

文章编号:1001-5078(2024)05-0718-07

· 激光应用技术 ·

# 激光熔覆工艺参数对 Fe-W-B 熔覆层质量的影响

唐敏<sup>1</sup>, 汪力<sup>1,2</sup>, 陈志国<sup>1</sup>, 魏祥<sup>1</sup>

(1. 湖南人文科技学院 能源与机电工程学院, 湖南 娄底 417000; 2. 先进钢铁材料技术国家工程研究中心华中分中心, 湖南 娄底 417000)

**摘要:**采用激光熔覆技术在 65Mn 钢表面熔覆 Fe-W-B 三元硼化物熔覆层。通过单道熔覆与单层多道熔覆实验,探究激光功率、扫描速度、送粉速率、搭接率对熔覆层质量的影响,获得优化激光工艺参数组合。并通过光学显微镜、X 射线衍射仪和维氏硬度计对熔覆层进行分析。结果表明:工艺参数对熔池高度与熔池宽度的影响程度由小到大排列为:送粉速率、扫描速度、激光功率,对维氏硬度的影响程度由小到大排列为:扫描速度、送粉速率、激光功率。获得的最优工艺参数组合为:激光功率 800 W,扫描速度 3 mm/s,送粉速率 4 g/min,搭接率 50%。此时熔覆层的维氏硬度均值为 757.9 HV,是基材的 3.5 倍。熔覆层与基材冶金结合良好,其微观组织由枝状晶、胞状晶和柱状晶组成。

**关键词:**激光熔覆; Fe-W-B 熔覆层; 工艺参数; 维氏硬度

**中图分类号:** TN249; TG665 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.009

## Influence of laser cladding process parameters on the quality of Fe-W-B cladding layer

TANG Min<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-guo<sup>1</sup>, WEI Xiang<sup>1</sup>

(1. Department of Energy and Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China; 2. Central China Branch of National Engineering Research Center for Advanced Iron and Steel Materials Technology, Loudi 417000, China)

**Abstract:** The laser cladding technology is used to clad Fe-W-B ternary boride cladding layer on 65Mn steel surface. Through the experiments of single-pass cladding and single-layer multi-channel cladding, the effects of laser power, scanning speed, powder feeding rate and lap rate on the quality of cladding layer are explored to obtain the optimal combination of laser process parameters. The cladding layer is analyzed by optical microscope, X-ray diffractometer and Vickers hardness tester. The results show that the influence of process parameters on the height of the molten pool and the width of the molten pool are in descending order: powder feeding rate, scanning speed and laser power, and the influence on Vickers hardness is in descending order: scanning speed, powder feeding rate and laser power. The optimal combination of process parameters is obtained as follows: laser power of 800 W, scanning speed of 3 mm/s, powder feeding rate of 4 g/min, lap rate of 50%. The average Vickers hardness of the cladding layer is 757.9 HV, which is 3.5 times that of the substrate. The cladding layer is well combined with the metallurgy of the substrate, and its microstructure consists of dendritic crystals, cyto crystals and columnar crystals.

**Keywords:** laser cladding; Fe-W-B cladding layer; process parameters; Vickers hardness

### 1 引言

65Mn 是优质碳素结构钢,具有强度高、硬度

高、淬透性好等优点,被广泛应用于农业机械、矿山机械设备等与土壤的沙石接触的耐磨关键零部件

**基金项目:**湖南省普通高等学校教学改革研究项目(No. HNJG-2021-0992);湖南人文科技学院研究生科研创新项目(No. ZSCX2022Y28)资助。

**作者简介:**唐敏(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为表面激光熔覆技术;E-mail:1691096865@qq.com

**通讯作者:**汪力(1985-),男,博士,主要研究方向为表面修复与强化技术。E-mail:318205396@qq.com

**收稿日期:**2023-07-06; **修订日期:**2023-09-07

上<sup>[1]</sup>。三元硼化物具有硬度高、耐磨性能和耐腐蚀性能强的特点<sup>[2]</sup>,将其涂敷在 65Mn 表面,可以有效地提高其硬度与耐磨性能,从而增强其使用寿命。目前,放电等离子烧结技术<sup>[3]</sup>、喷涂法<sup>[4]</sup>、固相反应法<sup>[5]</sup>、激光熔覆<sup>[6]</sup>等技术已广泛应用于三元硼化物的制备。激光熔覆技术是采用高能量的激光束将基体表面加热熔化,快速形成熔池。与此同时,激光束将喷嘴中随氩气喷出的金属粉末熔化并注入熔池中,两者快速凝固形成冶金结合良好的表面涂层。激光熔覆技术具有熔凝速率高、热影响区窄、冶金结合好、稀释最佳、熔覆工艺操作参数控制准确等优点<sup>[7]</sup>,具有良好的应用前景。

激光熔覆技术中激光工艺参数的选择对熔覆层的尺寸形貌、宏观组织、显微组织和力学性能有直接影响。研究表明,激光功率、熔覆速度、送粉速率、扫描速度以及搭接率等是影响熔覆层微观组织与相结构的重要因素<sup>[8]</sup>。Zhang Hao 等<sup>[9]</sup>研究了激光熔覆工艺参数对 Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> 三元硼化物的影响,发现激光功率正向影响熔池宽度和稀释率,负向影响熔池高度,扫描速度对熔池高度和稀释率的影响较小。林基辉等<sup>[10]</sup>研究发现,铬钼硼合金涂层的硬度随着激光功率的增加呈现先增加后降低的趋势;随扫描速度的增加呈现逐渐降低的趋势;随搭接率的增加呈现先增加后降低的趋势。

表 1 65 Mn 钢的化学成分(wt %)

Tab. 1 Chemical composition of 65Mn steel(wt %)

成分	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Fe
含量	0.62 ~ 0.7	0.17 ~ 0.37	0.9 ~ 1.2	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.3	Bal.

表 2 FeB 粉末的化学成分(wt %)

Tab. 2 Chemical composition of FeB powder(wt %)

成分	B	Si	Al	C	P	S	Fe
含量	20	≤0.4	≤0.05	≤0.1	≤0.03	≤0.003	Bal.

表 3 FeW 粉末的化学成分(wt %)

Tab. 3 Chemical composition of FeW powder(wt %)

成分	W	Fe	C	S	B	LEC
含量	84.23	14.25	0.05	<0.01	<0.05	Bal.

## 2.2 实验设备

本实验使用的是辉锐增材制造有限公司开发的 MobiMRO ® 10E-300 激光熔覆设备,该设备使用的是最大功率 3000 W 的光纤激光器,送粉模式为氩气作为保护气和载气进行同轴送粉,氩气载气流量 12 L/min,喷嘴为三点式环形喷嘴。冷却装置为市售水冷装置,水流速度 1.2 L/min。

张秀香等<sup>[11]</sup>研究发现,随着激光功率的增加,熔池的体积和熔池深度不断增加,从而导致合金层厚度逐渐增加。目前虽然通过改变工艺参数提高熔覆层表面质量取得了一定的成果,但对三元硼化物熔覆层的相关研究还鲜有报道。

本文设计了三因素三水平的正交实验,采用激光熔覆技术在 65Mn 表面制备了 Fe-W-B 三元硼化物熔覆层,以激光功率、扫描速度和送粉速率为优化变量,探究了三因素对熔池宽度、熔池高度、显微维氏硬度的影响,从而获得最优工艺参数组合。

## 2 实验材料及方案

### 2.1 实验材料

实验采用 65 Mn 钢为基材,其尺寸为 150 mm × 100 mm × 6 mm,65Mn 钢化学成分如表 1 所示,用打磨机去除基材表面铁锈、油渍等,再使用无水乙醇清洁。

熔覆材料选用的是质量分数为 17.5 % FeB 粉末、40 % FeW 粉末以及 42.5 % Fe 粉末,FeB 粉末与 FeW 粉末的化学成分如表 2、表 3 所示。将三种粉末按比例称重,置于 QM-2 型滚筒球磨机上采用干磨的方法进行球磨,其转速为 120 r/min,球磨时间为 8 h,球料比为 2 : 1,磨球采用的是 3 mm 与 5 mm 的不锈钢球,两者的比例为 3 : 2。

采用 Leica DM4M 光学显微镜和扫描电子显微镜观察熔覆层显微组织形貌,并且对熔池宽度和熔池高度进行测量。采用 DPT-5 型表面着色渗透探伤剂对熔覆层表面进行渗透探伤实验。采用 Rigaku (D/Max2550) X 射线衍射仪对其进行物相分析,其中所用的靶材为铜靶,加速电压 40 kV,扫描速度 8 °/min,10° ~ 90°连续耦合扫描,步长 0.02°。采用

MK-VK型显微维氏硬度计对熔覆层截面硬度进行测量,其试验力为9.8 kg,保荷时间15 s,从熔覆层表面至基材方向每隔20  $\mu\text{m}$  测量一个数值,取其平均值作为熔覆层的硬度值。

### 2.3 正交实验设计

为研究激光熔覆参数组合对熔覆层几何形貌和显微维氏硬度的影响,确定三个因素对熔池宽度、熔池高度和维氏硬度的影响权重和影响规律,以激光功率、扫描速度和送粉速率为研究对象,采用三因素三水平  $L_9(3^4)$  正交实验,设计出9组激光工艺参数,其三因素三水平如表4所示,激光熔覆工艺参数如表5所示。

表4 正交实验三因素与三水平表

Tab.4 Orthogonal experiment three-factor and three-level tables

水平	因素		
	A	B	C
	激光功率 $P/W$	扫描速度 $V_s$ $/(mm \cdot s^{-1})$	送粉量 $V_f/(g \cdot \text{min}^{-1})$
1	600	3	3
2	800	4	4
3	1000	5	5

表5 激光熔覆工艺参数

Tab.5 Laser cladding process parameters

序号	激光功率 $P/W$	扫描速度 $V_s/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $V_f/(g \cdot \text{min}^{-1})$
1	600	3	3
2	600	4	4
3	600	5	5
4	800	3	4
5	800	4	5
6	800	5	3
7	1000	3	5
8	1000	4	3
9	1000	5	4

## 3 实验结果及分析

### 3.1 激光参数对单道熔覆层质量的影响

#### 3.1.1 单道熔覆层宏观形貌分析

图1为不同激光工艺参数下熔覆层的单道熔覆。由图1(a)可知,所有熔覆层连续性较高,熔覆层具有窄而薄的特点,熔覆层与基体冶金结合较好。而且随着激光功率的不断增大,熔覆层中表面的熔渣也不断减少,熔覆层的厚度也不断增加,这是因为随着激光功率的增加,激光束能量不断增加,单位时间内熔化的合金粉末越多,粉末利用

率越高,遗留在熔覆层表面未熔化的粉末越少,熔覆层表面更光滑。图1(b)为不同激光工艺参数下熔覆层的渗透探伤结果。由图可知,裂纹数量随着激光功率的增加而不断增加。因为随着功率的不断增大,热输入量不断增加,焊前与焊后的温度差也不断增加,熔覆层所受热应力不断增加,导致涂层的裂纹增加。当激光功率一定时,随着送粉量的不断增加,单位面积上熔覆层的厚度增加,熔覆层散热相对较慢,热应力不断增加,熔覆层间裂纹数量不断增加。

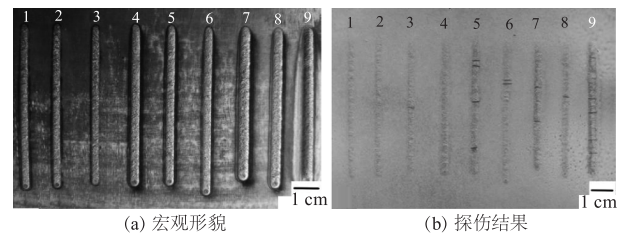


图1 不同激光工艺参数下熔覆层的单道熔覆

Fig.1 Single cladding of cladding layer under different laser process parameters

#### 3.1.2 正交实验结果分析

激光熔覆熔覆层分为熔覆区、稀释区、热影响区和基材四个部分,如图2所示。

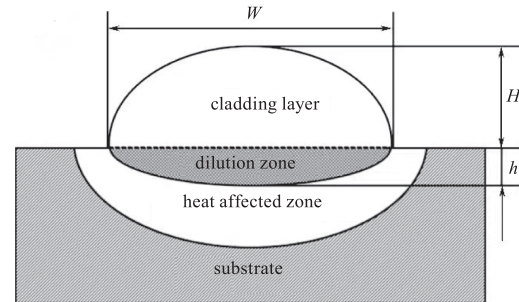


图2 熔覆层截面组成

Fig.2 Cross-sectional composition of cladding layer

图中  $W$  为熔池宽度,  $H$  为熔池高度,  $h$  为熔池深度,  $R_w$ 、 $R_H$ 、 $R_{Hv}$  分别为熔池宽度、熔池高度、熔覆层显微维氏硬度受三个因素影响的均值极差。  $r_w$ 、 $r_H$ 、 $r_{Hv}$  分别为熔池宽度、熔池深度、熔覆层显微维氏硬度受三个因素影响的权重。

采用相关实验设备对熔覆层进行检测,测量结果如表6所示。对熔池宽度,熔池高度和维氏硬度进行极差分析和方差分析,极差分析如表7所示,方差分析如表8所示。

由表7极差分析可知,对于熔池高度,  $R_H(C) < R_H(B) < R_H(A)$ ,即在三个因素中,熔池高度受激光功率影响最弱,受送粉速率影响最强,且获得最优参数组合为 A3B1C3。对于熔池宽度,  $R_w(C) < R_w(B)$

表 6 正交实验检测结果

Tab. 6 Orthogonal experimental test results

序号	激光功率 $P/W$	扫描速度 $V_s/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $V_f/(g \cdot min^{-1})$	熔池高度 $H/mm$	熔池宽度 $W/mm$	维氏硬度 HV
1	600	3	3	0.58	2.38	792.4
2	600	4	4	0.44	2.14	885.8
3	600	5	5	0.43	2.10	863.6
4	800	3	4	0.65	2.47	969.6
5	800	4	5	0.69	2.51	817.0
6	800	5	3	0.58	2.32	582.5
7	1000	3	5	0.70	2.53	639.3
8	1000	4	3	0.65	2.39	683.2
9	1000	5	4	0.70	2.47	631.4

$<R_w(A)$ ,即在三个因素中,熔池宽度受送粉速率影响最弱,受激光功率影响最强,且获得最优参数组合为 A3B1C3。对于显微维氏硬度,  $R_{HV}(B) < R_{HV}(C) < R_{HV}(A)$ ,即在三个因素中,熔池高度受扫描速度影响最弱,受激光功率影响最强,且获得最优参数组合为 A2B1C2。

由表 8 方差分析可知,方差分析结果中  $F$  值的大小代表了三个因素对熔池高度、熔池宽度和显微维氏硬度的影响程度。对于熔池高度和熔池宽度,均为  $F_C < F_B < F_A$ ,表明三个因素对激光熔覆熔池尺寸的影响排序为:送粉速率 < 扫描速度 < 激光功率。对于显微维氏硬度,  $F_B < F_C < F_A$ ,三个因素对显微维氏硬度的影响排序为:扫描速度 < 送粉速率 < 激光功率。由方差分析结论与极差分析结论一致。由极差与方差分析可知,最优参数主要为 A2B1C2 与 A3B1C3,即实验序号为 4 号与 7 号。由表 6 可知,4 号试样的平均维氏硬度值为 969.6 HV 远高于 7 号试样的平均维氏硬度值 639.3 HV,所以最终选择 A2B1C2 作为最优激光工艺参数组合,即激光功率 800 W,扫描速度 3 mm/s,送粉速率 4 g/min。此时熔覆层的维氏硬度 969.6 HV。

表 7 正交实验极差分析

Tab. 7 Orthogonal experimental range analysis

熔池高度 $H/mm$	A	B	C
k1	0.4833	0.6433	0.6033
k2	0.64	0.5933	0.5967
k3	0.6833	0.57	0.6067
$R_H$	0.2	0.0733	0.01
$r_H$	1	2	3
熔池宽度 $W/mm$	A	B	C
k1	2.207	2.46	2.363
k2	2.433	2.347	2.36
k3	2.463	2.297	2.38
$R_w$	0.257	0.163	0.02
$r_w$	1	2	3
维氏硬度 HV	A	B	C
k1	847.3	800.4	786
k2	889.7	795.3	828.9
k3	651.3	792.5	773.3
$R_{HV}$	238.4	8	55.6
$r_{HV}$	1	3	2

表 8 正交实验方差分析

Tab. 8 Analysis of variance for orthogonal experiments

	来源	自由度	Adj SS	Adj MS	$F$ 值	$P$ 值
熔池高度 $H/mm$	A	2	0.066422	0.033211	4.97	0.167
	B	2	0.008422	0.004211	0.63	0.613
	C	2	0.000156	0.000078	0.01	0.988
	误差	2	0.013356	0.006678	/	/
	合计	8	0.088356	/	/	/
熔池宽度 $W/mm$	来源	自由度	Adj SS	Adj MS	$F$ 值	$P$ 值
	A	2	0.118156	0.059078	3.57	0.219
	B	2	0.042022	0.021011	1.27	0.441
	C	2	0.000689	0.000344	0.02	0.98
	误差	2	0.033089	0.016544	/	/
合计	8	0.193956	/	/	/	

(续表)

	来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
硬度 HV	A	2	97023	48511.3	7.56	0.117
	B	2	97	48.7	0.01	0.992
	C	2	5091	2545.7	0.4	0.716
	误差	2	12835	6417.3	/	/
	合计	8	115046	/	/	/

### 3.1.3 单道熔覆层显微组织分析

熔覆层的组织生长形态是由温度梯度( $G$ )与凝固速度( $S$ )的比值决定的。 $G/S$  越小,熔覆层组织越细小,材料的硬度就越高,耐磨性能就越好; $G/S$  越大,熔覆层组织越粗大,材料的硬度等力学性能就会降低。

图3为激光功率800 W,扫描速度3 mm/s,送粉速率4 g/min时熔覆层的截面形貌。由图可知,熔覆层中上部主要由细小的枝状晶组成,分布致密。由于激光熔覆是一个快速加热和快速冷却的过程,熔覆层中上部相较于熔覆层底部散热较快,容易在该区域形成细小的等轴晶。随着凝固过程不断进行,固液界面逐渐向基材方向移动,其凝固速度也不断增加,温度梯度逐渐降低,所以在快速凝固的过程中容易形成枝状晶,而且随着  $G/S$  减小,熔覆层组织细小使得材料整体硬度提升。对于熔覆层底部,基材与熔覆层底部界面处凝固速度很小,使得  $G/S$  变大,所以熔覆层底部组织颗粒较大,形成了粗大的胞状晶和柱状晶。

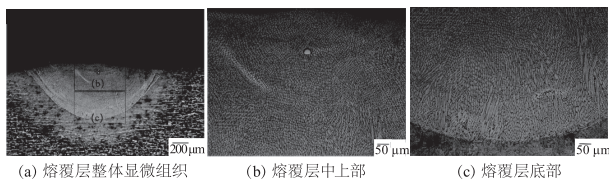


图3 Fe-W-B 熔覆层的截面形貌

Fig. 3 Microstructure morphology of Fe-W-B cladding layer

## 3.2 搭接率对单层多道熔覆层质量的影响

### 3.2.1 多道熔覆层宏观形貌分析

图4为不同搭接率下熔覆层的单层多道熔覆。由图4(a)可知,当搭接率为40%时,熔覆层表面凹凸不平,表面粗糙度较高。随着搭接率不断增加,熔覆层的致密性也不断增加,表面平整度也不断增加。图4(b)为不同搭接率下熔覆层的渗透探伤结果。由图可知,随着搭接率的不断增加,熔覆层的缺陷也不断增加。随着搭接率的不断增加,熔覆层间的残余应力不断叠加,熔覆层间局部应力增加,使得熔覆层间易产生裂纹,影响材料的综合性能,降低材料使用寿命。

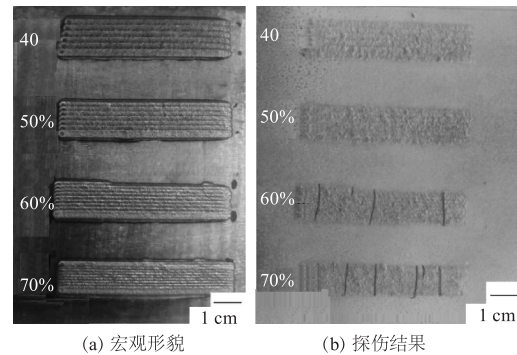


图4 不同搭接率下熔覆层的单层多道熔覆

Fig. 4 Single-layer multi-channel cladding of cladding layers at different lap rates

### 3.2.2 多道熔覆层显微组织分析

图5为四种不同搭接率(40%、50%、60%、70%)下单层多道熔覆层的显微形貌。由图可知,随着搭接率的不断提高,熔覆层的厚度不断增加,熔覆层与基体结合处也逐渐趋于平整。但随着搭接率不断提高,熔覆层热量积累严重,散热较慢,熔覆层与基体之间温度差不断增加,熔覆层内部的热应力也不断增加,使得熔覆层间易产生孔洞与裂纹。当搭接率为40%、50%时,熔覆层成形质量较好,无明显缺陷产生。当搭接率为60%时,熔覆层间由于热应力较大产生了裂纹。当搭接率提升至70%时,熔覆层内部有两种直径不同的孔洞产生,直径较大的孔洞是由于未熔化的铁钨粉末颗粒与熔覆层连接不紧密,易掉落形成孔洞;直径较小的孔洞是由于热量累积严重,导致熔池内部不稳定形成孔洞与裂纹。而搭接率为50%时,熔覆层表面平整,内部无缺陷。综合考虑熔覆层的宏观形貌以及显微组织,最终选择50%作为优化后的搭接率。

为进一步分析裂纹产生原因,对裂纹区域进行形貌观察,如图6所示。熔覆层裂纹主要由贯穿裂纹与非贯穿裂纹构成,两种裂纹均是由熔覆层表面萌生,并沿晶界向基材处延伸。贯穿裂纹是在熔覆层表面萌生,沿晶界一直向下延伸,最终由于基体交界处在热循环的作用下,发生了马氏体相变,体积不断膨胀,使得原本的拉应力逐渐转变成较大的压应力,从而使得裂纹在基体附近停止延伸。而且贯穿

裂纹还有多处拐点存在,产生了二次开裂,但所有开裂均沿晶界开裂,且延伸方向均向下。由于裂纹源出现在熔覆层表面,且垂直于基材交界处向下延伸,最终停止于熔覆层内部或基材交界处,所有判断出两种裂纹均为较大热应力作用下导致的低塑性脆化裂纹。

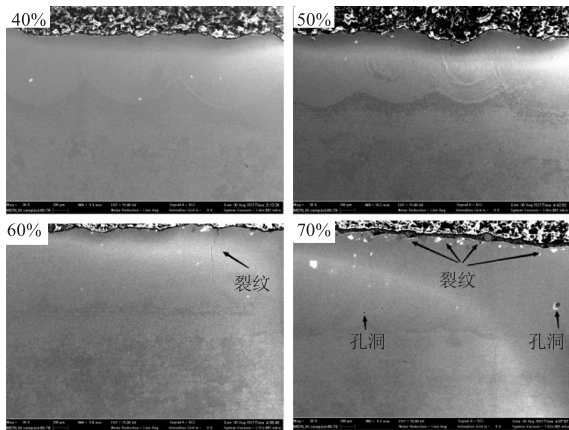


图5 不同搭接率下熔覆层的截面形貌

Fig. 5 Microstructure morphology of cladding layer at different lap rates

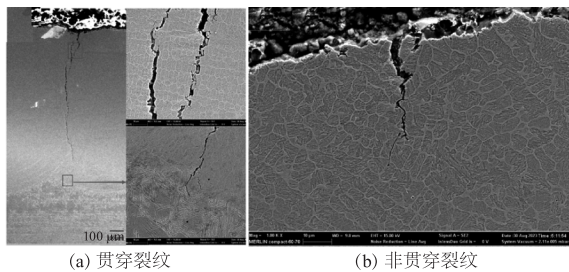


图6 熔覆层裂纹形貌

Fig. 6 Cladding layer crack morphology

### 3.2.3 多道熔覆层显微硬度分析

图7为距涂层表面0.2 mm处不同搭接率下的熔覆层沿横向距离的硬度值。由图可知,当搭接率为60%时,硬度有突变现象产生,由于当横向距离为2.5 mm左右时,熔覆层间产生了裂纹,使得熔覆层硬度急剧下降。当搭接率为50%与70%时,熔覆层的平均硬度值分别为757.9 HV、752.5 HV,两者硬度值相差不大,约为基材的3.5倍。当搭接率为40%时,熔覆层的平均硬度最低为731.5 HV,因为当搭接率较小时,单位时间内粉末熔化量较少,熔覆层厚度较低,熔覆层与基材的冶金结合力相对较弱<sup>[12]</sup>,从而使得熔覆层的硬度较低。整体而言,不同搭接率下的熔覆层硬度均高于基材的硬度,且当搭接率为50%时硬度最高为757.9 HV,约为基材(211 HV)的3.5倍。

### 3.2.4 Fe-W-B 熔覆层物相分析

图8为激光功率800 W、扫描速度3 mm/s、送

粉速率4 g/min、搭接率50%时,Fe-W-B熔覆层的XRD图谱。由图可知,熔覆层中除了基体相Fe和W外,还生成了金属相Fe<sub>2</sub>B,以及非金属相W<sub>2</sub>B和FeWB。主要物相为Fe<sub>2</sub>B,其硬度约为1200~1800 HV,其作为硬质相在熔覆层间形成弥散强化的作用,有效的提高了熔覆层硬度。王佳峰<sup>[13]</sup>采用SPS烧结工艺制备了FeWB基复合涂层,研究发现涂层主要由Fe<sub>2</sub>B、W<sub>2</sub>B和FeWB三种物相组成,本实验所含主要物相与该学者所得物相相似。这是由于在制备Fe-W-B熔覆层时,原始粉末中含有FeW粉中的W与FeB粉反应生成Fe<sub>2</sub>B与W<sub>2</sub>B,随后生成的Fe<sub>2</sub>B与W<sub>2</sub>B反应形成FeWB<sup>[14]</sup>。

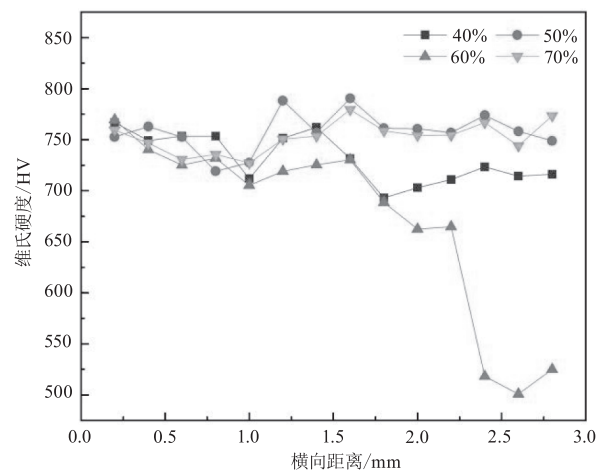


图7 不同搭接率下熔覆层的显微维氏硬度

Fig. 7 Cross-sectional morphology of cladding layer at different lap rates

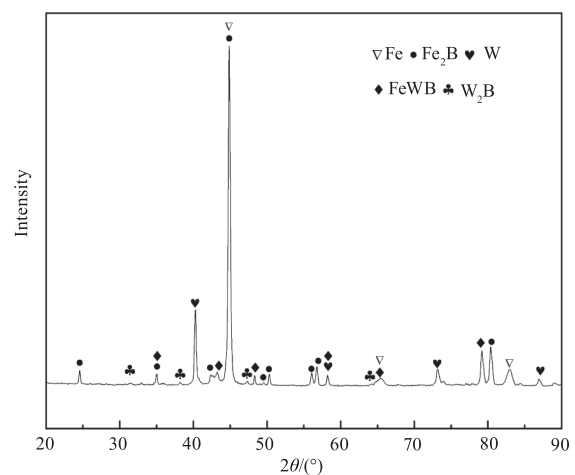


图8 Fe-W-B熔覆层XRD图谱

Fig. 8 XRD pattern of Fe-W-B cladding layer

## 4 结 论

(1)激光工艺参数对熔池高度与熔池宽度的影响程度均为:送粉速率<扫描速度<激光功率,激光工艺参数对维氏硬度的影响程度为:扫描速度<送

粉速率 < 激光功率。选定最优工艺参数组合为激光功率 800 W, 扫描速度 3 mm/s, 送粉速率 4 g/min。

(2) 熔覆层与基材冶金结合良好, 无裂纹、气孔等缺陷。熔覆层中上部由细小的枝状晶组成, 分布致密, 熔覆层底部由粗大的胞状晶和柱状晶组成。

(3) 搭接率为 40 % 时, 熔覆层表面凹凸不平, 粗糙度较高。搭接率增加至 60 % 时, 由于局部应力过大导致熔覆层产生裂纹。当搭接率为 70 % 时, 由于热量积累过多, 熔覆层产生了裂纹、孔洞等缺陷。而搭接率为 50 % 时, 熔覆层表面平整, 内部无缺陷。此时熔覆层平均硬度为 757.9 HV, 约为基材 (211 HV) 的 3.5 倍。

### 参考文献:

- [1] Xu Feng. Fracture analysis and process improvement of 65 Mn steel spring leaf[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(12): 281-283. (in Chinese)  
徐峰. 65 Mn 钢弹簧片断裂分析及工艺改进[J]. 金属热处理, 2022, 47(12): 281-283.
- [2] Gong Yubo, Zhao Shixin, Wei Xuguang, et al. Research progress of polyboride ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2022, 43(4): 567-578. (in Chinese)  
龚雨波, 赵世鑫, 位旭光, 等. 多元硼化物陶瓷的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(4): 567-578.
- [3] Demir B, Ayas E. Synthesis of Cr<sub>2</sub>AlB<sub>2</sub> MAB phase via spark plasma sintering: effect of temperature, dwell time, and Al content[J]. Materialia, 2022, 22: 101416.
- [4] Chen Xiangjun, Liu Xia, Hu Kai, et al. Effect of HVOF parameters on the corrosion resistance of MoB/CoCr coatings in molten Al-Si alloy[J]. Materials Protection, 2020, 53(11): 62-69, 93. (in Chinese)  
陈相君, 刘侠, 胡凯等. 喷涂参数对 MoB/CoCr 涂层耐熔融铝硅腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(11): 62-69, 93.
- [5] Wang Kun. Preparation and mechanical properties of ternary boride ceramic coatings [J]. Ceramics, 2021, 425(3): 27-37. (in Chinese)  
王坤. 三元硼化物陶瓷涂层的制备及其力学性能研究[J]. 陶瓷, 2021, 425(3): 27-37.
- [6] Tan Mixue, Wang Zhen, Zhao Fengjun, et al. Effect of process parameters of laser cladding on high-speed steel coating[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6): 202-206. (in Chinese)  
谭米雪, 王臻, 赵凤君, 等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 202-206.
- [7] Sun Zeyang. Microstructure and properties of laser cladding FeCoNiCuAlNbx high entropy alloy coating[D]. Anhui, Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)  
孙泽阳. 激光熔覆 FeCoNiCuAlNbx 高熵合金涂层组织结构及性能研究[D]. 安徽, 合肥工业大学, 2021.
- [8] Yu Tianbiao, Han Jibiao, Joe Ruozhen, et al. Influence of process parameters on iron-based and nickel-based powder coating properties [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(7): 801-807. (in Chinese)  
于天彪, 韩继标, 乔若真, 等. 工艺参数对铁基和镍基粉末涂层性能的影响[J]. 激光与红外, 2019, 49(7): 801-807.
- [9] Zhang Hao, et al. Sensitivity analysis for process parameters in Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> ternary boride coating by laser cladding [J]. Coatings, 2022, 12(10): 1420-1420.
- [10] Lin Jihui, Li Yao, Guo Dong, et al. Preparation process of chromium alloying of 45 steel laser surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(12): 170-173. (in Chinese)  
林基辉, 李耀, 郭栋, 等. 45 钢激光表面铬合金化的制备工艺[J]. 金属热处理, 2018, 43(12): 170-173.
- [11] Zhang Xiuxiang, Li Xiang, Dai Jiaoyan, et al. 45 steel laser boron alloying process optimization and performance research [J]. Ordnance Materials Science and Engineering. 2016, 39(1): 97-100. (in Chinese)  
张秀香, 李翔, 戴姣燕, 等. 45 钢激光硼合金化工艺优化及性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(1): 97-100.
- [12] Chaus A S, Beznak M, Porubsky J, et al. Effect of austenitising temperature on microstructural changes in high-speed steel of M2 type inoculated with addition of WC powder [JJ. Defect and Diffusion Forum, 2013, 333: 27-32.
- [13] Wang Jiafeng. Study on microstructure and wear properties of FeWB matrix composites and their coatings [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)  
王佳峰. FeWB 基复合材料及其涂层组织与磨损性能研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [14] Li Cheng, Jun Li, Ying Liu. Phase evolution of Fe-W-B powders and stability of FeWB ternary boride prepared by reactive synthesis [J]. Materials Research Express, 2018, 5(1): 016517.