



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.01.01

Nb对EA4T钢表面激光熔覆Fe基涂层组织与性能的影响

吴谊彬, 罗照洋, 陈文静*, 吴显文

西华大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610039

摘要: 通过在EA4T钢表面激光熔覆Fe-Cr-Ni-Nb粉末, 研究不同Nb含量对熔覆层的微观组织和力学性能的影响规律。利用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)分析熔覆层的组织形貌, 采用显微硬度计和冲击试验测试熔覆层的硬度及冲击韧性。结果表明: 在不同Nb含量的熔覆层中, 主要由奥氏体、FeNi固溶体和 $(Cr, Fe)_7C_3$ 组成; 随Nb含量的增加, 熔覆层的晶粒尺寸呈现细化现象。但与不含Nb的熔覆层相比, 当添加Nb元素后, 熔覆层的拉伸强度和屈服强度均得到显著提高, 0.3%Nb、0.6%Nb和0.9%Nb熔覆层试样的平均拉伸强度分别提高了42.5%、37.7%、13.1%, 平均屈服强度分别提高了26.5%、18.9%、14.1%, 均明显高于基体。此外, 熔覆层的冲击韧性也随着Nb含量的增加而得到提高, 与未添加Nb的熔覆试样相比, 平均冲击功分别增加8.3%、9.4%、26.4%。综合来看, Nb含量为0.9%的熔覆层综合力学性能最好。

关键词: 激光熔覆; Nb元素含量; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)01-0001-08

Effect of Nb on Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe-based Coating on EA4T Steel Surface

WU Yibin, LUO Zhaoyang, CHEN Wenjing*, WU Xianwen

School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China

Abstract: In this paper, the effects of different Nb contents on the microstructure and mechanical properties of the cladding layer were studied by laser cladding Fe-Cr-Ni-Nb powder on the surface of EA4T axle steel. The microstructure of the cladding layer was analyzed by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The hardness and impact toughness of the cladding layer were tested by microhardness tester and impact test. The results show that the cladding layer with different Nb content is mainly composed of austenite, FeNi solid solution and $(Cr, Fe)_7C_3$. With the increase of Nb content, the grain size of the cladding layer is refined. However, compared with the cladding layer without Nb, when the Nb element is added, the tensile strength and yield strength of the cladding layer are significantly improved. The average tensile strength increases by 42.5%, 37.7% and 13.1%, respectively, and the average yield strength increases by 26.5%, 18.9% and 14.1%, respectively. In addition, the impact toughness of the cladding layer is also improved with the increase of Nb content. Compared with the cladding sample without Nb, the average impact energy is increased by 8.3%, 9.4% and 26.4%, respec-

收稿日期: 2024-04-17 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 四川省科技支撑项目(2020Yfh0134); 西华大学重点项目(Z202123); 国家自然科学基金(52375387)

作者简介: 吴谊彬(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事先进表面连接技术研究。

通讯作者: 陈文静(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事先进表面连接技术研究。E-mail: njchenwenjing@163.com。

tively. On the whole, the cladding layer with Nb content of 0.9% has the best comprehensive mechanical properties.

Keywords: laser cladding; Nb element content; microstructures; mechanical properties

引用格式:吴宜彬,罗照洋,陈文静,等. Nb对EA4T钢表面激光熔覆Fe基涂层组织与性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(1): 1-8.

Citation: WU Yibin, LUO Zhaoyang, CHEN Wenjing, et al. Effect of Nb on Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe-based Coating on EA4T Steel Surface[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(1): 1-8.

0 引言

近年来,我国将EA4T钢车轴广泛应用于地铁及高速动车组机车中。随着高速列车服役时间的增加,其车轴的伤损问题日益凸显,未达到使用寿命就退出运行的车轴越来越多,且报废率呈逐年上升的趋势。相较于进行新车轴更换,对车轴进行修复可以延长其使用寿命,且能降低成本、节约资源,对于钢车轴的可重复应用具有重要意义。

激光熔覆技术作为一种新型的表面增材技术,利用高能激光束冲击材料表面,使基体表面薄层与熔覆材料共同熔化并快速凝固,形成冶金结合层,能有效修复损伤,改善基体性能,是航空航天、军工和轨道交通等领域的研究重点^[1-2]。在EA4T车轴钢的激光熔覆研究中,国内外学者主要使用铁基、镍基以及低合金粉末(合金元素含量<5%)作为熔覆材料。肖棚等人^[3]在EA4T车轴钢表面激光熔覆24CrNiMo合金粉末,发现熔覆层内部组织主要由胞状枝晶、柱状晶和取向随机的细小枝晶组成。该熔覆层的显微硬度、拉伸强度和屈服强度均显著高于基体,这归功于细晶强化和回火马氏体的形成。Chen^[4]等人在EA4T车轴钢上熔覆kf311粉末,熔覆层由柱状晶和细小的树枝晶组成,XRD结果显示熔覆层主要物相为 γ 和 Fe_2B ,这导致了熔覆层显微硬度值的提升。 $da/dn-\Delta K$ 曲线和断口形貌表明,熔覆层能够延缓EA4T钢疲劳裂纹萌生,提高疲劳寿命。蔡擎^[5]通过激光熔覆技术对损伤车轴EA4T钢表面进行修复,修复层的显微组织主要由 γ -Fe固溶体、 BNi_3 、 M_7C_3 和 Fe_3C 组成;激光熔覆后的EA4T钢的抗拉强度升高,但屈服强度和常温U型缺口冲击性能降低;李丛辰^[6]等人在EA4T钢表面激光熔覆Fe314合金熔覆层,熔覆层主要由奥氏体枝晶与枝晶间的 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 相组成。熔覆层的显微硬度高于基体,抗拉强度有所提升,但塑性和韧性降低。这些

研究表明,尽管激光熔覆技术在车轴修复方面取得了进展,但提升修复层的强韧性仍需进一步研究。

为了解决激光熔覆修复EA4T钢时熔覆层强韧性差的问题,一个最直接有效的方法是向熔覆材料中添加合金元素,特别是Nb元素,它能够细化晶粒并提升基体的强韧性。宋博瀚^[7]在45钢上激光熔覆添加Nb的镍基合金Ni60后,熔覆层的组织更细小,原位生成的NbC颗粒有效抑制了 Cr_7C_3 形成,从而提高了熔覆层的韧性。尚晓娟等人^[8]采用激光熔覆技术在W6Mo5Cr4V2AlA工具钢表面制备MoFe-CrTiWAlNb_x($x=1, 1.5, 2, 2.5, 3$)涂层。涂层主要由BCC相、MC相和少量Laves相组成。随着Nb含量的增加,先共晶碳化物数量减少、尺寸增加,呈现不规则颗粒状变化;刘自立等人^[9]的研究也表明,添加Nb能提高12Cr2Mo1R钢的强度和韧性。这些研究结果表明,通过在Fe-Cr-Ni合金粉末中添加适量的Nb元素,可以改变熔覆层的微观组织结构、相组成和晶粒尺寸,显著提升熔覆层的综合性能。这种方法可延长高速列车车轴等关键承载部件的使用寿命,对于提高铁路运输的安全性和经济性具有重要意义。

本文利用激光熔覆技术结合合金设计的方法,采用4 kW光纤激光器在EA4T车轴钢表面激光熔覆Fe-Cr-Ni合金粉末,分析讨论添加不同含量的Nb元素对熔覆后试样表面微观组织结构、硬度、强度和冲击性能的影响,通过深入探讨Nb元素在激光熔覆过程中的作用机制,为激光熔覆技术在高速列车车轴修复的应用提供研究基础。

1 试验材料及方法

EA4T车轴钢是一种低碳低合金钢,主要用于高速动车车轴,其微观组织由回火索氏体和少量先共析铁素体组成,如图1所示。熔覆合金由Fe-Cr-

Ni 粉末和纯 Nb 粉球磨进行混合,球磨的混粉参数为球粉比 8:1,球磨时间为 3.5 h,转速为 80 r/min。Fe-Cr-Ni 粉末颗粒形貌如图 2 所示,合金粉末呈规则球形,粉末颗粒直径为 90~120 μm,粉体的流动性为 30.78 g/s,松装密度为 4.537 g/cm³。基体材料与自制合金粉末的化学成分见表 1。

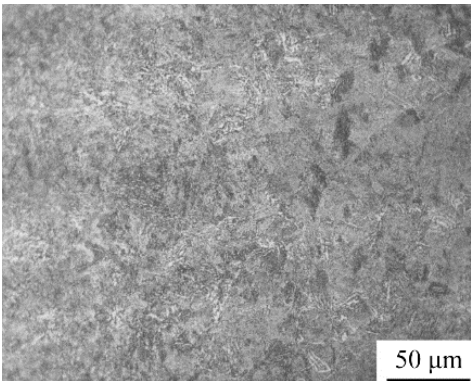


图 1 EA4T 车轴钢的显微组织
Fig. 1 Microstructure of EA4T axle steel

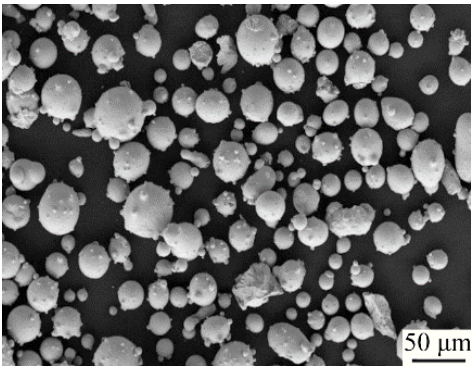


图 2 Fe314 合金粉末颗粒形貌
Fig. 2 Particle morphology of Fe314 alloy powder

表 1 基体材料与自制合金粉末的化学成分(质量分数,%)						
Table 1 Chemical composition of matrix material and self-made alloy powder (wt. %)						
元素	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si
EA4T	0.24	0.74	1.04	0.26	0.25	0.34
0% Nb	0.1	—	17.5	10.5	—	0.12
0.3% Nb	0.1	—	1.04	0.26	—	0.12
0.6% Nb	0.1	—	17.4	10.5	—	0.12
0.9% Nb	0.1	—	17.4	10.4	—	0.12
元素	Cu	B	S	P	Nb	Fe
EA4T	0.15	—	0.002	0.008	—	Bal.
0% Nb	—	0.65	—	—	—	Bal.
0.3% Nb	—	0.65	—	—	0.3	Bal.
0.6% Nb	—	0.65	—	—	0.6	Bal.
0.9% Nb	—	0.64	—	—	0.9	Bal.

激光熔覆过程中,采用 IPG YLS-4000 的 4 kW 高功率光纤激光器和 HUIRUI-O4T 双桶同轴送粉系统,激光熔覆工艺参数见表 2。由于在激光熔覆修复过程中激光熔池与其周围区域材料收缩和膨胀不协调,反复产生弹性和塑性应变而导致变形^[10]。为使高温下形成的熔覆件变形最小且长边和短边变形分布均匀以及降低组织内部残余应力,采用层错交错扫描策略,即上下两层熔覆层之间的扫描方向呈 90°,熔覆道之间以往复形式熔覆。熔覆时采用 99.999% 氩气进行粉末输送并对熔池进行保护。

表 2 激光熔覆工艺参数			
Table 2 Laser cladding process parameters			
激光功率 /W	扫描速度 /(mm·min ⁻¹)	送粉速度 /(g·min ⁻¹)	载气流量 /(L·min ⁻¹)
2 100	280	15.76	8
保护气流量/(L·min ⁻¹)		离焦量/mm	搭接率/%
30		0	40~50

熔覆试验后,沿垂直于熔覆扫描方向进行线切割取样,取样尺寸为 12 mm×12 mm×8 mm;然后按照粗磨、细磨和机械抛光顺序,磨制试样;然后采用 4% 硝酸+酒精腐蚀液对基体进行显蚀,用硝酸盐酸体积比为 1:3 的腐蚀液对熔覆层进行显蚀。

采用体式显微镜和 S3400N-SEM 对熔覆层进行显微组织观察,利用电子背散射衍射(EBSD)分析晶粒尺寸和晶体结构。硬度测试采用 JMHVS-1000AT 型显微维氏硬度计,加载载荷为 1.96 N,加载时间为 15 s。从熔覆层到基体每隔 0.1 mm 进行测量,同一深度测量 3 个点取平均值。采用 WDW-3100 微机控制电液伺服万能试验机进行拉伸试验,拉伸试验按照 GB/T228.1—2021《金属材料拉伸试验方法》进行,试样尺寸如图 3 所示;采用 JB-300B 型摆锤式冲击试验机,根据 GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击性能试验测试,试样尺寸如图 4 所示。

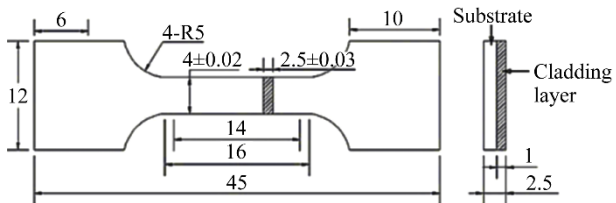


图 3 接头拉伸试样尺寸
Fig. 3 Joint tensile specimen size

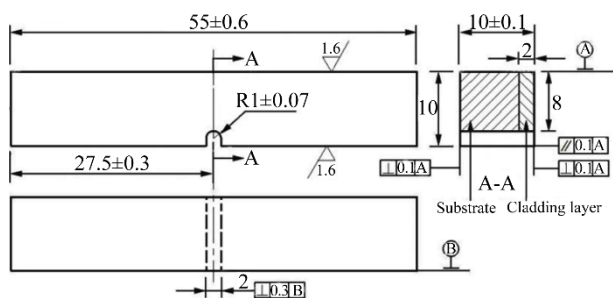


图4 接头冲击试样尺寸

Fig. 4 Impact specimen size of joint

2 试验结果与分析

2.1 显微组织结构

图5为添加了 $x\%$ Nb+Fe314粉末($x=0, 0.3, 0.6, 0.9$)熔覆层的物相分析结果。可以看出,加入Nb元

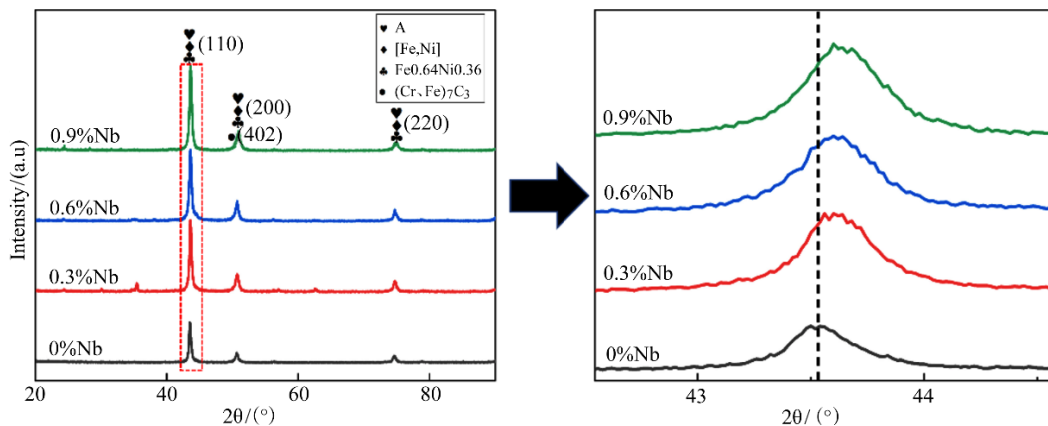


图5 不同Nb含量熔覆层的物相分析结果

Fig. 5 Phase analysis results of cladding layers with different Nb contents

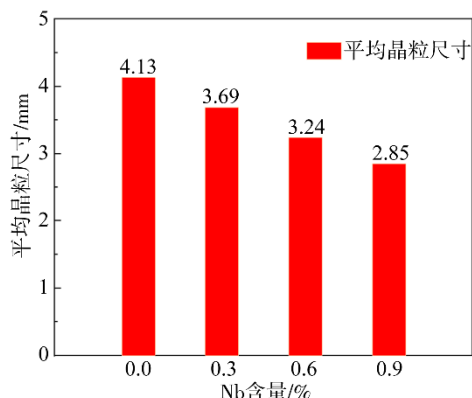


图6 不同Nb含量熔覆层的平均晶粒大小

Fig. 6 Average grain size of cladding layer with different Nb content

Nb含量为0.3%、0.6%、0.9%时熔覆层的SEM形貌如图7所示。分析表明,熔覆层与基体冶金结

素后,熔覆层的相并没有发生明显变化,主要为奥氏体、FeNi固溶体和 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 等;但其X射线衍射(XRD)峰随Nb含量的增加向右偏移。分析表明,Fe元素的原子半径为117 pm, Nb元素的原子半径为134 pm,加入比主体原子大的元素,其衍射峰按布拉格公式应向左偏移,但实际向右偏移,推断可能是存在的残余压应力引起的晶格畸变的或晶胞收缩导致。

采用Scherrer公式^[11]计算不同Nb含量的熔覆层的平均晶粒大小,其中:

$$D = K\lambda / (\beta \cos \theta) \quad (1)$$

式中 K 为常数; λ 为X射线波长; β 为衍射峰半高宽; θ 为衍射角。计算结果如图6所示,由图可知,随着Nb元素含量的增加,熔覆层的晶粒尺寸在减小,说明添加Nb元素起到了细化晶粒的作用。

合良好,熔覆层内部无气孔和裂纹缺陷。在激光热量作用下,粉末与EA4T车轴钢表面快速熔化并在基体表面上形成熔池,在凝固过程的初期,由于凝固界面处的 G/V 值很大并且几乎没有成分过冷,基体表面作为非均匀形核基底,液态金属在熔池与基体的界面处形核并沿着散热最快的反方向外延生长出一层平面晶^[12](见图7g、7h、7i)。平面晶形成后,基体温度明显升高,在远离熔池底部的区域 G/V 值迅速减小,由于溶质富集,出现成分过冷,在平面晶的上方沿着散热的反方向形成胞状枝晶。随着固-液界面继续向熔覆层中部推进,由于合金熔体的对流搅动作用增强且稀释程度降低,抑制了柱状树枝晶的生长。同时,固-液界面前沿温度梯度逐

渐减小,凝固速度变大^[13],所以生长出较细的树枝晶和胞状晶(见图7d、7e、7f)。在熔覆层顶部,热流不再单一地通过基体散热,开始向周围环境辐射热量。熔覆层的顶部出现组织细小且取向不同的枝晶,这是因为热流方向由垂直于界面变为逐渐与扫描方向平行的方向,在保护气体的流动与热流的共同作用下,形成细小且取向不一的细小树枝晶(见图7a、7b、7c)。

同时从图7a、7b、7c可观察到,随着Nb含量的

加入,熔覆层顶部组织先细化后粗化,共晶组织含量占比分别为14.79%、54.86%、14.46%,呈现出先增加再减少;组织形貌由大枝晶转变为柱状晶和小枝晶。由图7d、7e、7f可以看出,随着Nb含量的增加,熔覆层中部组织形貌由粗大的树枝晶转变为网状的枝晶,再转变为细小的胞状晶和细小树枝晶;共晶组织含量占比为9.61%、12.50%、21.55%,呈现出增大的趋势。从图7g、7h、7i可以看出,随着Nb含量的增加,熔覆层组织形貌变化不大。

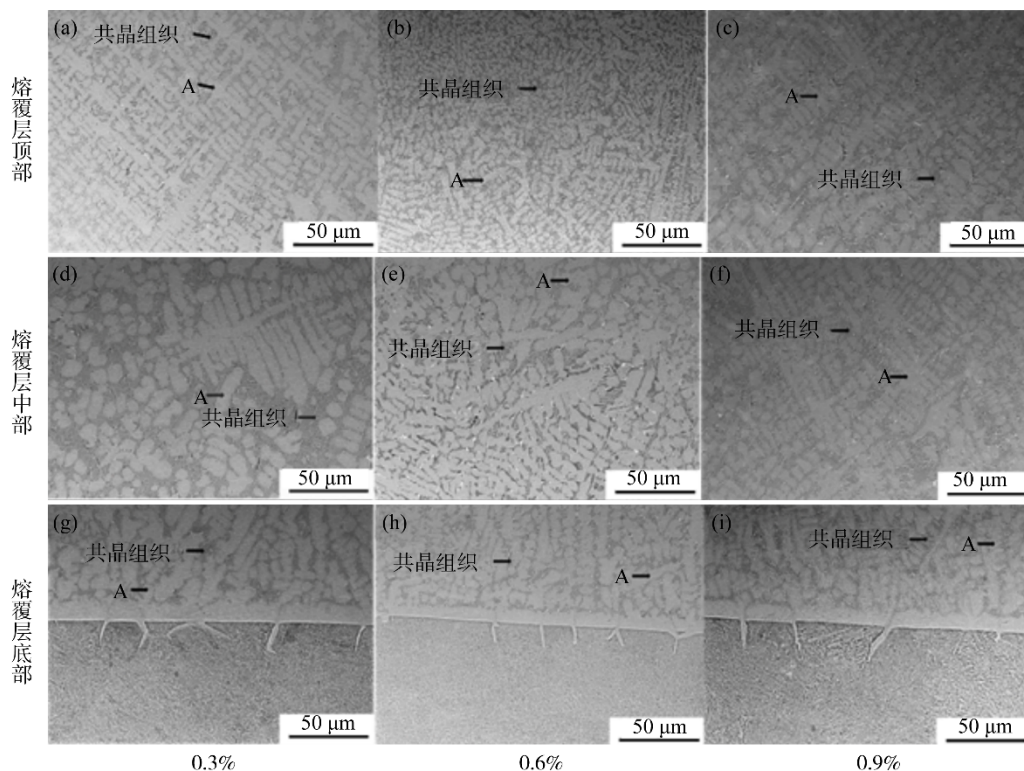


图7 Nb含量为0.3%、0.6%、0.9%时熔覆层的SEM形貌

Fig. 7 SEM morphology of the cladding layer when the Nb content is 0.3 %, 0.6 % and 0.9 %

图8为不同Nb含量熔覆层中部EDS面扫描结果。可以看出,添加了不同含量的Nb元素大都选择性地分布在共晶组织区域和晶界区域的交界处。且随着Nb元素的增加,共晶组织的形态也在发生着转变,从最开始的长棒状逐渐向片层状转变,这是因为Nb作为异质形核点起到了晶粒细化的作用,且加入了0.9%Nb后形成了Laves相^[14]。

图9为0.3%Nb熔覆层中部和0.9%Nb熔覆层中部的EBSD特征形貌。不同颜色代表不同的晶粒取向,绿色细线为2°~15°的小角度晶界,黑色细线为>15°的大角度晶界。由图9a、9c可以看出,晶粒取向

不一,且0.3%Nb的熔覆层晶粒更加细小;由图9b、9d可以看出奥氏体之间为大角度晶界,共晶组织内部为小角度晶界。大角度晶界对裂纹扩展起到阻碍作用,故大角度晶界占比越大其冲击韧性越高^[15]。由图9可以看出,0.9%Nb的大角度晶界更多,推测0.9%Nb熔覆层的冲击韧性大于0.3%Nb熔覆层。

2.2 力学性能

2.2.1 显微硬度

从熔覆层表面到基体的显微硬度分布如图10所示。由图10可以看出,添加了Nb的熔覆层的硬度可达400 HV_{0.2}以上,高于基体硬度。熔覆层的显

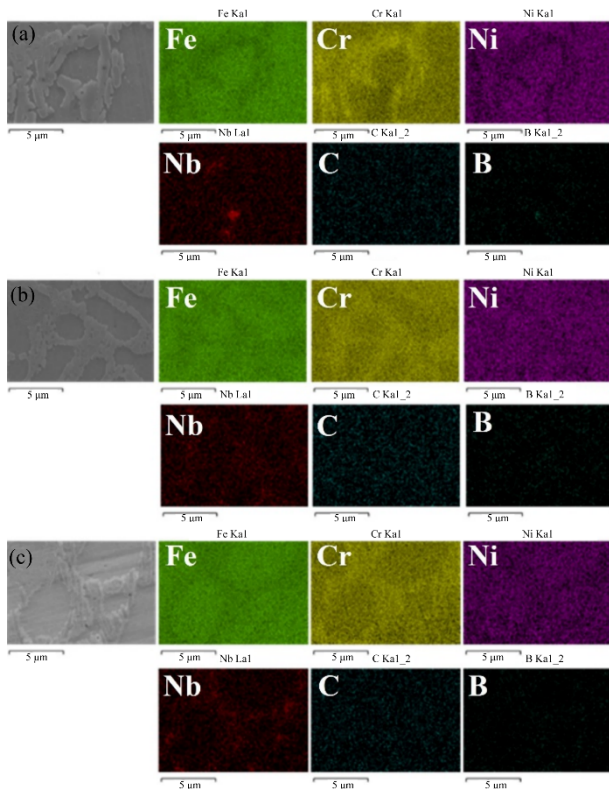
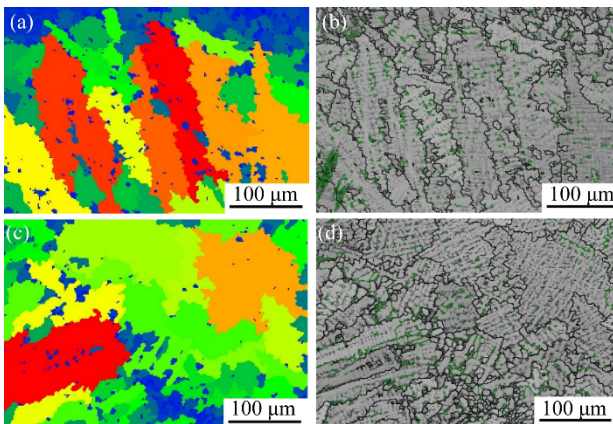


图8 不同Nb含量熔覆层中部EDS面扫描结果

Fig. 8 Scanning results of EDS surface in the middle of cladding layer with different Nb content



(a) 0.3%Nb熔覆层中部IPF图; (b) 0.3%Nb熔覆层中部大小晶界分布图; (c) 0.9%Nb熔覆层中部IPF图; (d) 0.9%Nb熔覆层中部大小晶界分布

图9 0.3%Nb熔覆层中部和0.9%Nb熔覆层中部的EBSD特征显示形貌

Fig. 9 EBSD characteristics of the middle part of the 0.3% Nb cladding layer and the middle part of the 0.9% Nb cladding layer show the morphology

微硬度升高主要得益于随Nb含量的增加,晶粒得到细化,且Laves相的析出量也在增加;其次是熔覆

层显微组织除奥氏体外,还有少量碳化物析出,而碳化物对位错有钉扎作用,使位错难以运动,使得其显微硬度有所增加^[16]。基体的显微硬度大约在250 HV_{0.2},其显微硬度受激光熔覆过程中传热作用影响,越靠近熔覆层界面硬度越高。热影响区的显微硬度相比基体的显微硬度有所增加,这是因为先熔覆的熔覆层作为下一道的高温基体,残留在熔覆层中的热量来不及扩散出去,前一道熔覆层保持较高的温度,巨大的热输入增强了基体的淬火效果^[17],使其在热影响区生成硬度较高的板条马氏体^[18]。

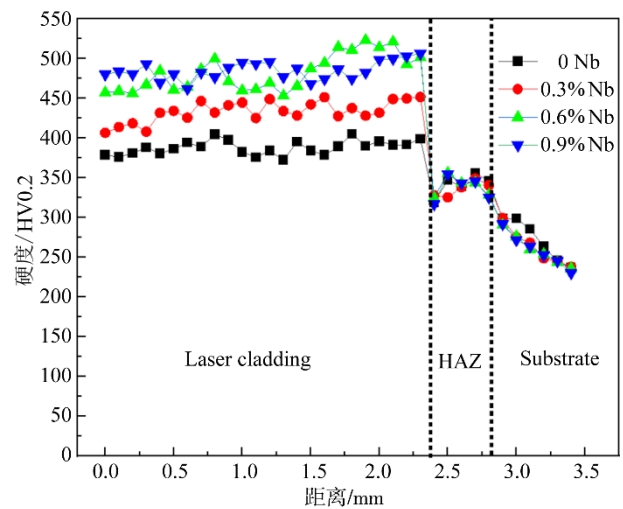


图10 不同Nb含量的熔覆层显微硬度

Fig. 10 Microhardness of cladding layer with different Nb content

2.2.2 拉伸性能

图11为不同Nb含量的熔覆试样的拉伸性能结果。由图11可以看出,相较于未添加Nb的熔覆试样,0.3%Nb的熔覆层的拉伸强度上升了42.5%,屈服强度上升了26.5%;0.6%Nb的熔覆层的拉伸强度上升了37.7%,屈服强度上升了18.9%;0.9%Nb的熔覆层的拉伸强度上升13.1%,屈服强度上升14.1%。结合微观组织分析,加入Nb元素后,Nb元素起到了细晶强化的作用,使熔覆试样拉伸强度和屈服强度均高于基体。但添加更多Nb元素后,其共晶组织的形貌也发生了转变,这又使得抗拉强度和屈服强度随Nb元素含量的增多而呈现出下降的趋势。

2.2.3 冲击性能

图12为不同Nb含量的熔覆试样的冲击试验结果。由图12可以看出,冲击韧性随着Nb含量的增加而增加,与未添加Nb的熔覆试样相比,0.3%Nb的

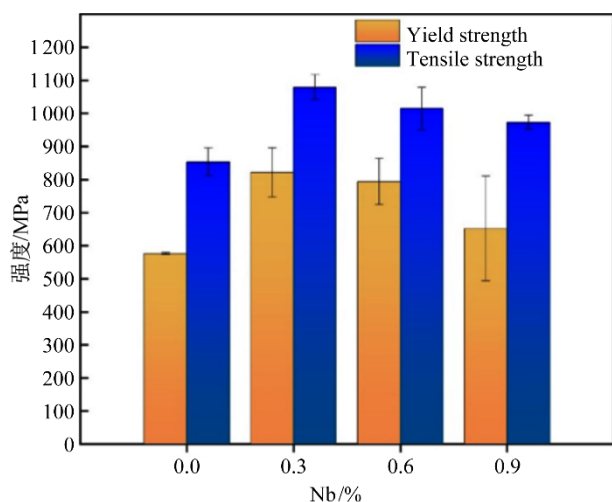


图11 不同Nb含量的熔覆试样的拉伸性能

Fig. 11 Tensile properties of cladding samples with different Nb contents

熔覆层的冲击韧性提高了8.3%,0.6%Nb的熔覆层提高了9.4%,0.9%Nb的熔覆层提高了26.4%。结合对XRD和微观组织分析,随Nb元素含量的增加,熔覆层的晶粒变得更加细小,而细小晶粒受到外力发生塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小;晶粒越细,晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展,这起到提高熔覆层的韧性的作用。

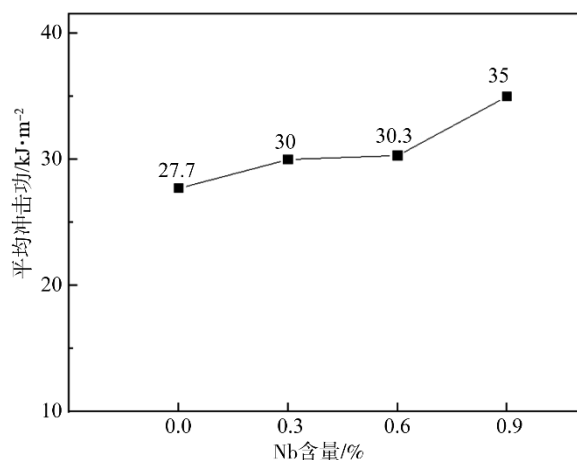


图12 不同Nb含量的熔覆试样的冲击试验结果

Fig. 12 Impact test results of cladding samples with different Nb contents

3 结论

通过在EA4T钢表面激光熔覆Fe-Cr-Ni-Nb粉

末,探讨了不同Nb含量对熔覆层微观组织和力学性能的影响。主要结论如下:

(1)不同Nb含量的熔覆层的相并没有发生明显变化,主要为奥氏体、FeNi固溶体和 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$;且随着Nb元素含量的增加,熔覆层晶粒尺寸逐渐细化。

(2)由于激光熔覆高温熔化和添加Nb元素使熔覆层出现细晶强化,熔覆层硬度达400 HV_{0.2}以上;与未添加Nb元素的熔覆层相比,0.3%Nb、0.6%Nb和0.9%Nb熔覆试样的平均拉伸强度分别提高了42.5%、37.7%、13.1%,平均屈服强度分别提高了26.5%、18.9%、14.1%,均明显高于基体。

(3)冲击韧性随着Nb含量的增加而增加,与未添加Nb的熔覆试样相比,0.3%Nb的熔覆层冲击韧性提高8.3%,0.6%Nb的熔覆层提高9.4%,0.9%Nb的熔覆层提高26.4%。

(4)综合来看,Nb含量为0.9%的熔覆层综合力学性能最好。未来研究可进一步探讨不同Nb含量对熔覆层耐磨性、耐腐蚀性等性能的影响,并结合数值模拟等方法深入揭示Nb元素在激光熔覆过程中的作用机制,以期激光熔覆技术的优化和应用提供更全面的指导。

参考文献:

- [1] 王明明,刘伟,伏利,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 冶金与材料,2024,44(01):73-75.
WANG M M, LIU W, FU L, et al. Research progress of laser cladding technology [J]. Metallurgy and materials, 2024, 44(01): 73-75.
- [2] 张津超,石世宏,龚燕琪,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术,2020,49(10):1-11.
ZHANG J C, SHI S H, GONG Y Q, et al. Research progress of laser cladding technology [J]. Surface technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [3] 肖棚,高杰维,刘里根,等. 激光熔覆修复EA4T车轴钢显微组织和强度评价[J]. 材料导报,2022,36(07):115-121.
XIAO P, GAO J W, LIU R G, et al. Microstructure and strength evaluation of EA4T axle steel repaired by laser cladding [J]. Material Bulletin, 2022, 36(07): 115-121.
- [4] Chen W, Chen H, Li C, et al. Microstructure and fatigue crack growth of EA4T steel in laser cladding remanufacturing [J]. Engineering Failure Analysis, 2017,

- 79:120-129.
- [5] 蔡擎,陈文静,陈晓男,等. EA4T 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Ni 涂层的组织与性能[J]. 西华大学学报(自然科学版),2017,36(02):33-37.
- CAI Q, CHEN W J, CHEN X N, et al. The microstructure and properties of laser cladding Fe-Cr-Ni coating on the surface of EA4T steel[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2017, 36(02): 33-37.
- [6] 李丛辰,陈文静,向超,等. EA4T 钢表面激光熔覆 Fe314 合金熔覆层的微观组织及性能[J]. 电焊机, 2016,46(05):73-77.
- LI C C, CHEN W J, XIANG C, et al. Microstructure and properties of laser cladding Fe314 alloy cladding layer on EA4T steel surface[J]. Electric Welding Machine,2016,46(05):73-77.
- [7] 宋博瀚. Nb 对激光熔覆镍基合金组织和性能的影响[D]. 河北:石家庄铁道大学,2016.
- SONG B H. The effect of Nb on the microstructure and properties of laser cladding nickel-based alloys [D]. Hebei:Shijiazhuang Railway University,2016.
- [8] 尚晓娟,刘其斌,郭亚雄,等. Nb 对激光熔覆 MoFe-CrTiWAlNb_x 高熔点高熵合金组织与性能的影响[J]. 功能材料,2017,48(12):12214-12220.
- SHANG X J, LIU Q B, GUO Y X, et al. Effect of Nb on microstructure and properties of laser cladding MoFeCrTiWAlNb_x high-melting-point high-entropy alloy [J]. Functional materials, 2017, 48(12): 12214-12220.
- [9] 刘自立,刘春明,张汉谦. 铌对 12Cr2Mo1R 厚板组织和性能的影响[C]//第九届全国压力容器学术会议, 2017:108-113.
- [10] 杨光,丁林林,王向明,等. 扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响[J]. 红外与激光工程, 2015,44(10):2926-2932.
- YANG G, DING L L, WANG X M, et al. Effect of scanning path on residual stress and deformation of laser repair titanium alloy[J]. Infrared and laser engineering,2015,44(10):2926-2932.
- [11] 周玉. 材料分析方法(第3版)[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [12] 董世运. 激光增材再制造及修复延寿技术[M]. 北京:国防工业出版社,2021.
- [13] 李强. 激光熔覆 Fe-Cr-C 系合金涂层的性能优化研究[D]. 甘肃:兰州理工大学,2019.
- LI Q. Research on performance optimization of laser cladding Fe-Cr-C alloy coating [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology,2019.
- [14] Guan Y, Cui X, Chen D, et al. Preparation of hypereutectic-eutectic-hypoeutectic gradient high-entropy alloy coating by in-situ interfacial reaction between Nb and FeCoCrNi[J]. Materials Letters,2023,346:134573.
- [15] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [16] 周登攀,唐红春,王海叶. 金属材料与热处理[M]. 湖北:华中科技大学出版社,2016.
- [17] Sun B, Cheng J, Cai Z, et al. Formation and wear property of broad-beam laser clad Fe-based coatings [J]. Surface and Coatings Technology,2021,405:126598.
- [18] 华俊伟. EA4T 车轴钢激光熔覆 Mo 基涂层研究[D]. 四川:西南交通大学,2018.
- HUA J W. Research on laser cladding Mo-based coating of EA4T axle steel [D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University,2018.