

Cr 含量对 Fe-B-C 系耐磨合金堆焊层组织和硬度的影响

刘奇聪, 马振, 吕鹏, 刘冬梅, 庄明辉

(佳木斯大学, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要: 为了抑制高硼铁基耐磨堆焊合金硬质相 Fe_2B 内部的显微裂纹, 改善堆焊合金层的耐磨性能, 向 Fe-B-C 系耐磨堆焊合金中添加不同含量的 Cr, 研究 Cr 含量对堆焊层组织形貌、物相组成及硬度的影响。试验采用添加不同含量微碳铬铁粉的方式, 利用等离子粉末堆焊的工艺, 在 Q235 钢板上制备具有不同 Cr 含量的高硼铁基堆焊合金, 通过光学显微镜、XRD, SEM, EDS 及洛氏硬度等方法对耐磨堆焊层的组织形貌、物相组成及硬度进行了分析。研究表明, 未添加微碳铬铁粉时, 堆焊合金层由初晶 Fe_2B 相和共晶组织 $\alpha-Fe + Fe_3(C, B)$ 组成; 当微碳铬铁粉的添加量为 30% 时, 出现新的初晶相 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$; Cr 元素具有促使堆焊层组织硬质相 Fe_2B 析出的作用, 并且能有效抑制初晶 Fe_2B 相显微裂纹的产生; 堆焊层的硬度随 Cr 含量的增加而增加, 当微碳铬铁粉添加含量为 55% 时, 硬度高达到 65.5 HRC。

创新点: 设计了一种高硬度、高抗裂性的高硼铁基耐磨堆焊合金材料。阐明了堆焊合金组织的形成规律, 揭示了 Cr 对堆焊合金的改性机理。堆焊合金以麦穗状初晶相 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ 为耐磨骨架, 共晶组织 $\alpha-Fe + M_3(C, B)$ 为支撑相, 两者相互协调配合, 有效解决了高硼铁基耐磨堆焊合金的脆性过高的难题。

关键词: 等离子粉末堆焊; 显微组织; 显微裂纹; 硬度

中图分类号: TG455 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20211116001

Influence of Cr content on microstructure and hardness of Fe-B-C wear-resistant alloy surfacing layer

Liu Qicong, Ma Zhen, Lü Peng, Liu Dongmei, Zhuang Minghui

(Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to inhibit the microcracks in the hard phase Fe_2B of the high B Fe-based wear-resistant surfacing alloy and improve the wear resistance of the surfacing alloy layer, different content of Cr was added to the Fe-B-C based wear-resistant surfacing alloy to study influence of Cr content on morphology, phase composition and hardness of the surfacing layer. Method of adding different content of micro-carbon ferrochromium powder was adopted in the experiment, plasma powder surfacing process was used to prepare high-B Fe-based surfacing alloys with different Cr contents on the Q235 steel plate, and morphology, phase composition and hardness of the surfacing layer were analyzed through methods of optical microscope, XRD, SEM, EDS and Rockwell hardness. The results showed that the surfacing alloy layer was composed of primary Fe_2B phase and eutectic structure $\alpha-Fe + Fe_3(C, B)$ with no addition of micro-carbon ferrochrome powder, and new primary crystal phase $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ with 30% addition amount of micro-carbon ferrochromium powder. Cr element had effect of promoting precipitation of the hard phase Fe_2B in the surfacing layer, and could effectively inhibit generation of microcracks in the primary Fe_2B phase. Hardness of the surfacing layer increased with the increase of Cr content, which was as high as 65.5 HRC with 55% addition amount of micro-carbon ferrochromium powder.

Highlights: A kind of high B Fe-based wear-resistant surfacing alloy with high hardness and crack resistance was designed. The formation reg-

收稿日期: 2021-11-16 修改日期: 2021-12-08 录用日期: 2021-12-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020E025); 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(2019-KYYWF-1370)。

ularity of microstructure in surfacing alloy was clarified, and modification mechanism of Cr on surfacing alloy was revealed. In surfacing alloy, ear-like primary crystal phase $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ was wear-resistant skeleton and eutectic microstructure $\alpha-Fe + M_3$ (C, B) was the supporting phase. The problem of high brittleness of high B Fe-based surfacing alloys was effectively solved by coordination between the two phases.

Key words: plasma powder surfacing, microstructure, microcrack, hardness

0 前言

磨粒磨损是机械零部件磨损失效的常见形式,在零件表面制备一层高性能的耐磨涂层是解决该问题的有效手段之一。表面堆焊技术因能实现涂层与基体的冶金结合,且具有既快速又经济的优势,常用于失效零部件表面的修复或强化^[1-2]。含硼的铁基耐磨材料由于可以形成多种高硬度和高耐磨性的硬质相(Fe_2B , M_2B 和 M_3 (B, C)等)引起广泛的关注,但是由于粗大的硬质相具有很高的脆性,限制了含硼铁基耐磨材料在实际工程中的应用^[3-5]。为了解决堆焊合金组织的脆性问题,进一步提升耐磨性,进行了大量研究并取得了一定的成果。

Jian 等人^[6-7]研究了 Cr 添加量为 0% ~ 2.5% 的 Fe-3.0B-0.3C 合金的耐磨性及 Fe_2B 相的断裂韧性。Cr 主要分布在硼化物中, Fe_2B 的断裂韧性随 Cr 含量的增加先升高后降低,当 Cr 的含量达到 2.0% 时,断裂韧性最高 $4.704 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (提高约 9.1%)。周焯等人^[8]在 Fe-xCr-3.5B-0.1C ($x = 9, 12, 15, 20$, 质量分数, %) 药芯焊丝中加入不同含量的 Cr, 研究其对堆焊合金硼化物形貌及耐磨性能的影响。Cr 促使共晶硼化物硬质相的析出,随着 Cr 含量的增加,堆焊合金的硬

度和耐磨性呈现持续提高的趋势。Yi 等人^[9]在 Fe-1.0B-1.0Cr-0.3C-0.5Cu 合金添加了少量的 Ti, N, Ti 与 N 形成 TiN 相,成为异质形核的核心,有效细化奥氏体,促使硼化物细化。

目前,国内外对 Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊合金的研究成果有很多^[10-13],认为 Cr 元素可以促使硬质相 Fe_2B 的析出,增加堆焊合金的韧性,但 Cr 元素添加量通常不会超过 20%,大量添加 Cr 元素的研究报道相对较少。基于此,该作者采用等离子粉末堆焊的技术制备不同 Cr 含量的 Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊合金,研究高 Cr 含量的添加对高硼铁基耐磨堆焊合金组织结构、物相组成及硬度等方面的影响。

1 试验材料及方法

试验用基体材料为 Q235 钢板,尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,堆焊前用角磨机进行除锈处理。制备堆焊层所用合金粉体购自中信锦州金属股份有限公司,合金粉粒度为 $100 \mu\text{m}$,化学成分见表 1,碳化硼粉体购自牡丹江碳化硼有限公司,化学成分见表 2。为研究 Cr 元素对堆焊层组织的影响,试验设计等离子粉末堆焊用粉体配方见表 3。

表 1 合金粉体化学成分(质量分数,%)

合金粉体	B	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
硼铁粉	19.27	0.36	—	0.51	0.027	0.005	—	余量
低碳锰铁粉	—	0.61	80.73	1.31	0.174	0.017	—	余量
硅铁粉	—	0.02	—	72.40	0.034	0.016	—	余量
还原铁粉	—	0.05	0.40	0.15	0.025	0.030	—	余量
微碳铬铁粉	—	0.03	—	0.89	0.026	0.010	65.25	余量

表 2 碳化硼粉体的化学成分(质量分数,%)

B	C	B_4C	Fe_2O_3	B_2O_3
77.29	19.73	95.42	0.29	0.11

依据表 3 称取适量合金粉,经立式行星混料机(SFM-2,合肥科晶材料技术有限公司,合肥),充分混合

0.5 h,混合后置于远红外焊条烘箱(ZYH-60,佛山市奥焊机械科技有限公司,佛山)中 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 4 h 后使用。采用等离子喷焊专机(PTA-BX-400A,上海本希机电科技有限公司,上海)实施堆焊,堆焊所用的送粉气、离子气以保护气均为纯度为 99.9% 氩气,堆焊 4 层,每层厚度 $1 \sim 2 \text{ mm}$,堆焊工艺参数见表 4。

表3 试样合金粉配方设计表(质量分数,%)

编号	硼铁粉	B ₄ C 粉	低碳锰铁粉	硅铁粉	微碳铬铁粉	铁粉
1	19.7	5.0	3.0	1.1	0.0	余量
2	19.7	5.0	3.0	1.1	5.0	余量
3	19.7	5.0	3.0	1.1	30.0	余量
4	19.7	5.0	3.0	1.1	55.0	余量

表4 堆焊工艺参数

电弧电压 U/V	焊接电流 I/A	转盘转速 $v/(mm \cdot min^{-1})$	送粉量 $Q/(g \cdot min^{-1})$	离子气体流量 $q_1/(L \cdot min^{-1})$	保护气体流量 $q_2/(L \cdot min^{-1})$	送粉气体流量 $q_3/(L \cdot min^{-1})$	摆宽 H/mm	摆速 $v_1/(mm \cdot min^{-1})$
25	130	50	20	3	9	6	7.5	12

堆焊层物相组成采用 X-射线衍射仪(D8Advance, Bruker AXS, Germany), 具体测量参数为: CuK α , $\lambda = 0.154\ 06\ nm$, 工作电压 40 kV, 工作电流 30 mA, 步长 0.02° , 扫描速率 $2^\circ/min$, 扫描范围 $20^\circ \sim 90^\circ$; 堆焊合金组织形貌的观察, 试样采用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀, 利用倒置金相显微镜(Axio Observer, 德国卡尔蔡司公司, 德国) 选取典型的金相组织区域进行图像收集; 扫描电子显微镜(SEM, JSM-6360LV, JEOL, Japan) 下进一步观察组织形貌; 为研究各元素在堆焊合金组织中的分布情况, 采用 X-射线能谱仪(EDS; FALCON-60S, EDAX Inc., Mahwah, NJ) 进行微区组织成分分析; 试样力学性能分析采用 HR-150A 型洛氏硬度计, 用金刚石压头, 加载力 150 kg, 加载时间为 5 s, 恢复时间为 3 s, 每个试样测试 5 个点取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织分析

2.1.1 物相组成分析

不同 Cr 添加量堆焊合金层的 X 射线衍射图谱如图 1 所示。由图可知, 未添加 Cr 元素的 1 号试样物相由 α -Fe, Fe₂B 和 Fe₃C 相组成。加入 5% 的微碳铬铁粉后, Fe₂B 相衍射峰峰强增强, 并且 (121) 晶面衍射峰明显增强, 说明有较多的 Fe₂B 相在该晶面上参与衍射(见 2 号试样)。当微碳铬铁添加含量达到 30% 时, 硬质相 Fe₂B 的衍射峰有所加强, 同时有新相 Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9} 相析出, 但峰强较弱, 即堆焊合金层 Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9} 相体积分数较少(见 3 号试样); 当微碳铬铁添加含量达到 55% 时, Fe₂B 相衍射峰峰强降低, Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9} 相在 (311) 晶面和 (511) 晶面的衍射峰明显增强。即随着 Cr 元素含量的增加, Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9} 相体积分数呈现增加趋势。

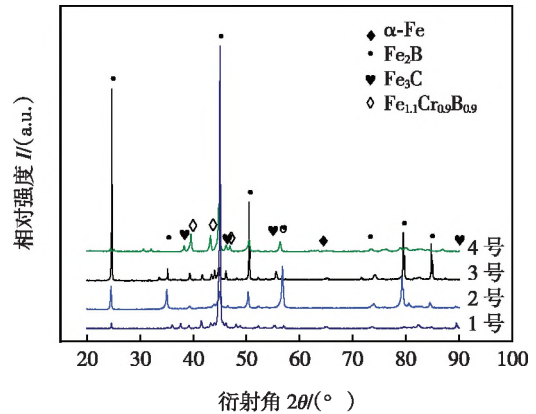


图1 不同 Cr 含量堆焊合金层 XRD 衍射图谱

2.1.2 显微组织分析

不同 Cr 添加量堆焊合金层金相组织如图 2 所示, 图 2a 为未添加 Cr 元素的 Fe-B-C 堆焊金相组织形貌。表 5 为不同 Cr 元素添加含量试样的相组成及形貌尺寸不同 Cr 含量堆焊合金 SEM 形貌如图 3 所示, 表 6 为不同区域元素含量。由图 2 可知, 堆焊层中含有大量长度约为 $20 \sim 50\ \mu m$ 浅灰色块状组织, 其宽度约为 $20 \sim 30\ \mu m$, 块状组织周围分布有大量的菊花状组织。结合 XRD(图 1)、微区成分分析(图 3a)和 Fe-B-C 三元合金相图^[14]分析可知, 块状组织成分中 B 元素和 Fe 元素含量较高, 显微硬度为 1 124 HV, 硬度较大, 推测该块状组织为初晶 Fe₂B 相; 菊花状组织在初晶 Fe₂B 相周围生成, 微区成分显示, 该区域 C, B 元素含量较高。菊花状组织与参考文献[3]中典型的共晶组织 Fe₃(C, B) + α -Fe 形貌完全相同, 根据 Nicholson 与金子秀夫的研究结果^[15], 在含硼的铁基合金中, 由于 B 与 C 的晶格常数类似, B 极易与 Fe₃C 中的 C 发生置换, 从而生成 Fe₃(C, B) 相。因此, 判断菊花状组织为共晶组织 α -Fe + Fe₃(C, B) 相。

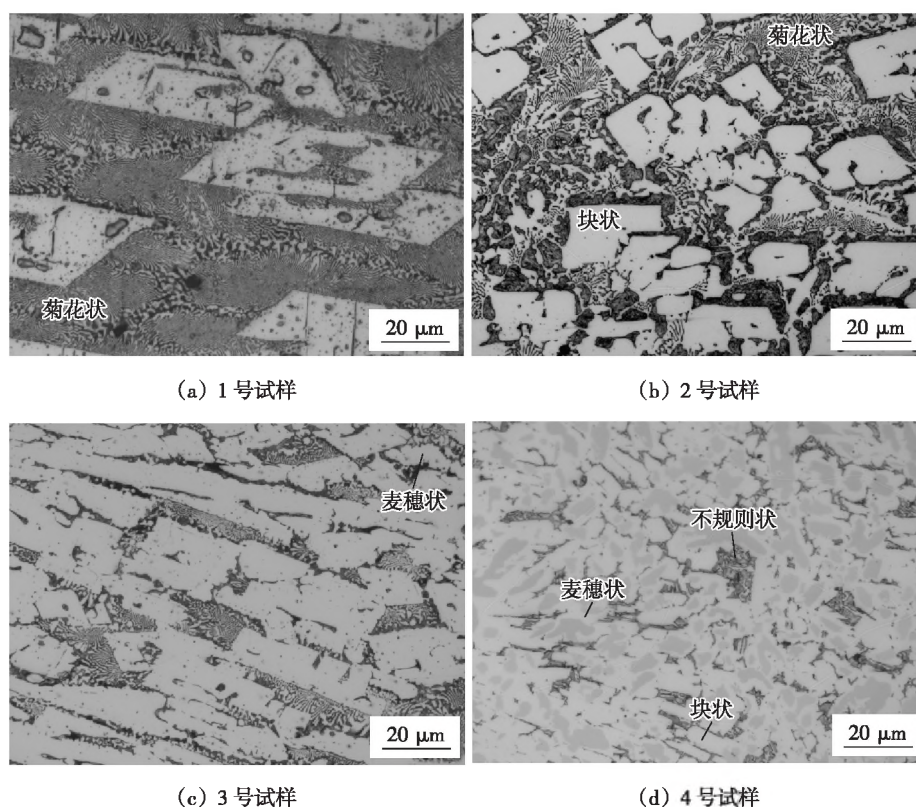


图2 不同 Cr 含量堆焊层金相图

表5 不同 Cr 元素添加含量试样的相组成及形貌尺寸

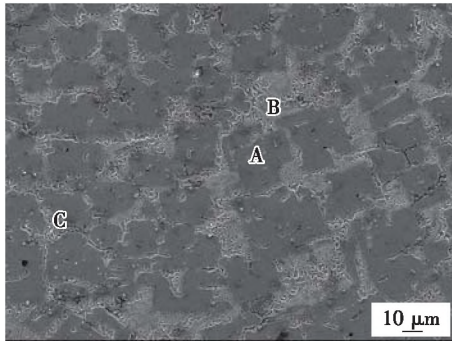
编号	相组成	相的形貌	初晶尺寸 $d/\mu\text{m}$
1	初晶: Fe_2B 共晶: $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$	棒状初晶组织 菊花状共晶组织	20 ~ 50
2	初晶: M_2B 共晶: $\alpha\text{-Fe} + \text{M}_3(\text{C}, \text{B})$	梯形、三角形块状初晶组织 菊花状共晶组织	20
3	初晶: M_2B 、 $\text{Fe}_{1.1}\text{Cr}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ (少量) 共晶: $\alpha\text{-Fe} + \text{M}_3(\text{C}, \text{B})$	块状、少量麦穗状初晶组织 菊花状和不规则状共晶组织	最小 10
4	初晶: M_2B (少量)、 $\text{Fe}_{1.1}\text{Cr}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ 共晶: $\alpha\text{-Fe} + \text{M}_3(\text{C}, \text{B})$	少量块状、麦穗状初晶组织 不规则状的共晶组织	10 ~ 20

图 2b 为微碳铬铁粉添加量为 5% 时的 2 号试样的金相组织形貌。初晶 Fe_2B 相的形貌向梯形和三角形的形貌转变, 长度与宽度有明显减小的趋势(长宽约为 $20\ \mu\text{m}$), 组织密集且数量增多, 而菊花状共晶组织几乎没有变化。分析认为, 由于 Cr 元素的添加, Cr 元素与体心立方晶格 Fe_2B 中 Fe 的原子尺寸相似, Cr 原子部分置换 Fe 原子, 形成了固溶体 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 相。Cr 元素的添加增加了 Fe_2B 的形核点, 促使了硬质相 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 的析出, $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 体积含量增多, 有限的空间抑制其尺

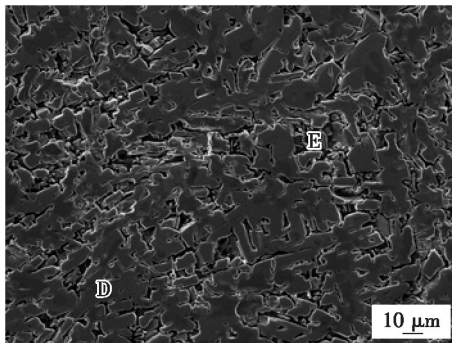
寸的增大, 导致尺寸变细小。

图 2c 为微碳铬铁粉添加含量为 30% 的 3 号试样的金相组织形貌。由图可知, 块状 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 组织宽度明显减小, 最小约为 $10\ \mu\text{m}$, 相对于未添加 Cr 元素和添加 5% 微碳铬铁粉的组织形貌, $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 相更密集, 并观察到有麦穗状新相析出, 在麦穗状物相周围有不规则的共晶组织出现。根据微区成分(见图 3a), 麦穗状的新相区域 B 元素和 Cr 元素的含量较高, 显微硬度为 $1\ 225\ \text{HV}$, 结合 XRD 衍射图谱分析, 推测该麦穗

状物相为 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ 相,但是含量较少,一部分 Cr 元素参与 $(Fe,Cr)_2B$ 相的生成,所得到的 XRD 衍射峰较少,峰强较低;初晶相的大量生长,占据了较多的有限空间,因此菊花状组织相对于 1 号试样和 2 号试样有所减少,由于微碳铬铁的加入,菊花状共晶组织为 $\alpha-Fe + M_3(C,B)$ 。



(a) 2 号试样



(b) 4 号试样

图 3 不同 Cr 含量堆焊合金 SEM 形貌

表 6 不同区域元素含量(质量分数,%)

区域	C	Cr	Mn	Fe
A	4.76	16.41	2.34	76.15
B	5.18	17.16	2.22	75.12
C	8.65	9.08	2.02	79.75
D	4.23	41.67	3.39	43.08
E	4.78	35.15	3.14	44.21

图 2d 为微碳铬铁粉添加含量为 55% 的 4 号试样的金相组织形貌。金相组织发生了明显的变化,初晶相组织中存在极少的块状和细条棒状的组织,大多为麦穗状组织,菊花状组织消失,共晶组织为不规则的形状,与 1 号、2 号和 3 号试样相比, $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ 相新的衍射峰更强。在焊接的快速冷却过程中,4 号试样中随着 Cr 的含量持续增加,初晶相优先生成了 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$

相,只有少量的 $(Fe,Cr)_2B$ 相生成,初晶 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ 相生成后,C 元素在初晶相周围富集,并且周围 B 元素含量较高,在其周围形成了 $\alpha-Fe + M_3(C,B)$ 的共晶组织。

综合以上分析,Cr 元素的添加影响 Fe-B-C 系耐磨堆焊合金的物相组成及组织形貌。少量微碳铬铁粉的加入促使初晶相 $(Fe,Cr)_2B$ 的体积分数的增多,且 Cr 有细化初晶相 $(Fe,Cr)_2B$ 的作用。当微碳铬铁粉的添加量达到并超过 30% 时,堆焊合金层有新相 $Fe_{1.1}Cr_{0.9}B_{0.9}$ 的析出,此相的体积分数随着微碳铬铁粉添加而增加。

2.1.3 显微裂纹分析

图 2a 中可以看到,在块状的 Fe_2B 组织上存在大量垂直并贯穿于该组织的显微裂纹。原因为 Fe_2B 初晶相的生长过程中, $Fe_3(C,B)$ 相在其表面析出,并以层片状的形式生长,层片状 $Fe_3(C,B)$ 相最终分布于初晶 Fe_2B 相内部,将其割裂。由于焊接为快速加热和冷却的过程,在组织内部产生了巨大的残余拉应力,渗碳体为脆硬的薄片状组织,导致在渗碳体部位发生断裂。因此,堆焊层组织中的残余拉应力和板条状 Fe_2B 组织内的渗碳体是引发显微裂纹的主要原因^[16-17]。随着微碳铬铁的加入,这种显微裂纹的量有明显减少,有学者认为 Cr 元素有增加初晶 Fe_2B 相韧性的作用,当 Cr 元素达到一定浓度,块状组织的韧性大于其断裂的脆性,这种裂纹的数量就会减少,当 Cr 达到一定含量时,这种裂纹就会消失;该文研究认为,Cr 在增加初晶 Fe_2B 相的韧性同时,与 Fe 发生置换反应,有一部分 Cr 与 Fe_2B 结合生成 $(Fe,Cr)_2B$ 或 $(Fe,Cr)_2(C,B)$ 相,组织晶格发生畸变,Cr 元素作为强碳化物,阻碍 $Fe_3(C,B)$ 在初晶 Fe_2B 相中析出, $Fe_3(C,B)$ 引发的脆硬断裂作用消失,裂纹因此消失。

2.2 硬度分析

图 4 为不同 Cr 元素添加含量所制备堆焊层的洛氏硬度。随着微碳铬铁粉添加量的不断增加,堆焊层的洛氏硬度呈上升趋势,添加 5% 微碳铬铁粉时洛氏硬度增加了 1.3 HRC,增加幅度最大,继续增加 Cr 元素的含量,洛氏硬度增加幅度逐渐减小,当微碳铬铁粉添加含量达到 55% 时,洛氏硬度达到最大值 65.5 HRC。因为添加微碳铬铁粉末后,金相组织中生成的 $(Fe,Cr)_2B$ 相尺寸变小,数目增多,共晶组织变少, $(Fe,Cr)_2B$ 相为硬质相,硬度大,共晶组织硬度小,所以硬度呈上升趋势;当微碳铬铁粉添加含量为 55% 时,大部分为初

晶 $\text{Fe}_{1.1}\text{C}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ 相,宏观硬度达到最大值,说明新生成的麦穗状组织 $\text{Fe}_{1.1}\text{Cr}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ 硬度同样较高。

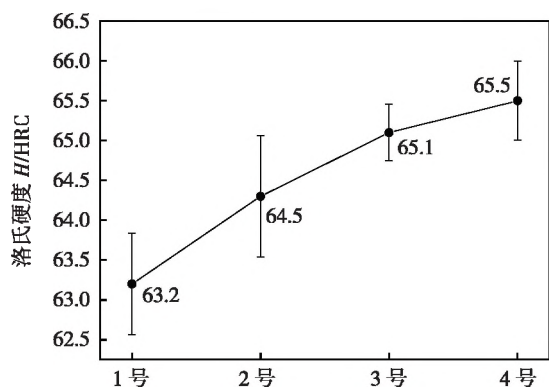


图4 不同 Cr 添加含量洛氏硬度值

3 结论

(1) 未添加 Cr 元素时,金相组织由初晶相 Fe_2B 和共晶组织 $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ 组成,随着 Cr 元素的添加出现新的初晶相 $\text{Fe}_{1.1}\text{Cr}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ 。

(2) 未添加 Cr 元素时,初晶 Fe_2B 的尺寸为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$,并且在 Fe_2B 组织上有垂直并贯穿于该组织的条状裂纹,随着 Cr 元素的添加,初晶 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 的体积分数增大,尺寸减小,约为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,该种显微裂纹消失,因此 Cr 元素有促使硬质相 Fe_2B 析出的作用并且能有效抑制 Fe_2B 组织上显微裂纹的产生。

(3) 堆焊层中未添加微碳铬铁粉时,洛氏硬度为 63.2 HRC,堆焊层的洛氏硬度随 Cr 元素的添加而增大,当微碳铬铁粉添加含量为 55% 时,宏观硬度达到 65.5 HRC。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘爱军, 王国平, 钟志宏, 等. CMT 堆焊低合金钢的组织性能及其冲击断裂行为[J]. 焊接, 2020(4): 11 - 15.
- [3] 庄明辉. 高硼铁基堆焊合金组织结构形成机理及耐磨性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2017.
- [4] 贾华, 刘政军, 李萌, 等. 自保护药芯焊丝明弧堆焊 Fe-Cr-C-B-W 合金的组织及性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(3): 86 - 90.
- [5] 贾华, 刘政军, 李萌, 等. 陶瓷硬质相对铁基复合材料组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 122 -

- 127.
- [6] Jian Y X, Huang Z F, Xing J D, et al. Effect of improving Fe_2B toughness by chromium addition on the two-body abrasive wear behavior of Fe-3.0wt% B cast alloy [J]. Tribology International, 2016, 101: 331 - 339.
- [7] Jian Y X, Huang Z F, Xing J D, et al. Investigation on two-body abrasive wear behavior and mechanism of Fe-3.0wt% B cast alloy with different content [J]. Wear, 2016, 362 - 363: 68 - 77.
- [8] 周焯, 王国红, 贺定勇, 等. 铬含量对 Fe-Cr-B 堆焊合金显微组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 88 - 92.
- [9] Yi D W, Xing J D, Zhang Z Y, et al. Effect of titanium and nitrogen additions on the microstructures and three-body abrasive wear behaviors of alloys [J]. Tribology Letters, 2014, 54(2): 107 - 117.
- [10] 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(3): 18 - 20.
- [11] 王智慧, 万国力, 贺定勇, 等. Fe-Cr-B-C 堆焊合金的组织与耐磨性[J]. 材料工程, 2014(9): 57 - 62.
- [12] 贾华, 李萌, 刘政军. 药芯焊丝明弧堆焊 Fe-Cr-C-B 合金组织及耐磨性[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 52 - 56.
- [13] 程诗尧, 龚建勋, 刘超, 等. Cr 对 Fe-B-C-Mn-Si 系堆焊合金的 M_2B 相及耐磨性影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(5): 80 - 85.
- [14] 苑振涛, 蒋业华, 冯晶. Fe-xCr-yB 高速钢铸态组织及力学性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(11): 53 - 58.
- [15] Kaneko H, Nishizawa T, Chiba A. Borides and carbides in the system Fe-B-C [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1966, 30(3): 263 - 269.
- [16] 龚建勋, 姚惠文, 程诗尧. FeCr15B2MnTi 明弧堆焊合金的组织及耐磨性[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(4): 82 - 86.
- [17] 郭连杰. 高碳高铬堆焊与堆焊层裂纹缺陷的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2014.

第一作者: 刘奇聪, 硕士研究生; 主要从事材料表面改性方面的研究; 1725990285@qq.com。

通信作者: 庄明辉, 博士, 副教授; 主要从事新型耐磨堆焊材料的研究; jmsdxzmh@163.com。

(编辑: 曲畅)