

B 含量对 Fe-Cr-C 系堆焊合金 组织结构及耐磨性的影响

刘一, 刘奇聪, 闫玉东, 韩卓芮, 庄明辉

(佳木斯大学材料科学与工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

[摘要] 为了进一步提高 Fe-Cr-C 系堆焊合金的耐磨性,采用等离子粉末堆焊技术,通过调整堆焊合金粉体中硼铁粉的添加量,在 Q235 钢表面制备不同 B 含量的 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金层,并采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)及磨粒磨损试验等分析测试方法,探究 B 添加量对 Fe-Cr-C 系堆焊合金组织结构、物相组成及耐磨性的影响。结果表明:当 B 添加量(以硼铁粉计,下同)为 0 时,堆焊合金的组织由树枝晶状 Fe 和菊花状 $(Fe, Cr)_7C_3+Fe$ 共晶组织组成。随着 B 添加量的增加,堆焊层中 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 硬质相的体积分数增加。 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 相的析出量达到一定值后,初晶 $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ 相生成。当 B 添加量为 20.0% 时, $(Fe, Cr)_2B$ 硬质相大量析出。堆焊层的硬度整体呈现上升-陡降-上升的趋势, B-10 试样的硬度达到 63.1 HRC。磨粒磨损试验结果显示,堆焊合金层耐磨性呈现上升-平缓-上升的趋势, B-20 试样的耐磨性增至 B-0 试样的 2.8 倍。

[关键词] Fe-Cr-C 合金; 等离子粉末堆焊; B 添加量; 组织结构; 耐磨性能

[中图分类号] TG455 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0167

[文章编号] 1001-1560(2024)07-0207-07

Effect of B Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Surfacing Alloy

LIU Yi, LIU Qicong, YAN Yudong, HAN Zhuorui, ZHUANG Minghui

(School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to further improve the wear resistance of Fe-Cr-C surfacing alloy, Fe-Cr-C wear-resistant surfacing alloy layers with different B addition amounts were prepared on the surface of Q235 steel by adjusting the amount of ferrobore powder added to the surfacing alloy powder using plasma powder surfacing technology. The effects of B addition amount on the microstructure, phase composition and wear resistance of Fe-Cr-C surfacing alloy were investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), abrasive wear tests and other analysis and testing methods. Results showed that when the addition amount of B was 0, the microstructure of the surfacing alloy was composed of dendritic Fe and chrysanthemum-like $(Fe, Cr)_7(C, B)_3+Fe$ eutectic structure. With the increase of B addition amount, the volume fraction of the $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ hard phase in the surfacing layer increased. After the precipitation amount of the $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ phase reached a certain value, the primary $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ phase was formed. When the B addition amount was 20.0% (mass fraction), a large amount of the $(Fe, Cr)_2B$ hard phase was precipitated. The hardness of the surfacing layer showed an overall trend of rising-steep drop-rising, and the hardness of the B-10 sample reached 63.1 HRC. The results of the abrasive wear test showed that the wear resistance of the surfacing alloy layer exhibited an trend of upward-flat-upward, and the wear resistance of the B-20 sample increased to 2.8 times that of the B-0 sample.

Key words: Fe-Cr-C alloy; plasma powder surfacing; B addition amount; organizational structure; wear resistance

收稿日期: 2024-01-11; 修订日期: 2024-03-19

Received: 2024-01-11; Revised: 2024-03-19

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310222117)

Funding: National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program(202310222117)

通信作者: 庄明辉(1976-), 博士, 副教授, 研究方向为金属材料表面改性, E-mail: jmsdxzmh@163.com

Corresponding Author: ZHUANG Minghui (1976-), Ph.D., Associate Professor, Research Focus: Surface Modification of Metal, E-mail: jmsdxzmh@163.com

0 前言

高耐磨堆焊材料在矿山、能源和机械等领域发挥着重要作用,不仅适应于严苛的环境要求,并且能够协调性能与成本之间的关系,对减少损耗、节约能源和提高工程机械效率具有显著意义^[1]。堆焊技术具有堆焊层硬度高、熔敷率高、操作简便和冶金结合等特点,是提高零部件耐磨性行之有效的方式之一。目前常用的耐磨堆焊材料有铁基合金、镍基合金和钴基合金等,其中铁基合金因其低廉的价格以及性能的可调控性而受到广泛关注^[2,3]。铁基合金中的 Fe-Cr-C 系堆焊合金以其突出的耐磨、耐热及耐蚀特性,已成为目前应用最广泛的硬面材料之一^[4]。

为进一步提升 Fe-Cr-C 系堆焊合金在工业应用中的价值,一方面可以通过不同的焊后热处理工艺来提升合金韧性^[5]。另一方面,在保证韧性不受过度影响的前提下,可通过优化基体成分,促使更多硬质相析出,从而有效降低成本^[6]。在现有研究中,调整 Fe-Cr-C 系堆焊合金中的成分比例或添加少量合金元素是提高性能的主要方式之一。刘政军等^[7]研究了不同 Cr 含量对 Fe-Cr-C-B 合金的影响,结果表明,随着 Cr 含量的增加,合金硬度和耐磨性逐渐提高,当 Cr 含量为 25% 时,硬度和耐磨性达到最佳值。魏炜等^[8]研究了不同 Fe/C 配比对 Fe-Cr-C 系合金的影响,结果表明,硬质相体积占比随 Fe/C 比例的降低而升高,最高可达 55.8%。当 Fe/C 配比为 4:1 时,合金的组织形态最佳。Yüksel 等^[9]研究了 B 元素添加后 Fe-Cr-C 系合金组织的变化,结果表明,合金中形成少量硼化物 Fe₂B,其在提升合金表面耐磨性方面的作用类似于过共晶 Fe-Cr-C 合金中的碳化物,充当重要的耐磨硬质相。

B 元素在我国资源丰富且价格相对较低,既可以促进碳化物的析出,提高碳化物体积分数,也可固溶到碳化物中,提高碳化物硬度和耐磨性^[10]。目前,国内外对 Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊合金的研究成果较多^[11-13],认为 B 元素在促使 (Fe, Cr)₇C₃ 硬质相析出的同时,可以形成 Fe₂B 硬质相。但是,其 B 的含量通常不会超过 2%,高 B 添加量的 Fe-Cr-C 系堆焊合金的研究鲜有报道。基于此,本工作采用等离子粉末堆焊技术制备不同 B 添加量的 Fe-Cr-B-C 系耐磨堆焊合金,探究高 B 添加量对 Fe-Cr-C 系堆焊合金的组织结构、物相组成及耐磨性等方面的影响。

1 试验

1.1 堆焊

采用尺寸为 150 mm×120 mm×10 mm 的 Q235 钢板作为耐磨堆焊基体材料。为确保良好的焊接质量,使用角磨机对钢板进行除锈处理,去除表面锈蚀和污染物。试验所用合金粉体化学成分见表 1 所示。为了制备不同 B 添加量的堆焊合金层,试验设计了 5 种等离子弧堆焊粉体配方(见表 2)。精确称取各合金粉末,通过 100 目筛筛选后,经 SFM-2 立式行星混料机充分混合 0.5 h。混合物置于 ZYH-60 远红外焊条烘箱中 150 ℃ 烘干 4 h 后,采用 PTA-BX-400A 等离子喷焊专机进行堆焊,选用纯度为 99.9% 的氩气作为送粉气、离子气和保护气。堆焊共分 4 层,每层厚度 1~2 mm。焊接电压 25 V,焊接电流 130 A,保护气流量 9 L/min,送粉气流量 6 L/min,送粉速度 20 g/min,摆宽 7.5 mm。

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
高碳铬铁粉	-	8.510	-	0.500	0.028	0.028	68.400	余量
硼铁粉	19.270	0.360	-	0.510	0.027	0.005	-	余量
低碳锰铁粉	-	0.600	80.560	1.100	0.166	0.010	-	余量
硅铁粉	-	0.020	-	72.400	0.034	0.016	-	余量
还原铁粉	-	0.050	0.400	0.150	0.025	0.030	-	余量

表 2 堆焊合金粉体成分设计(质量分数) %

编号	高碳铬铁粉	硼铁粉	硅铁粉	锰铁粉	还原铁粉
B-0	40.0	0	1.1	2.5	余量
B-5	40.0	5.0	1.1	2.5	余量
B-10	40.0	10.0	1.1	2.5	余量
B-15	40.0	15.0	1.1	2.5	余量
B-20	40.0	20.0	1.1	2.5	余量

1.2 测试分析

使用电火花线切割方式从堆焊合金层截取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,经磨削抛光后,采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀处理。对处理后的试样采用 D8Advance X 射线衍射仪(XRD)进行分析,并使用 Axio Observer 倒置金相显微镜及 JSM-6360LV 扫描电子显微镜(SEM)观察其组织结构和硬质相形态。采用 FALCON-60S X 射线能谱仪(EDS)分析堆焊层各处合

金元素的分布情况。

堆焊层硬度采用 HR-150A 洛氏硬度计测试, 加载 150 kg, 每个试样在 5 个不同位置进行测试, 取平均值。磨损试验采用 ML-100 磨粒磨损试验机, 原理如图 1 所示。试样尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 每个试样重复 3 次试验, 接触载荷设定为 24 N, 圆盘转速为 60 r/min, 进给量 4 mm/r, 行程 72.3 m, 对磨材料选用 180 目棕刚玉砂纸。一种成分堆焊层切取 3 个试样, 耐磨性试验重复至少 3 次。磨损失重采用 FA1104 型万分之一电子天平测定, 精度为 0.000 1 g。相对耐磨性为 $\varepsilon = 1/W$, 式中 ε 为相对耐磨性 (g^{-1}), W 为平均磨损失重 (g)。

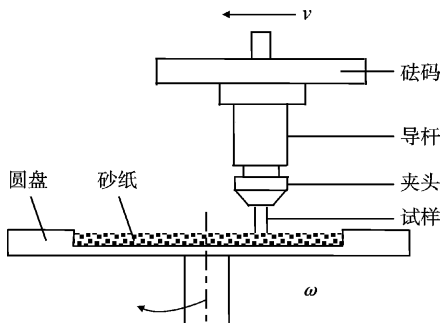


图 1 两体磨料磨损试验机示意^[14]

Fig. 1 Schematic diagram of two-body abrasive wear testing machine^[14]

2 结果与讨论

2.1 显微组织结构

不同 B 添加量堆焊层的 XRD 谱如图 2 所示。结

果显示, B-0 试样中体心立方结构的 Fe 在 (111) 晶面峰较强。随着 B 添加量的提高, Cr_7C_3 相衍射峰出现, 并逐渐增强。B-10 试样中 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相出现峰强较弱的衍射峰, B-15 试样中 Cr_7C_3 相和 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相的衍射峰分别在 (420) 和 (122) 晶面明显增强。B-20 试样中 Fe_2B 相在 (110) 和 (330) 晶面出现新的特征衍射峰, 由于 Fe_2B 的择优生长, 衍射峰峰强较强。已有的研究表明, Cr_7C_3 相和 Fe_2B 相在 Fe-Cr-B-C 系堆焊合金中通常以 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ 的形式存在^[14]。

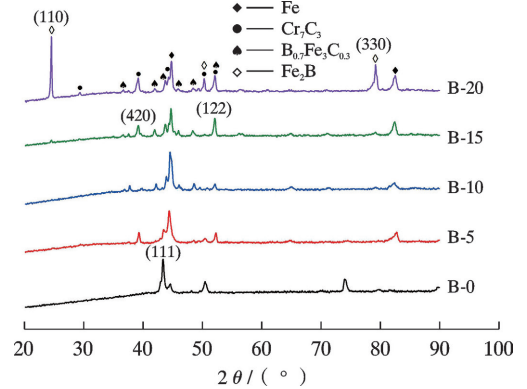


图 2 不同 B 添加量堆焊合金层的 XRD 谱

Fig. 2 XRD diffraction pattern of surfacing layer of surfacing alloy with different B additions

不同 B 添加量堆焊合金层的金相组织形貌如图 3 所示。图 3a 为 B-0 试样, 堆焊层为亚共晶组织, 凝固时首先析出初晶 $\gamma\text{-Fe}$, 初晶 $\gamma\text{-Fe}$ 生长为树枝晶形态, 随后冷却到室温转变为 $\alpha\text{-Fe}$ 固溶体。由于 B-0 试样中

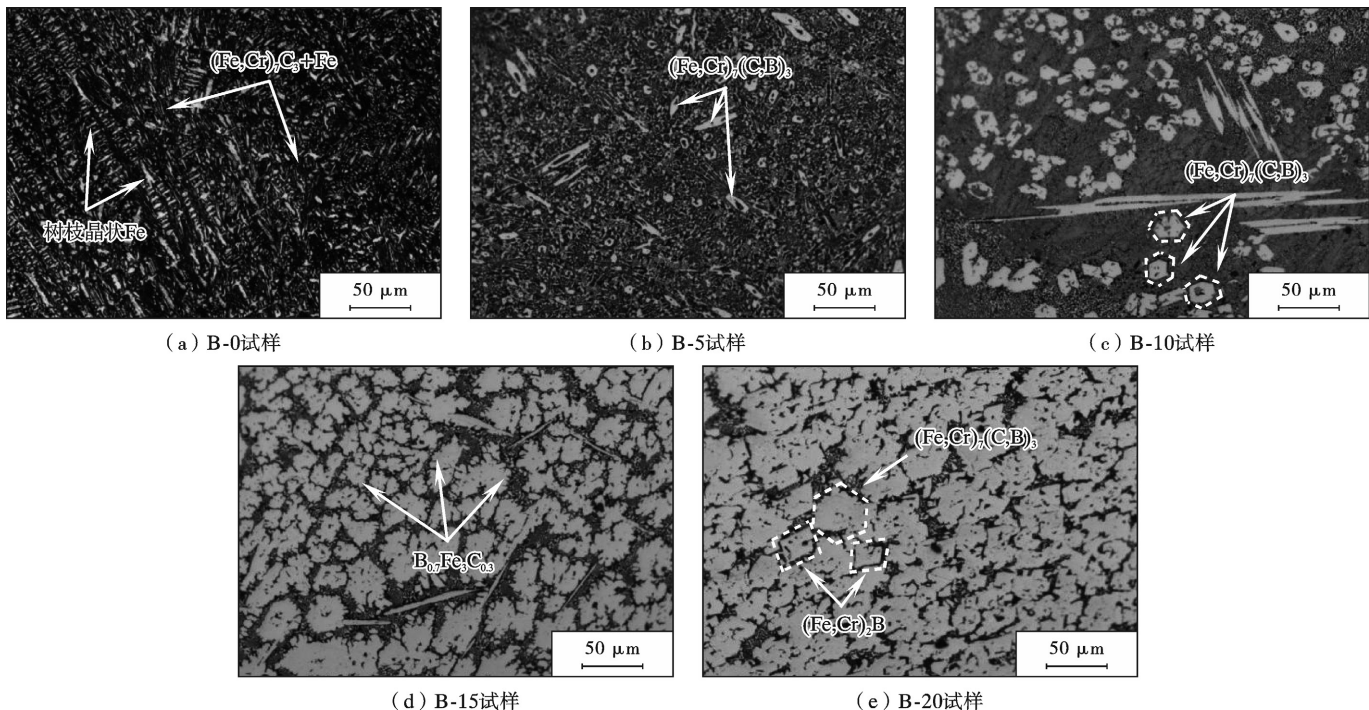


图 3 不同 B 添加量堆焊合金层的金相组织形貌

Fig. 3 Metallographic structure morphology of surfacing alloy layer with different B additions

Cr/C 值相对较低,未达到初晶 $(\text{Fe},\text{Cr})_7\text{C}_3$ 相的析出条件,此时的共晶组织由 $(\text{Fe},\text{Cr})_7\text{C}_3+\text{Fe}$ 组成。在B-5试样中,结合课题组已有的研究结果分析可知^[15,16],随着B添加量的增加,由于B与C的原子半径相近,部分B代替C促使初晶硬质相析出,细小的 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相出现。 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 是Fe-Cr-C-B系堆焊合金中主要的硬质相,可有效提高堆焊合金的硬度和耐磨性^[17]。

由图3b可观察到 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相由外向内生长,呈现空心状。图3c为B-10试样,通过Image Pro Plus软件计算硬质相的体积分数为24.13%, $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相的体积分数较B-5试样显著增大,多数 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相由空心转变为实心,少部分内部仍存在不规则孔洞或轮廓边缘存在豁口。由于此时B添加量较低,图中未见明显的 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相。继续增加B添加量,由于Cr含量一定, $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相的体积分数达到一定值后便不再继续增加,此时的B原子逐渐开始与 Fe_3C 结合形成共晶组织中的 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 。结合XRD结果分析,部分 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 可能由于B添加量的增加转变为初晶 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相,此时的共晶组织为

$\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})+\text{Fe}$ 。在B-20试样中,如图3e所示,B添加量达到初晶 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相的析出条件,共晶组织减少,棒状 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相析出,块状组织为 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相的横截面。

为了进一步确定组织组成和元素分布,对B-15、B-20试样进行SEM和EDS分析,结果分别见图4、图5所示。图4a中呈现典型菊花状形貌的共晶组织为 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})+\text{Fe}$ ^[16],图4b中硬质相呈现两相,其中一相被另一相所包裹。结合图5a EDS结果分析,被包围的相Cr元素分布较为集中,应为 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相。结合XRD分析包裹相,B添加量增加,B原子数量增多,将导致共晶组织中 $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ 与B原子结合生成新的含硼渗碳体 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 。由于初晶相周围B元素浓度较高,所以初晶相 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相包裹于 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相。图5a中有块状的硬质相析出,BSE结果呈现3种灰度,结合元素分布可知,其中颜色最深的组织为初晶 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相,次之的组织为 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相,最浅的组织为 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相。 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相体积分数相较于试样B-15没有显著变化,多数 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相依附于 $(\text{Fe},\text{Cr})_7(\text{C},\text{B})_3$ 相。

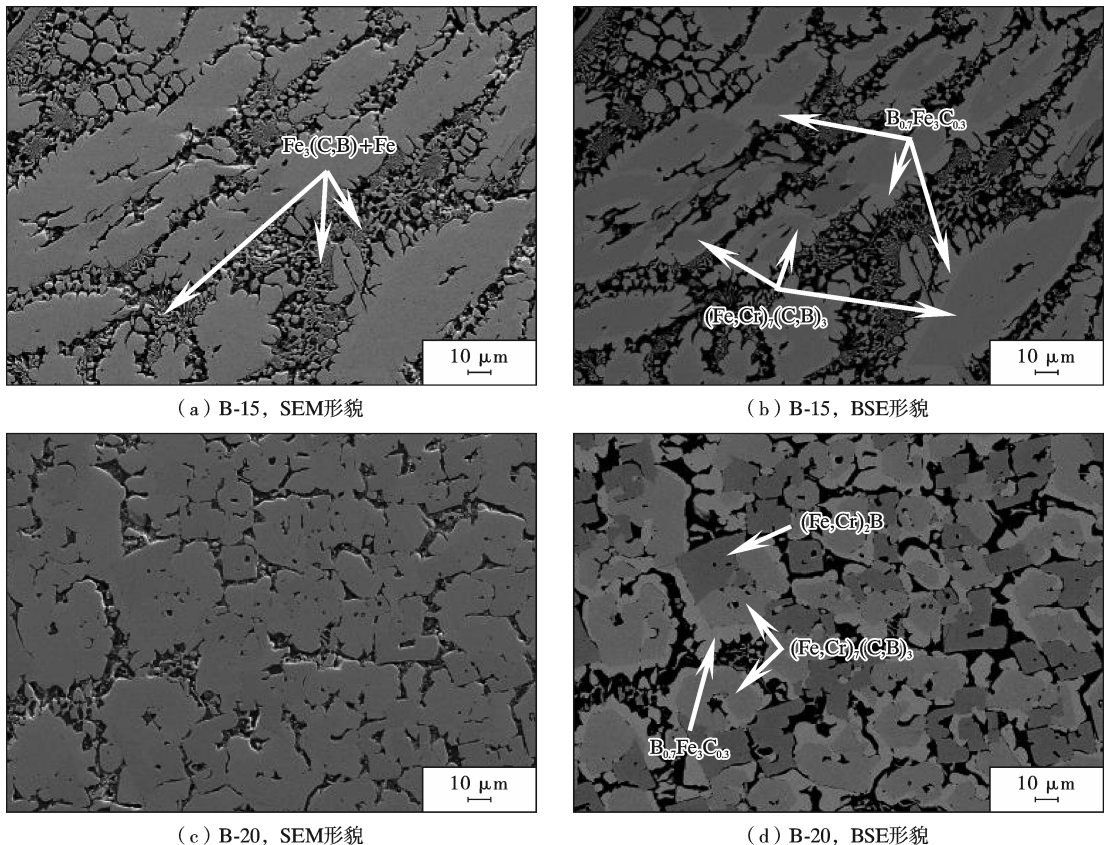
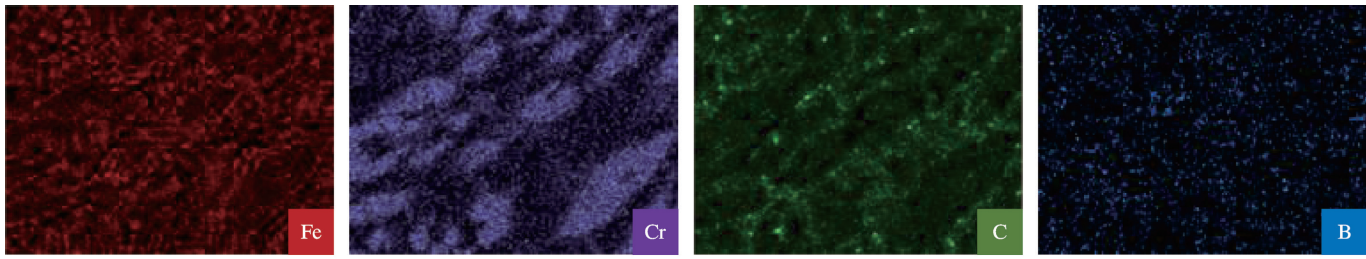
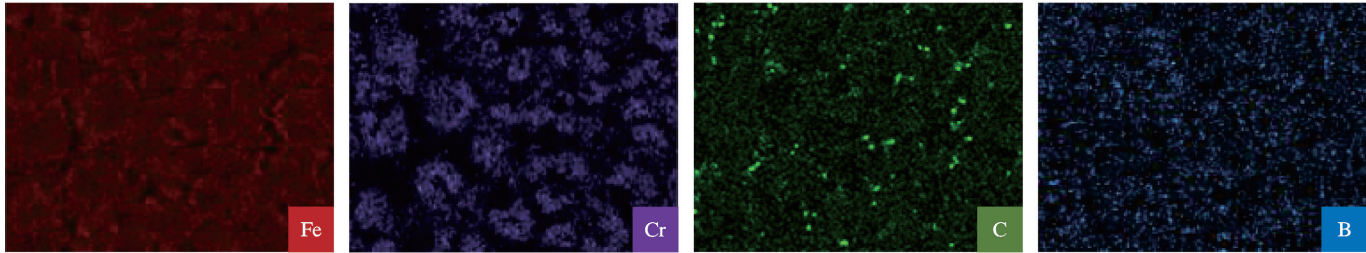


图4 试样B-15、B-20的组织形貌

Fig. 4 Microstructure of B-15 and B-20 samples



(a) B-15, EDS元素分布



(b) B-20, EDS元素分布

图5 试样 B-15、B-20 的 EDS 元素分布

Fig. 5 Element distribution of B-15 and B-20 samples

2.2 硬度与耐磨性

堆焊合金层的洛氏硬度值与磨损失重变化如图 6 所示。

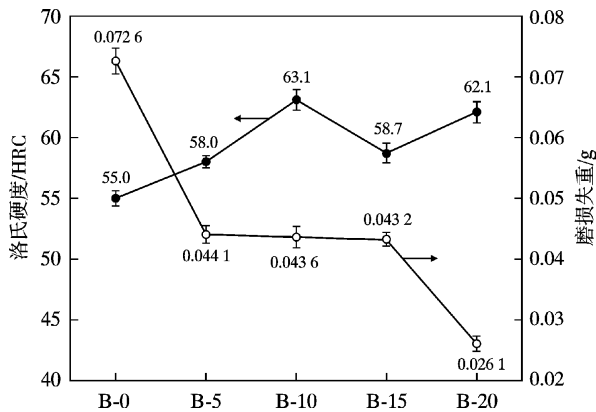


图6 堆焊合金层的洛氏硬度值与磨损失重

Fig. 6 Rockwell hardness value and wear loss weight of hardfacing alloy layer

图 3a B0 试样中的体心立方结构的 Fe 多以树枝晶形态生长,由于树枝晶组织的显微硬度较低,此时洛氏硬度值为 55.0 HRC。随着 B 添加量的增加(B-5), $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 硬质相体积分数增加,硬度值升高。由图 3c 可观察到, B-10 试样中多数 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 相由空心转变为实心,硬度达到 63.1 HRC。此后,堆焊合金中 B 添加量的增加,促使 $Fe_3(C, B)$ 向 $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ 转变。初晶 $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ 相的显微硬度低于共晶组织 $Fe_3(C, B)+Fe$,且由于 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 硬质相过度生长导致内部应力增大,致使堆焊合金硬度急剧降低。在 B-15 试样中,硬度降低至 58.7 HRC。B 添加量继续增加,共晶组织减少,初晶 $(Fe, Cr)_2B$ 相的硬度高于

$(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 相,硬度值恢复至 62.1 HRC(B-20)。

图 3a 中所示的亚共晶组织难以抵挡磨粒的压入,硬质相析出量较少,磨损失重为 0.0726 g。随着 B 添加量的增加, $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 相析出,耐磨性增加。B-5 试样中磨损失重为 0.0441 g,相较于 B 添加量为 0 时,耐磨性增至 1.6 倍。此后共晶组织 $Fe_3(C, B)+Fe$ 逐渐减少,初晶 $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ 相的体积分数增加,两者共同作用使得堆焊合金的耐磨趋势出现平台。当 B 添加量为 20.0% 时,计算得到硬质相体积分数由图 4b 中的 58.21% 增至图 4d 中的 73.49%,由于共晶组织的减少和 $(Fe, Cr)_2B$ 硬质相的大量析出,硬度和耐磨性得到增强, B-20 试样的磨损失重降低至 0.0261 g,相较于 B 添加量为 0 时,耐磨性增至 2.8 倍。

图 7 为不同 B 添加量堆焊合金磨损表面的 SEM 形貌。B-0 试样的磨损方式为多次塑变+微观切削^[11],且随着 B 添加量的增加,主要磨损方式逐渐由多次塑变向微观切削转变。当 B 添加量为 0 时,共晶组织是抵抗磨损的主要部分,犁沟边缘存在明显隆起,多次塑变的折痕相对明显。B 的加入使得磨损表面呈现出犁沟深度减小、宽度变窄的趋势,虽然对于提升堆焊合金的耐磨性具有正面影响,但达到一定量值时,磨损失重出现图 6 所示平台,犁沟的变化不再明显。随后堆焊合金中析出的大量棒状 $(Fe, Cr)_2B$ 相,粗大的 $(Fe, Cr)_2B$ 硬质相可有效保护共晶基体免受磨粒的损伤,并阻断磨粒的切削路径,磨粒压入深度变浅,耐磨性提高。试样 B-20 磨损表面的犁沟数量少、深度小,堆焊合金的耐磨性达到最佳。

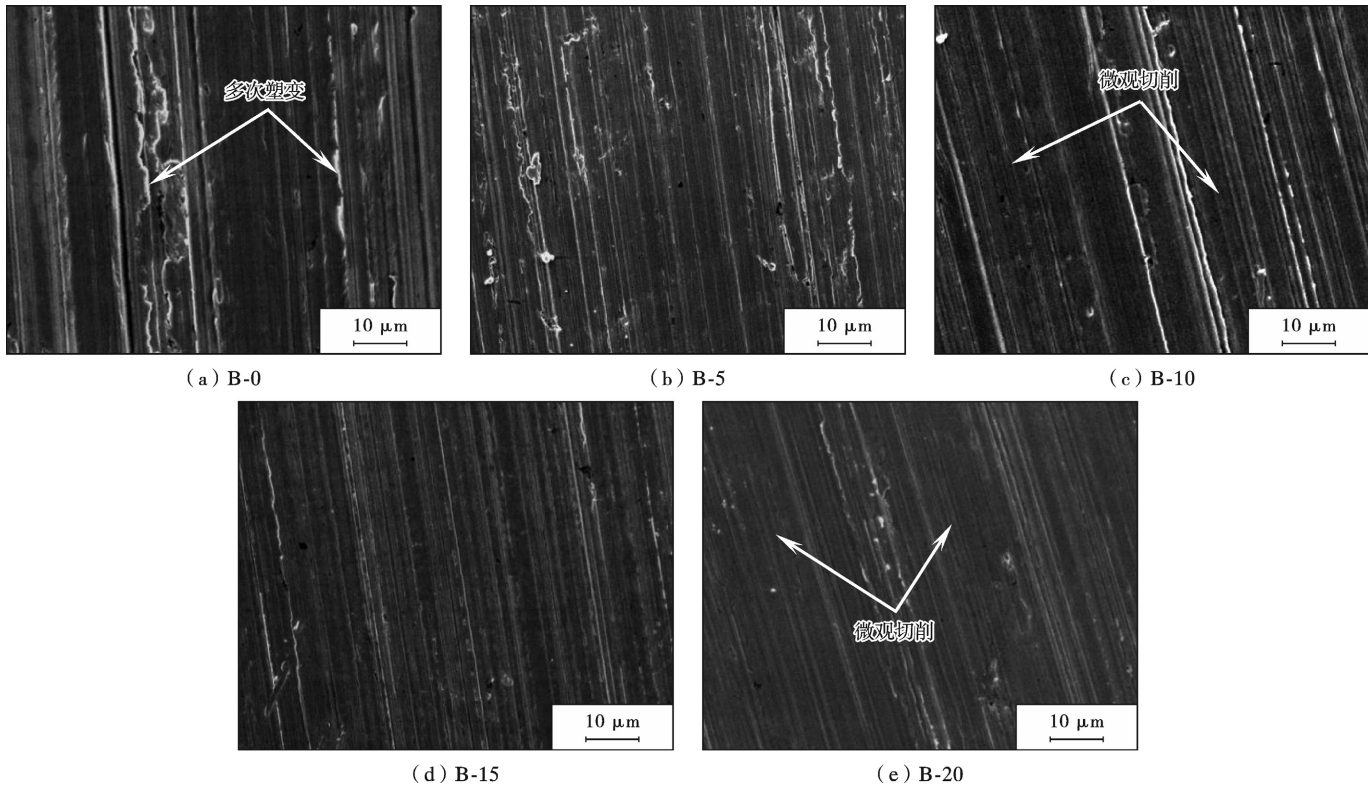


图7 不同B添加量堆焊合金磨损表面的SEM形貌

Fig. 7 SEM morphology of wear surface of surfacing alloy with different B additions

3 结论

(1)在B-0试样中,堆焊合金的组织主要由树枝晶状Fe和菊花状 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3+\text{Fe}$ 共晶组织组成。随着B添加量的增加, $(\text{Fe,Cr})_7(\text{C,B})_3$ 硬质相体积分数、尺寸增加,云朵状 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相和棒状 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ 相生成,云朵状 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相包裹于 $(\text{Fe,Cr})_7(\text{C,B})_3$ 相。

(2)在B-0试样中,洛氏硬度值为55.0 HRC。随着B添加量的增加,硬度呈现上升趋势,B-10试样的硬度值达到63.1 HRC。此后由于初晶 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相的生成,硬度降低,B-15试样降低至58.7 HRC。B添加量继续增加,共晶组织逐渐减少,初晶 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ 相大量析出,硬度值恢复至62.1 HRC。

(3)在B-0试样中,磨损失重为0.0726 g。随着B添加量增加,耐磨性提高。此后共晶组织 $\text{Fe}_3(\text{C,B})+\text{Fe}$ 减少,初晶 $\text{B}_{0.7}\text{Fe}_3\text{C}_{0.3}$ 相的体积分数增加,堆焊合金的耐磨趋势出现平台。当B添加量为20.0%时,初晶 $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ 相的析出使得堆焊合金的耐磨性达到最佳,磨损失重降低至0.0261 g,相较于B-0试样,耐磨性增至2.8倍。

[参 考 文 献]

[1] ZHUANG C L, LI S H, LIN Y H, et al. Effect of boron on microstructure evolution and properties of wear-resistant cast

Fe-Si-Mn-Cr-B alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5564-5576.

[2] 刘奇聪, 马 振, 吕 鹏, 等. Cr含量对Fe-B-C系耐磨合金堆焊层组织和硬度的影响[J]. 焊接, 2022(2): 26-31.

LIU Q C, MA Z, LU P, et al. Influence of Cr content on microstructure and hardness of Fe-B-C wear-resistant alloy surfacing layer [J]. Welding & Joining, 2022(2): 26-31.

[3] 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 Reports, 2012, 26(3): 96-100.

[4] 宋绪丁. 高硼铁基系列铸造耐磨合金研制及其应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.

SONG X D. Research on the Structures, Properties and Application of the High Boron Cast Wear-resistant Alloy [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.

[5] 贾连军. Fe-C-B-Cr-Nb系耐磨堆焊层的组织与性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.

JIA L J. Microstructures and Properties of Fe-C-B-Cr-Nb Hardfacing Layers [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[6] 孟媛媛, 任瑞晨, 张乾伟, 等. 耐磨堆焊合金材料的研究进展 [J]. 材料保护, 2016, 49(2): 55-57.

MENG Y Y, REN R C, ZHANG Q W, et al. Research progress of wear-resistant surfacing alloy materials [J]. Materi-

- als Protection, 2016, 49(2): 55-57.
- [7] 刘政军, 勾健, 贾华, 等. Fe-Cr-C-B 系药芯焊丝的显微组织与耐磨性[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(6): 618-622.
- LIU Z J, GOU J, JIA H, et al. Microstructures and wear resistance of Fe-Cr-C-B series flux-cored wire[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(6): 618-622.
- [8] 魏炜, 黄智泉, 杨威, 等. Fe/C 配比对等离子堆焊 Fe-Cr-C 合金组织及性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 37-42.
- WEI W, HUANG Z Q, YANG W, et al. Influence of Fe/C Ratio on Microstructure and Properties of Plasma Hardfacing of Fe-Cr-C Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 37-42.
- [9] Yüksel N, Şahin S. Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-B based hardfacing alloys[J]. Materials and Design, 2014, 58:491-498.
- [10] 勾俊峰. Fe-Cr-C-B 堆焊合金的纳米 CeO₂ 改性及机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- GOU J F. Modification and Its Mechanism of Nano Ceria on Fe-Cr-C-B Hardfacing alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [11] 线澜清, 庄明辉, 陈超, 等. 钼含量对 Fe-Cr-B 堆焊合金显微组织及耐磨性的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 64-68.
- XIAN L Q, ZHUANG M H, CHEN C, et al. Effect of Mo Content on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-B Surfacing Alloy[J]. Materials Protection, 2022, 55(10): 64-68.
- [12] ZHAUN M H, LI M Q, WANG J, et al. Study on Composition, Microstructure and Wear Behavior of Fe-B-C Wear-Resistant Surfacing Alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(12): 6182-6192.
- [13] 黄梦真, 王守忠, 王玉美. 焊后冷却方式对 Fe-Cr-C-B 堆焊合金强韧性的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 96-100.
- HUANG M Z, WANG S Z, WANG Y M. Effect of Cooling Modes after Welding on Strength and Toughness of Fe-Cr-C-B Surfacing Alloys[J]. Materials Protection, 2020, 53(8): 96-100.
- [14] 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, 2017.
- ZHUANG M H. Microstructure Formation Mechanism and Wear Resistance of High Boron Iron Base Surfacing Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] LIU Q C, LI X X, REN Y N, et al. Effect of different chromium contents on microstructure and two-body abrasive wear behavior of Fe-Mn-B surfacing alloys[J]. Materials Today Communications, 2023, 36:106707.
- [16] ZHAUNG M H, LI X X, MA Z, et al. Effect of vanadium alloying on microstructure and wear behavior of two-body abrasive particles of Fe-5.5wt.% B surfacing alloy[J]. Materials Today Communications, 2022, 33:104696.
- [17] MA Z, LI X X, LIAO P, et al. Microstructure and two-body abrasive wear behavior of Fe-B surfacing alloys with different chromium and vanadium contents[J]. Materials Today Communications, 2023, 34:105441.

[编校: 郑霞]

(上接第 180 页)

- [102] LIN L, LIU Z, ZHUANG W, et al. Effects of pre-strain on the surface residual stress and corrosion behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy plate[J]. Materials Characterization, 2020, 160:110129.
- [103] HAN N, ZHANG X, LIU S, et al. Effects of pre-stretching and ageing on the strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(10/11): 3714-3721.
- [104] YUAN D, CHEN K, CHEN S, et al. Effect of pre-strain and quench rate on stress corrosion cracking resistance of a low-Cu containing Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 833:142374.
- [105] 衡马俊, 刘妮娜. 金属材料表面处理技术在冶金工程中的应用研究[J]. 冶金管理, 2023(16): 109-112.
- HENG M J, LIU N N. Application of Surface Treatment Technology for Metallic Materials in Metallurgical Engineering[J]. Metallurgical Management, 2023(16): 109-112.
- [106] SU C H, CHEN T C, DING Y S, et al. Effects of Micro-Shot Peening on the Fatigue Strength of Anodized 7075-T6 Alloy[J]. Materials, 2023, 16(3): 1160.
- [107] ŽAGAR S, MRVAR P, GRUM J, et al. The Influence of Shot Peening and Artificially Ageing Aluminium Alloy 7075 on Corrosion Behaviour[J]. Materials, 2022, 15(9): 3094.
- [108] BAO L, LI K, ZHENG J Y, et al. Surface characteristics and stress corrosion behavior of AA 7075-T6 aluminum alloys after different shot peening processes[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 440:128481.
- [109] SUN Q, YANG M, JIANG Y, et al. Achieving excellent corrosion resistance properties of 7075 Al alloy via ultrasonic surface rolling treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 911:165009.

[编校: 范宏义]