

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20241223002

焊后热处理对 Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金组织和磨损性能的影响

李二虎¹ 崔丽¹ 邵蔚¹ 贺定勇^{1,2} 许一³ 于金满³

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院 北京 100124;

2. 北京市生态环境材料及其评价工程技术研究中心 北京 100124;

3. 威海天润金钰新材料科技有限公司 威海 264400)

摘要: 单齿辊在工作过程中面临着严重的高温磨粒磨损问题。为了提高其服役寿命, 采用药芯焊丝电弧焊制备 Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金, 并分析不同 Cr 含量 (14wt.%、18wt.%、23wt.%) 和焊后热处理对 Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金微观组织和磨粒磨损性能的影响。结果表明, Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金主要由马氏体、残余奥氏体和 M_7C_3 碳化物组成。随着 Cr 含量从 14wt.% 增加到 23wt.%, M_7C_3 碳化物面积分数从 48.9% 增加到 57.2%, 而其尺寸则从 27.9 μm 减小至 23.7 μm ; 随着 Cr 含量的增加, 堆焊合金的耐磨性提升, 这是因为随着 Cr 含量的增加, 堆焊合金中碳化物硬质相的含量增加, 并且硬质相组织细化, 提高了合金抵抗磨粒的切削能力, 从而提高了合金的磨损性能。然而, 900 $^{\circ}\text{C}$ 下进行焊后热处理使三种堆焊合金中 M_7C_3 碳化物的面积分数分别降低至 41.4%、48.9%、50.8%, 而碳化物尺寸分别增加至 32.1 μm 、27.3 μm 、26.4 μm , 使得堆焊合金的硬度和耐磨性下降。研究焊后热处理对 Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金组织和磨损性能的影响为单齿辊修复方面的研究和应用提供了参考。

关键词: Fe-Cr-Mo-C 堆焊合金; M_7C_3 碳化物; 磨粒磨损; 焊后热处理

中国分类号: TG174

Effect of Post-weld Heat Treatment on the Microstructure and Wear Performance of Fe-Cr-Mo-C Wear-resistant Hardfacing Alloys

LI Erhu¹ CUI Li¹ SHAO Wei¹ HE Dingyong^{1,2} XU Yi³ YU Jinman³

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Eco-materials and LCA, Beijing 100124, China;

3. Weihai Tianrun Jinyu New Material Technical Co., Ltd., Weihai 264400, China)

Abstract: When a single-tooth roller is used for crushing sintered mixtures over an extended period, the surface of the roller is subjected to high-temperature frictional wear from the sintered mixtures. This leads to severe wear on the surface of the roller, significantly reducing its crushing efficiency and service life. To enhance the high-temperature wear resistance of a single-tooth roller and prolong its service life, Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys containing M_7C_3 carbide were prepared using the flux-cored arc welding method. The MLS-225 wet rubber wheel wear tester was used to examine the effects of different Cr contents (14, 18, and 23wt.%) and heat treatment processes (heating rate, 10 $^{\circ}\text{C} / \text{min}$; heating temperature, 900 $^{\circ}\text{C}$; holding time, 2 h; cooling method, furnace cooling) on the microstructure and wear properties of the Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys. The samples were characterized and analyzed using an optical microscope (OM), a Rockwell hardness tester, an X-ray diffractometer (XRD), a scanning electron microscope (SEM), and an energy-dispersive spectrometer (EDS). The results indicated that the Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys are mainly composed of martensite, retained austenite and M_7C_3 . As the Cr content increases from 14wt.% to

收稿日期: 2024-12-23; 修改日期: 2025-01-29; 接受日期: 2025-02-08; 上线日期: 2025-02-25。

Received December 23, 2024; Revised January 29, 2025; Accepted in revised form February 8, 2025; Available online February 25, 2025.

引用格式: 李二虎, 崔丽, 邵蔚, 等. 焊后热处理对 Fe-Cr-Mo-C 耐磨堆焊合金组织和磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 152-160.

Citation format: LI Erhu, CUI Li, SHAO Wei, et al. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and wear performance of Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(3): 152-160.

23wt.%, the diffraction peaks corresponding to austenite increase slightly, indicating that the content of austenite in the alloy increases marginally as the Cr content increases. This is because an increase in the Cr content reduces the martensite transformation point (M_s point) of the Fe-Cr-Mo-C alloys. Moreover, the area fraction of M_7C_3 carbide increases from 48.9% to 57.2%, while its size decreases from 27.9 μm to 23.7 μm , with the Cr content increasing from 14wt.% to 23wt.%. The results of the hardness and wear tests show that increasing the Cr content improves the hardness and wear resistance of Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys. The wear particles mainly exert a micro-cutting effect on the alloys, resulting in the formation of plow grooves on their surfaces. The development of the wear resistance of Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys occurs because as the Cr content increases, the amount of carbide hard phases increases, and the microstructure of the hard phase is refined, which enhances the resistance of Fe-Cr-Mo-C alloys to the cutting action of abrasive particles. The wear mechanism of the as-welded Fe-Cr-Mo-C hardfacing alloys under wear conditions is micro-cutting. After heat treatment at 900 $^\circ\text{C}$ for 2 h, the phase composition of the hardfacing alloys remains unchanged, still consisting of martensite, retained austenite and M_7C_3 . The area fractions of M_7C_3 carbide in the three hardfacing alloys decrease to 41.4%, 48.9%, and 50.8%, respectively. The size of the M_7C_3 carbide increases to 32.1, 27.3, and 26.4 μm for Fe-Cr-Mo-C alloys with Cr content of 14, 18, and 23wt.%. Thus, the post-weld heat treatment at 900 $^\circ\text{C}$ reduces the area fraction of M_7C_3 carbides and causes their coarsening, thereby reducing the wear resistance of the hardfacing alloys. Meanwhile, the wear mechanism remains the micro-cutting by abrasive particles. The influence of post-weld heat treatment on the microstructure and wear properties of Fe-Cr-Mo-C wear-resistant hardfacing alloys provides a reference for research and application in the repair of single-tooth rollers.

Keywords: Fe-Cr-Mo-C hardfacing alloys; M_7C_3 carbides; abrasive wear; post-weld heat treatment

0 前言

单齿辊破碎机在现代钢铁工业中起着至关重要的作用,其主要作用是进行烧结料的破碎。由于烧结料的温度很高,通常在 700~900 $^\circ\text{C}$ 之间,当单齿辊对物料进行破碎时,单齿辊表面会受到来自物料的高温磨粒磨损作用,使单齿辊表面磨损严重,显著降低单齿辊的破碎效率和使用寿命,因此提高单齿辊表面的耐磨性对于提高烧结作业效率、节约成本具有重要的意义^[1-3]。堆焊作为一种修复技术,不仅可以恢复机械部件磨损表面的尺寸,提高机械部件的工作效率,而且采用耐磨材料可以提高机械部件表面的耐磨性,延长机械部件的使用寿命,避免机械部件的过早失效^[4]。

铁基耐磨堆焊合金具有良好的韧性和耐磨性,可满足大多数工况条件的使用要求,并且其价格低廉,在工程领域应用广泛。在常温磨损工况下,Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金是最常用的铁基耐磨堆焊合金^[5-8],其组织中可形成多种高硬度碳化物(M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 、 M_3C 等)硬质相作为耐磨骨架,对磨损颗粒具有很好的阻挡作用,使耐磨堆焊合金具有良好的抗磨损性能^[9-10]。艾孝文等^[11]研究了 Cr 含量对 Fe-Cr-C 系堆焊合金组织及耐磨性能的影响,结果表明,在一定含量范围内,随着 Cr 含量的增加,

(Fe, Cr, V) $_7C_3$ 碳化物的数量不断增加,为堆焊合金提供了更多的硬质相,从而使合金的硬度与耐磨性能得到提升,但是碳化物硬质相脆硬的特点严重影响了堆焊合金层的使用寿命。获得细小、分布均匀的碳化物硬质相,可以减少对合金基体的割裂和应力集中的敏感性,提高合金耐磨性的同时提高堆焊合金的使用寿命^[5-6]。因此,研究人员进行了广泛的研究。研究发现,通过合金化可以改善碳化物的形貌、提供异质形核核心细化晶粒,从而提高堆焊合金的性能。郑丽娟等^[12]研究了 Mo 元素的添加对高铬铸铁合金组织性能的影响,结果表明,Mo 元素的添加可以增加堆焊层中初生碳化物数量,细化合金组织,在强化碳化物的同时强化马氏体基体,使堆焊层的硬度提高 12.5%,常温冲击性能提高到原来的 1.9 倍。因此,通过合金化处理可以有效提高堆焊合金的常温力学性能。而单齿辊长期工作于高温条件下,高温对堆焊合金显微组织及性能的影响还未可知。汪圣林等^[13]研究了 600 $^\circ\text{C}$ 保温 8 h 对 Fe-Cr-C-B 堆焊合金显微组织及性能的影响,发现基体的组织由马氏体和残余奥氏体变成回火索氏体,基体组织的变化导致堆焊合金的硬度与耐磨性显著下降。

为了探究 Cr 含量和高温工作条件对堆焊合金组织和耐磨性能的影响,本文设计并制备了三种不同 Cr 含量的 Fe-Cr-Mo-C 堆焊合金,研究

Fe-Cr-Mo-C 合金在焊态下的微观组织和磨粒磨损性能。并对合金进行焊后热处理,模拟高温工作条件,探究高温工作条件对 Fe-Cr-Mo-C 合金的组织性能的影响。该研究为单齿辊破碎机耐磨堆焊材料的选材和组织演变提供数据支撑和理论基础。

1 材料与方法

采用宽度为 12 mm、厚 0.3 mm 的 430 不锈钢带包覆一定含量的高碳铬铁、钼铁、金属锰、硅铁和石墨等粉末,制备直径 2.8 mm 的三种不同 Cr 含量 (14 wt.%、18 wt.%、23 wt.%) 的药芯焊丝,丝材的填充率约为 47%。

采用明弧焊在低碳钢基板上进行多层多道堆焊,共堆焊三层,三种堆焊合金分别命名为 14Cr、18Cr 和 23Cr 合金。堆焊工艺参数为:焊接电流 380~400 A、焊接电压 26~29 V、送丝速度 7.0 m/min、焊接速度 4.0 mm/s。为研究单齿辊在实际工作条件下的磨损性能,对三种堆焊合金进行焊后热处理,热处理工艺条件为:热处理温度 900 °C、升温速率 10 °C/min、保温时长 2 h,随炉冷却,热处理后的堆焊合金分别命名为 14Cr-HT、18Cr-HT 和 23Cr-HT 合金。三种堆焊合金的化学成分采用德国 Bruker Q4 TASMANN 全谱直读光谱仪测定,其结果如表 1 所示。

表 1 Fe-Cr-Mo-C 合金的主要化学成分 (质量分数 / %)

Table 1 Main chemical composition of Fe-Cr-Mo-C alloys (wt. %)

Sample	C	Cr	Mo	Mn	Fe
14Cr	5.25	13.63	4.58	0.89	Bal.
18Cr	5.40	17.01	5.01	0.98	Bal.
23Cr	5.32	22.41	5.28	1.03	Bal.

采用 HR-150A 电动布洛氏硬度计测试堆焊合金表面的洛氏硬度。硬度计压头为金刚石圆锥压头,载荷 150 kg,加载时间 5 s,恢复时间 3 s,相邻两个测试点间距 5 mm,测试点数 10 个,去除测试的最大值和最小值后,硬度数据取平均值。利用 HXD-1000 数字式显微硬度计测试堆焊合金共晶组织的显微硬度,试样按照金相制样标准进行镶样和磨抛,试验载荷 1.96 N (200 gf),加载时间 10 s,测试点数 10 个,去除测试的最大值和最小值后,硬度数据取平均值。

采用电火花线切割机制备 10 mm×10 mm×10 mm 的堆焊合金金相试样,切割时避开起弧和收

弧区域。经砂纸打磨和抛光后,采用三氯化铁、盐酸、水按照一定比例配制的腐蚀液进行腐蚀,腐蚀时间为 5~10 s,并采用 GX51 光学显微镜进行拍摄观察。

采用电火花线切割机制备 57 mm×26 mm×15 mm 的磨粒磨损标准试样,切割时避开起弧和收弧区域。采用 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机进行磨粒磨损试验,橡胶轮直径 176 mm,硬度 60 (邵尔硬度),转速 240 r/min。在磨损试验时加入 1 000 g 水、1 500 g 的 40~70 目石英砂。试验载荷 100 N,预磨转数 2 000 r,精磨转数 8 000 r。每次磨损前用超声清洗仪对样品进行清洗,在精度为 0.000 1 g 的天平上进行称重来计算其失重,并使用 Quanta 650FEG 场发射扫描电子显微镜对其磨损表面和截面进行观察分析。

2 结果和分析

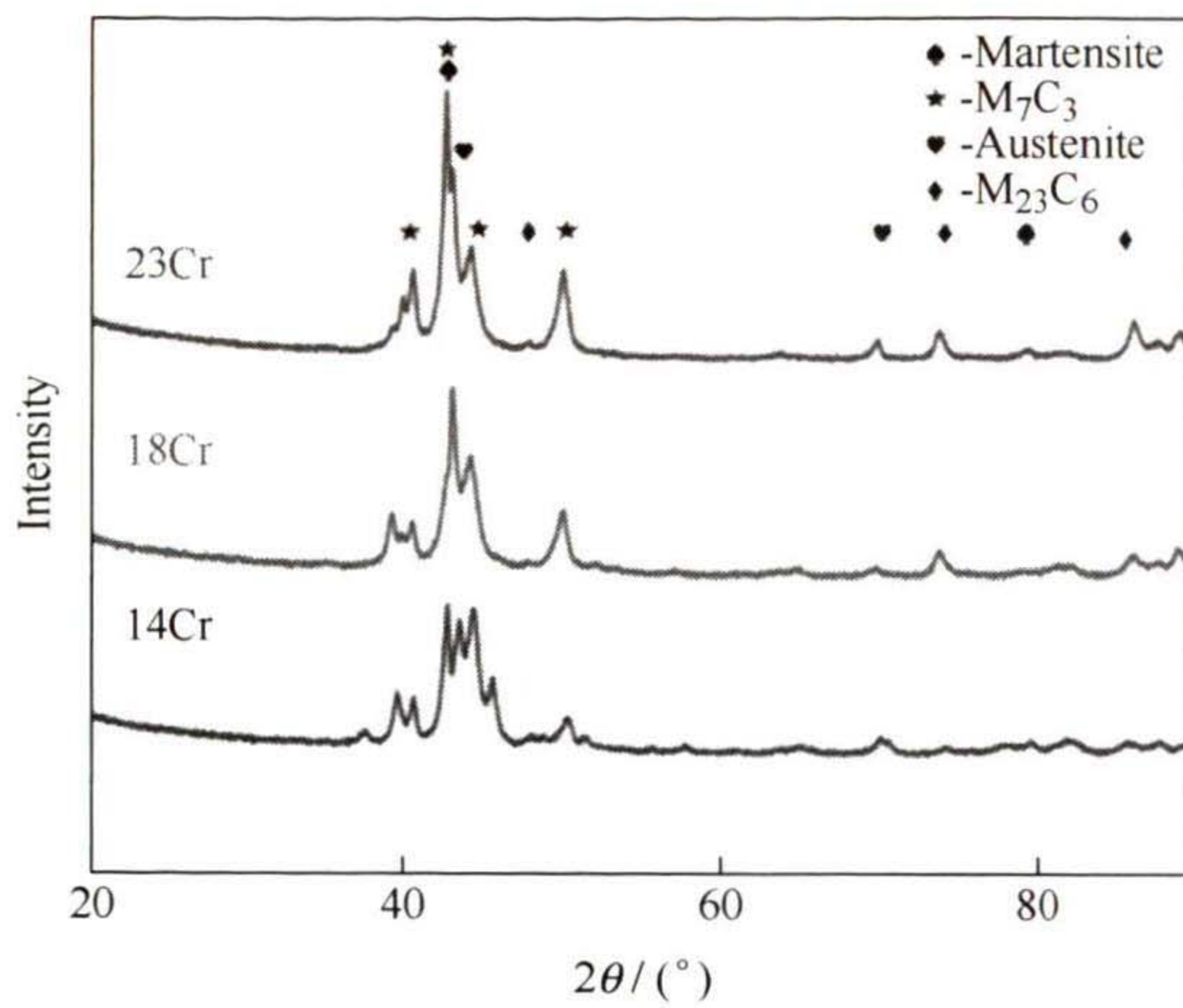
2.1 堆焊合金显微组织

图 1 为三种堆焊合金的 XRD 图谱。由图 1a 可知,三种堆焊合金主要由马氏体 (M)、残余奥氏体 (A)、 M_7C_3 和极少量的 $M_{23}C_6$ 组成。随着 Cr 含量从 14wt.% 增加至 23wt.%, M_7C_3 的特征衍射峰增加,这表明 M_7C_3 相的含量随着 Cr 含量的增加而不断增加。另外,奥氏体对应的衍射峰也略有增高,说明合金中奥氏体的含量也随着 Cr 含量的增加略有增加。这是因为 Cr 含量的增加使马氏体转变点 (M_s 点) 温度 (T_{Ms}) 降低,如式 (1) 所示,过冷奥氏体向马氏体转变的阻力变大,因此奥氏体的含量增加^[9]。

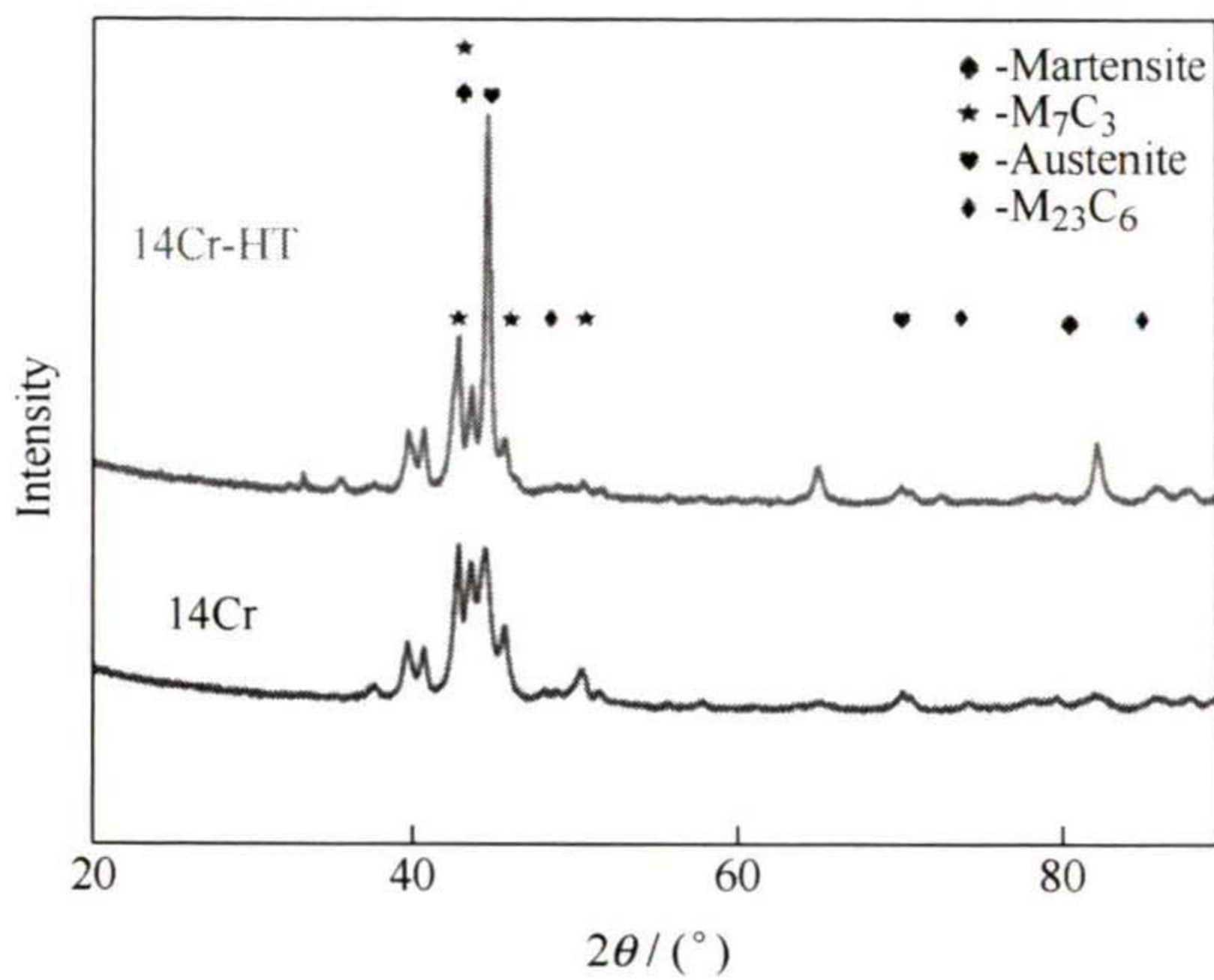
$$T_{Ms} = 539 - 423M_C - 30.4M_{Mn} - 17.7M_{Ni} - 12.1M_{Cr} - 7.5M_{Mo} \quad (1)$$

式中, M_C 、 M_{Mn} 、 M_{Ni} 、 M_{Cr} 、 M_{Mo} 分别为合金中 C、Mn、Ni、Cr、Mo 的质量分数。

为了进一步分析热处理对合金相组成的影响,将 14Cr 堆焊合金热处理前后的 XRD 图进行对比,结果如图 1b 所示。热处理之后的堆焊合金相组成未发生变化,仍由马氏体、残余奥氏体、 M_7C_3 与 $M_{23}C_6$ 组成。与焊态合金相比,热处理后奥氏体特征衍射峰变强,这是因为热处理过程中,堆焊合金中 Cr 等元素溶入奥氏体中,增加了奥氏体的稳定性,使残余奥氏体含量增加^[14]。



(a) XRD of 14Cr, 18Cr and 23Cr alloys



(b) XRD of 14Cr and 14Cr-HT alloys

图 1 Fe-Cr-Mo-C 合金的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of Fe-Cr-Mo-C alloys

图 2 为不同 Cr 含量堆焊合金热处理前后的显微组织。由图 2a~2c 可以看出, 焊态下的堆焊合金主要由初生 M_7C_3 和 $(M+A+M_7C_3)$ 共晶组成。初生 M_7C_3 碳化物多呈规则的块状、六棱状分布。 $(M+A+M_7C_3)$ 共晶组织呈网状分布于初生 M_7C_3 碳化物周围^[15], 其中条状组织为马氏体组织^[16-18], 共晶组织中的 M_7C_3 比初生 M_7C_3 碳化物小得多。另外, 合金中没有检测到 $M_{23}C_6$ 相的存在, 这是因为其含量非常少, 并且其衬度与 M_7C_3 难以区分。为了进一步分析焊态下 Cr 含量变化对 M_7C_3 含量及尺寸的影响, 利用 image-pro 软件对堆焊合金中 M_7C_3 碳化物的面积分数及尺寸大小进行统计。为了保证数据的准确性, 每次统计 30 组数据取平均值, 结果如表 2 所示。可以看出, 随着 Cr 含量逐渐增加, M_7C_3 的面积分数从 48.9% 增加至 57.2%, M_7C_3 的尺寸从 27.9 μm 减小至 23.7 μm , 表明随着 Cr 含量的增加, M_7C_3 相的面积分数增加, 尺寸减小。

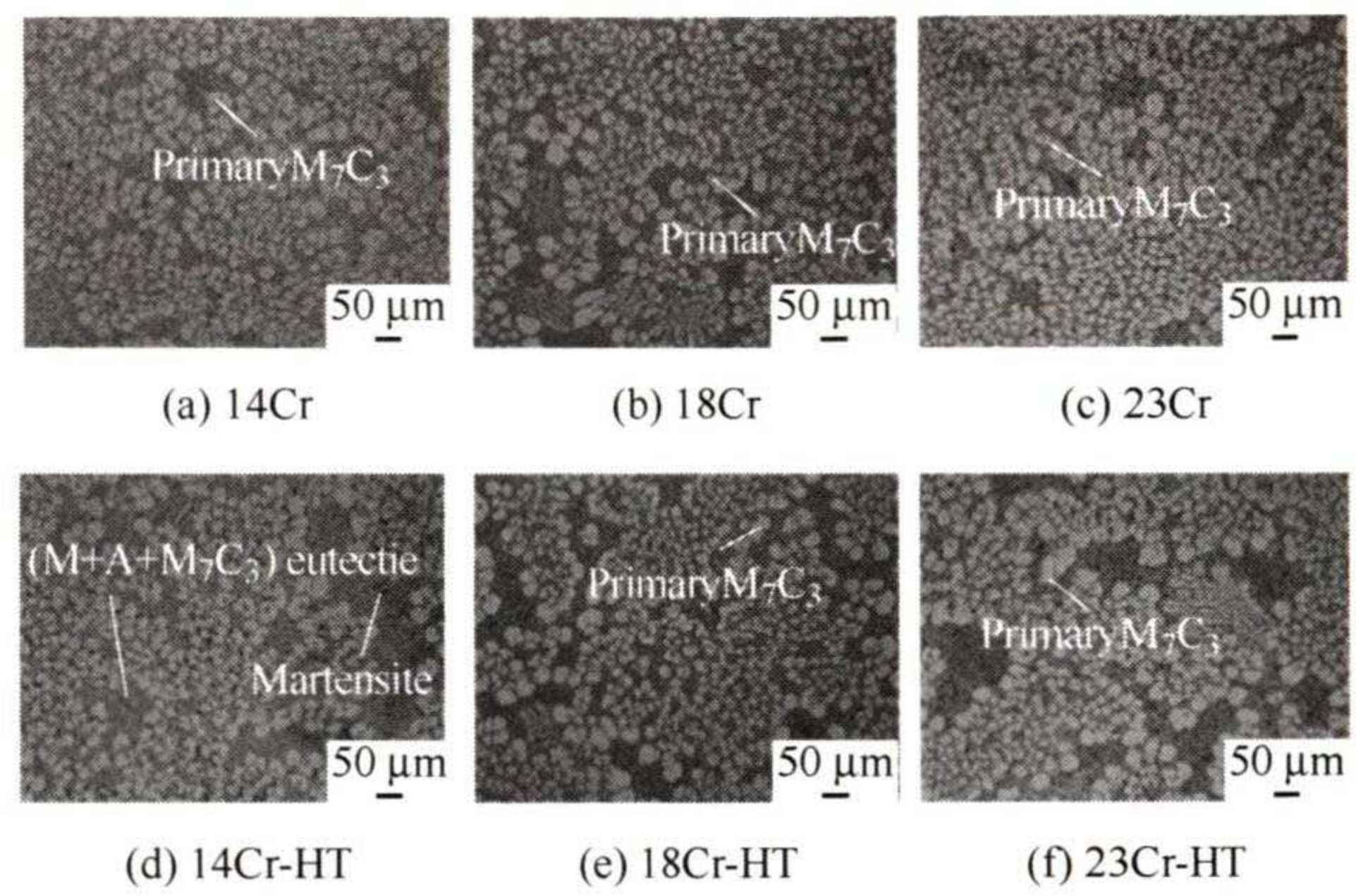


图 2 Fe-Cr-Mo-C 合金的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphology of Fe-Cr-Mo-C alloys

表 2 Fe-Cr-Mo-C 合金中 M_7C_3 的面积分数和晶粒尺寸

Table 2 Area fraction and grain size of M_7C_3 in the Fe-Cr-Mo-C alloys

Sample	Area fraction / %	Grain size / μm	Sample	Area fraction / %	Grain size / μm
14Cr	48.9	27.9	14Cr-HT	41.4	32.1
18Cr	52.3	24.1	18Cr-HT	48.9	27.3
23Cr	57.2	23.7	23Cr-HT	50.8	26.4

图 2d~2f 是不同 Cr 含量堆焊合金热处理后的显微组织。可以看出, 热处理后堆焊合金组织组成没有发生变化, 仍主要由初生 M_7C_3 和 $(M+A+M_7C_3)$ 共晶组成。为了进一步分析热处理对 M_7C_3 碳化物面积分数及尺寸的影响, 利用 image-pro 软件对堆焊合金微观组织中 M_7C_3 碳化物的面积分数及尺寸大小进行统计, 结果如表 2 所示。可以看出, 热处理之后, 三种堆焊合金中 M_7C_3 碳化物的面积分数分别为 41.4%、48.9%、50.8%, 相对于焊态合金均有所下降。14Cr 合金中 M_7C_3 碳化物的尺寸增加至 32.1 μm , 18Cr 合金中增加至 27.3 μm , 23Cr 合金中增加至 26.4 μm , 这表明热处理使得堆焊合金中 M_7C_3 碳化物的含量相对减少, 尺寸增大。

为了进一步分析堆焊合金中的元素分布并探究堆焊合金的显微组织形成过程, 对 23Cr 及 23Cr-HT 堆焊合金进行 EDS 面扫分析, 其结果如图 3 所示。可以看到, Mo 元素与 C 聚集形成了 MC 碳化物, MC 碳化物被 M_7C_3 碳化物包围。因此, 在堆焊过程中, Mo 元素先与 C 反应形成 MC 碳化物, MC 碳化物可以作为 M_7C_3 碳化物的异质形核位点, 促进 Cr、Fe 和 C 元素反应生成 M_7C_3 碳化物, 沿 MC 碳化物周围分布^[12, 19]。热处理后, Mo 元素仍主要存在于 MC 碳化物中, Cr 和 Fe 元素仍主要分布在 M_7C_3

碳化物中。对 23Cr 堆焊合金热处理前后的基体位置进行 EDS 成分测量, 结果如表 3 所示, 可以看出, 热处理后, 共晶组织中的 Mo 元素含量显著减少。这是因为在高温热处理条件下, 共晶组织中的 Mo 元素有充足的时间向晶界或碳化物中扩散, 促进更多 MC 碳化物的生成, 从而导致 Mo 元素在共晶组织中的浓度降低。

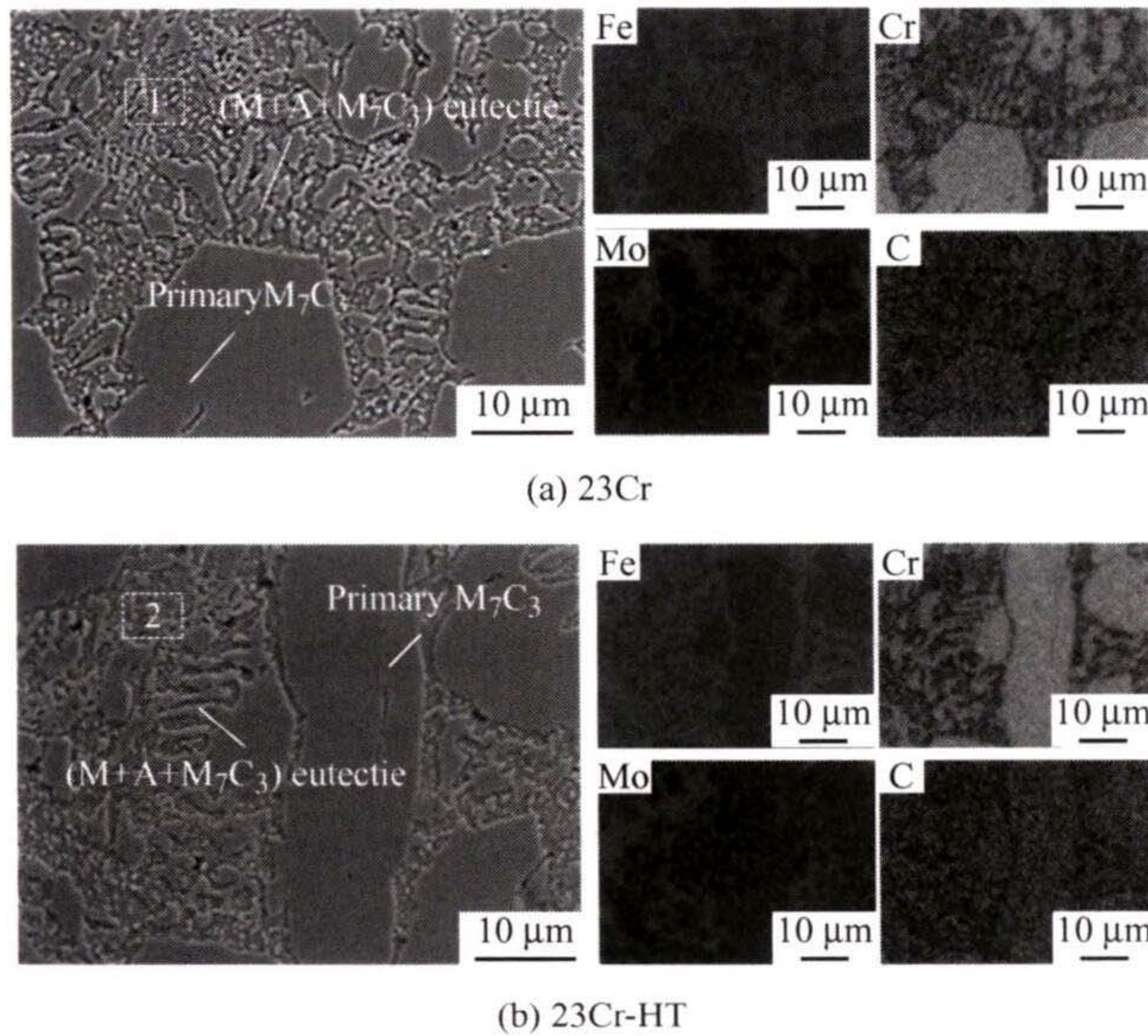


图 3 Fe-Cr-Mo-C 合金的 SEM 形貌和 EDS 图谱
Fig. 3 SEM morphology and EDS mappings of Fe-Cr-Mo-C alloys

表 3 Fe-Cr-Mo-C 合金不同区域元素含量 (质量分数 / %)

Table 3 Element content in different regions of Fe-Cr-Mo-C alloys (wt.%)

Point	C	Cr	Mo	Mn	Si	Fe
1	3.45	4.51	7.08	0.94	2.03	81.99
2	3.15	4.42	1.41	0.80	1.85	88.37

2.2 堆焊合金的磨粒磨损性能

图 4 为三种堆焊合金的焊态下 (AW) 与热处理后 (HT) 的洛氏硬度和共晶组织的显微硬度。如图 4a 所示, 14Cr 合金的硬度为 59.2 HRC, 18Cr 合金与 23Cr 合金的硬度分别为 64.1 和 64.6 HRC, 说明随着 Cr 含量的增加, 堆焊合金的硬度呈增长趋势, 主要是因为 Cr 含量的增加使高硬度的碳化物含量增加, 从而使合金的洛氏硬度提高。但是随着 Cr 含量的增加, 其增长趋势逐渐减小, 18Cr 合金与 23Cr 合金的硬度基本保持不变。相对于焊态合金, 热处理后三种堆焊合金的洛氏硬度均降低, 硬度分别为 57.3、60.2 和 62.9 HRC, 主要是因为热处理使合金中碳化物相的含量相对减少、使合金的硬度降低。

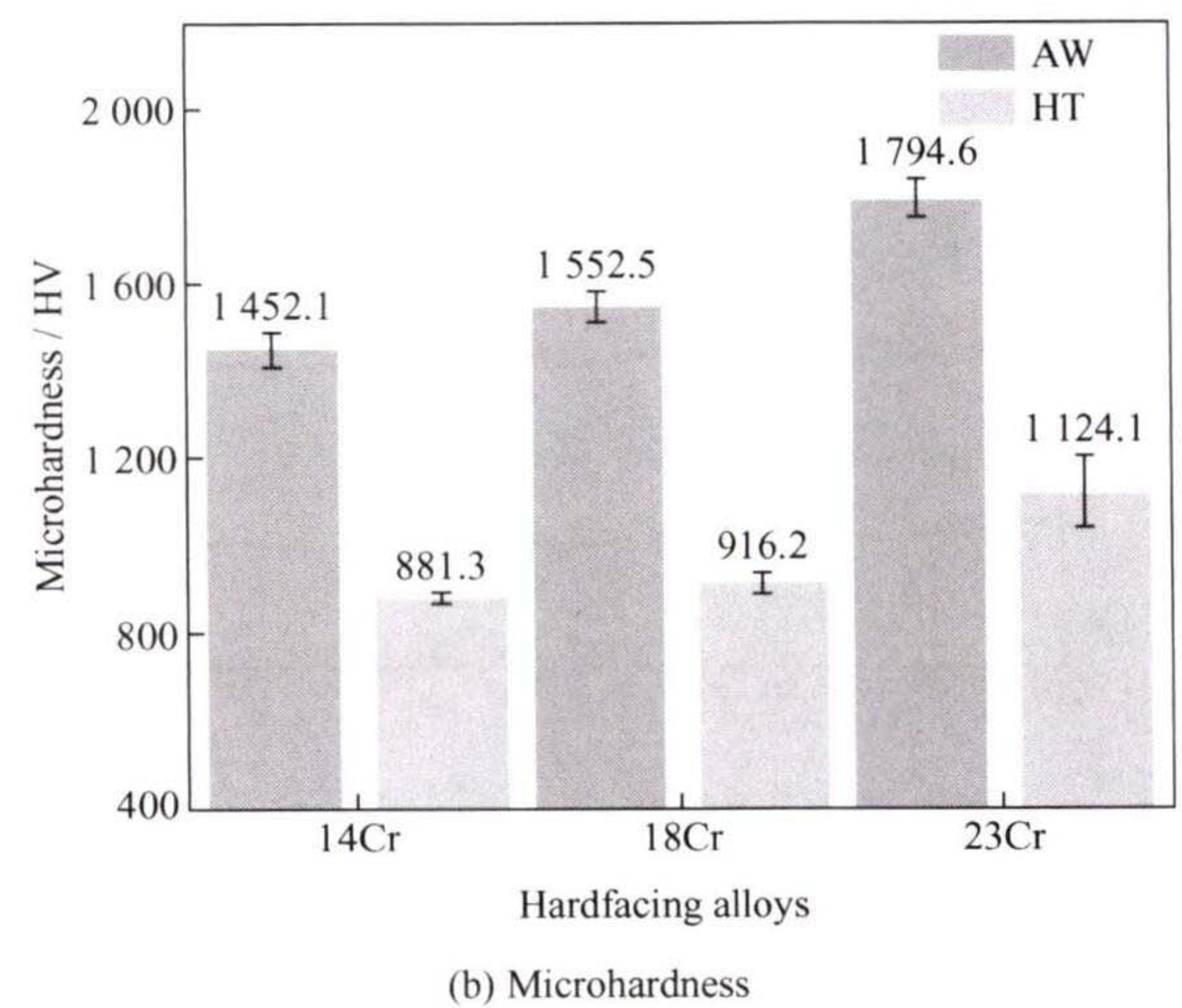
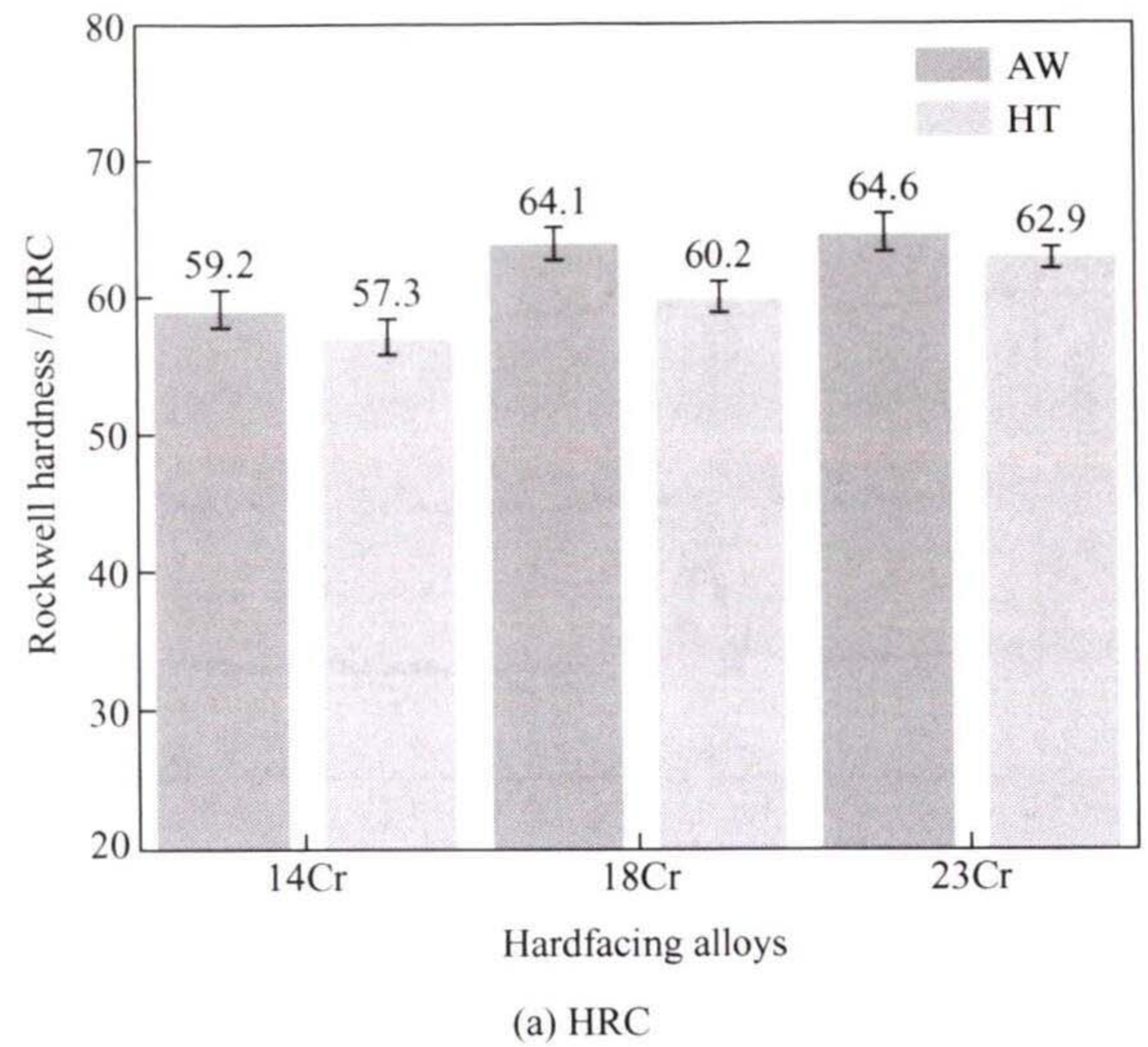


图 4 Fe-Cr-Mo-C 合金的洛氏硬度和显微硬度

Fig. 4 Rockwell hardness and microhardness of Fe-Cr-Mo-C alloys

堆焊合金共晶组织的显微硬度结果如图 4b 所示。可以看出, 随着 Cr 含量的增加, 共晶组织的显微硬度从 1452.1 HV 增加至 1794.6 HV, 这是因为随着 Cr 含量的增加, M_7C_3 碳化物数量增多, 使得 (M+A) 基体中弥散分布的硬质相增多, 从而提高了共晶组织的显微硬度。热处理后, 基体的显微硬度分别是 881.3、916.2 和 1124.1 HV, 显微硬度依次降低了 39.3%、41.0% 和 37.4%, 这是因为热处理后, 堆焊合金中 Cr 等元素增加了奥氏体的稳定性, 使得残余奥氏体含量增加, 硬度较高的马氏体和碳化物的含量均相对降低, 从而使共晶组织的显微硬度下降^[14]。

磨粒磨损试验后, 堆焊合金的磨损失重结果如表 4 所示。对于堆焊态合金, 14Cr 合金的磨损失重最高, 为 0.382 1 g; 18Cr 与 23Cr 堆焊合金的磨损失重分别为 0.374 0 和 0.350 5 g。可以看出, 随着 Cr 含量的增加, 磨损失重呈降低趋势。热处理后, 三种堆焊合金的磨损失重均显著增加, 磨损失重分别为 1.243 8、1.101 8 和 0.721 3 g。这是因为热处理

使 M_7C_3 碳化物含量降低, 合金中硬质相减少。热处理使硬度较高的马氏体转变成硬度较低的奥氏体, 磨损颗粒大部分作用在残余奥氏体上, 从而使其磨损加剧^[20]。另外, 随着 Cr 含量的增加, 磨损失重的增加量显著减小, 说明 Cr 含量的增加对于维持堆焊合金的高温磨损性能具有较好的效果。

表 4 Fe-Cr-Mo-C 合金的磨损失重

Table 4 Wear weight loss of Fe-Cr-Mo-C alloys

Sample	Wear weight loss / g	Sample	Wear weight loss / g
14Cr	0.3821	14Cr-HT	1.2438
18Cr	0.3740	18Cr-HT	1.1018
23Cr	0.3505	23Cr-HT	0.7213

图 5 显示了堆焊合金热处理前后在磨粒磨损试验后的表面形貌。如图 5a~5c 所示, 焊态 Fe-Cr-Mo-C 堆焊合金在磨损条件下的磨损机制为微切削, 磨损颗粒主要对 M_7C_3 碳化物和 (M+A) 基体产生微切削作用, 导致其表面形成犁沟。14Cr 合金的磨损表面产生了较深的犁沟, 而 18Cr 合金和 23Cr 合金的磨损表面的犁沟数量显著减少, 这主要是因为随着 Cr 含量的增加, 合金中 M_7C_3 硬质相数量增加, 并且碳化物的尺寸减小, 堆焊合金的洛氏硬度与显微硬度均增加, 使其抵抗磨粒的切削能力增加, 从而提高了合金的耐磨性^[7, 10]。

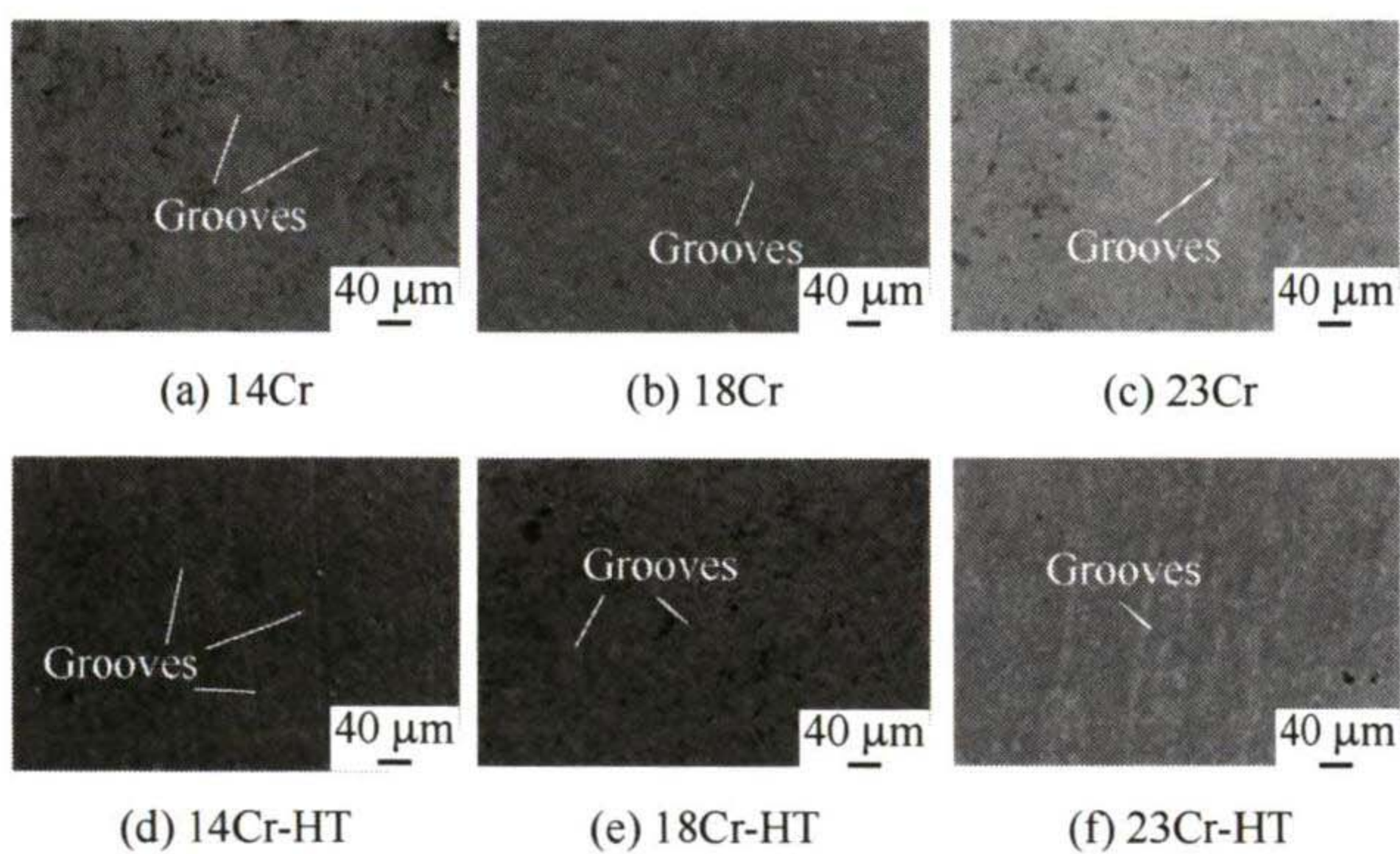


图 5 Fe-Cr-Mo-C 合金的磨损表面形貌图

Fig. 5 Wear surface morphology of Fe-Cr-Mo-C alloys

图 5d~5f 显示了堆焊合金热处理后 (Heat treatment, HT) 的磨损形貌。合金的磨损表面出现了较深的犁沟, 说明经过焊后热处理, 磨损机制没有发生变化, 仍为磨粒对合金的微切削机制^[13, 21]。而磨损程度加重, 这是由于热处理后, M_7C_3 硬质相的含量下降, 并且碳化物的尺寸相对增加, 使得堆焊合金的洛氏硬度及显微硬度降低, 同时大尺寸的碳化物在磨粒的作用下更容易发生剥落, 一方面剥落的硬质相可以作为磨粒磨损合金表面, 另一方面磨损颗粒直接作用于 (M+A) 基体, 从而导致磨损加剧。

耐磨堆焊合金磨粒磨损截面形貌如图 6 所示。通过图 6a~6c 可以明显看出, 堆焊合金中 M_7C_3 碳化物发生脱落, 这是因为马氏体和残余奥氏体基体的显微硬度相对较低而易被磨损颗粒切削, 使得 M_7C_3 碳化物失去马氏体和残余奥氏体基体的支撑而暴露在合金表面, 在磨粒的磨损作用下发生脱落。另外, 初生的 M_7C_3 碳化物具有有限的塑性变形能力, 而堆焊合金中的马氏体和残余奥氏体具有相当大的塑性变形能力, 使得碳化物 M_7C_3 相与周围的基体组织存在不一致的塑性变形, 因此裂纹从硬脆的 M_7C_3 碳化物边缘产生和延展, 使合金表面形成开裂^[9]。而随着 Cr 含量的增加, 堆焊合金磨损截面相对平滑, 这是因为 Cr 含量的增加, 使 M_7C_3 碳化物的面积分数不断增加, 尺寸不断减小, 可以有效抵抗磨损颗粒的切削作用, M_7C_3 碳化物也不容易发生剥落。热处理后, 合金磨损表面粗糙度增加, 说明磨粒对合金的磨损作用加剧, 主要是因为热处理后 M_7C_3 硬质相的尺寸增大、面积分数下降, M_7C_3 硬质相容易从基体中发生大块脱落; 另外, 基体中马氏体相减少, 奥氏体相增多, 使得抵抗磨损的能力下降, 因此合金表面磨损更加严重^[22-23]。

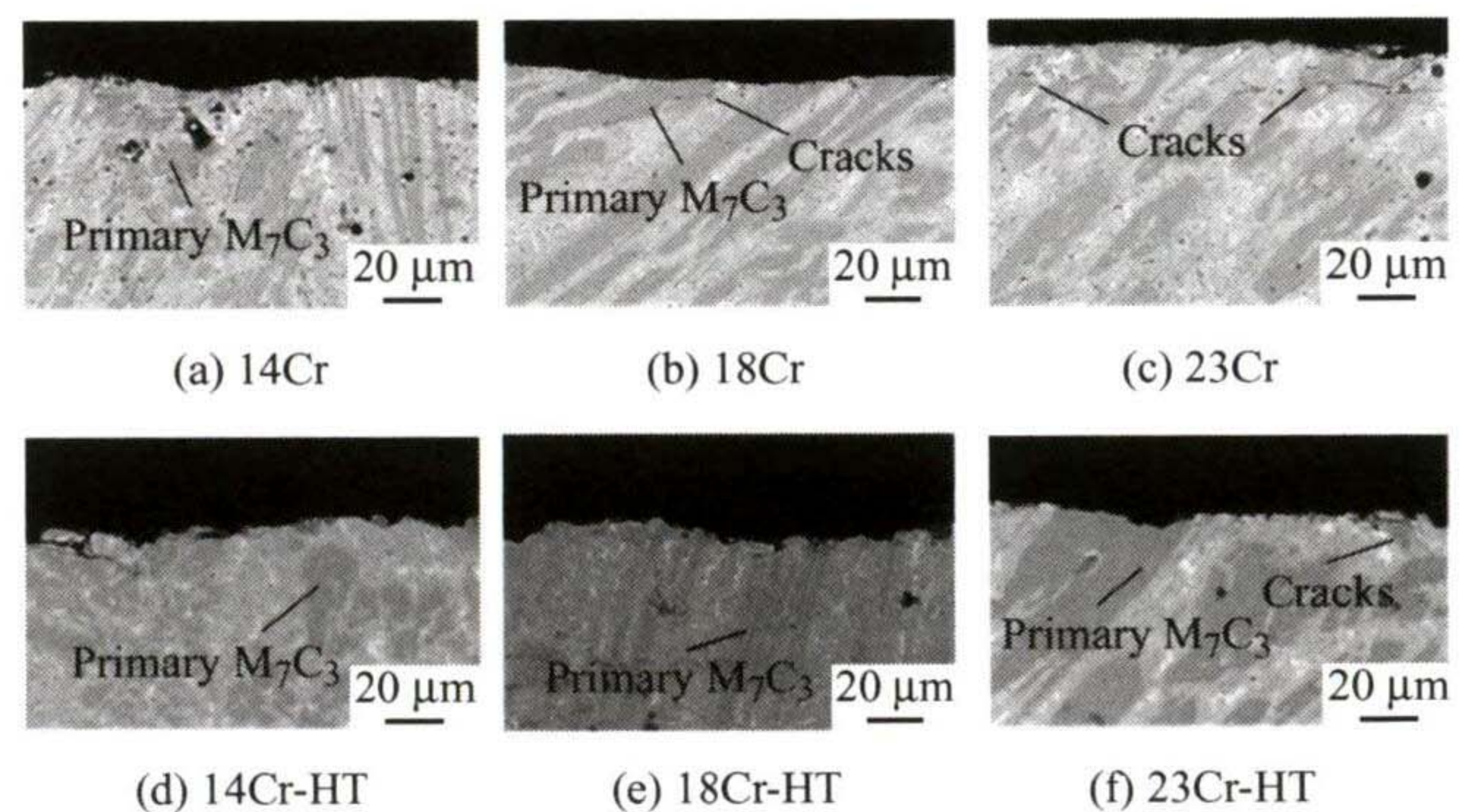


图 6 Fe-Cr-Mo-C 合金的磨损截面图

Fig. 6 Wear cross sections of Fe-Cr-Mo-C alloys

图 7 为堆焊合金的磨粒磨损机理图。堆焊合金的微观结构由 (M+A) 基体和碳化物组成。图 7a 显示出碳化物颗粒尺寸较大时的磨损机制。在磨粒磨损过程中, 磨粒不断在合金表面滑动。由于 (M+A) 基体硬度相对较低, 在高硬度磨粒的作用下, 基体发生塑性变形, 部分基体被磨损。因此, 大尺寸的 M_7C_3 碳化物因失去基体的支撑而暴露在合金表面。磨损直接作用于 M_7C_3 碳化物, 导致 M_7C_3 碳化物整体剥落, 在合金表面形成剥落坑。而图 7b 给出了碳化物颗粒尺寸较小时的磨损机制。在磨粒磨损过程中, 小尺寸的 M_7C_3 碳化物能够随着基体的塑性变形而发生少量位移, 可以作为基体的耐磨

骨架,提高合金的耐磨性。因此,随着Cr含量的增加,硬质相含量提高,尺寸减小,合金的耐磨性提

高;而热处理减少了硬质相含量,增大了硬质相尺寸,使合金的耐磨性降低。

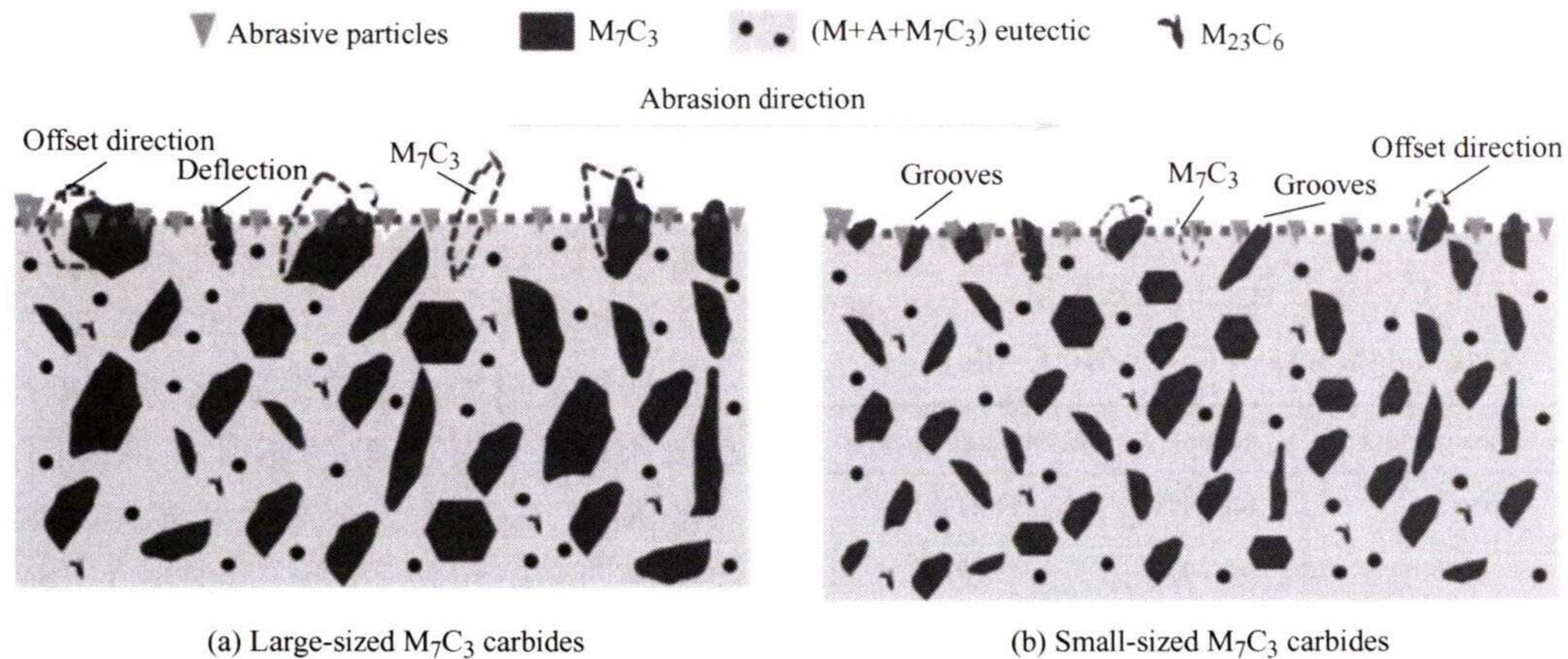


图7 Fe-Cr-Mo-C合金磨损机理图

Fig. 7 Wear mechanism diagram of Fe-Cr-Mo-C alloys

3 结论

采用明弧焊方法制备了Cr含量分别为14 wt.%、18 wt.%和23 wt.%的三种Fe-Cr-Mo-C堆焊合金,分析了不同Cr含量与热处理对Fe-Cr-Mo-C堆焊合金微观组织、硬度、抗磨粒磨损性能的影响。得出以下结论:

(1) 在Fe-Cr-Mo-C耐磨堆焊合金中,主要由马氏体、残余奥氏体和 M_7C_3 碳化物组成。合金中加入Mo,可以生成MC碳化物作为 M_7C_3 的异质形核点,促进 M_7C_3 析出,细化组织。焊后热处理并未改变堆焊合金的相组成。

(2) 当Cr含量从14 wt.%增加到23 wt.%时,堆焊合金中碳化物含量增加,组织得到细化,提高了合金抵抗磨粒的切削能力,从而提高了合金的抗磨粒磨损性能。

(3) 热处理后, M_7C_3 碳化物的含量减少,尺寸增大,使得合金抵抗磨粒的切削能力下降,抗磨粒磨损性能下降。

参 考 文 献

- [1] 李泓序. 单齿辊破碎机破碎齿的疲劳研究与等寿命优化[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
LI Hongxu. Fatigue research and equal life optimization of crushing teeth of single tooth roller crusher[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014. (in Chinese)
- [2] 胡建平, 赵学彬. 烧结单齿辊耐高温磨损焊丝的研究[J]. 金属加工(热加工), 2015, 18: 26-27.
HU Jianping, ZHAO Xuebin. Research on high

temperature and wear resistant welding wire for sintering single tooth roller[J]. Metal Working (Hot Working), 2015, 18: 26-27. (in Chinese)

- [3] 吴彼, 高祺洋, 薛伟海, 等. 钛合金表面 TiB_2 涂层与纯铝的高温黏着磨损行为[J]. 中国表面工程, 2022, 35(3): 64-72.

WU Bi, GAO Siyang, XUE Weihai, et al. High-temperature adhesive wear behavior between TiB_2 coating on titanium alloy surface and pure aluminum[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(3): 64-72. (in Chinese)

- [4] 肖平安, 肖璐琼, 顾景洪, 等. 15Cr系亚共晶高铬铸铁的烧结制备与性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(12): 58-64.

XIAO Pingan, XIAO Luqiong, GU Jinghong, et al. Study on sintering preparation and properties of 15Cr hypoeutectic high-chromium cast iron[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(12): 58-64. (in Chinese)

- [5] 何奖爱, 王玉伟. 材料磨损与耐磨材料[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.

HE Jiangai, WANG Yuwei. Material wear and wear resistant materials[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2014. (in Chinese)

- [6] 杨庆祥, 周野飞, 杨育林, 等. Fe-Cr-C系耐磨堆焊合金研究进展[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(3): 189-196.
YANG Qingxiang, ZHOU Yefei, YANG Yulin, et al. Research progress of Fe-Cr-C series wear-resistant surfacing alloys[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(3): 189-196. (in Chinese)

- [7] 王智慧, 贺定勇, 蒋建敏, 等. Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金磨粒磨损行为[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 73-76.
WANG Zhihui, HE Dingyong, JIANG Jianmin, et al. Abrasive wear behavior of Fe-Cr-C wear-resistant surfacing alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 73-76. (in Chinese)
- [8] GONG L Q, FU H G, YANG P H, et al. Refinement of primary carbides and improvement of wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron after modification[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5724-5742.
- [9] TONG Z X, SHAO W, HE C X, et al. Microstructure and wear resistance of in situ TiC-reinforced low-chromium iron-based hardfacing alloys[J]. Welding in the World, 2024, 68(3): 605-620.
- [10] 杨森, 王伟, 何平. Mo 含量对碳弧堆焊 Fe-Cr-C-Mo-B 耐磨层组织和性能的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(1): 47-48, 51.
YANG Sen, WANG Wei, HE Ping. Influence of Mo content on the microstructure and properties of Fe-Cr-C-Mo-B wear-resistant layer by carbon arc surfacing[J]. Materials Protection, 2015, 48(1): 47-48, 51. (in Chinese)
- [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 Xiaowen, GONG Jianxun, LI Zaihua. Influence of Cr on the microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Nb-V series surfacing alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(3): 42-48. (in Chinese)
- [12] 郑丽娟, 刘会莹, 付学中, 等. Mo 强化 Fe-Cr-C 系堆焊材料组织和力学性能分析[J]. 热加工工艺, 2012, 41(7): 1-3.
ZHENG Lijuan, LIU Huiying, FU Xuezhong, et al. Analysis of the microstructure and mechanical properties of Mo-reinforced Fe-Cr-C series surfacing materials[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(7): 1-3. (in Chinese)
- [13] 汪圣林, 崔丽, 贺定勇, 等. Cr 元素对 Fe-Cr-C-B 堆焊合金高温耐磨性能的影响[C]//中国焊接学会计算机辅助焊接工程专业委员会, 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室. 2014 年全国计算机辅助焊接工程学术研讨会摘要集. 哈尔滨: 2014 年全国计算机辅助焊接工程学术研讨会, 2014: 7.
WANG Shenglin, CUI Li, HE Dingyong, et al. Influence of Cr element on high-temperature wear resistance of Fe-Cr-C-B surfacing alloys[C]//Computer Aided Welding Engineering Committee of China Welding Society, Advanced Welding and Connection State Key Laboratory of Harbin Institute of Technology. Summary of the 2014 National Symposium on Computer Aided Welding Engineering. Harbin: 2014 National Symposium on Computer-Aided Welding Engineering, 2014: 7. (in Chinese)
- [14] WANG S, LI Y M, WANG J, et al. Effect of in-situ (Ti&W)C multiphase particles on three-body abrasive wear of high chromium cast iron[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 295: 127.
- [15] 王智慧, 俞长丽, 贺定勇. 焊后热处理对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织和磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(4): 77-80.
WANG Zhihui, YU Changli, HE Dingyong. Influence of post-weld heat treatment on the microstructure and wear properties of Fe-Cr-C wear-resistant surfacing alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(4): 77-80. (in Chinese)
- [16] ZHANG T L, YANG K Q, ZHU Z M, et al. Effect of Cr and W on microstructure and wear resistance of arc additive manufactured flux-cored wire for railway wheels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 3438-3447.
- [17] EFREMENKO V G, CHABAK Y G, LEKATOU A, et al. Pulsed plasma deposition of Fe-C-Cr-W coating on high-Cr-cast iron: effect of layered morphology and heat treatment on the microstructure and hardness[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 293-305.
- [18] 王逊, 史雅琴, 马永庆. Fe-Cr-C 系相图中 M_7C_3 体积分数的计算[J]. 大连海事大学学报, 2001, 4: 88-91.
WANG Xun, SHI Yaqin, MA Yongqing. Calculation of the volume fraction of M_7C_3 in the Fe-Cr-C phase diagram[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2001, 4: 88-91. (in Chinese)
- [19] 陶安, 吴正义, 周继顺, 等. Mo 含量对高碳钢组织和耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 64-71.
TAO An, WU Zhengyi, ZHOU Jishun, et al. Influence of Mo content on the microstructure and wear resistance of high carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(9): 64-71. (in Chinese)
- [20] 刘进龙, 李红轩, 吉利, 等. TiB_2 / WS_2 复合薄膜退火处理下的结构演变与磨损失效分析[J]. 中国表面工程, 2024, 37(3): 220-231.
LIU Jinlong, LI Hongxuan, JI Li, et al. Structural

- evolution and wear failure analysis of TiB_2 / WS_2 composite films under annealing treatment[J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(3): 220-231. (in Chinese)
- [21] 巩立超. Cr12MoV 钢超声滚压强化机理及耐磨性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- GONG Lichao. Research on the strengthening mechanism and wear resistance of Cr12MoV steel by ultrasonic rolling[D]. Jinan: University of Jinan, 2023. (in Chinese)
- [22] 赵梓淳, 苏允海, 黄宏军. 铬碳化合物对 Fe-Cr-C 堆焊层组织耐磨性影响的研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(15): 60-62.
- ZHAO Zichun, SU Yunhai, HUANG Hongjun. Research on the influence of chromium carbide compounds on the microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C surfacing layers[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(15): 60-62. (in Chinese)
- [23] 马笑晗, 贺定勇, 秦志恒, 等. TiC 对亚共晶高铬铸铁堆焊合金组织及磨损性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(4): 142-150.
- MA Xiaohan, HE Dingyong, QIN Zhiheng, et al. Influence of TiC on the microstructure and wear properties of hypoeutectic high-chromium cast iron surfacing alloys[J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(4): 142-150. (in Chinese)

作者简介: 李二虎, 男, 1999 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为耐磨堆焊药芯焊丝。

E-mail: 2413783400@qq.com

贺定勇(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工程材料表面改性理论与技术。

E-mail: dyhe@bjut.edu.cn