计算流体力学(CFD)模型中的速度进口条件。由于在试验过程中载粉气和准直气的气体流量分别固定为 3 L/min 和 10 L/min,而其进口直径分别为 1.5 mm 和 3 mm,所以根据流体速度、管径和气体流量之间的关系^[10],可得载粉气和准直气的进口速度分别为 28.29 m/s 和 23.58 m/s。根据前期预试验的结果,保护气体流量小于 18 L/min 时,喷嘴难以对熔覆过程进行有效保护;而 50 L/min 的气体流量可对功率在 1300 W 以下的熔覆过程实现良好保护。因此将模型中保护气体流量的工艺窗口定为 $[18 \text{ L/min}, 50 \text{ L/min}]$ 。保护气流的单个入口直径为 4 mm,其进口速度可根据不同的保护气体流量计算得到。

为了模拟试验时基材对气流的平板拘束效果,基材上表面选用壁面边界条件。粉气喷嘴以及保护喷嘴各表面均为壁面边界条件。对于空气域出口部分,采用压力出口条件,出口压力为一个标准大气压,即 101325 Pa。为了研究保护气体流量与保护效果之间的关系,设计了表 1 所示的 11 组气体流量,将它们输入到 Fluent 软件中进行数值模拟计算。

表 1 数值模拟参数及结果

Table 1 Numerical simulation parameters and results

No.	Shielding gas flow rate $Q / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	Half effective protection length L_{eh} / mm
1	18	5.70189775
2	21	7.76506575
3	24	10.03191600
4	27	12.06128200
5	30	13.52078375
6	33.5	14.26290000
7	37	16.22803775
8	40.5	16.86484750
9	44	18.30119650
10	47	19.27831025
11	50	20.21293800

选用 Fluent 软件中的组分输运模型对基材表

面的氧气浓度分布云图进行模拟,模型中湍流项选用 $k-\epsilon$ 方程。在各气体(载粉气、准直气和保护气)入口处,气体均由体积分数为 99.99% 的氩气和 0.01% 的空气组成,以模拟试验时压缩气瓶中的气体;在各气体出口处,气体均由体积分数为 20.95% 的氧气、0.97% 的氩气和 78.08% 的氮气组成,以模拟空气。

图 2 是表 1 中编号 5 对应的基材表面的氧气分布云图。根据 Ding 等^[11] 的研究,当稀有气体中氧气的体积分数低于 2×10^{-3} 时,钛合金的力学性能几乎不会受到影响,因此将图 2 中氧气体积分数低于 2×10^{-3} 的区域(图 2 中的灰色部分)定义为有效保护区域。从图 2 中可以看出,该部分区域近似呈圆形,说明有效保护区域具有较好的对称性。为了定量表达气流的保护效果,将该区域在 x 、 y 方向上最大长度的平均值定义为有效保护长度 L_e 。

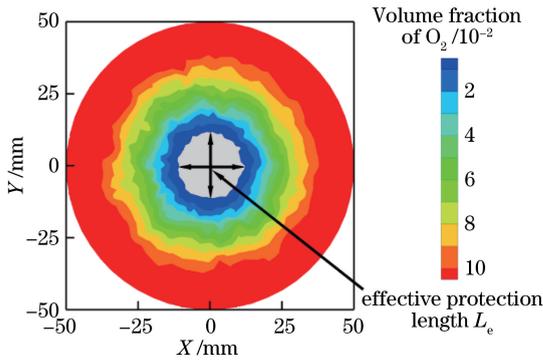


图 2 基材表面氧气分布云图

Fig. 2 Contour of oxygen distribution on substrate plane

2.2 局部气氛有效保护状态的定义

建立局部气氛保护模型的关键是建立局部喷嘴提供的有效保护范围与熔覆过程中待保护区域之间的关系模型,以此判断保护气流能否进行有效保护。在激光熔覆过程中,待光粉耦合稳定后,会形成如图 3 所示的彗星状温度分布区域。在扫描方向上,光斑中心前方的温度梯度较后方大,等温线较密集^[12],所以对于同一温度而言,光斑中心后方彗星状温度区域的长度远大于前方。钛合金在温度高于 400 °C 后会与氧气强烈反应,因此定义钛合金熔覆过程中温度高于 400 °C 的区域为高温区域,将该区域沿扫描方向上的最大长度定义为高温区域长度。如图 3 所示,光斑中心后方高温区域的长度 L_{htr} 远大于光斑中心前方高温区域的长度 L_{htf} 。在开放环境下的激光熔覆过程中,同轴局部保护喷嘴的轴线

与光斑中心重合,且保护区域沿轴线呈对称分布,所以当氧气体积分数低于 0.2% 的气氛环境能够完全覆盖温度高于 400 °C 的区域,即 1/2 有效保护长度 L_{eh} 大于等于光斑中心后方高温区域长度 L_{htr} 时,局部保护喷嘴可对钛合金的激光熔覆过程实现较好的保护,保证成形件不被氧化^[13]。而此时的保护气体流量即为开放环境下可进行有效保护的最小气体用量。各组保护气体流量对应的 1/2 有效保护长度 L_{eh} 如表 1 所示。

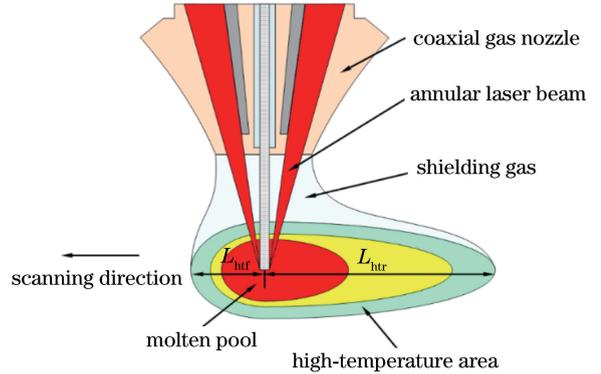


图 3 熔池周围高温区域保护示意图

Fig. 3 Schematic of the protection of high-temperature area around molten pool

2.3 有效保护长度的数学模型

根据表 1 中的计算结果,利用 Origin 软件,选用三次多项式对 1/2 有效保护长度 L_{eh} 进行数值拟合,拟合方程为

$$L_{eh} = -20.21817 + 2.09445Q - 0.04295Q^2 + 3.45112 \times 10^{-4}Q^3, \quad (1)$$

拟合曲线如图 4 所示。可见,拟合所得的三次曲线能够较好地吻合数据点的变化趋势。

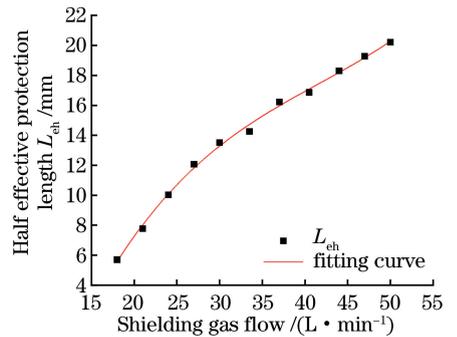


图 4 三次多项式拟合曲线

Fig. 4 Cubic polynomial fitting curve

为了检验拟合模型的准确性与拟合程度,对其进行显著性分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知,拟合方程的确定系数(R^2)与调整确定系数(Adjusted R^2)分别为 0.99752 和 0.99646,均满足 ≥ 0.9950

的要求,这表明拟合方程的拟合优度较高^[14]。拟合方程残差的平方和为 0.55869。经验算,拟合方程得到的 11 个数据点对应的 1/2 有效保护长度的拟

合值与实际结果的差值均位于 $-3.8\% \sim 3.8\%$ 区间内,这说明拟合方程可以准确表达保护气体流量 Q 与 1/2 有效保护长度 L_{eh} 之间的关系。

表 2 拟合方程显著性分析

Table 2 Significance analysis of fitting equation

Item	Degree freedom	Sum of squares	Mean square	F-value	P-value
Model	3	22.10548	75.03516	940.14394	1.7562×10^{-9}
Error	7	0.55869	0.07981		
Total	10	225.66471			

$R^2 = 0.99752$ Adjusted $R^2 = 0.99646$

3 高温区域长度的响应面分析

3.1 试验材料及方法

开放环境下的激光熔覆系统如图 5 所示。该系统由 YLS-2000-TR 型光纤激光器及其水冷装置、六轴 KUKA 机器人、KUKA 控制柜以及本实验室自行研发的光内送粉熔覆喷头和局部保护喷嘴等组成。试验中的载粉气、准直气与局部保护喷嘴所用保护气均是体积分数为 99.99% 的氩气。基材和粉末均为 Ti-6Al-4V 合金,它们的化学成分如表 3 所示。

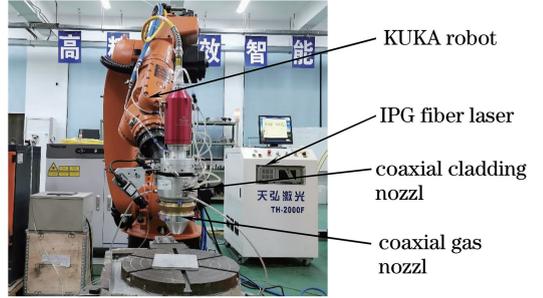


图 5 激光熔覆系统

Fig. 5 Laser cladding system

表 3 Ti-6Al-4V 基体及粉末的化学成分

Table 3 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy substrate and powders

Material	Mass fraction / %							
	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Substrate	6.2	4.3	0.19	0.02	0.18	0.01	0.002	Bal.
Powder	6.36	4.06	0.05	0.01	0.0785	0.0028	0.0012	Bal.

每组熔覆单道的扫描长度均为 30 mm,两组单道之间隔开一定距离,并冷却 30 s,以尽可能减小热量累积产生的影响。在激光熔覆过程中,使用红外热像仪监测熔池及其周围区域的温度变化。熔覆结束后,根据红外热像仪记录的数据,计算每组单道距开始端 15 mm 处光斑中心后方温度高于 400 °C 区域的最大长度,此长度即为上述定义的光斑中心后方高温区域的长度 L_{ht} 。

3.2 响应面设计

根据 2.2 节对局部气氛有效保护状态的定义,仍需建立熔覆过程中高温区域长度与工艺参数之间的数学模型。试验采用响应面法中的 BBD 设计方法^[15],用 Design-Expert 8.0 软件中的响应面设计

模块建立了具有 40 个轴向点和 6 个复制中心点的五因素三水平矩阵试验。其中,五因素是由前期预试验确定的对光斑中心后方高温区域长度 L_{ht} 影响较大的工艺参数,分别为激光功率 P_{laser} 、扫描速度 v 、离焦量 f 、送粉转速 v_p 以及保护气体流量 Q 。当保护气体流量偏小时,会有少量氧化反应发生,使得高温区域长度存在变大的趋势。考虑到这一因素,本文在响应面试验设计中添加了几组较小的保护气流量(14 L/min),以尽可能提高响应面模型的可靠性。响应面设计方法各因素的水平编码如表 4 所示。在试验过程中,为了避免系统误差对试验结果产生影响,以随机方式排列试验顺序,具体的试验参数及响应如表 5 所示。

表 4 影响因子水平编码表

Table 4 Impact factors level codes

Level	Factor				
	P_{laser}/W	$v/(mm \cdot s^{-1})$	f/mm	$v_p/(r \cdot min^{-1})$	$Q/(L \cdot min^{-1})$
-1	850	4	-4	0.7	14
0	1050	6	-3	1	22
1	1250	8	-2	1.3	30

表 5 BBD 响应面试验参数与结果

Table 5 BBD response surface experimental parameters and results

No.	$P_{\text{laser}}/\text{W}$	$v /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	f / mm	$v_p /(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q /(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$L_{\text{bitr}}/\text{mm}$
1	1050	4	-4	1	22	14.70684039
2	1250	6	-3	1.3	22	12.18566775
3	1050	8	-3	1	30	9.87459283
4	1050	8	-3	1.3	22	10.71498371
5	1250	4	-3	1	22	14.49674267
6	1050	4	-2	1	22	12.60586319
7	1050	6	-3	1	22	11.97557003
8	1050	6	-3	1	22	12.60586319
9	1050	6	-3	1	22	12.39576547
10	1050	8	-4	1	22	13.02605863
11	1050	8	-3	1	14	12.81596091
12	1050	6	-3	1	22	13.02605863
13	1050	6	-4	1	30	10.92508143
14	1050	6	-3	0.7	14	10.92508143
15	850	6	-4	1	22	13.23615635
16	850	6	-3	1	30	10.92508143
17	1050	6	-3	1	22	13.23615635
18	1050	6	-4	0.7	22	10.29478827
19	1250	6	-3	0.7	22	11.97557003
20	1050	4	-3	1.3	22	14.51250000
21	850	6	-2	1	22	10.71498371
22	1050	6	-2	0.7	22	10.92508143
23	1250	6	-3	1	30	15.75732899
24	1050	6	-2	1	14	14.28664495
25	1050	6	-4	1.3	22	11.97557003
26	1250	8	-3	1	22	12.39576547
27	1050	6	-3	1.3	14	12.18566775
28	1050	6	-2	1	30	10.92508143
29	1050	6	-3	1.3	30	11.76547231
30	1250	6	-3	1	14	14.07654723
31	1050	4	-3	0.7	22	11.13517915
32	1050	4	-3	1	14	13.65635179
33	850	6	-3	1	14	12.39576547
34	1050	6	-2	1.3	22	11.76547231
35	1050	6	-3	1	22	11.55537459
36	1050	4	-3	1	30	13.65635179
37	850	8	-3	1	22	9.87459283
38	850	6	-3	1.3	22	10.29478827
39	1050	6	-4	1	14	13.65635179
40	1050	8	-2	1	22	10.50488599
41	1250	6	-4	1	22	14.07654723
42	1250	6	-2	1	22	12.81596091
43	850	4	-3	1	22	13.02605863
44	1050	6	-3	0.7	30	11.76547231
45	850	6	-3	0.7	22	9.24429967
46	1050	8	-3	0.7	22	10.08469055

3.3 建立模型

响应值模型系数及失拟项显著性分析的结果如表 6 所示(2FI 为两因素交互关系模型),失拟项 P 值表示模型未能拟合的部分及未能考虑的因素。通常情况下,当模型系数 P 值小于 0.05,失拟项 P 值大于 0.05 时,模型的拟合较为精确。

表 6 响应值模型系数及失拟项显著性分析

Table 6 Significance analysis of response value model coefficients and lack of fit

Source	P -value	Lack of fit P -value	Result
Linear	<0.0001	0.0973	Suggested
2FI	0.7805	0.0755	
Quadratic	0.0063	0.1711	Suggested
Cubic	0.1148	0.3324	Aliased

由表 6 可知,线性回归模型和二阶回归模型均满足上述要求。根据响应面模型尽量选择高阶模型的设计准则,选择二阶回归模型作为光斑中心后方高温区域长度的最优回归模型^[16]。同时,为了提高模型的精度并简化得到的二阶回归模型,在建模过程中使用逐步回归法自动去除对响应值影响程度较小的因素,最终得到光斑中心后方高温区域

表 7 光斑中心后方高温区域长度二阶回归模型的方差分析

Table 7 Anova of quadratic regression model for the length of high temperature area behind the spot center

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	P -value> F	Remark
Model	78.39	9	8.71	13.46	<0.0001	Significant
P_{laser}	20.40	1	20.40	31.53	<0.0001	
v	21.40	1	21.40	33.07	<0.0001	
f	3.38	1	3.38	5.22	0.0283	
v_p	5.12	1	5.12	7.91	0.0079	
Q	4.41	1	4.41	6.82	0.0131	
$P_{laser}Q$	2.48	1	2.48	3.84	0.0579	
vv_p	1.89	1	1.89	2.92	0.0964	
vQ	2.16	1	2.16	3.34	0.0758	
v_p^2	17.14	1	17.14	26.48	<0.0001	
Residual	23.30	36	0.65			
Lack of fit	21.29	31	0.69	1.72	0.2870	Not significant
Pure error	2.00	5	0.40			
Cor total	101.68	45				
$R^2=0.7709$		Adjusted $R^2=0.7136$		Predicted $R^2=0.6002$		Adeq Precisor=14.030

图 6 为模型的残差正态概率分布图。从图 6 中可以看出,46 组光斑中心后方高温区域长度的残差值均近似线性地分布在一条直线上,表明标准化残差分布满足正态分布要求。

模型对光斑中心后方高温区域长度的预测值与试验实测值如图 7 所示。可见,数据点均匀地分布

长度 L_{ht} 关于激光功率 P_{laser} 等工艺参数的二阶回归模型,即

$$L_{ht} = -7.43606 - 5.18679 \times 10^{-3} P_{laser} + 1.57743v - 0.45959f + 37.23046v_p - 0.30694Q + 4.92417 \times 10^{-4} P_{laser}Q - 1.14459vv_p - 0.045959vQ - 14.23874v_p^2 \quad (2)$$

光斑中心后方高温区域长度二阶回归模型的方差分析结果如表 7 所示。由表 7 可知,该模型的 F 值为 13.46,模型系数 P 值<0.0001,这表明本文所建立的模型只有 0.01%的概率会因为干扰因素的影响而失真,模型的拟合精度高,影响因子对响应值的影响较为显著。失拟项 P 值为 0.2870(>0.05),说明模型的失拟性检验不显著,拟合误差较小,可用于精确预测影响因子与响应值之间的对应关系。多元相关系数(R^2)与调整确定系数(Adjusted R^2)分别为 0.7709 和 0.7136,均大于 0.5,表明模型的回归关系显著。调整确定系数(Adjusted R^2)与预测相关系数(Predicted R^2)的值较为接近,同样说明模型的拟合结果较为合理。此外,模型信噪比(Adeq Precisor)为 14.030,该值>4,表明模型具有较高的辨识度,满足响应曲面拟合的要求。

4 局部气氛保护模型

4.1 模型的建立

根据上述定义,为了确保惰性气氛环境能够对

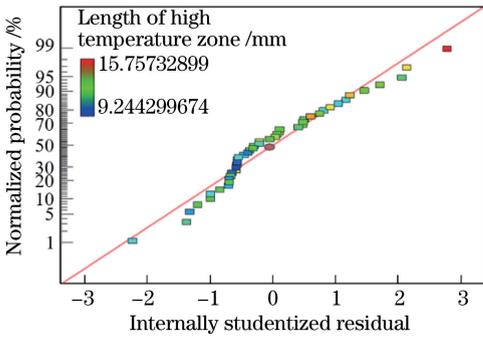


图 6 残差正态概率分布图

Fig. 6 Residual normal probability distribution

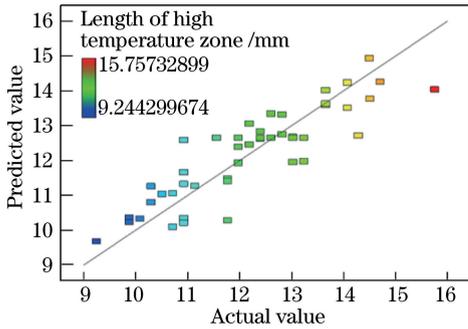


图 7 预测值与实际值的对应关系图

Fig. 7 Correspondence between predicted value and actual value

激光熔覆过程提供较好的保护,要求局部保护喷嘴提供的 $1/2$ 有效保护长度 L_{ch} 大于等于熔覆过程中光斑中心后方高温区域的长度 L_{htr} 。为此,将 Origin 拟合得到的三阶模型与通过响应面法建立的二阶回归模型联立起来,利用 MATLAB 软件对其

进行求解并化简,模型中各变量的系数均按照最终计算结果(Q 精确到 0.1 L/min)分别保留 $2\sim 4$ 位小数,最终得到局部气氛保护的数学模型为

$$Q = \sqrt[3]{A + \sqrt{B^3 + A^2}} - \frac{B}{\sqrt[3]{A + \sqrt{B^3 + A^2}}} + 41.48, \quad (3)$$

式中,

$$A = 22.0808P_{\text{laser}} - 476.86v + 53939.68v_p - 665.86f - 1658.288vv_p - 20629.158v_p^2 - 54419.17, \quad (4)$$

$$B = 44.39v - 0.4756P_{\text{laser}} + 598.5. \quad (5)$$

4.2 验证试验

(3)式所示的局部气氛保护模型的可靠性主要依赖于高温区域响应曲面模型的准确度,因此,为了验证其可靠性,重新选取不同于建模数据的 11 组工艺参数进行验证试验,具体试验参数如表 8 所示。其中, Q_{\min} 是利用式(3)计算出的每组工艺参数对应需要的最小保护气体的流量,因试验所用气体流量控制元件的精度 (1 L/min) 限制,利用进一法对其取整,得到调整后保护气体的流量 Q_{adj} 。由表 8 可知,光斑中心后方高温区域长度的实测值 $L_{htr,R}$ 与理论值 $L_{htr,P}$ 之间的偏差 (error) 基本稳定在 8% 以内,说明高温区域的响应曲面模型具有较高的可靠性。各组高温区域长度的实测值 $L_{htr,R}$ 均略小于 $1/2$ 有效保护长度 L_{ch} , 满足 2.2 节有效保护的要求,说明局部保护气氛能够对高温区域进行较好的覆盖保护。

表 8 验证试验工艺参数及结果

Table 8 Process parameters and results of confirmation tests

No.	$P_{\text{laser}}/\text{W}$	v/mm	f/mm	$v_p/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_{\min}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_{\text{adj}}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$L_{htr,P}/\text{mm}$	$L_{htr,R}/\text{mm}$	L_{ch}/mm	Error /%
1	1250	4	-4	1	43.7185	44	18.130683	16.774875	18.18445061	7.48
2	1250	4	-3	1.3	41.1392	42	17.392502	16.289065	17.55358786	6.34
3	1200	4	-3	1.1	39.0482	40	16.721693	15.520317	16.92699800	7.18
4	1250	5	-4	1	37.1176	38	16.068610	15.318750	16.28811566	4.67
5	1250	5	-3	1.3	34.0445	35	15.000184	15.016408	15.27050700	0.11
6	1150	4	-4	0.8	32.1179	33	14.247715	14.062500	14.52841994	1.30
7	1100	5	-2	1.1	29.9140	30	13.241898	12.206250	13.27835400	7.82
8	1250	7	-2	1.2	27.8075	28	12.232164	11.953130	12.32952862	2.28
9	1000	7	-3	1	25.9477	26	11.235384	10.430865	11.26901851	7.16
10	900	7	-2	1.2	23.8533	24	9.963765	9.609375	10.08025829	3.56
11	850	8	-2	1.3	21.7335	22	8.492914	8.637500	8.74668258	1.70

图 8 是单道熔覆验证试验结果。从图中可以看出,所得试样表面形貌较好,且表面均呈银白色的金属光泽,表明验证试验过程中待保护区域得到了有效

保护,熔覆层没有被氧化。综上可知,本文建立的数学模型具有较高的可靠性,可以用于计算开放环境下钛合金激光熔覆所需的最小有效保护气体流量。

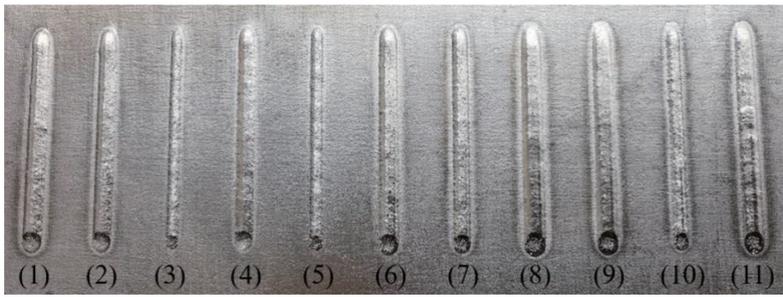


图 8 单道熔覆验证试验结果

Fig. 8 Results of single pass cladding confirmation tests

5 结 论

采用 Fluent 软件模拟了不同保护气体流量下局部保护喷嘴所能提供的有效保护范围,并对结果进行三次多项式拟合,建立了有效保护长度的数学模型,该模型对拟合所用数据点的拟合值与实际结果的差值均位于 $-3.8\% \sim 3.8\%$ 区间内。以激光功率等工艺参数为响应面法的输入值,以熔覆时光斑中心后方高温区域长度为输出值,基于响应面法中的 BBD 设计法进行了开放环境下的钛合金单道激光熔覆试验,建立了工艺参数与光斑中心后方高温区域长度之间的二次回归模型。同时,分析了保护气体能够有效保护高温区域不被氧化的临界条件,并以此为依据将两个模型联立起来分析,建立了局部气氛保护模型。验证试验表明,光斑中心后方高温区域长度的实测值与理论值之间的偏差稳定在 8% 以内,各组 $1/2$ 有效保护长度均大于实测值,且各单道熔覆试样表面形貌较好,均呈银白色的金属光泽,说明熔覆过程中的待保护区域得到了有效保护。

本文建立的模型可靠性较高,可以为开放环境下钛合金激光熔覆保护气体流量的选择提供参考。

参 考 文 献

[1] Wang H, Wu M P, Lu P P, et al. Effect of laser power on mechanical properties of the cobalt-based/GO composite coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091405.
王航, 武美萍, 陆佩佩, 等. 激光功率对钴基/GO 复合熔覆层力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091405.

[2] Li J F, Wei Z Y, Lu B H. Research progress on technology of selective laser melting of titanium and titanium alloys [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011403.
李俊峰, 魏正英, 卢秉恒. 钛及钛合金激光选区熔化

技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011403.

[3] Zou S. Patent analysis of titanium alloy welding gas protection technology [J]. Chemical Enterprise Management, 2018(19): 23-25.
邹帅. 钛合金焊接气体保护技术的专利分析[J]. 化工管理, 2018(19): 23-25.

[4] Zhou Q J, Yan Z Y, Han X, et al. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC11 titanium alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102005.
周庆军, 严振宇, 韩旭, 等. 激光熔化沉积 TC11 钛合金的组织与力学性能[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102005.

[5] Huo H, Liang Z Y, Zhang A F, et al. Anisotropy of mechanical properties of laser-cladding-deposited TC4 titanium alloy containing boron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202008.
霍浩, 梁朝阳, 张安峰, 等. 激光熔覆沉积含硼 TC4 钛合金力学性能的各向异性[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202008.

[6] Li G, Zhang J C, Shi S H, et al. Mass distribution of local shielding gas for laser cladding of titanium alloy in open environment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702007.
李刚, 张津超, 石世宏, 等. 开放环境下钛合金激光熔覆局部保护气体的质量分布[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702007.

[7] Bermingham M J, Thomson-Larkins J, St John D H, et al. Sensitivity of Ti-6Al-4V components to oxidation during out of chamber wire + arc additive manufacturing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 29-37.

[8] Zhang J C, Shi T, Li G, et al. Oxidation of TC4 titanium alloy processed by laser inside powder feeding technology in open environment [J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 243-251.
张津超, 石拓, 李刚, 等. 开放环境下激光内送粉熔覆 TC4 钛合金的氧化行为[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 243-251.

- [9] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Technique for manufacturing inner-light powder-supplying by laser machining forming and inner-light powder-supplying spray head: CN101148760 [P]. 2008-03-26.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760 [P]. 2008-03-26.
- [10] Liu H N, Liu J. Hydrodynamics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 150-152.
刘鹤年, 刘京. 流体力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 150-152.
- [11] Ding J, Colegrove P, Martina F, et al. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 99-105.
- [12] Zou S. Study on gas shielding technology for titanium alloys laser welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 28-53.
邹帅. 钛合金激光焊接气体保护技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 28-53.
- [13] Karpagaraj A, Siva Shanmugam N, Sankaranarayanan K. Experimental investigations and numerical prediction on the effect of shielding area and post flow time in the GTAW of CP Ti sheets [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101 (9/10/11/12): 2933-2945.
- [14] Zhang Y, Huang W Y, Wu M X, et al. The application of Origin in the nonlinear fitting of the standard curve of AAS [J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(12): 1289-1294.
张颖, 黄文耀, 吴梦溪, 等. Origin 软件在原子吸收光谱标准曲线非线性拟合中的应用 [J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(12): 1289-1294.
- [15] Yan R, Li H, Li J C, et al. Process parameters optimization of polystyrene powder selective laser sintering based on response surface methodology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302015.
鄢然, 李浩, 李军超, 等. 基于响应面法的聚苯乙烯粉末选择性激光烧结成型工艺参数优化 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302015.
- [16] Zhang C, Zhang F L, Li Y F, et al. Multivariate nonlinear regression analysis model of weld bead shaping of 50CrV steel by laser welding with filler wire [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(11): 2256-2266.
张川, 张福隆, 李跃峰, 等. 50CrV 钢激光填丝焊缝成形多元非线性回归模型 [J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2256-2266.