

## 激光与光电子学进展

## 20Cr13 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织和性能研究

杜彦斌<sup>1\*</sup>, 何国华<sup>1</sup>, 周志杰<sup>1</sup>, 舒林森<sup>2</sup><sup>1</sup>重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;<sup>2</sup>陕西理工大学陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 西安 723001

**摘要** 为改善 20Cr13 不锈钢零部件表面性能, 利用激光熔覆技术在 20Cr13 不锈钢基材表面制备 15-5PH 合金涂层实现其表面强化。采用超景深显微镜、光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、能谱仪、显微硬度计及摩擦磨损试验机等, 对利用信噪比分析获得的较优工艺参数下的 15-5PH 合金涂层的几何形貌、微观组织、物相、显微硬度及摩擦磨损性能等进行分析。结果表明: 熔道的熔宽、熔高、熔深与激光比能之间成正比; 15-5PH 涂层与 20Cr13 不锈钢冶金结合良好, 无裂纹、气孔等缺陷; 涂层组织以等轴晶和柱状晶等组成, 涂层中析出了颗粒状 NbC、NiC<sub>x</sub>、 $\epsilon$ -Cu 等硬质相。显微硬度和摩擦磨损性能结果表明, 涂层显微硬度约为基材的 2.4 倍, 同时涂层耐磨性较基材有明显提升, 其磨损形式为黏着磨损及磨粒磨损。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 15-5PH; 表面强化; 信噪比; 组织性能

中图分类号 TG174.44

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220854

## Microstructure and Properties of 15-5PH Coating by Laser Cladding on 20Cr13 Surface

Du Yanbin<sup>1\*</sup>, He Guohua<sup>1</sup>, Zhou Zhijie<sup>1</sup>, Shu Linsen<sup>2</sup><sup>1</sup>Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Shaanxi University of Technology, Xi'an 723001, Shaanxi, China

**Abstract** To improve the surface performance of 20Cr13 stainless steel parts, the laser cladding technology was used for producing 15-5PH alloy coating on the surface of 20Cr13 stainless steel substrate so that its surface strengthening can be achieved. The geometric morphology, microstructure, phase, friction and wear properties, and microhardness of the cladding layer under the better process parameters obtained by signal-to-noise ratio analysis were analyzed by using a digital microscope, optical microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope, energy dispersive spectroscopy, micro-hardness tester, and friction and wear tester. The results show that positive relationship between melt width, melt height, melt depth, and laser specific energy of the melt channel, the metallurgical combination between the 15-5PH cladding layer and 20Cr13 stainless steel is good without defects like cracks and pores. The structure of the coating is composed of equiaxed and columnar crystals, and hard phases such as granular NbC, NiC<sub>x</sub>, and  $\epsilon$ -Cu are precipitated in the coating. The microhardness and friction and wear performance results show that the microhardness of the coating is about 2.4 times of that of the substrate. At the same time, the wear resistance of the coating is significantly improved compared with that of the substrate, and its wear forms are adhesive wear and abrasive wear.

**Key words** laser technique; laser cladding; 15-5PH; surface strengthening; signal-to-noise ratio; microstructure performance

## 1 引言

20Cr13 不锈钢作为一种常用的马氏体不锈钢, 具

有较高的强度和良好的耐腐蚀性能, 常用于离心泵叶轮、汽轮机叶片、轴套等零部件<sup>[1-3]</sup>。20Cr13 零部件大多需要在高温、高压、冲蚀等恶劣环境下工作, 其常规

收稿日期: 2022-02-01; 修回日期: 2022-03-04; 录用日期: 2022-03-09; 网络首发日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(51775071)、重庆市高校创新研究群体资助项目(CXQT21024)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K202000801)、重庆英才计划(CQYC20210302226)、重庆工商大学研究生创新型科研资助项目(CYS21399)

通信作者: \*dyb@ctbu.edu.cn

状态下存在硬度较低、耐磨性能较差等问题,经过长时间的工作会出现裂纹、水蚀、磨损等缺陷,影响设备的使用效率<sup>[4-6]</sup>。为改善 20Cr13 不锈钢零部件服役性能,可利用激光熔覆、堆焊、热喷涂等表面处理技术对零部件进行表面改性。其中,激光熔覆是一种新的表面改性技术,具有低稀释率、冷却速度快、涂层材料不受限制、与基材冶金结合等优点,广泛应用于主轴等零部件表面改性<sup>[7-8]</sup>。激光熔覆的工艺参数、涂层材料对表面硬度、耐磨性、耐腐蚀性等性能具有多重影响,为此,开展 20Cr13 不锈钢表面激光熔覆涂层的组织和性能研究,对于实现 20Cr13 零部件的表面强化具有重要应用价值。

国内外学者针对 20Cr13 不锈钢表面性能提升开展了一系列研究。清华大学李杨等<sup>[9]</sup>利用活性屏离子渗氮技术对 20Cr13 不锈钢进行了表面强化,避免了传统渗氮技术中出现边缘效应等问题,显微硬度和耐蚀性能得到了显著的提高。上海交通大学 Lv 等<sup>[10]</sup>在 20Cr13 不锈钢基体上爆轰喷涂 MoB-CoCr 合金涂层,并开发了 4PB 试验用以研究涂层和基材之间的界面黏合强度。王海飞等<sup>[11]</sup>为提升 20Cr13 不锈钢叶片的抗冲刷腐蚀性能,利用多弧离子镀技术在 20Cr13 不锈钢基体上制备了 TiN 硬质膜层。随着激光熔覆技术的发展,部分学者为改善 20Cr13 不锈钢表面性能,选用不同的粉末利用激光熔覆技术进行激光熔覆试验,并进行了工艺参数、微观组织、硬度、耐磨性及耐腐蚀性等研究。Tian 等<sup>[12]</sup>在 20Cr13 不锈钢表面制备不同 WC 含量的 Inconel 625+WC 复合涂层,详细研究了不同 WC 含量的复合涂层的显微组织、显微硬度、耐腐蚀性能等。何斌锋等<sup>[13]</sup>选用镍基粉末在 20Cr13 不锈钢表面制备涂层,发现镍基涂层能够有效提高零部件的硬度和耐磨性。上海交通大学 Li 等<sup>[14]</sup>成功在 20Cr13 不锈钢表面制备了高铝铬 Fe-B-C 涂层,研究发现涂层硬度和耐磨性能较基材有明显的提高,磨损机制也由基材的黏着磨损和磨粒磨损转化为涂层的轻微磨粒磨损。周志杰等<sup>[15]</sup>在 20Cr13 不锈钢表面分别激光熔覆了 Ni60A 和 M2 合金涂层,对比分析了涂层的显微硬度和耐腐蚀性,发现两者硬度相差不大,但铁基涂层的耐腐蚀性较镍基高。

已有针对 20Cr13 不锈钢激光熔覆的研究主要采用镍基粉末或调制粉末,存在粉末价格高和难以获得最佳粉末配比的问题,而铁基粉末研究相对较少。15-5PH 不锈钢作为一种较为成熟的铁基材料,其成分中添加了 Ni 元素来提高其抗开裂能力,同时添加 Si、Cr 等元素来提高硬度和耐磨性,使其具有高强度、高硬度以及优异的耐腐蚀性能。其加工性能和其他沉淀硬化不锈钢相似,广泛应用于航空航天、核工业等高新技术产业,例如齿轮、化学处理设备、飞机零部件、核反应堆零件和阀门零件等<sup>[16-17]</sup>。15-5PH 合金粉末与 20Cr13 基材熔点和成分相近,满足激光熔覆材料设计

中熔点相近原则<sup>[18]</sup>,能够作为熔覆粉末用于涂层表面改性,而且涂层与基体之间可获得较高的结合强度<sup>[19-21]</sup>。因此,开展 20Cr13 不锈钢表面激光熔覆 15-5PH 合金粉末涂层的研究,能够为工程实际提供价格较低、性能较优的铁基粉末涂层作为参考。

本文利用激光熔覆技术在 20Cr13 不锈钢基材表面制备 15-5PH 涂层,在分析激光熔覆工艺参数对涂层几何质量特征影响规律的基础上,利用信噪比分析确定稀释率接近 30% 的较优工艺参数,并在该工艺参数下研究涂层的组织与性能,为 20Cr13 不锈钢零部件的激光熔覆表面改性提供理论依据和参考。

## 2 试 验

### 2.1 涂层的制备

基体材料选用 110 mm×200 mm×10 mm 的 20Cr13 不锈钢板材,试验前,采用平面磨床对原材料表面进行磨削去除氧化层,然后运用线切割设备切割成尺寸 50 mm×10 mm×10 mm 规格的试样块,使用乙醇清洗并烘干备用。选用熔覆粉末为图 1 所示 15-5PH 合金粉末,粒度为 48~120 μm,试验前将 15-5PH 粉末置于 200 °C 烤箱中烘干 2 h 备用,保证粉末流动性,避免涂层出现裂纹、气孔等缺陷。20Cr13 不锈钢及 15-5PH 合金粉末化学成分如表 1 所示。

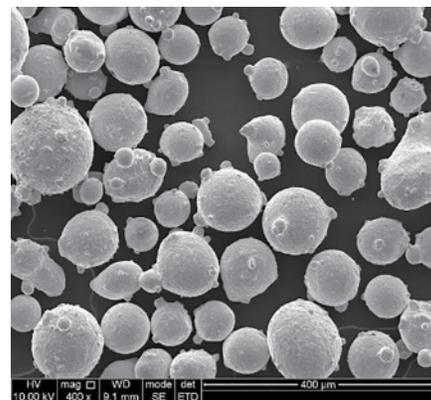


图 1 15-PH 合金粉末

Fig. 1 15-PH alloy powder

表 1 20Cr13 不锈钢及 15-5PH 合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of 20Cr13 stainless steel and 15-5PH alloy powder

Material	Mass fraction / %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	Fe
20Cr13	0.18	0.54	0.44	13.56	0.11	-	-	Bal.
15-5PH	0.026	0.84	0.38	15.41	4.66	3.71	0.3	Bal.

激光熔覆系统由机械臂、激光发生器、送粉器、水冷装置以及熔覆头等组成,如图 2 所示。激光最大输出功率为 3000 W,激光波长为(915±10) nm,频率为 50 Hz,熔覆采用同轴送粉方式,熔覆过程均采用氩气气氛保护熔池。

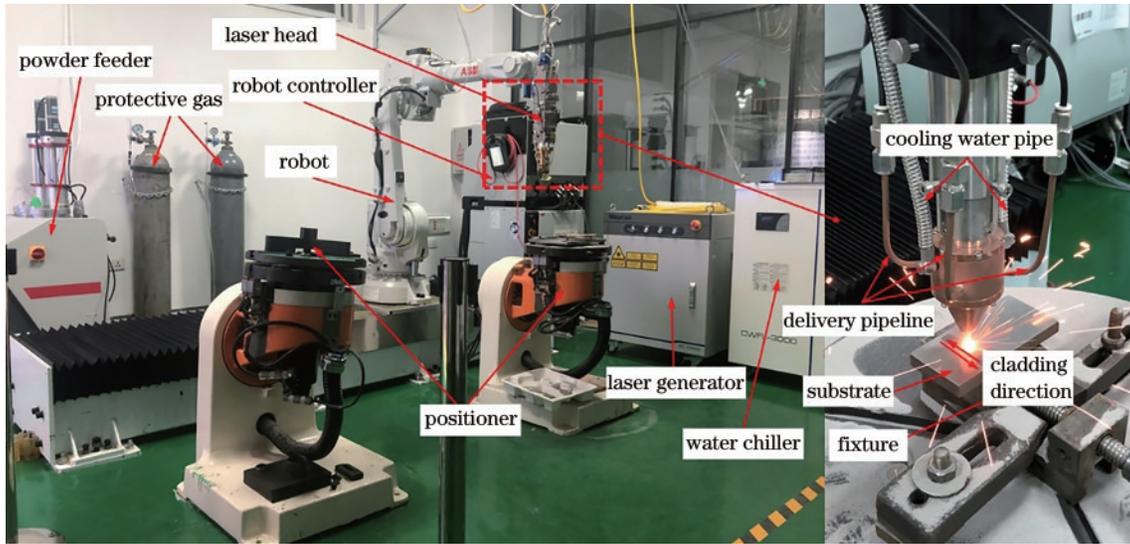


图 2 激光熔覆试验系统

Fig. 2 Experimental system of laser cladding

激光熔覆主要通过调整激光功率  $P$ 、扫描速率  $V$ 、光斑直径  $D$  等工艺参数进行熔覆质量的控制,引入激光比能  $E_s$  综合考虑三者的影响,即单位面积的激光能量<sup>[22]</sup>表示为

$$E_s = \frac{P}{1000 \cdot D \cdot V}, \quad (1)$$

式中:  $E_s$  为激光比能(单位:  $10^3 \text{ kJ/m}^2$ );  $P$  为激光功率(单位:  $\text{W}$ );  $D$  为光斑直径(单位:  $\text{mm}$ );  $V$  为扫描速率(单位:  $\text{mm/s}$ )。

根据前期试验,选取激光光斑直径为  $2 \text{ mm}$ ,送粉速率为  $2.3 \text{ r/min}$ ,选用激光功率及扫描速率进行 2 因素 5 水平  $[L_{25}(5^2)]$  全因子试验,试验方案如表 2 所示。

表 2 20Cr13 不锈钢表面激光熔覆 15-5PH 合金粉末单道全因子试验设计表

Table 2 Full factorial experiment design of 15-5PH alloy powder single-track laser cladding on 20Cr13 stainless steel

No.	$P/\text{W}$	$V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$E_s/(10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	No.	$P/\text{W}$	$V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$E_s/(10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2})$
1	1140	14	40.714	14	1230	11	55.909
2	1140	13	43.846	15	1140	10	57.000
3	1230	14	43.929	16	1500	13	57.692
4	1320	14	47.143	17	1410	12	58.750
5	1230	13	47.308	18	1320	11	60.000
6	1140	12	47.500	19	1230	10	61.500
7	1410	14	50.357	20	1500	12	62.500
8	1320	13	50.769	21	1410	11	64.091
9	1230	12	51.250	22	1320	10	66.000
10	1140	11	51.818	23	1500	11	68.182
11	1500	14	53.571	24	1410	10	70.500
12	1410	13	54.231	25	1500	10	75.000
13	1320	12	55.000				

## 2.2 性能测试及组织观察

激光熔覆完成后采用线切割设备选取试样中间部分切割成  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  块状样块,镶嵌后用  $400 \sim 1200$  目砂纸从粗到细进行打磨,然后用金刚石砂膏抛光。采用体积比  $\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{C}_2\text{H}_6\text{O}=2:3:3$  混合溶液蚀刻  $30 \text{ s}$  后,使用 Leica DVM6S 超景深显微镜测量涂层熔宽  $W$ 、熔高  $H$ 、熔深  $d_m$ 、涂层面积  $A_c$  及熔池面积  $A_m$ ,并由式(2)计算得到稀释率  $\eta$ <sup>[23]</sup>,涂层横截面形貌示意图如图 3 所示。利用 Leica DMILM

型金相显微镜、美国 FEI Inspect F50(FSEM)、美国 EDAX super octane 和丹东浩元 X 射线衍射仪(XRD)进行涂层微观组织、能谱及物相的试验。采用 HV-1000B 显微硬度计在加载  $200 \text{ gf}(1 \text{ gf}=0.0098 \text{ N})$ 、保压  $10 \text{ s}$  的条件下测试截面硬度,每个测量点均匀间隔  $0.04 \text{ mm}$ ,测试点示意图如图 3 所示。在载荷为  $100 \text{ N}$ 、转速为  $100 \text{ r/min}$ 、运行时间为  $900 \text{ s}$ 、40Cr 球头柱销的条件下使用 MMW-2 型销-盘式摩擦磨损试验机进行单向旋转式干式摩擦磨损试验。稀释率  $\eta$  表示为

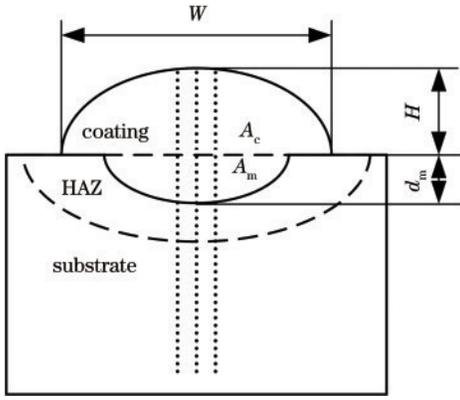


图 3 熔覆试样横截面形貌及显微硬度测量点示意图

Fig. 3 Schematic of cross-sectional morphology and microhardness measuring points of cladding sample

$$\eta = \frac{A_m}{A_c + A_m}, \quad (2)$$

式中： $A_c$ 为涂层面积(单位为  $\text{mm}^2$ )； $A_m$ 为熔池面积(单位为  $\text{mm}^2$ )。

### 3 组织与性能分析

#### 3.1 信噪比与形貌分析

图 4 为 15-5PH 粉末在 20Cr13 不锈钢表面进行单道熔覆试验实物图,涂层表面平整,无裂纹、气孔等缺陷。如图 5 所示,试样经腐蚀后横截面及三维成像图,激光束能量为高斯热源,涂层呈“月牙状”<sup>[24]</sup>。涂层与基体之间均未发现裂纹、气孔等缺陷,涂层与基体之间形成了明显的凝合线,说明涂层与基体之间冶金结合性能良好<sup>[25]</sup>。

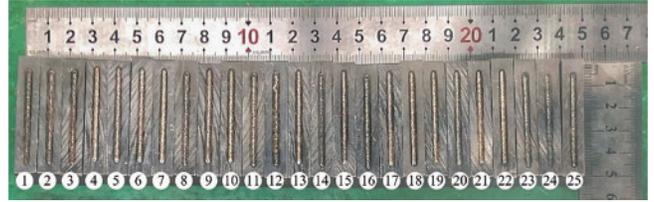


图 4 15-5PH 涂层单道激光熔覆实物图

Fig. 4 Physical image of 15-5PH single-track laser cladding

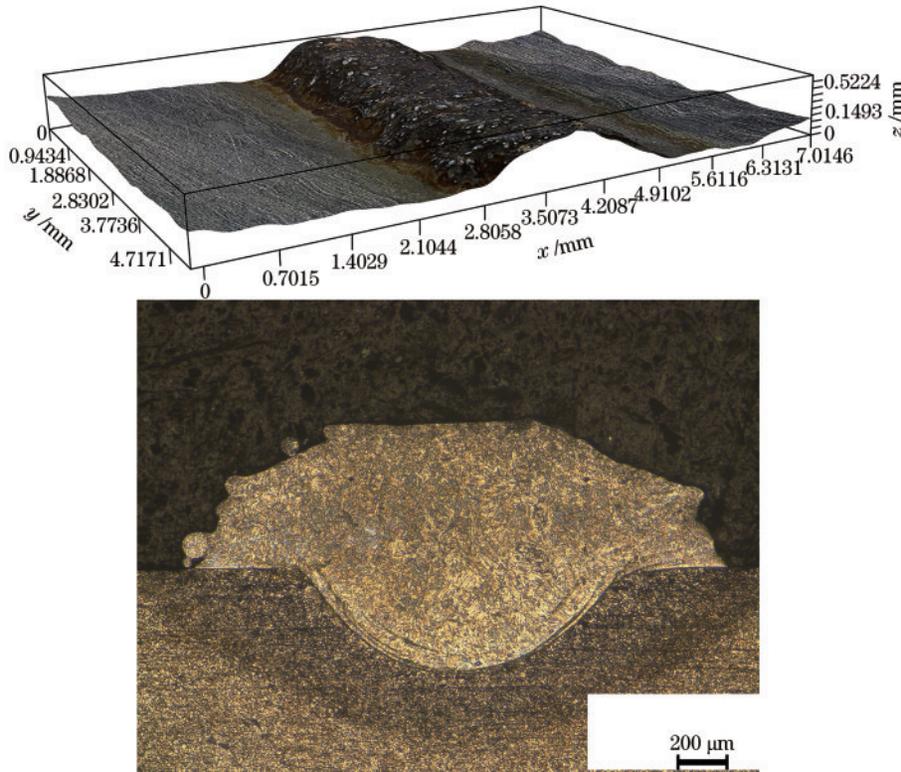


图 5 熔道截面图及三维图

Fig. 5 Cross-sectional diagram and three-dimensional diagram of the cladding

图 6 为 15-5PH 合金粉末在不同激光比能  $E_s$  与熔宽  $W$ 、熔高  $H$ 、熔深  $d_m$  及稀释率  $\eta$  的关系图,使用调整后的  $R^2(R_{\text{adj}}^2)$  对拟合曲线进行拟合优度评判。由图 6(a)~(c) 可知,随着激光比能的增大,熔宽、熔高、熔深均呈增大的趋势。主要原因是在送粉速率及光斑直径一定的条件下;随着激光功率和激光比能增大,单位面积基材吸收的能量增加,熔深增加,同时单位面积粉末吸收的能

量增加,导致熔宽及熔高增加;随着扫描速率的降低,单位时间内粉末吸收的能量增加,导致基材表面粉末沉积量增加,熔宽及熔高增加。如图 6(d) 所示,稀释率与激光比能的调整后拟合系数 ( $R_{\text{adj}}^2$ ) 接近零,即稀释率与激光比能之间无明显的相关性,其主要原因是稀释率由激光功率、送粉速率、扫描速率、离焦量、保护气流量、粉末质量等因素综合决定,难以通过简单指标进行衡量。

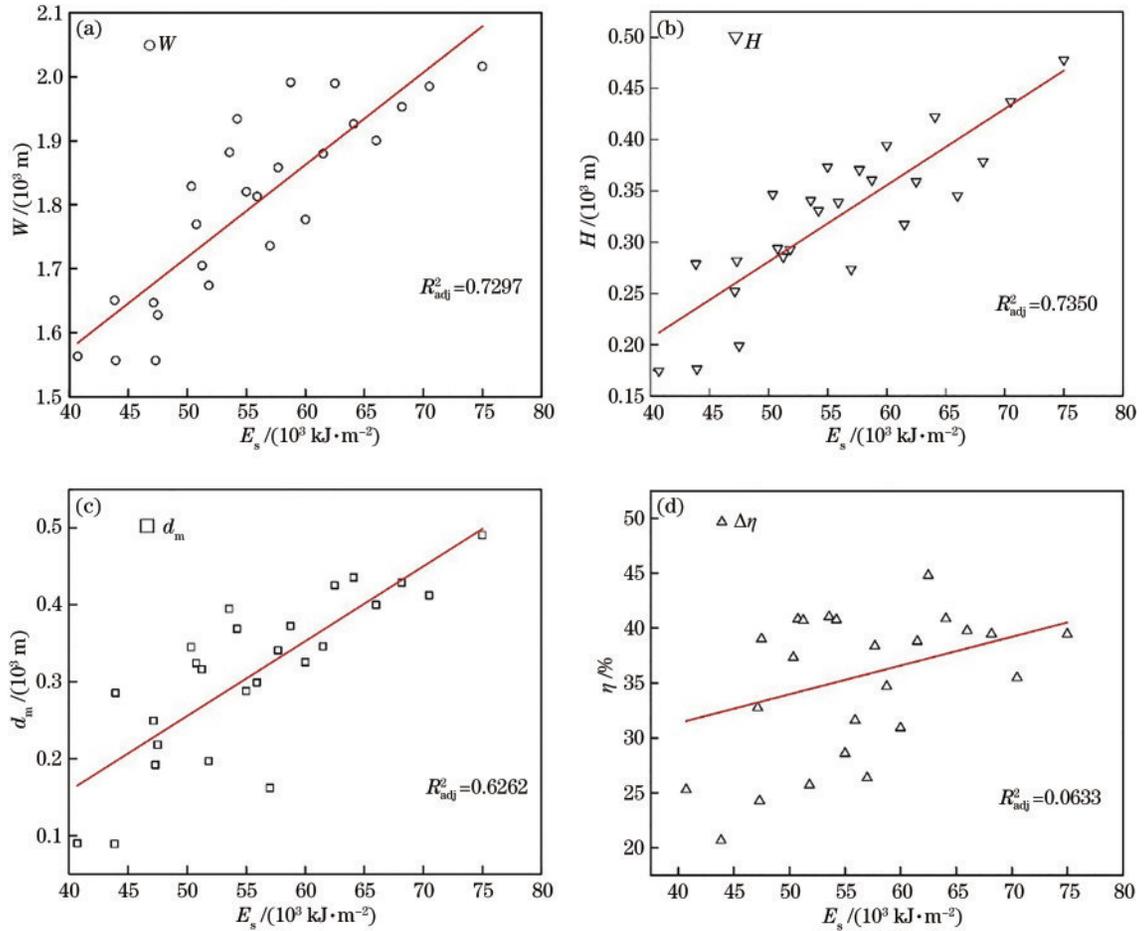


图 6 激光比能  $E_s$  对熔道几何尺寸及稀释率影响规律

Fig. 6 Influence of laser specific energy  $E_s$  on geometrical size and dilution rate of the cladding

信噪比常用来评价设计的参数抵抗噪声因子的能力,信噪比值越大即信号越强,噪声越小,则输出与期望误差越小<sup>[26]</sup>。稀释率  $\eta$  是指激光熔覆过程中,由于熔化基材的混入而引起的熔覆合金成分的变化程度。稀释率过低属于机械咬合,结合力较差甚至无法形成冶金结合;稀释率过高则容易造成基体过度稀释涂层,加大开裂和变形的趋势,导致涂层性能低<sup>[27]</sup>。对于稀

释率这一评判指标,本文选取 30% 作为稀释率优化目标<sup>[28-30]</sup>,涂层与基材之间形成良好的冶金结合性能。根据信噪比质量特性分析,为获得稀释率接近 30% 的工艺参数,选用望目特性进行信噪比分析。根据信噪比望目特性计算公式分别计算激光功率和扫描速率 5 个水平所对应的信噪比值均值,信噪比望目特性计算公式如式(3)所示,计算结果如图 7 所示。信噪比越大

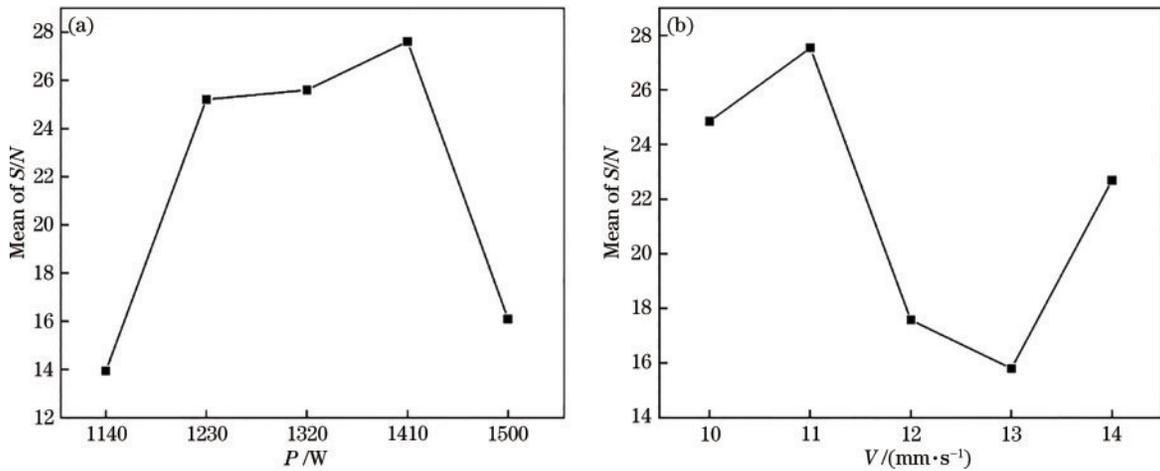


图 7 稀释率的信噪比均值响应图

Fig. 7 Mean of S/N response of dilution rate

说明输出与期望误差越小,即各工艺参数水平对应的稀释率越接近 30%,因此激光功率和扫描速率 5 个水平中信噪比均值最大的,所对应工艺参数水平即为稀释率接近 30% 的工艺参数,较优工艺参数组合如表 3 所示。信噪比值表示为

$$S/N = -10 \lg \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \right], \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为试样实际测量稀释率;  $x_0$  取 30%。

表 3 第 21 组试验结果

Table 3 Experimental results of group 21

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
$P/W$	1410	$H/mm$	0.443	$A_c/mm^2$	0.652
$V/(mm \cdot s^{-1})$	11	$W/mm$	1.847	$A_m/mm^2$	0.274
$E_s/(kJ \cdot m^{-2})$	64.090	$d_m/mm$	0.341	$\eta$	0.295

### 3.2 涂层物相及微观组织

基于信噪比分析所得结果,选取较优工艺参数如下:激光功率  $P=1410\text{ W}$ ,扫描速率  $V=11\text{ mm/s}$ ,进行物相、微观组织、显微硬度及摩擦磨损分析。图 8 为涂层的 XRD 图谱,由于 15-5PH 粉末中 Cr 含量较高,Fe、Cr、Ni 等形成的碳化物的物相以  $M23C6$ 、 $M7C3$ 、 $NiC_x$  为主。Nb 元素的存在,涂层析出了 MC 型碳化物即 NbC,另外形成了  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\epsilon\text{-Cu}$  等物相。图 9 和图 10 分别为涂层颗粒物质的能谱仪(EDS)图和涂层的 EDS 图。

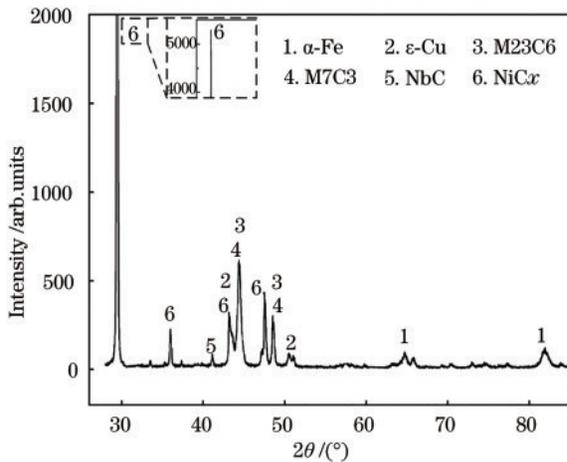


图 8 涂层的 XRD 物相

Fig. 8 XRD phase of the coatings

激光熔覆试样经处理后的显微组织如图 11 所示。基材供货状态为热轧退火,结合金属金相图谱及图 11(a)所示基材的光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)图分析可得,基材显微组织由铁素体和颗粒状碳化物等组成。由图 11(b)可知,热影响区(HAZ)主要由铁素体和粒状碳化物组成,基体上的碳化物粗化导致热影响区出现大量的粒状碳化物,同时部分铁素体向马氏体转变<sup>[31]</sup>。如图 11(c)所示,涂层

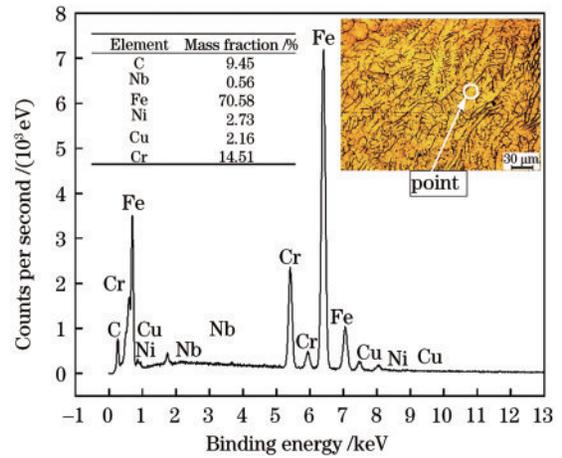


图 9 涂层颗粒物质的 EDS 图

Fig. 9 EDS image of particulate matter in the coatings

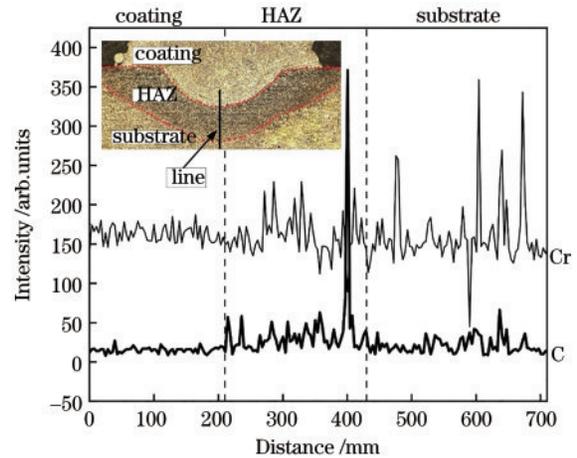


图 10 涂层的 EDS 图

Fig. 10 EDS image of the coatings

底部以垂直于凝合线沿热扩散方向生长的柱状晶为主,柱状晶组织沿着热扩散的方向生长<sup>[32]</sup>。涂层中部以柱状晶为主,如图 11(d)所示,随着涂层凝固的继续,温度梯度  $G$  减小,凝固速度  $R$  增大,使得过冷度增大,同时受到晶体学各向异性和热扩散方向的影响,涂层中部柱状晶生长方向相对比较杂乱<sup>[33]</sup>。如图 11(e)所示,涂层顶部以柱状晶及少量的等轴晶为主,随着过冷度  $G/R$  趋于无穷小,同时激光能量集中,柱状晶发生紊乱生长,出现了少量的等轴晶<sup>[34]</sup>。由图 11(c)~(e)可知,涂层中弥散有白色颗粒物质,对涂层中颗粒物质进行 EDS 能谱分析,颗粒物质 EDS 能谱分析结果如图 9 所示,结合涂层 XRD 物相分析可得析出的颗粒物质为 NbC、 $NiC_x$ 、 $\epsilon\text{-Cu}$  等硬质相。

为了探究涂层、热影响区、基材三者之间元素变化情况,对涂层、热影响区、基材进行线扫 EDS 能谱分析,线扫 EDS 能谱结果如图 10 所示,通过对 Cr 和 C 元素进行定量分析可得热影响区中 C 和 Cr 元素含量较涂层和基材多,其主要原因是熔覆过程中涂层中的 C 和 Cr 元素发生了从涂层至热影响区的迁移。

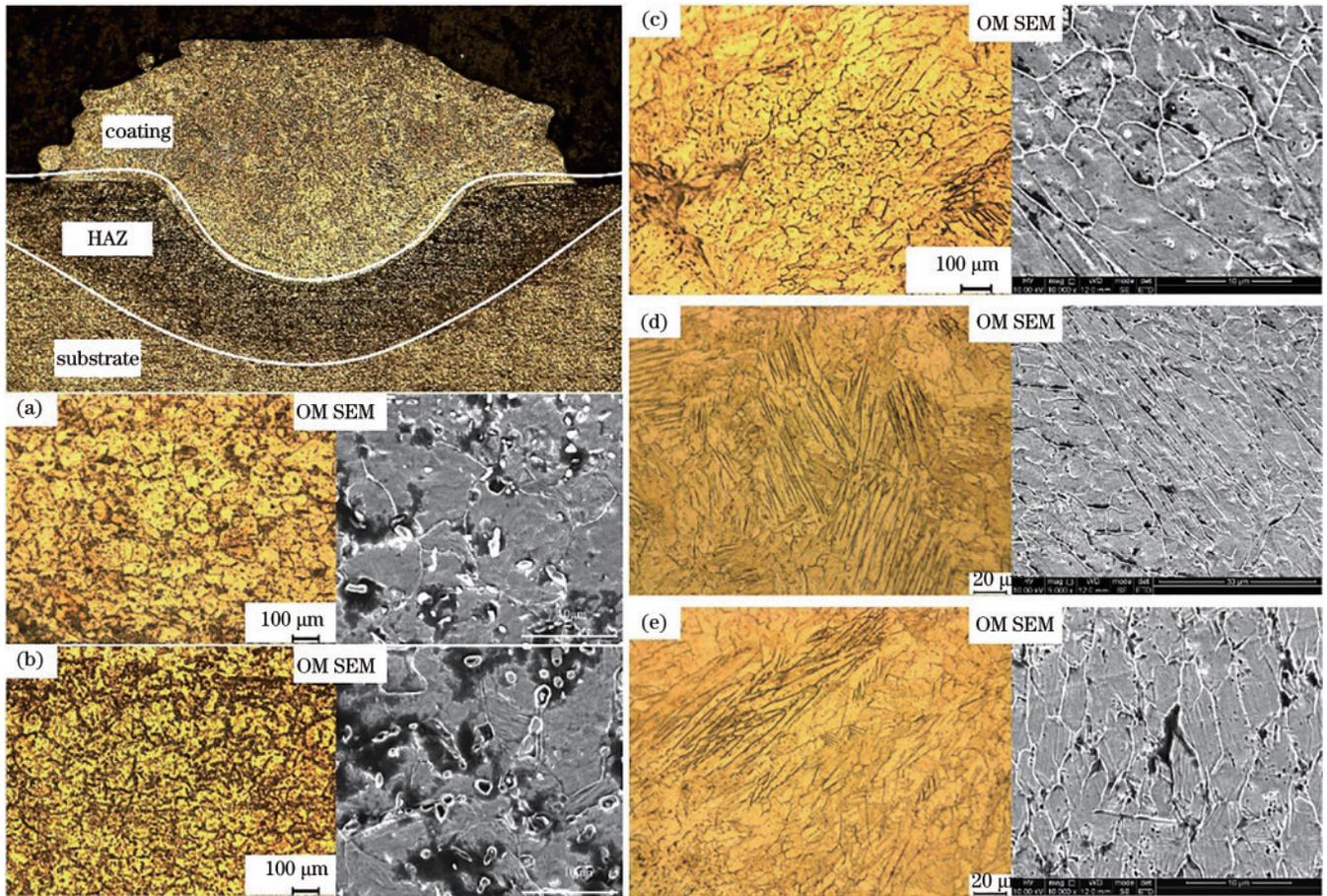


图 11 试样截面不同区域显微组织。(a) 基材; (b) 热影响区; (c) 涂层顶部; (d) 涂层中部; (e) 涂层底部

Fig. 11 Microstructure of different areas of sample cross section. (a) Substrate; (b) heat affected zone; (c) top of the coatings; (d) middle of the coatings; (e) bottom of the coatings

### 3.3 显微硬度与耐磨性分析

显微硬度分布曲线如图 12 所示。基材部分显微硬度较为平稳,显微硬度平均处于 175 HV。到达热影响区后,由于 C 和 Cr 元素的迁移及铁素体向马氏体转变,硬度快速增大,越接近基材硬度越小。涂层显微硬度平均处于 420 HV,是基材显微硬度的 2.4 倍,其主要原因是:激光熔覆具有冷却速度快的特点,属于快速

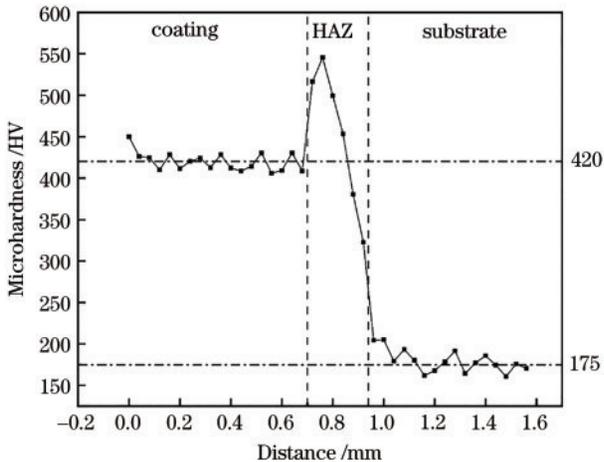


图 12 涂层截面显微硬度分布曲线图

Fig. 12 Microhardness distribution curve of coating cross section

凝固过程,涂层容易得到细晶组织,如图 11(a)、(c)、(d)、(e)所示,基材晶粒大小较涂层晶粒粗大;同时由于快速凝固,涂层中固溶体的固溶度极限得到了提高,从而增强了高温下的固溶强化效果。结合物相、能谱和显微组织分析可知,涂层产生了 NbC、NiCx、ε-Cu 等硬质相。综上可知,涂层显微硬度较基材有明显的提高。

图 13 为 15-5PH 涂层和 20Cr13 基材平均摩擦系数与时间关系图,15-5PH 涂层摩擦系数约为 0.31777,20Cr13 基材摩擦系数约为 0.68579,同时称重得 15-5PH 涂层失重为 0.032 g,20Cr13 基材失重为 0.137 g,基材磨损失重约为涂层的 4.3 倍,综合摩擦系数和试验前后失重分析可知,15-5PH 涂层耐磨损性能较 20Cr13 基材有明显的提高。图 14 为 15-5PH 涂层磨损特征区域表面 SEM 图像。如图 14(a)、(c)所示,磨损过程中产生了大量的磨屑,并在后续的磨损过程中与磨损表面发生了黏附,造成了黏着磨损。如图 14(a)(d)所示,随着磨损的继续,黏着发生了脱落,在磨损表面形成了凹坑。如图 14(d)所示,黏着磨损与磨损表面形成了分层。如图 14(b)、(d)所示,同时由于 15-5PH 涂层中弥散着 NbC、NiCx、ε-Cu 等硬质相,在磨损

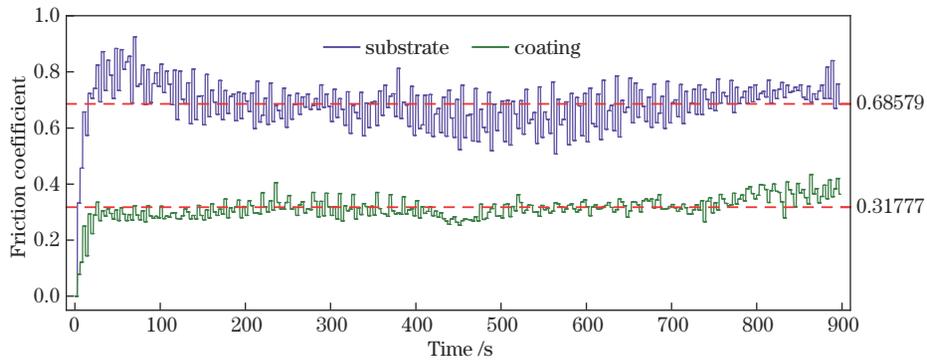


图 13 15-5PH 涂层的平均摩擦系数与时间关系图

Fig. 13 Relationship between average friction coefficient and time of the coatings of 15-5PH

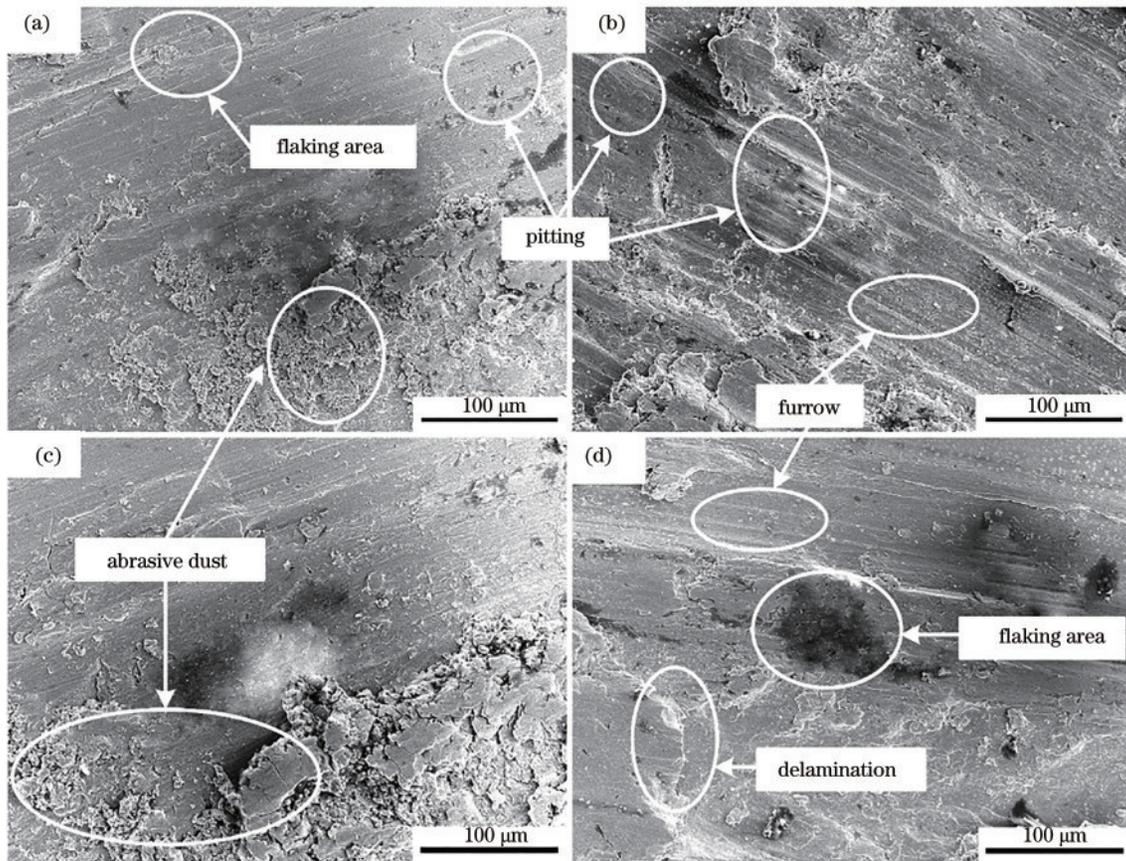


图 14 15-5PH 涂层摩擦磨损图

Fig. 14 Friction and wear morphology of 15-5PH coatings

过程中发生脱落形成了凹陷,并在磨损表面形成犁沟。综上所述,15-5PH涂层的磨损形式为黏着磨损及磨粒磨损。

## 4 结 论

本文利用激光熔覆技术在 20Cr13 不锈钢表面制备 15-5PH 涂层,并分析了激光熔覆工艺参数对涂层几何质量特性的影响规律,利用信噪比望目特性分析获得稀释率接近 30% 的较优工艺参数,对较优工艺参数下的涂层进行了宏观形貌、微观组织、XRD、EDS、显微硬度和摩擦磨损性能的研究,结论如下。

1) 随着激光比能的增大,熔宽、熔高、熔深呈增长的趋势,但稀释率与激光比能之间没有明显的关系。信噪比分析获得的较优工艺参数为激光功率  $P=1410\text{ W}$ ,扫描速率  $V=11\text{ mm/s}$ ,对应激光比能  $E_s=64.091\text{ kJ/m}^2$ 。

2) 20Cr13 基材与 15-5PH 涂层冶金结合良好,熔道外观平整,无裂纹及气孔等缺陷。涂层物相以 M23C6、M7C3、NbC、NiCx、 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\epsilon\text{-Cu}$  等组成,涂层组织以等轴晶和柱状晶组成,涂层析出的颗粒状硬质相为 NbC、NiCx、 $\epsilon\text{-Cu}$  等。

3) 热影响区及涂层显微硬度均高于基材显微硬

度, 基材和涂层平均显微硬度分别约为 175 HV、420 HV, 涂层平均显微硬度值约为基材硬度值的 2.4 倍。涂层耐磨损性能较 20Cr13 不锈钢基材有明显提升, 基材磨损损失重约为涂层的 4.3 倍, 涂层磨损形式为黏着磨损及磨粒磨损。

## 参 考 文 献

- [1] Zang Q Y, Jin Y F, Zhang T, et al. Effect of yttrium addition on microstructure, mechanical and corrosion properties of 20Cr13 martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(4): 451-460.
- [2] 胡晓冬, 姚建华, 孔凡志, 等. 半导体激光熔覆 2Cr13 的工艺实验与预测模型[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 277-280.  
Hu X D, Yao J H, Kong F Z, et al. Experiment and prediction model for 2Cr13 cladding using diode laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 277-280.
- [3] Zhang C, Li S, Qi L, et al. Fabrication of NiTi alloy coating on 2Cr13 stainless steel by laser cladding[J]. Advanced Materials Research, 2011, 418/419/420: 242-245.
- [4] Bonagani S K, Bathula V, Kain V. Influence of tempering treatment on microstructure and pitting corrosion of 13 wt.% Cr martensitic stainless steel[J]. Corrosion Science, 2018, 131: 340-354.
- [5] 张兴民, 牛广义, 马明臻. 回火温度对 2Cr13 钢组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(10): 46-51.  
Zhang X M, Niu G Y, Ma M Z. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of 2Cr13 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(10): 46-51.
- [6] Hamed A A, Tabakoff W, Rivir R B, et al. Turbine blade surface deterioration by erosion[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 445-452.
- [7] Ge J G, Lin J, Long Y H, et al. Microstructural evolution and mechanical characterization of wire arc additively manufactured 2Cr13 thin-wall part[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 1767-1778.
- [8] 李方义, 戚小霞, 李燕乐, 等. 盾构机关键零部件再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 820-831.  
Li F Y, Qi X X, Li Y L, et al. Review on repair technologies for key part remanufacturing of shield machines[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(7): 820-831.
- [9] 李杨, 何永勇, 朱宜杰, 等. 2Cr13 马氏体不锈钢活性屏离子渗氮技术[J]. 金属热处理, 2017, 42(5): 163-167.  
Li Y, He Y Y, Zhu Y J, et al. Active screen plasma nitriding of 2Cr13 martensitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(5): 163-167.
- [10] Lv H P, Nie P L, Yan Y G, et al. Characterization and adhesion strength study of detonation-sprayed MoB-CoCr alloy coatings on 2Cr13 stainless steel substrate[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2010, 7(6): 801-807.
- [11] 王海飞, 王国红, 崔荣星. TiN 膜层提高 2Cr13 不锈钢叶片的抗冲刷腐蚀性能[J]. 石油机械, 2009, 37(10): 26-29, 97.  
Wang H F, Wang G H, Cui R X. Influence of the TiN film layer on the anti-erosion performance of the 2Cr13 stainless steel blade[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(10): 26-29, 97.
- [12] Tian Z H, Zhao Y T, Jiang Y J, et al. Microstructure and properties of Inconel 625+WC composite coatings prepared by laser cladding[J]. Rare Metals, 2021, 40(8): 2281-2291.
- [13] 何斌锋, 付福兴, 谢燕翔, 等. 2Cr13 不锈钢激光熔覆涂层的性能[J]. 热加工工艺, 2018, 47(12): 108-111.  
He B F, Fu F X, Xie Y X, et al. Performance of 2Cr13 stainless steel laser cladding coating[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(12): 108-111.
- [14] Li J J, Ju J, Chang W W, et al. Investigation on the microstructure and wear behavior of laser-cladded high aluminum and chromium Fe-B-C coating[J]. Materials, 2020, 13(11): 2443.
- [15] 周志杰, 许磊, 杜彦斌, 等. 20Cr13 钢表面激光熔覆铁/镍基合金熔覆层的组织与性能研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(02): 69-74.  
Zhou Z J, Xu L, Du Y B, et al. Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe/Ni Base Alloy Coating on 20Cr13 Surface Steel[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(02): 69-74.
- [16] 王一澎, 陈志国, 汪力, 等. 激光比能对 Fe<sub>2</sub>B 激光熔覆涂层微观组织与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(1): 117-124.  
Wang Y P, Chen Z G, Wang L, et al. Effects of laser specific energy on microstructure and properties of Fe<sub>2</sub>B laser cladding coating[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(1): 117-124.
- [17] 刘正武, 赵凯, 郝云波, 等. 激光熔化沉积 15-5PH 沉淀硬化不锈钢组织及拉伸性能[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(1): 150-156.  
Liu Z W, Zhao K, Hao Y B, et al. Microstructures and tensile properties of 15-5PH precipitation hardening stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(1): 150-156.
- [18] 董世运, 马运哲, 徐滨士, 等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9, 13.  
Dong S Y, Ma Y Z, Xu B S, et al. Current status of material for laser cladding[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 5-9, 13.
- [19] 陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.  
Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502001.
- [20] 宗琳, 李荣广, 张小玲. 激光熔覆 Fe-Ti-V-C 合金微观组织与磨损性能[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 67-73.  
Zong L, Li R G, Zhang X L. Microstructure and wear resistance of Fe-Ti-V-C hardfacing alloys by laser cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 67-73.

- [21] Lu Y Z, Huang G K, Wang Y Z, et al. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding[J]. *Materials Letters*, 2018, 210: 46-50.
- [22] 李高松, 李金华, 冯伟龙, 等. 比粉与比能对激光熔覆 NiWC25 特性的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(05): 253-258. Li G S, Li J H, Feng W L, et al. Effects of Specific Powder and Specific Energy on the Characteristics of NiWC25 by Laser Cladding[J]. *SURFACE TECHNOLOGY*, 2019, 48(05): 253-258.
- [23] Khorram A, Taheri M, Fasahat M. Laser cladding of Inconel 713 LC with Stellite 31 powder: statistical modeling and optimization[J]. *Laser Physics*, 2021, 31(9): 096001.
- [24] 庞小通, 姚成武, 龚群甫, 等. 多层激光熔覆对 30CrMnSiNi2A 高强钢组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602104. Pang X T, Yao C W, Gong Q F, et al. Influence of multilayer laser cladding on the microstructure and properties of 30CrMnSiNi2A steel substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602104.
- [25] 赵伟, 张柯, 刘平, 等. 激光熔覆 Ni 基 WC 复合熔覆层组织与性能的研究[J]. *功能材料*, 2019, 50(1): 1098-1103, 1109. Zhao W, Zhang K, Liu P, et al. Study on microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC composite coating[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(1): 1098-1103, 1109.
- [26] 张瑞林, 涂兴华. 二次谐波的变分模态分解和小波阈值函数降噪[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0210001. Zhang R L, Tu X H. Variational mode decomposition and wavelet threshold function de-noising for second harmonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0210001.
- [27] 李成, 王玉玲, 姜芙林, 等. 激光功率对超声辅助激光熔覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 陶瓷力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(2): 218-224. Li C, Wang Y L, Jiang F L, et al. Effect of laser power on mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ceramic[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(2): 218-224.
- [28] 杜彦斌, 周志杰, 许磊, 等. 基于灰色关联分析与自适应混沌差分进化算法的激光熔覆工艺参数优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(1): 149-160. Du Y B, Zhou Z J, Xu L, et al. Laser cladding process parameter optimization method based on grey relational analysis and ACDE algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(1): 149-160.
- [29] 赵凯, 梁旭东, 王炜, 等. 基于 NSGA-II 算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0102004. Zhao K, Liang X D, Wang W, et al. Multi-objective optimization of coaxial powder feeding laser cladding based on NSGA-II [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0102004.
- [30] Yu T B, Yang L, Zhao Y, et al. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 321-332.
- [31] 徐庆东, 林鑫, 宋梦华, 等. 激光成形修复 2Cr13 不锈钢热影响区的组织研究[J]. *金属学报*, 2013, 49(5): 605-613. Xu Q D, Lin X, Song M H, et al. Microstructure of heat-affected zone of laser forming repaired 2Cr13 stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(5): 605-613.
- [32] 徐一飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 高速激光熔覆铁基合金涂层的组织及性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002122. Xu Y F, Sun Y N, Wang G J, et al. Microstructure and properties of iron-based alloys coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002122.
- [33] 郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 扫描顺序对激光熔覆 304 钢组织和性能的影响[J]. *激光与红外*, 2018, 48(9): 1087-1093. Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Influence of the scanning sequence on microstructure and mechanical property of 304 steel by laser cladding[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(9): 1087-1093.
- [34] 葛亚琼, 王文先. 不同激光功率下镁合金表面激光熔覆 Ni60 合金涂层的显微组织和磨损性能[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(1): 45-50. Ge Y Q, Wang W X. Microstructure and wear resistance of laser clad Ni60 alloy on AZ31B magnesium alloy in different laser power[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(1): 45-50.