

原位合成V(C,N)对铁基堆焊合金组织性能的影响

白云朋, 贾华, 徐令, 张潇予, 祝茂函, 武立波
(大连海洋大学 机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要 采用自制药芯焊丝明弧堆焊方法在Q235钢表面制备5组不同钒含量的Fe-Cr-C-N-V系铁基堆焊合金。借助X射线衍射仪、光学显微镜、扫描电子显微镜、洛氏硬度计和湿砂磨损试验机对堆焊合金的组织性能进行分析。结果表明:堆焊合金主要由马氏体、残余奥氏体、V(C,N), $M_7(C,N)_3$, $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_3(C,N)$ 等相组成。随着V添加量的增多,原位生成的V(C,N)陶瓷硬质相颗粒增多,初生奥氏体晶粒细化,部分转变为马氏体,共晶硬质相增多并逐渐由网状断裂为孤立状。当V的质量分数为8%时,各相组织之间匹配良好,堆焊合金具有最佳的耐磨性,此时硬度为64.5HRC,磨损量为0.1667 g。此后继续增加V的添加量,V(C,N)陶瓷硬质相颗粒聚集长大,导致堆焊合金的耐磨性变差。

关键词 药芯焊丝;原位合成;V(C,N)陶瓷硬质相颗粒;铁基堆焊合金;组织性能

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2026)02-0083-05

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250826.001

Effect of in-situ synthesized V (C,N) on microstructure and properties of iron-based surfacing alloys

BAI Yunpeng, JIA Hua, XU Ling, ZHANG Xiaoyu, ZHU Maohan, WU Libo

(College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract Five groups of Fe-Cr-C-N-V iron-based surfacing alloys with varying vanadium contents were prepared on the surface of Q235 steel using a self-made flux-cored wire open-arc surfacing method. The microstructure and properties of the surfacing alloys were analyzed using X-ray diffractometer, optical microscope, scanning electron microscope, rockwell hardness tester, and wet sand wear tester. The results indicate that the surfacing alloys primarily consist of martensite, residual austenite, V(C,N), $M_7(C,N)_3$, $M_{23}(C,N)_6$, and $M_3(C,N)$ phases. With increasing vanadium addition, the in-situ generated V(C,N) ceramic hard phase particles increase, the primary austenite grains refine, some transform into martensite, and the eutectic hard phases increase and gradually break from a network structure into isolated shapes. When the mass fraction of vanadium is 8%, the phase structures match well, resulting in the best wear resistance of the surfacing alloy, with a hardness of 64.5HRC and a wear loss of 0.1667 g. Continuing to increase the vanadium addition thereafter leads to the aggregation and growth of V(C,N) ceramic hard phase particles, resulting in a decrease in the wear resistance of the surfacing alloy.

Keywords flux-cored wire; in-situ synthesis; V(C,N) ceramic hard phase particles; iron-based surfacing alloys; microstructure and properties

铁基堆焊合金综合性能优良、来源广泛、价格低廉,是目前应用最多的硬面材料之一^[1-2]。为了提高金属零件的使用寿命,目前关于铁基堆焊合金的研究主要集中在向Fe-Cr-C系铁基合金中添加Ti, Nb, V, W, B和稀土等元素,原位形成碳化物或硼化物陶瓷硬质相强化性能方面^[3-6]。由于V在我国攀西地区蕴藏丰富,并且是一种强碳化物元素,具有细化晶粒、提高淬透性的作用,其形成的VC颗粒熔点高、硬度高和化学稳定性好,与铁基体润湿性良好^[7-9],因此

V是提高铁基堆焊合金耐磨性的理想元素。已有研究表明^[10-12],向铁基堆焊合金中加入适量的V,可以原位生成圆球状VC,呈均匀弥散分布,并且VC能作为异质形核基底,促进形核,细化晶粒,改变共晶组织形貌,从而使合金的耐磨性显著提高。为了形成更多的VC,一般需要增加C的添加量,但这会导致堆焊合金的抗裂性和焊接工艺性能变差。氮与碳的原子半径相近,用氮代替部分碳,焊接工艺性能不会变差,还将形成比VC更稳定、细小的碳氮化物V(C,N)颗粒,

收稿日期:2025-04-22;修回日期:2025-08-18

基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(QL201914);辽宁省科技计划联合计划(2025-MSLH-117);2025年大连海洋大学省级大学生创新创业训练计划项目

第一作者:白云朋,男。E-mail:2326792047@qq.com。

通讯作者:武立波,男,硕士,副教授。E-mail:wulibo@dlou.edu.cn。

在强化铁基堆焊合金耐磨性方面具有更广阔的前景^[3-4]。

目前,关于碳氮化物V(C,N)颗粒强化铁基堆焊合金耐磨性方面的研究较少。因此,本文作者用自制的自保护药芯焊丝进行明弧堆焊,通过改变V的含量制备Fe-Cr-C-N-V系堆焊合金,研究原位合成V(C,N)颗粒对铁基耐磨堆焊合金组织和性能的影响。

1 试验材料与方法

研制的药芯焊丝使用H08A钢带(16 mm×0.3 mm),药粉为石墨、高碳铬铁、氮化铬、钒铁、铁粉,粉末粒度为150~180 μm。另外,药粉中还添加少量的铝粉、CaO、Al₂O₃和CaF₂等,对焊接过程进行保护。为了能够原位合成V(C,N)陶瓷硬质相颗粒,在2%~10%内改变V的添加量(质量分数分别为2%,4%,6%,8%,10%),制备5组药芯焊丝。药芯焊丝直径为2.8 mm,包粉率为45%±1%。

母材选用Q235低碳钢板(100 mm×80 mm×12 mm)。在堆焊前将母材表面的氧化皮和油污等清理干净,然后用夹具固定在焊接试验台上,最后用MZC-1250型埋弧焊机将药芯焊丝明弧堆焊在母材表面。堆焊电弧电压为25~30 V,焊接电流为180~200 A,焊接速度为10 mm/s,焊丝伸出长度为15 mm。每个试样堆焊3层,每层3道焊缝,堆焊层厚度约为9 mm。

用线切割切取硬度、金相和磨损试样(56 mm×27 mm×11 mm)。物相组成用布鲁克D8型X射线衍射仪分析。显微组织用OMLPUS BX-6型金相显微镜和日立S-3400N型扫描电子显微镜观察。硬度用HRC-150A型洛氏硬度计测试。磨损试验在MLS-23型橡胶轮式湿砂磨损试验机上进行,磨损参数见表1。试样磨损前后的质量 M_0 和 M_1 用分析天平测量,则试样被磨损的质量为 $\Delta M=M_0-M_1$ 。磨损试样的表面形貌用扫描电子显微镜观察。

表1 磨损试验参数

Table 1 Wear test parameters

石英砂 粒度/μm	胶轮转速 N/(r·min ⁻¹)	胶轮直径 d/mm	胶轮表面压力 P/MPa	磨损时间 t/min
380~212	240	150	1.5	3

2 结果及讨论

2.1 铁基堆焊合金的成分分析

堆焊结束后,将试样表面打磨平整,钻取金属粉末,采用化学方法分析化学成分,结果见表2。

表2 堆焊合金的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of welding alloy (mass fraction/%)

添加量 w(V)/%	C	Cr	N	V	Fe
2	1.40	13.52	0.17	0.56	余量
4	1.37	13.29	0.19	1.13	余量
6	1.40	13.45	0.21	1.78	余量
8	1.38	13.22	0.19	2.39	余量
10	1.41	13.36	0.20	3.03	余量

2.2 铁基堆焊合金的物相分析

图1为不同钒添加量时堆焊合金的XRD衍射图。由图1可见,在Fe-Cr-C-N-V系堆焊合金中,当V的质量分数为2%时,堆焊合金的基体组织主要是马氏体和少量的残余奥氏体,硬质相主要是M₇(C,N)₃,M₂₃(C,N)₆和M₃(C,N)等,硬质相中的M为Fe,Cr和V元素,此时没有VC和VN衍射峰出现,说明堆焊合金中没有VC和VN相生成。当V的质量分数为8%时,出现了VC和VN衍射峰,说明药粉中的石墨、高碳铬铁、氮化铬和钒铁之间发生了化学反应,原位合成了VC和VN相。VC和VN都是面心立方晶体,晶格常数十分接近(分别为0.417 nm和0.413 4 nm),二者可形成连续固溶体V(C,N)。同时,马氏体的衍射峰增加,奥氏体的衍射峰减小,说明堆焊合金中马氏体的量增多,残余奥氏体的量减少。当V的质量分数为10%时,堆焊合金主要由马氏体、残余奥氏体、VC、VN,M₇(C,N)₃,M₂₃(C,N)₆和M₃(C,N)相组成,但是马氏体的衍射峰减少,奥氏体的衍射峰增加,说明此时堆焊合金中马氏体的量减少,残余奥氏体的量增加。

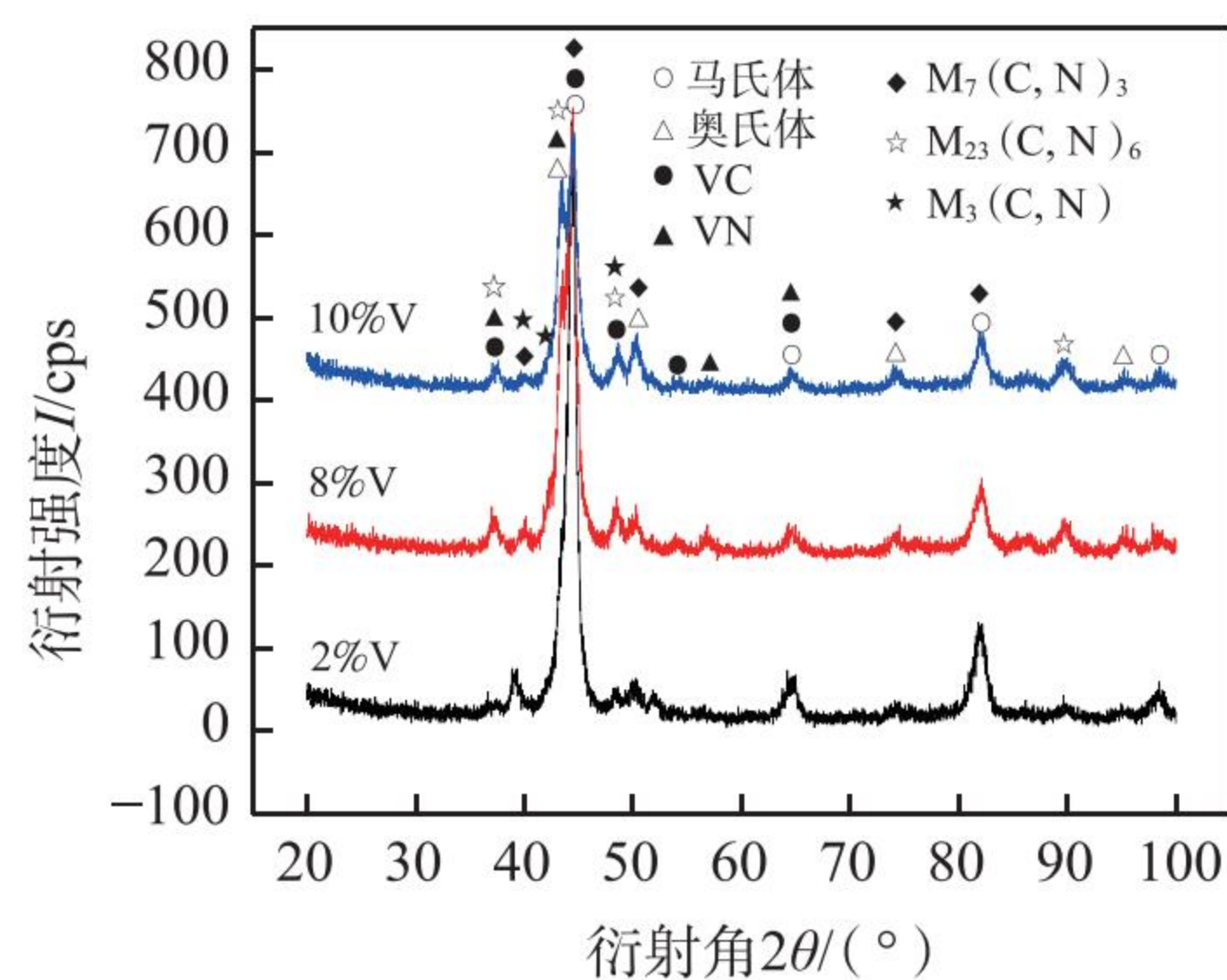


图1 不同钒添加量时堆焊合金的XRD衍射图

Fig.1 XRD Patterns of iron-based surfacing alloy with different vanadium addition

在Fe-Cr-C-N-V系铁基合金中,参加反应的元素主要是Fe,Cr,C,N和V等,可能生成的碳化物和氮化物主要有VC,VN,Cr₂₃C₆,Cr₇C₃和Fe₃C等。可以采用热力学分析这些碳化物和氮化物的生成。当温度和压力

一定的同等条件下,吉布斯自由能 $\Delta G_0 < 0$ 的化学反应能够发生,并且自由能 ΔG_0 越低反应越容易发生。该合金系中可能发生化学反应的各反应物吉布斯自由能见表3^[13]。

表3 各反应物的吉布斯自由能^[13]
Table 3 Gibbs free energy of each reactant^[13]

反应方程式	吉布斯自由能 $\Delta G_0 / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	温度 T/K
$23\text{Cr}+6\text{C}=\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$-309\ 600-77.4T$	$298 < T < 1\ 793$
$7\text{Cr}+3\text{C}=\text{Cr}_7\text{C}_3$	$-153\ 600-37.2T$	$298 < T < 2\ 130$
$3\text{Fe}+\text{C}=\text{Fe}_3\text{C}$	$29\ 040-28.03T$	$298 < T < 1\ 000$
	$11\ 234-11.0T$	$1\ 000 < T < 1\ 410$
$\text{V}+\text{C}=\text{VC}$	$-102\ 100+9.58T$	$298 < T < 2\ 298$
$\text{V}+\text{N}=\text{VN}$	$-214\ 640+82.43T$	$298 < T < 2\ 644$

根据表3数据绘制各反应物吉布斯自由能的变化曲线,如图2所示。由图2可见,生成物VC, VN, Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 和 Fe_3C 的吉布斯自由能都小于零,说明这些物质都能生成,但是 Cr_{23}C_6 的吉布斯自由能最低, Cr_7C_3 的吉布斯自由能次之,说明在满足成分条件时, Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 可比VC, VN优先生成。

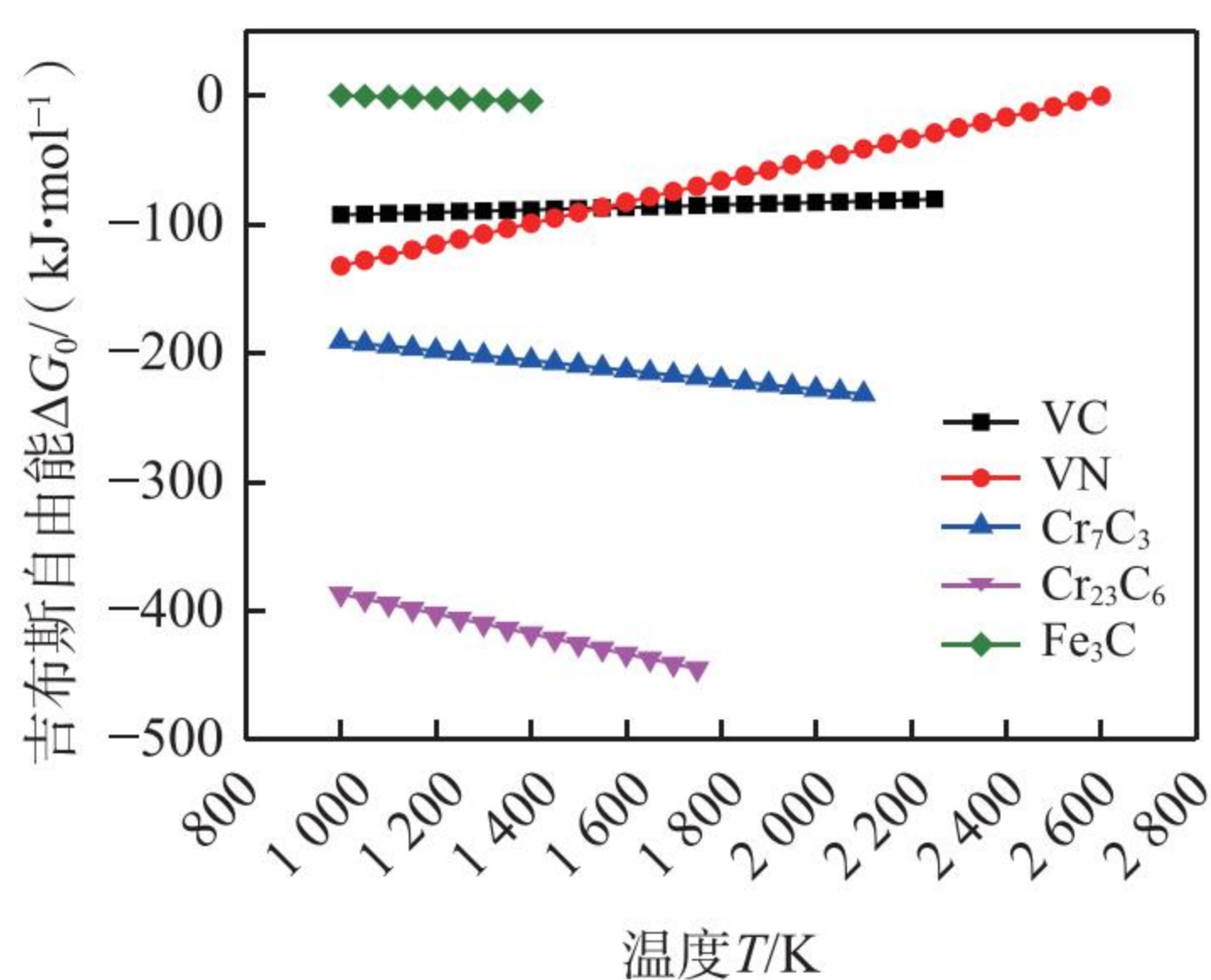


图2 各反应物吉布斯自由能的变化曲线

Fig.2 Gibbs free energy variation curves of various reactants

2.3 铁基堆焊合金显微组织分析

图3为不同V添加量时堆焊合金的金相组织形貌。由图可见,当V的质量分数为2%时,无原位V(C,N)陶瓷硬质相颗粒生成,初生奥氏体晶粒粗大,其上分布少量针状马氏体,周围共晶硬质相呈连续网状分布。这是由于堆焊合金中V的含量较少,成分起伏达不到要求,未能与碳和氮生成V(C,N)陶瓷硬质相颗粒,多余的碳和氮大部分生成 $\text{M}_7(\text{C},\text{N})_3$, $\text{M}_{23}(\text{C},\text{N})_6$ 和 $\text{M}_3(\text{C},\text{N})$ 共晶硬质相,少量固溶于初生奥氏体中,所以在后续快速冷却过程中,有部分初生奥氏体转变为针状马氏体。此后随着V的质量分数从4%增至8%时,原位生成的V(C,N)陶瓷硬质相颗粒增多,初生奥氏体晶粒细化,部分转变为马氏体,共晶硬质相增多,并

逐渐由网状断裂为孤立状,如图3b~d所示。当V的质量分数为8%时,组织之间实现良好匹配,原位生成的V(C,N)陶瓷硬质相颗粒数量最多,呈均匀弥散分布,初生奥氏体晶粒细小,共晶硬质相数量最多,并呈断网状分布,如图3d所示。这是由于V是强碳氮化物形成元素,当满足成分条件时将优先与C和N生成V(C,N)陶瓷硬质相颗粒,成为异质形核核心,使组织中的晶粒细化。另外,V还能用作钢的变质剂促使晶粒细化。当V的质量分数增至10%时,原位生成的V(C,N)陶瓷硬质相颗粒聚集长大,初生奥氏体晶粒粗化,马氏体和共晶硬质相数量减少,如图3e所示。这是由于堆焊合金中的碳和氮含量是一定的,添加过量的V将会消耗更多的碳和氮,致使共晶碳氮化物硬质相和马氏体减少。另外,多余的V只能依附在先形核的V(C,N)晶粒上进行生长,从而使V(C,N)陶瓷硬质相颗粒聚集长大。

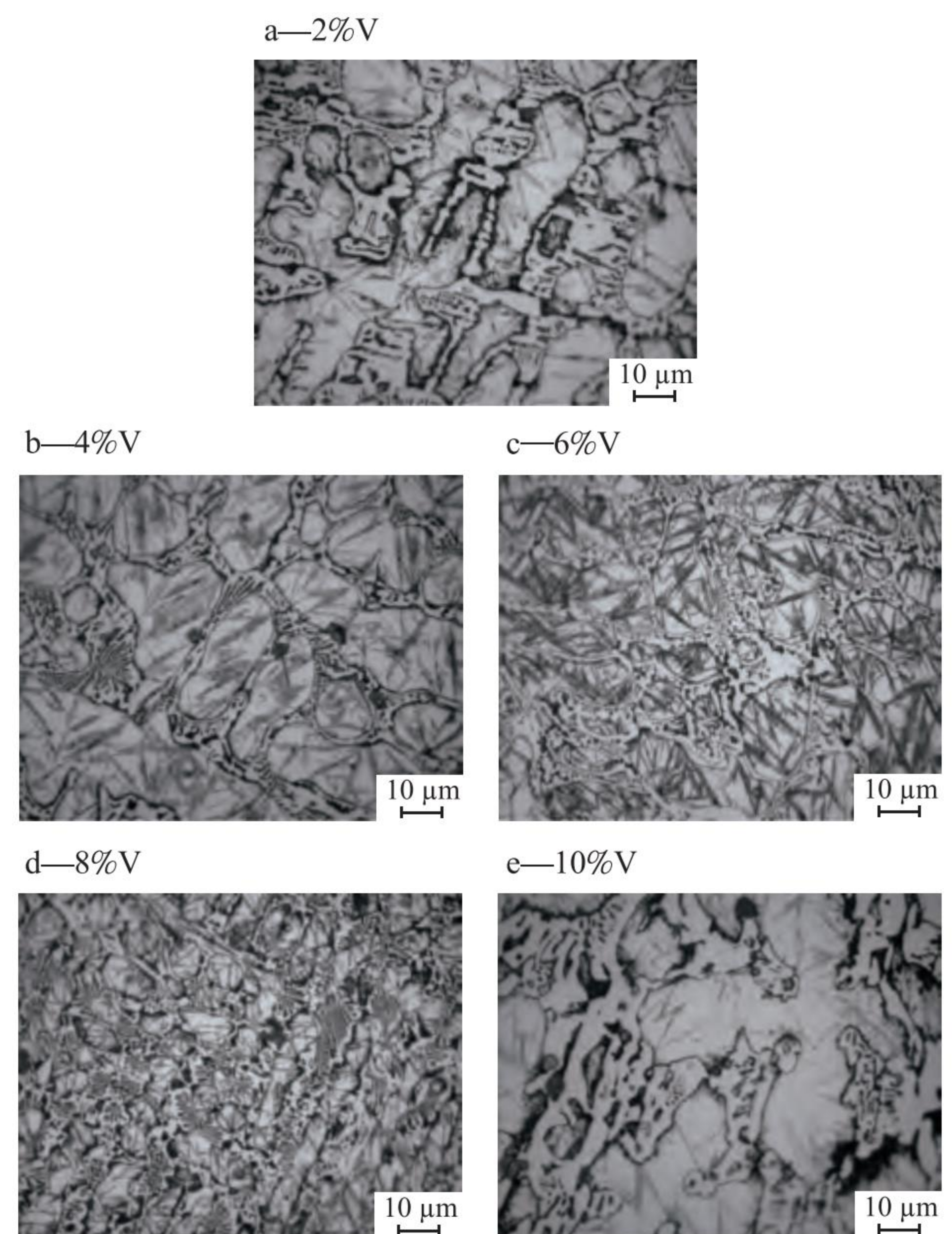


图3 不同V添加量时堆焊合金的金相组织形貌

Fig.3 Microstructural morphology of sukfacing alloy with different vanadium additions

研究表明^[14],在高铬铸铁中,V作为强碳化物形成元素,主要以生成VC, $(\text{Cr},\text{Fe},\text{V})_7\text{C}_3$ 相和固溶于基体中3种形式存在。为了明确Fe-Cr-C-N-V系铁基堆焊合金的物相组成,对V的质量分数为8%的合金层进行各元素能谱分析,结果如图4所示。由图4a可以看

出,a点黑色块状颗粒V,C和N较多,Fe和Cr较少,b点共晶组织中Cr,Fe,V,C和N均有分布。由于VC和VN均是立方晶系,在组织中呈颗粒状存在,并且C原子与N原子的半径相近,可以任意比例互溶形成固溶体。V原子半径为0.135 nm,铁原子和铬原子半径为0.127 nm,原子半径相近,再结合前面的XRD分析结果,判断a点为 $V(C,N)$ 陶瓷硬质相颗粒,b点为缠绕在一起的 $M_{23}(C,N)_6$, $M_7(C,N)_3$ 和 $M_3(C,N)$ 共晶硬质相。

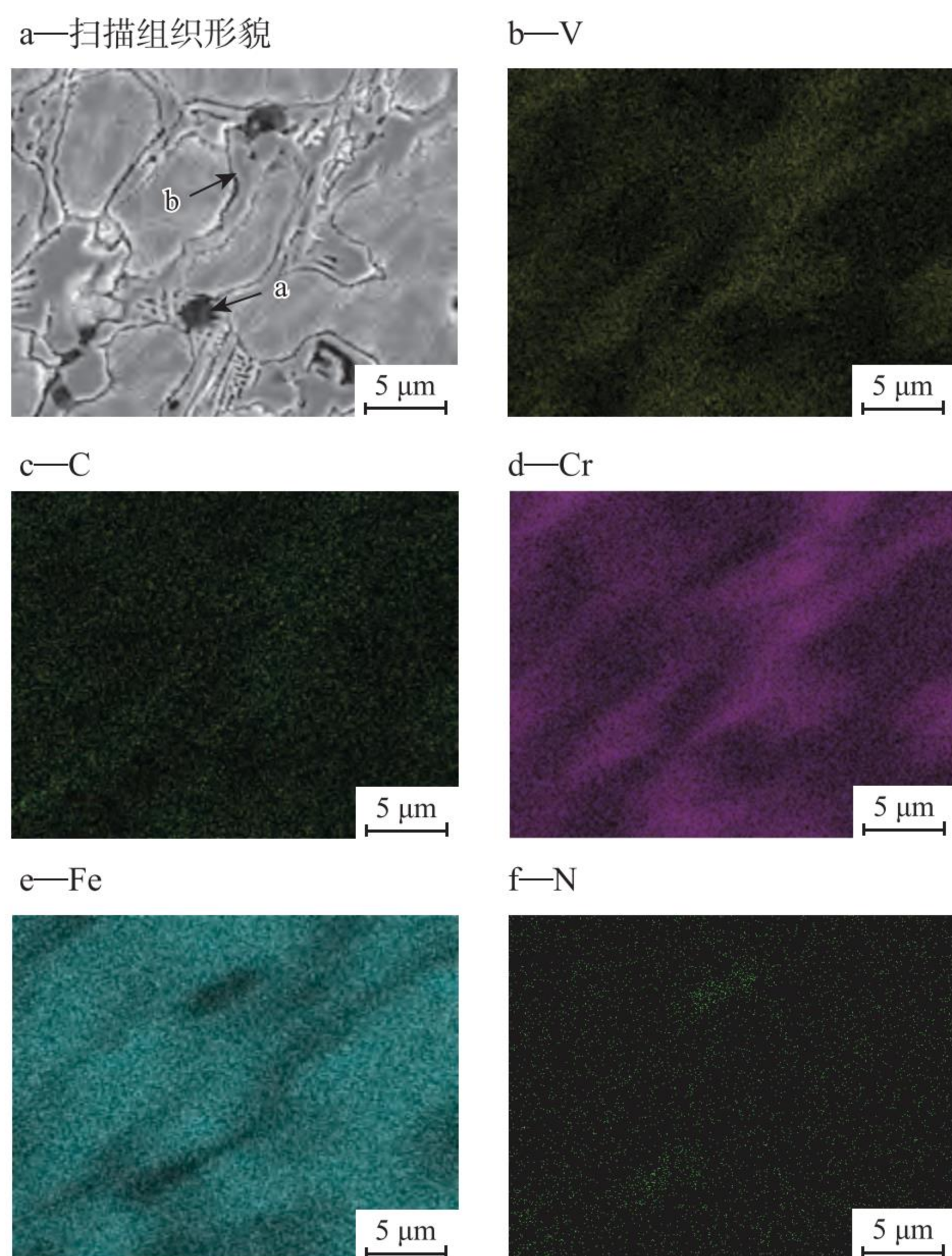


图4 堆焊合金面扫描图像

Fig.4 Surface scanning image of surfacing alloy

由图4a还可以看出,原位生成的 $V(C,N)$ 陶瓷硬质相颗粒主要分布在初生奥氏体周围的共晶组织中。这是由于亚共晶合金凝固时,首先从液相中析出初生奥氏体,部分V,Cr,C和V则固溶于初生奥氏体中。随着温度降低,V,Cr,C和V在初生奥氏体中的固溶量逐渐减少,使这些元素逐渐向初生奥氏体周围的液相中富集。通过前面的热力学分析可知, $Cr_{23}C_6$ 和 Cr_7C_3 的吉布斯自由能比VC和VN更低,所以在满足成分条件下 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 可优先析出,并缠绕在一起分布初生奥氏体周围。由于在 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 形核与长大过程中,V被迁移到初生奥氏体周围,参与形成 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 或固溶于 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 中,所以弱化了V形成VC和VN的能力。当温度降至780℃时,在满足VC和VN生成条件时,才能作

为二次碳化物从共晶组织中析出^[15]。

2.4 铁基堆焊合金的耐磨性分析

图5为不同V添加量时堆焊合金硬度和磨损量曲线。由图可见,当V的质量分数为2%时,堆焊合金硬度最低,磨损量最大。随着V添加量的增多,硬度增加,磨损量降低,表明堆焊合金的耐磨性得以改善。当V的质量分数为8%时,堆焊合金的耐磨性能达到最佳值,此时硬度最高为64.5HRC,磨损量最小为0.1667 g。此后继续增加V的质量分数为10%时,硬度下降,磨损量增大,表明堆焊合金的耐磨性变差。由于试验采用明弧堆焊方法制备Fe-Cr-C-N-V合金,当V添加量较少时,过渡到堆焊合金中的V含量较少,不能生成 $V(C,N)$ 硬质相颗粒,对合金组织改善作用不明显,因此堆焊合金的硬度较低,磨损量较大。随着V添加量的增多,过渡到堆焊合金中的钒含量增加,在V作用下,初生奥氏体晶粒长大受到抑制,含V共晶硬质相 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 增多,并且在共晶组织中有 $V(C,N)$ 陶瓷硬质相颗粒生成,加上初生奥氏体转变为马氏体,从而使堆焊合金的硬度增加,磨损量减小。继续增加V的添加量,受堆焊合金中C和N的含量限制,多余的V只能堆砌在 $V(C,N)$ 原有晶核上聚集长大。由于粗大 $V(C,N)$ 陶瓷硬质相颗粒与基体组织的结合力降低,加上初生奥氏体晶粒长大与共晶硬质相数量减少等因素共同作用,导致堆焊合金的硬度下降,磨损量增大。

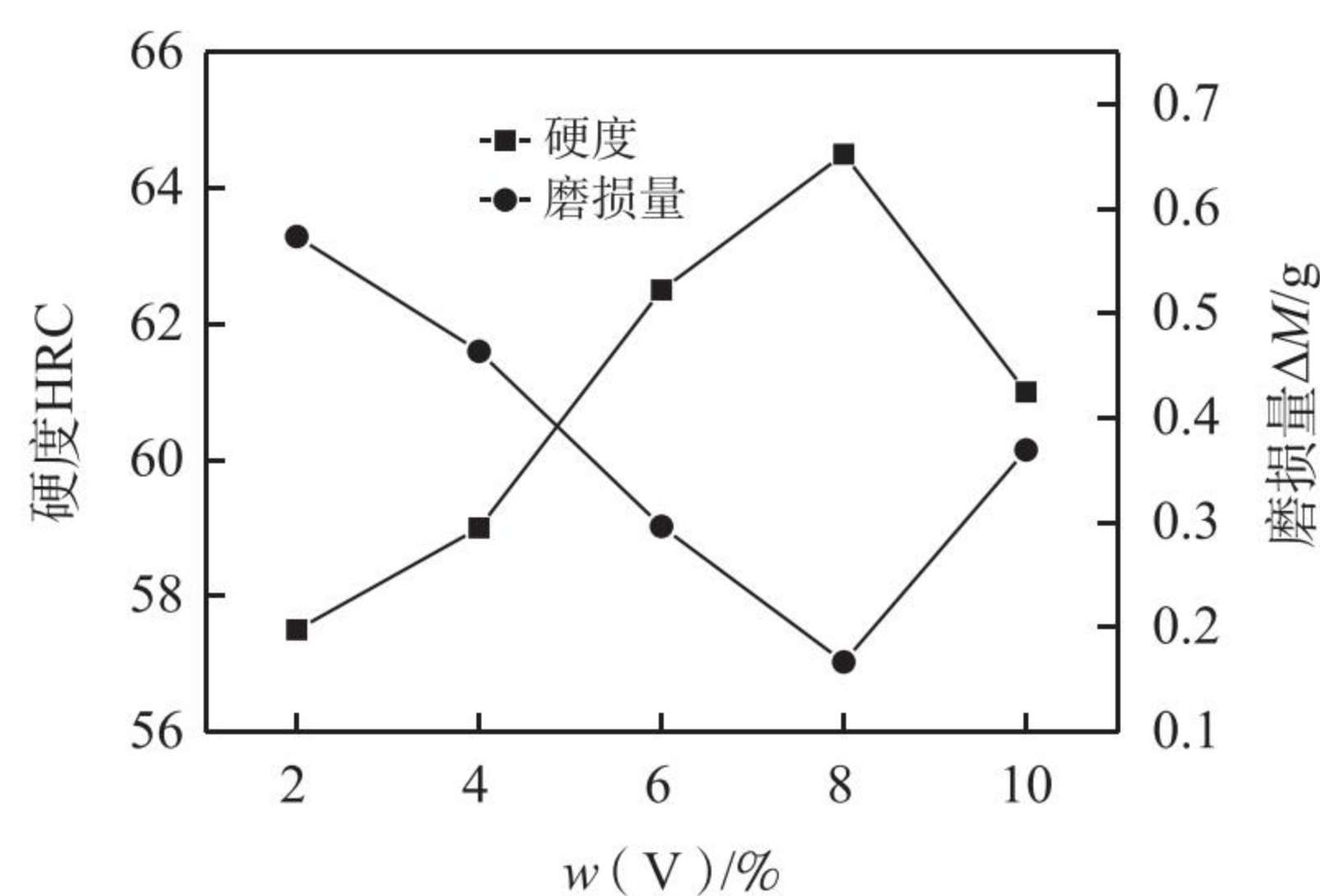


图5 不同钒添加量时堆焊合金的硬度和磨损量曲线

Fig.5 Hardness and wear rate curves of surfacing alloy with different vanadium additions

图6为不同V添加量时堆焊合金的磨损形貌。由图可见,当V的质量分数为2%时,堆焊合金磨损形貌的磨痕较多,沟槽较深,排列比较密集并且连续,为典型的犁沟式微观切削,如图6a所示。这是由于V添加量较少时,V未与C或N生成 $V(C,N)$ 陶瓷硬质相颗粒,导致石英砂磨粒很容易压入堆焊合金表面并产生犁削运动,因此堆焊合金磨损失质量较大,耐磨性较差。当V的质量分数为8%时,堆焊合金的磨损形貌只

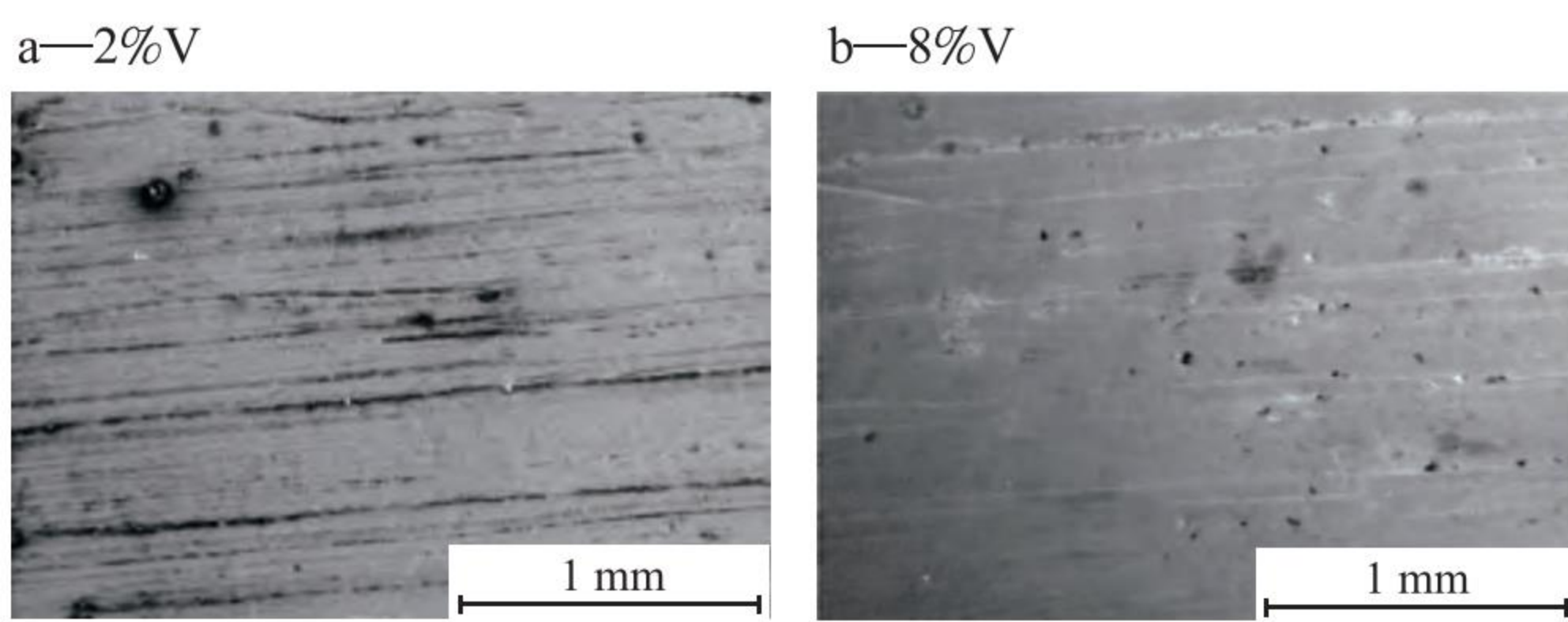


图6 不同V添加量时堆焊合金的磨损形貌

Fig.6 Wear morphology of surfacing alloy with different vanadium addition

有少量窄而浅的犁沟和极少的剥落坑,表明堆焊合金的耐磨性较好,试样的磨损机制仍以犁沟式的微观切削为主,如图6b所示。这是由于此时堆焊合金的硬质相是陶瓷颗粒V(C,N)和共晶相 $M_7(C,N)_3$, $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_3(C,N)$,基体组织是马氏体和残余奥氏体,他们之间匹配良好,协同能够有效抵抗磨料的压入与犁削作用。另外,这些硬质相都是原位生成的,与马氏体和残余奥氏体基体组织具有很强的界面结合强度,可保护硬质相不易从基体组织上脱落。因此,该成分的堆焊合金具有较高的耐磨性。

3 结论

1) 当V的质量分数为8%时,堆焊合金主要由马氏体、少量的残余奥氏体、VC, VN, $M_7(C,N)_3$, $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_3(C,N)$ 等相组成, M为Fe, Cr和V。 $Cr_{23}C_6$ 和 Cr_7C_3 的吉布斯自由能比VC和VN更低,在满足成分条件下 $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_7(C,N)_3$ 可优先析出。

2) 随着V添加量的增多,原位生成的V(C,N)陶瓷硬质相颗粒增多,初生奥氏体晶粒细化,部分转变为马氏体,共晶硬质相增多,并逐渐由网状断裂为孤立状。当V的质量分数为8%时,堆焊合金具有最佳的耐磨性能,此时硬度为64.5HRC,磨损量为0.1667 g。此后继续增加V的添加量,V(C,N)陶瓷硬质相颗粒聚集长大,导致堆焊合金的耐磨性变差。

3) 硬质相V(C,N), $M_7(C,N)_3$, $M_{23}(C,N)_6$ 和 $M_3(C,N)$ 与基体组织马氏体和残余奥氏体匹配良好,协同作用能够有效抵抗磨料的压入与犁削作用。当V的质量分数为8%时,试样的磨损机制是犁沟式的显微切削,磨损形貌只有少量窄而浅的犁沟和剥落坑,表明堆焊合金的耐磨性较好。

4 参考文献

[1] 宗琳,王学昭,徐俊尧,等. 硼化物强化铁基堆焊合金组织与性能的研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(9): 83-86.

ZONG Lin, WANG Xuezhao, XU Junyao, et al. Study on microstructure and properties of iron base hardfacing alloy strengthened by borides [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(9): 83-86. (in Chinese)

[2] 于吉鲲,孟政,贾华. 硼对含钨铁基耐磨堆焊合金组织性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(2): 82-85.

YU Jikun, MENG Zheng, JIA Hua. Effect of boron on microstructure and properties of tungsten containing iron base hardfacing alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(2): 82-85. (in Chinese)

[3] 邹宗轩,刘政军,韩旭. W对Fe-Cr-C-W-B系堆焊合金组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(7): 91-96.

ZOU Zongxuan, LIU Zhengjun, HAN Xu. Effect of W on microstructure and properties of Fe-Cr-C-W-B surfacing alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(7): 91-96. (in Chinese)

[4] 贾华,高明,刘政军. Ti和Nb对铁基堆焊合金组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 87-91.

JIA Hua, GAO Ming, LIU Zhengjun. Effect of Ti and Nb on microstructure and properties of Fe based surfacing alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(3): 87-91. (in Chinese)

[5] CHEN Hongyu, GU Dongdong, ZHANG Hongmei, et al. Novel WC-reinforced iron-based composites with excellent mechanical properties synthesized by laser additive manufacturing: Underlying role of reinforcement weight fraction [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 289: 1-14.

[6] WEN Haokan, GWÉNAËLLE P, VIJAY B, et al. Slurry erosion, sliding wear and corrosion behavior of martensitic stainless steel composites reinforced in-situ with NbC particles [J]. Wear, 2019, 420/421: 149-162.

[7] 魏炜,黄智泉,张海燕,等. 钒对铁基碳化钨耐磨堆焊层组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 134-136.

WEI Wei, HUANG Zhiquan, ZHANG Haiyan, et al. Effect of vanadium on microstructure and performance of tungsten carbide hardfacing alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 134-136. (in Chinese)

[8] 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.

HAO Jianjun, YANG Zeyu, MA Luping, et al. Fe-Cr-C-V plasma surfacing layer improving wear resistance and impact toughness of rotary blade [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 24-30. (in Chinese)

[9] 李明喜,刘进,李殿凯. VC对铁基合金喷焊层组织与耐磨性影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(11): 214-218.

LI Mingxi, LIU Jin, LI Diankai. Effect of addition of VC on microstructure and wear resistance of Fe-based alloy coatings by plasma transferred arc welding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(11): 214-218. (in Chinese)

(下转第109页)

- axial bending[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2023, 25(9):20-31. (in Chinese)
- [12] 王兰,姜航,谢文超,等. CFRP-铝合金复合管高强混凝土短柱轴压性能研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(4):1-9.
WANG Lan, JIANG Hang, XIE Wenchao, et al. Axial compressive behavior of high-strength concrete-filled CFRP-aluminum composite tubular stub columns[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(4):1-9. (in Chinese)
- [13] 任庆新,蔡雨晨,王庆贺. 方中空夹层钢管混凝土叠合构件纯扭性能研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(6):984-993.
REN Qingxin, CAI Yuchen, WANG Qinghe. Behavior of square concrete-encased CFDST members under pure torsion[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2024, 40(6):984-993. (in Chinese)
- [14] 陈树梁,徐雷,胡元昊,等. 铝合金预拉伸板残余应力数值模拟方法研究[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(2):292-296.
CHEN Shuliang, XU Lei, HU Yuanhao, et al. Study on numerical simulation method of residual stress of aluminum alloy pre-stretching board based on change of material parameters[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(2):292-296. (in Chinese)
- [15] 党伟华. 圆形闭合地下连续墙基础的竖向承载性能研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(3):111-117.
DANG Weihua. Study on vertical bearing behavior of circular closed diaphragm wall foundation[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2023, 45(3):111-117. (in Chinese)

(上接第87页)

- [10] 李百奇,汤文博,王笑生. 等离子熔覆高钒铁基合金涂层耐冲击磨料磨损的研究[J]. *铸造*, 2022, 71(4):409-414.
LI Baiqi, TANG Wenbo, WANG Xiaosheng. Research on impact abrasive wear resistance of plasma cladding high vanadium iron-based alloy coating[J]. *Foundry*, 2022, 71(4):409-414. (in Chinese)
- [11] 宗琳,刘政军,高海亮,等. 高钒复合堆焊合金的耐磨性分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(9):41-44.
ZONG Lin, LIU Zhengjun, GAO Hailiang, et al. Research on wear resistance of compound material surfacing alloy with high vanadium content[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(9):41-44. (in Chinese)
- [12] 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.
GONG Jianxun, DONG Hailong, HUANG Hongjiang, et al. Effect of vanadium content on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-V-B-C system hardfacing alloys[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2023, 47(10):37-42. (in Chinese)
- [13] 梁英教,车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳:东北大学出版社,1993:1-9.
LIANG Yingjiao, CHE Yinchang. Inorganic matter thermodynamics data hand book[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993:1-9. (in Chinese)
- [14] 王彩芹,潘川,王移山,等. Fe-C-Cr-V系高铬铸铁型自保护药芯焊丝的研制[J]. *焊接技术*, 2016, 45(7):69-72.
WANG Caiqin, PAN Chuan, WANG Yishan, et al. Development of Fe-C-Cr-V series high chromium cast Iron self-protection flux cored welding wire[J]. *Welding Technology*, 2016, 45(7):69-72. (in Chinese)
- [15] 周野飞. Fe-Cr-C-X堆焊合金显微组织演变及其耐磨性[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.
ZHOU Yefei. Microstructural evolution and wear resistance of Fe-Cr-C-X hardfacing alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)