栗亚松，蔡金竹，贾晓明，等．高硬度耐磨堆焊焊条的研制[J]．广东化工，2024，51(15)：29-31．
DOI:10.3969/j.issn.1007-1865.2024.015.011.

高硬度耐磨堆焊焊条的研制

栗亚松，蔡金竹，贾晓明，陈昶坤，潘晓宇，翟梓械*
(佳木斯大学，黑龙江 佳木斯 154000)

[摘 要]本文为了研制具有高硬度和优良耐磨性能的手工焊条，设计了焊条药皮的配方，通过添加来源广泛、价廉经济的高碳铬铁和碳化硼以及少量的钒铁、钼铁、铌铁等合金粉末。采用多层堆焊技术对自主研制的 Fe-Cr-B-C 为主成分的焊条进行观察并讨论 Fe-Cr-B-C 等合金元素在焊缝中的组织形态和分布状态。用光学显微镜(OM)和 X 射线衍射(XRD)研究了堆焊层微观结构和相位。结果表明，此次研制的焊条在焊接过程中焊接性能较好，焊后无内部裂纹，脱渣性能较好，堆焊合金的组织主要为针状马氏体+Fe 和$(Fe,Cr)_3(B,C)$的共晶组织，堆焊层平均洛氏硬度可达 61.8 HRC，具有良好的耐磨性能。

[关键词]焊条；堆焊；Fe-Cr-B-C；高硬度
[中图分类号]TG455 [文献标识码]A [文章编号]1007-1865(2024)15-0029-03

Development of High Hardness and Endurance Stack Welding Rod

Li Yasong, Cai Jinzhu, Jia Xiaoming, Chen Changkun, Pan Xiaoyu, Zhai Ziyu*
(Jiamusi University, Jiamusi 154000, China)

Abstract: In order to develop the manual electrode with high hardness and excellent wear resistance, the formula of electrode medicine skin is designed by adding wide sources, cheap and economical high carbon iron chromium and boron carbide and a small amount of iron vanadium, iron molybdenum, iron niobium and other alloy powder. Multi-layer surwelding technology is used to observe the Fe-Cr-B-C and discuss the tissue pattern and distribution of Fe-Cr-B-C in the weld. The microstructure and phase of the stacking layer were studied by an optical microscope (OM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the welding rod developed this time has good welding performance, no internal cracks after welding, and the slag removal performance is good. The organization of the weld alloy is mainly needle martensite + Fe and (Fe, Cr) 3 (B, C), and the average Rockwell hardness of the weld layer can reach 61.8 HRC, which has good wear resistance.

Keywords: welding rod；overwelding；Fe-Cr-B-C；high hardness

1 研究目的和意义

随着现代工业技术的发展与进步，由磨料磨损带来的机械设备零部件失效日益严重，统计数据表明，摩擦、磨损造成的经济损失，大约占一个工业化高度发达的国家 GDP 的 1 %~2 %[1]，这大大降低了生产效率，严重还会危及人身安全。因此，开发耐磨材料，能降低材料损耗，保证设备安全生产，提高经济效益，本课题是研制高硬度耐磨堆焊焊条，这种焊条通过特殊的材料和工艺，能够在焊接区域形成一层高硬度的耐磨层，显著提升工件的耐磨性能，延长其使用寿命。高硬度耐磨堆焊焊条的研究还有助于推动焊接技术的发展，通过对这类焊条的研究，可以探索新的焊接材料、工艺和技术，促进焊接技术的创新和进步。

2 国内外研究现状

目前我国研究开发的堆焊金属根据化学成分和组织结构可分为铁基堆焊金属、镍基堆焊金属和钴基堆焊金属三大类，其中铁基堆焊金属的成本较低，硬度较高，耐磨性好[2]。机械设备及零部件中采用耐磨材料可以大大减少磨损，降低材料损耗，提高经济效益，根据零件的重要程度和经济价值可以采用局部耐磨设计，例如表面堆焊处理。因此，对堆焊焊条的研制是堆焊材料的重要基础，具有很重要的实际应用价值。

焊条的工艺性能评定主要包括有焊接电弧稳定性、焊缝成型性、各种空间位置焊接的适应性、脱渣性以及焊接飞溅情况等。在工业生产中较为重视的是焊缝脱渣性，脱渣性好的焊条清渣容易，焊缝质量高[3]。熔渣中 TiO_2 的含量是影响脱渣性的主要因素之一，栗卓新等人[4]研究了熔渣中 TiO_2/SiO_2 含量对脱渣性的影响，控制 TiO_2/SiO_2 在 6.0 左右时其脱渣性最好。孟工戈等人[5]对碱性焊条中的药皮辅料进行了研究，结果表明，金红石与钛白粉可以降低焊接烟尘，而氟化钡与萤石、金红石与萤石等会提高焊接烟尘。

国内外对耐磨堆焊合金的研制较多，对合金系的选择与研究也在不断创新，选用适合工程应用价值较高的合金系以及合理的堆焊技术具有重要较大的意义。焊条药皮一般都要加入 Mn、Si 等合金元素来除去焊接过程中的氧气，对堆焊合金的研制主要是在合金中添加一些合金元素(如 Cr、B 等)能够与碳形成显微硬度较高的合金碳化物，进而提高堆焊层的硬度与耐磨性[6]，进一步加入强碳化物形成元素，如 Nb、Ti 等形成 MC 型碳化物或基体组织韧化元素如 Ni、Mo 等以及稀土元素等在改善堆焊合金耐磨性的重要作用[7]。

3 研究内容

(1)本实验通过自主设计焊条药皮成分，添加价格适中的高碳铬铁和碳化硼以及少量的钒铁、钼铁、铌铁等合金粉末，对焊缝硬度、耐磨性进行了改进与研究，并讨论 Fe-Cr-B 等合金元素对于焊缝强度的影响。

(2)观察焊条成型性及焊后脱渣性，分析各合金元素对于焊接过程稳定性及焊接质量的影响。

(3)通过对堆焊之后的试样进行金相组织观察以及 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)物相分析，确定焊缝组织的生长方式，合金元素 Cr、B 等在焊缝中形成的组织和分布状态。

4 实验材料及方法

4.1 实验材料

4.1.1 基体材料

实验采用焊机设备为焊条压涂机、ZYH-60 自控远红外电焊条烘干炉、ZX7315GT 交流电焊机，Q-2A 型金相试样切割机，型号为 S1S-250 的砂轮机，HYM-1 型金相预磨机，PG-2C 型金相试样抛光机，奥林巴斯倒置金相显微镜 GX71，德国布鲁克 D-8 型 X 射线衍射仪，JSM-6360LV 型扫描电镜，HR-150A 洛氏硬度机，MH-VK 显微硬度测试仪。

实验所用的基体材料为 Q235 钢板，尺寸大小为 200 mm ×50 mm×10 mm。Q235 中的碳和其他合金元素含量较低，具有良好的塑性和韧性，产生焊接裂纹倾向小以及价格相对便宜等优点而受到广泛的应用。堆焊前需要用砂轮机对 Q235 钢板表面进行打磨处理，使其露出闪亮的金属光泽。

[收稿日期] 2024-01-10
[作者简介] 栗亚松(2002-)，男，河南濮阳人，大学本科，主要研究方向为焊接技术与工程。*为通讯作者。

4.1.2 焊芯材料

实验焊芯材料选用直径 3.2 mm 的 H08A，成分如表 1 所示。

表 1　H08A 主要成分

Tab.1　H08A Main components　　wt%

元素	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
含量	<0.01	<0.33	0.30~0.55	<0.03	<0.03	<0.3	<0.2	<0.2

4.1.3 焊条药皮配方

经过查阅文献，根据各合金元素基本用途，选用合适的焊条合金系和药皮渣系，最终确定焊条药皮配方如表 2 所示。

表 2　焊条药皮成分配比

Tab.2　Distribution ratio of electrode drug skin

药皮成分	质量/g	占比/%
高碳铬铁	39	19.5
碳化硼	20	10
钼铁	2	1
铌铁	0.2	0.1
钒铁	0.4	0.2
硅铁	30	15
锰铁	15	7.5
钛白粉	16.84	8.42
钛铁	8.4	4.2
金红石	14.08	8.04
大理石	22	11
萤石	10	5
石墨	8	4
云母	14.08	8.04
总计	200	100

各元素的主要作用：高碳铬铁，主要提供 Cr，形成 Cr_7C_3 型碳化物来提高堆焊金属的耐磨性；碳化硼，主要提供 B，形成硼铁、B_4C(碳化硼)等硬质相；钼铁，主要提供 Mo，增加韧性；铌铁，主要提供 Nb，提高冲击韧性；钒铁，主要提供 V，提高强度，改善韧性；硅铁、锰铁，主要提供 Si、Mn，进行除氧和提高抗拉强度；钛铁，提高熔敷效率；钛白粉，作为增塑剂、稀渣剂，提高韧性；大理石，作为稳弧剂、造气剂、造渣剂；萤石，作为造渣剂、稀渣剂；石墨，合金剂、除氧剂；金红石，造渣剂；云母，主要作用为防开裂、防飞溅。

本实验焊接药皮成分中，采用 Fe-Cr-B 系合金粉体为基体，焊条药皮主要成分是价格适中的高碳铬铁、碳化硼等[8]，M_7C_3 高铬铸铁成分范围内的主要碳化物，这些具有较高硬度的碳化物通常以弥散的形式分布于堆焊层中，提升堆焊层的耐磨性[9]，通过加入一定量的碳化硼和石墨，来形成 Fe_3C、Fe_3(C，B)和(Fe，Cr)(C，B)等硬质相，提高堆焊层硬度和耐磨性[10]，在本实验所述熔敷金属中含铬量范围内，加入 w(碳化硼)16 %~20 %和 w(石墨粉)3 %~9 %是较理想方案，能够使药皮具有较好的耐磨性能和抗剥离性能[11]。同时加入少量钼铁、铌铁和钒铁可以提高焊缝强度，改善焊缝质量。通过加入硅铁、锰铁进行脱氧达到合金化的目的。钛白粉作为增塑剂、稀渣剂，能够提高堆焊韧性，还能激发 Mo 的作用。加入少量铁粉是为了提高熔覆效率。此外加入必要的云母、金红石、大理石等作为焊条渣系。

4.2 实验方法

4.2.1 耐磨焊条的工艺

制作耐磨焊条的工艺流程如图 1 所示。根据本实验焊条药皮成分，称量各合金元素，搅拌混合均匀。随后，加入水玻璃研磨揉捏成团，保持一定的湿度。经焊条压涂机将研磨后的涂料均匀地覆盖到焊芯上，再将头部去除一部分药皮作为夹持部分，自然晾干 3~4 天。最后，将其放入烘干箱，设定烘干温度为 200 ℃，烘干时间 7 小时[12]，得到了实验所需的焊条。

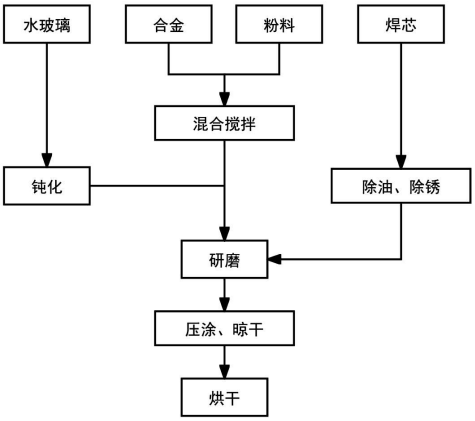


图 1　焊条制作工艺流程图

Fig.1　Flow chart of the electrode production process

4.2.2 实验试件的制备与观察

使用 ZX7315GT 交流电焊机进行三层单道堆积方式的焊接实验，堆焊工艺参数详见表 3。多层堆焊具有低热输入的特点，每一层焊道后续对前一层进行热处理，因此外表面焊缝对内表面焊缝的微观结构产生良好影响，特别是靠近熔合线的 HAZ(热影响区)，从而提高了焊接接头的韧性[13]。然而，由于合金含量较高，脱渣和成型性不是很好，每焊完一层后需要使用砂轮机进行打磨，以防止夹渣，确保焊缝表面的均匀性和光洁度。堆焊完成后，使用切割机将长板切割成小块试样，尺寸大小为 20 mm×15 mm×15 mm。接下来，进行金相制备，首先使用预磨机处理试样，然后使用砂纸进行打磨和抛光处理。抛光完成后，用酒精清洗试样，然后使用 4 %硝酸酒精腐蚀试样表面 5 秒，之后再次用酒精擦拭试样表面并吹干。最后，在显微镜下观察和拍摄制备好的金相试样。

表 3　堆焊工艺参数

Tab.3　Process parameters of unstacking welding

焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(mm·min^{-1})
108	25	25

4.2.3 XRD 实验

本实验需先将尺寸大小为 20 mm×15 mm×15 mm 的小块切割成 10 mm×5 mm×5 mm 的小样，并将堆焊层的上部打磨、抛光，然后采用德国布鲁克 D-8 型 X 射线衍射仪对堆焊合金进行物相定量分析。实验用铜靶 Kα 辐射，实验参数见表 4。

表 4　XRD 实验参数

Tab.4　Experimental parameters of XRD

加速电压/kV	扫描范围/°	步长/°	扫描 2θ 速度/(°·min^{-1})
40	30~90	0.04	2

4.2.4 SEM 实验

本实验需先将 10 mm×5 mm×5 mm 的小样堆焊层表面重新进行金相制备，使用砂纸进行打磨和抛光处理后用 4 %的硝酸酒精进行腐蚀，时长为 10 s~15 s，然后采用 JSM-6360LV 扫描电子显微镜(SEM)进行分析观察微观形貌。

4.2.5 洛氏硬度实验

本实验使用 HR-150A 型洛氏硬度机测量堆焊层的硬度。在堆焊层上等间距选取不同位置的 5 个点进行洛氏硬度值的测量，最后计算这些硬度值的算术平均值，以得出此件的宏观硬度值。

4.2.6 显微维氏硬度实验

本实验使用 MH-VK 显微硬度测试仪来测量堆焊层的显微组织硬度。在试验力为 1.961 N 下作用 10 s，随机选取位置不同的五个点，最后计算这些硬度值的算术平均值，以此作为该件的显微硬度值。

5 结果与讨论

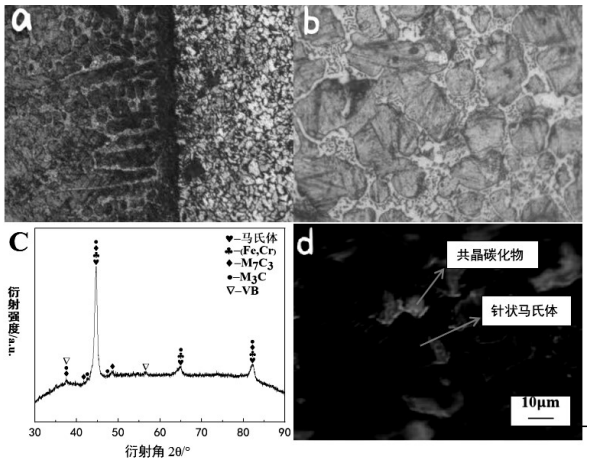
5.1 焊接工艺性分析

通过对本实验制作的 Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊焊条进行压制和堆焊处理，观察发现，在焊条外观成型方面，焊条在制作时出现断续和开裂现象，分析其原因可能为药皮配方中，高碳铬铁和碳化硼等合金粉的含量过高，粘结剂钠水玻璃和的防开裂的云母的量较少，压制过程速度不均匀导致。堆焊层表面有少量气泡，焊缝内部无气泡和无裂纹出现。

5.2 组织分析

图 2a 和 b 分别为熔合区，堆焊层(焊缝区)金相组织形貌，由图 2ab 可知，由于焊接时温度极高、冷却速度极快，导致焊缝组织以柱状晶的形式增长，又因为多层焊接，每一层对前一层起热处理作用，晶粒由柱状晶变为了等轴晶继续长大。

图 2c 和 d 分别为金属堆焊层的 XRD，堆焊合金 SEM 形貌，由图 2cd 可得，堆焊合金主要由马氏体、M_3C、M_7C_3、VB 和(Fe,Cr)五相构成。由金相组织和 SEM 形貌可以看出堆焊层为亚共析组织，焊缝中以针状马氏体和 Fe+$(Fe,Cr)_3(B,C)$共晶组织为基体。焊接时由于电弧热作用，熔池快速升温，随着焊条的移动，电弧移开，焊接热减少，在空冷条件下熔池开始快速凝固，温度迅速下降，当温度降到共晶线时，在初晶 γ-Fe 周围发生共晶转变 L→γ-Fe+共晶碳化物 M_3C 和 L→γ-Fe+共晶碳化物 M_7C_3，由于焊条药皮中 Cr 合金元素含量较多，共晶转变主要为 L→γ-Fe+共晶碳化物 M_3C，并且生成了少量的 M_7C_3。共晶碳化物 M_7C_3 中 M 为固溶大量 Cr 元素的基体 Fe 组织。合金元素 B 元素在 γ-Fe 中的溶解度极低，并且原子半径与 C 元素相近，形成的共晶碳化物中的部分 C 原子被 B 原子取代，形成富含 Cr，B 元素的$(Fe,Cr)_3(B,C)$，此外，钒会在高温情况下被 C 还原生成 V_2O_5，随着熔池冷却至 600 ℃以下时，会与碳化硼发生氧化反应生成 VB，但由于合金元素钒铁含量较少，最后生成少量的 VB。



(a)熔合区(200×)；(b)焊缝区(500×)；
(c)焊缝区的 XRD；(d)堆焊合金 SEM 形貌

图 2　熔合区和堆焊层下组织

Fig.2　Fusion zone and underlying weld layer

5.3 硬度分析

材料的硬度是评估其表面强度的重要指标，同时也与其耐磨性密切相关。本实验采用洛氏硬度测量堆焊层的宏观硬度，用维氏硬度测量堆焊层的显微硬度，选择堆焊层上等间距的不同位置进行了五个点的洛氏硬度测量，结果见表 5。选择堆焊层上随机的五个位置进行了维氏硬度测量，结果见表 6。堆焊层中的耐磨骨架和碳化物硬质相的硬度较高，而基体部分的硬度相对较低。因此，通过计算这些硬度值的平均值，能够较准确地反映整个堆焊层的宏观硬度。根据测量结果，堆焊层的平均洛氏硬度达到了 61.8 HRC，这表明该堆焊层在硬度方面具有较高的性能。堆焊层的平均维氏硬度达到了 900.6 HV，这表明共晶碳化物$(Fe，Cr)_3(B,C)$具有较高的硬度，可以显著提高堆焊层的耐磨性；

表 5　洛氏硬度值

Tab.5　Rockwell hardness values

组别	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	平均值
洛氏硬度值(HRC)	62.2	61.5	61.8	61.1	62.3	61.8

表 6　维氏硬度值

Tab.6　Vickers hardness values

组别	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	平均值
维氏硬度值(HV)	895.4	903.3	865.1	903.3	935.7	900.6

6 结论

(1) 堆焊层组织由较多弥散分布的碳化物颗粒$(Fe,Cr)_3(B,C)$，基体组织为针状马氏体，碳化物颗粒$(Fe,Cr)_3(B,C)$是硬质相，可以显著提高堆焊层的硬度和耐磨性，平均洛氏硬度值高达 61.8 HRC。

(2)焊条药皮成分添加有大量 C、Cr、B 元素和少量多元合金组成物(铌、钼、钒)，根据组织分析，内部组织均匀，无内部缺陷，表面有少量气孔。焊条药皮中加入大理石、金红石、萤石等对焊接过程中造渣、造气产生积极影响，但此次实验所用量较少，成型性上存在一定问题。

(3)本实验所用主要合金元素(高碳铬铁、碳化硼)材料来源广泛、价廉经济，所得焊条性价比较高。

参考文献

[1]阳俊龙．耐磨材料在涂层防护方面的研究进展[J]．化工技术与开发，2021，50(10)：47-51.
[2]许慧．新型堆焊焊条与耐磨堆焊层的组织性能研究[D]．山东科技大学，2012.
[3]张建．高硬度高抗裂性耐磨堆焊合金的研制[D]．合肥工业大学，2013.
[4]栗卓新，蒋建敏，魏琪．熔渣成分对气保护不锈钢药芯焊丝脱渣性影响的研究[J]．材料工程，2003，1：30-33.
[5]孟工戈，金龙浩，赵国华，等．新渣系碱性焊条发尘量及发尘速率[J]．焊接学报，2007，28(6)：77-80.
[6]SUMIT M，LOCHAN S，RAHUL C．Effect of CaO-CaF_2-SiO_2-Al_2O_3 Based Electrode Coating Constituents and their Interactions on the P22 Alloy SMAW Dissimilar Weld Metal delta Quantities[J]．Silicon，2022，14(18)：12315-27.
[7]谢卫平．钻杆用药芯焊丝堆焊合金耐磨性及机理研究[D]．南京航空航天大学，2023.
[8]龚建勋，李丹，肖逸锋，等．Fe-Cr-B-C 堆焊合金的显微组织及耐磨性[J]．材料热处理学报，2010，31(03)：136-141.
[9]黄海堂，陈登华，何曲波，等．铁基堆焊合金表面涂层耐磨性的研究进展[J]．功能材料，2023，54(11)：11106-11117.
[10]孙洪斌，王龙权，马振，等．Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊合金组织与性能[J]．焊接，2023(01)：43-49.
[11]韩明臻，闫玉东，延佳铭．Fe-Cr-B-C 耐磨堆焊焊条组织性能研究[J]．信息记录材料，2021，22(09)：34-36.
[12]廖禄泰，王海艳，宁嘉沛，等．碳化硼及石墨含量对中高铬系堆焊层性能的影响[J]．焊接技术，2019，48(07)：68-71+2.
[13]Fan JW，Luo J，Gao JJ，et al．Mechanical properties and microstructure of longitudinal submerged arc welded joint of a new C-Mn steel sheet cladding fine grained ferrite in surface layer for a long distance transport pipeline．Materials Research Express，2020，7(4)：046513.