

堆焊制备碳钢-高铬耐磨双金属板用药芯焊丝的研制

* 马朝^{1,3} 李蕾蕾^{2,3} 史可³ 符少龙¹ 钟黎声^{3*}

(1. 陕西延长石油榆林凯越煤化有限责任公司 陕西 719100

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 710065

3. 西安理工大学陕西省复合材料及其产品智能制造技术国际联合研究中心 陕西 710048)

摘要: 碳钢-高铬耐磨双金属板是广泛应用于化工、电力、建材等领域的常备易耗产品,从Fe-Cr-C三元系相图分析出发,根据耐磨层化学成分和耐磨性要求,设计并试制出适用于碳钢表面高铬耐磨层堆焊制造的药芯焊丝,并分析了其微观组织和硬度。结果表明,通过调整药芯成分可使碳钢表面高铬耐磨层的微观组织中分布大量垂直于基材的柱状 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ 碳化物,配合以基体中的过共晶组织,使其洛氏硬度达到57.7HRC以上。

关键词: 双金属板; 堆焊; 药芯焊丝; 磨粒磨损

中图分类号: TF125 **文献标识码:** A

DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.02.058

Preparation of Cored Wire for Carbon Steel-high Chromium Wear Resistant Bimetallic Plate by Surfacing

Ma Chao^{1,3}, Li Leilei^{2,3}, Shi Ke³, Fu Shaolong¹, Zhong Lisheng^{3*}

(1. Shaanxi Yanchang Yulin Kaiyue Coal Chemical Co., Ltd., Shaanxi, 719100

2. PowerChina Northwest Engineering Co., Ltd., Shaanxi, 710065

3. Shaanxi International Joint Research Center of Composites and Intelligent Manufactory, Xi'an University of Technology, Shaanxi, 710048)

Abstract: Carbon steel-high chromium wear-resistant bimetallic plate is widely used in chemical industry, electric power, mining and other fields. Based on the analysis of Fe-Cr-C ternary phase diagram, according to the requirements of the chemical composition and mechanical properties of the wear-resistant layer, the flux-cored wire suitable for the surfacing of the high chromium wear-resistant layer was designed and trial-produced. The microstructure and anti-wear properties were analyzed. The results show that by adjusting the core composition, a large number of columnar $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ carbides are distributed in the microstructure of the high chromium wear-resistant layer, which is perpendicular to the substrate. Combined with the eutectic structure in the substrate, the average rockwell hardness of the surfacing layer reaches more than 57.7HRC.

Key words: bimetallic plate; surfacing welding; flux cored wire; abrasive grain wear

物料输送系统在化工、电力、建材、矿山等领域扮演着重要的角色,而碳钢-高铬耐磨双金属板是物料输送系统中直接接触物料的重要抗磨备品备件,其服役安全性和稳定性直接关系着整个系统的正常运行。采用明弧堆焊工艺制备碳钢-高铬耐磨双金属板,是以电弧为热源,利用高温将含Fe-Cr-C三元系合金的药芯焊丝熔覆在碳钢基材表面的技术方法。其具有热应力低、表层成分与组织可调、层间温度可控等优势。而且,由于电弧加热具有“快热快冷”的特性,易于在高铬层中获得细小的晶粒尺寸^[1-3]。可以看出,药芯焊丝是堆焊制备碳钢-高铬耐磨双金属板的关键材料。一方面,高铬耐磨层主要由焊丝中的合金材料过渡而来;另一方面,焊丝与堆焊工艺相配合可实现高铬耐磨层表面化学成分和微观组织的调控^[4]。

根据使用工况对碳钢-高铬耐磨双金属板工作面化学成分和力学性能的要求,从Fe-Cr-C三元系相图分析出发,设计并试制出适用于碳钢表面高铬耐磨层堆焊制造的药芯焊丝,并分析了其熔覆层金属的微观组织和抗磨性能。

1. 焊丝的药芯成分设计与实验材料选择

(1) 焊丝的药芯成分设计。图1为Fe-Cr-C三元系液相面投影图和1000℃等温截面图。可以看出,Fe-Cr-C三元系合金中,C和Cr的含量直接影响室温平衡物相组成。要想获得高硬度和高耐磨性的 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物,主要依赖于较高的C和Cr含量,并且与Cr/C比有一定的关系。学者Ma等^[5]给出了Fe-Cr-C三元系合金中铸态组织中 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物含量的近似计算如公式(1)所示。

$$\phi = 11.4C + 0.52Cr - 10.5 \quad (1)$$

式中： ϕ 为 $(Fe, Cr)_7C_3$ 碳化物的含量，%；
C和Cr分别为元素含量，%。

综合考虑 Fe-Cr-C 三元相图和 $(Fe, Cr)_7C_3$ 碳化物含量，确定碳钢表面熔覆高铬耐磨层的化学成分范围，具体见表1，表中还列出了根据公式(1)计算出的理论 $(Fe, Cr)_7C_3$ 碳化物含量。

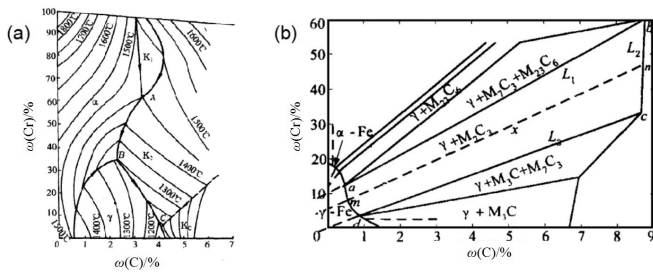


图1 (a)Fe-Cr-C三元系液相面投影图；(b)1000 °C等温截面图^[6]

表1 碳钢表面高铬耐磨堆焊层的化学成分与 $(Fe, Cr)_7C_3$ 理论含量(质量分数/%)

化学成分质量分数/%					Cr/C比	$(Fe, Cr)_7C_3$ 理论含量 (质量分数)/%
C	Cr	Mn	Si	Fe		
3.7~ 4.3	20~ 25	0.30~ 0.90	0~ 1.10	余量	4.7	48.9 (C=4.3, Cr=20)
					5.4	42.2 (C=3.7, Cr=20)
					5.8	51.5 (C=4.3, Cr=25)
					6.8	44.7 (C=3.7, Cr=25)

(2) 实验材料的选择与实验方法。碳钢-高铬耐磨双金属板表面化学成分是否能够达到设计标准是焊丝药芯成分设计的关键。需要重点考虑的问题包括：①各合金元素的引入形式与添加量；②各合金元素在明弧堆焊条件下的过渡系数；③堆焊工艺和表面质量的稳定性。

对于合金元素的引入形式与添加量，选择同时含有铁和合金元素的粉状原料最为合适。一方面，可保证充足的元素引入；另一方面，铁与合金元素形成的金属间化合物更为稳定。所用粉状原料及其化学成分要求，见表2。除了主合金元素引入物料高碳铬铁、金属铬、石墨之外，铝镁合金、金属锰、氟铝酸钾等的添加是为了脱氧、脱氮、保护熔池，以获得良好的堆焊表面质量。

表2 粉状原料及其化学成分(质量分数/%)

	C	Cr	Al	Mg	Si	P	S	Mn
高碳铬铁	7.60	56.13	-	-	-	-	-	-
镁铝合金	0.026	-	50.06	49.63	0.032	0.003	0.003	-
金属铬	0.02	99.03	-	-	0.23	0.01	0.02	-
金属锰	0.04	-	-	-	-	0.005	0.05	99.5
中碳锰铁	1.37	-	-	-	1.21	0.137	0.019	79.02

明弧堆焊条件下合金元素的过渡系数(η_i)直接影响堆焊层的微观组织，主要元素的过渡系数参考值，见表3。药芯填充系数(K_b)控制在40%~42%范围内。

表3 合金元素参考过渡系数

元素	C	Cr	Mn	Si
η_i	0.4~0.7	0.8~0.9	0.5~0.7	0.4~0.6

各金属元素的加入量参考式(2)进行计算。

$$M_c = \frac{M_w - M_f \cdot \eta_i}{\eta_i \cdot K_b \cdot K_c} \quad (2)$$

式中： M_c 为需加入的金属质量分数，%；

M_w 为堆焊层中的合金元素含量，%；

M_f 为焊丝中合金元素的含量，%；

K_c 为铁合金中的合金元素含量，%。

据此，可计算出药芯焊丝各组分含量与比例，提出较合理的成分配方。按照如下步骤制备药芯焊丝：①合金粉过筛(80目)后按比例称重，经120 °C烘干后混料；②利用焊丝成型机将碳钢带轧制成“U”形截面，包裹上述混合粉末后进一步轧制为搭接“O”形截面；③将已包裹有粉末的焊丝拉拔减颈至3.2 mm直径的焊丝成品。

(3) 碳钢-高铬耐磨双金属板的堆焊制备与分析方法。以碳钢(Q235)为基材，利用自制药芯焊丝堆焊碳钢-高铬耐磨双金属板。设置焊接电流和电弧电压分别为380 A和30 V，采用明弧堆焊的方法施焊。获得焊件后，经打磨抛光其表面，分别参照GB/T 230、GB/T 223等标准测试其表面宏观硬度和表面堆焊层化学成分^[7]。堆焊层微观组织选择光学显微镜进行观察。此外，在相同载荷条件下，对堆焊层的抗磨粒磨损性能进行测试，并与低碳钢(基材)、高锰钢及铸态高铬铸铁进行对比，分析其抗磨机制。

2. 实验结果与讨论

(1) 堆焊层的化学成分

经化学滴定法测得堆焊层的化学成分结果，见表4。测试结果与所设计碳钢表面高铬耐磨堆焊层的化学成分(表1)相比，3个试样的C、Cr含量及Cr/C比均在所正常范围。根据式(1)的计算结果，这样的化学成分可以保证足够量的高硬度、高耐磨 $(Fe, Cr)_7C_3$ 碳化物含量。

表4 堆焊层化学成分与 $(Fe, Cr)_7C_3$ 理论含量(质量分数/%)

试样编号	C	Cr	Mn	Si	S	P	Cr/C比	$(Fe, Cr)_7C_3$ 理论含量
1	4.91	24.02	0.68	0.78	0.015	0.021	4.9	57.9
2	4.42	23.01	0.46	0.98	0.012	0.020	5.2	51.9
3	3.70	20.28	0.79	0.76	0.012	0.020	5.5	42.2

(2) 堆焊层的显微组织

图2为不同Cr/C比堆焊层表面与截面的显微组织。可以看出,堆焊层为典型的过共晶组织,在奥氏体基体中分布有大量形状规则的 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物。对比观察表面与截面形貌, $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物呈现出明显的方向性,均垂直于基材向上生长分布。 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物含量与理论计算结果一致性好,且分布均匀、尺寸较大。对比不同Cr/C比的显微组织,较大Cr/C比可获得更大尺度的 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物,其含量的变化仅与C量和Cr量有关,根据理论计算结果(表1和表5),较高的C含量或较高的Cr含量都会提高组织中 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物的含量。

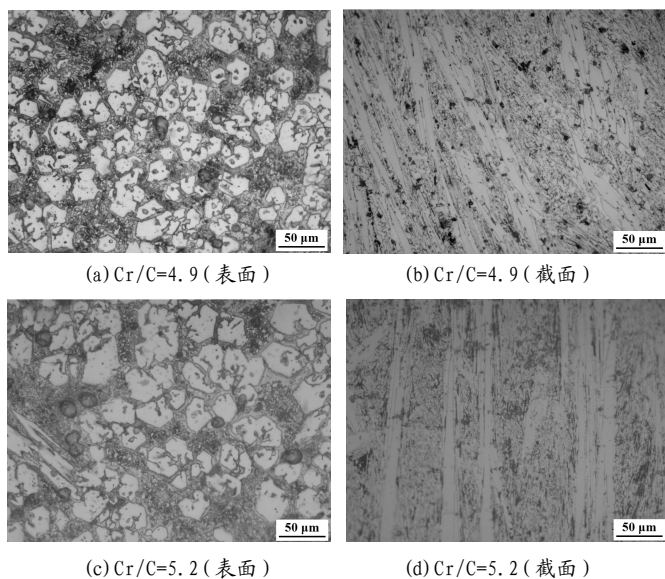


图2 不同Cr/C比堆焊层表面与截面的显微组织

(3) 堆焊层的表面硬度与耐磨性

表5为不同Cr/C比堆焊层表面宏观硬度测试结果。Cr/C比为4.9、5.2和5.5时,堆焊层表面宏观硬度平均值分别为62.0HRC、61.3HRC和57.7HRC。这一结果与 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物含量密切相关,更高含量的 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物有助于提高堆焊层的硬度。有了碳化物含量的保证,堆焊层表现出优异的抗磨粒磨损性能。在Fe-Cr-C三元体系中,碳化物的种类、分布、含量等是影响其抗磨性能的关键。常见的碳化物有 $(Cr, Fe)_3C$ 、 $(Cr, Fe)_7C_3$ 和 $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 碳化物,其中, $(Cr, Fe)_7C_3$ 是Cr置换不稳定化合物 Fe_7C_3 中的Fe原子点位形成的稳定碳化物,显微硬度最高,且具有明显的各向异性特征。初生 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物通常为空心六棱柱结构,棱柱横截面的硬度可高达1750~1850 HV,而棱柱侧面也可保持在1400 HV以上。因此,为提高堆焊层的耐磨性,应含有大量的初生 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物,且使其垂直于基材生长,这样

可以让高硬度的棱柱横截面承受磨损,提高使用寿命。

表5 不同Cr/C比堆焊层表面宏观硬度(HRC)测试结果

试样编号	Cr/C比	测试值1	测试值2	测试值3	平均值
1	4.9	62.0	63.0	61.0	62.0
2	5.2	61.5	60.5	62.0	61.3
3	5.5	58.0	58.0	57.0	57.7

3. 结论

(1) 根据Fe-Cr-C三元系相图并计算确定制碳钢-高铬耐磨双金属板用药芯焊丝堆焊层的C、Cr含量分别为3.7~4.3和20~25,理论碳化物含量不低于42.2%。

(2) 堆焊层为典型的过共晶组织,在奥氏体基体中分布有大量形状规则的 $(Cr, Fe)_7C_3$,且其呈现出明显的方向性,均垂直于基材向上生长分布。碳化物含量与理论计算结果一致性好,至少高于42%。

(3) 堆焊层表面宏观硬度平均值大于57.7HRC,表现出优异的抗磨粒磨损性能,主要得益于高含量且垂直于基材分布的 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物。

【参考文献】

- [1] 尚群超. 大型耐磨板型件液态模锻及其组织性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [2] 段琪影, 岳宏霖, 宋函珂, 等. 刮板输送机中部槽用高铬堆焊耐磨板的组织特征及滑动磨损性能[J]. 润滑与密封, 2022, 47(11): 114-123.
- [3] 张松, 车广东, 韩翔宇, 等. 化学成分及热处理工艺对高铬铸铁力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2023, 44(09): 837-842.
- [4] 蒋振峰, 李艳. 高铬铸铁叶片堆焊工艺研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(17): 195-203.
- [5] MA Y Q, QI Y H, XU X L, et al. Exploitation and Applications of Metastable Austenite Matrix Wear Resisting Alloys[J]. ACTA Metallurgica Sinica (English Letters), 1999, 12(5): 1206-1211.
- [6] 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, 27(4): 88-91.
- [7] 孙素珍, 张海岩. 碳化铬中铬含量分析方法的研究[J]. 当代化工研究, 2017(3): 32-133.

【基金项目】

陕西省创新能力支撑计划-国际科技合作基地“复合材料及其产品智能制造技术国际联合研究中心”(项目编号: 2023GHJD-18); 西安市科技计划项目“钛合金表面梯度TiC/Fe涂层制备关键技术研究”(项目编号: 22GXFU0069); 榆林市科技计划项目“纤维-多孔核壳结构柔性催化剂制备与光解水制氢装置研发”(项目编号: 2023-CXY-205)

【作者简介】

马朝(1982-), 男, 汉族, 陕西榆林人, 大专, 助理工程师, 研究方向: 金属耐磨材料及应用

【通信作者】

钟黎声(1984-), 男, 汉族, 陕西榆林人, 博士, 教授, 研究方向: 金属耐磨材料。