

激光增材再制造 20G/Inconel625 复合板工艺研究

王进才¹ 霍晓阳¹ 李 雷² 樊贝贝¹ 米国发¹
(1.河南理工大学材料科学与工程学院; 2.上海电机学院材料学院)

摘 要 采用激光增材再制造技术,在垃圾焚烧锅炉水冷壁钢板表面激光熔覆一层 Inconel625 合金覆层,形成 20G/Inconel625 复合材料,研究了激光功率对 Inconel625 合金复合层稀释率、宏观形貌、微观组织和硬度的影响。结果表明,采用双层激光熔覆方式,底层和面层的功率为 5 000 W,扫描速度为 5 000 mm/min,送粉速率为 40.3 g/min,搭接率为 60%时,复合层 Fe 稀释率低于 5%,表面平整、无气孔。复合层结合区的组织主要是胞状枝晶和次生枝晶,层间重熔区主要是柱状晶,柱状晶周围分布着网状二次枝晶,面层一次熔化区主要是等轴晶。

关键词 激光增材再制造;水冷壁;显微组织;稀释率;气孔

中图分类号 TG456.7 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Parameters Analysis of Laser Additive Remanufacturing 20G/Inconel625 Composite Plate

Wang Jincail¹, Huo Xiaoyang¹, Li Lei², Fan Beibei¹, Mi Guofa¹
(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University;
2.Institute of Materials, Shanghai Dianji University)

Abstract: A layer of nickel-based superalloy Inconel625 was cladded on the surface of the water wall steel plate of waste incineration boiler by laser additive remanufacturing to fabricate 20G/Inconel625 composite. The effects of laser power on the dilution rate, macroscopic morphology, microstructure and hardness of Inconel625 alloy composite layer were investigated. The results indicate that with the power of the bottom layer and the surface layer of 5 000 W, the scanning speed of 5 000 mm/min, the powder feeding rate of 40.3 g/min, and the lap rate of 60%, the Fe dilution rate of the composite layer is less than 5%, and the surface is smooth with absence of pores. The structure of bonding zone in the composite layer is characterized by cellular dendrite and secondary dendrites, while that of interlayer remelting zone is columnar grain, which is surrounded by network secondary dendrites, and that of primary melting zone in the surface layer presents equiaxed grain.

Key Words: Laser Additive Remanufacturing, Water Wall, Microstructure, Dilution Rate, Pore

收稿日期:2021-07-26;修改稿收到日期:2021-08-21

基金项目:上海市科委“科技创新行动计划”重大专项基金资助项目(19511105402)

第一作者简介:王进才,男,1996 年出生,硕士研究生,河南焦作(454003),E-mail:1933625054@qq.com

通信作者:李雷,男,1975 年出生,教授,上海(200240),E-mail:lilei1975@163.com

引用格式:王进才,霍晓阳,李雷,等. 激光增材再制造 20G/Inconel625 复合板工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):99-103.

WANG J C, HUO X Y, LI L, et al. Parameters analysis of laser additive remanufacturing 20G/Inconel625 composite plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):99-103.

[15] GEORGE J. Waffle cast iron cylinder liner[P].US:US6123052A. 1999-08-15.

[16] ODA T, NOZAWA T, KOYAMA K. Cylinder liner and cylinder block[P]. US: US20060156917A1. 2007-06-23.

[17] SPRINGER H, KOSTKA A, PAYTON E J, et al. On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(4): 1 586-1600.

[18] KATTNER U R, BURTON B P. ASM Handbook Vol. 3: Alloy Phase Diagrams[M]. ASM International: THE Materials Information Company, 1992.

[19] LEMMENS B, SPRINGER H, DE GRAEVE I, et al. Effect of silicon on the microstructure and growth kinetics of intermetallic phases formed during hot-dip aluminizing of ferritic steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319: 104-109.

[20] LEMMENS B, SPRINGER H, DE GRAEVE I, et al. Effect of silicon on the microstructure and growth kinetics of intermetallic phases formed during hot-dip aluminizing of ferritic steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319: 104-109.

[21] DANGI B, BROWN T W, KULKAMI K N. Effect of silicon, manganese and nickel present in iron on the intermetallic growth at iron-aluminum alloy interface[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 769: 777-787.

(编辑:刘卫)

近年来,垃圾焚烧发电厂改变了传统的垃圾填埋处理方式,既能处理垃圾,又能发电。垃圾焚烧时产生的烟气与火力发电不同,含有大量的氯化物和硫化物,对锅炉管排的腐蚀远大于火力发电,常造成锅炉泄露等事故^[1,2]。为了提高锅炉管排的使用寿命,一般采用 TIG/MIG 堆焊的方法在水冷壁外表面堆焊一层高耐腐蚀的 Inconel625 镍基合金^[3~8],堆焊层中 Fe 稀释率高,达到 5%~15%,且呈梯度分布,会大幅度降低 Inconel625 合金的高温耐腐蚀性,且堆焊法热影响区大,残余应力大,易造成管排翘曲变形。

激光增材再制造也称为激光熔覆,可显著改善基体材料表面的抗磨损、耐腐蚀、耐高温、抗氧化等性能^[9,10]。激光增材再制造的研究主要有 ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢与 Inconel625 复合层的制备^[11]和 Ni625 与 WC 复合涂层的制备^[12]。由于再制造层材料具有较大的选择自由度,不一定与基体材料一致,可根据实际需求选择具有特殊功能的覆层材料,从而使原先单一材质的零部件成为功能梯度复合材料,具有稀释率低、晶粒细小、组织致密、成形精度高等特点^[13,14]。研究表明,激光功率与速度不匹配时,会在复合层内产生气孔^[15]。但激光功率过高,会导致稀释率过高,而激光功率过小,会导致假焊,即熔覆层与基材之间未形成冶金结合。

本课题研究了在高压锅炉钢表面激光涂覆 Inconel625 合金,制备 20G/Inconel625 镍基复合材料,讨论了激光功率对稀释率、界面结合、气孔、显微组织及硬度的影响,以确保复合层中的 Fe 稀释率低于 5%,且复合层与基体形成冶金结合,同时无气孔,为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与设备

采用 Laserline 公司 6000W 型激光器在 20G 钢板表面激光涂覆 Inconel625 合金,钢板尺寸为 200 mm×150 mm×12 mm,Inconel625 合金粉末粒径为 100~270 目,其化学成分见表 1。

表 1 Inconel625 镍基合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Inconel625 Ni-base

alloy powder										%
w_B										
C	Cr	Si	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	P	S	Ni
0.025	21.25	0.31	1.29	9.18	3.55	0.33	0.33	0.008	0.008	余量

1.2 试验方法

对 20 号高压锅炉钢板表面进行打磨抛光去除氧化

铁皮,用体积分数为 75% 的酒精擦洗。将 Inconel625 合金粉末置于真空干燥箱内,在 140 ℃ 下保温 2 h 烘干。采用旁轴气动送粉法进行激光再制造,送粉气体为 99.99% 的高纯氩气,氩气也作为熔池保护气。采用压缩空气作为激光镜头的保护气,防止熔覆过程中粉末飞溅,并对镜片降温。激光再制造工艺参数包括光斑直径、激光功率、扫描速度、送粉速率和搭接率,激光器焦距 $W_{DH}=374$ mm,光斑直径为 5.3 mm,扫描速度为 5 000 mm/min,送粉速率为 40.3 g/min,搭接率为 60%,研究激光功率分别为 6 000、5 500、5 000 和 4 500 W 时对稀释率、复合层与基体之间的界面结合、气孔、硬度和显微组织的影响。

单层激光再制造复合层厚度一般为 0.5 mm 左右,而垃圾焚烧水冷壁耐蚀层厚度要求在 1 mm 左右,此外,采用了双层再制造工艺,即首先熔覆 0.5 mm 底层,再熔覆 0.5 mm 厚的面层,获得 1.0 mm 厚的熔覆层。

激光再制造后进行着色探伤,探明复合层表面是否存在气孔、裂纹等缺陷。然后利用线切割沿垂直于激光头运动方向截取试样,得到包括基材在内的 10 mm×10 mm×13 mm 的试样,试样打磨抛光后,采用 10 g 的 $CuSO_4+80$ mL 的 $HCl+40$ mL 的乙醇溶液对界面结合区进行腐蚀,用扫描电镜观察;利用王水 $[\varphi(HCl):\varphi(HNO_3)=3:1]$ 溶液对整个横截面进行腐蚀,用 LEICA DM4000 MLED 型高温金相显微镜观察复合层的一次熔化区、层间重熔区、结合区组织。利用 Elcometer456 涂层厚度测试仪测量复合层的厚度。用 HXD-1000TMC/LCD 显微硬度计测量显微硬度,载荷为 200 N,保压时间为 10 s。利用 HITACHI S3400N 型钨灯丝扫描电镜测试试样中 Fe 稀释率。

2 试验结果与分析

2.1 激光功率对复合层厚度及宏观形貌的影响

生产中 Inconel625 合金复合层厚度过大则浪费材料,厚度过薄则耐腐蚀层薄,而在送粉速率恒定的情况下,复合层厚度主要与激光功率有关。激光功率与复合层厚度之间的关系见图 1。可以看出,复合层单层的厚度随着激光功率的增加呈现上升的趋势,这是因为随着热输入增加,熔池的面积变大,粉末的熔化量增加,进入熔池的粉末体积也增大,因此复合层的厚度逐渐增大。但复合层厚度的增加趋势会逐渐减弱,这是因为在粉末一定的情况下,继续增大功率,最大熔化的粉末量一定。

图 2 为不同功率下复合层单层时的表面形貌。可以看出,在 6 000 W 和 5 500 W 下复合层表面有很多气孔,这是由于熔覆功率大,温度过高,气化金属量增多,

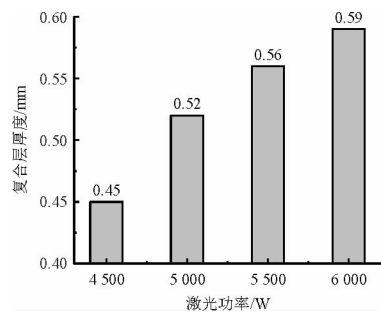


图1 在激光速度为 5 m/min,送粉量为 40.3 g/min, 搭接率为 60% 下不同激光功率的复合层厚度

Fig.1 Thickness of compound layer at different laser power with rate of 5 m/min, powder feeding rate of 40.3 g/min and lap rate of 60%

导致气孔增多。此外,在激光功率高、且扫描速度较低时,会因匙孔尖端失稳而形成气孔、匙孔针状根部释放冲击波而发射气孔^[15]。因此,在扫描速度一定时,功率过高会产生气孔。在功率较低时,复合层表面未形成气孔,见图 2c 和图 2d。

图 3 为加工两层后的表面形貌。去除表面的氧化皮和氧化颗粒,并用着色渗透探伤剂进行探伤,结果显示,在 6 000 W 和 5 500 W 时表面仍然产生气孔,见图 3a 和图 3b,而在 4 500 W 时,出现部分粉末未熔透现象,尤其是在起光位置会由于未熔透而产生气孔,见图 3d。在 5 000 W 时表面没有气孔,较光洁平整,见图 3c。综合单层和双层再制造结果,激光功率为 5 000 W

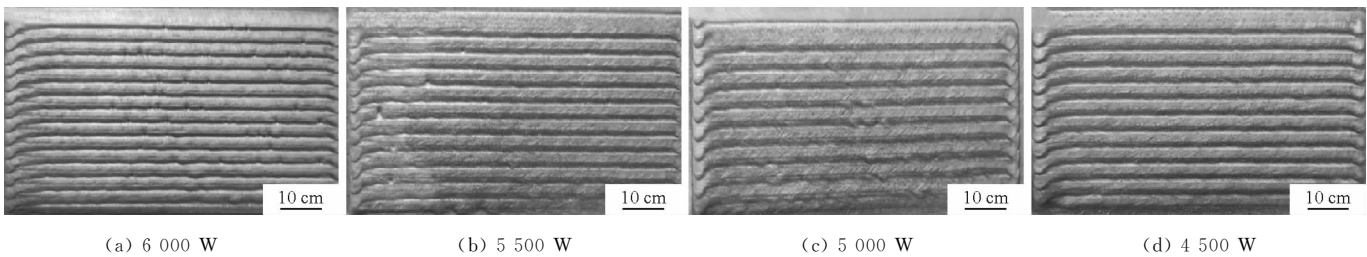


图2 不同激光功率下再制造单层时的宏观形貌

Fig.2 The macro morphology of remanufactured monolayer under different laser power

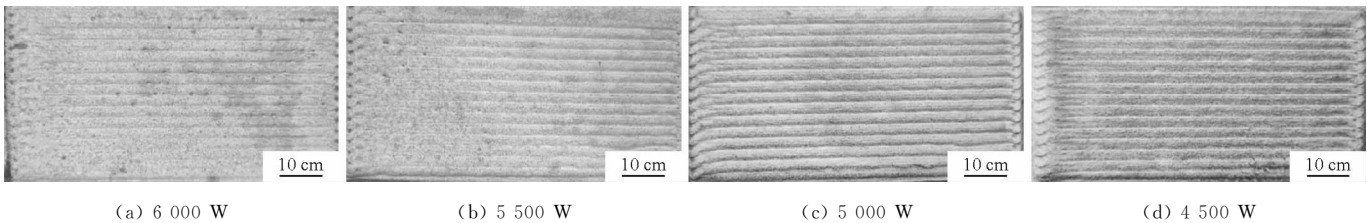


图3 不同激光功率下双层再制造的探伤结果

Fig.3 Flaw detection results of double layer remanufacturing under different laser power

与扫描速度匹配较好,再制造表面均无气孔。

2.2 显微组织特征分析

不同功率下复合层与基体之间结合面的显微组织见图 4。可以看出,复合层与基体之间的熔合线下方钢基体产生了过腐蚀。随着功率降低,晶粒尺寸细化,晶

粒的宽度尺寸由 6 000 W 时的 3.5 μm 逐渐细化到 4 500 W 时的 2 μm 左右。在 5 000 W 功率腐蚀较浅时,复合层结合处的金相组织见图 5。从结合处可看出,左边区域有较亮的组织延伸生长到右边基材中,表明结合处 Inconel625 合金和基体晶粒熔合生长,形成了

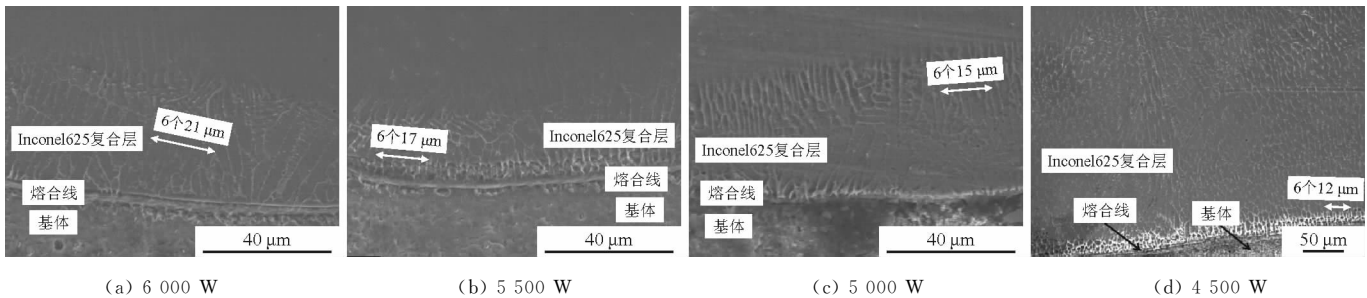


图4 不同功率下 20G/Inconel625 复合材料复合层与基体之间结合界面显微组织

Fig.4 Microstructure of bonding interface between 20G/Inconel625 compound layer and matrix under different power

冶金结合。

复合层的显微组织。可以看出,复合层内部无气孔、裂纹等缺陷,组织致密。结合区的组织是胞状晶,见图

图 6 是在功率为 5 000 W 时 Inconel625 合金双层

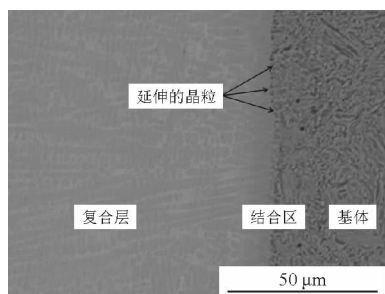


图 5 功率为 5 000 W 时熔合线两端复合层与基体之间的晶粒
Fig.5 The grains between compound layer and matrix at both ends of the fusion line at 5 000 W

6b,粉末和基体被熔化之后,粉末与熔化的基材形成液相,组织间的元素相互扩散随着凝固速率增大,形成成分过冷区,在结合位置临近熔覆层处产生胞状晶,晶粒较小,分布均匀。层间重熔区的微观组织形貌见图 6c,在结合处上方,柱状晶按一定角度贯穿整个复合层,其生长方向与激光扫描方向有关。随着激光头的移动,材料表面熔化形成熔池,在熔池中,晶粒在过冷度较大处开始形核长大,随着热量变化的方向逐渐生长,其生长

方向与水平方向呈一定角度,晶粒生长方向与复合层内部热量传输方向相反。由于已经凝固的金属受到激光的二次辐照的影响,引起层间重熔区的显微组织明显粗大、拉长,晶粒尺寸由原来的 $16\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $30\text{ }\mu\text{m}$ 左右,且在柱状晶周围分布着网状二次枝晶。这是因为两次再制造,形成沉积层,先成形复合层在激光的热作用下,该层经历激光重熔处理,重新熔化再凝固,复合层中本身就存有大量热量,再经过新热量的连续输入,使晶粒发生再结晶,生成网状树枝晶。面层一次熔化区的组织见图 6d,因为在制备复合层时,激光头往复运动,同一区域热量分布不均匀,温度梯度也不断变化,先成形复合层经过与空气热对流,温度梯度降低,凝固速率升高,有利于等轴晶的形成。故柱状晶与二次网状枝晶在温度的变化下,转化为等轴晶。当经过激光的热效应,该层重新熔化,晶粒重新经历形核、长大的过程。后成形的复合层重复经过该过程,试样最上层位置与保护氩气充分接触,能与保护氩气进行充分热交换,冷却速率快,形成较宽的等轴晶区域,在试样下端与中间部分几

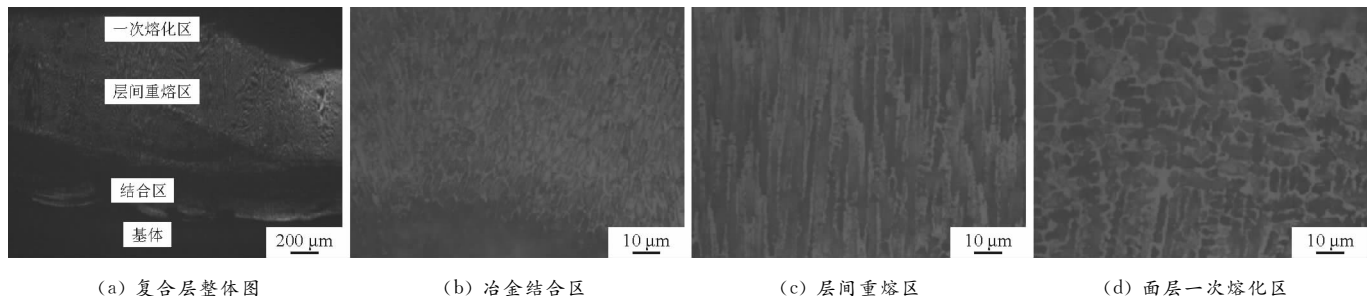


图 6 在 5 000 W 功率下双层再制造复合层的显微组织

Fig.6 Microstructure of double-layer remanufactured compound layer at 5 000 W

乎观察不到该区域。

2.3 显微硬度分布

自复合层顶部向下每隔 $150\text{ }\mu\text{m}$ 测量维氏硬度,共测量 10 个点,测量点包含一次熔化区、层间重熔区、冶

金结合区和基材,硬度分布见图 7。可以看出,复合层的平均硬度(HV)约为 250,在功率为 5 000 W 时平均值约为 280;在层间重熔区,同一功率下的硬度值下降,其原因是激光的二次辐照导致层间重熔区晶粒受热长

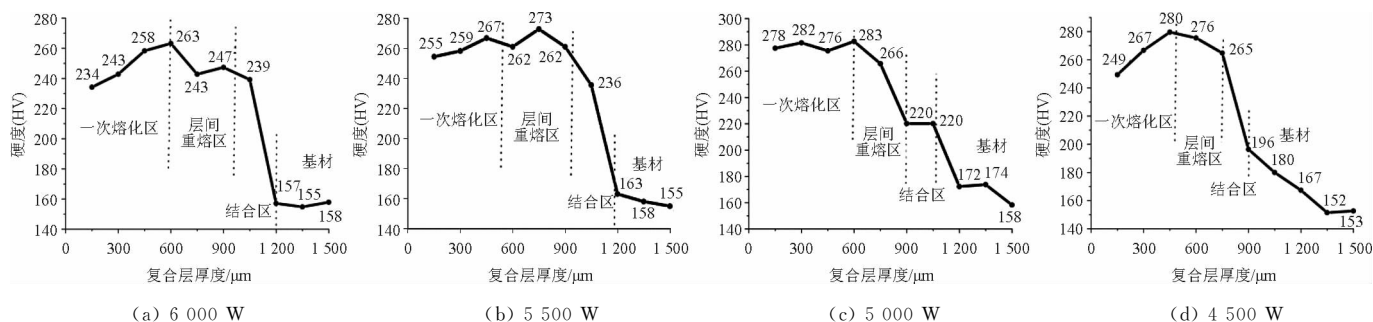


图 7 双层再制造复合层显微硬度

Fig.7 Microhardness of double-layer remanufactured compound layer

大,组织粗化,底部区域由于基材的熔入,硬度值较低。这表明,在复合层中存在显微组织不均匀和力学性能不均匀的现象。

2.4 复合层中 Fe 稀释率

双层再制造时 Fe 的稀释率见图 9。Fe 的稀释率受功率影响较大。当功率为 6 000 W 时,复合层中 Fe

含量较高,大部分区域超过了 5%。Inconel625 合金中的 Fe 含量须小于 5%,超此范围,耐腐蚀性能大幅度下降。当功率为 5 500 W 和 5 000 W 时,复合层在 800 μm 以前,见图 8b 和 8c,Fe 含量在 5% 以下;复合层大于 800 μm 后,Fe 含量逐渐提高,有 200~300 μm 厚的区间 Fe 含量在 20% 左右,这是复合层与基材的冶金结

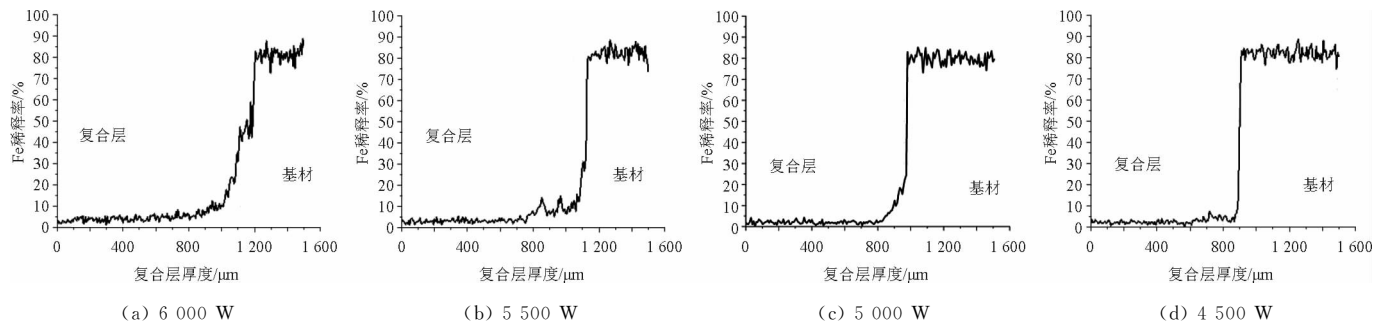


图 8 双层复合层中 Fe 元素的稀释率

Fig.8 Dilution rate of Fe in double compound layer

3 结 论

(1)20G/Inconel625 复合材料的再制造在光斑尺寸、送粉量、扫描速度、搭接量率确定的情况下,复合层的厚度和表面状态受激光功率的影响明显。复合层厚度随着激光功率的增加呈现上升的趋势,功率大于 5 500 W 时复合层表面出现气孔,低于 4 500 W 时出现未熔透现象,功率为 5 000 W 时表面光洁平整、无气孔。

(2)20G/Inconel625 复合材料采用双层再制造工艺,可控制复合层中 Fe 稀释率低于 5%,复合层的组织主要分为 3 区域,结合区的组织主要是胞状枝晶结构和次生枝晶,层间重熔区的组织主要是柱状晶,且柱状晶周围分布着网状二次枝晶,面层一次熔化区的组织主要是较宽的等轴晶。

(3)在激光功率为 5 000 W 时,20G/Inconel625 复合材料复合层与基体形成了冶金结合,此时硬度较高,且复合层不同区域的硬度不同,面层一次熔化区的平均硬度(HV)约为 280,层间重熔区的硬度约为 240,结合区硬度最低,约为 220。

(4)20G/Inconel625 复合材料在激光功率为 5 000 W 时,复合层中 Fe 稀释率低于 5%,分布均匀,满足了 Inconel625 合金要求 Fe 含量低于 5% 的要求,并形成冶金结合,保证了复合层耐蚀性能。

参 考 文 献

[1] OTERO E, PARDO A, PÉREZ F J, et al. High temperature corrosion in waste incinerators due to deposits of molten chlorides[J]. Materials Science Forum, 1997, 251-254: 519-526.
[2] 胡桂平,王树炎,徐滨士.绿色再制造工程及其在我国应用的前景

合区。将基材中的 Fe 熔入复合层底部,这也证明了复合层与基体形成了冶金结合。功率为 4 500 W 时,见图 8d,复合层中 Fe 含量小于 5%,但复合层的厚度只有 0.9 mm,且复合层中 Fe 含量的变化是瞬时变化,从 5% 左右直接跳跃到 85%,没有过渡区域,表明了复合层与基体可能形成假焊,未形成冶金结合。

[J].水利电力机械, 2001, 23(6): 33-35.

[3] 孙宁,方艳,张家奇,等.WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响[J].中国激光, 2021, 48(6): 93-102.
[4] KIM M J, SALDANA C. Thin wall deposition of IN625 using directed energy deposition-Science Direct[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1 366-1 373.
[5] MOHAMMADIAN N, TURENNE S, BRAILOVSKI V. Electro-polishing of laser powder bed-fused IN625 components in an ionic electrolyte[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(4): 86-90.
[6] 张敏.焊接工艺对镍基堆焊层组织及性能的影响[J].压力容器, 2018, 35(12): 69-73.
[7] 孙焕焕,刘爱国,孟凡玲.堆焊 Inconel625 合金的锅炉膜式水冷壁组织和性能[J].材料热处理学报, 2013, 34(S2): 96-99.
[8] 张伟,宋元才,张建晓,等.热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J].压力容器, 2020, 37(5): 13-17.
[9] 刘珍峰,李正佳.激光熔覆技术在航空工业中的应用[J].航空精密制造技术, 2007, 43(1): 37-40.
[10] 曹力,赵坚,陈小明,等.水轮机纳米 WC 抗磨蚀陶瓷涂层性能研究及应用[J].水力发电, 2017, 43(8): 80-83.
[11] 李艳鹏,温海骏.In625 镍基合金粉末激光熔覆参数研究[J].粉末冶金技术, 2021, 39(2): 153-158.
[12] 王书文,廖玉红,王腾迪.激光熔覆 Ni625/WC 涂层的减振降噪和摩擦磨损性能[J].中国表面工程, 2021, 34(2): 94-103.
[13] 杜学芸,许金宝,宋健.激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J].表面工程与再制造, 2020, 20(6): 18-22.
[14] 江吉彬,练国富,许明三.激光熔覆技术研究现状及趋势[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(1): 27-36.
[15] ZHAO C, PARAB N D, LI X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6 520): 1 080-1 086.

(编辑:刘卫)