

文章编号: 2095-2198(2026)03-0301-06

## 钒含量对 Fe-Cr-C 系堆焊合金显微组织和性能的影响

宗琳<sup>1</sup>, 李立伟<sup>1</sup>, 马亚琳<sup>1</sup>, 胡祚华<sup>1</sup>, 王明<sup>2</sup>

(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:** 采用等离子堆焊技术在 20 钢基体上制备 6 组不同钒铁含量的钒铁/Fe60 合金粉末的堆焊合金层, 并利用 SEM、EDS、XRD 和维氏硬度计等设备对其进行检测, 探讨不同钒铁含量对堆焊层显微组织和性能的影响规律。研究结果表明: 堆焊层显微组织由  $\alpha$ -Fe、VC、 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  和  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_3\text{C}$  组成。随着钒铁含量的增加,  $\alpha$ -Fe 基体组织逐渐细化; 共晶组织由长条状向蜂窝状转变, 最终转变为层片状; VC、 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相数量逐渐增多。大部分 VC 在晶界处析出, 显著增强了界面结合强度, 其与  $[\alpha\text{-Fe} + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3]$  相形成多边形网络耐磨骨架, 极大地提升了合金耐磨性。随着钒铁含量的增加, 堆焊层平均显微硬度不断提高, 当钒铁质量分数为 35% 时, 堆焊层近表层平均显微硬度最高 (629.4HV<sub>0.2</sub>), 约为基体的 3.5 倍。

**关键词:** 堆焊; Fe-Cr-C; 显微组织; 显微硬度

DOI:10.3969/j.issn.2095-2198.2026.03.011

中图分类号: TH117.3 文献标识码: A

堆焊是一种低成本效益的表面改性技术, 通过激光熔覆、等离子转移电弧等技术将合金粉末堆焊于金属表面, 产生耐磨耐腐蚀涂层, 从而延长采矿、破碎、研磨和农业设备等领域工程部件的使用寿命。因此, 开发优质高效化的耐磨堆焊合金材料显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。在目前堆焊合金材料的选择中, 高铬高碳铁基 Fe-Cr-C 系堆焊合金因具有良好的耐磨性和经济性, 已被广泛应用于表面强化领域。但同时 Fe-Cr-C 系合金堆焊层存在韧性差的问题, 容易引发脆断和裂纹现象<sup>[3-4]</sup>。为改善这一状况, 在 Fe-Cr-C 系堆焊合金中加入一定量 V 元素, 旨在实现晶粒细化与固溶强化的综合效果, 从而进一步提高合金堆焊层的综合力学性能。

V 作为强晶粒细化剂, 能够促进熔体中初生碳化物的析出, 降低基体中的碳含量, 进而提高堆焊合金韧性。同时, V 在  $\alpha$ -Fe 基体和其他

$\text{M}_3\text{C}$ 、 $\text{M}_7\text{C}_3$  中具有较高的溶解度, 能够强化基体与碳化物, 基体强韧性的提高能够对硬质相起到有效的支撑作用, 从而提高合金的耐磨性<sup>[5-7]</sup>。Singla 等<sup>[8]</sup>采用 SMAW 方法制备了 Fe-Cr-C-V 堆焊层, 发现 V 含量的增加提高了合金堆焊层的韧性和耐磨性。Qi 等<sup>[9]</sup>使用手工电弧堆焊技术制备了含钒添加剂的耐磨堆焊层, 发现 VC 的形成数量随钒含量的增加而增加, 并且钒添加剂有利于提高合金堆焊层的耐磨性。Lai 等<sup>[10]</sup>采用 GTAW 方法在 Fe-Cr-C 合金中添加质量分数为 0~2.39% 的 V, 研究其添加量对合金性能的影响, 结果发现当添加 V 的质量分数达到 0.93% 时, 生成的纤维状  $\text{V}_4\text{C}_3$  显著增强了合金堆焊层的表面硬度与耐磨性。郝建军等<sup>[11]</sup>采用等离子堆焊技术在 65Mn 钢基体上制备 Fe-Cr-C-V 堆焊层, 实验证明 Fe-Cr-C-V 堆焊层维氏硬度提高了 75%, 磨

收稿日期: 2024-10-10

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: 宗琳(1979—), 女, 辽宁台安人, 教授, 博士, 主要从事材料表面强化技术的研究。

引用格式: 宗琳, 马亚琳, 李立伟, 等. 钒含量对 Fe-Cr-C 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(3): 301-306.

损质量降低约 67%。为进一步提高铁基合金的耐磨性,本文采用等离子堆焊技术制备了 6 组不同钒铁含量的钒铁/Fe60 合金粉末的铁基堆焊合金层,并通过显微组织和性能分析检测揭示了不同钒铁含量的堆焊层组织转变规律和性能特点。

## 1 实验方法

将退火态 20 钢加工成 200 mm × 80 mm × 20 mm 规格的试样作为堆焊基材,选用的 Fe60 合金粉末成分见表 1。将钒铁粉末分别按质量分数 10%、15%、20%、25%、30%、35% 与 Fe60 合金粉末混合制备 6 组合金系统。利用 DML-V02BD 型多功能等离子粉末堆焊机对焊材进行等离子堆焊,工艺参数为:转移弧电流 140 ~ 160 A,送粉电压 30 V,电弧纵向移动速度 3 ~ 15 cm/min,摆动宽度 2.0 cm,离子气通量 0.4 ~ 0.6 m<sup>3</sup>/h,保护气通量 0.4 ~ 0.6 m<sup>3</sup>/h。将堆焊后的焊材通过线切割技术加工成 15 mm × 10 mm × 10 mm 规格的样品块。对堆焊面及样品侧面进行打磨和抛光处理后使用体积分数 10% 的硝酸酒精溶液对样品进行腐蚀处理,制备成金相试样。使用 LEICA DM2500M 金相显微镜、JSM-IT800 型扫描电镜观察与分析金相试样的显微组织。采用 D8-Advance 型多晶 X 射线衍射仪分析并确定金相试样堆焊层的物相组成。利用 HV-1000SPTA 型显微硬度计对金相试样侧面进行显微硬度测试,测试条件:加载载荷 200 g、作用时间 10 s,沿堆焊层厚度方向每隔 10 μm 测量 1 次显微硬度。

表 1 Fe60 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe60 alloy powder

| 元素 | w/%   | 元素 | w/%  |
|----|-------|----|------|
| Cr | 14.52 | Mn | 0.83 |
| Si | 1.93  | C  | 0.54 |
| B  | 1.21  | V  | 0.11 |
| Ni | 1.14  | Fe | 余量   |

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 堆焊层 XRD 物相分析

为了确定 6 组合金系堆焊层的物相组成,对堆焊层进行 X 射线衍射分析。由图 1 可以看出:

该合金系堆焊层组织的基体为铁素体( $\alpha$ -Fe),硬质相为 VC、M<sub>3</sub>C 和 M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>(M = Fe, Cr, V)。随着堆焊合金中钒铁含量的不断增加, $\alpha$ -Fe 基体(110)晶面衍射峰强度持续下降,表明该相不断减少;当钒铁质量分数为 15% ~ 35% 时,(Fe,Cr,V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 相的(211)晶面、(220)晶面和 VC 相(200)晶面处特征衍射峰强度明显增强,说明该相增多。这主要是由于随着钒铁含量的增加,分解出了更多的 V 元素,在后续化学冶金反应中与 C 元素结合,析出了更多的 VC 颗粒和 (Fe,Cr,V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 硬质相。(Fe,Cr,V)<sub>3</sub>C 相的衍射峰强度整体微弱偏低,未发现其有明显的变化,证明该相含量偏低。钒铁质量分数为 25% ~ 35% 的合金堆焊层主要由  $\alpha$ -Fe、VC 和 (Fe,Cr,V)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 组成。上述结果表明提高钒铁含量可促进堆焊层中含钒硬质相的生成,可通过其来改善合金的性能。

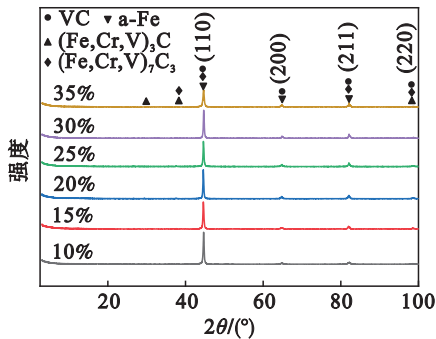


图 1 堆焊层的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD pattern of the surfacing weld layer

### 2.2 堆焊层显微组织分析

图 2 为 6 组加入不同质量分数钒铁的铁基合金堆焊层 SEM 图像。由图 2 可知:6 组合金组织均由深灰色基体与晶界处共晶组织组成。当钒铁含量较少(质量分数为 10%、15%)时,堆焊层组织晶界处的共晶组织数量较少,呈现长条状、断续状结构,组织中析出的深黑色颗粒数量较少,基体组织较粗大;当钒铁质量分数增加到 20% 时,共晶组织虽然也呈现断续状分布,但有了一定的网络状结构变化,同时组织中析出的深黑色团块状硬质相数量开始增多;随着钒铁含量继续增加,共晶组织结构分布逐渐呈现多边形网络化,深黑色硬质相颗粒数量也逐渐增多,大多弥散分布于晶界处,如图 2(e)、图 2(f) 所示。

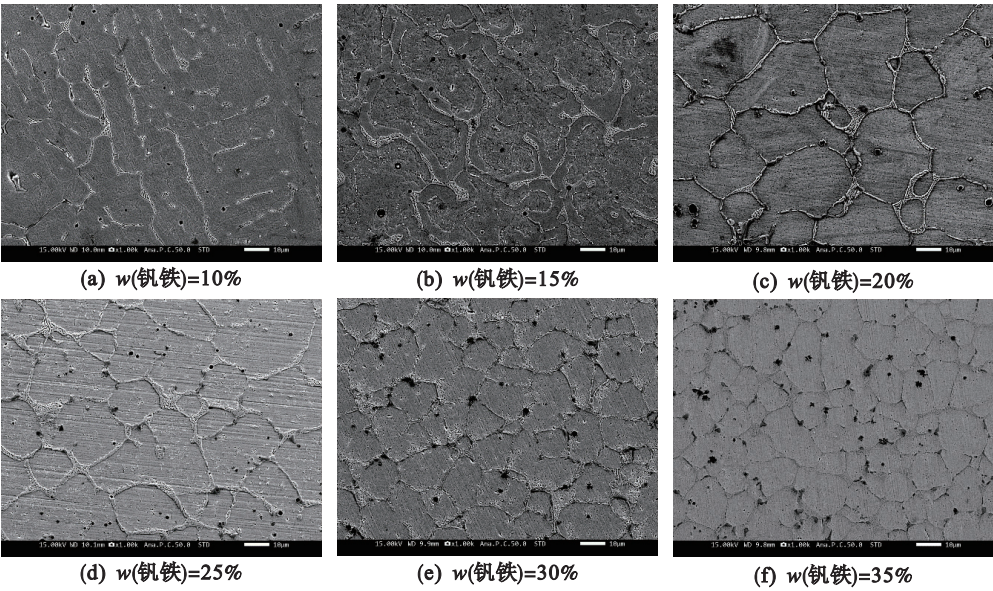


图 2 加入不同质量分数钒铁的铁基堆焊层显微组织

Fig.2 Microstructure of Iron - based surfacing layers with different mass fractions of ferrovanadium

从图 2 还可以看出,随着钒铁含量的增加,堆焊层基体组织逐渐细化.这是由于当钒铁加入量较少(质量分数小于 20%)时,加入的钒铁基本全部溶解进入基体,形成的 $(\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3$ 、VC 等硬质相数量较少,晶粒细化效果不明显;当加入钒铁的质量分数超过 20% 时,会残存部分未完全分解的钒铁颗粒,同时重新析出的 VC 与 $(\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3$ 一起作为 $\alpha\text{-Fe}$ 有效异质形核核心,对基体组织起到促进形核、抑制晶粒长大的作用,有效细化了 $\alpha\text{-Fe}$ 基体组织.

为了更清楚地确定堆焊层组织的组成,并进一步分析不同钒铁含量对堆焊层微观组织的影响,对添加钒铁质量分数为 15%、25% 和 35% 的铁基堆焊层表层进行高倍 SEM 显微组织特征观察和 EDS 能谱元素分析,结果如图 3 和表 2 所示.鉴于 EDS 分析对于小原子量元素含量测试存在误差较大的情况,C 元素的含量仅供参考.

微区  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  的 EDS 测试结果表明:该组区域内均富含大量 Fe 元素、少量 Cr、V 元素及微量 C、Si 元素,根据 XRD 衍射分析结果,确认该组区域为 $\alpha\text{-Fe}$ 基体.通过对比 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 微区的元素含量,发现相较于 $A_1$ 区, $A_2$ 区基体中的 Cr、V 固溶量有所增加,而在 $A_3$ 区中,这一增加趋势更为显著,表明随着钒铁含量的增加, $\alpha\text{-Fe}$ 基体中 Cr、V 元素固溶强化作用显著增

强,有助于提升合金堆焊层的力学性能<sup>[12]</sup>.

微区  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  的 EDS 测试结果表明:该组区域内均富含 Fe 元素和较高量 Cr、V 元素.相较于 $B_4$ 区, $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 区 Cr、V 元素含量较高, $B_1$ 区 Cr 含量约为 $B_4$ 区的 2.3 倍,由于 Cr、V 元素含量达到一定程度后会扩散到晶界与 C 元素结合形成硬质相,结合 XRD 衍射分析结果及组织形态可知,晶界处共晶组织由基体和硬质相组成,判断 $B_4$ 区为 $[\alpha\text{-Fe} + (\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_3\text{C}]$ 相, $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 区为 $[\alpha\text{-Fe} + (\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3]$ 相.随着钒铁含量的不断增加,长条结构的 $[\alpha\text{-Fe} + (\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_3\text{C}]$ 相显著减少,蜂窝结构的 $[\alpha\text{-Fe} + (\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3]$ 相不断增多.这是由于 $B_2$ 区 Cr、V 含量占比较高,C 含量过低,元素分布不平衡,共晶组织中 $M_3C$ 型硬质相稳定性降低发生相变,逐渐转变为 $M_7C_3$ 型硬质相,直至完全取代 $M_3C$ 型硬质相<sup>[5,13]</sup>,共晶组织形貌发生改变,由原来的长条状变更为蜂窝状,最终转变为层片状,共晶组织中 $(\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3$ 硬质相数量随之增多. SEM - EDS 分析表明钒促进了由 V、Cr、Fe 组成的 $(\text{Fe},\text{Cr},\text{V})_7\text{C}_3$ 的生成.

微区  $C_2$ 、 $C_3$  的 EDS 测试结果表明:该组区域内 Fe 元素含量急剧下降,与此同时 V 元素含量占比显著增加,质量分数高达 85.73%,推断该区域为富 V 碳化物,结合图 1 结果及其凝固

形态进一步判定该深黑色碳化物为 VC 硬质相。由图 2 和图 3 可以看出:随着钒铁含量的增加,析出的 VC 硬质相逐渐增多,形态由深黑色团块状逐渐演变为团球状、颗粒状;大部分 VC 硬质

相在晶界处析出,由参考文献[14]可知 VC 硬质相在晶界处析出有利于提高硬质相与基体的界面结合强度,从而提高合金耐磨性。

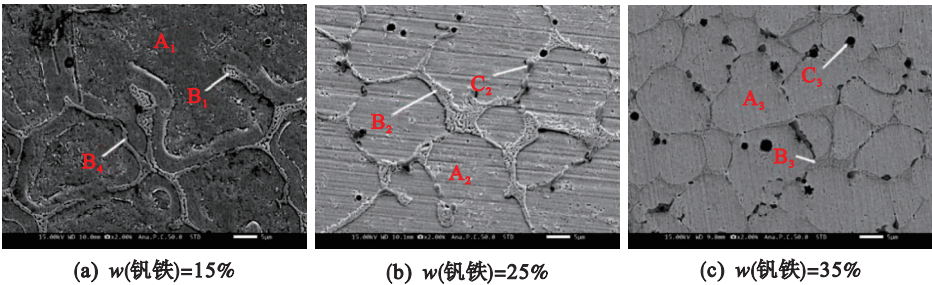


图 3 加入不同质量分数钒铁的铁基堆焊层 SEM 组织

Fig. 3 SEM microstructure of iron – based surfacing layers with different mass fractions of ferrovanadium

表 2 特征区域 EDS 分析结果

Table 2 EDS results of typical regions

| 样品            | 微区             | w(Fe)/% | w(V)/% | w(Cr)/% | w(C)/% | w(Si)/% |
|---------------|----------------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 15% 钒铁 + Fe60 | A <sub>1</sub> | 83.64   | 3.22   | 5.93    | 6.79   | 0.42    |
|               | B <sub>1</sub> | 68.31   | 10.08  | 13.25   | 8.36   | —       |
|               | B <sub>4</sub> | 80.21   | 8.97   | 5.66    | 4.63   | 0.53    |
| 25% 钒铁 + Fe60 | A <sub>2</sub> | 80.40   | 7.49   | 6.38    | 5.04   | 0.69    |
|               | B <sub>2</sub> | 73.46   | 13.04  | 11.23   | 1.99   | 0.28    |
|               | C <sub>2</sub> | 5.27    | 77.43  | 3.71    | 13.59  | —       |
| 35% 钒铁 + Fe60 | A <sub>3</sub> | 79.14   | 9.08   | 7.63    | 3.52   | 0.63    |
|               | B <sub>3</sub> | 64.34   | 15.23  | 8.24    | 11.78  | 0.41    |
|               | C <sub>3</sub> | 3.70    | 85.73  | 3.21    | 6.33   | 1.03    |

图 4 为添加质量分数为 35% 钒铁的铁基合金堆焊层的面成分分析结果。

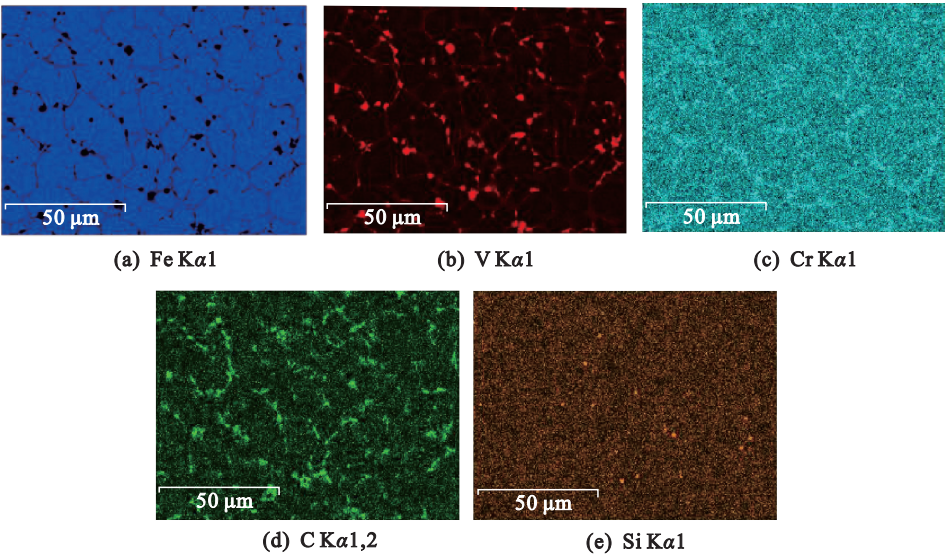


图 4 添加钒铁质量分数为 35% 的铁基合金堆焊层面扫描图像

Fig. 4 EDS element mapping of iron – based alloy surfacing layer with 35% ferrovanadium

由图 4 可以看出:基体内富含 Fe 元素,固溶一定量 Cr、V 元素;晶界处连续网状共晶组织内含一定量 V、Cr 元素,少量 Fe 元素,证明其为  $[\alpha - \text{Fe} + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3]$  硬质相;团球状、颗粒状物质富含 V、C 元素,判断其为 VC 硬质相,这些硬质相共同生长,相互依靠,其中大部分 VC 硬质相与共晶组织相互交叉贯穿在一起,形成多边形网络结构的耐磨骨架.有文献<sup>[15]</sup>表明:网络结构增强相因与之交叉贯穿的基体相所具有的韧性而得到增韧,基体相则由于网络增强相骨架的刚性承载作用而得到增强,二者相互依托,相互补强,由此产生的强化效果要远高于增强颗粒单独在基体中均匀分散的情形.

2.3 堆焊层侧面显微硬度分析

图 5 为 6 组不同钒铁含量的铁基堆焊层侧面显微硬度变化曲线,其与显微组织变化相一致.根据硬度和显微组织的变化,将其分为 3 个区域:基体区、过渡区和堆焊区.各区域内的硬度变化不大,超过层界后硬度变化明显.基体区硬度最低,平均硬度仅为 178.7HV<sub>0.2</sub>.从基体区到

堆焊区存在明显的过渡区硬度,其介于基体区与堆焊区之间,可以用过渡区组织来解释,在界面处基体组织以平面晶方式生长,随着向堆焊层顶部的推进逐渐转为胞状晶,其硬度较低,但同时堆焊层中形成少量的高硬度 VC 和  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相,有助于提高过渡区硬度.过渡区起缓冲作用,可使基体与堆焊层之间保持良好的冶金结合.最高显微硬度出现在堆焊层表层附近,最高点显微硬度可达 719.1HV<sub>0.2</sub>.堆焊层近表层平均显微硬度变化趋于平缓,这归因于低硬度母材对堆焊层的稀释作用减弱,进而减少了堆焊层表层化学成分的变化.当添加的钒铁质量分数达到 35% 时,该区平均显微硬度 (629.4HV<sub>0.2</sub>) 最高,约为基体的 3.5 倍.这主要归因于堆焊层近表层组织中高硬度 VC 和  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相数量显著增多,大量 VC 结合  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相形成网状耐磨骨架,有效提升了显微硬度平均值.同时,VC 晶粒细化基体组织、V 和 Cr 元素对基体固溶强化作用也是堆焊层显微硬度提升的主要原因.

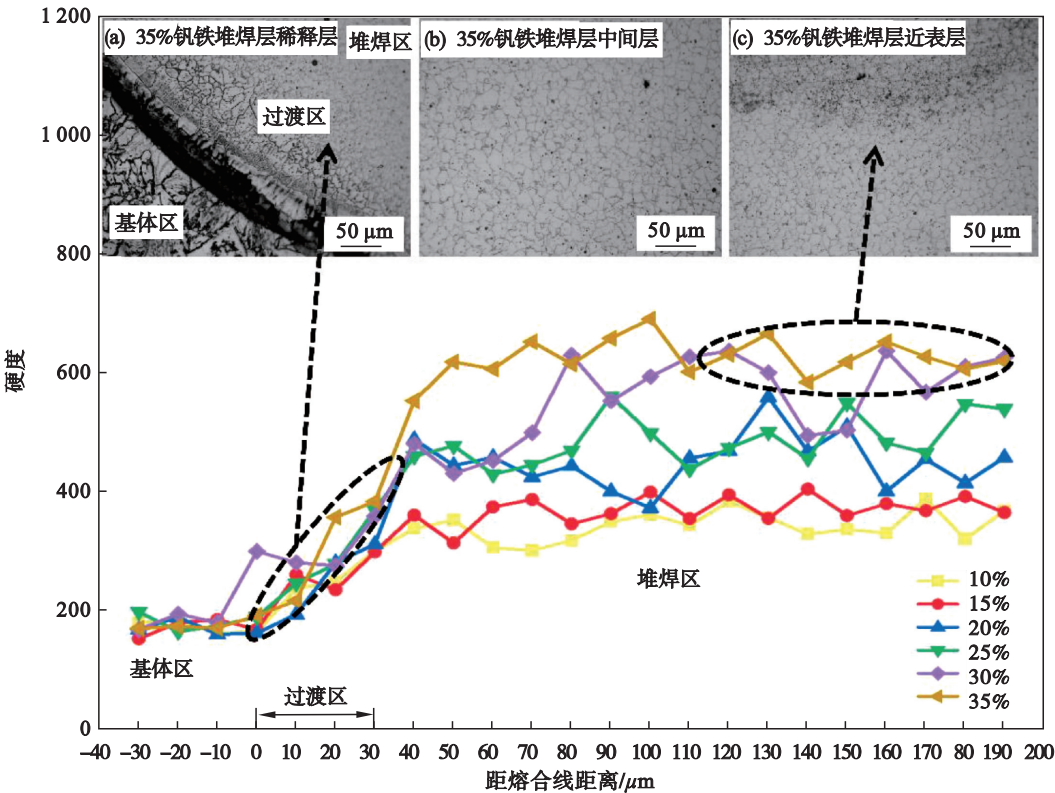


图 5 添加不同质量分数钒铁的铁基堆焊层侧面显微硬度

Fig. 5 Microhardness on side of iron - based surfacing layers with different mass fractions of ferrovanadium

3 结 论

(1) 铁基合金堆焊层显微组织由  $\alpha - \text{Fe}$  基体与  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_3\text{C}$  和 VC 硬质相组成. 合金中随着钒铁含量的增加, 基体组织逐渐细化,  $\alpha - \text{Fe}$  基体中 Cr、V 元素固溶强化作用显著增强.

(2) 随着钒铁含量的增加, 共晶组织中长条状  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_3\text{C}$  转变为蜂窝状及层片状  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  逐渐增多; VC 硬质相由团块状转变为团球状和颗粒状, 且大部分 VC 硬质相在晶界处析出, 其与  $\alpha - \text{Fe}$  和  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相交织形成多边形网络耐磨骨架, 提升了堆焊层硬度和耐磨性.

(3) 堆焊层侧面平均显微硬度随钒铁含量的增加总体呈上升趋势, 其平均显微硬度最大值在近表层区域. 这是由于近表层处析出的 VC 和  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  硬质相显著增加, 平均硬度不断提高. 当添加的钒铁质量分数为 35% 时, 堆焊层近表层平均显微硬度 ( $629.4\text{HV}_{0.2}$ ) 最高, 约为基体的 3.5 倍.

参考文献:

[1] 韩明臻, 闫玉东, 李东莹, 等. 耐磨堆焊发展现状及工艺的探讨[J]. 世界有色金属, 2022(10): 193 - 195.

[2] LAD V I, MENGHANI J V, CHANNIWALA S A. Studies on the Effect of Alloying Element in Iron Base Hardfacing Alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(3): 343 - 349.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 张永生, 段嘉旭, 赵文礼, 等. C 含量对 Fe - Mo -

V 堆焊合金组织性能的影响[J]. 电焊机, 2024, 54(3): 43 - 47.

[6] WANG H, YU S F, KHAN A R, et al. Effects of Vanadium on Microstructure and Wear Resistance of High Chromium Cast Iron Hardfacing Layer by Electroslag Surfacing[J]. Metals, 2018, 8(6): 458.

[7] 龚建勋, 董海龙, 黄洪江, 等. 钒含量对 Fe - Cr - V - B - C 系堆焊合金显微组织和耐磨性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(10): 37 - 42.

[8] SINGLA Y K, DWIVEDI D K, ARORA N. On the Modeling of Dry Sliding Adhesive Wear Parameters of Vanadium Additive Iron - Based Alloys at Elevated Temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 223 - 233.

[9] QI X W, JIA Z N, YANG Q X, et al. Effects of Vanadium Additive on Structure Property and Tribological Performance of High Chromium Cast Iron Hardfacing Metal[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(23/24): 5510 - 5514.

[10] LAI H H, HSIEH C C, LIN C M, et al. Effects of Vanadium Content on the Microstructure and Dry Sand Abrasive Wear of a Eutectic Cr - Fe - C Hardfacing Alloy[J]. Metals and Materials International, 2016, 22(1): 101 - 107.

[11] 郝建军, 杨泽宇, 马璐萍, 等. Fe - Cr - C - V 等离子堆焊层改善旋耕刀耐磨性和冲击韧性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 24 - 30.

[12] 聂辉文, 曾松盛, 聂俊红, 等. 碳化钒含量对  $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Co}_{10}$  高熵合金涂层蠕变性能的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(8): 50 - 55.

[13] 禹润缜, 刘胜新, 王朋旭, 等. Fe - Cr - C 系硬面合金及其硬质相的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(21): 3780 - 3788.

[14] LEE J, LEE D, SONG M H, et al. *In - Situ* Synthesis of TiC/Fe Alloy Composites with High Strength and Hardness by Reactive Sintering[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(8): 1397 - 1404.

[15] 伍天华, 李文戈. 原位自生 WC -  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  复相陶瓷增强铁基表面复合材料[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(6): 924 - 927.

# Group Decision Analysis Based on Probabilistic Dual Hesitant Fuzzy Information

WANG Xiao, CHEN Yan

(School of Science, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** To solve the group decision making problem under probabilistic dual hesitant fuzzy preference relations, and effectively handle expert opinion divergence and control the cost of consensus feedback, this paper constructs a decision model integrating consistency test and cooperative game theory. First, the transformation matrix is employed to define the additive consistency of probabilistic dual hesitant fuzzy preference relations, so as to test the logical consistency of experts' initial preferences. Second, the expert group is treated as a cooperative coalition. Considering comprehensively expert opinion compatibility and unit adjustment cost, the Shapley value is applied to quantify the marginal contribution of each expert to the coalition and assign expert weights objectively, so as to effectively identify synergistic value and restrain extreme preferences. A minimum – cost consensus feedback optimization model is established to minimize the overall adjustment cost on the premise of ensuring the group reaches the preset consensus level. Finally, a minimum – deviation programming model is constructed to solve the optimal alternative weight vector and complete evaluation and ranking. This decision – making method not only ensures the reliability of decision process but also makes up for the deficiency of traditional models ignoring adjustment costs, and balances the efficiency and economy of group consensus reaching.

**Key words:** probabilistic dual hesitant fuzzy preference relations; consensus; cooperative game; consistency

(上接第 306 页)

# Effect of Vanadium Content on Microstructure and Properties of Fe – Cr – C Surfacing Alloys

ZONG Lin<sup>1</sup>, LI Liwei<sup>1</sup>, MA Yalin<sup>1</sup>, HU Zuohua<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Six groups of experiments with different ferrovanadium contents and Fe60 alloy powder were carried out on 20 steel substrates by plasma surfacing technology, and the microstructure and properties of the surfacing layer were characterized by SEM, EDS, XRD and Vickers hardness tester, and the influence of different ferrovanadium contents on the microstructure and properties of the surfacing layer was discussed. The results show that the microstructure of the surfacing layer is composed of  $\alpha$  – Fe, VC,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  and  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_3\text{C}$ . With the increase of ferrovanadium content, the matrix microstructure of  $\alpha$  – Fe was gradually refined. The eutectic structure changes from long strip shape to honeycomb shape, and finally transforms into lamellar structure. The amounts of VC,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$  hard phases increased gradually. Most of the VC was precipitated at the grain boundary, which significantly enhanced the interfacial bonding strength, and formed a polygonal network wear – resistant framework with the  $[\alpha - \text{Fe} + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3]$  phase to improve the wear resistance of the alloy. With the increase of ferrovanadium content, the average microhardness value of the surfacing layer continues to increase, and when the ferrovanadium mass fraction is 35%, the average near – surface microhardness of the surfacing layer near the surface layer is the highest, reaching 629.4HV<sub>0.2</sub>, which is about 3.5 times that of the substrate matrix.

**Key words:** hardfacing; Fe – Cr – C; microstructure; microhardness