

DOI: 10.11973/jxgccl250514

近等物质的量比钼/钒/铌/钛强化高铬铸铁堆焊层的组织和耐磨性能

胡士昌, 黄智泉*, 高站起, 尼军杰, 王重阳

(中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司, 郑州 450001)

摘要: 基于高熵合金设计理念, 设计钼、钒、铌、钛的物质的量比分别为 0.7:1.0:1.0:1.0 和 1.0:0.7:1.0:1.3(对应的质量分数分别为 0.88% Mo, 0.68% V, 1.22% Nb, 0.68% Ti 以及 1.25% Mo, 0.48% V, 1.22% Nb, 0.85% Ti)的近等物质的量比多元强化高铬铸铁(铬质量分数约 15.7%), 将上述成分的粉末作为药皮并制备对应焊条, 再利用手工电弧焊在 Q235 钢板上制备相应堆焊层(分别记作 1#堆焊层和 2#堆焊层), 研究了堆焊层的显微组织、硬度和耐磨性能, 并与工程实际应用 TN65 高铬铸铁堆焊层进行对比。结果表明: 1#堆焊层和 2#堆焊层的物相与 TN65 高铬铸铁堆焊层相似, 均主要由 M_7C_3 、 γ -Fe、 M_3C 、(Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C)和 Fe_2B 组成。与 TN65 高铬铸铁堆焊层相比, 1#和 2#堆焊层的 M_7C_3 碳化物更加圆整, 尺寸更小, M_3C 共晶碳化物含量更高; 其中 1#堆焊层的 M_7C_3 碳化物最圆整, 数量最多, 平均粒径最小, 约为 12.45 μm , M_3C 共晶碳化物含量低于 2#堆焊层。1#堆焊层的硬度为 64.1 HRC, 高于 2#堆焊层(62.5 HRC)且与 TN65 高铬铸铁堆焊层接近(65.1 HRC)。1#堆焊层的磨损质量损失为 0.077 1 g, 低于 2#堆焊层(0.093 1 g)且与 TN65 高铬铸铁堆焊层接近(0.067 7 g), 1#堆焊层与 TN65 高铬铸铁堆焊层磨损表面的犁沟均较浅。近等物质的量比 0.7:1.0:1.0:1.0 钼/钒/铌/钛强化高铬铸铁堆焊层的硬度和耐磨性能与 TN65 高铬铸铁堆焊层最为接近。

关键词: 近等物质的量比; 高铬铸铁; 碳化物; 硬度; 耐磨性能

中图分类号: TG422.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2026)06-0088-06

0 引言

高铬铸铁因其优异的耐磨性能和高的硬度, 在矿山、冶金、机械等领域得到广泛应用, 其优异的性能与其弥散分布的碳化物 $M_{23}C_6$ (硬度 1 000~1 100 HV)、 M_7C_3 (硬度 1 300~1 800 HV)、 M_3C (硬度 840~1 100 HV)有关^[1-2]。然而, 随着服役工况的日益苛刻, 上述传统碳化物易粗化与软化, 导致耐磨性能显著下降。为改善上述不足, 多元合金化被广泛应用。通过添加多种合金元素形成细小复杂碳化物虽能进一步提高高铬铸铁的耐磨性能, 但会导致成本提高, 且其中仍然存在的大量大尺寸硬质相易割裂基体, 限制了材料综合性能的进一步提升^[3-4]。研究^[5-8]发现, 高熵碳化物作为一种新型多主元陶

瓷, 凭借高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应及“鸡尾酒”效应, 具有高硬度、优异的热稳定性和良好的耐磨性能。基于这一理念, 将高熵合金设计理念引入到高铬铸铁的多元强化设计中^[4], 即通过多种碳化物形成元素以近等物质的量比的共同添加, 在较低合金总含量条件下, 利用高熵效应抑制碳化物在高温下的粗化倾向, 同时避免大尺寸硬质相割裂基体的问题。然而, 目前有关高铬铸铁近等物质的量比多元强化方面的研究仍处于初步阶段, 缺乏系统的材料设计及性能优化体系^[9]。

研究^[10-11]表明, 钼、钒、铌、钛等合金元素可通过形成高硬度碳化物来提高合金的硬度, 同时优先形成的复合碳化物可成为 M_7C_3 的形核核心, 抑制晶粒长大并细化碳化物尺寸; 此外, 部分合金元素可固溶于基体或碳化物中, 进一步提高耐磨性能。PRYSYAZHNYUK 等^[12]研究发现, 添加近等物质的量比的钼、钒、铌、钛强化高锰钢药芯焊丝堆焊层的抗冲击磨损率约为普通高锰钢的 1/4, 证实了利用高熵效应强化材料的可行性。堆焊技术是高铬铸铁在

收稿日期: 2025-11-06; 修订日期: 2026-04-16

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(242102230046)

作者简介: 胡士昌, 男, 2001 年, 硕士研究生, 2322639049@qq.com

*通信作者: 黄智泉, 女, 1969 年生, 研究员, 硕士, 主要从事金属堆焊耐磨材料研究, zcrime7435275@163.com

工业耐磨领域实现高效应用、性能升级、成本控制的核心支撑技术,可有效改善高铬铸铁脆性大、成型难、成本高等问题^[1]。通过堆焊技术制备高铬铸铁耐磨层,不仅便于材料设计与性能调控,也更贴近工程实际应用场景。作者基于高熵合金设计理论,在高铬铸铁中加入近等物质的量比(0.7:1.0:1.0:1.0和1.0:0.7:1.0:1.3)的钼、钒、铌、钛,并以上述成分的粉末为药皮制备出相应焊条,采用手工电弧焊在Q235钢板上制备堆焊层,研究堆焊层的显微组织和耐磨性能,并与性能优异的TN65多元强化高铬铸铁堆焊层进行对比。

1 试样制备与试验方法

基板为尺寸100 mm×40 mm×20 mm的Q235钢板,用砂轮机打磨钢板表面后备用。按照化学成分(质量分数/%)4.20~4.37C, 1.44~1.88Si, 0.75~

0.90Mn, 15.00~16.08Cr, 0.20~0.25B, 余Fe配料,再在其中加入近等物质的量比(0.7:1.0:1.0:1.0和1.0:0.7:1.0:1.3)的钼、钒、铌、钛,对应的化学成分(质量分数/%)分别为0.88Mo, 0.68V, 1.22Nb, 0.68Ti以及1.25Mo, 0.48V, 1.22Nb, 0.85Ti。将上述粉末与水玻璃混合后涂覆于焊芯上作为药皮,采用焊条压涂机制备直径为3.2 mm的焊条,对比焊条为工程用相同直径的TN65高铬铸铁焊条。采用手工电弧焊在Q235钢板上堆焊3~4层,堆焊层厚度约为12 mm,沉积路径为往复堆积,焊接电流为140~150 A,焊接电压为20~25 V,层间温度为150 ℃,冷却方式为空冷。将物质的量比0.7:1.0:1.0:1.0和1.0:0.7:1.0:1.3的钼/钒/铌/钛增强高铬铸铁焊条制备得到的堆焊层分别记作1#堆焊层和2#堆焊层。采用Thermo Fisher型直读光谱仪测得堆焊层的实际化学成分如表1所示。

表1 不同堆焊层的实测化学成分

Table 1 Actual chemical composition of different surfacing layers

堆焊层	质量分数/%										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	Ti	W	B	Fe
1#	4.23	1.52	0.77	15.77	0.85	0.68	1.22	0.65		0.21	余
2#	4.33	1.44	0.81	15.74	1.21	0.48	1.21	0.85		0.21	余
TN65高铬铸铁	4.57	1.93	1.12	16.42	1.99	0.84	2.56	0.77	1.25	0.70	余

采用线切割方法在堆焊层上截取试样,采用Smartlab SE型X射线衍射仪(XRD)对堆焊层的物相组成进行分析,采用铜靶, K_{α} 射线,工作电压为20~60 kV,工作电流为30~60 mA,扫描范围为 10° ~ 90° ,扫描速率为 $5(^{\circ}) \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用Phenom XL G2型扫描电镜(SEM)观察堆焊层的微观形貌,利用ImagePro Plus软件对 M_7C_3 碳化物进行定量统计,用SEM附带的能谱仪(EDS)分析微区成分。采用THRP-150D型洛氏硬度计测堆焊层的硬度,载荷为1 471 N,保载时间为15 s,测7个点,去掉最大和最小值后取平均值。在堆焊层上截取尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times$

24 mm的试样,采用ML-100型磨粒磨损试验机进行摩擦磨损试验,加载载荷为20 N,转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,磨损时间为4 min,磨粒材料为氧化铝;采用精度为0.000 1 g的电子天平称取摩擦磨损试验前后试样的质量,计算磨损质量损失;采用SEM观察磨损形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观形貌和物相组成

由图1可知:1#和2#堆焊层表面均较平整,裂纹较少;TN65高铬铸铁堆焊层表面凹凸不平,存在较多裂纹,这与其较高的合金元素含量有关^[10-11]。

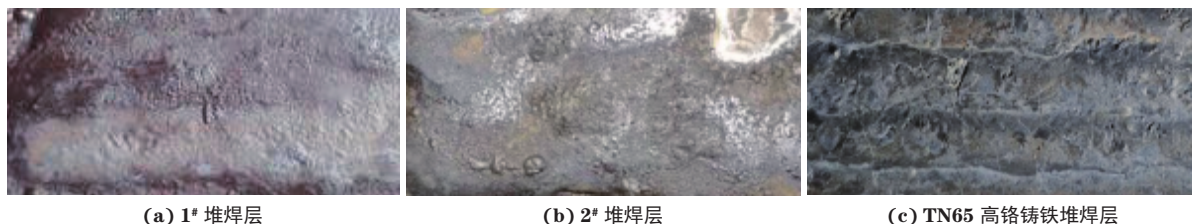


图1 不同堆焊层的表面宏观形貌

Fig. 1 Surface macromorphology of different surfacing layers: (a) 1# surfacing layer; (b) 2# surfacing layer and (c) TN65 high-chromium cast iron surfacing layer

由图2可以看出,不同堆焊层均含有 M_7C_3 、 γ -Fe、 M_3C 、 $(Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C)$ 和 Fe_2B 相,而由于 TN65 高铬铸铁中含有钨元素,且钼元素含量较多,因此其堆焊层中还出现了 Mo_2C 和 WC 等物相。铌、钛、钒、钼的近等物质的量配比使得合金具有高混合熵,这有利于形成复合相 $(Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C)$,从而抑制 NbC 、 TiC 等单碳化物的形成^[7-8]。其中,1#堆焊层的 M_7C_3 相衍射峰明显宽化,且积分面积更大,表明 M_7C_3 更加细小且数量更多。

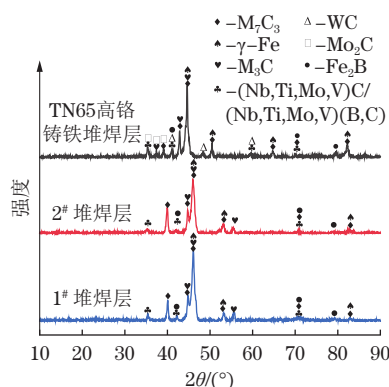


图2 不同堆焊层的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of different surfacing layers

由图3和表2可以看出,不同堆焊层均由六边形碳化物 M_7C_3 (如点 A, C, E)、网状共晶碳化物 M_3C 、粒状复合硬质相 $(Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C)$ (点 B, D, F) 以及灰色基体相 γ -Fe 组成。在凝固过程中,钛和碳的亲合度最大, TiC 会优

先析出形核;在温度降低以及晶粒长大的过程中,铌在碳中的溶解度变大,且铌和钛的原子半径接近、碳化物结构相似,铌逐渐取代钛形成 $(Nb, Ti)C$ ^[11];后续钼、钒等原子也会置换其中的金属原子,最终形成以铌、钛为主的 $(Nb, Ti, Mo, V)C$ 多元复合硬质相;此外,部分硼会取代碳形成硼碳硬质相。六边形 M_7C_3 结构中心含有缩孔,这些缩孔是碳化物凝固收缩后被溶液填入而形成的^[13]。 M_7C_3 形成后,多余的铬、碳和硼元素在其周围富集;当温度降到共晶线时,在 γ -Fe 周围发生共晶转变,形成网状共晶碳化物 M_3C 。对比发现,1#堆焊层的碳化物分布最均匀, M_7C_3 碳化物最圆整,棱角角度为 $85^\circ \sim 125^\circ$,平均粒径最小,约为 $12.45 \mu m$; M_7C_3 碳化物沿堆焊沉积方向垂直生长,其横截面硬度高于纵截面,这一特性有利于提高材料的耐磨性能^[14]。与1#堆焊层相比,2#堆焊层中的 M_3C 网状共晶碳化物较多,而 M_3C 的硬度低于 M_7C_3 ,因此其抵抗磨粒切削的能力较弱。2#堆焊层中 M_7C_3 碳化物的平均粒径约为 $13.68 \mu m$,大于1#堆焊层,且部分碳化物沿优先生长方向形成长条状形貌;其棱角角度在 $80^\circ \sim 120^\circ$,尖锐程度略高于1#堆焊层。与1#和2#堆焊层相比, TN65 高铬铸铁堆焊层中的 M_7C_3 碳化物尺寸更大,平均粒径为 $15.43 \mu m$,棱角角度为 $67^\circ \sim 102^\circ$,尖锐程度最大;虽然其共晶碳化物含量更低,但粗大、尖锐的初生 M_7C_3 碳化物对基体的割裂作用更为显著,导致堆焊层脆性更大。复合硬质相可作为初生以及共晶碳化

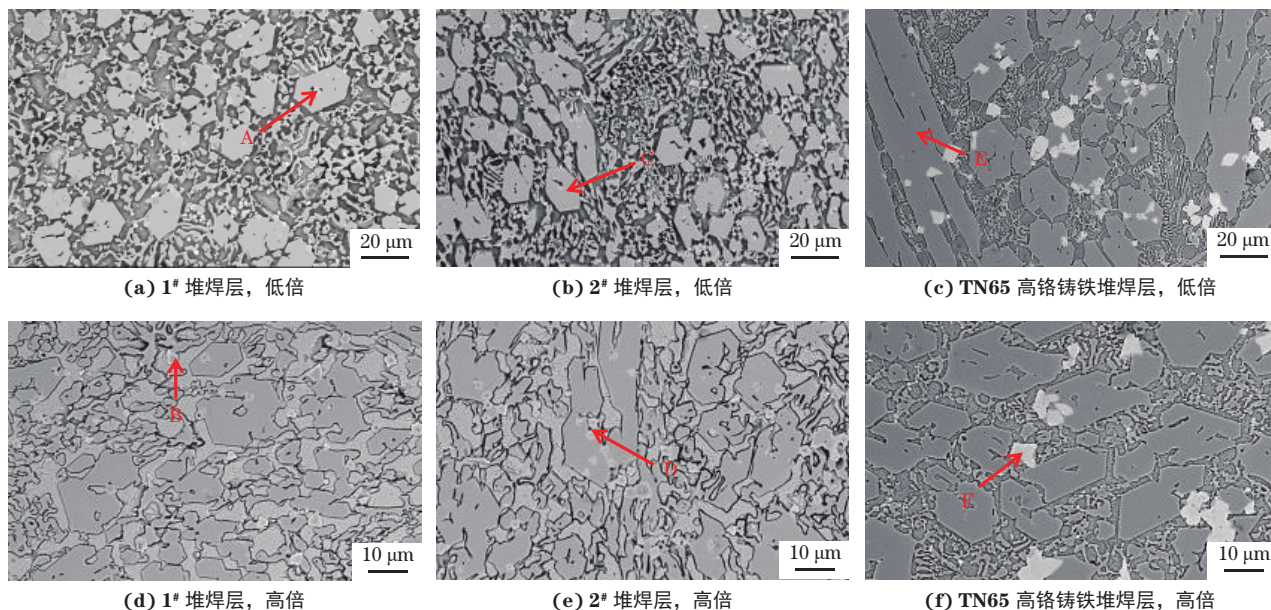


图3 不同堆焊层的低倍和高倍 SEM 形貌

Fig. 3 SEM morphology at low (a-c) and high (d-f) magnification of different surfacing layers: (a, d) 1# surfacing layer; (b, e) 2# surfacing layer and (c, f) TN65 high-chromium cast iron surfacing layer

表 2 图 3 中不同点的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of different points in Fig.3

测试点	质量分数/%										
	B	C	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Nb	Mo	W
A		6.49	0.10		1.30	36.46	0.80	54.85			
B	6.70	6.00		26.80	3.20				54.50	2.80	
C		7.00	0.10		2.60	38.00	1.00	51.30			
D		12.00		28.20	3.60				53.50	2.70	
E		9.74	0.20		2.41	36.60	0.70	50.35			
F	8.00	10.12		14.81	5.01			2.20	51.45	4.30	4.10

物的异质形核核心,细化组织,改善碳化物形貌,并在与基体结合良好时能显著提升材料的抗磨粒切削能力^[15]。铌、钛、钒、钼的近等物质的量配比使得合金堆焊层组织细化、碳化物棱角钝化、共晶碳化物含量增加,从而提高堆焊层的韧性,并减少宏观裂纹。

2.2 硬度和耐磨性能

1#堆焊层、2#堆焊层和 TN65 高铬铸铁堆焊层的平均硬度分别为 64.1, 62.5, 65.1 HRC, 对应的标准差为 0.78, 0.81, 0.99 HRC, 较小的标准差说明各堆焊层组织分布相对均匀。其中, TN65 高铬铸铁堆焊层的合金元素含量较高,碳化物较多且尺寸较大,因而其硬度最高。1#堆焊层的硬度高于 2#堆焊层。这是由于 1#堆焊层的组织更加细小, M_7C_3 碳化物分布更均匀,形态更圆整,数量更多,且多为沿堆焊表面垂直分布的六边形,因此硬度更高,且与 TN65 高铬铸铁堆焊层硬度接近;而 2#堆焊层中硬度相对较低的共晶碳化物更多,因此其整体硬度较低。

1#堆焊层、2#堆焊层和 TN65 高铬铸铁堆焊层的磨损质量损失分别为 0.077 1, 0.093 1, 0.067 7 g。可

知, TN65 高铬铸铁堆焊层的耐磨性能最好, 1#堆焊层次之, 2#堆焊层的耐磨性能最差。磨损质量损失与硬度基本呈负相关, 即硬度越高, 磨损质量损失越低, 耐磨性能越好。1#堆焊层中 M_7C_3 碳化物多为沿堆焊表面垂直分布的六边形, 组织均匀细小, 硬度较高, 能有效抵抗磨粒的切削作用; 2#堆焊层硬度最低且碳化物分布不均匀, 导致磨粒对基体的切削严重; TN65 高铬铸铁堆焊层的硬度最高, 大尺寸碳化物抵抗磨粒切削的能力最强, 因此磨损质量损失最小。由图 4 可知, 不同堆焊层磨损表面均存在犁沟、剥落坑及少量裂纹。在磨损过程中, 高硬度的初生碳化物对磨粒产生阻隔作用, 可导致切削过程中断, 并且在销盘的切应力作用下, 韧性较差的初生碳化物易萌生裂纹; 剥落坑的形成与碳化物断裂、较小硬质相剥落以及磨粒对基体组织的凿削作用有关^[16]。与 2#堆焊层相比, 1#堆焊层和 TN65 高铬铸铁堆焊层的犁沟较浅。虽然 TN65 高铬铸铁堆焊层中硬质相较为尖锐, 但在低应力作用下未发生明显剥落, 因此该堆焊层仍具有优异的耐磨性能。

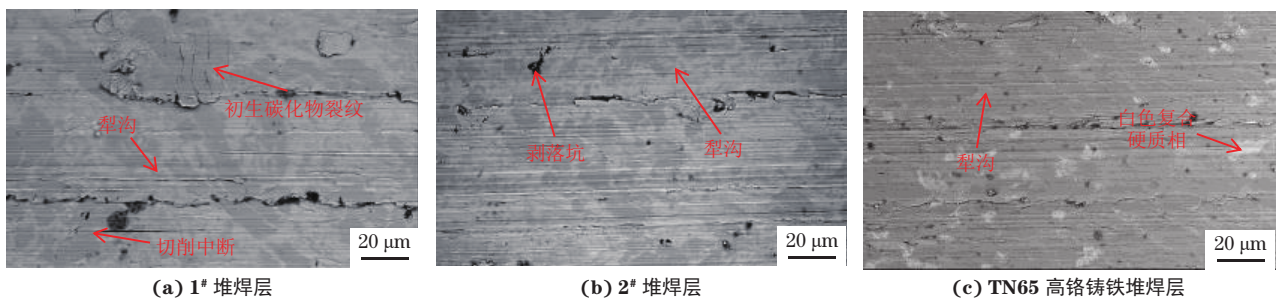


图 4 不同堆焊层的磨损形貌

Fig. 4 Wear morphology of different surfacing layers: (a) 1# surfacing layer; (b) 2# surfacing layer and (c) TN65 high-chromium cast iron surfacing layer

由图 5 可以看出: 1#堆焊层磨损表面铬和铁元素发生聚集, 该区域主要对应 M_7C_3 和共晶碳化物, 且在其相应位置观察到少量剥落坑, 未出现碳化物大面积剥落现象; 硼、碳元素含量较少, 未检测到聚集

现象; 钛和铌元素发生明显聚集, 且其相应位置未观察到明显剥落坑, 这表明 (Nb, Ti, Mo, V)C 相与基体结合良好。此外, 钼和钒元素呈弥散分布, 固溶于基体和碳化物中, 起到强化作用。

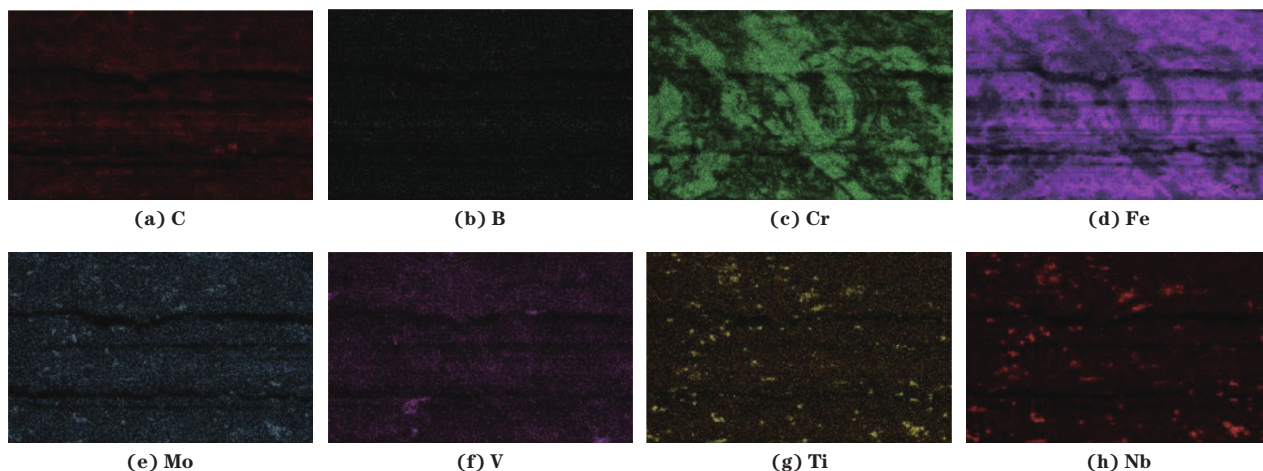


图5 图4(a)所示区域的元素面扫描结果

Fig. 5 Elemental mapping results of area show in Fig.4(a)

3 结论

(1)近等物质的量比(0.7:1.0:1.0:1.0和1.0:0.7:1.0:1.3)钼/钒/铌/钛强化高铬铸铁堆焊层(1#堆焊层和2#堆焊层)和TN65高铬铸铁堆焊层的物相均主要由 M_7C_3 、 γ -Fe、 M_3C 、(Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C)和 Fe_2B 组成。与TN65高铬铸铁堆焊层相比,1#和2#堆焊层组织更加细小, M_7C_3 碳化物更加圆整, M_3C 共晶碳化物含量更高;其中1#堆焊层组织更加均匀, M_7C_3 碳化物最圆整,数量最多,平均粒径最小,约为12.45 μm ,共晶碳化物含量低于2#堆焊层。

(2)1#堆焊层的硬度为64.1 HRC,高于2#堆焊层(62.5 HRC)且与TN65高铬铸铁堆焊层接近(65.1 HRC);1#堆焊层的磨损质量损失为0.077 1 g,低于2#堆焊层(0.093 1 g)且与TN65高铬铸铁堆焊层接近(0.067 7 g)。不同堆焊层磨损表面均存在剥落坑、犁沟及少量裂纹,其中1#堆焊层和TN65高铬铸铁堆焊层磨损表面的犁沟均较浅。近等物质的量比0.7:1.0:1.0:1.0钼/钒/铌/钛强化高铬铸铁堆焊层的硬度和耐磨性能与TN65高铬铸铁堆焊层最为接近,近等物质的量比多元合金强化使高铬铸铁在低元素含量下仍具有优异的性能。

参考文献:

- [1] LIU S, ZHOU Y F, XING X L, et al. Growth characteristics of primary M_7C_3 carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32941.
- [2] 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. YU R Z, LIU S X, WANG P X, et al. A brief survey on the Fe-Cr-C hard facing alloys and its hard phases[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(21): 3780-3788.
- [3] 王茂森,王帅,龙骏,等. TiC-TiWC₂增强高铬铸铁基复合材料的组织与磨损性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2025, 19(1): 164-170. WANG M S, WANG S, LONG J, et al. Investigation of microstructures and wear properties of TiC-TiWC₂ reinforced high chromium cast iron matrix composites[J]. *Materials Research and Application*, 2025, 19(1): 164-170.
- [4] HUANG L, PAN Y F, ZHANG J X, et al. Densification, microstructure and mechanical performance of TiC/Fe composites by spark plasma sintering[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 6116-6124.
- [5] 苏允海,梁学伟,邓越,等. FeAlCuCrNiNb_x系高熵合金堆焊层的组织及性能分析[J]. *焊接学报*, 2020, 41(4): 38-43. SU Y H, LIANG X W, DENG Y, et al. Microstructure and property analysis of FeAlCuCrNiNb_x high-entropy alloy surfacing layer[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(4): 38-43.
- [6] CASTLE E, CSANÁDI T, GRASSO S, et al. Processing and properties of high-entropy ultra-high temperature carbides[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8609.
- [7] ZHANG P X, YE L, CHEN F H, et al. Stability, mechanical, and thermodynamic behaviors of (TiZrHfTaM)C (M = Nb, Mo, W, V, Cr) high-entropy carbide ceramics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163868.
- [8] TAGIR M, NIKOLAY R, ANATOLIY P. Synthesis of single-phase high-entropy carbides from a mixture of pre-mechanically alloyed CrNbMoWV HEA powders and carbon[J]. *Materials Letters*, 2022, 309: 131363.
- [9] 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. Study on multiple composite reinforced wear-resistant surfacing flux cored wire and wear-resistance mechanism of surfacing layer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [10] 杨跃辉, 张晓娟, 褚祥治, 等. 合金元素对高 Cr 铸铁组织和性能的影响 [J]. 唐山学院学报, 2013, 26(6): 26-29.
- YANG Y H, ZHANG X J, CHU X Z, et al. Effect of alloying elements on the microstructure and properties of high chromium cast iron[J]. Journal of Tangshan College, 2013, 26(6): 26-29.
- [11] 刘政军, 张桂清, 尹奕君, 等. 合金元素对铁基耐磨堆焊合金性能的影响 [J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 69-72.
- LIU Z J, ZHANG G Q, YIN Y J, et al. Effect of alloy elements on properties of iron-base hardfacing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 69-72.
- [12] PRYSYAZHNYUK P, IVANOV O, MATVIENKIV O, et al. Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 36: 130-136.
- [13] 杨绍斌, 董伟, 徐晓辰, 等. Fe-Cr-C 系堆焊耐磨材料的研究现状与展望 [J]. 材料导报, 2012, 26(3): 96-100.
- YANG S B, DONG W, XU X C, et al. Research actuality and development of the Fe-Cr-C wear-resistant hardfacing alloy system[J]. Materials Review, 2012, 26(3): 96-100.
- [14] 杨威, 魏建军, 黄智泉. Fe-Cr-C 系高碳高铬耐磨堆焊合金微观组织分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 85-88.
- YANG W, WEI J J, HUANG Z Q. Microstructure in Fe-Cr-C hardfacing alloys with high C and Cr[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(3): 85-88.
- [15] YANG K, GAO Y, YANG K, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr13-C-Nb hardfacing alloy with Ti addition[J]. *Wear*, 2017, 376: 1091-1096.
- [16] KIRCHGÄßNER M, BADISCH E, FRANEK F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact[J]. *Wear*, 2008, 265(5/6): 772-779.

Microstructure and Wear Resistance of Surfacing Layer of High-Chromium Cast Iron Reinforced by Near-Equal Molar Ratio Mo/V/Nb/Ti

HU Shichang, HUANG Zhiquan*, GAO Zhanqi, NI Junjie, WANG Chongyang

(China Machinery General Institute Group Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the high-entropy alloy design philosophy, two near-equal molar ratio multi-component reinforced high-chromium cast irons (with a chromium mass fraction of approximately 15.7%) were designed with Mo, V, Nb, Ti molar ratios of 0.7:1.0:1.0:1.0 and 1.0:0.7:1.0:1.3 (corresponding to mass fractions of 0.88% Mo, 0.68% V, 1.22% Nb, 0.68% Ti, and 1.25% Mo, 0.48% V, 1.22% Nb, 0.85% Ti, respectively). The powders with the aforementioned compositions were used as coatings to prepare corresponding welding electrodes. Subsequently, the corresponding surfacing layers were deposited on Q235 steel plates by shielded metal arc welding, denoted as 1[#] surfacing layer and 2[#] surfacing layer, respectively. The microstructure, hardness, and wear resistance of the surfacing layers were investigated and compared with those of the TN65 high-chromium cast iron surfacing layer used in practical engineering applications. The results show that the phases in both the 1[#] and 2[#] surfacing layers were similar to those in the TN65 high-chromium cast iron surfacing layer, all mainly consisting of M₇C₃, γ-Fe, M₃C, (Nb, Ti, Mo, V)C/(Nb, Ti, Mo, V)(B, C), and Fe₂B. Compared with the TN65 high-chromium cast iron surfacing layer, the M₇C₃ carbides in the 1[#] and 2[#] surfacing layers were more rounded, smaller in size, and the content of M₃C eutectic carbides was higher. Among them, the M₇C₃ carbides in the 1[#] surfacing layer were the most rounded, with the largest quantity and the smallest average particle size of 12.45 μm, and the content of M₃C eutectic carbides was lower than that in the 2[#] surfacing layer. The hardness of 1[#] surfacing layer was 64.1 HRC, which was higher than that of 2[#] surfacing layer (62.5 HRC) and closed to that of TN65 high-chromium cast iron surfacing layer (65.1 HRC). The wear mass loss of 1[#] surfacing layer was 0.077 1 g, lower than that of 2[#] surfacing layer (0.093 1 g) and similar to that of TN65 high-chromium cast iron surfacing layer (0.067 7 g). The wear grooves on the surface of 1[#] surfacing layer and TN65 high-chromium cast iron surfacing layer were both relatively shallow. The hardness and wear resistance of high-chromium cast iron surfacing layer reinforced with Mo, V, Nb, Ti at a near-equal molar ratio of 0.7:1.0:1.0:1.0 were most similar to those of TN65 high-chromium cast iron surfacing layer.

Key words: near-equal molar ratio; high-chromium cast iron; carbide; hardness; wear resistance