

异质金属熔覆搭接率对 Ni60A 熔覆层显微组织影响

詹 欢, 李 涛*, 邓林辉, 石非凡

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用半导体激光器在 45 钢基体上熔覆 Ni60A 材料来制作镍基合金涂层的实验方法, 研究了熔覆层内部显微组织、物相成分及显微硬度随着搭接率的变化规律, 根据实验结果选择合适的搭接率以满足性能要求。结果表明, 在搭接率为 20%、30%、40% 及 50% 时, 随着搭接率的增大, 熔覆层搭接区底部组织晶粒逐渐增大, 中上部组织晶粒逐渐减小; 熔覆层主要物相为 γ -Ni 固溶体相, 还有大量的铬硼化物、碳化物等硬质强化相, 并且当搭接率从 20% 逐渐增大到 30% 时, 主要物相成分逐渐增多, 搭接率从 30% 增大到 50% 时主要物相成分有所减少; 熔覆层的显微硬度变化规律大致与物相成分变化规律相同, 同样是在搭接率从 20% 增大到 30% 时逐渐增大, 在搭接率为 20% 时显微硬度最低, 在搭接率为 30% 时显微硬度最大, 为 700 HV, 随后当搭接率增大到 50% 时显微硬度降低至 665 HV。根据熔覆层的性能要求, 显微硬度要高, 组织晶粒要细小均匀, 在仅考虑搭接率的变化时, 综合分析显微组织、物相成分及性能, 选择 30% 搭接率为最佳。

关键词: 激光熔覆; Ni60A; 多道搭接; 物相成分; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG17

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202402006

0 引言

随着经济的不断发展, 高端制造行业不断凸显出其重要作用, 但是由于不可再生能源的大量开采和消耗, 环境污染问题显得尤为突出, 全球的目光逐渐聚焦在绿色制造、可持续制造的方法上。其中激光熔覆等绿色再制造技术手段因其效率高、材料选择无限制、热影响区小及工艺过程易自动化等优点, 在齿轮、轴承等大型关键零部件的修复中占有举足轻重的地位。激光熔覆^[1-4]是将高能量密度的激光束辐照到基体材料表面, 使金属粉末或涂层熔化, 经过凝固后形成与界面具有较强冶金结合能力的熔覆层。由于其极快的冷却速率(冷却速率为 $10^5 \sim 10^7$ K/s), 所制备的熔覆层显微组织结构通常具有细小、致密等特点^[5-7], 这为熔覆层具备良好的显微硬度、拉伸性及冲击韧性等力学性能提供了基础。而在逐道搭接的熔覆过程中, 搭接率不仅影响了熔覆层的表面平整度等

表面质量, 同时也影响了熔覆层的温度累积、显微组织结构特征、物相分布等, 进而极大地影响了熔覆层最终的力学性能, 并且搭接率的合理选择也为后续多层熔覆层的良好成形提供了基础。例如缪喆宇等^[8]为了改善石墨/铜自润滑材料激光熔覆层的平整度, 探索了搭接率对熔覆层平整度的影响与二次重熔处理对熔覆层表面的改善效果, 但并未对显微组织进行探究。郭士锐等^[9]采用高能量密度激光器在灰铸铁 HT250 表面制备了多道搭接铁基合金熔覆层, 通过熔覆层稀释率及表面平整度两个重要质量指标对搭接率进行了优化。Chen 等^[10]建立了基于序贯耦合热结构法的三维有限元模型, 预测了搭接区域对激光扫描引起的残余应力的影响, 但是未进一步探究组织性能的影响规律。现有文献大多研究搭接率与表面形貌和质量的关系, 对搭接率与熔覆层组织和性能关系的探究仍不够完善。

Ni60A 是一种高硬度的合金粉末, 具有优良

收稿日期: 2023-02-18; 修回日期: 2024-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975099).

作者简介: 詹 欢(1998—), 男, 硕士生, E-mail: 690403163@qq.com; 李 涛(1977—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: litao@dlut.edu.cn.

的综合性能,如耐腐蚀、抗氧化、耐热、耐低应力磨粒磨损及抗冲击韧性,并且其粉末的自熔性、润湿性和喷焊性良好,所以常用于零件的修复及表面强化.利用镍基合金材料来修复 45 钢齿轮,不仅在加工工艺上能够利用其自身优势,在性能上也完全能够满足甚至超过被修复齿轮的要求.本文在 45 钢基体上熔覆 Ni60A 材料,对比探究搭接率对单层熔覆层的显微组织结构、物相分布以及性能等方面的影响规律,揭示显微组织、物相成分和性能三者变化规律,并基于分析结果得到最优搭接率,为齿轮激光修复绿色再制造业提供一定的实验和理论指导.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

采用 45 钢作为基体,将其制作成 80 mm×70 mm×8 mm 的块体,该材料的化学成分见表 1.在进行熔覆前,为减少外在因素的影响,对基体材料进行预处理:用砂纸将基体上的氧化层去除,用酒精擦拭并烘干.

表 1 45 钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45 steel

w(C)/%	w(Cr)/%	w(Mn)/%	w(Ni)/%
0.42~0.50	≤0.25	0.50~0.80	≤0.35
w(P)/%	w(S)/%	w(Si)/%	w(Cu)/%
≤0.035	≤0.035	0.17~0.37	≤0.25

熔覆层材料选择的是自熔性镍基合金粉末 Ni60A,颗粒度为-140~+320 目(负数表示能漏过该目数的网孔,即颗粒尺寸小于网孔尺寸;正数则与之相反),该材料的化学成分见表 2.同样,对熔覆层粉末进行预处理:为去除熔覆层粉末中的水分,增加该材料粉末的流动性,将熔覆层粉末烘干 1 h,这样可减少实验后样品产生气孔等缺陷.

表 2 Ni60A 合金粉末的化学成分

Tab.2 Chemical composition of Ni60A alloy powder

w(C)/%	w(B)/%	w(Fe)/%	w(Cr)/%	w(Si)/%
0.5~1.1	3.0~4.5	≤17.0	14~20	3.5~5.5

1.2 实验方法

实验装置采用实验室的半导体激光器(LDF

4000-100),其输出的激光束有脉冲和连续两种,最小及最大的输出波长分别为 900 nm 和 1 070 nm,激光功率最大可达 4.4 kW.采用的机械手臂是 KUKA 工业机器人(KUKA KR30HA),该机械手臂共有 6 个自由度,最大负载为 40 kg,最大输入功率为 7.8 kW,位置重复误差小于 0.05 mm.采用的同轴激光头(Precitec YC52)送粉方式为同步送粉,即通过 4 个送粉管路同轴送粉,激光光斑直径为 3 mm,焦距可调节,最大输出激光功率为 6 kW.送粉器采用的是气载式送粉器(RC-PF-01B-2),双料仓负压式的送粉方式,15 r/min 的送粉速率,送粉量可在 3~150 g/min 调节.

实验参数如下:激光功率为 1 200 W;送粉速率为 15 r/min;扫描速度为 0.006 m/s;搭接率选择的是 20%、30%、40%和 50%,需要注意的是由于搭接率过高时熔覆层的质量不高,所以不采用过高的搭接率进行实验;扫描方式为单层往复,并且将高纯氩气作为实验的保护气和送粉气.为了方便观察搭接区域的显微组织,按照垂直激光扫描方向切割样品用来制作金相试样,并将切割后的样品块用不同规格的砂纸进行研磨和抛光.由于 X 射线衍射仪无须将样品腐蚀,因此在腐蚀前利用 X 射线衍射仪对其表面进行测量分析.在观察显微组织时用体积比为 3 : 1 的盐酸和硝酸混合溶液对样品腐蚀 40 s,并立即用无水乙醇擦拭烘干,利用超景深显微镜等设备对样品进行显微组织观察.

2 结果分析

2.1 搭接率对熔覆层显微组织的影响

实验需要通过改变搭接率来研究显微组织和性能的变化规律.所谓搭接率就是指在基体上进行多道熔覆时,两道熔覆层相互重叠的部分占整个熔覆层面积的比例.多道搭接熔覆截面如图 1 所示.

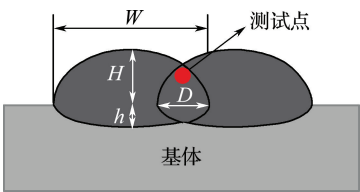


图 1 多道搭接熔覆截面

Fig.1 Cross section of multi-track overlapping cladding

图 1 中深色区域为熔覆层,底部灰色区域为基体,H 为熔覆层距基体高度,h 为熔池深度,W

为单道熔覆层宽度, D 为两道熔覆层重叠区域宽度. 其中搭接率会影响熔覆层各方面的尺寸、精度及性能等, 搭接率太大或者太小都会产生不良影响, 而显微组织的尺寸变化会影响熔覆层的显微硬度等性能.

图 2 为不同搭接率下熔覆层搭接区底部的显微组织. 从图中可以看出, 熔覆层搭接区底部显微组织先以平面晶形式生长形成一条白亮带, 随着温度梯度的变化, 伴随着成分过冷现象的产生, 显微组织状态也开始发生改变, 此结果符合非平衡凝固理论. 随着搭接率的增大, 熔覆层搭接区底部

的晶粒更加粗大, 图 2(a) 为搭接率 20% 时的显微组织, 此时成分过冷的影响较弱, 主要以平面晶分化出的胞状晶为主, 有少量胞状晶正在向柱状晶转变, 分布较为离散. 图 2(b) 为搭接率 30% 时的显微组织, 此时成分过冷的影响开始占主导, 除胞状晶外, 已有成形的柱状晶, 其生长方向与温度梯度方向呈较小的锐角. 图 2(c) 为搭接率 40% 时的显微组织, 柱状晶增多, 分布更为密集, 且柱状晶的侧向开始有分支. 图 2(d) 为搭接率 50% 时的显微组织, 此时柱状晶更加粗大, 分布较多, 其生长方向大多沿着温度梯度方向.

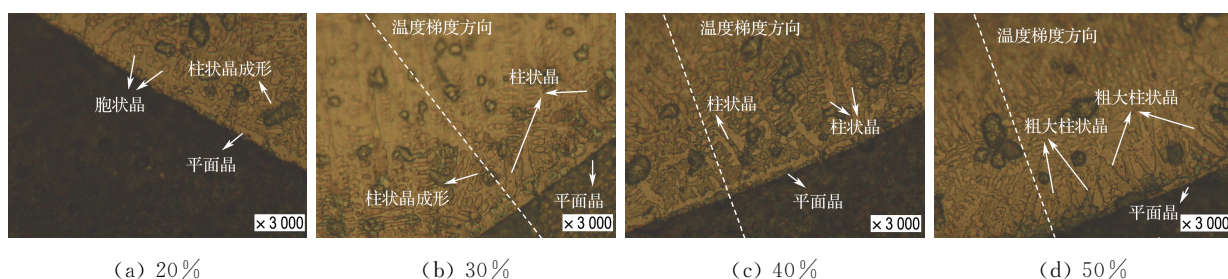


图 2 不同搭接率下熔覆层搭接区底部的显微组织

Fig. 2 Microstructure at the bottom of the overlap zone in cladding layer under different overlap rates

图 3 为不同搭接率下熔覆层搭接区中上部的显微组织. 图 3(a) 为搭接率 20% 时中上部的显微组织, 此时主要是以柱状晶为主, 且尺寸都较为粗大, 分布密集. 图 3(b) 为搭接率 30% 时中上部的显微组织, 此时柱状晶明显减少, 尺寸略微减小,

大多正在向等轴晶转变. 图 3(c) 为搭接率 40% 时中上部的显微组织, 柱状晶尺寸明显减小. 当搭接率增大到 50% 时, 如图 3(d) 所示, 此时显微组织中以等轴晶为主, 柱状晶较少, 且等轴晶尺寸细小, 分布均匀.

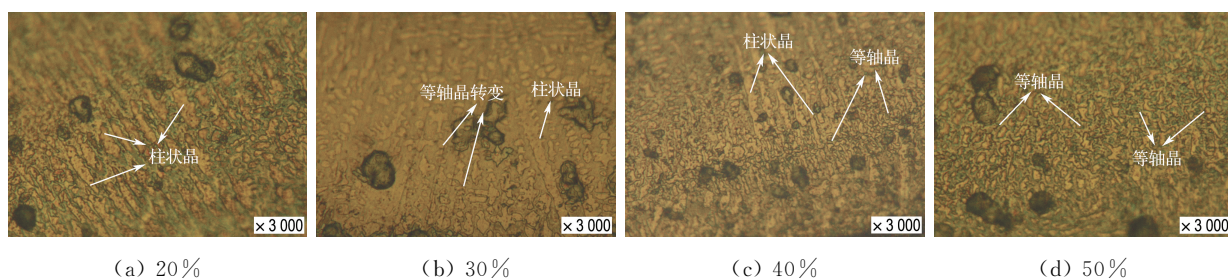


图 3 不同搭接率下熔覆层搭接区中上部的显微组织

Fig. 3 Microstructure of the middle and upper parts of the overlap zone in cladding layer under different overlap rates

综合上述不同搭接率下熔覆层搭接区不同部位显微组织的变化情况分析: 对于底部晶粒, 在进行多道搭接熔覆时, 对于更大的搭接率, 其重叠区域会更多, 重熔区域变大意味着激光作用在此区域的时间更长, 此区域熔覆层吸收的激光能量也就更多, 导致搭接区底部的显微组织生长时间更

长, 所以与低搭接率相比, 高搭接率下搭接区底部显微组织晶粒会更加粗大, 柱状晶的尺寸也就随着搭接率的增大而逐渐增大; 对于中上部晶粒, 此时主要以二次结晶作用为主, 重熔区域的增大说明二次结晶区也增大, 等轴晶的转变更加明显, 并且等轴晶分化成更多细小的胞状晶, 显微组织更

加细密均匀,晶粒更加细小.

2.2 搭接率对物相成分的影响

图 4 为不同搭接率下熔覆层 X 射线衍射图谱,图 5 则给出了 30% 搭接率下熔覆层搭接区横截面背散射图,对应位置的能谱成分分析见表 3. 若要完全识别熔覆层中所有存在的相比较困难,只能先通过对比分析判断出主要存在的相有 γ -Ni 固溶体相、铬硼化物、碳化物等.

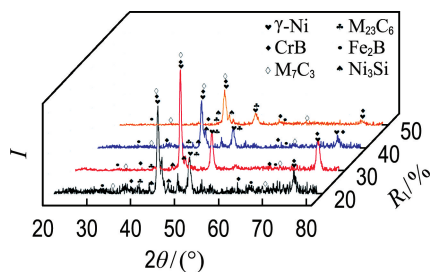


图 4 不同搭接率下熔覆层 X 射线衍射图谱
Fig. 4 X-ray diffraction patterns of cladding layers under different overlap rates

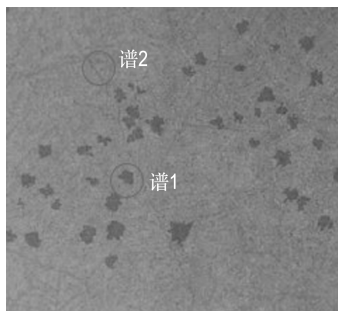


图 5 30% 搭接率下熔覆层搭接区横截面背散射图
Fig. 5 Backscatter diagram of cross section of overlap zone in cladding layer under 30% of overlap rate

表 3 图 5 中不同位置的能谱成分分析
Tab. 3 Energy spectrum composition analysis of different positions in Fig. 5

位置	$w/\%$					
	Ni	Cr	Fe	Si	C	其他
谱 1	3.1	56.68	10.76	1.98	23.57	3.91
谱 2	18.4	47.44	9.97	1.52	19.73	2.94

由 X 射线衍射图谱性质可知,衍射峰的高度主要是由相同方向上分布的晶面数量来决定的,即当晶粒均分布在相同的方向,则那些无规律排列的晶粒对应的衍射峰相对较低. 另外在不同的 X 射线衍射图谱中,在相同位置时,其对应角度的

不同衍射峰强度反映的是对应的不同晶体成分. 衍射峰越高,则对应的晶体化程度就越高. 对于衍射峰宽度的分析,最常用的是半峰全宽. 以多晶成分的组织来说,半峰全宽与晶粒的尺寸成反比,即晶粒尺寸越大则对应的半峰全宽越小. 从图 4 可以看出,不同搭接率下熔覆层 X 射线衍射图谱中各物相的衍射峰位置大致相同,只是衍射峰的高度有所变化,呈先增大后减小的趋势,说明搭接率变化时,熔覆层中物相成分变化不大,只是含量和晶体化程度有所变化. 当搭接率为 30% 时,几个主峰的强度和半峰全宽最大,说明此时熔覆层中的 γ -Ni 相、铬硼化物、碳化物等含量较多,晶粒细化程度较大,这对熔覆层的显微组织和性能都有着很大的影响.

由图 5 可见,图中出现了黑色块状组织和颜色较淡的灰色树枝状组织. 黑色块状组织体积较大,较为明显,分布密集;灰色树枝状组织较为细小,分布密集. 从表 3 的能谱成分分析可以看出,在黑色块状组织中 Cr 含量较多,灰色树枝状组织中含有较多的 Cr、Ni、Fe 和 C 等元素. 结合 X 射线衍射结果以及图 5 扫描电镜背散射结果分析,可以大致判断出黑色块状组织为 CrB 型铬硼化物,灰色树枝状组织为 M_7C_3 型碳化物. 综合上述结果得出,熔覆层中主要由 γ -Ni 相、黑色块状铬硼化物以及灰色树枝状碳化物等组成. 对于铬硼化物和碳化物,这两种均为初生相, M_7C_3 型碳化物是稳定性更好的硬质相,在组织中可作为增强相,CrB 型铬硼化物在熔覆层组织生长中会导致成分偏析增大,所以会使得熔覆层组织综合性能下降.

2.3 搭接率对显微硬度的影响

为了解搭接率对熔覆层显微硬度的影响,实验采用 HV-1000 维氏硬度计对熔覆层搭接区表面进行显微硬度测试,测量点选取为每个搭接区的中点,取其平均值作为显微硬度. 图 6 为不同搭接率下显微硬度波动图.

从图 6 可看出,搭接率对熔覆层显微硬度有不同程度的影响,其显微硬度为 520~700 HV,并且随着搭接率的增大,显微硬度呈先增大后减小的趋势. 显微硬度的最大值出现在搭接率为 30% 的情况下,达到了 700 HV. 同 X 射线衍射图谱的结果对比来看,在搭接率变化的情况下,熔覆层显微硬度的变化趋势与熔覆层中物相成分的变化

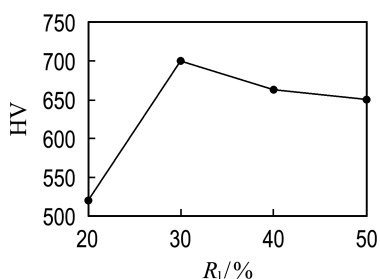


图 6 不同搭接率下显微硬度波动图

Fig. 6 Diagram of microhardness fluctuation with different overlap rates

化趋势大致相符. 搭接率从 20% 增大到 30% 时, 由图 2、3 熔覆层搭接区显微组织变化规律可知, 晶粒逐渐细化, 组织逐渐均匀细密. 晶粒的细化意味着在强化组织时细晶强化起到了重要作用, 这有利于提高熔覆层的显微硬度, 所以显微硬度也就随着晶粒细化程度的增大而逐渐增大. 同时由 X 射线衍射图谱的结果可知, 搭接率增大时熔覆层中的 CrB 等硬质相含量逐渐增多, 这也是导致熔覆层显微硬度增大的一个因素. 但是当搭接率进一步增大时, 熔覆层显微硬度有所下降, 主要的原因可能是当搭接率过大时, 熔覆层重复加热区域增大, 热量的积累使得温度极大升高, 冷却速度随之减小, 同时导致过冷度降低, 最终使熔覆层内产生过烧现象, 此时过烧的熔覆层将覆盖细小均匀的晶粒组织. 此外, 搭接率过大导致的温度升高会使熔池的深度增大, 从而稀释率有所增大, 熔覆层粉末中的元素更多被熔入基体中, 熔覆层中硬质相的体积分数相对减小, 显微硬度也就随之降低.

3 结 论

(1) 在搭接率变化时, 熔覆层金相组织的变化规律均符合非平衡凝固理论, 即先以平面晶的形式生长, 开始失稳后不断出现胞状晶或者柱状晶. 当搭接率从 20% 增大到 50% 时, 熔覆层搭接区底部的组织晶粒逐渐变得粗大, 而中上部的组织晶粒逐渐变得细小.

(2) 熔覆层中物相成分主要是由 γ -Ni 相、CrB 型铬硼化物、 M_7C_3 型碳化物等组成, 当搭接率从 20% 逐渐增大到 30% 时, 熔覆层中物相成分中的铬硼化物及碳化物逐渐增多, 搭接率继续增大到 50% 时, 主要物相成分有所减少.

(3) Ni60A 熔覆层的显微硬度在 520 ~ 700 HV 变化, 并且当搭接率从 20% 增大到 30% 时, 熔覆层的显微硬度逐渐增大, 在搭接率为 30% 时显微硬度最大, 为 700 HV, 随后随搭接率继续增大显微硬度有所下降.

综合上述结果可知, 当搭接率为 30% 时, 各物相成分中强化相成分较多, 组织晶粒均匀, 此时显微硬度最佳, 故选择 30% 为最佳搭接率.

参考文献:

- [1] 王争强, 李文戈, 杜旭, 等. 激光熔覆技术在轴类零件再制造过程中的应用现状 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(11): 35-40.
WANG Zhengqiang, LI Wenge, DU Xu, *et al.* Applications of laser cladding technique in remanufacturing of shaft parts [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(11): 35-40. (in Chinese)
- [2] 张艺, 马志凯, 孙铂, 等. 激光熔覆材料的研究现状及发展 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(14): 40-44.
ZHANG Yi, MA Zhikai, SUN Bo, *et al.* Present status and development of material for laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(14): 40-44. (in Chinese)
- [3] 朱润生. Ni60 自熔合金粉末的研究 [J]. 粉末冶金工业, 2002, 12(6): 7-16.
ZHU Runsheng. Study on Ni60 self-melting alloy powder [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2002, 12(6): 7-16. (in Chinese)
- [4] 嵇友迪, 龚红英, 徐培全. 45 钢激光熔覆 Ni60 合金粉末工艺参数的多目标优化 [J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(4): 315-320.
JI Youdi, GONG Hongying, XU Peiquan. Multi-objective optimization of process parameters of 45 steel laser cladding Ni60 alloy powder [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2021, 35(4): 315-320. (in Chinese)
- [5] 王永东, 张宇鹏, 张宁, 等. 激光熔覆工艺参数对 Ni60A 熔覆层组织及性能的影响 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(4): 446-451.
WANG Yongdong, ZHANG Yupeng, ZHANG Ning, *et al.* Effect of Ni60A laser cladding process parameters on microstructure and properties of cladding layer [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2021, 31(4):

- 446-451. (in Chinese)
- [6] 张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 激光熔覆修复 45 号钢模具的组织及性能研究 [J]. 机械设计与制造, 2017(2): 118-120.
- ZHANG Deqiang, ZHANG Jiqing, GUO Zhongjuan. Research of microstructure and properties of repairing 45 # steel mold on laser cladding [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2017(2): 118-120. (in Chinese)
- [7] LI Qiang, ZHANG Dawei, LEI Tingquan, *et al.* Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, **137**(2/3): 122-135.
- [8] 缪喆宇, 高义民, 王怡然, 等. 搭接率与二次重熔对激光熔覆石墨/铜自润滑复合材料组织的影响 [J]. 铸造技术, 2022, **43**(6): 433-438.
- MIAO Zheyu, GAO Yimin, WANG Yiran, *et al.* Effect of lap ratio and secondary cladding on laser cladding graphite/copper self-lubricating composite [J]. *Foundry Technology*, 2022, **43**(6): 433-438. (in Chinese)
- [9] 郭士锐, 赵 阳, 崔陆军, 等. 基于灰铸铁表面多道搭接熔覆成形质量及组织性能研究 [J]. 有色金属工程, 2022, **12**(4): 31-35.
- GUO Shirui, ZHAO Yang, CUI Lujun, *et al.* Study on forming quality, microstructure and properties of multi-lap cladding on the surface of gray cast iron [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, **12**(4): 31-35. (in Chinese)
- [10] CHEN Changpeng, YIN Jie, ZHU Haihong, *et al.* Effect of overlap rate and pattern on residual stress in selective laser melting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, **145**: 103433.

Effect of heterogeneous metal cladding overlap rate on microstructure of Ni60A cladding layer

ZHAN Huan, LI Tao*, DENG Linhui, SHI Feifan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The experimental method of using a semiconductor laser to melt Ni60A material on a 45 steel substrate to produce a nickel based alloy coating is adopted to study the internal microstructure, phase composition and microhardness of the cladding layer as a function of the overlap rate. Based on the experimental results, an appropriate overlap rate is selected to meet the performance requirements. The results show that when the overlap rates are 20%, 30%, 40% and 50%, with the increase of overlap rate, the structure grain at the bottom of the overlap zone in the cladding layer gradually increases, while the structure grain in the middle and upper parts gradually decreases. The main phases of the cladding layer are γ -Ni solid solution phase as well as a large amount of hard strengthening phases such as chromium borides and carbides, and when the overlap rate gradually increases from 20% to 30%, the main phase composition gradually increases, but decreases when it increases from 30% to 50%. The microhardness variation pattern of the cladding layer is roughly the same as that of the phase composition. It gradually increases as the overlap rate increases from 20% to 30%, with the lowest microhardness at 20% of overlap rate and the highest microhardness 700 HV at 30% of overlap rate. It then decreases to 665 HV when the overlap rate increases to 50%. According to the performance requirements of the cladding layer, it is required that the microhardness be high, and the structure grain be small and uniform. When only considering the changes in the overlap rate, a comprehensive analysis of the microstructure, phase composition and properties is conducted, and a 30% of overlap rate is selected as the best.

Key words: laser cladding; Ni60A; multi-track overlapping; phase composition; microstructure; microhardness