

文章编号: 1001-3806(2021)04-0441-07

镍基高温合金激光熔覆涂层组织及性能研究

陈子豪¹, 孙文磊^{1*}, 黄勇^{1,2}, 崔权维¹

(1. 新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆工程学院 机电工程学院, 乌鲁木齐 830023)

摘要: 为了研究高温合金激光熔覆涂层组织演变及力学性能, 采用激光熔覆技术在 2Cr25Ni20 耐热奥氏体不锈钢表面制备镍基 NiCrFeMo 高温合金涂层。使用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、能量色散光谱仪、显微硬度计等微观分析测试手段对该镍基高温合金涂层的微观组织形貌、物相种类、界面元素分布与偏析、各区域的硬度进行分析。结果表明, 基材与熔覆层结合位置至熔覆层顶部, 依次由多种晶粒形态生成; Nb 与 Mo 元素在熔池金属液体对流作用下向基材发生扩散, 其它元素基本无扩散; 熔覆层存在物相有 γ -Ni 和 $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$, 熔覆层结合位置包含物相 Fe_2Ni_3 , γ -(Fe, Ni) 和 $\text{Ni}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}$; 基材显微硬度平均值为 $252\text{HV}_{0.3}$ 左右, 熔覆层显微硬度平均值为 $285\text{HV}_{0.3}$ 左右; 经常温拉伸试验, 与 2Cr25Ni20 钢力学性能比较, 2Cr25Ni20 钢修复件抗拉强度升高, 强度增大, 断后伸长率明显下降, 塑性降低。此研究为后续钢炉转轴修复提供了可行性方案。

关键词: 激光技术; 激光金属沉积; 组织演变; 力学性能; Ni 基高温合金

中图分类号: TN249; TG156.99

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.04.006

Study on microstructure and properties of laser cladding coating for base superalloy

CHEN Zihao¹, SUN Wenlei¹, HUANG Yong^{1,2}, CUI Quanwei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering College, Xinjiang Engineering College, Urumchi 830023, China)

Abstract: In order to study the microstructure evolution and mechanical properties of laser cladding coatings of high temperature alloy, a nickel-based NiCrFeMo high temperature alloy coating was prepared on the surface of 2Cr25Ni20 heat-resistant austenitic stainless steel using laser cladding technology. The cladding technology prepares a nickel-based NiCrFeMo high-temperature alloy coating on the surface of 2Cr25Ni20 heat-resistant austenitic stainless steel. Scanning electron microscope, X-ray diffraction, energy dispersive spectrometer, micro-hardness tester and other micro-analysis test methods were used to analyze the microstructure morphology, phase types, interface element distribution and segregation, and hardness of each area of the nickel-based superalloy coating. The results show that the bonding position of the base material and the cladding layer to the top of the cladding layer is sequentially generated from a variety of crystal grain morphologies. The Nb and Mo elements diffuse to the substrate under the action of the molten metal liquid convection, and the other elements basically have no diffusion. The cladding layer has phases: γ -Ni and $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$, while the bonding position of the cladding layer contains phases: Fe_2Ni_3 , γ -(Fe, Ni), and $\text{Ni}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}$. The average microhardness of the substrate is about $252\text{HV}_{0.3}$, and the average microhardness of the cladding layer is about $285\text{HV}_{0.3}$. In normal temperature tensile test, compared with the mechanical properties of 2Cr25Ni20 steel, the tensile strength of 2Cr25Ni20 steel repaired parts increases, the strength increases, the elongation after fracture decreases significantly, and the plasticity decreases. Therefore, this study provides a feasible plan for the subsequent repair of the steel furnace shaft.

Key words: laser technique; laser metal deposition; microstructure evolution; mechanical property; Ni base superalloy

基金项目: 新疆维吾尔自治区克拉玛依市科技重大专项资助项目(2018ZD002B); 新疆维吾尔自治区高校科研计划资助项目(XJEDU2019Y064)

作者简介: 陈子豪(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光再制造的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sunwenxj@163.com

收稿日期: 2020-07-27; 收到修改稿日期: 2020-08-17

引言

奥氏体不锈钢 2Cr25Ni20 是一种高镍铬合金的耐热钢, 一般经冶炼后在铸态下直接进行使用, 在高温工作环境下, 该耐热钢抗高温氧化性和热腐蚀性能优良, 可以在高温下反复加热使用, 而不发生失效, 该种耐热钢主要用于制作炉用部件、喷嘴、燃烧室等^[1-3]。

激光熔覆^[4-8]是一种先进制造技术,激光转化为热量熔化粉末颗粒,形成涂层,然后将涂层沉积到工件表面上,使工件表面耐磨性、耐腐蚀性等性能得到明显提升,并能对废旧零件进行修复。由于在成形熔覆层过程中,能量输入在空间上是局部的、热量输入是精确控制,工件内部只形成有限的热影响区(heat affected zone, HAZ)。同时也减小了基材与熔覆层的稀释率,稀释率随激光能量的增加而增加,低稀释率熔覆层具有良好的微观结构和力学性能。激光熔覆工艺参量^[9-12]合理设置能提升熔覆成形能力,产生更少缺陷。温度梯度^[13]对于熔覆层的成形过程也有重要影响。

本文中所用粉末与 Inconel625 粉末元素种类相同,Mo,Nb 元素含量不同,其它元素含量范围相同,故类比 Inconel625 相关性来研究该高温合金涂层。Inconel625^[14-18]是一种镍基高温合金,其主要借助镍铬基体中 Mo,Nb 等元素的固溶强化来获得高温强度、抗蠕变性能,并且还一种激光吸收率较大的沉积材料,同时也是一种 NiCrFe 多元合金。WNAG 等人^[19]利用激光熔覆技术在 316L 不锈钢表面制备了单层和多层 Inconel625 高温合金涂层,比较了样品中不同区域的宏观形态,微观结构。讨论了界面的晶粒形态转变和显微组织形成机理并对机械性能和腐蚀性能也进行了详细研究。DINDA 等人^[20]利用激光沉积技术制造出 Inconel625 镍基高温合金成形件,使用高功率 CO₂ 激光

器在 Inconel625 基板上形成熔池,将 Inconel625 粉末流输送到熔池中形成 3 维物体,微观结构为柱状枝晶,由基底向上生长。ROMBOUTS 等人^[21]研究了利用激光金属沉积技术(laser metal deposition, LMD)制备 3 维镍铬铁合金 Inconel625 块状成形件,通过 X 射线衍射检测到含有 MC, M₂₃C₆ 和 M₆C 型碳化物的致密胞状树枝状结构。拉伸屈服强度为 480MPa ~ 656MPa,极限强度为 882MPa ~ 1000MPa,断后延伸率为 24% ~ 36%,与常规生产的 Inconel625 合金相比,其强度和塑性都有了很大的提升。

本文中在 2Cr25Ni20 耐热奥氏体不锈钢基体上进行最佳激光熔覆工艺参量的多层多道熔覆 NiCrFeMo 高温合金粉末试验,分析了 2Cr25Ni20 钢基体和熔覆层材料的显微组织,显微硬度及常温力学性能,为实现钢炉转动轴表面修复奠定了一定的应用基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验中所用基材为 300mm × 150mm × 12mm 2Cr25Ni20 钢板,基体常温平衡组织为奥氏体,而所用的激光熔覆合金粉末为 NiCrFeMo 高温合金粉末,其粒度为:100 目 ~ 300 目,粉末流动性:10g/s ~ 100g/s,硬度:25HRC ~ 30HRC,使用温度:1000℃。试验前,粉末在烘干机内静置烘干,烘干时间为 2h,温度为 150℃。基材与高温合金粉末成分如表 1 所示。

Table 1 Compositions of substrate and Ni-based superalloy alloy powder(mass fraction)

element	C	Si	Cr	Nb + Ta	Mn	S	P	Mo	Fe	Ni
2Cr25Ni20	≤0.0025	≤0.0150	≤0.2400	—	≤0.0200	≤0.00030	≤0.00035	—	balance	≤0.1900 ~ 0.2200
powder	0.0003 ~ 0.0005	0.006 ~ 0.015	0.20 ~ 0.23	0.04 ~ 0.06	—	—	—	0.08 ~ 0.1	0 ~ 0.05	balance

1.2 试验方法

试验在激光快速成型系统上进行,该试验系统由德国 IPG 公司 YLS-4000-S2 光纤激光器,中国 KUKA 公司 KR30HA 机器人,中国新松公司 1000mm 伺服旋转工作台,中国新松公司 XSL-PF-01A-2 负压式气载送粉器及中国东露阳实业有限公司 PH-LW296-TH2P 冷却系统组成,如图 1 所示。激光波长:1070nm ~ 1080nm;激光聚焦头(PLFDH0125)使用抛物聚焦镜,焦距 $f = 600\text{mm}$,焦点光斑直径 3mm。配置侧向送粉喷嘴及调整机构,载气与保护气为氩气。在熔覆过程中,氩气不仅被用作保护熔覆层被空气氧化,还被用作保护激光加工头内的光学元件免受烟尘氧化。

该系统送粉方式为气压驱动侧向同步送粉,为了提高基材对激光的吸收率,成形性能优良的熔覆层,前



Fig. 1 Laser cladding experiment equipments (1—fiber laser YLS-4000-S2; 2—KR30HA robot; 3—servo rotating worktable; 4—XSL-PF-01A-2 negative pressure type powder feeding system; 5—PLFDH0125 laser head; 6—lateral powder-feed nozzle; 7—cooling system)

期通过正交试验选出最佳工艺参量,具体试验工艺参量设定为:激光功率 1.6kW,扫描速率 8mm/s,送粉量 15g/min,光斑直径 3mm,送粉载气流量 150L/h。

为了评估 NiCrFeMo 高温合金涂层与基材 2Cr25Ni20 钢板间的结合强度与常温力学性能,设计常温拉伸试验,将板件垂直于长边开 V 型坡口,坡口尺寸如图 2 所示。

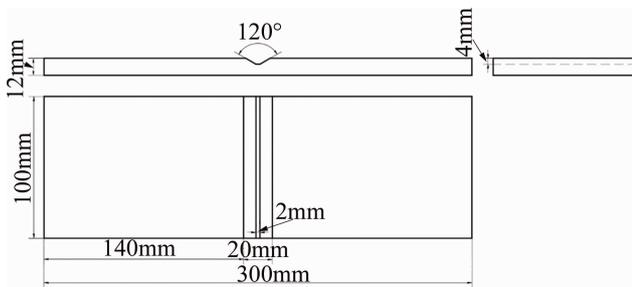


Fig. 2 2Cr25Ni20 plate groove diagram

采用上述激光试验系统在 2Cr25Ni20 钢板上进行 Ni 基高温合金粉末激光熔覆成形试验,研究在上述工艺参量下,粉末在激光作用下熔化,形成致密 Ni 基高温熔覆层,冷却至室温,经过多层堆积,将上述钢板上的通槽填充完整,并使用磨光机磨削熔覆层多余部分,用不同目数的砂纸先后打磨该部分,然后使用酒精擦拭熔覆层及其周围表面,静置晾干。

处理完成后,利用电火花线切割机沿熔覆板件对处理后板件熔覆区域中心横截面方向进行线切割,并对切割后样品进行标准金相制样。清理表面铁屑,用砂纸将试样棱角打磨平滑。然后进行抛光、腐蚀,采用 Kalling 试剂(C_2H_5OH 100mL, HCl 100mL, $CuCl_2$ 5g) 腐蚀熔覆层与基材,使用 Zeiss Sgma 500 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对基材区、热影响区、基材区与熔覆层结合处以及熔覆层截面显微组织晶粒形态进行观察。

利用理学 D/max2500 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)分别测试熔覆层、基材与熔覆层结合处中的物相,然后利用牛津 200 X 射线能量色散光谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)测试熔覆层和垂直界面方向各层各元素的分布。

采用 HVS-1000Z 型维氏显微硬度计沿基材区-热影响区-熔覆层直线方向测量各层区显微硬度值,测量距离为相邻两点间距 $200\mu m$,载荷为 $300g(2.942N)$,加载时间为 15s。

将熔覆完成的试样依据 GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法标准进行试验,先用线切割在处理好的板件上切割出标准力学拉伸试

样,然后使用不同目数的砂纸对力学试样进行打磨抛光,最终通过 CMT 5205 常温力学试验机测试修复试样力学性能。

2 镍基高温合金熔覆层性能分析

2.1 镍基高温合金熔覆层表面形貌分析

图 3a 所示为沉积层区域、两种金属结合位置、基材区域 SEM 形貌,图 3b 为熔覆层上半部分,图 3c 为熔覆层下半部分。在高温合金沉积的过程中,熔覆层是由粉末熔化、凝固堆积而成,该过程相当于激光重熔与合金化的综合应用,成形质量主要取决于首层熔覆层,基材处于室温,熔融液体在基材上快速凝固形成熔覆层。在该层成形过程中,一部分热量用于熔化基材与粉末,多余热量通过基材传入垫板和空气中,故在首层熔覆层成形过程中工艺参量的选取显得尤为重要。因此,基材下的垫块应采用导热系数小的材料,保证一部分热量存在于试样内,保证较小温度梯度,产生较小的残余应力,产生更少的缺陷。

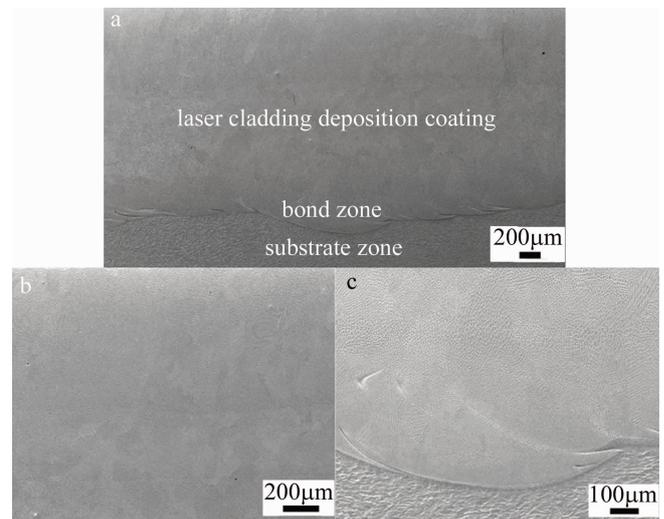


Fig. 3 a—SEM images of cladding layer, joint and substrate b—the upper part of the cladding layer c— lower part of the cladding layer

新成形熔覆层在激光的辐照下,由于高温作用,熔覆层表面熔化形成熔池,随着粉末熔化后形成的液体不断注入层中,已完成凝固成形区域重新熔化与连续粉末熔化的熔融液体混合并形成新的熔覆层凝固成形。在连续激光的作用下,先成形熔覆层对后续熔覆层存在循环退火、回火热处理,让成形件表面平整光滑,内部呈现出交错热处理组织特征。

新成形的熔覆层容易受到热循环二次加热影响。但是,在图中沉积层分层现象不明显,说明各熔覆层之间基本无缺陷产生,热循环作用影响不明显,沉积层中

各单层紧密结合,成形质量良好。已经完成凝固成形的高温合金熔覆层相当于基板,先成形的熔覆层表面温度高,内部存在大量热量,对于后续产生的熔覆层相当于退火与回火热处理作用,产生的组织均匀,缺陷少。

最后成形的熔覆层主要与空气介质进行热交换,组织凝固速率较先成形熔覆层相比较较大,温度梯度较小。图中熔覆层之间结合处有波浪纹产生,由于在形成熔池过程中,粉末熔融液体表面张力与基材表面弹力相互作用。

2.2 镍基高温合金熔覆层微观组织与演变

图4a所示为熔覆层SEM显微组织形貌,其表面无裂纹、光顺平滑。通过不同放大倍数的扫描电子显微镜图像显示镍基高温合金熔覆层微结构区域。如图4b~图4f所示,在结合处上方,柱状晶按一定角度贯穿过整个熔覆层,柱状晶周围分布着网状二次枝晶。通过SEM对网状二次枝晶区域进行放大处理,在晶间位置有存在少量白色颗粒。

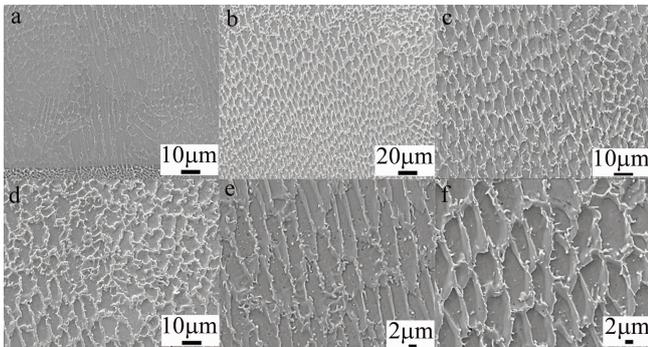


Fig. 4 a—overall microstructure morphology of cladding layer b—the distribution of network structure on the surface of cladding layer c—enlarged local view of reticular distribution d—equiaxed crystal distribution on the upper layer of the cladding layer e—columnar crystal distribution in cladding layer f—the cellular crystal distribution at the lower end of the cladding layer

该激光熔覆沉积层由4层组成,经过连续激光的辐照,基材表面熔化,熔融粉末液体与熔池接触混合开始凝固,柱状晶从临近结合位置开始生长,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,其生长方向与水平呈一定角度,晶粒生长方向与熔覆层内部热量传输方向相反。多道熔覆层堆积,成形沉积层,先成形熔覆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,熔覆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,生成如图中网状树枝

晶。且热量变化不仅存在于垂直方向,也存在于水平方向。在水平方向,柱状晶与二次网状枝晶交错分布,且柱状晶在垂直方向,根据温度梯度与凝固速率的分布的情况,二次网状枝晶、柱状晶、树枝晶和等轴晶交错分布,因为在制备熔覆层时,激光头往复运动,同一区域热量分布不均匀,温度梯度也是不断变化,先成形熔覆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。在经过激光的热效应,该层重新熔化,晶粒重新经历形核、长大的过程。后成形的熔覆层重复经过该过程,直到最后一层熔覆层的成形,试样最上层位置与空气充分接触,与空气进行热交换,形成较宽的等轴晶区域,在试样下端与中间部分几乎观察不到该区域。

不同放大倍数SEM下熔覆层波浪纹微观形貌如图5a~图5d所示。先成形部分在激光的辐照下,表面熔化,离表面距离越近,温度就越高。温度的变化会直接导致熔融液体表面张力的变化。连续粉末熔化后不断注入熔池中,在此过程中,粉末熔融液体表面张力不断增大,先成形层熔化部分与未完全熔化粉末间有弹力产生,两种力相互叠加作用,最终形成波浪纹。

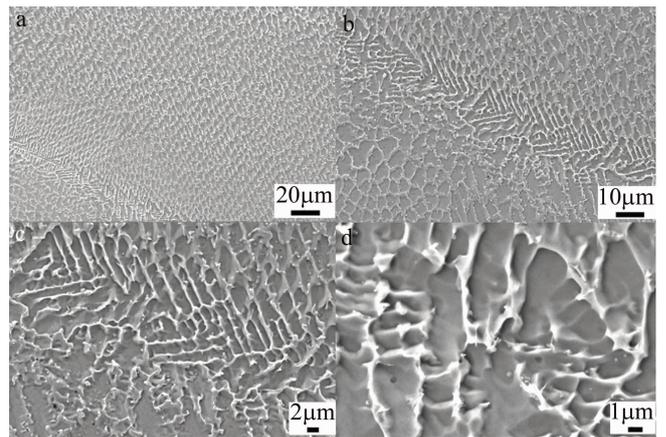


Fig. 5 a—micro morphology of the upper end of the wave pattern of the cladding layer b—dendrite distribution around wave pattern c—micro morphology of wave pattern d—wavy interior structure

波浪纹两侧组织形貌也不尽相同,以波纹为中界限,波纹以上主要分布着柱状晶组织,其生长方向与水平位置呈一定角度。波纹以下主要分布着柱状晶和二次网状枝晶,两种晶粒在形核长大的过程中,由于热对流与热传导的作用,柱状晶区域与二次网状枝晶区域间界线明显,两种晶粒形貌相差较大。熔覆层中存在波纹形貌,柱状晶镜面生长,晶粒在生长过程中,同一侧按相同方向外延生长,与另外一侧生长方向相反,其生长过程类似于镜中成像原理。

图 6 所示为不同放大倍数 SEM 下高温合金熔覆层与基材 2Cr25Ni20 结合位置。如图 6a ~ 图 6d 所示, 在结合位置观察到层状微观组织结构和不同尺寸晶粒的存在。基材和粉末被熔化之后, 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, 温度梯度降低, 形成成分过冷区, 故在结合位置临近熔覆层处, 该处产生胞状晶, 晶粒较小, 分布均匀, 临近基材位置处, 其大小不一, 分布不均匀, 因为热量在该位置反复输入、输出, 组织经过回火热处理导致较大尺寸的枝晶生成。故在该位置易产生缺陷, 在后续研究中应该控制热量的输入。

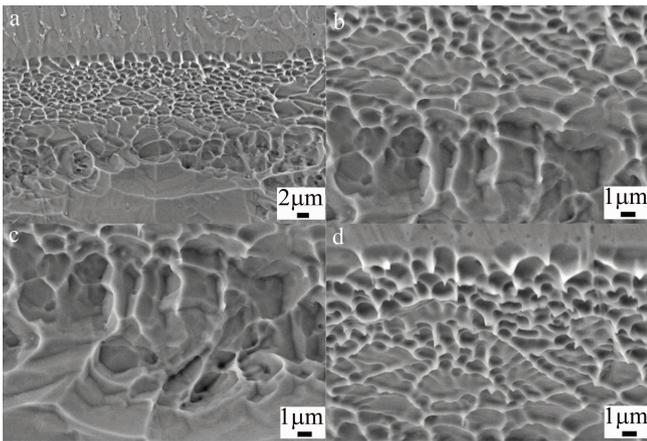


Fig. 6 a—bonding position of cladding layer and substrate b—middle position of joint c—reticulated dendrite morphology d—dendrite growth morphology at the upper end of the junction

在首层熔覆层成形过程中, 基材处于室温状态下, 激光提供大量热量将基材加热, 甚至将其表面熔化, 熔深主要与功率、扫描速度有关, 由于激光作用下所形成的熔池与冷基体之间的温度梯度较大, 熔池的冷却速率相对较大, 大量热量通过基材传入空气中, 基材为金属件, 易导热, 传热速度快, 因此在基体附近一定不会产生二次枝晶。但是, 随着结合区上端位置温度梯度降低, 凝固速率升高, 上端位置晶粒在该动态变化的情况下, 生长为典型的胞状枝晶结构和次生枝晶。

2.3 镍基高温合金熔覆层物相与耐高温性能分析

通过 D/max2500 XRD 分析了熔覆层、熔覆层与基材结合处之间物相的种类, 牛津 200 EDS 主要分析关键元素通过过渡区向首层熔覆层向上层扩散效应和分布规律。如图 7 所示, 熔覆层与结合处所含物相种类不同。熔覆层所含物相包含: γ -Ni (面心立方结构)、 $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ (金属间化合物), 在熔覆层结合位置包含物相: Fe_2Ni_3 , γ -(Fe, Ni), $\text{Ni}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}$ 。熔覆层主要耐热强化相主要是 γ -Ni 相, 熔覆层中大量的 Cr 元素均匀分

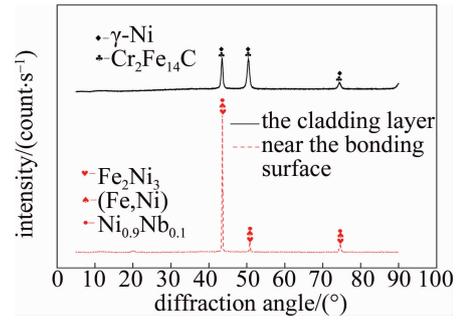


Fig. 7 XRD phase diagram of the junction between the cladding layer and the substrate and the cladding layer

布于 γ -Ni 固溶体中, 对 γ -Ni 相固溶强化起促进作用, 并且让熔覆层在高温下获得较高强度。由于熔覆层内 Nb 元素含量较少, 并且该沉淀固溶相非常细小, 由于熔覆层温度变化快速, 该沉淀物并没有经过粗化过程, 故 XRD 扫描检测时没有观察 Ni_3Nb 强化相。Ni 基合金凝固过程中, 在熔覆层与基材结合位置处, 各晶界处容易形成 laves 相, 该相为一种脆硬相, 该相存在位置容易形成裂纹, 在 SEM 图片中观察到在熔覆层表面有白色细小颗粒存在, 并在该位置处该相出现。

通过对熔覆层横截面进行 EDS 线扫描, 得到熔覆层中含有元素 Ni, Cr, Fe, Mo, C, Nb。在图 8a 中 600 μm 处熔覆层与基材结合位置, Ni 元素相对强度瞬时性升高, Fe 元素相对强度明显减弱, 在图中上述位置处, Nb 与 Mo 元素相对强度也突然升高, 基材中 Nb 元素相对强度不为零, 从表 1 中可知, 基材中并不含有

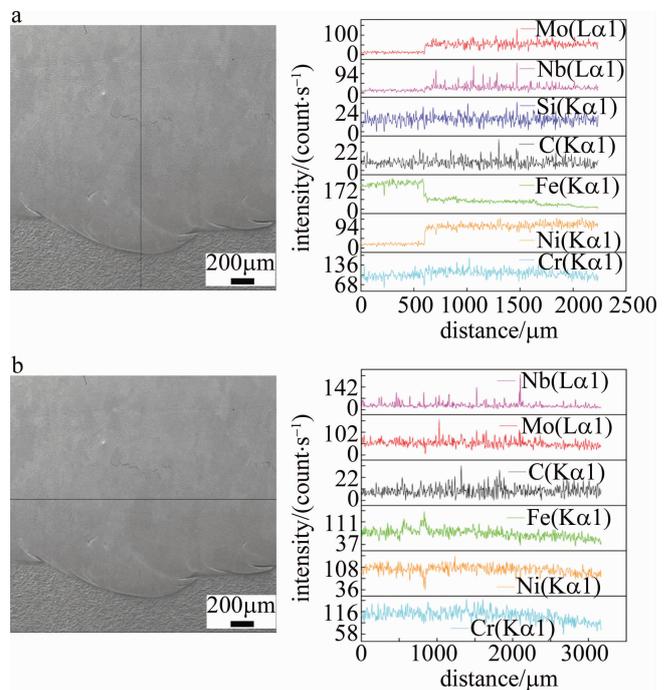


Fig. 8 a—EDS line scan of cross section from substrate to cladding layer b—EDS line scan of cross section of cladding layer

Nb 与 Mo 元素,说明元素在熔池金属液体对流作用下发生相对扩散,由熔覆层扩散至基材中,由高浓度扩散至低浓度,说明在该工艺参量下稀释作用明显。在图 8b 中各元素相对强度基本平稳,但是在某些位置相对强度会瞬时性升高或降低,说明在熔覆层中,熔融液体表面张力、保护气与熔池作用以及金属液体发生对流作用下,元素分布会发生些许扰动,但总体上元素分布还是较为均匀。其它元素相对强度可能不相同,但是从基材至熔覆层相对强度几乎无较大变化,说明位置的变化过程中,熔覆层浓度大体相同,无扩散过程。

2.4 显微硬度测试

熔覆层显微硬度与试样横截面显微硬度如图 9 所示。熔覆层显微硬度范围为 $267\text{HV}_{0.3} \sim 303\text{HV}_{0.3}$, 熔覆层显微硬度在同一水平位置变化较大,基材显微硬度范围为 $248\text{HV}_{0.3} \sim 284\text{HV}_{0.3}$, 熔覆层至基材方向显微硬度先增大后减小,在基材与熔覆层结合位置显微硬度变化最快,在该位置晶界外大量共晶组织阻碍树枝晶生长,使晶粒细化。在连续激光辐照在基材表面,基材受到激光重熔的作用,使组织分布均匀,故显微硬度又升高,再降低,由于突然在基材表面输入大量能量,故在基材内部会形成热影响区。随着激光离该区域距离增加,温度逐渐降低,热影响明显减弱,硬度又回到较低硬度。

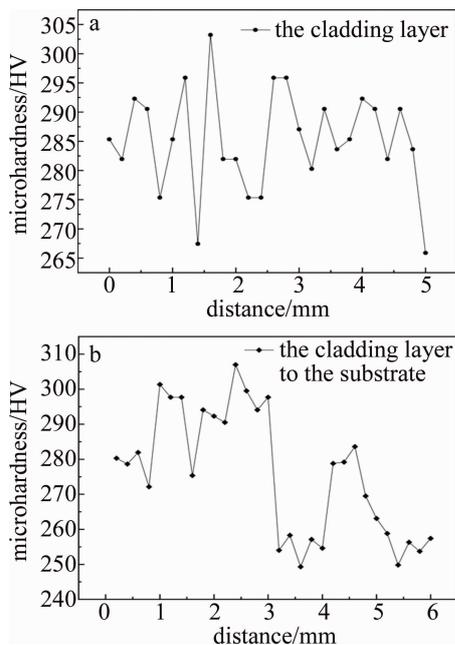


Fig. 9 a—cladding layer cross-sectional hardness b—cladding layer-base material cross-sectional hardness

2.5 常温力学性能测试

图 10 所示为修复试样室温拉伸曲线。2Cr25Ni20

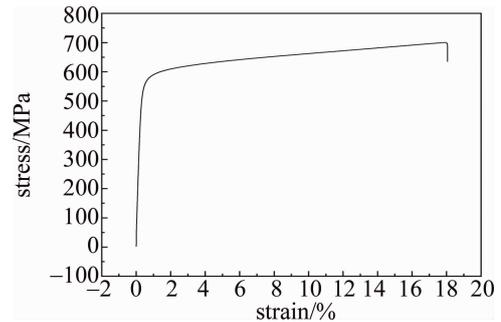


Fig. 10 Repair sample tensile curve at room temperature

钢 NiCrFeMo 高温合金修复试样室温抗拉强度为 700MPa , 图中屈服点不明显, 断后延伸率为 16.5% , 规定塑性延伸强度 $R_p = 553\text{MPa}$, 根据国家标准 GB-T1221-2007, 2Cr25Ni20 钢抗拉强度为不小于 590MPa , 断后延伸率为 40% , 规定塑性延伸强度 $R_p = 205\text{MPa}$, 经过比较, 修复件抗拉强度升高, 强度增大。断后伸长率明显下降, 塑性降低。

3 结论

综上所述, 利用激光熔覆技术制备 NiCrFeMo 高温合金涂层, 采用多种测试手段对试样的显微组织微观结构和常温力学性能进行了研究。

(1) 激光熔覆成形熔覆层试样表面平整光滑, 无缺陷产生。

(2) 熔覆层中含有元素 Ni, Cr, Fe, Mo, C, Nb 和 Nb 与 Mo 元素在熔池金属液体对流作用下向基材发生相对扩散, 熔覆层存在物相有: $\gamma\text{-Ni}$, $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$, 在熔覆层结合位置包含物相: Fe_2Ni_3 , $\gamma\text{-(Fe, Ni)}$, $\text{Ni}_{0.9}\text{Nb}_{0.1}$, 在结合位置处有少许 laves 相产生。Cr 元素均匀分布于 $\gamma\text{-Ni}$ 固溶体中, 对 $\gamma\text{-Ni}$ 相固溶强化起促进作用, 且熔覆层与基材结合处生成其它固溶体, 提升修复试样耐高温性能。

(3) 熔覆层容易受到热循环二次加热影响, 熔覆层的硬度分布呈波动状, 其硬度值范围为 $267\text{HV}_{0.3} \sim 303\text{HV}_{0.3}$, 基材显微硬度范围为 $248\text{HV}_{0.3} \sim 284\text{HV}_{0.3}$, 两者差值不大于 $30\text{HV}_{0.3}$ 。熔覆层至基材方向显微硬度先增大后减小, 在基材与熔覆层结合位置显微硬度变化最快。在热影响区内发生马氏体相变, 显微硬度先升高, 再降低。

(4) 2Cr25Ni20 钢 NiCrFeMo 高温合金修复试样与 2Cr25Ni20 钢力学性能参量比较, 修复件抗拉强度升高, 强度增大, 断后伸长率下降, 塑性降低。

(5) 利用激光熔覆技术对该零件进行修复, 获得更优耐高温、力学性能, 故可使用该方法对钢炉转动

轴旋转轴进行修复。

参 考 文 献

- [1] LIU B Ch, HUANG T Y. China materials engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:204 (in Chinese).
- [2] CHEN Sh M. Research on high temperature properties of $Al_2O_3/20Cr25Ni20$ composite material or roll [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013:5-10 (in Chinese).
- [3] WANG E Z, XU Y P, BAO Ch G, *et al.* Preparation of Al_2O_3 particles/heat-resistant steel composite material and high-temperature abrasive wear properties [J]. Journal of Composite Materials, 2004, 21 (1):56-60 (in Chinese).
- [4] HAO Y B, WANG J, YANG P, *et al.* Research on microstructure and properties of laser cladding tin-based babbitt alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8):0802009 (in Chinese).
- [5] CHEN Zh J, DING Y M, DONG G, *et al.* Analysis of microstructure and Cr content of low Cr alloy modified layer prepared by laser cladding on 9% Cr steel [J]. Surface Technology, 2020, 49(2):281-287 (in Chinese).
- [6] DONG Sh Y, MA Y Zh, XU B Sh, *et al.* Research status of laser cladding materials [J]. Material Guide, 2006, 20(6):10-14 (in Chinese).
- [7] SONG X H, ZOU Y F, XING J K, *et al.* Performance comparison of 35CrMo laser cladding iron-based alloy and nickel-based alloy coating [J]. Laser Technology, 2015, 39(1):39-45 (in Chinese).
- [8] LU H F, PAN Ch Y, QIN E W, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding WC/Ni-based alloy composite coating on 45 steel [J]. Metal Heat Treatment, 2019, 44(12):19-25 (in Chinese).
- [9] LIU P L, SUN W L, WANG G D, *et al.* The effect of scanning rate on the performance of laser cladding nickel-based alloy coating [J]. Laser Technology, 2018, 42(6):845-848 (in Chinese).
- [10] DENG D W, SUN J H, WANG X L, *et al.* Effect of laser power on the structure and properties of laser cladding nickel-based alloy coating [J]. Rare Metals, 2016, 40(1):20-25 (in Chinese).
- [11] GONG Ch, WANG L F, ZHU G X, *et al.* Influence of laser additive manufacturing process parameters on residual stress of cladding layer [J]. Laser Technology, 2019, 43(2):263-268 (in Chinese).
- [12] ZHANG D Q, ZHANG J Q, LI J H, *et al.* Effect of defocusing amount on laser cladding of self-fluxing Ni-based WC on 45# steel surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(12):92-97 (in Chinese).
- [13] LIU P L, SUN W L, HUANG Y. The effect of temperature gradient on cracks in laser cladding layer [J]. Laser Technology, 2019, 43(3):392-396 (in Chinese).
- [14] LI C, WHITE R, FANG X Y, *et al.* Microstructure evolution characteristics of Inconel625 alloy from selective laser melting to heat treatment [J]. Materials Science & Engineering, 2017, A58(8):20-31.
- [15] PAVITHRA E, SENTHILKUMAR V S. Microstructural evolution of hydroformed Inconel625 bellows [J]. Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics, 2016, 669(5):199-204.
- [16] CHUNG K H, RODRIGUEZ R, LAVERNIA E J, *et al.* Grain growth behavior of cryomilled Inconel625 powder during isothermal heat treatment [J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2002, A33(1):125-134.
- [17] JEYAPRAKASH N, YANG C H, RAMKUMAR K R. Microstructure and wear resistance of laser clad Inconel625 and Colmonoy 6 depositions on Inconel625 substrate [J]. Applied Physics, 2020, A126(6):1-11.
- [18] XU F J, LÜ Y H, YU Y, LIU Y X, *et al.* Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel625 alloy during pulsed plasma arc deposition process [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(5):480-488.
- [19] WANG X, XU X, GAO Y, *et al.* Research on microstructures and properties of Inconel625 coatings obtained by laser cladding with wire [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 715(8):362-373.
- [20] DINDA G P, DASGUPTA A K, MAZUMDER J. Laser aided direct metal deposition of Inconel625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability [J]. Materials Ence and Engineering, 2009, 509(1/2):98-104.
- [21] ROMBOUITS M, MAES G, MERTENS M, *et al.* Laser metal deposition of Inconel625: Microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(5):2575-2581.