

文章编号: 2095-2198(2026)01-0057-06

铬含量对 Fe-C-Nb-Cr 系堆焊合金显微组织和性能的影响

王学昭¹, 宗琳¹, 马亚琳¹, 徐俊尧¹, 王明²

(1. 沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 采用等离子弧堆焊技术在 Q235 钢基体上制备 5 组 Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金, 通过改变合金中 Cr 的质量分数, 分析不同 Cr 含量对合金堆焊层硬质相形态、数量和性能的影响规律。利用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和维氏硬度计对各堆焊合金层显微组织和硬度进行测试。结果表明: Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金组织由铁素体 (α)、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ 和 NbC 构成。随着 Cr 质量分数的增多, 条状析出物不断增加的同时, 初生 NbC 和二次 NbC 的数量也在不断增加, 且尺寸增大, 部分区域出现聚集现象, 且铁素体组织被细化, 弥散分布在堆焊合金层表面。堆焊合金层横截面显微硬度测试表明: 随着 Cr 质量分数的增加, 堆焊合金层的显微硬度 ($\text{HV}_{0.2}$) 平均值不断提高, 当 Cr 的质量分数为 11.8% 时合金堆焊层显微硬度平均值最高, 达到了 835。

关键词: 碳化物; 显微组织; 显微硬度; 堆焊

DOI: 10.3969/j.issn.2095-2198.2026.01.009

中图分类号: TH117.3 文献标识码: A

在钢铁、冶金、采矿等工业生产生活中, 常见的工程构件失效形式主要有断裂、腐蚀、磨损和变形 4 种类型, 其中磨损失效占有失效形式的 55%^[1-3]。合金材料表面硬度高、耐磨性能好, 为了提高零部件的表面硬度与耐磨性, 通常采用堆焊技术在零件表面制备出具有较高硬度的堆焊合金^[4-6]。以等离子弧作为热源的等离子堆焊技术, 具有稀释率低、堆焊效率高、零件变形少等优点, 是一种常见的堆焊方法^[7-8]。

铁基合金是常见的堆焊材料, 其价格低廉、性能优良, 在工业生产中应用十分广泛^[9]。镍碳化物增强铁基合金堆焊层, 以其硬度高、耐磨效果好等优点被广泛用作铁基合金中的增强相^[10]。Li 等^[11]采用激光堆焊技术制备了原位 (Ti, Nb)C 颗粒增强铁基合金堆焊层, 研究结果表明随着堆焊层中 (Ti, Nb)C 数量的增多, 堆焊

层的硬度和耐磨性大大增加。Lai 等^[12]和 Liu 等^[13]采用明弧堆焊制备了 Fe-C-Cr-Nb 系堆焊合金, 发现由于堆焊组织中奥氏体和 NbC 的数量增加, $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物被明显细化, 堆焊层的硬度得到了显著提高。Nb 含量对 Fe-C-Cr 系堆焊合金的影响研究成果较多, 而 Cr 含量对添加有 Nb 元素的铁基堆焊合金的影响却鲜有报道。本文通过改变 Fe-C-Nb-Cr 系堆焊合金中 Cr 元素的质量分数, 研究了不同 Cr 含量对堆焊合金层表面碳化物的种类形成、数量和分布的影响, 以及对堆焊合金层性能的影响。

1 实验材料及方法

采用等离子堆焊技术在 Q235 钢基体上制备 5 组不同 Cr 质量分数的堆焊合金层, Q235 钢板尺寸为 100 mm × 80 mm × 12 mm, 其表面在

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51901141); 辽宁省教育厅科学研究项目 (LJ2020034)

作者简介: 王学昭 (1997—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生在读, 主要从事材料表面强化技术方面的研究。

通信联系人: 宗琳 (1979—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 主要从事材料表面强化技术方面的研究。

引用格式: 王学昭, 宗琳, 马亚琳, 等. 铬含量对 Fe-C-Nb-Cr 系堆焊合金显微组织和性能的影响[J]. 沈阳化工大学学报, 2026, 40(1): 57-62.

堆焊前经砂轮打磨干净。堆焊合金层所用合金粉末由高碳铬铁、铌铁、C(石墨)和铁粉组成。设计合金粉末配方时,固定合金粉末中 Nb 的含量,按照 Cr 的质量分数分别为 6.6%、7.9%、9.2%、10.5% 和 11.8% 设计 5 组合金粉末,具体成分见表 1。每组合金粉末配方总质量为 100 g。合金粉末在堆焊前采用水玻璃作黏结剂预置在基体表面,厚度约为 1.5~2 mm,待试板晾干后,分别经 10 min/50℃、10 min/100℃、1 h/200℃ 烘干。

表 1 预置合金粉末成分

Table 1 Preset alloy powder composition

试样编号	w/%			
	Cr	Nb	C	Fe
1	6.6	10.753	4.40	余量
2	7.9	10.753	4.66	余量
3	9.2	10.753	4.92	余量
4	10.5	10.753	5.19	余量
5	11.8	10.753	5.45	余量

采用 DML-V02BD 型多功能等离子粉末堆焊机进行堆焊试验,堆焊工艺参数如表 2 所示。

表 2 堆焊工艺参数

Table 2 Parameters of plasma hardfacing

量符号/单位	数值
空载电压/V	90
电弧电压/V	30
焊接电流/A	140~160
电弧纵向移动速度/(cm·min ⁻¹)	3~15
电弧横向摆动频率/(次·min ⁻¹)	21
电弧横向摆动宽度/cm	2.0
电弧距工件距离/mm	3

采用线切割技术沿焊缝断面切取金相试样,试样经预磨、抛光和王水溶液腐蚀。利用 FEI NOVA400 型扫描电镜观察堆焊合金层的微观组织,利用 Bruker D8 型 X 射线衍射仪对堆焊合金层进行物相分析,利用 MC010-HVS-20 型数显维氏硬度计测试堆焊合金层侧面的硬度。

2 结果与讨论

2.1 堆焊层合金的物相分析

Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金表面的 X 射线衍射结果如图 1 所示,可检测到的物相有 α-Fe、NbC 和 M₇C₃、M₂₃C₆(M=Fe、Cr,下同)型碳化

物。5 组试样的 XRD 谱图中 NbC 的衍射峰非常明显,表明有大部分铌铁受热分解,由于 Nb 是强碳元素,很容易与熔池中的碳结合发生反应生成 NbC;(Fe,Cr)₇C₃ 的衍射峰强度较低,说明在堆焊合金层中生成的 (Fe,Cr)₇C₃ 相较少。

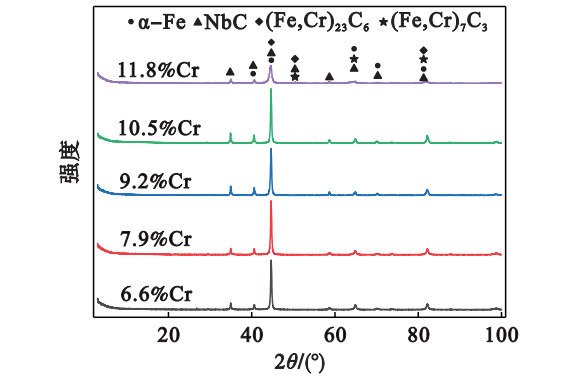


图 1 堆焊层合金的 X 射线衍射谱图

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of surfacing alloy

2.2 Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金层表面显微组织分析

图 2 为不同 Cr 含量(质量分数)堆焊合金层表面的 SEM 形貌。当 Cr 质量分数为 6.6% 和 10.5% 时,深灰色基体上分布着条状析出物和呈颗粒状、开花状及长条状的碳化物。对 Cr 质量分数为 7.9% 的堆焊合金层表面进行 EDS 面扫描分析,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出:深灰色基体组织中富含 Fe 元素(质量分数为 84.54%),而 C 元素的质量分数仅为 5.66%,因此判定其为 α-Fe 基体;长条状初生碳化物富含 Nb 元素(质量分数为 60.38%)和 C 元素(质量分数为 35.58%),而 Fe 元素的含量很少,结合 XRD 分析结果可判定其为初生 NbC;细条状及点状白亮化合物含 30.58% C、46.92% Nb 和少量其他元素,可判定其为纳米级二次 NbC;基体上分布的条状析出物推测是 α-Fe + NbC + M₂₃C₆ 混合物。通过对堆焊合金层表面的组织进行分析可以得出堆焊合金层的凝固过程:从熔体中析出初生碳化物 NbC,随着温度的下降液相转变为 γ-Fe 相,部分 Cr 元素固溶到基体组织中,多余的 Cr 和 C 在其周围富集;当温度降至共晶线时,在初晶 γ-Fe 周围发生共晶转变 L→γ-Fe + NbC + M₂₃C₆;随着初生 NbC 的不断

形成长大,溶质元素 Cr、Nb 和 C 在凝固过程中被 γ 相排斥到晶界处,在凝固的最后阶段形成纳米级颗粒二次 NbC;同时,熔池的碳含量下降和熔池的快速冷却使得 γ -Fe 转变为 α -Fe,最终形成 α -Fe + NbC + $M_{23}C_6$ + NbC_(script) 的混合

组织,其具体凝固过程如下:
$$L \rightarrow L + NbC \rightarrow L + NbC + \gamma - Fe \rightarrow$$
$$L + NbC + \gamma - Fe + M_{23}C_6 + NbC_{(script)} \rightarrow$$
$$\alpha - Fe + NbC + M_{23}C_6 + NbC_{(script)}.$$

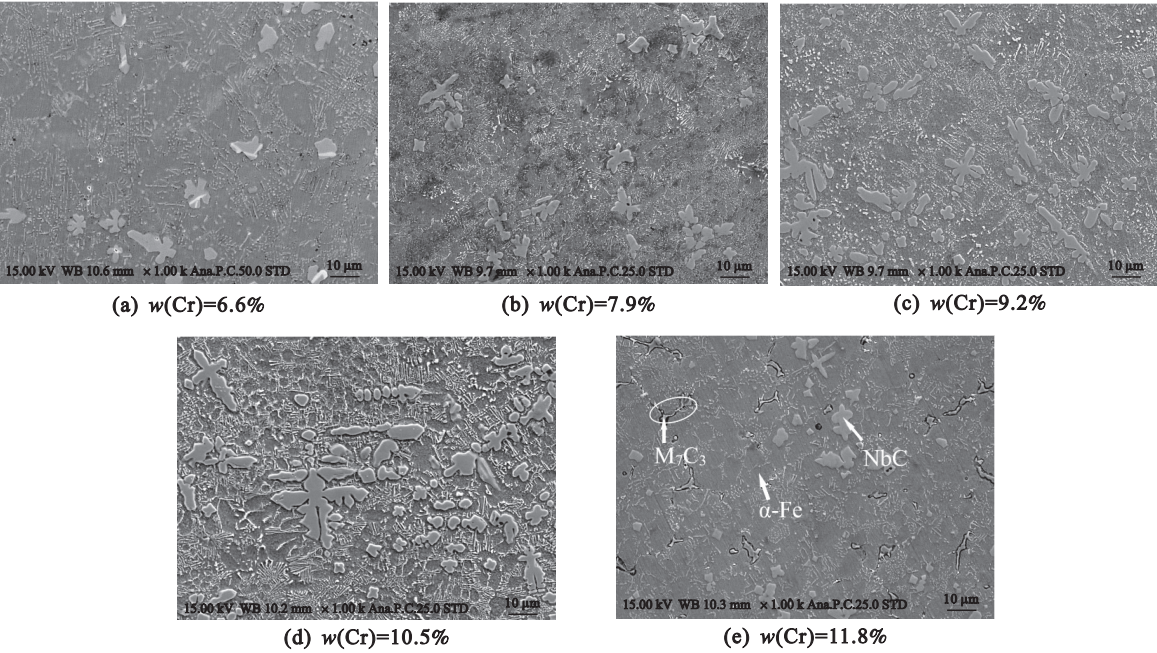


图 2 不同 Cr 含量的堆焊合金层表面 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of surfacing layers with different Cr contents

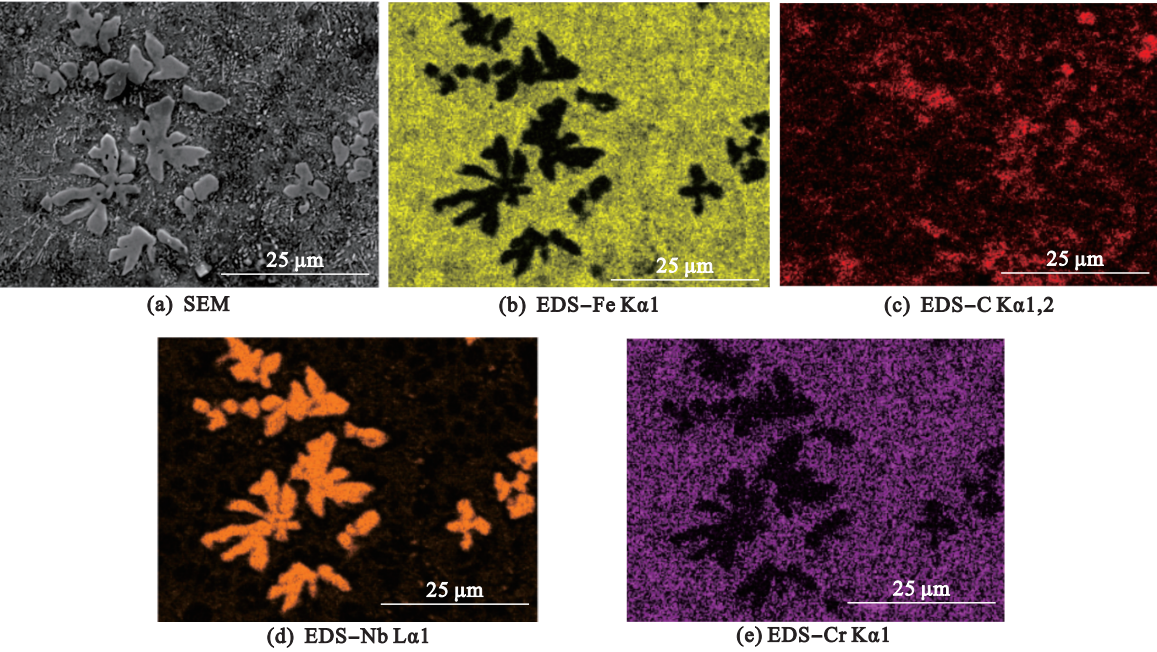


图 3 Cr 质量分数为 7.9% 的堆焊合金层面扫描图像
Fig. 3 Surface scan image of surfacing layer with 7.9% Cr mass fraction

从图 2(a)—图 2(d) 还可以看出:随着合金中 Cr 质量分数的增加,条状析出物数量不断增加的同时,初生 NbC 和二次 NbC 的数量也在不断增加,且尺寸增大,部分区域出现聚集现象.当 Cr 质量分数为 6.6% 时,初生 NbC 尺寸较小(2~4 μm),形态多为颗粒状或不规则状;随着 Cr 质量分数的增加,初生 NbC 尺寸不断增大,某些粗大长条状 NbC 尺寸可达 10~20 μm.这是因为高碳铬铁含量的增加提供了较多的碳原子,促进了 NbC 的形核与长大;同时堆焊合金层表面组织中 M₂₃C₆ 相数量的增多提供了更多的 NbC 非自发形核的核心,所以 NbC 的数量不断增多. M₂₃C₆ 为不稳定组织,随着合金中 Cr 质量分数的增多, M₂₃C₆ 有逐渐向 M₇C₃ 转变的趋势.由图 2(e) 可以看出组织中 M₂₃C₆ 的数量减少,沿晶界析出了部分碳化物 M₇C₃ [见图 2(e) 中椭圆部分],因此可判定合金组织由 α-Fe + NbC + M₂₃C₆ + M₇C₃ + NbC_(script) 组成.

图 4 为 Cr 质量分数为 10.5% 的堆焊合金层横截面金相显微组织.下部为基体,上部为堆焊合金层,堆焊合金层与基体之间形成了过渡区,过渡区无气孔、裂纹等缺陷产生,表明堆焊合金层与基体之间形成了良好的冶金结合.过渡区的存在有助于释放堆焊合金层与基体之间的应力,从而提高堆焊合金层的断裂韧性^[14].

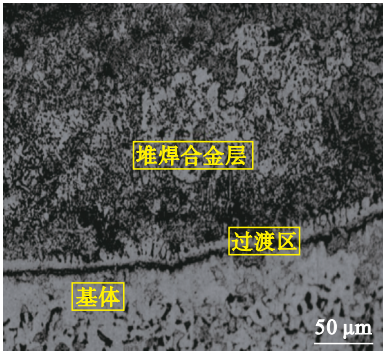


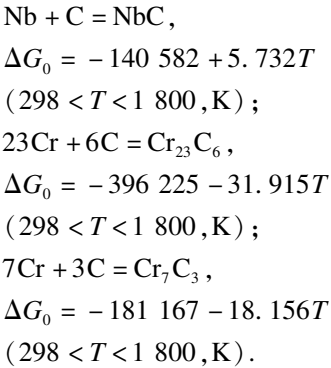
图 4 Cr 质量分数为 10.5% 的堆焊合金层横截面组织

Fig. 4 Cross-sectional microstructure of surfacing layer with 10.5% Cr mass fraction

2.3 Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金层形核机理热力学分析

为了研究堆焊合金层的形核机理,对堆焊过程中可能发生的化学反应进行热力学分析,熔池

中主要含有 Fe、Cr、C、Nb 4 种元素,凝固时可能发生以下化学反应:



从热力学角度出发,在一定温度下,某化学反应的吉布斯自由能(ΔG)为负值时,说明在此温度下该化学反应是自发的^[15].图 5 为此体系中生成物的吉布斯自由能与温度的关系,可以看出在堆焊过程中 Cr₇C₃、Cr₂₃C₆ 和 NbC 均有可能生成,且生成 Cr₂₃C₆、Cr₇C₃ 的吉布斯自由能更低,二者更容易在反应中生成.因此,新生成的 Cr₇C₃ 和 Cr₂₃C₆ 可以作为 NbC 的异质形核点,促进 NbC 的生成.

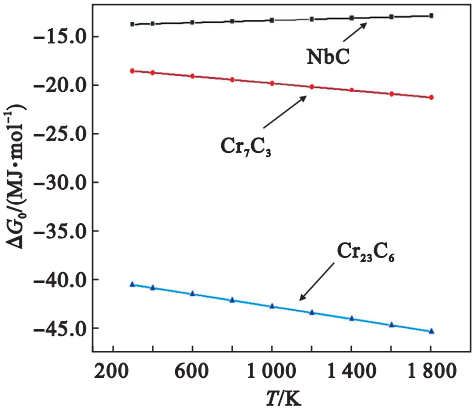


图 5 吉布斯自由能与温度的关系

Fig. 5 Relationship between Gibbs free energy and temperature

2.4 Fe-C-Nb-Cr 系堆焊合金层横截面显微硬度分析

图 6 为 5 组不同 Cr 含量堆焊合金层横截面的显微硬度变化曲线.从图 6 可以看出:5 组试样横截面显微硬度从基体至堆焊合金层表面呈梯度增加,在距离熔合线 20 μm 的基体区,显微硬度平均值为基体的显微硬度(HV_{0.2}为 150.76);穿过熔合线后,由于基体和堆焊合金

层材料之间的化学成分差异较大,在熔合线处存在明显的硬度过渡区,Cr 质量分数为 6.6% ~ 11.8% 的堆焊合金层横截面显微硬度($HV_{0.2}$)为 231 ~ 1 005.7,堆焊合金层近表面处显微硬度平均值最高,这是因为在堆焊合金层表面生成了 NbC、 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 和 $(Fe,Cr)_7C_3$ 等硬质相;随着 Cr 质量分数的增加,NbC 的数量增多,且尺寸变大,同时在堆焊合金层表面弥散分布着呈细条状及点状的二次 NbC,使得堆焊合金层处显微硬度平均值随 Cr 质量分数的增加而增加;当 Cr 质量分数达到 11.8% 时,NbC 的数量较多,分布良好,同时高碳铬铁中的 C 含量的增加促进了硬质相 $(Fe,Cr)_7C_3$ 的形核,堆焊合金层表面形成了 $\alpha - Fe + NbC + M_{23}C_6 + M_7C_3 + NbC_{(script)}$ 骨架,此时堆焊合金层硬度达到了最高,显微硬度($HV_{0.2}$)平均值为 835。

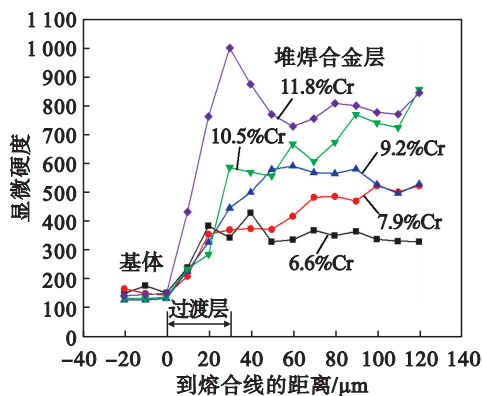


图 6 堆焊合金层横截面显微硬度

Fig.6 Microhardness of cross section of surfacing layer

3 结 论

(1) Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金层基体组织由 α 相构成,硬质相由 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 、 $(Fe,Cr)_7C_3$ 和 NbC 相构成,堆焊过程中生成的 $(Fe,Cr)_7C_3$ 和 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 可以作为 NbC 的异质形核点,促进 NbC 的形核。

(2) 随着 Cr 质量分数的增加,NbC 的数量增多且逐渐被细化,初生 NbC、二次 NbC 和 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 一起构成了堆焊合金层耐磨骨架,显著提高了堆焊合金层表面的硬度。

(3) Fe-C-Nb-Cr 堆焊合金层横截面显微硬度从基体到表层总体呈上升趋势,在熔合线处存在明显的硬度过渡区。由于表层显微组织中

形成了高硬度的碳化物 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 、 $(Fe,Cr)_7C_3$ 和 NbC,堆焊合金层顶端的显微硬度平均值显著增加,当 Cr 质量分数达到 11.8% 时,堆焊合金层显微硬度平均值最高,达到了 835。

参考文献:

- [1] 张伟.激光熔覆 Fe45 与超细 VC 复合涂层的组织和性能[J].材料热处理学报,2016,37(2):212-215.
- [2] 王旭,贺定勇,邵蔚,等.硼含量对 NiCrB 堆焊合金高温氧化性能的影响[J].表面技术,2023,52(8):247-254.
- [3] 刘治宇,王振宇,刘政军,等.等离子弧堆焊 WC 增强镍基堆焊层的组织及耐磨性研究[J].热加工工艺,2023,52(17):27-31.
- [4] 黄智泉,贺定勇,刘仁培,等.堆焊技术发展及应用综述[J].电焊机,2023,53(4):56-62.
- [5] 付雅迪,段嘉旭,黄智泉,等.Fe-Cr-C-Nb 堆焊合金抗冲击磨损性能研究[J].焊接技术,2021,50(1):9-12.
- [6] HUANG F,LI R W,REN Z A,et al. Effects of High Carbon Ferrochrome Additions on the Microstructure and Properties of Fe-C-Cr-Nb Hardfacing Alloys[J]. Materials Science, 2021, 27(2): 161-166.
- [7] 靳鑫,李毅,陈波,等.WC 颗粒增强铁基合金涂层的组织及耐磨性[J].热加工工艺,2020,49(24):92-95.
- [8] 刘畅,饶嘉威,蒋凤琦,等.等离子弧熔覆 Fe-C-B-V 系耐磨堆焊层的组织及性能研究[J].热加工工艺,2024,53(2):145-148.
- [9] ZHAO C C,XING X L,GUO J,et al. Micro-Properties of $(Nb,M)C$ Carbide ($M = V, Mo, W$ and Cr) and Precipitation Behavior of $(Nb,V)C$ in Carbide Reinforced Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 852-860.
- [10] 田大标. 铌在高铬铸铁堆焊层中的存在状态[J]. 中国表面工程, 2008, 21(6): 37-40.
- [11] LI Q T,LEI Y P,FU H G. Growth Mechanism, Distribution Characteristics and Reinforcing Behavior of $(Ti,Nb)C$ Particle in Laser Cladded Fe-Based Composite Coating[J]. Applied Surface Science, 2014, 316: 610-616.
- [12] LAI J P,PAN Q L,WANG X D,et al. Effects of Nb

on the Microstructure and Properties of Ti – Added Hypereutectic High – Cr Cast Iron[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27 (9) :4373 – 4381.

[13] LIU S, SHI Z J, XING X L, et al. Effect of Nb Additive on Wear Resistance and Tensile Properties of the Hypereutectic Fe – Cr – C Hardfacing Alloy [J]. Materials Today Communications, 2020, 24 : 101232.

[14] 秦利锋,武胜圈,胡瑞,等. Fe – Cr – C 系堆焊层中碳化物对耐磨性能的影响[J]. 材料保护,2022,55 (11) :63 – 68.

[15] MA Q S, LI Y J, WANG J. Effects of Ti Addition on Microstructure Homogenization and Wear Resistance of Wide – Band Laser Clad Ni60/WC Composite Coatings[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 64 : 225 – 233.

Effect of Chromium Content on Microstructure and Properties of Fe – C – Nb – Cr Surfacing Alloy

WANG Xuezhao¹, ZONG Lin¹, MA Yalin¹, XU Junyao¹, WANG Ming²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. China Construction Industrial & Energy Engineering Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: Five groups of Fe – C – Nb – Cr surfacing alloys were prepared on Q235 steel substrate by plasma arc surfacing technology. The effects of Cr content on the morphology, quantity and properties of hard phases of alloy surfacing layer were analyzed by changing Cr content. Scanning electron microscopy (SEM), X – ray diffractometer (XRD) and Vickers hardness tester were used to test the microstructure and hardness of each surfacing layer. The results show that the microstructure of Fe – C – Nb – Cr surfacing alloy is composed of ferrite(α), (Fe, Cr)₇ C₃, (Fe, Cr)₂₃ C₆, NbC. With the increase of Cr content, the strip – like precipitates, the number of primary NbC and secondary NbC also increased, and the size increases. Aggregation phenomenon appears in some areas, and the ferrite structure is refined and dispersed on the surface of the surfacing layer. The cross section microhardness test of the surfacing layer shows that the average microhardness (HV_{0.2}) of the surfacing layer increases with the increase of Cr content. When Cr content is 11. 8% , the average microhardness of the alloy surfacing layer is the highest, reaching 835.

Key words: carbides; microstructure; microhardness; hardfacing