

H13 钢压射冲头表面激光熔覆工艺 的参数优化

冷岳峰, 张亮*, 郑春生

(辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要 为解决 H13 压射冲头表面失效问题, 确定激光熔覆技术在 H13 钢表面制备铁基合金涂层的最优参数, 以激光功率、扫描速度、送粉速度 3 种参数为优化变量, 以稀释率和宽高比作为最优化方案的评价标准, 基于正交试验法研究上述三种变量对评价指标的影响, 采用极差分析法对正交试验的结果进行分析。采用综合平衡法并建立线性回归模型, 最终确定出最优化工艺参数组合为激光功率 1 400 W、扫描速率 12 mm/s、送粉速度 1.2 rad/s。研究结果表明在最优化工艺参数组合下生成的铁基合金涂层具有优良的性能。通过分析涂层显微组织和物相发现, 涂层主要由 α -Fe、FeNi₃、FeCr、C₂Fe₅ 等物相组成, 硬度比基体提高了 34.72%。说明 Fe60 熔覆粉末在 H13 压射冲头表面熔覆可以形成性能良好的涂层, 达到了 H13 压射冲头的使用要求。

关键词 激光熔覆; 压射冲头; H13; 正交试验; 极差分析; Fe60 熔覆粉末

中图分类号: TG178

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20254505.009

Parameter Optimization of the Laser Cladding Process on the Surface of the H13 Steel Injection Head

Leng Yuefeng, Zhang Liang*, Zheng Chunsheng

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract In order to address the surface failure issue of H13 injection head, and to determine the optimal parameters for preparing iron-based alloy coatings on the surface of H13 steel using laser cladding technology. Taking laser power, scanning speed, and powder feeding rate as the optimization variables, and dilution rate and aspect ratio as the evaluation criteria for the optimal solution. Based on the orthogonal experimental design method, the influence of the three variables mentioned above on the evaluation indicators was studied, and the range analysis method was used to analyze the results of the orthogonal experiment. By using the comprehensive balance method and establishing a linear regression model, the optimal combination of process parameters is determined to be laser power of 1 400 W, scanning speed of 12 mm/s, and powder feeding rate of 1.2 rad/s. The research results show that the iron-based alloy coating generated under the optimal process parameters combination exhibits excellent performance. Through the analysis of the coating microstructure and phase composition, it was discovered that the coating is mainly composed of phases such as α -Fe, FeNi₃, FeCr, C₂Fe₅, etc. The hardness of the coating has increased by 34.72% compared to the substrate. It can be indicated that the Fe60 clad powder can produce a high-performance coating on H13 injection heads, meeting their operational requirements.

Key words laser cladding; injection head; H13; orthogonal experiment; range analysis; Fe60 clad powder

0 引言

压射冲头是压铸生产中极其关键的一个零部

件, 压射冲头的材料以 H13、球墨铸铁、铍青铜等材料为主, 其中, H13 拥有良好的韧性、淬透性及抗热

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 2022 年辽宁省教育厅基本科研项目(面上项目)(LJKMZ20220686)

作者简介: 冷岳峰(1978—), 男, 硕士, 副教授。研究方向为先进制造技术与系统、矿山设备设计制造技术。E-mail: lengyuefeng@126.com

* 通信作者: 张亮(1999—), 男, 硕士研究生。研究方向为结构轻量化、先进制造技术。E-mail: 857238663@qq.com

裂能力,且价格相对较低,是目前最为普遍的热锻模具钢^[1]。压铸过程中由于高温的熔液对冲头表面的反复冲刷,以及冲头与压室之间的高速摩擦,冲头极易遭受磨损并失效,缩短冲头的使用寿命,直接影响压铸生产的效率和成本^[2]。因此,解决压射冲头表面失效问题是非常有必要的。

目前,压射冲头的表面修复技术主要有激光熔覆技术、离子渗氮技术、表面气相沉积强化等方法。其中,激光熔覆技术是激光熔覆表面强化技术和快速原型制造技术两者的结合体^[3],能够制备出具有良好耐磨、耐腐蚀及较高硬度的熔覆层^[4]。激光熔覆技术具有结合强度好、热变形及热影响区较小、凝固时间短等优点。叶四友等^[5]采用激光熔覆技术对 H13 钢表面进行处理,并对 H13 合金涂层进行试验研究,研究结果表明,熔覆后的 H13 合金涂层内部组织均匀致密,硬度至少提高了 2.4 倍。张胜江等^[6]基于正交试验和极差分析法,研究了球墨铸铁表面熔覆层的质量与激光熔覆工艺参数之间的关系,结果表明通过选择合理的工艺参数,可以极大地提高熔覆层的质量。任思学等^[7]利用激光技术在 20CrMnTi 表面熔覆 Ni60A-25%TiC 粉末,研究了工艺参数对涂层耐磨性和硬度的影响,结果表明在最佳工艺参数下,复合涂层的硬度和耐磨性显著

提高。

因此,为了能得到较好的熔覆层,以激光功率(A)、扫描速度(B)、送粉速率(C)为研究对象,以稀释率和宽高比为评估指标,采用正交试验和极差分析法分析工艺参数对熔覆层的影响^[8-10],通过综合平衡法并建立回归模型确定最优工艺参数;将 Fe60 粉末熔覆到 H13 基体上,最后,对熔覆后的涂层显微组织、硬度及物相进行验证^[11]。

1 试验材料及设备

本次试验以研究压射冲头修复为背景,故基体材料选择与冲头材料相同的 H13 钢,将基体材料加工成长 50 mm、宽 50 mm、高 12 mm 的试样块,基材具体成分如表 1 所示。为了保证试样块与冲头的力学性能一致,将试样块进行粗加工后,在高温条件下进行 1 030 ℃ 的淬火处理,然后进行两次高温回火处理,使其硬度达到 48~52 HRC,试验前利用磨床打磨,使用高浓度的酒精溶液浸泡去除氧化铁等锈渍。为了确保压射冲头的表面性能,选取的熔覆粉末应当在线膨胀系数、熔点和润湿性等方面与基体材料相近。由于铁基粉末具有良好的耐磨和耐蚀性,且自熔性较好,因此,选择 Fe60 粉末作为 H13 钢基体的熔覆材料,其化学成分如表 2 所示。

表 1 H13 钢化学成分含量
Table 1 Chemical composition content of H13 steel

Element	C	Si	Cr	Mo	Mn	V	S	P
Mass fraction/%	0.32~0.45	0.80~1.20	4.75~5.50	1.10~1.75	0.20~0.50	0.80~1.20	≤0.03	≤0.03

表 2 Fe60 合金粉末元素成分
Table 2 Element composition of Fe60 alloy powder

Element	C	B	Si	Cr	Ni	W	Fe
Mass fraction/%	4.0~4.5	1.5~2.5	2.0~5.0	24.0~30.0	4.0~6.0	2.0~3.0	Bal.

图 1 为激光熔覆设备^[12],试验所用的仪器有:德国产的 LDM3000-100 半导体激光器(输出功率范围为 100~3 000 W)、IWS-COAX8 同轴

送粉喷嘴和 PF2/2 送粉器(以氩气作为载粉与保护气体)、维氏硬度计、超景深显微镜、X 射线衍射仪。

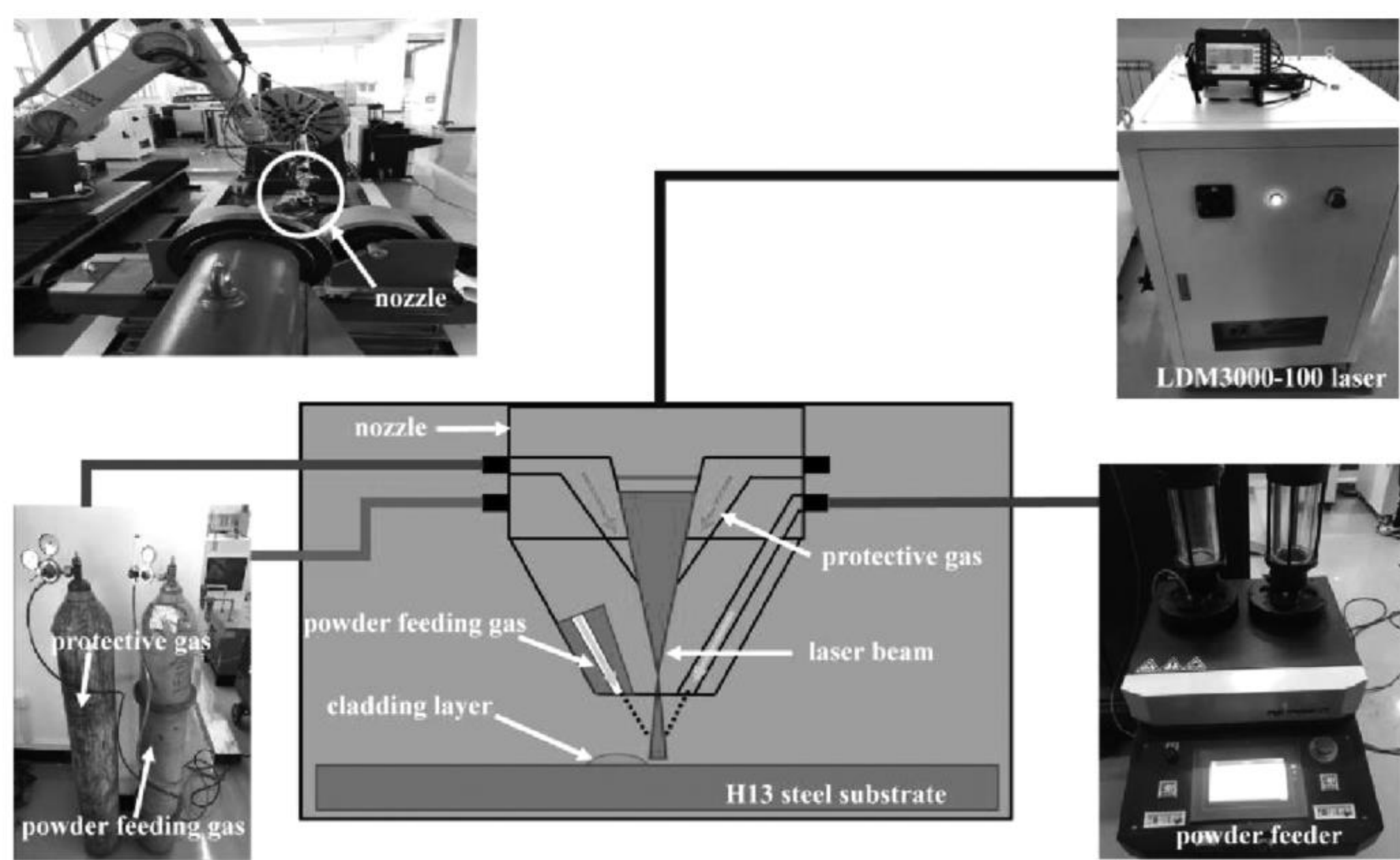


图 1 激光熔覆设备
Fig. 1 Laser cladding equipment

2 试验方法

2.1 正交试验

激光熔覆的工艺参数与熔覆层形貌及成型质量有着密切的联系^[13],且各个参数之间相互作用,若把所有参数都当成自变量处理,则试验过于复杂,不易实现。故本试验在光斑直径 $D_s=4\text{ mm}$ 的基础上,分

别以激光功率(A)、扫描速率(B)、送粉速率(C)3个参数为研究对象,每个参数设置3个水平量(表3),得到9组正交试验参数,表4为正交试验优化方案。根据9组正交试验方案,在H13基体材料上分别进行激光熔覆,得到熔覆层宏观图(图2)和熔覆层截面图(图3)。

表 3 实验因素
Table 3 Experimental factors

Serial number	Laser power/W	Scan speed/(mm · s ⁻¹)	Power feeding rate/(rad · s ⁻¹)
1	$A_1=1\ 000$	$B_1=6$	$C_1=1.2$
2	$A_2=1\ 200$	$B_2=9$	$C_2=1.4$
3	$A_3=1\ 400$	$B_3=12$	$C_3=1.6$

表 4 正交试验优化方案表
Table 4 Orthogonal experiment optimization plan table

Serial number	Laser power/W	Scan speed/(mm · s ⁻¹)	Power feeding rate/(rad · s ⁻¹)
1	1 000	6	1.2
2	1 000	9	1.4
3	1 000	12	1.6
4	1 200	6	1.6
5	1 200	9	1.2
6	1 200	12	1.4
7	1 400	6	1.4
8	1 400	9	1.6
9	1 400	12	1.2

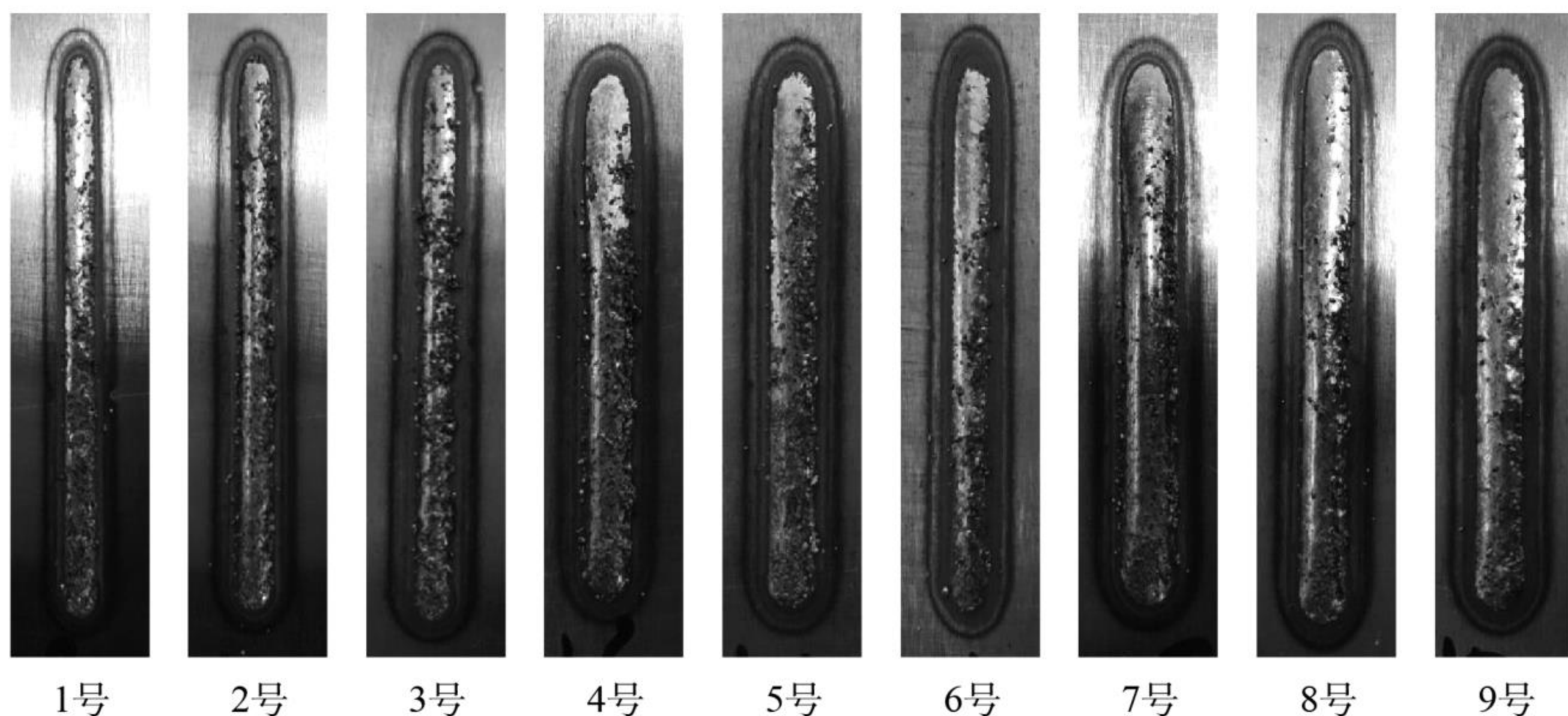


图 2 9 组试验熔覆层宏观图
Fig. 2 Macro view of 9 sets of test cladding layers

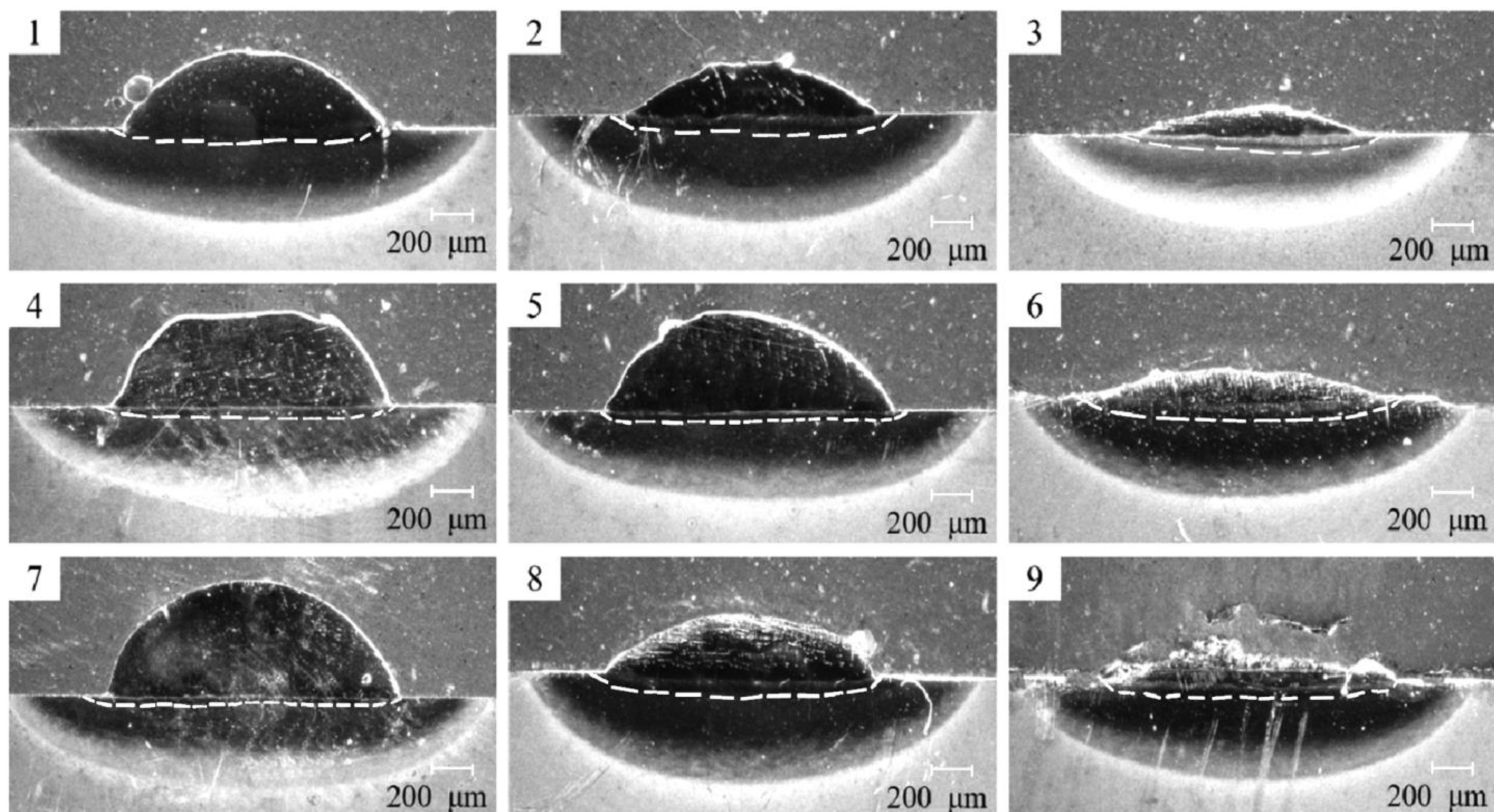


图 3 9 组试验熔覆层截面图
Fig. 3 Cross section view of 9 sets of test cladding layers

2.2 工艺参数优化

稀释率是指熔融的基材进入熔覆层从而使涂层成分产生改变的程度。熔覆层的硬度与成型质量都与其有密切的联系,是评价熔覆质量的一个关键性指标^[14]。稀释率越小越好,因为在满足结合强度的条件下,较小的稀释率不仅能够保证基体与熔覆层之间的结合强度,还能避免熔覆层过多地渗入基体材料中。因此,控制稀释率大小在

合理范围内是非常有必要的,稀释率的简化后计算公式^[15-17]为:

$$\eta = \frac{h}{h+H} \quad (1)$$

式中: h 为熔深,mm; H 为熔高,mm。

宽高比是评价熔覆层质量的另一个关键性指标,其可通过公式(2)计算得出。在满足强度的条件下,熔覆层稀释率较低且宽高比较高,说明熔覆层质

量较好^[18]。宽高比计算公式为：

$$n = \frac{W}{H}$$

(2)

式中： W 为熔宽，mm。

因此，本试验以熔覆层的宽高比以及对基材的稀释程度作为评价标准。图 4 为熔宽(W)、熔高(H)以及熔深(h)的测量示意图，表 5 为正交试验熔覆层测量数据表。

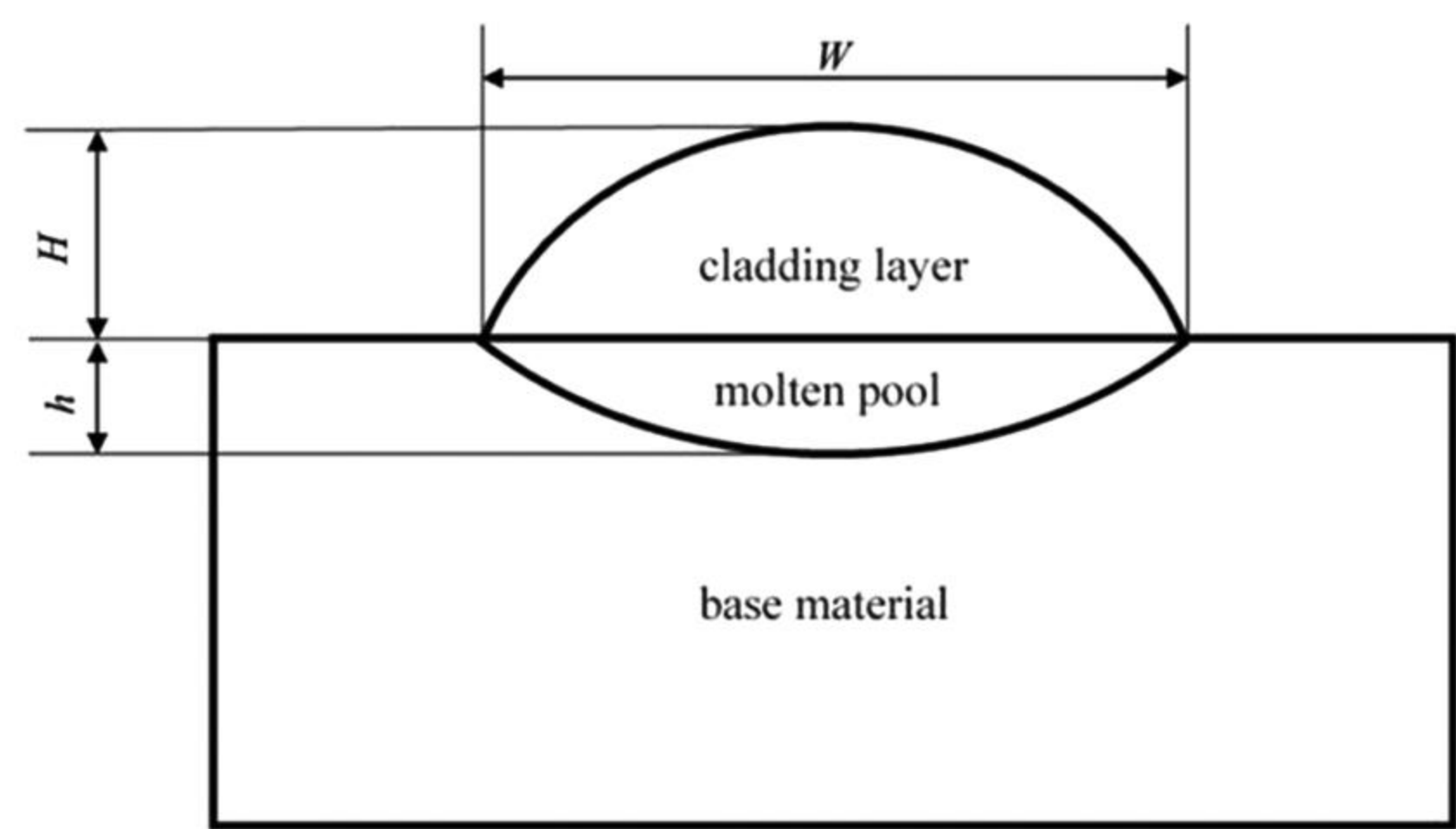


图 4 熔宽 W 、熔高 H 以及熔深 h 的测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement of melt width W , melt height H , and melt depth h

表 5 正交试验熔覆层测量数据表

Table 5 Measurement data table of orthogonal test cladding layer

Serial number	Width/mm	Hight/mm	Pool depth/mm	Dilution ratio/%	Aspect ratio
1	2.832	0.736	0.104	12.381	3.848
2	2.502	0.379	0.111	22.653	6.602
3	2.099	0.281	0.137	32.775	7.470
4	3.273	0.959	0.138	12.579	3.413
5	3.271	0.866	0.079	8.359	3.777
6	2.892	0.554	0.118	17.560	5.220
7	3.461	1.134	0.129	10.214	3.052
8	3.026	0.527	0.103	16.350	5.742
9	2.873	0.634	0.082	11.453	4.532

极差分析法^[19]是分析正交试验结果经常使用的一种方法,具有计算简单、实用性强等特点。根据公式 $R=\max(\overline{K_1},\overline{K_2},\overline{K_3})-\min(\overline{K_1},\overline{K_2},\overline{K_3})$ 计算极差 R 值,根据 R 值的大小来判断 A、B、C 3 种因素对相应评价标准的重要程度,进而获得针对该评价指标的最优化方案。正交试验的极差分析结果如表 6 所示,由极差分析可知,当以稀释率作为评价指标时,A、B、C 3 种因素对稀释率影响的程度依次为 A、C、B,对应的最优参数 $A_3=1\ 400\ W$ 、 $B_1=6\ \text{mm/s}$ 、 $C_1=1.2\ \text{rad/s}$;将熔覆层的宽高比作为评价标准时,3 种因素影响的程度依次为 B、A、C,对应的最优参数 $A_1=1\ 000\ W$ 、 $B_3=12\ \text{mm/s}$ 、 $C_3=1.6\ \text{rad/s}$ 。

根据以上分析,选取不同的评价指标,所产生的最优工艺参数组合也不同,因此,使用综合平衡法^[20-22]来评估其影响次序和优选水平(表 6)。首先,在评估熔覆层稀释率时,因素 A 被认为是最重要的影响因素,而以宽高比为评估指标时,因素 A 被视为第二重要的影响因素,依据综合平衡法“次服从主,少服从多”的准则,应该优先选择稀释率对应的最优水平 A_3 ;其次,当以稀释率为评价指标时,因素 B 排在第三位,被视为次次级影响因素,而以宽高比为评价指标时,因素 B 被认为是最重要的影响因素。因此,应该选择宽高比对应的最优水平 B_3 ;最后,因素 C 用同样的方法选择稀释率对应的最优水平 C_1 。基于以上分析,选定最优参数组合为 $A_3B_3C_1$ 。

表 6 正交试验极差分析结果
Table 6 Orthogonal experiment range analysis results

Dilution ratio/%	Factor A	Factor B	Factor C	Best plan
K_1	67.809	35.174	32.193	$A_3 B_1 C_1$
K_2	38.498	47.362	50.427	
K_3	38.017	61.788	61.704	
$\overline{K_1}$	22.603	11.725	10.731	
$\overline{K_2}$	12.833	15.787	16.809	
$\overline{K_3}$	12.672	20.596	20.568	
R	9.931	8.871	9.837	
Degree of influence of factors		A > C > B		

Aspect ratio	Factor A	Factor B	Factor C	Best plan
K_1	17.920	10.313	12.157	$A_1 B_3 C_3$
K_2	12.410	16.121	14.874	
K_3	13.326	17.222	16.625	
$\overline{K_1}$	5.973	3.438	4.052	
$\overline{K_2}$	4.137	5.374	4.958	
$\overline{K_3}$	4.442	5.741	5.542	
R	1.836	2.303	1.490	
Degree of influence of factors		B> A > C		

2.3 多元线性回归模型的建立与分析

2.3.1 回归模型的建立

表 4 和表 5 的试验数据显示,不同的工艺参数对熔覆层的几何特征(熔宽、熔高和熔深)、稀释率以及宽高比的影响程度不同。因此,在显著性影响水平 $1-\alpha=95\%$ 的前提下,建立熔覆层几何特征、稀释率以及宽高比与工艺参数之间的多元回归方程进行分析^[23]。根据正交试验的数据结果建立多元线性回归方程,得到熔覆层几何特征、稀释率以及宽高比的多元线性回归方程如式(3)、(4)、(5):

$$\begin{aligned} W &= 2.513 + 1.61 \times 10^{-3} A - 1.58 \times 10^{-3} B - 4.813 \times 10^{-1} C \\ H &= 1.003 + 0.749 \times 10^{-3} A - 1.26 \times 10^{-3} B - 3.901 \times 10^{-1} C \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} h &= -0.063 + 0.118 \times 10^{-3} A + 0.056 \times 10^{-3} B - 0.041 \times 10^{-1} C \\ \eta &= -0.0191 - 2 \times 10^{-4} A + 2 \times 10^{-4} B + 2.459 \times 10^{-1} C \end{aligned} \quad (4)$$

$$n = 0.7775 - 3.8 \times 10^{-3} A + 6.4 \times 10^{-3} B + 3.7233 C \quad (5)$$

在光斑直径一定的情况下,由回归方程式(3)可知,3个工艺参数的改变,对熔覆层几何特征影响程度较大的是熔宽和熔高,其次是熔深。其中,激光功率对熔覆层的熔宽和熔高具有正影响,扫描速率与送粉速率对熔覆层的熔宽和熔高具有负影响。激

光功率和扫描速率对熔覆层的熔深具有正影响,送粉速率对熔覆层的熔深具有负影响;由回归方程式(4)、(5)可知,扫描速率、送粉速率对稀释率和宽高比具有正影响,而激光功率具有负影响。

2.3.2 回归模型的理论分析

根据数理统计的显著性检验理论,对熔覆层几何特征、稀释率以及宽高比的回归模型进行分析,检验模型的正确性和拟合程度。

(1) 回归模型的拟合程度检验

由表 7 可知, R -squared 为决定系数,是一种衡量模型对数据拟合程度的指标,它的取值在 0~1 之间,较高的决定系数值表示模型的拟合程度高,反之则低或者没有关系;Adjusted R -squared 为调整决定系数,其考虑了模型中自变量的个数和样本量之间的关系,相比于决定系数更为准确。与 R -squared 类似,Adjusted R -squared 越接近 1 表示拟合的程度越高; F -value 是一种用于检验整个回归模型的显著性的方法,基于假设检验的原理,用来判断自变量是否对因变量具有显著的解释性; P -value 为概率 P 值,当该值小于预先设定的显著性水平时,表明模型整体是显著的。

表 7 拟合程度检验值

Table 7 Fit test value

Object	R-squared	Adjusted R-squared	F-value	P-value
W	0.820	0.712	7.607	0.026 0
H	0.783	0.653	6.011	0.041 1
h	0.683	0.642	3.575	0.102 0
η	0.883	0.813	12.600	0.009 0
n	0.803	0.686	6.810	0.032 0

由表可知,稀释率(η)和宽高比(n)的决定系数为 0.883、0.803,调整决定系数为 0.813、0.686,说明稀释率和宽高比的回归模型的拟合程度相对较高;此回归模型中,样本容量为 9、总自由度为 8、自变量个数为 3,可得组内自由度为 5,由 F 检验的临界值表可知 $F(n_1, n_2) = F(3, 5) = 5.410$ 。而稀释率和宽高比对应的 F 值最小为 $F_{\min} = 6.810 > F(3, 5) = 5.410$,说明自变量对因变量有显著的解释性;稀释率和宽高比对应的 P 值最大为 $P_{\max} = 0.032 < \alpha = 0.05$,也证明了该模

型整体是显著的。

(2)回归模型的回归系数检验

表 8 为稀释率和宽高比回归模型的回归系数的检验值,其中 t -value 用于检验单个自变量对因变量的显著性,当 $\alpha = 0.05$ 时,由 t 分布的分位表可得,通过 $|t|$ 值与 $t_{0.05}(5) = 2.015$ 的大小来确定回归系数是否具有显著性。 P -value 为对应的概率 P 值。当 P 值小于预先设定的显著性水平时,表明模型中的回归系数应该被保留,反之则不该被保留。

表 8 回归系数检验值

Table 8 Regression coefficient test value

Object		Standard error	t -value	P-value
η	A	$6.734\ 1 \times 10^{-5}$	-3.686 7	0.014 194
	B	$7.482\ 3 \times 10^{-5}$	3.293 4	0.021 631
	C	$6.734\ 1 \times 10^{-2}$	3.651 9	0.014 719
n	A	$1.736\ 9 \times 10^{-3}$	-2.204 1	0.048 689
	B	$1.929\ 9 \times 10^{-3}$	3.314 7	0.021 130
	C	1.736 9	2.143 6	0.044 927

由表可知,激光功率(A)、扫描速率(B)、送粉速率(C)的回归系数的 t 值均大于 $t_{0.05}(5) = 2.015$,同时 P 值也都比 $\alpha = 0.05$ 小。说明回归系数具有较高的显著性,3 个工艺参数的系数都应该被保留。

由以上分析可知,熔覆层几何特征、稀释率以及宽高比的回归模型拟合程度高,具有较高的显著性水平,回归系数也同样具有较高的显著性水平,说明回归模型正确,可靠性高,可适用于此试验中。依据熔覆层“稀释率较低且宽高比较高”的评价标准,并结合公式(4)、(5),可以确定最优工艺参数为 $A = 1\ 400\ \text{W}$ 、 $B = 12\ \text{mm/s}$ 、 $C = 1.2\ \text{rad/s}$ 时,此时,熔覆层的质量最好。另外,通过试验数据拟合得到的

多元线性回归模型和综合平衡法所得到的结果匹配程度较好。因此,H13 钢压射冲头表面激光熔覆 Fe 基粉末的最优工艺参数为 $A = 1\ 400\ \text{W}$ 、 $B = 12\ \text{mm/s}$ 、 $C = 1.2\ \text{rad/s}$ 。

3 试验结果分析

3.1 熔覆层显微组织分析

图 5 为 Fe 基粉末在 H13 基体上利用最优工艺参数熔覆得到的不同部位的微观组织图^[24]。图 5(a)为基体组织形貌图,从中可以发现,基体组织包括回火马氏体、回火托氏体、残余奥氏体以及剩余碳化物;图 5(b)为热影响区微观组织,该处生成了大量的马氏体组织,这是由于激光熔覆时产生了较大的过冷度使得该区域等同于进行了重复淬火处理,

从而使得其硬度提高；图 5(c)、5(d) 分别为结合区在不同倍数下的微观组织图，熔覆层与基体的结合强度的高低与结合区组织有密切的联系。观察图 5(c) 发现，熔覆层底部的组织呈现细密的胞状晶结构，并且在结合区域出现了明显的扩散现象。熔覆层与基体之间形成了清晰的白亮带，已达到了良好的冶金结合。图 5(e)、5(f) 分别为不同倍数下熔覆组织微观图，且结合图片可以看出，熔覆层底部的组织呈现胞状晶结构，而向上延伸时逐渐转变为柱状晶结构，晶粒也逐渐变粗。这种转变是由于激光熔

覆过程的快速冷却和快速加热特性，在凝固相变过程中产生了驱动力，促使晶粒沿着垂直于熔覆界面的方向生长。随着反应的进行，温度梯度逐渐均匀，垂直于界面的散热优势下降，不再明显呈现方向性优势，从而导致表面组织趋向于形成等轴晶形态；而如图 5(d)、5(e) 所示，熔覆层区域下部的组织细小，并且由底部至顶部逐渐呈现出胞状晶、柱状晶、等轴枝晶的趋势^[25]，进一步说明，在该最优化工艺参数组合下，使用铁基 Fe60 熔覆粉末在 H13 基体熔覆能够达到较好的组织形态。

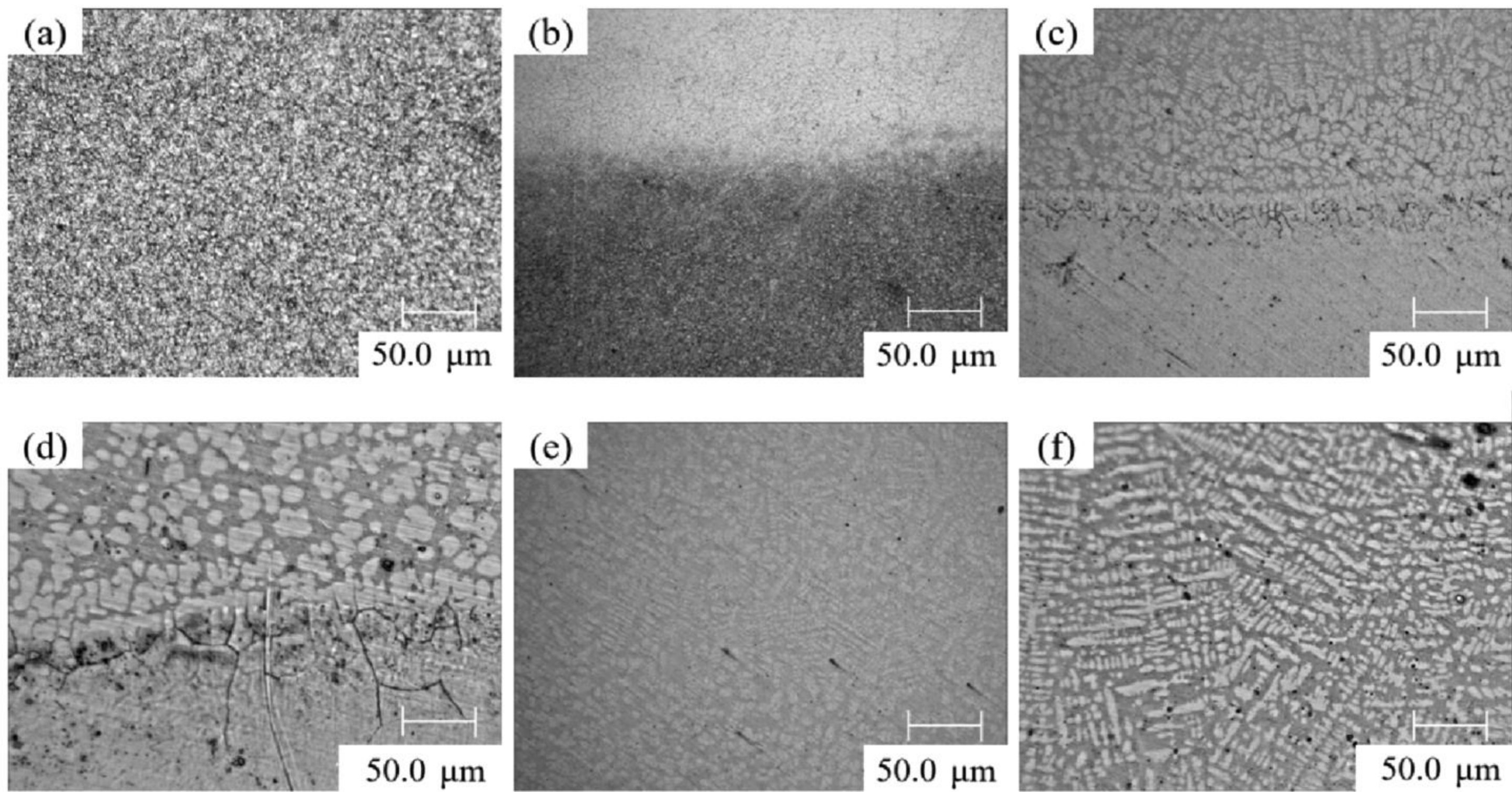


图 5 熔覆层以及 H13 基体显微组织图
(a)基体组织形貌图；(b)热影响区微观组织图；(c)(d)结合区微观组织图；(e)(f)熔覆组织微观图

Fig. 5 Microstructure diagram of the cladding layer and H13 matrix
(a)Matrix microstructure morphology diagram;(b) microstructure of heat affected zone;
(c)(d) microstructure diagram of the combined area;(e)(f) microstructure diagram of cladding structure

3.2 熔覆层硬度测试

对激光熔覆后的试样进行抛光处理，采用维氏硬度计从距表层 0.3 mm 处开始每隔 0.1 mm 测量 1 次硬度，得到熔覆层硬度值(表 9)。图 6 为熔覆层内部显微硬度梯度曲线，熔覆区-热影响区-基体的显微硬度大致呈梯度递减分布^[26-27]，产生这种情况的主要原因是在熔池的凝固过程中，熔覆层底部首

先发生凝固相变，然后这种相变逐渐向上延伸。这导致了熔覆层底部的凝固时间比顶部较长，而顶部的凝固时间较短。由于顶部相较于底部具有更大的过冷度，熔覆层顶部的组织形成了更细小的颗粒。因此，显微硬度呈梯度递减的趋势。通过计算可知，H13 基体的平均硬度值为 567.85 HV，铁基熔覆涂层平均硬度为 765.02 HV，较基体提高了 34.72%。

表 9 熔覆层硬度值

Table 9 Hardness value of the cladding layer

Distance/mm	Hardness/HV	Distance/mm	Hardness/HV
0.3	771.01	1.2	708.78
0.4	771.01	1.3	510.64
0.5	784.47	1.4	517.34
0.6	781.04	1.5	568.81
0.7	787.63	1.6	589.86
0.8	784.46	1.7	561.52
0.9	773.29	1.8	578.27
1.0	756.95	1.9	568.14
1.1	735.86	2.0	591.04

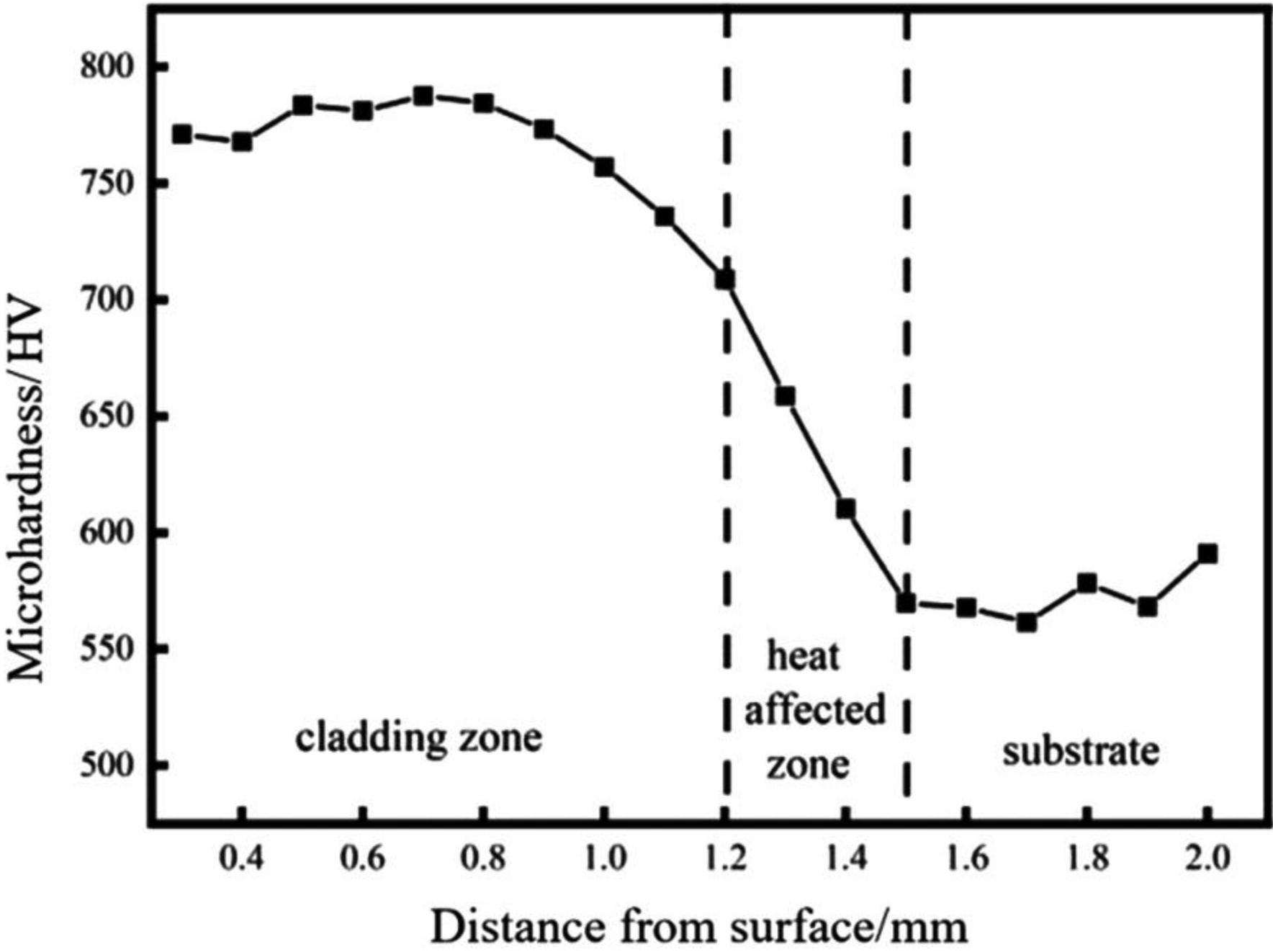


图 6 熔覆层内部显微硬度梯度曲线

Fig. 6 Microhardness gradient curve inside the cladding layer

3.3 熔覆层物相分析

采用 X-射线衍射仪对铁基熔覆层进行物相定量分析,图 7 为熔覆层物相分析图。

由图可知:铁基熔覆层主要由多种物相组成,包括 α -Fe(铁素体)、 FeNi_3 (铁镍化合物)、 FeCr (铁铬化合物)、 Co_3Fe (钴铁化合物)、 K_6MnO_6 (锰钾氧化物)、 C_2Fe_5 (铁碳化物)等。其中, C_2Fe_5 、 FeCr 等是主要的硬质相,为熔覆层提

供了较高的硬度。在激光熔覆过程中,由于高温环境, Fe60 熔覆粉末最初形成奥氏体(γ -Fe),随着温度的降低和物相的转变,冷却至室温后转变为马氏体(α -Fe)。此外,Co、Ni 等元素的存在为熔覆层提供了良好的塑韧性。生成 K_6MnO_6 物相可能是空气中的氧元素与粉末中的相关元素在熔覆过程中的反应结合所致,这也提升了熔覆层的硬度性能。

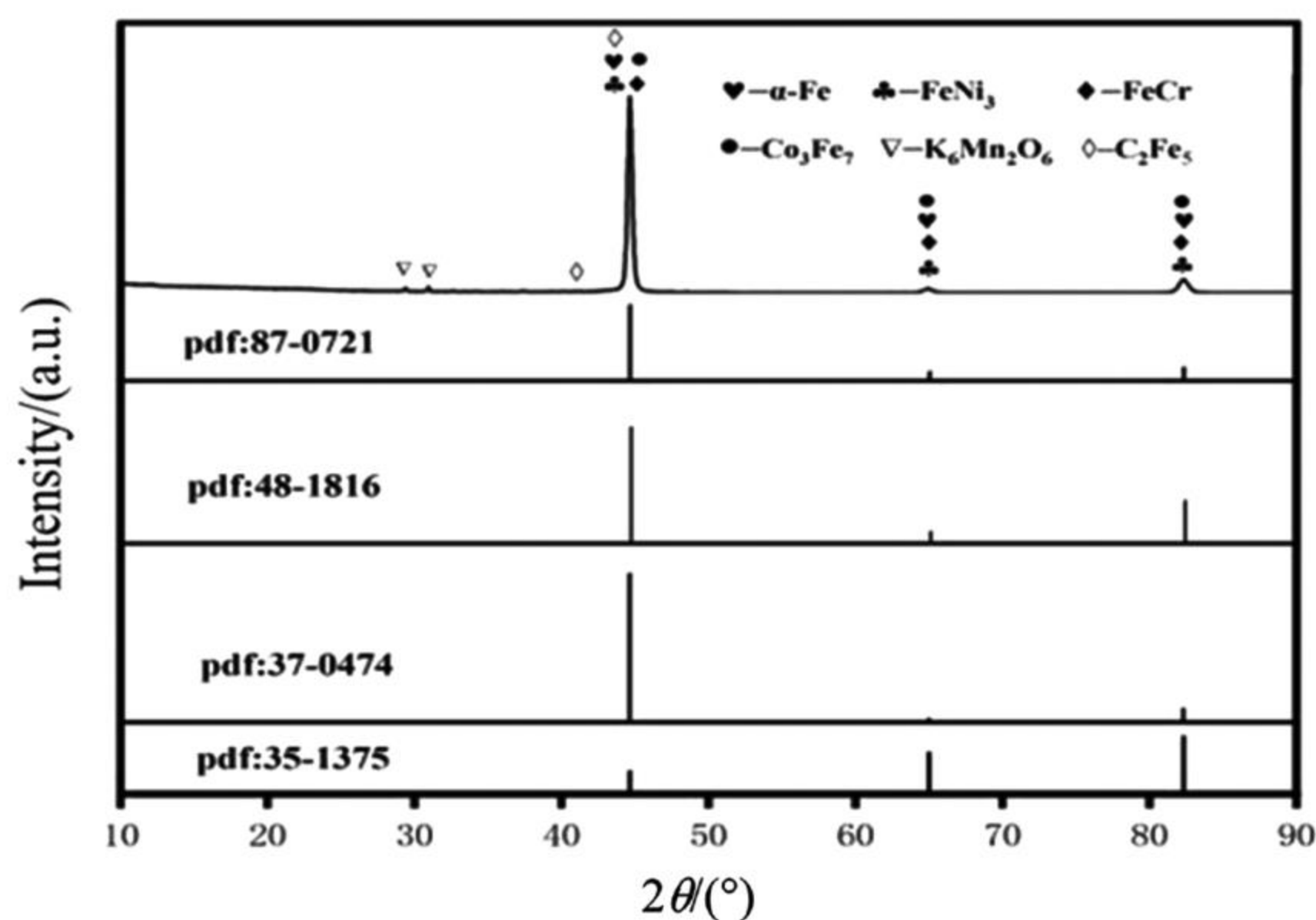


图7 熔覆层物相分析图
Fig. 7 Phase analysis diagram of cladding layer

4 试验结果分析

(1)针对 H13 钢压射冲头表面激光熔覆工艺,以 Fe60 作为熔覆粉末,基于正交试验法研究激光功率、扫描速度、送粉速度 3 种参数对熔覆质量的影响。通过对正交试验的结果进行极差分析,研究上述 3 种因素对稀释率和宽高比的影响。研究表明,当以稀释率作为评价指标时,影响的大小依次为激光功率>送粉速率>扫描速率;而以宽高比作为评价指标时,影响的大小依次为扫描速率>激光功率>送粉速率。

(2)以稀释率和宽高比作为评价指标,通过综合平衡法,并建立了线性回归模型,确定最优化的工艺参数组合为激光功率 1 400 W、扫描速率 12 mm/s、送粉速率 1.2 rad/s。在该工艺参数组合下获得的熔覆涂层,具有较好的平整度和光洁度。通过观察其显微组织发现,熔覆组织底部细密、基体和熔覆层之间形成较好的冶金结合;通过 XDR 物相分析可知, C_2Fe_5 、FeCr 等是主要的硬质相,为熔覆层提供了较高的硬度^[28]。在显微硬度上,熔覆层的平均显微硬度达到 765.02 HV,是 H13 基体硬度的 1.3 倍,满足 H13 压射冲头的使用需要。

(3)当前,针对 H13 压射冲头表面的激光熔覆修复工作尚处于起步阶段,本研究对 H13 压射冲头进行大量试验研究分析,并对激光熔覆的工艺参数进行优化和研究。试验结果不仅为激光熔覆修复 H13 压射冲头提供了理论依据,也促进了激光熔覆技术在工程实践中的应用。

参考文献

- [1] 赵宇擎,赵作福,潘忠旭,等. H13 钢表面激光熔覆的研究现状[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 11-14.
ZHAO Y Q, ZHAO Z F, PAN Z X, et al. Research status of laser cladding on the H13 steel surface[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 43(1): 11-14.
- [2] 李茂真,刘金海,赵雪勃,等. 球墨铸铁压射冲头的失效分析[J]. 现代铸铁, 2016, 36(5): 74-79.
LI M Z, LIU J H, ZHAO X B, et al. Failure analysis of nodular injection head[J]. Modern Cast Iron, 2016, 36(5): 74-79.
- [3] 宋建丽,李永堂,邓琦林,等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-39.
SONG J L, LI Y T, DENG Q L, et al. Research progress of laser cladding forming technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-39.
- [4] 徐善瑞,王玉玲,张光华,等. 20CrMnTi 钢表面激光熔覆 Fe 基合金工艺参数优化[J]. 激光杂志, 2016, 37(11): 28-31.
XU S R, WANG Y L, ZHANG G H, et al. Research on parameter optimization of laser cladding Fe65 alloy on 20CrMnTi steel surface[J]. Laser Journal, 2016, 37(11): 28-31.
- [5] 叶四友,刘建永,杨伟. H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层质量研究[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 81-85.
YE S Y, LIU J Y, YANG W. Quality of H13 alloy

- coating on H13 steel prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 81-85.
- [6] 张胜江, 王明娣, 倪超, 等. QT800-2 球墨铸铁表面激光熔覆工艺参数多目标优化[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 74-82.
ZHANG S J, WANG M D, NI C, et al. Multi-objective optimization of laser cladding process parameters on QT800-2 ductile iron surface[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 74-82.
- [7] 任思学, 李景彬, 史亚盟, 等. 工艺参数对 20CrMnTi 基激光熔覆 Ni60A-TiC 涂层组织及耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 0802207.
REN S X, LI J B, SHI Y M, et al. Effect of process parameters on microstructure and wear resistance of 20CrMnTi-based laser cladding Ni60A-TiC coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802207.
- [8] 郭星星, 帅美荣, 王建梅, 等. 基于 NSGA-II 算法的激光熔覆单道成形工艺参数多目标优化[J]. 中国表面工程, 2023, 36(3): 87-100.
GUO X X, SHUAI M R, WANG J M, et al. Multi-objective optimization of laser cladding single-pass forming process parameters based on NSGA-II algorithm [J]. China Surface Engineering, 2023, 36(3): 87-100.
- [9] GENG X M. Study on laser cladding process parameters of Fe-based alloy based on numerical simulation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1948(1): 012231.
- [10] 张倩倩, 亓一帆, 张建广, 等. 42CrMo 基体激光熔覆质量优化的试验与数值仿真研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(22): 20-27.
ZHANG Q Q, QI Y F, ZHANG J G, et al. Experimental and numerical simulation study on quality optimization of 42CrMo matrix laser cladding [J]. Hot working process, 2024, 53(22): 20-27.
- [11] 赵之明. 工艺参数对激光熔覆高铬不锈钢涂层组织与性能的影响[J]. 冶金设备, 2023(4): 64-67.
ZHAO Z M. Effect of microstructure properties of high chromium stainless steel powder through process parameters by laser cladding[J]. Metallurgical Equipment, 2023(4): 64-67.
- [12] 林冉, 舒林森, 董月, 等. 激光功率和扫描速度对熔覆组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914004.
LIN R, SHU L S, DONG Y, et al. Effect of laser power and scanning speed on microstructure and properties of cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914004.
- [13] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77-80.
GAO J, SONG D Y, FENG J W. Influence of processing parameters on geometrical features of CBN coatings by laser cladding on titanium alloy surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77-80.
- [14] 马运哲, 董世运, 徐滨士, 等. 铁基合金激光熔覆技术工艺优化研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(S1): 154-160.
MA Y Z, DONG S Y, XU B S, et al. Study on process optimization of laser cladding technology for iron-based alloys [J]. China Surface Engineering, 2006, 19(S1): 154-160.
- [15] 李治恒, 孙耀宁, 张瑞华, 等. 基于正交试验的 3Cr14 不锈钢激光熔覆工艺参数优化[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1029-1034.
LI Z H, SUN Y N, ZHANG R H, et al. Optimization of laser cladding process parameters of 3Cr14 stainless steel based on orthogonal test [J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 1029-1034.
- [16] WANG D S, ZHU Y Y, QU G, et al. Research on dilution of laser cladding assisted by pulsed current based on orthogonal experiment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965(1): 012087.
- [17] 雷靖峰, 祁文军, 谢亚东, 等. U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 66-71.
LEI J F, QI W J, XIE Y D, et al. Optimization of process parameters of laser cladding Ni60-25% WC coating on U71Mn steel [J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 66-71.
- [18] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296.
ZHU G X, ZHANG A F, LI D C. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 296.
- [19] LI K, YU W J, XU Y L, et al. Analysis on the influence degree of deformation control factors of deep-buried roadway's fractured surrounding rock using orthogonal design[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 9981539.
- [20] ZHOU K X, SHEN Y F. Effects of process parameters and carbon nanotubes content on microstructure and properties of laser cladding composite coatings using Ni-Ti-Cr-carbon nanotubes [J]. Materials

- Research Express, 2022, 9(9): 096403.
- [21] 魏仕勇, 彭文屹, 鲍蓉蓉, 等. 基于正交综合平衡法的 CoCrFeMnNi 高熵合金等离子熔覆工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2023, 52(8): 87-91.
WEI S Y, PENG W Y, BAO R R, et al. Optimization of plasma cladding process parameters of CoCrFeMnNi high entropy alloy based on orthogonal comprehensive balance method[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(8): 87-91.
- [22] 赵小强, 汪志伟, 许庆. 基于多指标正交实验设计的加热工艺参数优化[J]. 中国新技术新产品, 2018(20): 9-10.
ZHAO X Q, WANG Z W, XU Q. Optimization of heating process parameters based on multi-index orthogonal experimental design[J]. New Technology & New Products of China, 2018(20): 9-10.
- [23] 李艳, 柳洁冰. 激光熔覆钴基合金涂层稀释率预测数学模型构建[J]. 激光杂志, 2023, 44(6): 230-234.
LI Y, LIU J B. Construction of mathematical model for predicting dilution ratio of laser cladding cobalt-based alloy coating[J]. Laser Journal, 2023, 44(6): 230-234.
- [24] 成俊秀, 李艳玲, 李启航, 等. 高速激光熔覆工艺参数对 Fe 基合金熔覆层组织与耐磨性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(10): 53-58.
CHENG J X, LI Y L, LI Q H, et al. The effect of high-speed laser cladding process parameters on the microstructure and wear resistance of Fe based alloy cladding layer [J]. Hot Working Process, 2024, 53(10): 53-58.
- [25] 赵钊. 基于 H13k 刀具修复的激光熔覆 Fe 基合金工艺研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
ZHAO Z. Study on laser cladding Fe-based alloy based on H13k tool repair[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [26] 王义厢, 李宝增, 宫耀华, 等. 45 钢表面激光熔覆铁基合金涂层显微组织与性能[J]. 热加工工艺, 2008, 37(21): 131-133.
WANG Y X, LI B Z, GONG Y H, et al. Microstructure and performance of iron-based alloy laser cladding on 45 steel surface [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(21): 131-133.
- [27] 孙静. 激光熔覆铝合金表面制备高熵合金工艺参数分析[J]. 应用激光, 2023, 43(6): 49-57.
SUN J. Analysis of process parameters of laser cladding on aluminum alloy surface to prepare high-entropy alloy[J]. Applied Laser, 2023, 43(6): 49-57.
- [28] 王永霞, 丁国华, 梁莉蒙. 送粉速率对铁基合金激光熔覆层组织形貌的影响[J]. 应用激光, 2022, 42(12): 38-44.
WANG Y X, DING G H, LIANG L M. Effect of powder feeding rate on microstructure morphology of laser cladding layer of Fe-based alloy[J]. Applied Laser, 2022, 42(12): 38-44.