

# 激光功率对 17-4PH 丝材激光熔覆组织及硬度的影响

王强<sup>1a,1b</sup>, 李洋洋<sup>1a,1b</sup>, 杨洪波<sup>1a</sup>, 牛文娟<sup>1a</sup>, 苏成明<sup>2</sup>,  
曹鹏<sup>2</sup>, 杨驹<sup>1a</sup>, 王永刚<sup>1a</sup>, Dong QIU<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 a.冶金工程学院 b.陕西省冶金工程技术研究中心, 西安 710055;  
2. 陕西天元智能再制造股份有限公司, 西安 710055;  
3. Center for Additive Manufacturing, School of Engineering,  
RMIT University, Melbourne 3053, Australia)

**摘要:** 目的 研究激光功率对 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆组织及硬度的影响, 以确定最佳激光熔覆功率, 为 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆的应用提供参考。方法 在 27SiMn 钢活塞杆表面, 对 17-4PH 不锈钢丝材进行了不同激光功率熔覆试验, 利用金相显微镜和扫描电子显微镜表征不同激光功率熔覆层的微观组织, 使用硬度计测量不同激光功率熔覆层和基体的硬度。结果 当激光功率分别为 1600、1800、2000、2200 W 时, 熔覆层的高度由 1119  $\mu\text{m}$  降低到 1006  $\mu\text{m}$ , 基体的穿透深度和热影响区宽度都随激光功率的增加而增大, 熔覆层的组织主要为较短无方向性的板条马氏体。当激光功率为 2400、3000 W 时, 熔覆层的高度、基体的穿透深度和热影响区宽度均随激光功率的增大而增加, 最大值分别达到 1119、310、638  $\mu\text{m}$ , 熔覆层的组织主要由具有方向取向的板条马氏体组成, 靠近基材的位置由晶粒细小而致密的等轴晶组成, 随着激光功率的增加, 熔覆层弥散析出的沉淀颗粒越来越多。此外, 熔覆层和热影响区的显微硬度均高于基体, 随着激光功率的增加, 熔覆层的显微硬度明显增大, 最高可达 479.4HV<sub>0.2</sub>。结论 综合考虑激光功率对 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆组织及硬度的影响, 2600 W 为最佳激光熔覆功率。  
**关键词:** 激光熔覆; 激光功率; 不锈钢丝材; 熔覆层组织; 热影响区; 硬度  
**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)03-0191-07  
**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.03.017

## Effect of Laser Power on Laser Cladding Structure and Hardness of 17-4PH Wire

WANG Qiang<sup>1a,1b</sup>, LI Yang-yang<sup>1a,1b</sup>, YANG Hong-bo<sup>1a</sup>, NIU Wen-juan<sup>1a</sup>, SU Cheng-ming<sup>2</sup>,  
CAO Peng<sup>2</sup>, YANG Ju<sup>1a</sup>, WANG Yong-gang<sup>1a</sup>, Dong QIU<sup>3</sup>

(1.a.School of Metallurgical Engineering, b. Shaanxi Research Center of Metallurgical Engineering,

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2021-01-06

Received: 2020-10-21; Revised: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51801143); 陕西省自然科学基金 (2017JZ012); 陕西省教育厅专项 (18JK0445)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51801143), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JZ012), Special Research Project of Education Department of Shaanxi Province (18JK0445)

作者简介: 王强 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为冷喷涂技术及应用、轻合金快速增材制造。邮箱: qiang.wang@xauat.edu.cn

Biography: WANG Qiang (1984—), Male, Doctor, Professor, Research focus: cold spraying technology development and application and light alloy rapid additive manufacturing. E-mail: qiang.wang@xauat.edu.cn

引文格式: 王强, 李洋洋, 杨洪波, 等. 激光功率对 17-4PH 丝材激光熔覆组织及硬度的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 191-197.

WANG Qiang, LI Yang-yang, YANG Hong-bo, et al. Effect of laser power on laser cladding structure and hardness of 17-4PH wire[J]. Surface technology, 2021, 50(3): 191-197.

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2.Shannxi Tyon Intelligent Remanufacturing Co., Ltd, Xi'an 710055, China;

3.Center for Additive Manufacturing, School of Engineering, RMIT University, Melbourne 3053, Australia)

**ABSTRACT:** To study the effect of laser power on laser cladding microstructure and hardness of 17-4PH stainless steel wire, ensure the best laser cladding power, and provide an evidence for 17-4PH stainless steel wire to apply for laser cladding, this paper carries out the laser cladding test for 17-4PH stainless steel wire on the surface of 27SiMn steel piston rod, observes and presents the microstructure of cladding layer under various laser powers by metallographic microscope and scanning electron microscope, and measures the hardness of cladding layer and substrate by hardness tester at different laser powers. It is found that the height of cladding layer is decreased from 1119  $\mu\text{m}$  to 1006  $\mu\text{m}$ , and the penetration depth of the substrate and the width of the heat-affected zone are increased with the increase of the laser power when the laser power is 1600 W, 1800 W, 2000 W and 2200 W, respectively. Its microstructure is mainly composed of shorter lath martensite without directionality. Besides, when the laser power is 2400 W and 3000 W, the height of the cladding layer, the penetration depth of the substrate and the width of the heat-affected zone increase as the laser power is increased, with the maximum up to 1119  $\mu\text{m}$ , 310  $\mu\text{m}$  and 638  $\mu\text{m}$ , respectively. Its microstructure consists of lath martensite with directional orientation, and dense equiaxed crystals close to substrate. Meanwhile, the precipitation particles are increased with the increase of laser power. In addition, micro-hardness of the cladding layer and the heat-affected zone is higher than that of the substrate. Its hardness is up to 479.4HV<sub>0.2</sub> as the laser power is increased. Therefore, it is concluded that 2600 W is the best laser cladding power, considering the influence of laser power on laser cladding structure and hardness of 17-4PH stainless steel.

**KEY WORDS:** laser cladding; laser power; stainless steel wire; microstructure of cladding layer; heat-affected zone; hardness

激光熔覆是新兴起的一种材料表面处理技术,利用激光器发出的高能量激光束将合金粉末或丝材熔化于基体表面,从而在基体表面形成牢固的冶金结合的熔覆涂层,广泛应用于冶金、煤矿、工程机械制造等领域<sup>[1-3]</sup>。其中,送丝激光熔覆是通过高能量激光束将丝材熔化到基体表面,具有成形效率高、冷却速度快、组织成形好、热输入变形小、生产过程无污染、丝材利用率高等特点,在制备耐磨、耐蚀等特殊性能的表面涂层方面具有广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

丝材的选择是影响送丝激光熔覆质量的关键,近年来,国内外学者对送丝激光熔覆的研究多集中在丝材种类的选择上,不断扩展丝材的应用范围。如 Gökhan Demir<sup>[6]</sup>采用 301 不锈钢丝材作为熔覆材料,成功熔覆了 700~800  $\mu\text{m}$  的形貌和组织较好的高精度薄壁件; P. Wanjara 等人<sup>[7]</sup>采用 Inconel718 丝材作为熔覆材料,对熔覆层微观组织进行了研究,总结了熔覆层强化机理;黄梓麟等人<sup>[8]</sup>采用 FV520B 不锈钢丝材作为熔覆材料进行表面修复,取得了良好的效果;清华大学 Peng Wen 等人<sup>[9]</sup>采用 ER410NiMo 丝材作为激光熔覆材料,得到了组织形貌完整、力学性能优异的熔覆层;四库等人<sup>[10]</sup>采用 45 钢丝材作为熔覆材料,得到了致密、无孔隙的金属组织。国内外学者已完成了对 301 不锈钢、Inconel718、FV520B 等多种不同材料的激光丝材熔覆工艺以及组织性能的研究,丝材激光熔覆在以上材料上,可以得到表面形貌完整、组织性能较好的熔覆层,为丝材激光熔覆的应用奠定了基础。然而熔覆材料的应用范围仍在不断扩展,熔覆

工艺和机理的研究仍需不断的优化和探索。

17-4PH (0Cr17Ni4Cu4Nb) 是由铜、镍构成的沉淀硬化型马氏体不锈钢,在 Cr17 不锈钢基础上发展而来,具有高强度、高硬度、高断裂韧性和抗腐蚀特性,适于用作涂层材料<sup>[11-14]</sup>。然而 17-4PH 不锈钢作为激光送丝熔覆材料却鲜有报道,且激光功率是影响熔覆成形质量的重要因素之一,因此研究激光功率对 17-4PH 丝材激光熔覆组织及性能的影响具有重要意义。本文选用 17-4PH 不锈钢丝材,在 27SiMn 活塞杆表面进行不同激光功率送丝熔覆,探究激光功率对熔覆层组织和性能的影响,并寻找最佳的激光熔覆功率,为 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆的应用提供参考。

## 1 实验材料与方法

实验基体材料采用直径为 99 mm 的 27SiMn 钢活塞杆,熔覆的丝材为 17-4PH 不锈钢,直径为 1.2 mm,化学成分如表 1 所示。熔覆前,对活塞杆进行打磨,然后用酒精清洗,去除表面污渍,提高激光能量吸收率。实验采用陕西天元智能再制造股份有限公司自主研发的 ProLC-3000MT 高速丝材激光熔覆设备,激光波长为 1064 nm,光斑直径为 3 mm。采用侧向送丝的方式进料,送丝速度为 55 mm/s。送丝机具有加热功能,丝材初始加热温度 800  $^{\circ}\text{C}$ 。熔覆路径为自左向右螺旋熔覆,扫描速度为 45 mm/s,搭接率为 65%。实验过程中,采用氮气作为保护气,防止熔池和丝材被氧化。实验材料分别在 1600、1800、2000、2200、

表 1 27SiMn 钢和 17-4PH 不锈钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 27SiMn steel and 17-4PH stainless steel

Materials	C	Si	Mn	Ni	Cu	S	P	Cr	Nb	Fe
27SiMn steel	0.24~0.32	1.10~1.40	1.10~1.40	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.30	—	—	Bal.
17-4PH stainless steel	0.017	0.43	0.43	4.57	3.32	0.01	0.019	16.24	0.21	Bal.

2400、2600、2800、3000 W 下进行了单层多道次激光熔覆。

将制备好的试样放入无水乙醇,使用超声波清洗机清洗 30 min,然后打磨、抛光至镜面状态。使用金相腐蚀剂(1 g 氯化铜+3.5 g 氯化铁+50 mL 盐酸+2.5 mL 硝酸+50 mL 水+50 mL 酒精)进行腐蚀,利用 Reichert Jung (Leica) Polyvar 金相显微镜和 JSM-6460 扫描电子显微镜表征熔覆层的微观组织。使用 HVS-1000 硬度计,按照 ASTM E384-2011 标准测量熔覆层和基体的硬度,实验载荷为 200 g,荷载时间为 15 s。

2 结果与分析

2.1 微观组织分析

对不同激光功率下的熔覆试样横截面的显微组织进行分析,发现激光熔覆样品的显微组织均由熔覆层( Coating )、热影响区( HAZ )和基体( Substrate )

三部分组成,如图 1 所示。图 1a—d 分别是激光功率为 1800、2200、2600、3000 W 时,熔覆试样横截面的显微组织形貌。由于对丝材进行了提前加热,无论在低激光功率下,还是高激光功率下,熔覆试样均未发现孔隙、裂纹和未融合区域等缺陷,熔覆效果较好。为了更好地揭示激光功率对 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆微观形貌的影响规律,对不同激光功率下得到的微观形貌进行了表征分析。图 1a 表征的是热影响区的宽度,用  $d$  表示。图 1c 说明的是熔覆层高度、基体穿透深度的表征方法,  $H_1$  表示熔覆层高度,  $H_2$  表示穿透深度,并且熔覆层穿透深度  $H_2$  为相邻三处穿透深度的平均值。图 2 为不同激光功率下的熔覆层高度、基体穿透深度和热影响区宽度的测量值。当激光功率为 1600~2200 W 时,熔覆层的高度由 1119  $\mu\text{m}$  降低到 1006  $\mu\text{m}$ ,当激光功率为 2200~3000 W 时,熔覆层的高度由 1006  $\mu\text{m}$  增加到 1181  $\mu\text{m}$ 。基体的穿透深度和热影响区宽度都随激光功率的增加而增大。当激光功率为 1600 W 时,基体的穿透深度和热影响区宽

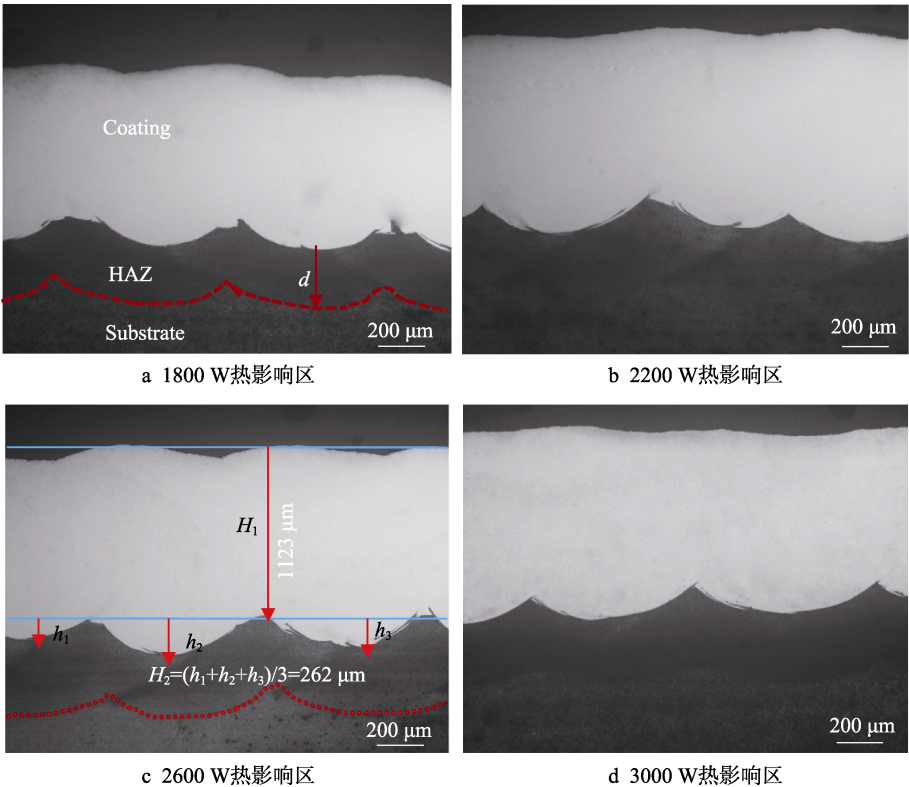


图 1 熔覆试样横截面的显微组织形貌及表征方法

Fig.1 Cross-sectional view of the microstructure of the cladding sample under low laser power and high power: a) 1800 W heat-affected zone; b) 2200 W heat-affected zone; c) 2600 W heat-affected zone; d) 3000 W heat-affected zone

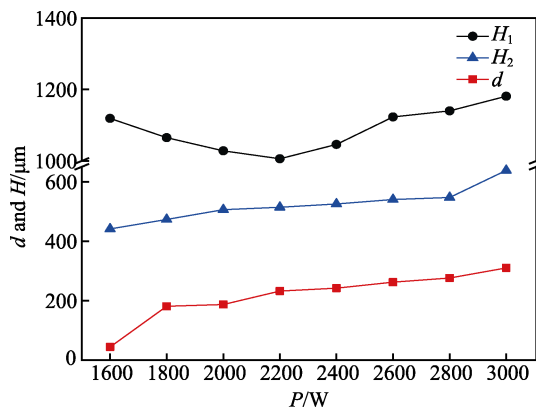


图2 不同激光功率下熔覆层高度、基体穿透深度和热影响区宽度的测量值

Fig.2 Measurements of the cladding height, the penetration depth of the substrate and the width of the heat-affected zone under different laser powers

度的值最小,分别为44  $\mu\text{m}$ 和441  $\mu\text{m}$ ;激光功率继续增加,当功率达到3000 W时,基体的穿透深度和热影响区宽度分别为310  $\mu\text{m}$ 和638  $\mu\text{m}$ ,相较于激光功率为1600 W时明显增加。激光熔覆过程中,丝材在高能量激光作用下部分熔化,形成熔液,熔液在自身重力和表面张力的综合作用下向熔池两边流动,即熔池的横向扩展<sup>[15]</sup>。当激光功率较低时,熔池的流动性较差,熔池的横向扩展能力较小,因而熔覆层的高度随着激光功率的增大而减小;当激光功率较高时,

作用于丝材的能量增加,熔池的流动性较好,熔池的横向扩展能力提升<sup>[16]</sup>,但由于搭接率较大,熔池的部分横向流动会被阻碍,上一道次熔池的横向扩展会对下一道次熔覆层的高度起到叠加作用,因此熔覆层的高度会随着激光功率的增大而增加。激光功率越大,形成熔池的能量越高,热影响区的宽度和基体的穿透深度越大<sup>[17]</sup>,对基体的损伤就越大,因此激光功率的选择不宜过大。

当激光熔覆功率为1600、1800、2000、2200 W时,在熔覆层的底部,靠近基材的位置没有等轴晶形成;而激光功率为2400、2600、2800、3000 W时,靠近基材的位置有细小而致密的等轴晶形成。图3为激光功率为1800、2200、2600、3000 W的熔覆层的微观组织。由图3a、b可知,在基体和熔覆层的结合处有一条白亮带,说明丝材和基体呈冶金结合状态<sup>[18]</sup>,组织中板条马氏体垂直于基体向上分布。图3a、b右上方为局部放大的板条马氏体,没有发现等轴晶。而从图3c、d可知,靠近基体的位置是由大量细小而致密的等轴晶组成。当激光功率为1800 W时,激光能量转化的热能在基体内部传导,使靠近基体位置处的温度升高,导致奥氏体化温度发生相变,在随后的凝固过程中形成了板条状马氏体。当激光功率升高至3000 W时,熔池的能量较高,极高的能量将丝材快速熔化又快速冷却凝固,靠近基材区域的过冷度较

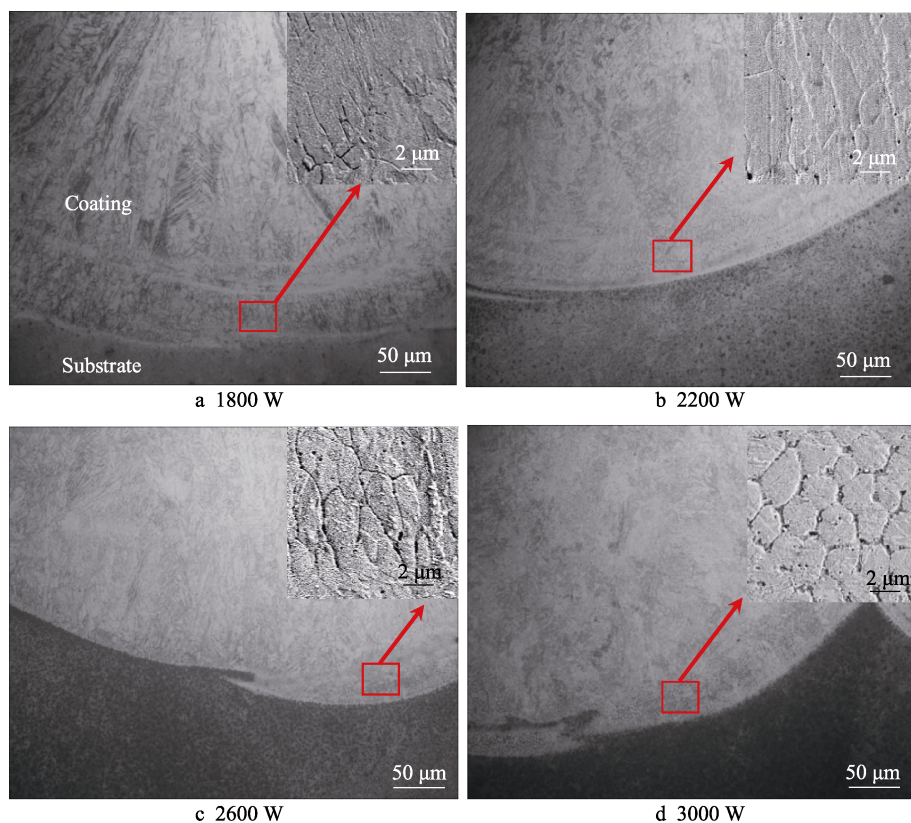


图3 熔覆层的微观组织

Fig.3 Microstructure and partial enlarged view near the substrate

大,凝固速率较快,当液体内部满足成分过冷时开始形核,晶粒来不及长大就已经生成,因此形成了致密且尺寸均匀细小的等轴晶<sup>[19]</sup>。

激光功率不同,熔覆层的显微组织略有差异。图 4 为不同激光功率下的熔覆层微观组织变化。图 4a 为激光功率为 1800 W 的熔覆层微观组织,由薄而长的板条马氏体组成,厚度为 2~4  $\mu\text{m}$ ,最大长度约为 40  $\mu\text{m}$ 。图 4b 为激光功率为 2200 W 的熔覆层微观组织,由少量的沉淀粒子颗粒和厚而短的粗化板条马氏体组成,厚度为 3~5  $\mu\text{m}$ ,最大长度约为 20  $\mu\text{m}$ 。图 4c 为激光功率为 2600 W 的熔覆层微观组织,由厚而长、排列整齐且具有方向取向的板条马氏体组成,厚度为 5~10  $\mu\text{m}$ ,长度超过 80  $\mu\text{m}$ ,许多的沉淀粒子颗粒在马氏体上弥散析出。图 4d 为激光功率 3000 W 的熔覆层微观组织,同样由厚而长、排列整齐且具有方向取向的板条马氏体组成,厚度为 2~8  $\mu\text{m}$ ,长度超过 100  $\mu\text{m}$ ,还有大量密集的沉淀粒子和许多黑色颗粒

粒在马氏体上弥散析出。吴晓瑜<sup>[20]</sup>等人在激光立体成形 17-4PH 不锈钢的研究中得出,马氏体上弥散析出的细小沉淀粒子主要为 NbC 型以及  $\text{M}_7\text{C}_3$ 、 $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型碳化物等。在激光熔覆过程中,激光作用的能量使 17-4PH 不锈钢的温度达到熔点 1400  $^{\circ}\text{C}$ ,17-4PH 不锈钢丝材被迅速熔化。当熔体冷却到液相线温度,首先凝固形成高温铁素体,随着熔体温度的降低,高温铁素体与液相的包晶转变成奥氏体。在激光的作用下,17-4PH 不锈钢的冷却速率极高,导致马氏体相变的发生<sup>[2]</sup>。根据这种快速冷却过程,可以推断出高温铁素体枝晶的枝晶臂间距将影响奥氏体晶粒的尺寸,从而影响最终板条马氏体的尺寸<sup>[21]</sup>。同时随着激光功率的增加,熔池温度增大,冷却速率增大,从而影响了奥氏体晶粒的尺寸<sup>[22]</sup>。极大的冷却速率使来不及完全长大的奥氏体转变成略有差异的马氏体。此外,大量过饱和的 Cr、Mn、Nb 等合金元素以合金碳化物  $\text{M}_7\text{C}_3$ 、 $\text{M}_{23}\text{C}_6$  等形式析出<sup>[23]</sup>。

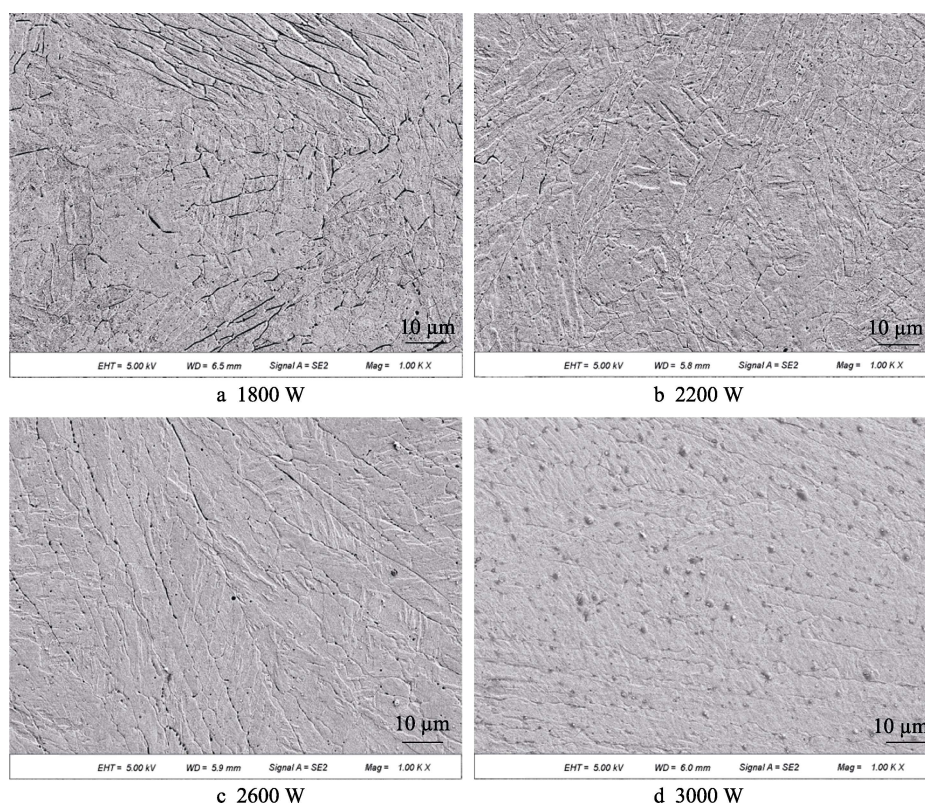


图 4 不同激光功率下熔覆层的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of cladding layer under different laser power

## 2.2 硬度分析

图 5 是不同激光功率下熔覆 17-4PH 不锈钢丝材的显微硬度曲线。显微硬度从熔覆层、热影响区到基体呈现出三台阶状,熔覆层和热影响区的显微硬度均高于基体。随着激光功率的增加,熔覆层的显微硬度明显增大,最高可达 479.4HV<sub>0.2</sub>。一方面,由于激光熔覆具有快速熔化、快速凝固的特点,在激光熔覆过

程中,熔池对基体和熔覆层产生热作用,细化了熔覆层和热影响区的组织,使熔覆层和热影响区的显微硬度均高于基体;另一方面,由于 17-4PH 钢中 Cr、Mn 等合金元素含量较高,随着激光功率的增加,在高温作用下,单相奥氏体基体中固溶了大量过饱和的合金元素。在快速冷却过程中,这些过饱和的合金元素以金属碳化物等形式不断析出,大量均匀、细小的析出物分布在马氏体上,产生弥散强化<sup>[24]</sup>,使熔覆层

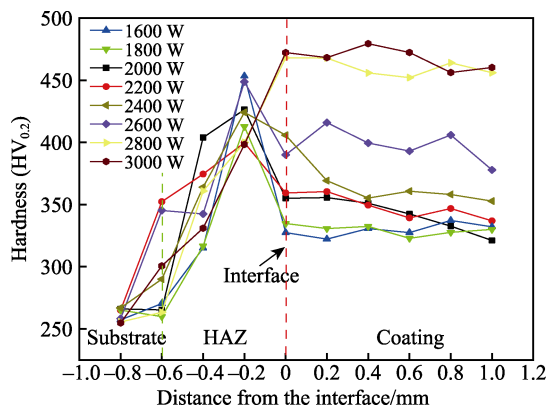


图5 不同激光功率下熔覆试样的显微硬度曲线

Fig.5 Microhardness of cladding samples under different laser powers

的硬度增加<sup>[25]</sup>。当激光功率小于 2600 W 时,热影响区硬度先增大后减小。这是由于在该激光功率范围内,靠近熔覆区的热影响区组织在冷却过程中形成马氏体,并且没有粗化,所以显微硬度有上升的趋势。远离熔覆区,由于热传导的热量不足以使 27SiMn 钢完全奥氏体化,使其部分发生类回火现象,显微硬度降低。并且距离熔覆区越远,回火马氏体的比例就越大,硬度下降得越多,因此激光功率的选取不易过小。当激光功率大于 2600 W 时,热影响区硬度迅速减小,软化严重。

### 3 结论

1) 随着激光功率的增加,熔覆层的高度先减小后增加,而基体的穿透深度和热影响区宽度都随着激光功率的增大而增加。

2) 激光功率不同,熔覆层的显微组织略有差异。当激光功率较低时,熔覆层的组织主要为较短且没有方向性的板条马氏体;当激光熔覆的功率较高时,熔覆层的组织主要由具有方向取向的板条马氏体组成,在靠近基材的位置,由细小而致密的等轴晶形成。随着激光功率的增加,熔覆层弥散析出的碳化物颗粒逐渐增多。

3) 相同激光功率下,熔覆层和热影响区的显微硬度均高于基体。随着激光功率的增加,熔覆层的平均显微硬度逐渐增加。

4) 当激光功率较小时,熔覆层没有晶粒细小而致密的等轴晶形成,也没有碳化物颗粒弥散析出,熔覆层硬度较低;当激光功率较高时,热影响区宽度和基体的穿透深度较大,对基体的损伤加大,且软化严重。综合考虑激光功率对 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆组织及硬度的影响,2600 W 为最佳激光熔覆功率。

### 参考文献:

[1] HANG Yong-jun. Characterization of dilution action in

laser-induction hybrid cladding[J]. Optics and laser technology, 2011, 43(5): 965-973.

[2] 王长贵,李志远,黄安国. 75CrMnMo 铸钢轧辊激光熔凝强化的组织及性能分析[J]. 钢铁, 2004(9): 61-63.

WANG Chang-gui, LI Zhi-yuan, HUANG An-guo. Study on microstructures and mechanical properties of laser hardening roller steel 75CrMnMo[J]. Iron and steel, 2004(9): 61-63.

[3] 牛兴林,张德强,李金华,等. 45 钢表面激光熔覆 Fe 基粉末实验研究[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 148-151.

NIU Xing-lin, ZHANG De-qiang, LI Jin-hua, et al. Study of laser cladding Fe-based powder on 45 steel surface[J]. Machinery design & manufacture, 2014(12): 148-151.

[4] WEI Shao-peng, WANG Gang, SHIN Y C, et al. Comprehensive modeling of transport phenomena in laser hot-wire deposition process[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 125: 1356-1368.

[5] 许翔. 激光送丝熔敷成形技术的基础及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

XU Xiang. Research on mechanism and application of laser cladding forming with wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.

[6] DEMIR Ali Gökhan. Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures[J]. Optics and lasers in engineering, 2018, 100: 9-17.

[7] ZHANG Y N, CAO X, WANJARA P. Microstructure and hardness of fiber laser deposited Inconel 718 using filler wire[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, 69(9-12): 2569-2581.

[8] HUANG Zi-lin, WANG Gang, WEI Shao-peng, et al. Process improvement in laser hot wire cladding for martensitic stainless steel based on the Taguchi method[J]. Frontiers of mechanical engineering, 2016, 11(3): 242-249.

[9] WEN Peng, CAI Zhi-peng, FENG Zhen-hua, et al. Microstructure and mechanical properties of hot wire laser clad layers for repairing precipitation hardening martensitic stainless steel[J]. Optics & laser technology, 2015, 75: 207-213.

[10] 四库,孙进. 45 钢送丝激光熔覆成型基础工艺[J]. 制造技术与机床, 2012(6): 149-152.

SI Ku, SUN Jin. The basic process of laser cladding fabrication with 45 carbon steel wire[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2012(6): 149-152.

[11] RAJ S V, GHOSH L J, LERCH B A, et al. Mechanical properties of 17-4PH stainless steel foam panels[J]. Materials science & engineering A, 2006, 456(1): 305-316.

[12] LIN Xin, CAO Yong-qing, WU Xiao-yu, et al. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel[J]. Materials science & engineering A, 2012, 553: 80-88.

[13] MARTINA F, DING J L, WILLIAMS S, et al. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel[J]. Additive manufacturing, 2019, 25: 545-550.

[14] CABALLERO A, DING J L, GANGULY S, et al. Wire+

- arcadditive manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength[J]. *Journal of materials processing technology*, 2019, 268: 54-62.
- [15] 冯帅. 合金钢激光熔丝沉积工艺及回火处理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
FENG Shuai. Study on the fabrication process and tempering treatment of alloy steel by wire and laser additive manufacturing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [16] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 82-87.  
LI Kai-bin, LI Dong, LIU Dong-yu, et al. Research of fiber laser cladding repairing process with wire feeding [J]. *Chinese journal of lasers*, 2014, 41(11): 82-87.
- [17] CAPELLO E, COLOMBO D, PREVITALI B. Repairing of sintered tools using laser cladding by wire[J]. *Journal of materials processing technology*, 2005, 164: 990-1000.
- [18] BAMBACH M, SIZOVA I, SILZE F, et al. Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder[J]. *Hot and cold wire*, 2018, 74: 206-209.
- [19] 刘振宝, 雍岐龙, 杨志勇, 等. 高强度马氏体时效不锈钢的晶粒细化及其力学性能的研究[J]. *钢铁*, 2008(6): 61-65.  
LIU Zhen-bao, YONG Qi-long, YANG Zhi-yong, et al. Study of grain refining process and mechanical properties of a high strength maraging stainless steel[J]. *Iron and steel*, 2008(6): 61-65.
- [20] 吴晓瑜, 林鑫, 吕晓卫, 等. 激光立体成形 17-4 PH 不锈钢组织性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 109-115.  
WU Xiao-yu, LIN Xin, LYU Xiao-wei, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser solid forming 17-4PH stainless steel[J]. *Chinese journal of lasers*, 2011, 38(2): 109-115.
- [21] 王春芳, 王毛球, 时捷, 等. 低碳马氏体钢的微观组织及其对强度的影响[J]. *钢铁*, 2007(11): 57-60.  
WANG Chun-fang, WANG Mao-qiu, SHI Jie, et al. Microstructural characterization and its effect on strength of low carbon martensitic steel[J]. *Iron and steel*, 2007(11): 57-60.
- [22] NEZHADFAR P D, KATHRYN A W, DANIEWICZ S R, et al. Improved high cycle fatigue performance of additively manufactured 17-4PH stainless steel via in-process refining micro-defect-structure[J]. *Additive manufacturing*, 2020, 36: 101604.
- [23] SUN Y, HEBERT R J, AINDOW M. Effect of laser scan length on the microstructure of additively manufactured 17-4PH stainless steel thin-walled parts[J]. *Additive manufacturing*, 2020, 35: 101302.
- [24] 吴增强, 白银, 马龙腾, 等. 650 °C 马氏体耐热钢研究及其进展[J]. *钢铁*, 2015, 50(5): 1-6.  
WU Zeng-qiang, BAI Yin, MA Long-teng, et al. Research and development of martensitic creep-resistant steels for 650 °C[J]. *Iron and steel*, 2015, 50(5): 1-6.
- [25] CHEN Zhao-yun, ZHOU Gui-juan, CHEN Zhong-hua. Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching[J]. *Materials science and engineering: A*, 2012, 534: 536-541.

(上接第 190 页)

- [18] 许兆林. 粗糙固体表面对流动与传热影响机理的分子动力学模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
XU Zhao-lin. Study on the role of rough solid surface on fluid flow and heat transfer by molecular dynamics simulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] 冯妙. 相变传热边界热流反演及相界面重构[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.  
FENG Miao. Boundary heat flux inversion and phase interface reconstruction of phase change heat transfer system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [20] NEE A. Hybrid lattice Boltzmann-finite difference formulation for combined heat transfer problems by 3D natural convection and surface thermal radiation[J]. *International journal of mechanical sciences*, 2020, 173: 105447.
- [21] 黄文迪, 许国良. 气固流化床颗粒间辐射换热模型[J]. *华中理工大学学报*, 1996(1): 12-16.  
HUANG Wen-di, XU Guo-liang. Radiation heat transfer model between particles in gas-solid fluidized bed[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1996(1): 12-16.
- [22] 王一丹, 张学润, 崔秀芳, 等. 激光能量密度对 NiCrCoTiV 高熵合金涂层组织结构及耐腐蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 118-124.  
WANG Yi-dan, ZHANG Xue-ruan, CUI Xiu-fang, et al. Effects of laser energy density on microstructure and corrosion resistance of NiCrCoTiV high entropy alloy coating [J]. *Surface technology*, 2019, 48(6): 118-124.
- [23] 于亚海, 张锦洲, 张林修. 基于高斯热源 T 型接头焊接数值模拟[J]. *长江大学学报*, 2018, 15(5): 13-16.  
YU Ya-hai, ZHANG Jin-zhou, ZHANG Lin-xiu. Numerical simulation of T joint welding based on gaussian heat source[J]. *Journal of Changjiang University*, 2015, 15(5): 13-16.
- [24] CAI Z, WU S, LU A, et al. Line Gauss heat source model: An efficient approach for numerical welding simulation [J]. *Science and technology of welding and joining*, 2001, 6(2): 84-88.
- [25] 房芳. 基于多扫描的六面体网格划分算法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
FANG Fang. The research of hexahedral mesh generation algorithm based on multi-sweep[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [26] 虞钢, 何秀丽, 李少霞, 等. 激光先进制造技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.  
YU Gang, HE Xiu-li, LI Shao-xia, et al. Advanced laser manufacturing technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.