

光纤激光送丝熔覆修复工艺研究

李凯斌 李东 刘东宇 裴广玉

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

摘要 采用光纤激光器在不锈钢表面进行侧向送丝熔覆修复实验,系统地研究了激光工艺参数对熔覆道形貌影响并确定合适的多道搭接率取值范围,为多道多层送丝激光熔覆修复技术应用提供指导。结果表明:影响熔覆道宏观成形和形貌参数的激光工艺参数主要有激光功率、扫描速度和送丝速度,离焦量的影响相对较小,当激光能量密度为 100 J/mm^2 ,熔丝率为 $39.44 \times 10^{-6} \text{ g/J}$ 时,可得到稳定平滑的熔覆道;合适的搭接率变化范围为 $45\% \sim 53\%$,此时多道单层熔覆层表面平整度在 $100 \mu\text{m}$ 以下。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 激光熔覆修复; 工艺参数

中图分类号 TG142.25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1103006

Research of Fiber Laser Cladding Repairing Process with Wire Feeding

Li Kaibin Li Dong Liu Dongyu Pei Guangyu

(Department of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract Fiber laser cladding repairing is performed on the surface of stainless steel with wire feeding. The effects of laser process parameters on the cladding track geometry are studied. In order to apply on multi-track and multi-layer cladding repairing practice, the best range of overlapping rate is also investigated. The results show that the laser cladding track geometry is mainly attributed to laser power, scanning speed and wire feeding speed, while defocusing distance has relatively small effect on the formation and geometry of cladding track. When the laser energy density is 100 J/mm^2 and the wire fusion rate is $39.44 \times 10^{-6} \text{ g/J}$, the stable and smooth cladding track is obtained. When the overlapping rate varies from 45% to 53% , the values of multi-track single-layer cladding surface smoothness are $100 \mu\text{m}$ or less.

Key words laser technology; fiber lasers; laser cladding repairing; process parameters

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引言

激光熔覆修复技术相比于热喷涂、钨极氩弧焊(TIG 焊)、惰性气体保护焊(MIG 焊)等传统修复技术,具有易与基材成冶金结合、冷却速度快、热影响区小等优点而得到国内外的普遍关注^[1-3]。激光熔覆修复常用的熔覆材料送给方式是同步送粉和同步送丝,目前送粉熔覆由于无方向性影响、可达到极低的稀释率等优点得到广泛应用,但送粉熔覆粉末利用率通常只有 20% 左右,而送丝熔覆丝材利用率几乎为 100% ^[4];同时粉末包中的气体极易在熔覆道里形成

气孔、夹渣等缺陷,提高熔覆道表面粗糙度,成形精度差,而送丝熔覆丝材致密,成形熔覆道无气孔、表面光滑^[5];此外在核电等特殊场合,粉尘污染是不允许存在的,紧急修复时只能采取送丝方式。本课题研究目的正是探究激光熔覆修复在核电方面的应用,为避免核辐射粉尘等问题,综合考虑采用送丝方式。随着激光熔覆技术等不断应用,激光器也得到发展,其中光纤激光器以加工性能好、与金属的耦合效率高、装置简单及成本低等优点而得到人们的青睐^[6-7]。

激光熔覆修复技术的基础是激光熔覆和激光快

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-22

基金项目: 上海市自然科学基金(11ZR1414600)、上海市教委创新项目(11YZ214)

作者简介: 李凯斌(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆修复方面的研究。E-mail: lkbaaa@163.com

导师简介: 李东(1974—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接和激光熔覆修复等方面的研究。

E-mail: lid@sues.edu.cn

速成形,合适的激光工艺参数对熔覆修复效果至关重要。Cottam 等^[8]研究了送粉激光修复 Ti-6Al-4V 基材时工艺参数对组织的影响,指出随着扫描速度减少,热影响区的魏氏组织细化;Unnikrishnan 等^[9]指出随着热输入增加,308L 熔覆层铁素体含量增加、晶粒尺寸变大;朱刚贤等^[10]发现工艺参数对熔覆层表面平整度具有影响,随激光功率增大、送粉量增大及扫描速度减低,单层熔覆层表面的平整程度降低,随载气流量增大,单层熔覆层表面的平整程度先增加后降低;鲁青龙等^[11]研究了扫描速度对激光送粉熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响,指出随着扫描速度的增加,树枝晶细化,外延生长层宽度减小,扫描速度为 400 mm/min 时,熔覆层具有较好的耐磨性能。

上述研究大多集中在送粉激光熔覆工艺优化、工艺对熔覆层组织影响等,其目的主要是改善基材

表面的耐磨性或耐蚀性。目前关于送丝激光熔覆修复工艺优化研究不多,因此本文采用光纤激光器在不锈钢表面进行侧向送丝激光熔覆修复实验,系统地探讨激光工艺参数对熔覆道成形及形貌参数影响,找出最佳单道熔覆工艺参数组合,研究搭接率对多道单层熔覆层表面平整度影响并选出合适的搭接率取值范围,为多道多层激光熔覆修复实践提供数据参考。

2 实验材料与方法

基材为市场上供应的热轧状态 316L 不锈钢板,试样尺寸为 150 mm×60 mm×15 mm。熔覆前基材表面预先用角磨机去氧化层,并用乙醇水溶液进行表面清洗,去除油污后烘干。熔覆材料选用 308L 不锈钢焊丝,直径为 0.8 mm,基材和焊丝化学成分见表 1。

表 1 基材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrate and wire (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
Substrate	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.03	16.0~18.0	2.0~3.0	10.0~14.0	—	Bal.
Wire	0.013	0.48	1.68	0.024	0.001	19.57	0.12	9.55	0.13	Bal.

激光熔覆设备主要由 IPG YLS-5000 光纤激光器、KuKA KR16 机器人和 KempArc Pulse 450 送丝机构组成。激光器的输出激光波长为 1.06 μm,最大功率可达 5000 W,熔覆头光斑大小为 5 mm×5 mm,光斑能量分布均匀,送丝管和保护气管均固定于激光器上。激光熔覆时采用前向送丝,送丝角度为 45°,丝位于光斑中心;后向送气,采用纯度(体积分数)为 99.99% 的 Ar 气,气流量为 10 L/min。熔覆完成后用 KEYENCE Z100 超景深显微镜观察并测量熔覆道宽度、高度和深度,金相腐蚀剂选用 FeCl₃ 盐酸硝酸腐蚀液(含 50 mL HCL, 10 mL HNO₃, 100 mL H₂O, 10 g FeCl₃)。

光纤激光熔覆修复工艺研究过程为通过单因素实验确定激光功率 P 、扫描速度 V_s 、送丝速度 V_w 及离焦量 L 对熔覆道成形及形貌参数的影响,通过激光能量密度和熔丝率找出最佳单道激光熔覆修复工艺参数组合;以表面平整度为评价标准确定合适的多道搭接率取值范围。

3 实验结果及分析

激光熔覆从组织上分熔覆层、热影响区和基材三个部分,熔覆层是基材和丝材在激光能量下熔化凝固形成的,热影响区是熔覆层到基材过渡的区域。

熔覆道横截面形貌如图 1 所示,主要参数包括熔宽(W)、熔高(H)、熔深(D)、熔全高(F),此外形貌参数还有高宽比($a = H/W$)和稀释率($d = D/F$)。高宽比反映熔覆道横向扩展能力,高宽比越小熔覆道横向扩展能力越强;稀释率反映熔覆道纵向扩展能力及基材对熔覆层稀释程度,稀释率越小纵向扩展能力越强,同时基材对熔覆材料稀释程度越低。

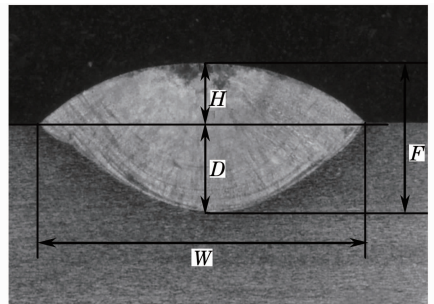


图 1 熔覆道横截面形貌图

Fig. 1 Picture of cross-section cladding track

3.1 工艺参数对熔覆道成形及形貌参数影响

激光熔覆过程是一个复杂的熔化凝固冶金过程,当熔覆材料、基体材料及外界环境确定后,影响熔覆道成形与微观形貌的激光工艺参数主要包括激光功率 P 、扫描速度 V_s 、送丝速度 V_w 和离焦量 L 。图 2 是不同激光工艺参数对熔覆道成形形貌影响,

熔覆道(a)~(d)为不同激光功率下熔覆道的成形情况,激光功率 P 从上到下变化依次是 2000,3000,4000,5000 W,其他参数 $V_s=8$ mm/s, $V_w=40$ mm/s, $L=+6$ mm 不变;熔覆道(e)~(l)为不同扫描速度下熔覆道的成形情况,扫描速度 V_s 从上到下变化依次是 2,4,6,8,10,12,14,16 mm/s,其他参数 $P=4000$ W, $V_w=40$ mm/s, $L=+6$ mm 不变;熔覆道(m)~(r)为不同送丝速度下熔覆道的成形情况,送丝速度 V_w 从上到下变化依次是 20,30,40,50,60,70,80 m/min,其他参数 $P=4000$ W, $V_s=8$ mm/s, $L=+6$ mm 不变;熔覆道(s)~(y)为不同离焦量下熔覆道的成形情况,离焦量 L 从上到下变化依次是 0,+6,+12,+24,+30,+48,+60 mm,其他参数 $P=4000$ W, $V_s=8$ mm/s, $V_w=40$ mm/s 不变。

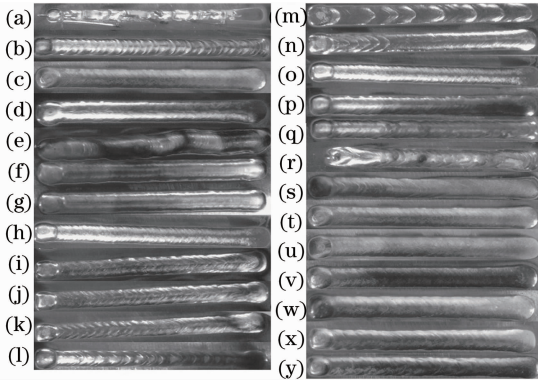


图2 不同激光工艺参数下熔覆道成形形貌

Fig.2 Profile of cladding track under different laser process parameters

激光功率大小直接影响对基材和丝材能量的输入,进而影响熔池形成和丝材熔化。激光功率过小将不能在基材表面形成熔池,如图2熔覆道(a);激光功率过大会造成熔融金属材料过多被基材稀释,熔深过大、熔覆道不饱满。图3是激光功率改变时图2熔覆道(b)~(d)的形貌参数变化,随着激光功率增加,激光能量密度增加,送丝速度不变,熔化基

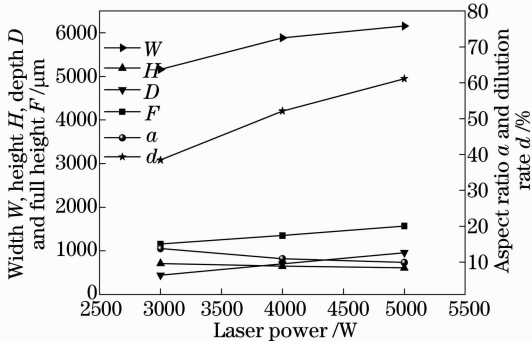


图3 激光功率对熔覆道形貌参数影响

Fig.3 Effect of laser power on cladding track geometry

材能量增加,熔宽、熔深增加,熔高减少,高宽比减少,熔全高增加是因为熔深的增加幅度大于熔高的减少幅度,稀释率增加的原因是熔深增加的比例大于熔全高增加的比例。

扫描速度大小直接影响单位长度内基材和丝材对激光能量的吸收,同时还影响单位长度内进入熔覆道中熔覆材料的质量。扫描速度过小熔覆道熔覆材料过多导致宽度不均匀,熔覆道变形,如图2熔覆道(e);扫描速度过大将使熔覆道不饱满、不连续,甚至不能熔化丝材和形成熔池,形成熔滴过渡,如图2熔覆道(k)、(l)。图4是扫描速度改变时图2熔覆道(e)~(l)的形貌参数变化,随着扫描速度增加,激光能量密度减少,送丝速度不变,造成熔化基材的能量减少同时单位长度内熔覆材料减少,熔宽、熔深、熔高、熔全高减少,高宽比减少的原因是熔高减小的比例大于熔宽减少的比例,稀释率基本不变的原因是熔深和熔全高减少的比例相当。

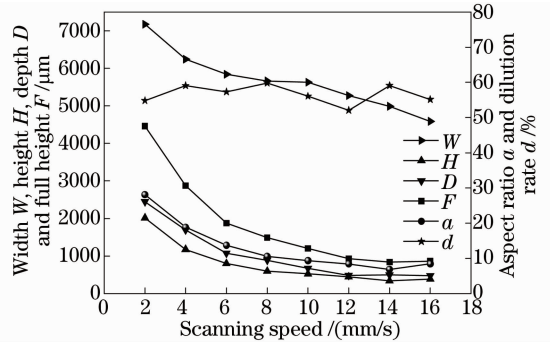


图4 扫描速度对熔覆道形貌参数影响

Fig.4 Effect of scanning speed on cladding track geometry

送丝速度大小直接影响单位时间内丝材对激光能量的吸收,同时也影响熔池中熔覆材料的多少。送丝速度过小将使熔覆道不够饱满、不连续,形成熔滴过渡,如图2熔覆道(m);送丝速度过大熔覆道熔覆材料过多导致高度凹凸不均匀、表面不光滑,甚至

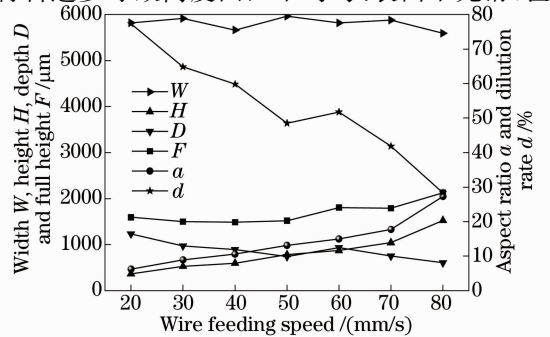


图5 送丝速度对熔覆道形貌参数影响

Fig.5 Effect of wire feeding speed on cladding track geometry

不能完全融化丝材,如图 2 熔覆道(q)、(r)。图 5 是送丝速度改变时图 2 熔覆道(m)~(r)的形貌参数变化,随着送丝速度增加,熔化基材的能量减少同时单位长度内熔覆材料增加,因此熔宽略有减少、熔高增加,高宽比增加,熔深减少,稀释率减少,熔全高增加是因为熔高增加的幅度大于熔深减少的幅度。

离焦量大小影响激光能量密度大小,一般正离焦量越大,光斑越大,激光能量密度越小,母材和焊丝得到的能量越少,熔深会下降,熔宽会增加,熔高会有所下降。但本实验离焦量从 0~+60 mm 变化时,熔覆道都可形成良好熔覆道,如图 2 熔覆道(s)~(y)。离焦量本质是通过改变激光光斑大小影响激光能量密度改变,随着正离焦量的增加,光斑能量密度减少,但实验专用激光熔覆头具有稳定光斑大小作用,离焦量从 +5~+60 mm 变化时光斑基本仍保持 5 mm×5 mm 不变,且激光功率为 4000 W 时能充分熔化母材和焊丝,因此随着离焦量的增大对熔覆道成形和形貌参数影响都不是很大,熔宽略有增加,熔高、高宽比基本不变,熔深、熔全高略有减少,稀释率总体呈下降趋势,如图 6 所示。

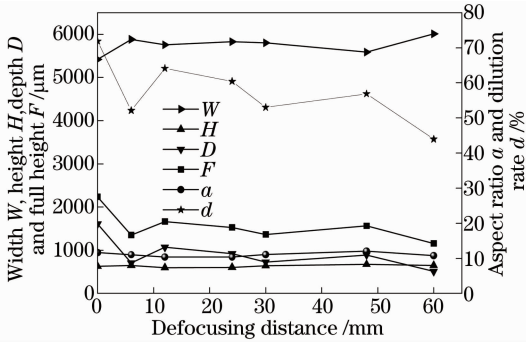


图 6 离焦量对熔覆道形貌参数影响

Fig. 6 Effect of defocusing distance on cladding track geometry

3.2 最佳单道激光熔覆工艺组合

熔覆道形貌参数变化主要是由于激光工艺参数改变造成的,本质上是激光能量密度和送丝速度变化造成的。激光能量密度的数值计算公式为

$$E = \frac{P}{D_1 V}, \quad (1)$$

式中 E 为激光能量密度(单位为 J/mm^2), P 为激光功率(单位为 W), D_1 为垂直于扫描速度方向激光光斑的长度(单位为 mm), V 为扫描速度(单位为 mm/s)。 E 表示熔覆道单位面积上输入的激光辐射能量,这部分能量主要是用来熔化基材和丝材。为了表示单位能量内用来熔化丝材的质量,引入熔丝率 X ,其计算表达式为

$$X = \frac{m}{P} = \frac{v S \rho}{P}, \quad (2)$$

式中 m 为单位时间内送丝质量(单位为 g/s), v 为送丝速度(单位为 mm/s), S 为丝材横截面面积(单位 mm^2), ρ 为丝材的密度(单位 g/mm^3)。熔丝率相比于送丝速度,还涉及到了丝材的密度、横截面面积和激光功率,可以通过激光功率等参数变化改变自身数值,更深刻地揭示了能量与物质相互作用的本质。

实验表明,当不锈钢焊丝密度取 $7.85 \times 10^{-3} g/mm^3$, 经计算激光能量密度 E 为 $100 J/mm^2$ 、熔丝率 X 为 $39.44 \times 10^{-6} g/J$ 时,激光熔覆工艺最为稳定,成形熔覆道形貌如图 7 所示。图 7 中熔覆道的形貌参数见表 2,由表 2 可知,相同的激光能量密度和熔丝率得到的熔覆道形貌参数可能不同,因此激光能量密度和熔丝率主要是用来揭示熔覆过程能量的转换、评价熔覆过程工艺稳定性及成形熔覆道质量的两个物理量。

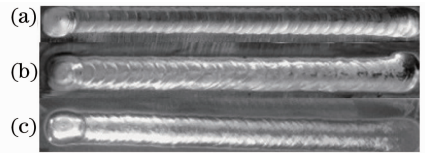


图 7 相同激光能量密度和熔丝率下熔覆道成形形貌
Fig. 7 Profile of cladding track under same laser energy density and wire fusion rate. (a) $P = 2000 W$, $V_s = 4 mm/s$, $V_w = 20 mm/s$, $L = +6 mm$; (b) $P = 3000 W$, $V_s = 6 mm/s$, $V_w = 30 mm/s$, $L = +6 mm$; (c) $P = 4000 W$, $V_s = 8 mm/s$, $V_w = 40 mm/s$, $L = +6 mm$

表 2 相同激光能量密度和熔丝率下熔覆道形貌参数

Table 2 Morphology parameters of cladding track under same laser energy density and wire fuse rate

	Width / μm	Height / μm	Depth / μm	Full height / μm	Aspect ratio / %	Dilution ratio / %
(a)	4225.53	889.61	292.28	1181.89	21.05	24.73
(b)	5363.46	673.54	597.29	1270.83	12.56	47.00
(c)	5883.96	648.13	705.31	1353.45	11.02	52.11

3.3 多道搭接率对表面平整度影响

由于受到激光功率、光斑尺寸、扫描速度和送丝

速度的限制,单道熔覆的宽度十分有限,限制了其工业应用。对于大面积激光熔覆,必须采用多道搭接

技术,使熔覆的每道之间按一定的比例交叠,以实现熔覆层宽度的增加。多道搭接率 Φ 大小直接关系到激光熔覆修复能否顺利进行,合适的搭接率取值范围能够保证多道单层熔覆层表面平整,使多层熔覆修复时节省表面加工时间,提高工作效率。搭接率 Φ 表示为

$$\Phi = \frac{l}{W}, \quad (3)$$

式中 l 为相邻两熔覆道搭接长度(单位为 mm), W 为单道熔覆时熔覆道宽度(单位为 mm)。实验中采用单道激光熔覆工艺参数 $P=3000$ W, $V_s=6$ mm/s, $V_w=30$ mm/s, $L=+6$ mm 进行研究。图 8 为多道单层熔覆层不同搭接率下的宏观成形形貌,由图可知,多道搭接熔覆层表面无裂纹、夹渣等宏观缺陷,良好的工艺可以使熔覆道表面光滑、无波纹存在。

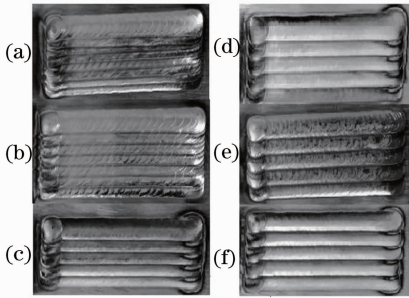


图 8 不同搭接率下多道单层熔覆层成形形貌

Fig. 8 Profile of multi-track single-layer cladding under different overlapping rates. (a) $\Phi=62.71\%$; (b) $\Phi=53.39\%$; (c) $\Phi=44.07\%$; (d) $\Phi=34.74\%$; (e) $\Phi=25.42\%$; (f) $\Phi=16.1\%$

图 9 为搭接率从大到小变化时多道单层熔覆层的横截面形貌,由图可知,熔覆层与基材成良好的冶金结合,组织致密无缺陷。由图9还可看出搭接率

过大会造成熔覆道多余金属堆积,同时离焦量、送丝位置等也会发生变化,不利于熔覆继续稳定进行,如图 9(a) 所示;搭接率过小则多道搭接熔覆层表面峰谷起伏变大,如图 9(e) 和 (f) 所示。由于多道搭接熔覆层表面起伏程度超出表面粗糙度测量范围,为得到合适的搭接率范围,需对熔覆层表面平整度进行测定。

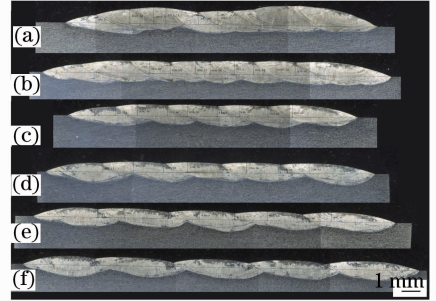


图 9 不同搭接率下多道单层熔覆层横截面形貌

Fig. 9 Cross-section of the multi-track single-layer cladding under different overlapping rates. (a) $\Phi=62.71\%$; (b) $\Phi=53.39\%$; (c) $\Phi=44.07\%$; (d) $\Phi=34.74\%$; (e) $\Phi=25.42\%$; (f) $\Phi=16.1\%$

表面平整度 S 是反映工件表面平整程度的物理量,这里指熔覆道最高点 F_m 和最低点 G_m 的差值,数值越小表明熔覆层表面越平整^[10]。对图 9 中不同熔覆道最高点和最低点测量并选取 3 组计算表面平整度 S_1, S_2, S_3 ,取其平均值作为此搭接率下的表面平整度 S ,结果如表 3 所示。由表 3 可知,当搭接率从 62.71% 到 16.1% 变化时,熔覆层的表面平整度数值先快速降低后缓慢升高,53.39% 时数值最小为 66.21 μm 。由于表面平整度随搭接率变化是连续的,若以表面平整度 100 μm 以下为合格标准,则搭接率从 45% 到 53% 变化时可满足要求。

表 3 不同搭接率下表面平整度数值

Table 3 Surface smoothness values of different overlapping rates

	$\Phi/\%$	$F_{m1}/\mu\text{m}$	$G_{m1}/\mu\text{m}$	$S_1/\mu\text{m}$	$F_{m2}/\mu\text{m}$	$G_{m2}/\mu\text{m}$	$S_2/\mu\text{m}$	$F_{m3}/\mu\text{m}$	$G_{m3}/\mu\text{m}$	$S_3/\mu\text{m}$	$S/\mu\text{m}$
(a)	62.71	1203.3	1027.58	175.72	1172.74	893.88	278.86	1012.3	893.88	118.42	191
(b)	53.39	939.72	909.16	30.56	993.2	924.44	68.76	1035.22	935.9	99.32	66.21
(c)	44.07	851.86	775.46	76.4	848.04	744.9	103.14	890.06	760.18	129.88	103.14
(d)	34.74	756.36	637.94	118.42	756.36	630.3	126.06	729.62	626.48	103.14	115.87
(e)	25.42	649.4	458.4	191	660.86	477.5	183.36	687.6	488.96	198.64	191
(f)	16.1	592.1	309.42	282.68	592.1	351.44	240.66	615.02	351.44	263.58	262.31

4 结 论

1) 在本文研究条件下,影响熔覆道成形和形貌参数的主要因素是激光功率、扫描速度和送丝速度,激光焦距的影响相对不大。单因素变化时,随着激

光功率增加,熔高、高宽比减少,熔宽、熔深、熔全高、稀释率都增加;随着扫描速度增加,熔宽、熔高、熔深、熔全高、高宽比均减少,稀释率基本不变;随着送丝速度增加,熔宽略有减少,熔深、稀释率减少,熔

高、熔全高、高宽比增加；随着离焦量增加，熔宽略有增加，熔高、高宽比基本不变，熔深、熔全高略有减少，稀释率呈下降趋势。

2) 可以通过激光能量密度和熔丝率来评价最佳单道熔覆修复工艺组合。实验中激光能量密度为 100 J/mm^2 ，熔丝率为 $39.44 \times 10^{-6} \text{ g/J}$ 时，激光熔覆修复工艺过程稳定，可得到光滑饱满的熔覆道。

3) 熔覆层与基材成良好的冶金结合，组织致密无缺陷。当搭接率从 62.71% 减少到 16.1% 时，多道单层熔覆层表面平整度先降低后升高，53.39% 时数值最小为 $66.21 \mu\text{m}$ 。合适的搭接率范围为 45% 到 53%，此时多道单层熔覆层表面平整度在 $100 \mu\text{m}$ 以下。

参 考 文 献

- Xu Qingdong, Lin Xin, Song Menghua, *et al.*. Microstructure of heat-affected zone of laser forming repaired 2Cr13 stainless steel [J]. *Acta Metall Sinica*, 2013, 49(5): 605–613.
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.
- B Graf, A Gumenyuk, M Rethmeier. Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 376–381.
- B Bax, M Schäfer, C Pauly, *et al.*. Coating and prototyping of single-phase iron aluminide by laser cladding [J]. *Surf Coat Technol*, 2013, 235: 773–777.
- Shi Shihong, Fu Geyan, Li Long, *et al.*. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 266–270.
石世宏, 傅戈雁, 李龙, 等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 266–270.
- T E Abioye, J Folkes, A T Clare. A parametric study of inconel 625 wire laser deposition [J]. *J Mater Process Technol*, 2013, 213(12): 2145–2151.
- F Lusquiños, R Comesaña, A. Riveiro, *et al.*. Fibre laser micro-cladding of Co-based alloys on stainless steel [J]. *Surf Coat Technol*, 2009, 203(14): 1933–1940.
- J del Val, R Comesaña, F. Lusquiños, *et al.*. Laser cladding of Co-based superalloy coatings: Comparative study between Nd:YAG laser and fibre laser [J]. *Surf Coat Technol*, 2010, 204(12-13): 1957–1961.
- R Cottam, M Brandt. Laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate: effect of laser cladding parameters on microstructure [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 323–329.
- R Unnikrishnan, K S N Satish Idury, T P Ismail, *et al.*. Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments [J]. *Mater Charact*, 2014, 93: 10–23.
- Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 296–301.
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): 296–301.
- Lu Qinglong, Wang Yanfang, Li Li, *et al.*. Effects of scanning speed on microstructures and properties of laser cladding Fe-based amorphous composite coatings [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0203007.
鲁青龙, 王彦芳, 栗荔, 等. 扫描速度对激光熔覆铁基非晶复合涂层组织与性能的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203007.

栏目编辑: 王晓球