

DOI: 10.11973/jxgccl240153

# 堆焊电流对 Fe-Cr-W-Nb 药芯焊丝堆焊熔覆层组织及性能的影响

张子锐, 潘应君, 柯德庆

(武汉科技大学材料学部, 武汉 430081)

**摘要:** 设计了一种 Fe-Cr-W-Nb 药芯焊丝, 采用埋弧堆焊技术在不同堆焊电流 (350, 400, 450, 500 A) 下在 Q235 钢基体表面制备熔覆层, 研究了堆焊电流对熔覆层组织、显微硬度及高温耐磨性能的影响。结果表明: 不同堆焊电流制备的熔覆层均主要由 Fe-Cr 固溶体、 $M_{23}C_6$ 、NbC 以及少量  $M_7C_3$ 、 $Fe_3W_3C$  等物相组成; 随着堆焊电流的增大, NbC 硬质相颗粒形状逐渐规则, 当堆焊电流为 450 A 时, 熔覆层中的硬质相颗粒形状最规则, 尺寸一致, 分布均匀, 熔覆层与钢基体形成良好的冶金结合, 当堆焊电流过大 (500 A) 时, 硬质相颗粒互相连接形成不规则形状, 尺寸明显增大, 分布不均匀。随着堆焊电流的增大, 熔覆层的显微硬度先增大后减小, 磨损质量损失先减小后增大, 当堆焊电流为 450 A 时, 熔覆层显微硬度最大, 磨损质量损失最小, 耐磨性能最优, 磨损机制为氧化磨损。

**关键词:** 药芯焊丝; 埋弧堆焊; 熔覆层; 高温耐磨性能; NbC

**中图分类号:** TG423

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2025)02-0080-06

## 0 引言

热作模具长时间工作于高温高压环境, 常会因磨损、开裂和腐蚀等原因而发生失效<sup>[1]</sup>。通过表面涂覆、表面改性和表面处理等表面工程技术在模具表面形成一层性能优异的涂层或改性层, 是一种经济有效的提升模具性能的方法<sup>[2]</sup>。热作模具表面的涂层或改性层应具有抗高温磨损的能力。目前, 国内外主要有铁基、钴基和镍基 3 大类高温耐磨材料, 其中铁基材料的耐磨性能良好、价格低廉、适用范围较广。在铁基合金材料中, 碳与合金元素形成 NbC、WC、TiC 等碳化物, 可细化晶粒、改善材料组织<sup>[3-4]</sup>, 并且 NbC 等硬质相均匀分布在韧性较好的铁基合金中, 有利于提升铁基涂层的硬度及高温耐磨性能<sup>[5-6]</sup>。

埋弧堆焊是一种常用的表面强化技术, 通过在基材表面堆焊一层或多层合金熔覆层来改善基材表面性能<sup>[7-8]</sup>。埋弧堆焊制备的铁基合金熔覆层能与基体实现良好的冶金结合, 并且抗磨损能力较强, 在热作模具表面修复和增强改性方面得到广泛应用<sup>[9-10]</sup>。艾孝文等<sup>[11]</sup>采用埋弧堆焊技术在 Q235 钢板表面制

备 Fe-Cr-C-Nb-V 系合金堆焊层, 该堆焊层的组织由  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 基体, 以及 MC、 $M_7C_3$  和  $M_3C$  硬质相等组成, 组织致密, 常温耐磨性较好。

目前, 针对铁基合金熔覆层在 800 °C 高温下的耐磨性能研究较少。堆焊电流是埋弧堆焊关键工艺参数之一, 对熔池温度、冷却速率、熔覆层组织等有着直接影响。作者采用自制的 Fe-Cr-W-Nb 药芯焊丝, 在 Q235 钢基体表面堆焊熔覆层, 研究了堆焊电流对熔覆层组织与硬度的影响, 并研究了熔覆层在 800 °C 高温下的耐磨性能, 拟为制备高温耐磨熔覆层提供一定的理论依据。

## 1 试样制备与试验方法

自制 Fe-Cr-W-Nb 药芯焊丝, 外皮为 430 不锈钢钢带, 药芯和钢带的化学成分见表 1。药粉过 60 目筛后干燥、混合均匀后装入 U 型不锈钢钢带槽中, 采用 LZ6/560 型药芯焊丝成型机轧成直径为 4.4 mm 的 O 型截面焊丝, 经拉拔处理依次减径 0.5 mm, 直至直径为 2.4 mm。药芯焊丝的粉末填充率约为 45%。

Q235 钢基体试样的尺寸为 30 cm × 20 cm × 12 cm, 堆焊前将其表面用角磨机磨平, 去除表面油污以及氧化皮, 直至露出金属光泽。使用 MZ1250 型埋弧焊机在处理好的基体表面制备熔覆层, 堆焊电流分别为 350, 400, 450, 500 A, 堆焊电压为 37 V,

收稿日期: 2024-03-25; 修订日期: 2024-12-28

基金项目: 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室青年基金资助项目(2018QN04)

作者简介: 张子锐(1996—), 男, 山西原平人, 硕士研究生

通信作者(导师): 潘应君教授

表1 自制药芯焊丝中药芯和430不锈钢钢带的化学成分

Table 1 Chemical composition of flux core and 430 stainless steel strip of self-made flux cored wire

材料	质量分数/%										
	C	Si	Cr	W	Nb	Mn	P	S	Ni	Mo	Fe
药芯	2.5~2.8	1.0~1.5	23~25	5~7	3~5	1~2					余
钢带	≤0.12	≤1.00	16			≤1.00	≤0.04	≤0.03	≤0.60	2	余

堆焊速度为  $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

采用数控走丝线切割机床在堆焊试样表层切割出尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的金相试样,对其截面进行打磨抛光,用由质量比为 1:10:20 的  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  组成的三氯化铁溶液腐蚀 15 s 后,采用多功能 ZEISS Axio plan2 型光学显微镜(OM)观察截面显微组织。采用 X Pert PRO MPD 型 X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的物相组成,工作电压为 50 kV,工作电流为 200 mA。采用 Nova 400 Nano 型场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察熔覆层微观形貌,用附带的能谱仪(EDS)分析微区成分。采用 HX-500 型显微硬度测试计测试熔覆层的截面显微硬度,载荷为 9.8 N,保载时间为 10 s,沿深度方向每隔  $20 \mu\text{m}$  取点测试,相同深度测 3 个点取平均值。在堆焊试样上切割出尺寸为  $\phi 4.8 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$  的销试样,在淬火态 GCr15 钢上切割出尺寸为  $\phi 44 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的圆柱形底盘,在 MUZ-10Z 型高温真空摩擦磨损试验机上进行销盘摩擦磨损试验,试验温度为  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,转速为  $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,载荷为 100 N,时间为 120 min,测试 3 组,每组 2 个平行销试样。使用精度为 0.000 1 g 的电子天平称取试样磨损前后的质量,计算磨损质量损失。采用 FESEM 观察磨损形貌。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 物相组成

由图 1 可知,不同堆焊电流制备的熔覆层均存在

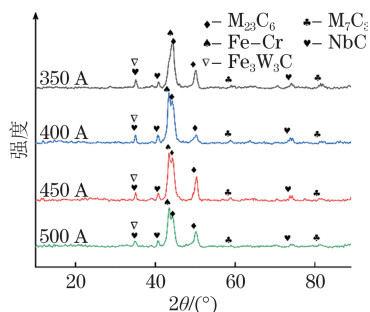


图1 不同堆焊电流制备熔覆层的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of cladding layer prepared under different surfacing currents

Fe-Cr 固溶体、 $\text{M}_{23}\text{C}_6$ 、NbC 以及少量  $\text{M}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  等物相, M 代表铁、铬等元素。Fe-Cr 固溶体和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  相的衍射峰强度相对较高,说明熔覆层主要由 Fe-Cr 固溶体和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  碳化物组成。

### 2.2 显微组织

由图 2 可见,不同堆焊电流制备的熔覆层与基体结合界面处均未出现裂纹、孔洞等缺陷。当堆焊电流为 350 A 时,熔覆层与基体之间的熔合线附近存在大量白色长条形区域(箭头所指),这是因为低电流下热输入小,熔覆层与钢基体反应不充分;随着堆焊电流的增大,热输入逐渐提升,白色长条形区域减少,当堆焊电流为 450 A 时,几乎不存在白色长条形区域,熔覆层与基体之间的熔合线清晰,说明在此堆焊电流下热输入适中,熔覆层与钢基体反应充分;当堆焊电流继续增大至 500 A 时,由于热输入较大,熔覆层与基体之间的熔合线较模糊,熔合线附近白色长条形区域较少,说明基体表面熔化量过多并与熔覆层混合,过会导致熔覆层中合金元素浓度的稀释,影响熔覆层性能。

由图 3 可知,从熔覆层向基体方向,铬和铌元素含量降低,铁元素含量增加。这是因为在堆焊过程中的高温作用下,熔覆层中高含量的铬和铌等元素向钢基体一侧扩散,钢基体中的铁元素向熔覆层扩散,从而在熔合区形成具有元素浓度梯度变化的区域;钢基体与熔覆层之间形成良好的冶金结合<sup>[12]</sup>。

由图 4 可见,不同堆焊电流下熔覆层中均出现了浅灰色块状颗粒、深灰色网状相和灰色 Fe-Cr 固溶体基体相。结合表 2 和 XRD 分析可知:浅灰色块状颗粒中碳与铌元素含量较高,且原子比接近于 1:1,推断为 NbC 硬质相;网状相中铬和铁元素含量高,这 2 种元素与碳元素原子比约为 23:6,推断为  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$  碳化物。铌元素是强碳化物形成元素,在埋弧堆焊过程中和碳原子经过原位反应形成 NbC 硬质相<sup>[13]</sup>,对硬度与耐磨性的影响远大于铬碳化物<sup>[14]</sup>;  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$  网状碳化物的硬度高,在具有韧性的 Fe-Cr 固溶体基体中起到支撑和强化作用,可作为抗磨损的“骨架”提升熔覆层的硬度和耐

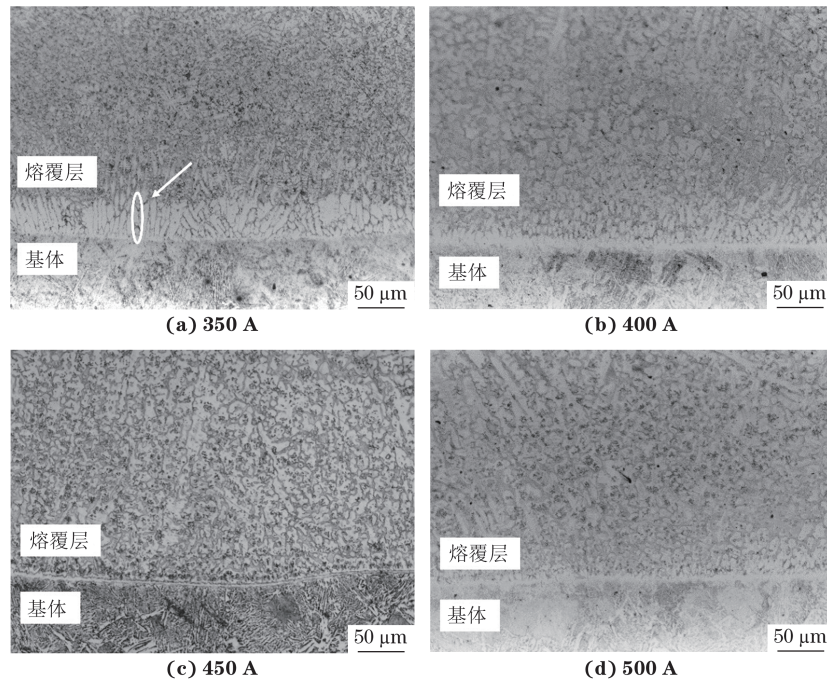


图2 不同堆焊电流制备熔覆层的 OM 形貌

Fig. 2 OM morphology of cladding layer prepared under different surfacing currents

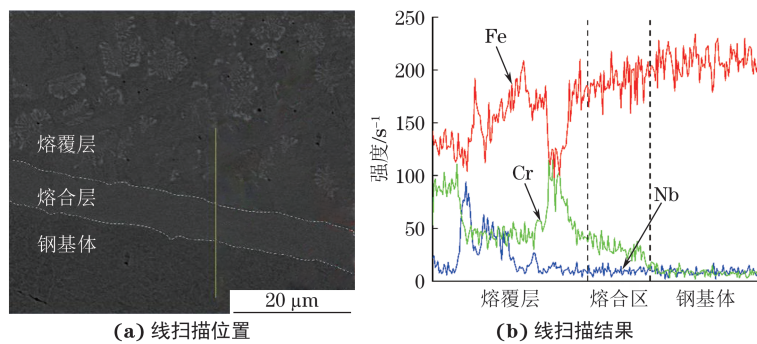


图3 在堆焊电流 450 A 下制备熔覆层结合界面处的 EDS 线扫描位置及结果

Fig. 3 EDS line scanning position (a) and results (b) at bonding interface of cladding layer prepared at surfacing current of 450 A

磨性<sup>[15-16]</sup>。

堆焊电流的差异使得熔池的温度有所不同,进而影响熔覆层的冷却时间,因此原位生成的NbC形核点的生长发育时间也不同,导致NbC形状各异。当堆焊电流为350 A时,熔池温度较低且冷却时间短,块状颗粒形核点数量较多,块状颗粒的形状不规则,并且Fe-Cr固溶体基体中存在少量孔洞;随着堆焊电流的增大,熔池温度提高且冷却时间延长,块状颗粒形状变得规则,Fe-Cr固溶体基体中孔洞数量有所下降;当堆焊电流为450 A时,块状颗粒形状最规则,尺寸较为一致,分布均匀且Fe-Cr固溶体基体中孔洞数量明显下降;当堆焊电流为500 A时,块状颗粒过度生长,先形成的块状颗粒互相连接形成不规则形状,并抑制周围形核点长大,从而析出呈短棒状等形状的小块状颗粒,这些小块状颗粒会产生

偏聚,互相吸引聚集在较大的NbC硬质相周围<sup>[17]</sup>,这会增加熔覆层的脆性,导致硬度降低。由熔覆层的微观形貌分析可知,在Q235钢表面埋弧堆焊Fe-Cr-W-Nb合金熔覆层的最佳电流为450 A。

### 2.3 显微硬度

由图5可知:不同电流堆焊熔覆层的硬度未随深度发生突变,显微硬度在450~500 HV之间;在熔合区,随着距基体距离增大,硬度增大。当堆焊电流分别为350, 400, 450, 500 A时,熔覆层的平均显微硬度分别为468.9, 463.4, 472.1, 444.3 HV,可知随着堆焊电流的增大,堆焊层显微硬度先增大后减小。随着堆焊电流的增大,热输入逐渐提升,使得硬质相形状变得规则,尺寸逐渐一致,分布逐渐均匀,当堆焊电流为450 A时熔覆层中硬质相颗粒形状最规则,尺寸较一致,分布均匀,此时显微硬度曲线起伏波动

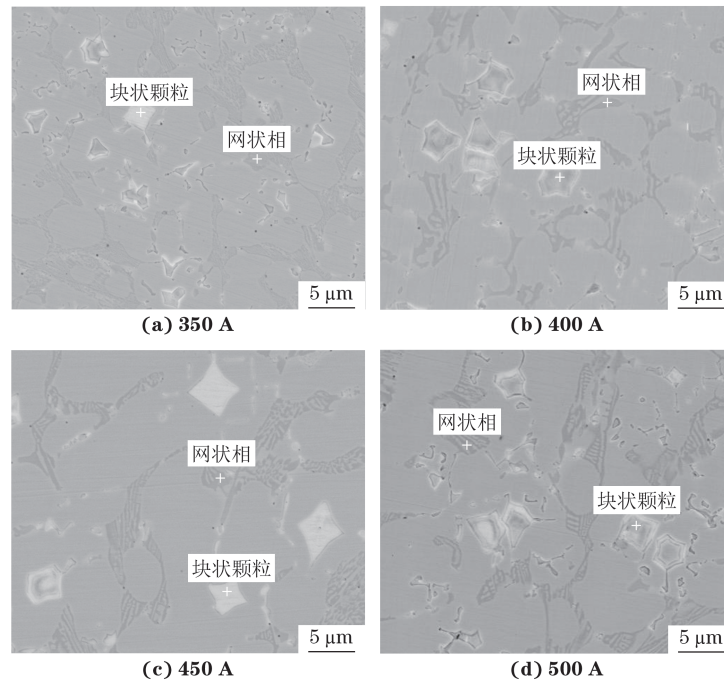


图4 不同堆焊电流制备熔覆层的FESEM形貌

Fig. 4 FESEM morphology of cladding layer prepared under different surfacing currents

表2 不同堆焊电流制备熔覆层中不同相的EDS分析结果  
Table 2 EDS analysis results of different phases in cladding layer prepared under different surfacing currents

物相	堆焊 电流/A	原子分数/%				
		Fe	Cr	W	Nb	C
块状 颗粒	350	2.07	3.10	0.75	41.39	52.69
	400	2.23	2.86	0.70	42.90	51.31
	450	1.62	3.08	0.70	41.82	52.78
	500	2.74	2.77	0.61	47.33	46.55
网状相	350	60.33	24.80	1.51	0.20	13.16
	400	28.84	47.72	1.10	0.37	21.97
	450	31.21	44.80	1.17	0.23	22.59
	500	36.20	41.57	0.74	0.30	21.19

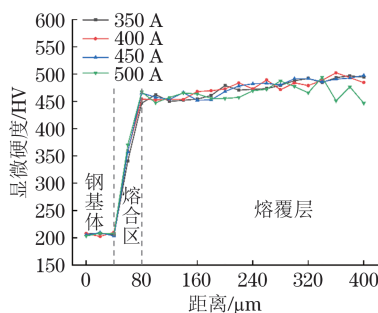


图5 不同堆焊电流制备熔覆层的截面显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution on cross-section of cladding layer prepared under different surfacing currents

最小,熔覆层显微硬度最高;当堆焊电流为500 A时,

此时热输入过大,先形成的碳化物硬质相过度生长并抑制周围形核点长大,使得硬质相形状不一致,分布不均匀,因此熔覆层显微硬度曲线起伏波动最大且显微硬度最低。

## 2.4 高温耐磨性能

由图6可知:熔覆层的磨损质量损失随着堆焊电流的增加先减小后增大,当堆焊电流为450 A时磨损质量损失最小,说明耐磨性能最好。在较低堆焊电流下热输入不足,熔覆层显微硬度较低,因此耐磨性能不强;当堆焊电流为450 A时,熔覆层显微硬度最高,耐磨性能提高;当堆焊电流为500 A时,熔覆层硬度减小,脆性增大,耐磨性能下降。

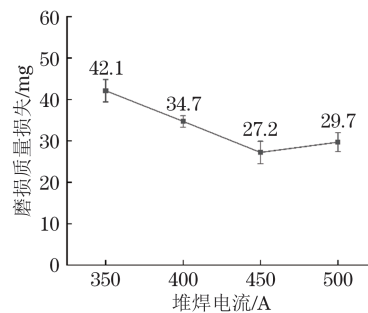


图6 800 °C 摩擦磨损后不同堆焊电流制备熔覆层的磨损质量损失

Fig. 6 Wear mass loss of cladding layer prepared under different surfacing currents after friction and wear at 800 °C

由图7可知,高温摩擦磨损后不同堆焊电流制备熔覆层的表面均存在犁沟和微裂纹,这是因为细小

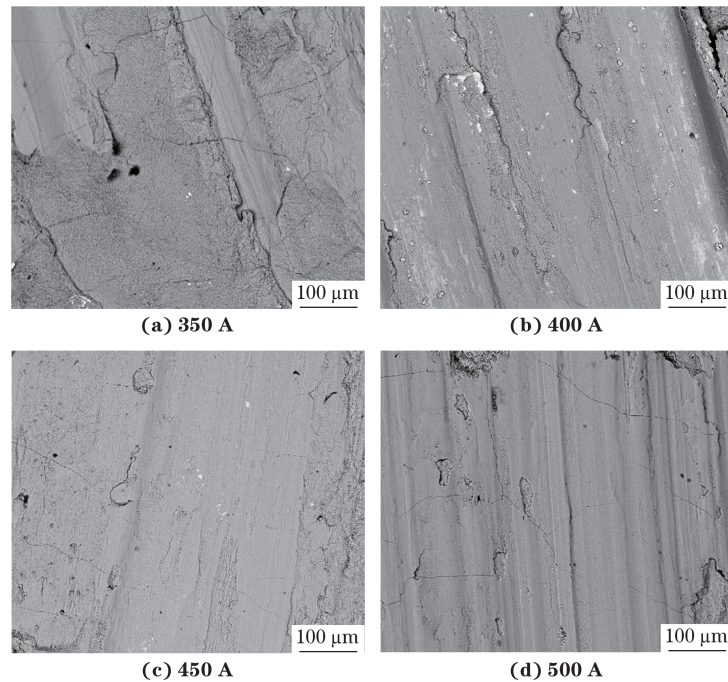


图7 不同堆焊电流制备熔覆层的磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of cladding layer prepared under different surfacing currents

的磨屑颗粒黏附于摩擦副表面,在摩擦过程中产生了犁沟,这些犁沟容易产生应力集中和微裂纹。当堆焊电流小于450 A时,熔覆层中犁沟较深,并出现大面积剥落,磨损严重,这是因为堆焊电流较低时熔覆层中形成的硬质相颗粒没有充分生长,形状不规则,导致熔覆层表面整体硬度较低,耐磨性能差,此时磨损机制为磨粒磨损;当堆焊电流为450 A时,熔覆层中犁沟明显减少且磨痕最浅,表面较为平坦,这是因为熔覆层磨损面在高温下发生氧化反应形成了连续的氧化层薄膜,对熔覆层起到了保护作用<sup>[17]</sup>,同时由于硬质相颗粒形状规则、尺寸一致,在Fe-Cr固溶体基体中均匀分布,提升了熔覆层整体硬度与耐磨性能,此时磨损机制主要为氧化磨损;当堆焊电流为500 A时,熔覆层中除了存在较浅的犁沟磨痕外还存在剥落坑,剥落坑是因为聚集在较大不规则NbC硬质相颗粒周围的较小短棒状硬质相颗粒在摩擦副的剪切力作用下被剥离而产生的<sup>[18]</sup>,此时磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损共同作用。

### 3 结 论

(1) 不同堆焊电流埋弧堆焊Fe-Cr-W-Nb合金熔覆层均主要由Fe-Cr固溶体、 $M_{23}C_6$ 、NbC以及少量的 $M_7C_3$ 、 $Fe_3W_3C$ 等物相组成,熔覆层与基体结合界面处均未观察到裂纹、孔洞等缺陷。

(2) 随着堆焊电流的增大,NbC硬质相颗粒的形

状变得规则,当堆焊电流为450 A时,硬质相颗粒的形状最规则,尺寸一致,分布均匀,熔覆层与钢基体形成良好的冶金结合;当堆焊电流为500 A时,NbC硬质相颗粒互相连接形成不规则形状,尺寸明显变大,分布不均匀。

(3) 随着堆焊电流的增大,熔覆层显微硬度先增大后减小,磨损质量损失先减小后增大,当堆焊电流为450 A时,显微硬度最大,磨损质量损失最小,耐磨性能最优,此时磨损机制为氧化磨损。

#### 参考文献:

- [1] 王邦杰. 实用模具材料与热处理速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.  
WANG B J. Practical mold materials & heat treatment quick reference manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [2] 贾华. 多元复合强化耐磨堆焊药芯焊丝及堆焊层耐磨机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.  
JIA H. Research on the wear-resistant mechanism of multi-composite reinforced wear-resistant surfacing flux-cored wire and cladding layer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [3] HU H J, XU G, WANG L, et al. The effects of Nb and Mo addition on transformation and properties in low carbon bainitic steels[J]. Materials & Design, 2015, 84: 95-99.

- [4] SUN S T, FU H G, PING X L, et al. Reinforcing behavior and microstructure evolution of NbC in laser clad Ni45 coating[J]. Applied Surface Science, 2018, 455: 160-170.
- [5] CAO Y B, REN H T, HU C S, et al. In-situ formation behavior of NbC-reinforced Fe-based laser cladding coatings[J]. Materials Letters, 2015, 147: 61-63.
- [6] GAO W L, LENG Y, FU D F, et al. Effects of niobium and heat treatment on microstructure and mechanical properties of low carbon cast steels[J]. Materials & Design, 2016, 105: 114-123.
- [7] 王娟. 表面堆焊与热喷涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
WANG J. Surfacing and thermal spraying technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [8] 张有德, 吴鹏, 官发根, 等. 高温耐磨堆焊技术研究进展[J]. 兰州工业学院学报, 2018, 25(3): 62-68.  
ZHANG Y D, WU P, GUAN F G, et al. Study progress of hardfacing technology with high temperature wear resistance[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2018, 25(3): 62-68.
- [9] GÜNTHER K, BERGMANN J P, SUCHODOLL D. Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 334: 420-428.
- [10] AWASTHI R, LIMAYE P K, KUMAR S, et al. Wear characteristics of Ni-based hardfacing alloy deposited on stainless steel substrate by laser cladding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(3): 1237-1252.
- [11] 艾孝文, 龚建勋, 李再华. Cr对Fe-Cr-C-Nb-V系堆焊合金组织及耐磨性的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(3): 42-48.  
AI X W, GONG J X, LI Z H. Effect of Cr on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Nb-V system hardfacing alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(3): 42-48.
- [12] 李子豪, 潘应君, 柯德庆, 等. 堆焊Mo-Cr-Fe-B合金覆层的组织及性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(4): 252-256.  
LI Z H, PAN Y J, KE D Q, et al. Microstructure and properties of Mo-Cr-Fe-B alloy coating by surfacing[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(4): 252-256.
- [13] 郗文超, 宋博学, 梁赢东, 等. 原位生成NbC增强YCF102熔覆层热力学与耐磨性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 538-543.  
XI W C, SONG B X, LIANG Y D, et al. Research on thermodynamics and wear resistance of in situ NbC reinforced YCF102 cladding layer[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(4): 538-543.
- [14] 胡泽群, 裘荣鹏, 宋宏鲁. 铌元素对Fe-Cr-C系药芯焊丝堆焊层耐磨性的影响[J]. 电大理工, 2016(4): 3-5.  
HU Z Q, QIU R P, SONG H L. Effect of niobium on the wear resistance of surfacing layer of Fe-Cr-C flux-cored wire[J]. Studies of Science and Engineering for Open Education, 2016(4): 3-5.
- [15] LAI H H, HSIEH C C, LIN C M, et al. Characteristics of eutectic  $\alpha(\text{Cr, Fe})-(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$  in the eutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(1): 493-500.
- [16] 周威, 朱协彬, 程敬卿. Fe-Cr-C-Nb药芯焊丝堆焊合金组织与耐磨性能研究[J]. 安徽工程大学学报, 2019, 34(3): 17-21.  
ZHOU W, ZHU X B, CHENG J Q. Study on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Nb flux-cored wire surfacing alloy[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2019, 34(3): 17-21.
- [17] 幸报. 预合金化 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 焊丝堆焊熔覆层的组织与性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.  
XING B. Microstructure and properties of  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  cladding prepared by surfacing of pre-alloyed wire[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [18] 柯德庆, 汪威, 吕正奇, 等. 热处理对等离子熔覆Fe-Mo-Cr-Ni-B合金覆层组织及耐磨性能的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2024, 47(2): 93-100.  
KE D Q, WANG W, LV Z Q, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and wear resistance of plasma cladding Fe-Mo-Cr-Ni-B alloy cladding[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2024, 47(2): 93-100.

(下转第104页)

## Effect of Aluminum Content on Microstructure and Properties of Nickel Aluminum Alloy Coating Prepared by Atmospheric Plasma Spraying

LONG Jin, HU Linrong, SUO Pengbang, CHEN Tang, QIU Wenyue, ZHU Chunli

(Guizhou Liyang International Manufacturing Co., Ltd., Anshun 561100, China)

**Abstract:** With Ni5Al aluminum-coated nickel alloy powder and mixtures of pure aluminum and Ni5Al aluminum-coated nickel alloy powder with aluminum mass fraction of 10% and 20% as raw materials, Ni5Al, Ni10Al and Ni20Al alloy coatings were prepared by atmospheric plasma spraying technology on the surface of GH4169 nickel-based superalloy. The effects of aluminum content on the phase composition, microstructure, mechanical properties, and electrochemical properties of the nickel aluminum alloy coatings were studied. The results show that the alloy coatings with different aluminum content were mainly composed of nickel solid solution, accompanied by the formation of NiAl and NiAl<sub>3</sub> phases. With the increase of aluminum content, the number of diffraction peaks of NiAl<sub>3</sub> and NiAl phases increased, and the intensity of diffraction peaks of nickel solid solution phase decreased. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase was present in both Ni10Al and Ni20Al alloy coatings, and Ni<sub>3</sub>Al phase was present in Ni5Al alloy coating. With the increase of aluminum content, the oxides in the alloy coatings decreased, the microhardness and bonding strength of the coating increased, and self-corrosion current density decreased, indicating improved corrosion resistance. There were a large number of cleavage planes and cleavage steps in the nickel aluminum alloy coating fracture, and the fracture mode was mainly brittle fracture. The Ni5Al alloy coating fracture also had a "rock sugar" shape, and the Ni10Al alloy coating fracture also had a small number of dimples.

**Key words:** aluminum content; nickel aluminum coating; bonding strength; corrosion resistance; microstructure

(上接第 85 页)

## Effect of Surfacing Current on Microstructure and Properties of Fe-Cr-W-Nb Flux Cored Wire Surfaced Cladding Layer

ZHANG Zirui, PAN Yingjun, KE Deqing

(Faculty of Materials Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** A Fe-Cr-W-Nb flux cored wire was designed, and the cladding layer was prepared on the surface of Q235 steel matrix by submerged arc surfacing technology under different surfacing currents (350, 400, 450, 500 A). The effects of surfacing current on the microstructure, microhardness and high temperature wear resistance of the cladding layer were studied. The results show that the cladding layers prepared under different surfacing currents were mainly composed of Fe-Cr solid solution, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, NbC and a small amount of M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C. With the increase of surfacing current, the shape of NbC hard phase particles gradually became regular. When the surfacing current was 450 A, the shape of hard phase particles of the cladding layer was the most regular with consistent size and uniform distribution, and the cladding layer formed a good metallurgical bond with the steel matrix. When the surfacing current was too large (500 A), the hard phase particles were connected to each other to form an irregular shape, the size was obviously increased and the distribution was uneven. With the increase of the surfacing current, the microhardness of the cladding layer first increased and then decreased, and the wear mass loss first decreased and then increased. When the surfacing current was 450 A, the microhardness was the largest, the wear mass loss was the smallest, showing the best wear resistance, and the wear mechanism was oxidative wear.

**Key words:** flux cored wire; submerged arc surfacing; cladding layer; high temperature wear resistance; NbC