文章编号：1008-1542(2024)01-0074-08

激光功率对 316L 不锈钢熔覆层组织及性能的影响

赵稳利[1,2]，张　亮[1,2]，李晓君[3]，曹　磊[1,2]，付　凯[1,2]，朱金广[4]

（1. 河北科技大学材料科学与工程学院，河北石家庄　050018；
2. 河北省材料近净成形技术重点实验室，河北石家庄　050018；
3. 内蒙古呼铁对外经济技术合作集团有限责任公司，内蒙古呼和浩特　010051；
4. 河北省低温罐车技术创新中心，河北衡水　053100）

摘　要：为了解决 316L 不锈钢激光熔覆层成形差、耐腐蚀性低的问题，采用显微组织观察、硬度实验、常温冲击及电化学测试等试验方法，对不同激光功率下熔覆单层及多层熔覆层的成形、组织及性能进行检测和分析。结果表明，随着激光功率的增大，熔覆层高度呈现先增加后减小的变化趋势，熔覆层内部析出相的含量以及稀释率则呈现上升趋势；激光功率过小易引起熔覆层开裂，过大则会引起熔覆层晶粒异常长大；随着激光功率的增加，熔覆层硬度呈增大趋势，当激光功率达到 450 W 时，熔覆层与基材结合界面处硬度值达到最大，为 475 HV；而熔覆层的冲击性能和耐腐蚀性能则随着激光功率的增大呈现下降趋势，当激光功率为 300 W 时，其冲击韧性最大为 92 J，且熔覆层具有最优的耐腐蚀性能，腐蚀电位 E_{corr} 最高为 −0.3 V，且腐蚀电流密度 I_{corr} 最小为 0.165 A/cm^2；因此，当熔覆速率为 3 mm/s、送粉速率为 14 g/min、搭接率为 50% 时，采用 300 W 激光功率制备的熔覆层可得到优异的冲击和耐腐蚀性能。研究结果可为 316L 激光熔覆层工艺调控及性能改善提供参考。

关键词：特种加工工艺；激光功率；激光熔覆成形；显微组织；耐腐蚀性；冲击韧性

中图分类号：TG456.7　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.7535/hbkd.2024yx01009

Effect of laser power on the microstructure and properties of 316L stainless steel cladding layer

ZHAO Wenli[1,2], ZHANG Liang[1,2], LI Xiaojun[3], CAO Lei[1,2], FU Kai[1,2], ZHU Jinguang[4]

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

收稿日期：2023-11-17；修回日期：2023-12-10；责任编辑：冯　民
基金项目：国家自然科学基金(51775007)；河北省自然科学基金(E2019208199)；河北省科技重大专项(23261601Z)；河北省重点研发计划项目(23311811D,19211016D)；中国呼和浩特铁路局集团科学技术研究项目(2022D033)
第一作者简介：赵稳利(1998—)，男，河北保定人，硕士研究生，主要从事激光熔覆技术方面的研究。
通信作者：曹磊，高级工程师。E-mail：306310565@qq.com

赵稳利，张亮，李晓君，等. 激光功率对 316L 不锈钢熔覆层组织及性能的影响[J]. 河北科技大学学报，2024，45(1)：74-81.
ZHAO Wenli, ZHANG Liang, LI Xiaojun, et al. Effect of laser power on the microstructure and properties of 316L stainless steel cladding layer[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(1): 74-81.

2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
3. Inner Mongolia HUTIE Foreign Economic and Technological Cooperation Group Company Limited, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;
4. Hebei Province Low Temperature Tank Car Technology Innovation Center, Hengshui, Hebei 053100, China)

Abstract: To solve the problems of poor forming and low corrosion resistance of 316L stainless steel laser cladding layer, the forming, microstructure and properties of single-layer and multi-layer samples prepared at different laser powers were detected and analyzed by microstructure observation, hardness testing, impact testing and electrochemical testing. The results show that the height of the laser cladding layer initially increases and subsequently decreases with the increase of laser power. The content of precipitates and the dilutionrate increase with the increase of laser power. Cracks occur in the laser cladding layer under the condition of low laser power, and it can cause the grains to grow abnormally under the condition of high laser power. Meanwhile, the hardness value of the laser cladding layer increases with the increase of laser power. The hardness value at the interface reach a maximum value of 475 HV when the laser power is 450 W. However, the impact toughness and corrosion resistance of the laser cladding layer decreases as the laser power increases. The maximum impact toughness is 92 J of the laser cladding layer prepared with the laser power of 300 W. Meanwhile, the laser cladding layer prepared with the laser power of 300 W has the best corrosion resistance, with its highest corrosion potential (E_{corr}) of −0.3 V and lowest corrosion current density (I_{corr}) of 0.165 A/cm^2, respectively. Therefore, the laser cladding layer prepared at 300 W laser power can obtain excellent impact and corrosion resistance when the laser cladding speed is 3 mm/s, the powder feeding rate is 14 g/min, and the overlap rate is 50%. The research results can provide a reference for the parameter control and performance improvement of laser cladding 316L layer.

Keywords: special processing technology; laser power; laser cladding forming; microstructure; corrosion resistance; impact toughness

激光熔覆作为一种对环境影响较小的绿色加工技术，具有成形精度高、结合强度强、稀释率低、缺陷少、变形小等优点，激光熔覆技术逐渐应用于工业生产[1-3]。316L 粉末是一种低成本、耐蚀性较好且成形性良好的材料，通常被用于金属熔覆制造或修复各类装置的保护层[4]。在激光熔覆过程中，工艺参数会影响 316L 熔覆层的组织与性能[5-6]，工艺参数的不匹配可导致激光熔覆层出现开裂、气孔、成型差等缺陷，同时也会降低其力学性能及耐腐蚀性[7-10]。

近年来，许多学者对于激光工艺参数对熔覆层的成形质量和组织性能的作用开展了众多研究。叶四友等[11]采用 CCD 中心组合设计，在 45 钢表面激光熔覆了 316L 不锈钢单道熔覆层，得出了成形质量最好的工艺参数，并在此基础上开展后续试验。与基材相比，熔覆层明显提升了耐磨和耐腐蚀性能。LIU 等[12]采用不同激光功率在 Q235 钢表面制备了 2205 双相不锈钢单道熔覆层，在激光功率增大时，显微晶粒尺寸先变小后增大，2.3 kW 获得的熔覆层具有最高的硬度值和最好的耐腐蚀性能。邓德伟等[13]研究了激光工艺参数对熔覆层的影响规律，当激光功率增大或扫描速度减小时，会使熔覆层厚度增加且显微晶粒变大，硬度性能有所下降，而过大的送粉量会使熔覆层表面不平整。

众多学者的研究表明，激光工艺参数对熔覆层的成形、组织及性能具有较大影响。然而大多数学者只是针对单层单道和单层多道熔覆层的情况开展研究，激光工艺参数对多层多道熔覆层的影响研究相对较少。本文采用单一变量法设计试验，对激光功率与其他工艺参数之间的匹配进行研究，获得激光功率与其他参数之间的匹配关系，研究激光功率变化对熔覆层成形、组织及性能的影响规律。

1　试验材料及方法

1.1　激光熔覆层制备工艺试验

试验母材为 Q345，尺寸为 150 mm×100 mm×5 mm，所用粉末为 316L，粉末粒径为 50～150 μm，粉末成分如表 1 所示。本实验中采用激光熔覆设备，将 316L 粉末熔覆至 Q345 钢表面。该系统由 IPG-500 光纤激光光源、旁轴送粉装置及三轴数控机床组成。激光的波长为 1 064 nm，光斑直径 2 mm。所采用的熔覆层制备工艺参数如表 2 所示。

表1 316L粉末化学成分表

Tab.1 Chemical composition of 316L powders

参数	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	其他	Fe
质量分数/%	0.02	0.5	1.5	14	17	2.5	≤0.035	≤0.03	0.15	余量

表2 激光熔覆工艺参数

Tab.2 Parameters of laser cladding

组别	编号	激光功率/W	行走速率/(mm/s)	光斑直径/mm	保护气流量/(L/min)	送粉速率/(g/min)	搭接率/%	熔覆层数
单层	1#	250	3	2	10	14	50	1
	2#	300	3	2	10	14	50	1
	3#	350	3	2	10	14	50	1
	4#	400	3	2	10	14	50	1
	5#	450	3	2	10	14	50	1
多层	1#	300	3	2	15	14	50	10
	2#	350	3	2	15	14	50	10
	3#	400	3	2	15	14	50	10

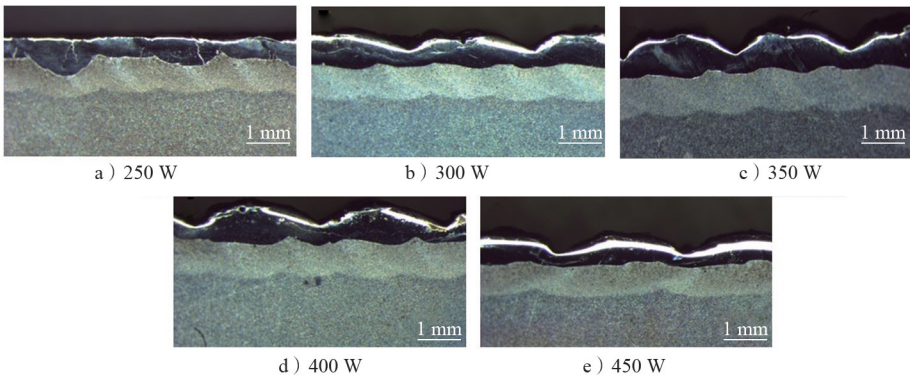
1.2 显微组织与性能表征试验

根据不同试验的要求将激光熔覆技术制备好的熔覆层采用线切割机切割成所需尺寸。对金相试样依次采用200#、400#、800#、1200#、1500#及2000#砂纸进行打磨，然后对截面进行抛光，之后利用硝酸和盐酸的混合溶液(体积比为1∶3)侵蚀试样截面8 s。采用LEICA DMi8型莱卡金相光学显微镜进行组织观察。采用TMVS-1型维氏硬度计进行显微硬度测定，从熔覆层表层到基材每隔0.5 mm测试3个点位，然后取平均值作为此位置的硬度值，实验过程中载荷为200 g，加载时间为15 s。采用JBD-300A型冲击试验机对不同激光功率制备的熔覆层进行冲击实验后，采用TESCANVEGA3钨灯丝扫描电子显微镜进行断口观察。电化学腐蚀试验采用三电极体系，在0.5 mol/L NaCl溶液中测试熔覆层的恒电位极化曲线，测量范围为−1～1 V。

2 实验结果及分析

2.1 激光功率对单层激光熔覆成形及组织的影响

如图1所示，随着激光功率的增加熔覆层的表面成形质量变差，表面呈现波浪变化形式，而熔覆层的熔宽及熔深相应增大，但熔高减小。分析其原因，在激光熔覆过程中，激光能量主要用来加热基材和熔化熔覆粉末，但一部分被粉末和基材反射[14]。随着激光功率的增加其熔化的粉末质量增加，当功率增加至350 W后，熔覆的粉末质量不再发生变化，而基材吸收的热量随激光功率的增大继续保持增加状态，则母材的熔深与熔宽相应增加。此外，激光辐射会影响熔滴的飞行速度和温度[15]，激光功率增大后，金属液滴更容易铺展，形成较大的润湿角，使熔覆层的高度下降、宽度增加。



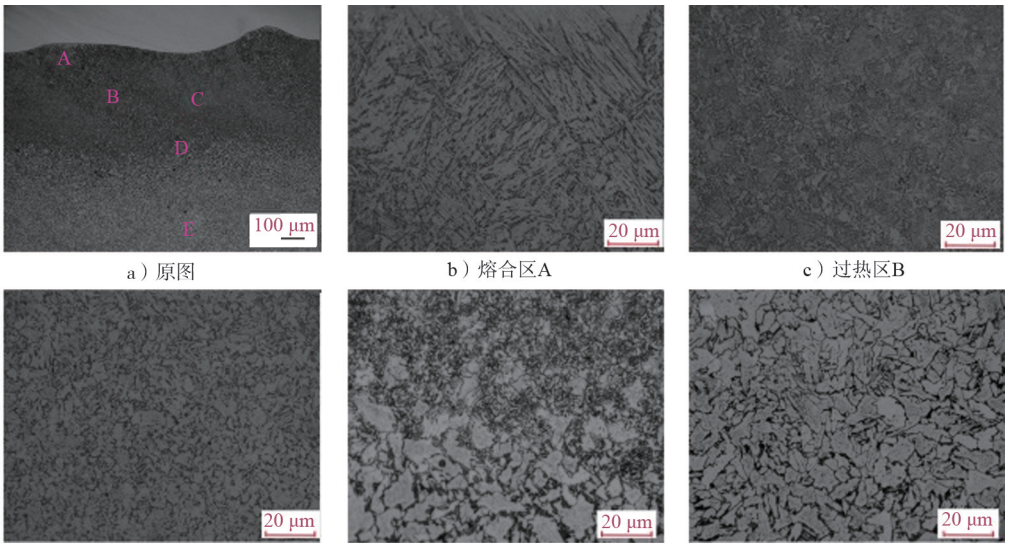
a) 250 W　b) 300 W　c) 350 W

d) 400 W　e) 450 W

图1 不同激光功率下单层熔覆层高度变化

Fig.1 Height variation of single cladding layer at different laser powers

单层多道激光熔覆过程中，基材及已加工熔覆层均受到后续加工过程中激光热的反复作用，对基材及熔覆层的组织及性能产生较大影响，其中热影响区的组织可分为 4 个区域，如图 2 所示。A 区域是熔覆层与基材之间的熔合区，激光熔覆的过程中由于较大的热输入量造成熔覆层与基体结合界面处的峰值温度较高，冷却速度大于临界冷却速度，熔合区主要以马氏体为主。B 区域是过热区，此区域的金属处于严重的过热状态，金属液体冷却凝固后主要形成粗大的铁素体和珠光体。C 区域是热影响区中的完全重结晶区，此区域的晶粒极易发生重结晶，铁素体和珠光体晶粒细小且均匀。D 区域是热影响区中的不完全重结晶区，部分显微晶粒发生了重结晶，形成细小的铁素体和珠光体，另一部分晶粒较为粗大，因此晶粒在该区域呈现不均匀的分布且尺寸差异较大。E 区域是母材区，未受到激光热作用，依然保持原始的铁素体及珠光体。



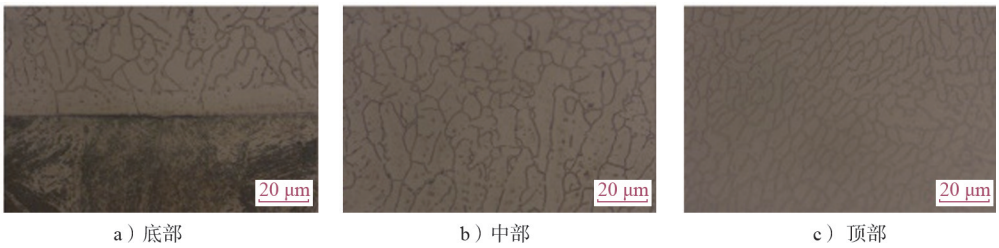
a）原图　b）熔合区A　c）过热区B

d）完全重结晶区C　e）不完全重结晶区D　f）母材区E

图 2　300 W 激光功率时热影响区及母材的组织

Fig. 2　Microstructures in the heat affected zone and base material at 300 W

采用激光熔覆技术制备熔覆层时，熔覆层不同区域的晶粒形态会产生较大差异[16]。由图 3 可以看出，熔覆层底部主要是平面晶，这是由于在此处的金属液体处于凝固阶段，温度梯度很大，成分过冷接近于零，凝固所释放的热量主要沿基体散失，晶粒沿界面形成平面晶。随着金属液体凝固时固液界面向熔覆层中部推移，温度梯度减小，且熔覆层中部形核困难，利于柱状晶的形成。熔覆层顶部的晶粒形态主要为等轴晶，熔覆层顶部与保护气体直接接触导致散热速度增大，且温度梯度较小，成分过冷度增加，形核点位较多，利于等轴晶的形成。激光熔覆过程中，基材与熔覆层冶金反应导致基材中的 C 元素熔融混合进入熔覆层，在熔覆层底部形成 $M_{23}C_6$ 等析出相[7]。



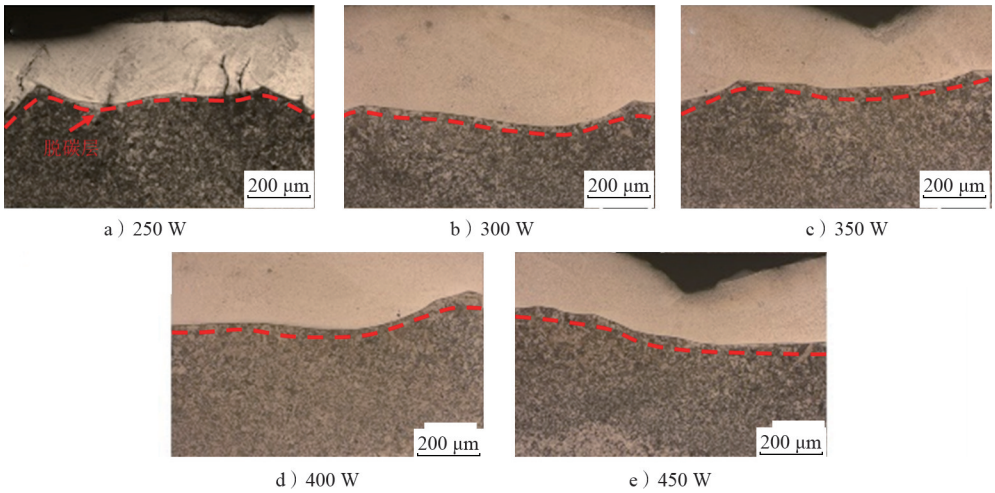
a）底部　b）中部　c）顶部

图 3　熔覆层不同区域的晶粒形态

Fig. 3　Grain morphology of different regions in the cladding layer

激光功率的变化会对熔覆层的形貌产生较大影响。当激光功率过小时，在熔覆层与基体的结合界面处出现裂纹，随着激光功率的增加，较大的热输入能够保证基材与粉末充分熔化，同时，随着激光功率的增加，熔池的流动性得到改善，避免了熔池凝固过程中 Cr 元素的偏析及熔覆层中的裂纹消失。同时，随着激光功

率的增加，熔覆层的熔深增加，熔覆层与基材冶金结合良好，如图 4 所示。在采用激光熔覆技术制备熔覆层时，异种材料中 C 元素含量不同，存在较大的浓度差异，基材中的 C 向熔覆层中扩散，在基材与熔覆层的结合线下方区域易形成脱碳层，高温下大量 C 进入熔覆层，导致熔覆层中 $M_{23}C_6$ 析出相增多。激光功率的增大，使基材吸收的热量增多，熔覆层界面处的脱碳变得明显。



a）250 W　b）300 W　c）350 W

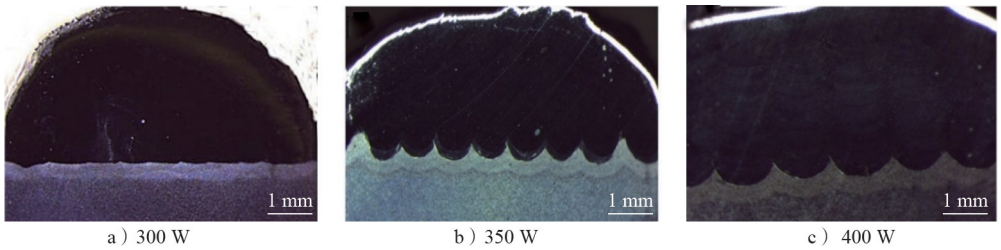
d）400 W　e）450 W

图 4　不同激光功率下熔覆层显微组织

Fig. 4　Microstructures of cladding layers at different laser powers

2.2　激光功率对多层激光熔覆成形及组织的影响

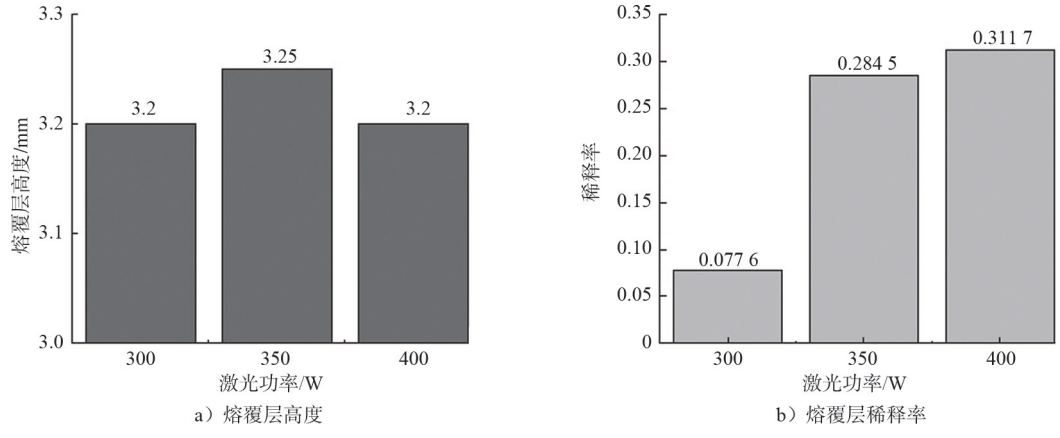
在单层熔覆的基础上，通过参数优化选取 300，350 和 400 W 激光功率进行多层熔覆，在 Q345 基材表面堆覆 10 层 316L，截面如图 5 所示，相关影响见图 6。从图 6 a)可以看出，随着激光功率的增加，熔覆层的高度呈现先增加后减小的趋势，与单层熔覆过程中熔覆层的成形规律一致。对熔覆层的熔深面积与熔覆层整体面积进行测绘，分析发现随着激光功率的增加，熔覆层的稀释率逐渐增加，如图 6 b)所示。这主要是由于激光功率增大时，基材所吸收的激光能量增加，对基材的加热作用更明显，熔深和熔宽变大，稀释率也逐渐增大。



a）300 W　b）350 W　c）400 W

图 5　不同激光功率下多层熔覆层宏观形貌

Fig. 5　Macroscopic morphology of multi cladding layers at different laser powers

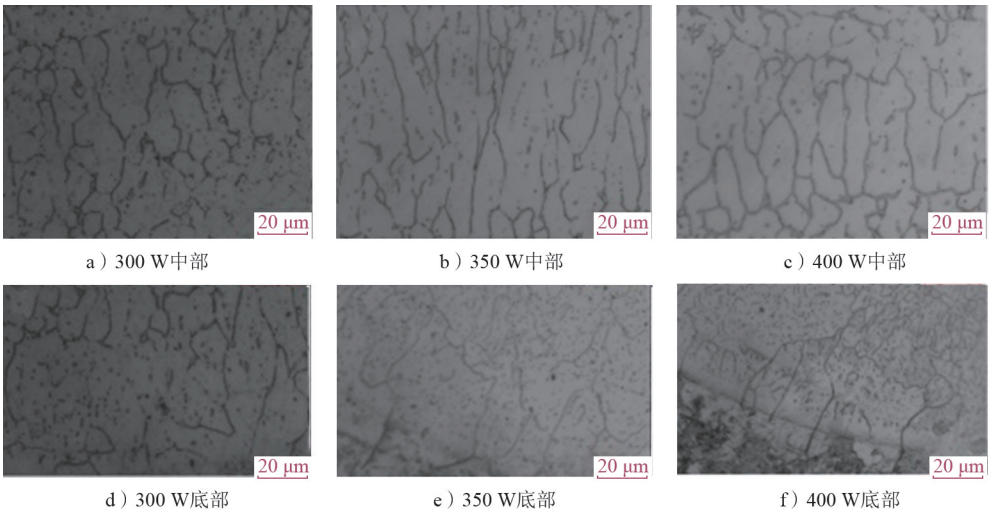


a）熔覆层高度　b）熔覆层稀释率

图 6　激光功率对多层熔覆层高度及稀释率的影响

Fig. 6　Influence of laser power on the height and dilution rate of multi cladding layers

在多层熔覆过程中，上层金属液体凝固时会向下层散热，产生反复的热输入，熔覆层的微观组织发生改变。图 7 是多层熔覆时较为典型的微观组织。通过对比图 7 a)、图 7 b)、图 7 c)发现，随着激光功率的增加，熔覆层中部的柱状晶增大，产生此现象的原因是熔覆层吸收的能量增多，液体金属存在时间长，凝固速度减小，导致柱状晶尺寸增大。图 7 d)、图 7 e)、图 7 f)是不同激光功率下熔覆层底部区域的显微组织图。通过对比可以看出，激光功率越大，熔覆层底部的析出物越多，晶粒长大趋势明显[17]。这主要是由于较大的热输入使更多的碳化物析出，同时使凝固速度下降，晶粒长大。由于大量 $M_{23}C_6$ 析出相富集在晶界处，晶界裂纹的敏感性增加。



a）300 W中部　b）350 W中部　c）400 W中部

d）300 W底部　e）350 W底部　f）400 W底部

图 7　不同激光功率下熔覆层不同位置的组织

Fig. 7　Microstructure of the cladding layer at different positions at different laser powers

2.3　激光功率对多层激光熔覆性能的影响

对多层熔覆层的硬度性能进行测试，从图 8 中可以看出，从熔覆层表面到结合层，显微硬度值逐渐上升，从结合层到基体的显微硬度值逐渐下降，直到与基材硬度相当。其中熔覆层表面显微硬度值最低为 210 HV 左右，界面处硬度值最高为 475 HV 左右。界面处硬度最高，是由于结合处基材产生了脱碳现象，更多的 C 元素进入熔覆层，在界面处析出碳化物。随着激光功率的增加，熔覆层硬度增大。这是由于激光功率增大使熔覆层的热输入增多，更容易导致析出物的产生，析出强化的效果增加。

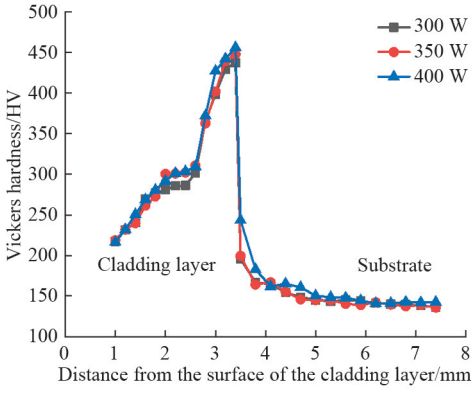
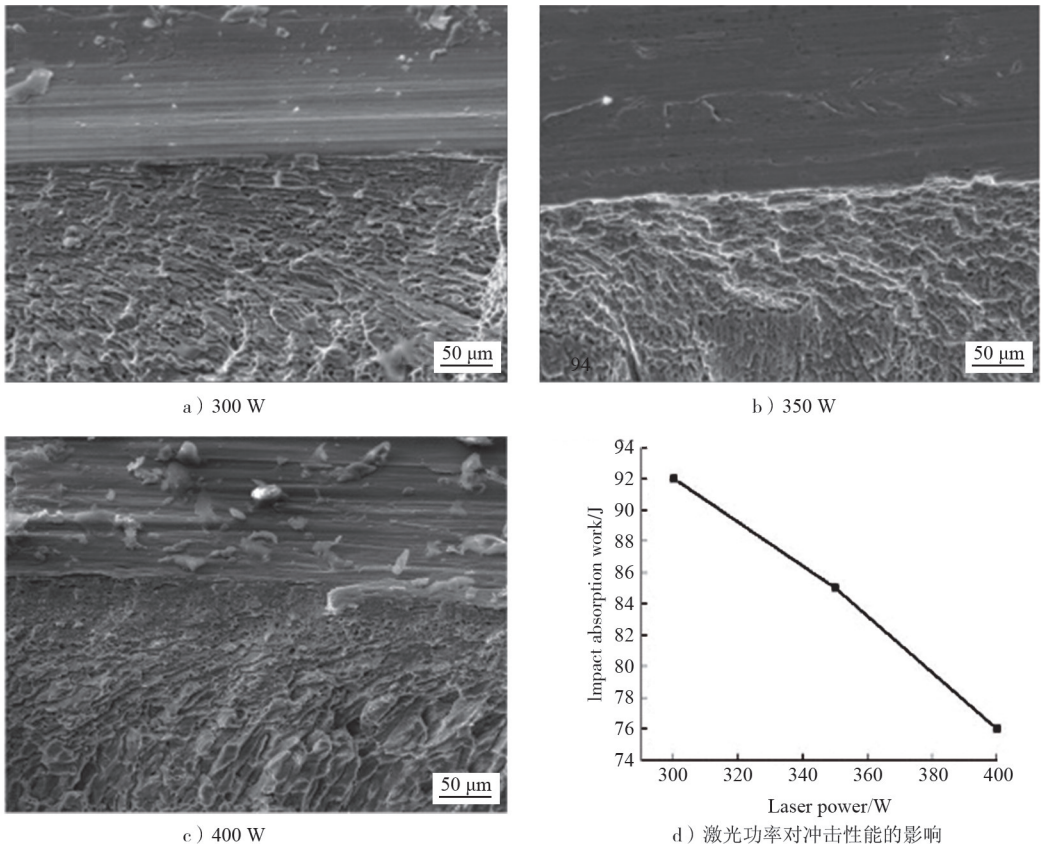


图 8　不同激光功率下多层熔覆层硬度分布

Fig. 8　Hardness distribution of multi laser cladding layers at different laser powers

随着激光功率的增加，不同熔覆层在常温冲击试验结果中所表现出来的冲击功逐渐减小，即脆性增大。300 W 激光功率下制备的熔覆层冲击功最大，为 92 J，如图 9 所示。熔覆层与基体呈现不同的断裂形貌，但并没有发生分层断裂的现象，说明 3 个激光功率参数下制备的激光熔覆层与基材的结合性能很好。由图 9 可知，在 300，350 和 400 W 激光功率时，基材的断口都分布有明显的韧窝，随着激光功率的增加韧窝分布明显减少，解理断裂的特征变得明显，热影响区的韧性下降。而熔覆层都呈撕裂状，属于典型的解理断裂形貌，说明熔覆层的韧性较低，激光熔覆的热作用会使材料的韧性降低。随着激光功率的增加，熔覆层晶粒尺寸变大，熔覆层与基材结合界面附近容易产生晶间裂纹，这在一定程度上降低了冲击性能。

采用恒电位法在 0.5 mol/L 的 NaCl 溶液中，对不同激光功率下制备的熔覆层进行电化学腐蚀性能测试。测量电压范围为－1～1 V，记录其阴极极化曲线。图 10 为不同激光功率实验中的熔覆层表面的阴极极化曲线，腐蚀电位越大，金属的耐腐蚀性越好[18]，金属的腐蚀倾向与腐蚀电位成反比，而金属的腐蚀速率与腐蚀电流密度成正比[19]。随着激光功率的增加，腐蚀电位降低，腐蚀电流密度增加，耐腐蚀性能下降。当激光功率为 300 W 时，腐蚀电位 $E_{corr}=-0.3$ V，腐蚀电流密度 $I_{corr}=0.165$ A/cm^2，腐蚀倾向最小，腐蚀速率最小，具有最优



a）300 W　b）350 W

c）400 W　d）激光功率对冲击性能的影响

图 9　不同激光功率制备的熔覆层冲击断口形貌

Fig. 9　Impact fracture morphology of laser cladding layers at different laser powers

的耐腐蚀性能。激光功率增加，使熔覆层的晶粒长大，316L 不锈钢熔覆层的腐蚀性能会变差[20]。此外，随着激光功率的增加，稀释率的上升使得熔覆层中的 C 含量增加，形成 $M_{23}C_6$ 等 Cr 含量较高的碳化物，晶界处形成贫 Cr 区，耐腐蚀性能下降[21]。而较小的稀释率使得表面更容易形成致密的氧化膜，以减小腐蚀速率[22]。

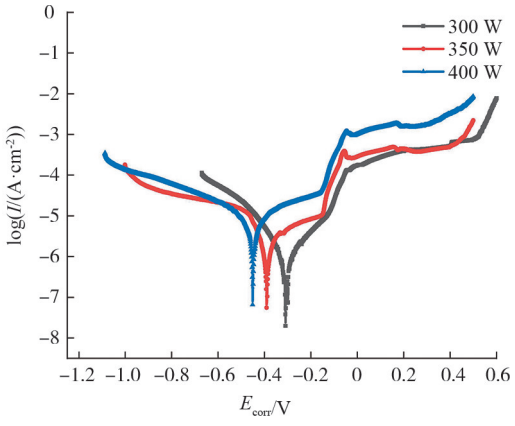


图 10　不同激光功率下熔覆层的极化曲线分布

Fig. 10　Polarization curve distribution of the cladding layers at different laser powers

3　结　语

本文分析了激光功率对单层及多层 316L 熔覆层显微组织的影响，结合力学性能及耐腐蚀性能分析了激光功率变化引起性能改变的根本原因，明确了显微组织变化对性能的影响规律。本文探明了激光功率变化对单层及多层 316L 不锈钢熔覆层成形、组织和性能的影响规律，可为 316L 激光熔覆层的工艺优化及性能调控提供参考。主要结论如下。

1）单层激光熔覆过程中，随着激光功率的增加，熔覆层的高度先增加后减小，熔覆层的组织晶粒尺寸逐渐增大，析出相逐渐增多，硬度值逐渐增大。

2）多层激光熔覆过程中，随着激光功率的增加，熔覆层的高度先增加后减小，熔覆层晶粒尺寸逐渐增大，析出物逐渐增多，界面处熔覆层的晶间裂纹的敏感性增加。熔覆层的硬度值随着激光功率的增加呈现增大的趋势，熔覆层与基材结合界面处硬度最高，为 475 HV 左右。

3）多层激光熔覆过程中，随着激光功率的增加，熔覆层的冲击韧性下降，耐腐蚀性能下降。300 W 激光功率下制备的熔覆层具有最大的冲击韧性，达到 92 J。同时，采用 300 W 激光功率制备的熔覆层腐蚀电位 E_{corr} 最高为−0.3 V，腐蚀电流密度 I_{corr} 最小为 0.165 A/cm^2，即腐蚀倾向最小，腐蚀速率最小，具有最优的

耐腐蚀性能。

尽管得出 300 W 激光功率下制备的熔覆层具有更优性能的结果，但是扫描速度和送粉速率对单层及多层熔覆层的影响行为还有待进一步研究。

参考文献/References：

[1] SHEN Faming，TAO Wang，LI Liqun，et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of coatings by extreme high speed laser cladding[J]. Applied Surface Science，2020，517. DOI：10. 1016/j. apsusc. 2020. 146085.

[2] LI Meiyan，HAN Bin，SONG Lixin，et al. Enhanced surface layers by laser cladding and ion sulfurization processing towards improved wear-resistance and self-lubrication performances[J]. Applied Surface Science，2020，503(15). DOI：10. 1016/j. apsusc. 2019. 144226.

[3] ZHANG Yaocheng，YANG Li，LU Wangzhang，et al. Microstructure and elevated temperature mechanical properties of IN718 alloy fabricated by laser metal deposition[J]. Materials Science and Engineering：A，2020，771. DOI：10. 1016/j. msea. 2019. 138580.

[4] HÜBLER R，COZZA A，MARCONDES T L，et al. Wear and corrosion protection of 316-L femoral implants by deposition of thin films [J]. Surface and Coatings Technology，2001，142/144：1078-1083.

[5] 刘朋，陈志凯，金全明，等. 激光熔覆制备 316L 涂层组织及腐蚀行为研究[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(3)：140-146.
LIU Peng，CHEN Zhikai，JIN Quanming，et al. Microstructure and corrosion behaviors of 316L coating fabricated by laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2020，57(3)：140-146.

[6] 徐瀚宗，葛鸿浩，王杰锋，等. 工艺参数对 316L 不锈钢激光熔覆层中 Cr 元素分布的影响[J]. 中国激光，2020，47(12)：86-95.
XU Hanzong，GE Honghao，WANG Jiefeng，et al. Effects of process parameters upon chromium element distribution in laser-cladded 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers，2020，47(12)：86-95.

[7] KAIN V，CHANDRA K，ADHE K N，et al. Effect of cold work on low-temperature sensitization behaviour of austenitic stainless steels [J]. Journal of Nuclear Materials，2004，334(2/3)：115-132. https：//doi. org/10. 1016/j. jnucmat. 2004. 05. 008

[8] TERADA M，ESCRIBA D M，COSTA I，et al. Investigation on the intergranular corrosion resistance of AISI 316L(N)stainless steel after long time creep testing at 600 ℃[J]. Materials Characterization，2008，59(6)：663-668.

[9] 陈刚，范才河，曾广胜，等. 熔覆层厚度对激光熔覆 316L 涂层组织及性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2018，45(12)：53-58.
CHEN Gang，FAN Caihe，ZENG Guangsheng，et al. Influence of cladding layer thickness on structureand properties of laser cladding 316L coating[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences)，2018，45(12)：53-58.

[10] 咎少平，焦俊科，张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展，2016，53(6)：217-224.
ZAN Shaoping，JIAO Junke，ZHANG Wenwu. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2016，53(6)：217-224.

[11] 叶四友，刘建永，杨伟. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J]. 表面技术，2018，47(3)：48-53.
YE Siyou，LIU Jianyong，YANG Wei. Microstructure and properties of laser cladded 316L stainless steel layer[J]. Surface Technology，2018，47(3)：48-53.

[12] LIU E，HUANG Feifei，BAO Feihu，et al. Microstructure and electrochemical corrosion behaviors of laser-cladded 2205 duplex stainless steel[J]. Steel Research International，2020，91(6). DOI：10. 1002/srin. 201900456.

[13] 邓德伟，常占东，马云波，等. 工艺参数对 316L 激光熔覆层组织性能及残余应力的影响[J]. 应用激光，2021，41(1)：83-88.
DENG Dewei，CHANG Zhandong，MA Yunbo，et al. Influence of process parameters on microstructure and residual stress of 316L laser cladding layer[J]. Applied Laser，2021，41(1)：83-88.

[14] GEDDA H，POWELL J，WAHLSTROM G，et al. Energy redistribution during CO_2 laser cladding[J]. Journal of Laser Applications，2002，14(2)：78-82.

[15] SERGACHEV D V，KOVALEV O B，GRACHEV G N，et al. Diagnostics of powder particle parameters under laser radiation in direct material deposition[J]. Optics & Laser Technology，2020，121. DOI：10. 1016/j. optlastec. 2019. 105842

[16] HUNT J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic[J]. Materials Science and Engineering，1984，65(1)：75-83.

[17] 李朋欢，包燕平，岳峰，等. 异常粗大的奥氏体晶粒对表面晶间裂纹的影响[J]. 北京科技大学学报，2009(sup1)：177-181.
LI Penghuan，BAO Yanping，YUE Feng，et al. Effect of abnormally large prior-austenite grains on the presence of surface intergranular cracks[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2009(sup1)：177-181.

[18] 李新梅，张忠文，魏玉忠，等. HR3C 钢焊接接头的应力腐蚀行为[J]. 热加工工艺，2016，45(5)：236-238.
LI Xinmei，ZHANG Zhongwen，WEI Yuzhong，et al. Research on stress corrosion behavior of HR3C steel welded joint[J]. Hot Working Technology，2016，45(5)：236-238.

[19] 徐泽洲，王志英，何志军，等. 激光功率对激光熔覆 CeO2 改性 316L 涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属，2020，44(3)：281-286.
XU Zezhou，WANG Zhiying，HE Zhijun，et al. Effectoflaserpoweronmicrostructure and properties of laser claddingCeO2modified 316L coating[J]. Chinese Journal of Rare Metals，2020，44(3)：281-286.

[20] 钟晓康，王幸福，韩福生. 316L 不锈钢表面激光熔覆 Stellite-F 合金层的电化学腐蚀行为[J]. 金属热处理，2019，44(1)：176-179.
ZHONG Xiaokang，WANG Xingfu，HAN Fusheng. Electrochemical corrosion behavior of Stellite-F laser cladding layer on surface of 316L stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals，2019，44(1)：176-179.

[21] TENG Lvdan，ZHAO Tiantian，CHENG Tengfei，et al. Microstructure evolution and corrosion behavior of Nb-alloyed cast heat-resistant steel during different aging treatments[J]. Journal of Iron and Steel Research International，2020，27(12)：1456-1465.

[22] 李强，张永忠，李劲风，等. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层的结构与腐蚀性能[J]. 激光技术，2004，28(3)：237-240，270.
LI Qiang，ZHANG Yongzhong，LI Jinfeng，et al. Icrostructure and corrosion performance of laserclad 316L stainless steel coating[J]. Laser Technology，2004，28(3)：237-240.