

B₄C 加入量对 Fe-Cr-C-B 堆焊合金耐磨性的影响

吉文哲^a, 王守忠^b

(商丘职业技术学院 a. 汽车建筑工程系, b. 生物工程系, 河南 商丘 476005)

[摘要] 为了提高 Fe-Cr-C-B 堆焊合金的耐磨性, 采用自制的药芯焊丝和 CO₂ 气体保护焊法分别制备了 B₄C 加入量为 0~7.0% 的 Fe-Cr-C-B 系堆焊合金试样, 并采用金相显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、硬度计、光谱分析仪、磨损试验机等研究了 B₄C 加入量对其显微组织和耐磨性的影响规律。结果表明: 添加了 B₄C 的堆焊合金均由板条马氏体+残余奥氏体基体和初生 (Fe, Cr)₇(C, B)₃+共晶 (Fe, Cr)₃(C, B) 组成。初生硼碳化物的形状为不规则六边形, 共晶硼碳化物为粒状+针状。随着 B₄C 加入量的增加, 马氏体含量增加, 残余奥氏体含量减少, 晶粒细小化, 基体面积减少; 初生硼碳化物数量增加, 体积增大, 宏观硬度从 53 HRC 提高到 61 HRC, 耐磨性呈倒“√”型变化。当 B₄C 加入量为 5.6% 时, 堆焊合金的综合性能最佳, 硬度相对未加 B₄C 的提高了 6 HRC, 耐磨性提高了 36%。体积大小适中、分布较为均匀、尺寸较为细小、硬度较高的硬质相与强韧性较好的基体组织配合得当, 是其耐磨性提高的主要原因。

[关键词] B₄C; CO₂ 气体保护焊; Fe-Cr-C-B 堆焊合金; 耐磨性

[中图分类号] TG422.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-1560(2021)12-0064-08

The Effect of B₄C Addition Amount on Wear Resistance of Fe-Cr-C-B Surfacing Alloy

Ji Wen-zhe^a, Wang Shou-zhong^b

(a. Department of Automotive and Construction Engineering;

b. Department of Biological Engineering, Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476005, China)

Abstract: In order to improve the wear resistance of Fe-Cr-C-B surfacing alloy, the Fe-Cr-C-B surfacing alloy with B₄C contents (0~7.0%) was prepared by self-made flux cored wire and CO₂ gas shielded welding method. The effect of B₄C addition amount on its microstructure and wear resistance was studied by metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, hardness tester, spectrum analyzer and wear tester. Results showed that the B₄C-added surfacing alloy was composed of lath martensite, retained austenite matrix and primary (Fe, Cr)₇(C, B)₃+ eutectic (Fe, Cr)₃(C, B). The shape of the primary boron carbide was irregular hexagon, and the eutectic boron carbide was granular and needle-shaped. With the increase of the addition amount of B₄C, the content of martensite increased while the content of retained austenite decreased, the grain size was refined, and the matrix area decreased. The number of primary boron carbides increased, and the volume increased, and the macroscopic hardness increased from 53 HRC to 61 HRC, the abrasion resistance showed an inverted “√” type change. When the amount of B₄C was 5.6%, the overall performance of the surfacing alloy was the best, the hardness was increased by 6 HRC, relative to the absence of B₄C, and the wear resistance increased by 36%. The main reason for the improvement of wear resistance was that the hard phase with more moderate volume, more uniform distribution, smaller size and higher hardness was properly matched with the matrix structure with good strength and toughness.

Key words: B₄C; CO₂ gas shielded welding; Fe-Cr-C-B surfacing alloy; wear resistance

[收稿日期] 2021-06-25

[基金项目] 河南省高等职业学校青年骨干教师培养计划项目“新能源汽车智能空调控制系统应用研究”(2019GZGG107); 国家高等职业教育创新发展行动计划基金项目“校企共建的生产性实训基地建设”(XM-2)资助

[通信作者] 吉文哲(1983-), 副教授, 主要从事金属材料与焊接工艺技术方面的研究, 电话: 13623701269, E-mail: 13623701269@163.com

0 前言

Fe-Cr-C-B 系铁基堆焊合金因其具有硬度高、耐磨性好以及价格低廉等优点,常被用来再制造和修复因磨损而失效的零部件^[1]。这种堆焊合金的耐磨性主要以硬度高、热稳定性好的初生硼碳化物作为抗磨骨架,配合强韧性良好的基体来实现其较好的综合性能^[2,3]。该合金中硼、碳 2 种元素分别是决定硼化物数量和基体组织性能的重要合金元素^[4],特别是硼含量的高低对堆焊合金的耐磨性能起决定作用^[5,6]。然而,传统的 Fe-Cr-C-B 系药芯焊丝中硼元素的加入方式大多采用硼铁粉^[7,8],由于常用硼铁粉中的硼元素含量较低(4.0%~24.0%),为了增加硬质相硼碳化物的数量,提高堆焊合金的耐磨性,需要在药芯焊丝中加入大量的硼铁合金粉末,导致堆焊合金中铁的含量较高,从而对堆焊合金产生稀释作用,降低了堆焊合金中合金元素的利用率^[9],其研究结果不能真实地反映硼对堆焊合金组织和性能的影响。另外,由于硼铁粉的熔点较低(1 500 ℃左右),大量的加入到药芯中会降低药芯的熔化温度,导致其他高熔点的合金粉末(如石墨熔点 3 652 ℃)还未完全熔化就随熔滴进入熔池,致使焊缝中夹渣量增多,焊层成形性变差。

B₄C 是一种硬度很高的非金属硼碳化物,只含 B、C 2 种元素,容易制造而且造价相对低廉,熔点(2 450 ℃)高^[10],因此 Fe-Cr-C-B 系堆焊合金中的硼元素加入方式若以 B₄C 代替硼铁粉,不仅可以提高合金元素的利用率,而且还可以减少焊缝中夹渣量。再者,由于硼在铁基体中的固溶量很小(在 α-Fe 中溶解度<0.000 4%,在 γ-Fe 中溶解度<0.02%)^[11],故在 Fe-Cr-C-B 药芯焊丝中加入 B₄C 粉末,在焊接电弧高温作用下,分解出的硼和碳将大部分以硼化物或硼碳化物形式析出,硼化物或硼碳化物具有较高的硬度和热稳定性,是良好的耐磨相,有助于提高堆焊合金的耐磨性^[12,13]。

CO₂ 气体保护焊是以 CO₂ 气体为保护气体进行焊接的方法,具有焊接质量好、效率高、成本低以及操作简单等优点,适合自动焊和全方位焊接^[14],在焊接领域中的应用较为广泛。目前,有关 B₄C 加入量和 CO₂ 气体保护焊对 Fe-Cr-C-B 堆焊合金耐磨的影响研究鲜见报道。

鉴于上述原因,为了提高 Fe-Cr-B-C 堆焊合金的耐磨性,本工作将 B 合金元素以 B₄C 粉末形式加入药芯焊丝中,为防止 B 元素含量过高偏析于晶界,从而引起堆焊合金的脆硬倾向和产生裂纹的敏感性增大^[15],结合 Fe-Cr-C-B 堆焊合金系耐磨堆焊药芯焊丝与 CO₂

气体自保护堆焊的优势,探讨了 B₄C 加入量在 0~7.0% 的范围内对堆焊层组织和耐磨性能的影响规律。

1 试验

试验用基材为 Q235 钢,规格尺寸为 150 mm×150 mm×10 mm,焊前表面经除锈和除油处理,用丙酮清洗干燥后备用。经优化设计 Fe-Cr-C-B 药芯焊丝的主要化学成分和 B₄C 加入量如表 1 所示。

表 1 堆焊用合金粉体成分设计(质量分数)

元素	B ₄ C	C	Si	Mn	Cr	Fe
w/%	1.40~7.00	3.23	1.24	0.42	18.75	余量

采用锰铁粉(80.5%Mn)、硅铁粉(72.4%Si),高碳铬铁粉(60.6%Cr)、还原铁粉(98%Fe),石墨(99.5%C)为合金元素材料,0.5%CaF₂-0.2%Al₂O₃-0.3%CaO-3.0%Al 为渣系,包裹粉芯的外皮钢带为 H08A 碳素钢,应用 YHZ-1 型药芯焊丝成型机,采用轧-拔法分别制备 B₄C 加入量为 0~7.0%、6 种直径为 2.8 mm 的药芯焊丝,截取一小段焊丝测量其包粉率。通过反复试验,药芯焊丝包粉率达到 45%左右和药芯焊丝中合金元素的过渡系 0.30%~0.65%C、0.80%~0.90%Cr,0.30%~0.55%B 为佳。采用 NBC-630 型逆变式 CO₂ 气体保护焊机进行堆焊试验,经过多次调试后得到 CO₂ 气体保护焊的最佳工艺参数如表 2 所示。

表 2 堆焊工艺参数

工艺参数	电压/V	电流/A	速率/(cm·min ⁻¹)	焊丝伸长/cm	层间温度/℃	冷却方式
数值	26~27	295~325	25~30	25~30	100~150	空冷

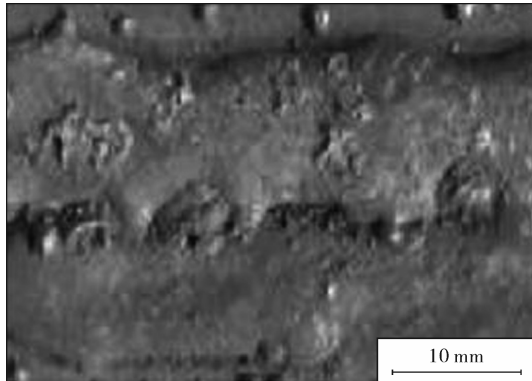
不同 B₄C 加入量试样堆焊层的厚度均大于 11 mm,将各堆焊合金磨去表面氧化皮和氧化渣后,喷涂显影液检测堆焊合金层裂纹情况。采用线切割法和水冷方式分别切取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 合金块作为微观组织观察和 X 射线衍射分析试样,尺寸为 56 mm×27 mm×11 mm 的磨损试样,经盐酸苦味酸酒精溶液(1 g 苦味酸+5 mL 盐酸+30 mL 70%乙醇+100 mL 蒸馏水,室温,8 s)腐蚀后,分别采用 ZEISS Axio Scope A1 型金相显微镜和 JSM-6700F 型扫描电子显微镜观察试样的微观组织;用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪进行物相分析;用 HR-150A 洛氏硬度计检测堆焊层的宏观硬度,用 HMV-2T 显微硬度计测定堆焊层截面和堆焊层各组织结构的显微硬度。用 ARL-3460 型直读光谱分析仪进行成分测定。采用 MLS-23 型橡胶轮式湿砂磨损试验机进行耐磨性测试,胶轮直径为 150 mm,转速

240 r/min,表面压力1.5 N, 试验砂浆成分为 1 500 g 石英砂(SiO_2)+1 000 g 水,石英砂粒度为 50~60 目,试验时间为 3 min。用 TG328A 分析天平称量试样磨损前、后的质量,用相对耐磨性来表征堆焊合金的耐磨性,试验结果均取 3 次测试的平均值。

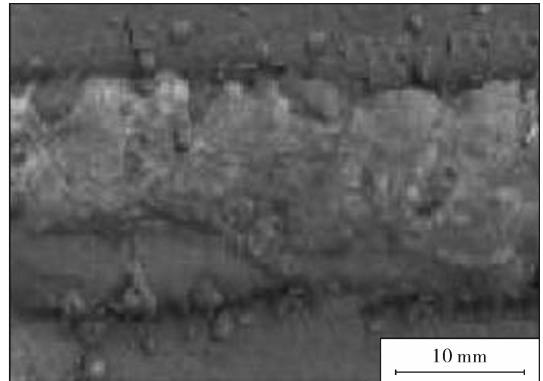
2 结果与分析

2.1 B_4C 添加量对焊接工艺性能的影响

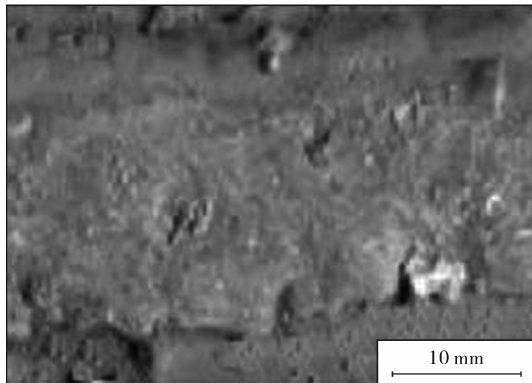
不同 B_4C 加入量的 Fe-Cr-C-B 堆焊试样的典型宏



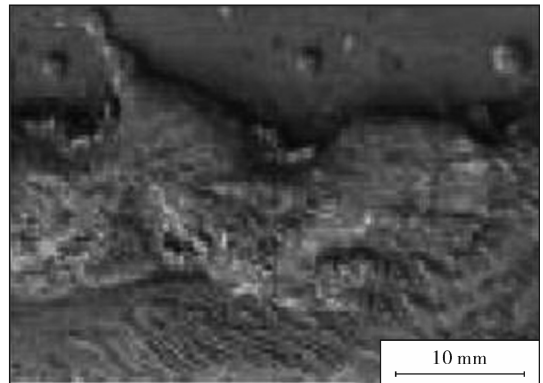
(a) 0 B_4C



(b) 1.4% B_4C



(c) 5.6% B_4C



(d) 7.0% B_4C

图 1 不同 B_4C 添加量的堆焊合金的表面形貌

由试验结果分析认为,由于 B_4C 的相对密度较低,导热率高,在熔池对流时易于上浮,堆焊时在焊接电弧高温作用下易于分解为 B、C 2 种元素,其中分解的 B 原子能够细化熔滴,增强电弧稳定性,减少焊接飞溅、烟尘和残渣量;分解的 C 原子能与氧相互作用,改善焊丝的自保护效果,减少其他合金元素的氧化烧损。因此,随着 B_4C 加入量的增加焊接工艺性能逐渐改善。但当 B_4C 加入量过多时,堆焊合金中 B、C 含量过高,过多的 B 会形成更多的硼碳化物分布在晶界处,严重割裂分化基体,导致堆焊合金韧性不足,裂纹的敏感性增大;过多的 C 使焊缝中碳含量升高,加剧裂纹的产生,同时还会增加焊接区域的还原气氛,产生大量气体,增大熔滴过渡的驱动力,致使熔滴在过渡过程中容易爆

观形貌如图 1 所示。从图 1 可见,当 B_4C 的加入量为 0 时,堆焊层表面存在大量氧化皮,且焊缝表面残渣多,飞溅较大,成型性差,局部还有少量孔洞。当 B_4C 的加入量为 1.4% 时,堆焊层表面氧化皮数量减少,飞溅和残渣量均有所减少,孔洞消失;当 B_4C 的添加量为 5.6% 时,焊接工艺性能达到最佳,但焊缝中有少量的微裂纹产生。当 B_4C 的添加量增加到 7.0% 时,焊缝中纵横裂纹的数量明显增多,焊缝成型明显变差,飞溅量又有所增大。

炸而产生飞溅,导致堆焊层焊接工艺性能下降。因此,Fe-Cr-C-B 堆焊合金中 B_4C 的加入量以不超过 5.6% 为宜。

2.2 B_4C 加入量对堆焊合金成分的影响

通过对不同 B_4C 加入量的堆焊合金上表面区域进行成分测定,其主要合金成分测试结果如表 3 所示。由表 3 可知,随着药芯焊丝中 B_4C 加入量的增加,堆焊合金中 B、C 含量逐渐增加,其余合金元素含量基本不变。文献[16~18]研究表明,合金元素能够改变基体组织和硬质相的数量、形态、尺寸和分布。因此,在堆焊工艺参数一定的试验条件下,随着 B_4C 加入量的增加,合金成分的改变必然会对堆焊合金组织性能带来一定的影响。

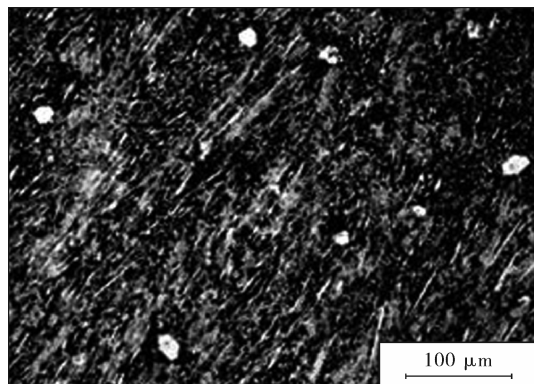
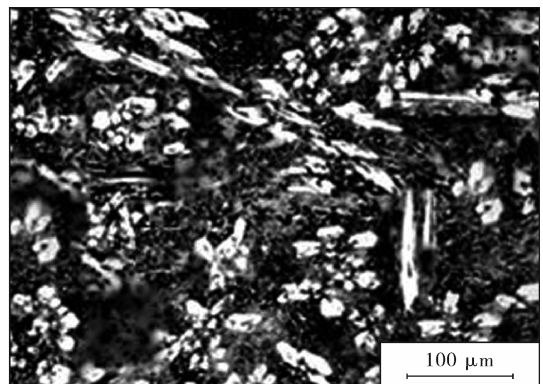
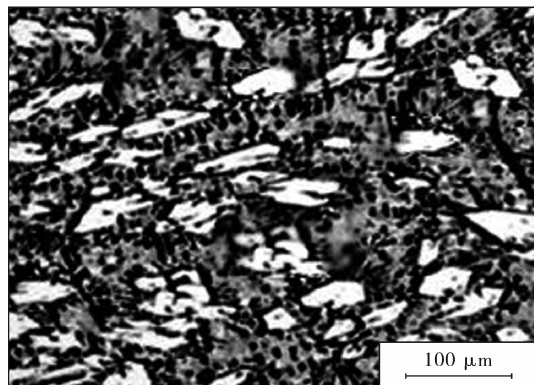
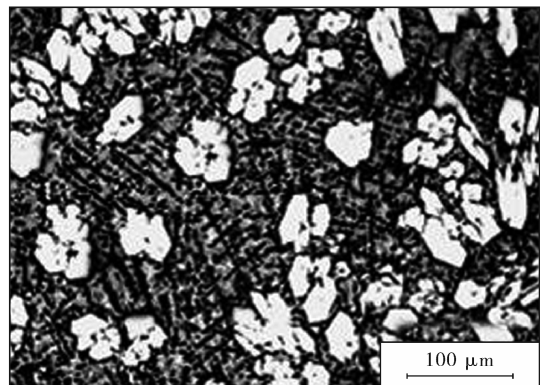
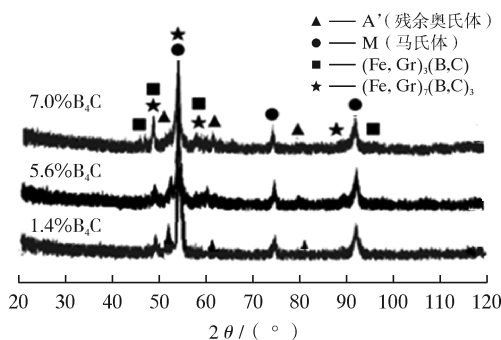
表3 不同 B_4C 加入量的堆焊层化学成分(质量分数) %

$w(B_4C)/\%$	Cr	Mn	Si	C	B
0	18.72	0.42	1.22	3.18	0
1.4	19.04	0.43	1.29	3.37	0.14
2.8	19.41	0.45	1.34	3.46	0.21
4.2	18.48	0.41	1.21	3.61	0.23
5.6	18.47	0.39	1.16	4.18	0.30
7.0	18.46	0.38	1.17	4.66	0.38

2.3 B_4C 加入量对堆焊合金显微组织的影响

不同 B_4C 加入量的 Fe-Cr-C-B 堆焊试样上部的典型显微组织如图 2 所示,其 XRD 物相测定结果如图 3 所示。由图 2 可见,不同 B_4C 添加量的堆焊合金层均

由灰黑色的基体组织和白色硬质相组成,白色硬质相的形状为不规则六边形、针状和颗粒状等。将试样的衍射谱与标准 PDF 卡片进行对比可知,灰黑色的基体组织主要由残余奥氏体+马氏体组成;不规则六边形主要是初生 $(Fe, Cr)_7C_3$ 、 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ 型化合物,针状和颗粒状白色组织为其共晶组织 $(Fe, Cr)_3(C, B)$ 。当 B_4C 的加入量为 0 时,初生碳化物为尺寸较小的规则六边形,数量较少。当 B_4C 加入量在 1.4%~7.0% 范围内逐渐增大时,堆焊金属内初生碳化物析出数量逐渐增多,体积增大,分布均匀性提高;残余奥氏体含量减少,马氏体含量增加,基体面积不断减少,尺寸细小化。药粉中 B 元素以 B_4C 的形式添加,但图 3 中并未检测到其衍射峰,说明 B_4C 在电弧的高温作用下都已经发生分解。

(a) 0 B_4C (b) 1.4% B_4C (c) 5.6% B_4C (d) 7.0% B_4C 图2 不同 B_4C 加入量的堆焊层的微观组织形貌图3 不同 B_4C 加入量的堆焊层的 XRD 谱

由试验结果分析认为,随着 B_4C 加入量的增加,堆焊合金中的 B、C 含量逐渐提高, B、C 固溶于熔体中,增加了熔体结晶时的过冷度,提高了形核率,有利于促进马氏体和硼碳化物的生成,并细化堆焊合金组织,由于马氏体转变的不完全性,少量未转变的奥氏体将残留在基体组织中^[19,20],所以,随着 B_4C 加入量的增加,马氏体和硬质相的含量增加,残余奥氏体不断减少,基体尺寸细小化,硼碳化物的分布均匀性提高。C 能扩大奥氏体区,可使堆焊合金共晶点右移;B 元素能缩小奥

氏体区,可使堆焊合金的共晶点左移。B、C 的共同作用,将使得堆焊合金组分远偏离于共晶区,因此,堆焊合金冷却时,析出的初生硼碳化物数量就多,共晶体组织和基体组织所占的比例相应地减少。先析出的初生硼碳化物在高温停留时间长,生长周期长,易于长大甚至聚集在一起,因此,初生的硼碳化物体积增大。随着温度的降低,初生硼碳化物不断长大,周围液相中 B、C 含量不断降低,其他液相中的 B、C 向初生的硼碳化物奥氏体晶界扩散,接近共晶点成分时,由于奥氏体的晶界能低^[21],当含硼量达到共晶点成分时, $(Fe, Cr)_3(C, B)$ 相沿晶界析出,分布在初生硼碳化物周围,形成上述组织结构。

为了清晰地显示堆焊层各组织结构形貌,测试其力学性能,对添加 5.6%B₄C 的堆焊层的显微组织进行了较深腐蚀,经深腐蚀后的形貌如图 4 所示。由图 4 可见,初生 M₇C₃ 型硼碳化物为不规则六边形块状,内部存在空洞,右边有明显的微裂纹,经测试其平均硬度约为 1 370 HV。粗大初生硼碳化物嵌入基体较深,不易脱落,且显微硬度高,既可有效抵抗磨粒压入,又阻碍磨粒的显微切削运动。共晶硼碳化物为粒状+针状,分布在不规则的六边形周围,其平均硬度约为 1 140 HV。粒状的共晶硼碳化物弥散分布在基体中,对基体产生弥散强化作用,弯曲的针状共晶硼碳化物钉扎在基体中,与粗大的初生硼碳化物联合作用构筑成耐磨骨架;基体组织中的马氏体呈板条束状排列,且板条束近似平行,经测试其平均硬度约为 560 HV。板条状马氏体相对于片状或针状马氏体具有良好的强韧性^[22],可为硬质相提供有效的支撑和包裹作用,有利于提高堆焊层的耐磨性。

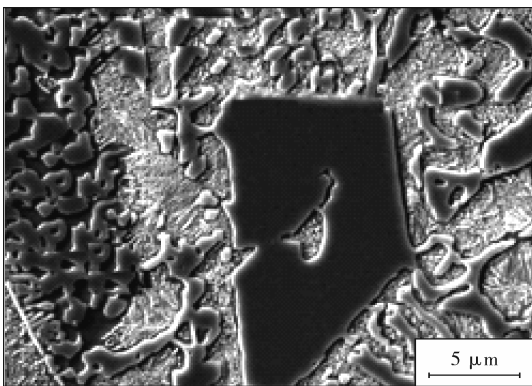


图 4 堆焊层组织结构形貌

经研究分析认为,不规则六边形内部空洞主要是堆焊合金冷却较快而呈不平衡性凝固,堆焊合金内部产生较大的内应力造成的^[23]。空洞的存在,可释放初生硼碳化物的内应力,降低其脆性,从而在一定程度上

减少了磨损时的断裂或剥落,有利于堆焊合金耐磨性的提高,而由于微裂纹的存在,磨损时会加剧初生硼碳化物的断裂或剥落,降低堆焊合金的耐磨性。

2.4 堆焊层熔合区形貌和力学性能分析

为了观察堆焊层熔合区形貌和测试堆焊层横截面力学性能,对 B₄C 加入量为 5.6%的堆焊层熔合区的微观形貌以及至熔合线不同距离堆焊层的显微硬度进行了观察测试。图 5 是熔合区的组织形貌,上部为堆焊层,下部为 Q235 钢母材,熔合区为一条白亮带,带内没有夹渣、裂纹或气孔等缺陷,表明堆焊层与母材为良好冶金结合。这主要是 Q235 钢母材属于低碳钢,含碳量较低,而含铁量较高,稀释率较大,有利于堆焊层与基体界面形成良好的冶金结合,可以保证堆焊层在使用过程中能够有效抵抗磨料的磨损而不脱落,持续地发挥其耐磨作用。

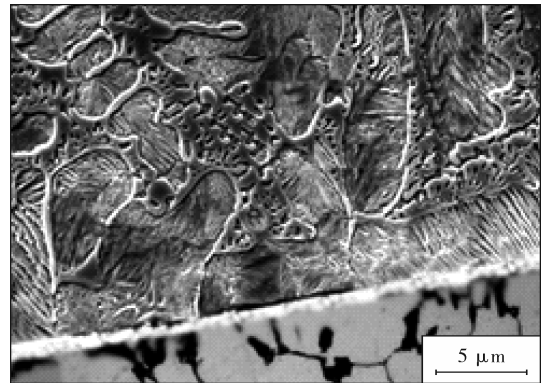


图 5 熔合区微观形貌

表 4 是 B₄C 加入量为 5.6%时,至熔合线不同距离堆焊层的横截面显微硬度的测试结果。由表 4 可知,随着至熔合线距离的增加,堆焊层横截面硬度逐渐增加,当至熔合线的距离大于 6 mm 时,堆焊层硬度趋于稳定并逐步达到最高值。这主要是因为随着至熔合线距离的增加,母材对堆焊层稀释作用逐渐减弱,药芯焊丝中的 Cr、C、B 等元素之间能够充分进行反应,生成较多的复合硼碳化物硬质相所致。

表 4 至熔合线不同距离的堆焊合金横截面硬度

距离/mm	0	2	4	6	8	10
硬度/HV	280	570	610	660	720	720

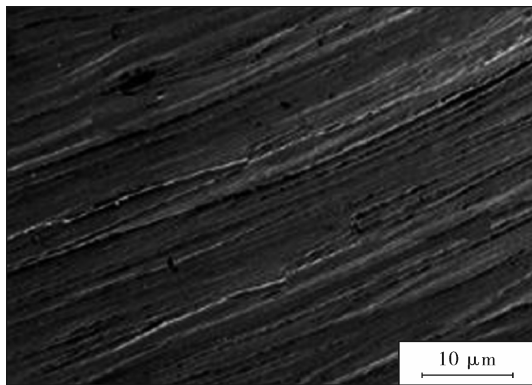
2.5 B₄C 加入量对堆焊层耐磨性的影响

不同 B₄C 加入量的堆焊层的宏观硬度及磨损量测试结果如表 5 所示。由表 5 可知,未添加 B₄C 的堆焊层的硬度最低,随着 B₄C 加入量的增加,堆焊层的硬度逐渐增加。B₄C 加入量为 0 时,堆焊层的耐磨性最差,

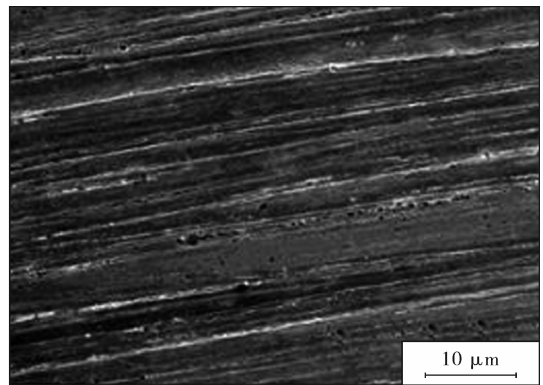
B_4C 加入量为5.6%时,耐磨性最好,相对未添加 B_4C 的堆焊合金的硬度提高了 6 HRC,耐磨性提高了 36.0%,当 B_4C 加入量为 7.0%时,虽然堆焊层的硬度最高,但其耐磨性较差,相对 B_4C 加入量为 5.6%时,其耐磨性下降了 13.5%。可见,堆焊层的耐磨性和硬度之间并不是完全的正比例关系,过量地加入 B_4C 不但没有提高堆焊层的耐磨性,还会增加堆焊成本。

表 5 B_4C 加入量对堆焊合金性能的影响

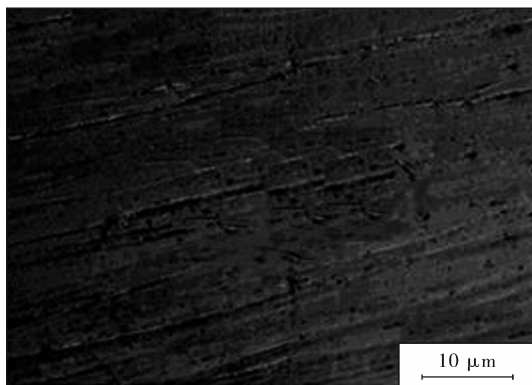
$w(B_4C)/\%$	0	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0
硬度/HRC	53	55	57	58	59	61
相对耐磨性	1.000	1.220	1.230	1.235	1.360	1.225



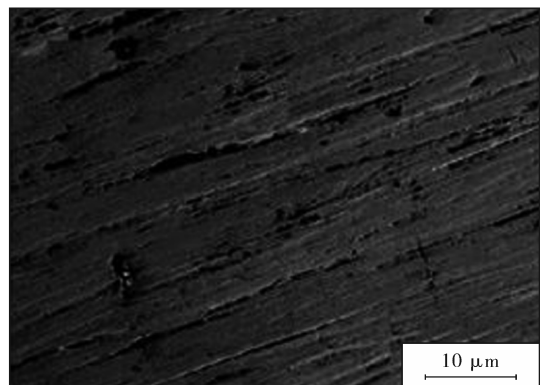
(a) 0 B_4C



(b) 1.4% B_4C



(c) 5.6% B_4C



(d) 7.0% B_4C

图 6 不同 B_4C 加入量的堆焊合金表面的磨损形貌

由试验结果分析认为,在低应力磨料磨损试验条件下,石英砂磨料(平均硬度约为 1 050 HV)在外加载荷作用下对堆焊层产生破坏作用力可分为垂直于堆焊层表面的法向应力和平行于堆焊层表面的切向应力。由图 2、图 3 可知,当 B_4C 加入量为 0 时,堆焊合金基体残余奥氏体含量较高,马氏体含量较低,磨料对堆焊层产生的冲击力很小,奥氏体加工硬化潜能得不到应有的发挥,基体的硬度较低,在法向应力作用下磨料可压入堆焊层表面,并在切向应力作用下向前运动,当石英砂的棱角与堆焊层表面接触时,便对堆焊层表面进行

图 6 为不同 B_4C 加入量的堆焊试样表面磨损形貌。从图 6 可见,当 B_4C 加入量为 0 或较少时,其磨损形貌中存在着大量深而连续的长磨痕,还有大量宽而深的犁沟,犁沟两侧或前端有犁皱,犁沟侧面或前端有磨屑断痕,这表明堆焊层的磨损机制以显微切削和塑性变形为主。随着 B_4C 添加量的增加,其磨痕和犁沟变浅,连续性和密集度降低。当 B_4C 的加入量为 5.6% 时,其磨痕和犁沟变得少而更浅,磨损表面较为平整,局部有少量的小凹坑。当 B_4C 的添加量为 7.0% 时,其磨痕、犁沟的数量、深度和宽度相对 B_4C 加入量为 5.6% 时的均有所增加,磨损表面局部有大而深的不规则凹坑,显然堆焊层磨损机制以显微切削和脆断剥落为主。

切削运动,在磨损表面留下沟槽,当石英砂的棱边与堆焊层表面接触或石英砂和堆焊层表面之间的夹角太小时,磨粒在堆焊层表面滑过后只能形成划痕,而将材料推向两边或运动方向前面,形成犁皱,在后续磨粒的作用下,犁皱会发生多次塑性变形丧失塑性而断裂为磨屑。当磨料遇到硬质相时,磨料运动停止或越过硬质相向下一个基体组织的晶粒进行切削。当 B_4C 的加入量较少(1.4%)时,虽然塑韧性良好的奥氏体对硬质相包裹性能较好,但硬质相数量较少,起不到耐磨骨架作用,不能很好地保护基体,磨料对堆焊层的显微切削

和塑性变形磨损量均较大,当硼碳化物周围的基体被切削后,硼碳化物便失去基体保护,在石英砂运动切向应力的作用下会整块脱落,因而其耐磨损性较差。

随着 B_4C 加入量的提高,残余奥氏体含量逐渐减少,马氏体含量逐渐增加,基体的硬度逐渐提高,抵抗变形和磨料的楔入能力逐步增强。初生 $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ + 共晶组织 $(Fe, Cr)_3(C, B)$ 硬质相数量逐渐增加,硼碳化物间距减小,磨料对基体的切削范围减小,当硼碳化物之间的间距减小到稍小于磨粒尺寸时,磨粒就不能对基体进行切削,此时,硼碳化物对基体具有良好的保护作用。高强韧性的板条马氏体基体在吸收各种应力、应变以及提高抗裂纹形成与扩展和抗磨性的同时,可对硬质相硼碳化物起到强有力的支撑或包裹作用,可充分发挥硼碳化物硬质相的抗磨作用,所以,随着 B_4C 的加入量的提高,堆焊层的耐磨性逐渐提高。

但当 B_4C 加入量为 7.0% 时, B 元素偏析于晶界易形成脆层现象,同时初生硼碳化物的数量进一步增加,且初生硼碳化物大多聚集为粗大的团簇,晶粒尺寸和体积均增大,占据堆焊层大部分表面,基体面积明显减少,基体对硬质相包裹性能变差,硬质相在磨粒、水流和橡胶轮的滚、压、切、冲撞作用下,易于破碎或松动而造成整块脱落,因此,在磨损表面局部留下较大的凹坑。再者,如图 1d 所示,由于堆焊层中存在大量的纵横裂纹,在磨粒的滚压切作用下,裂纹易于扩展,导致硼碳化物断裂,甚至整体脱落,在磨损表面局部也会留下较大的凹坑。当硼碳化物脱落后,基体组织便暴露出来,使磨粒的犁削运动得以顺利进行,在磨损表面切削形成较宽且深的沟槽,因而其耐磨性反而下降。

当 B_4C 加入量为 5.6% 时,初生硼碳化物的数量和体积适中,与强韧性良好的基体组织配合得当,此时硬质相耐磨骨架对基体的保护作用以及基体对硬质相耐磨骨架的支撑、包裹作用均较好,既保证了基体组织不被磨损,反过来基体又对硬质相耐磨骨架提供有效支撑,硼碳化物就不会因基体变形而碎裂脱落,所以其耐磨性较佳。但由于如图 1c 和图 4 所示,堆焊层中和 M_7C_3 型硼碳化物存在着微裂纹,在磨粒的滚切、凿削作用下易于扩展断裂脱落,所以,其磨损表面也出现少量的小凹坑,在一定程度上增加了其磨损量,因此, B_4C 加入量应控制在 5.6% 以内才能够取得更好的耐磨性。

3 结 论

(1) 当 B_4C 的加入量为 0 时,堆焊层显微组织主要由残余奥氏体+马氏体+初生 $(Fe, Cr)_7C_3$ 组成。当 B_4C

加入量在 1.4%~7.0% 范围内逐渐增加时,堆焊层显微组织均由马氏体+残余奥氏体+ $(Fe, Cr)_7(C, B)_3$ + $(Fe, Cr)_3(C, B)$ 组成。随着 B_4C 加入量的增大,残余奥氏体含量减少,马氏体含量增加,基体组织细小化,基体面积减少;初生硼碳化物数量增多,分布均匀化,尺寸和体积增大。

(2) 随着 B_4C 加入量的增大,堆焊合金的宏观硬度提高,相对耐磨性先提高后降低。当 B_4C 加入量为 5.6% 时,堆焊层的硬度为 59 HRC,虽然其硬度不为最高,但耐磨性最好,相对 B_4C 加入量为 0 时堆焊层的硬度提高了 6 HRC,耐磨性提高了 36.0%,相对 B_4C 加入量为 7.0% 时堆焊层的硬度降低了 2 HRC,耐磨性提高了 13.5%。

(3) 堆焊层硬度的高低,硬质相数量的多少,与其耐磨性的好坏并没有必然的联系,决定堆焊层的耐磨性的主要因素是基体组织的强韧性和硬质相的数量、体积、尺寸、分布以及硬度等。硬质相的硬度越高,尺寸越小,分布越均匀,体积适中,与基体组织配合越得当时,堆焊层的耐磨性越好。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 蒋德兵,贺定勇,周 正,等. Fe-15Cr-3.5B-xC 堆焊合金微观组织与耐磨性的研究[J]. 焊接, 2017(7): 28-31.
- [3] 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.
- [4] 刘仲礼,李言祥,陈 祥,等. 硼、碳含量对高硼铁基合金组织和性能的影响[J]. 钢铁, 2007, 42(6): 78-82.
- [5] 张彦超,崔 丽,贺定勇,等. B 元素对 Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金组织和耐磨性的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35 (3): 89-92.
- [6] 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, 3(31): 136-141.
- [7] 张 迪,单际国,陈武柱,等. Fe 对 NiAl 金属间化合物光束堆焊层成形及组织结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(1): 5-8.
- [8] 张 洋,宋博瀚,薛 峰. 稀释率对镍基合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 259-264.
- [9] YOO J W, LEE S H, YOON C S, et al. The effect of boron on the wear behavior of iron-based hardfacing alloys for nuclear

- power plants valves [J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 352(1/3):90-96.
- [10] 章晓波,刘宁. 碳化硼材料的性能、制备与应用[J]. 硬质合金, 2006, 23(1):120-125.
- [11] SONG Y Y, PING D H, YIN F X, et al. Microstructural evolution and low temperature impact toughness of a Fe-13%Cr-4%Ni-Mo martensitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(3):614-618.
- [12] 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.
- [13] 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(7):68-72.
- [14] 吴海涛,鲁守夺,孙涛,等. CO₂气体保护焊/喷射送粉法制备Fe基耐磨堆焊层研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(2):258-261.
- [15] 郑刚,李树林. 硼元素对敏感性钢组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(7):1725-1727.
- [16] GOU J, LIU Z J, JIA H. Effects of Nb on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-B surfacing alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(2):1-9.
- [17] 杨森,王伟,何平. Mo含量对碳弧堆焊Fe-Cr-C-Mo-B耐磨层组织和性能的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(1):47-48.
- [18] 张立成,龚建勋,姚惠文. Si元素对明弧堆焊奥氏体合金组织及耐磨性的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(3):26-30.
- [19] 宗琳,菅渡平,张小玲,等. Q245钢表面等离子堆焊Fe-Cr-Ti-C层的组织与耐磨性能[J]. 材料保护, 2015, 48(3):54-56.
- [20] 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.
- [21] GUO C Q, KELLY P M. Boron solubility in Fe-Cr-B-carbide[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1/2):40-45.
- [22] 贾华,刘政军,勾健. 药芯焊丝中B元素对铁基堆焊金属性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(17):77-80.
- [23] 王清宝,王智慧,李世敏. Fe-Cr-C系高碳耐磨堆焊合金组织及性能[J]. 焊接学报, 2004, 25(6):119-123.

[编校:范宏义]

招 贤 纳 士

招聘销售工程师

职位类别:化工/环保类·化工技术应用/化工工程师
销售类·销售工程师

工作性质:全职
学历要求:大专以上
专业要求:电化学,金属表面处理,应用化学
职称要求:不限
性别要求:男
年龄要求:25~40岁
经验要求:1年以上
工作地区:上海·嘉定 广东·深圳·宝安
户口要求:不限
截止日期:2022-03-23
外语要求:不限
工资待遇:面议

招聘人数:5人

其他福利:周末双休、带薪年假、五险一金、奖金丰厚、年终分红、交通补助、出差补贴、高温补贴、话补、节日福利、定期体检

职位描述(Job Description)

1年以上销售经验,懂得金属表面处理,有相关电镀经验优先。

岗位职责:负责所辖片区客户的市场开拓,提升客户满意度,达成销售目标和回款率;具体包括:(1)通过多种渠道开发电镀产品大客户,完成销售目标,达成开发客户数量要求;(2)维护与重要客户间的良好合作关系;(3)制定销售计划和方案;(4)向公司提供准确的市场信息,为公司的市场战略提供信息基础;(5)在规定账期内回收货款。

招聘区域销售经理

职位类别:销售管理类·销售经理 销售类·销售工

程 师

工作性质:全职
学历要求:大专以上
专业要求:电化学,金属表面处理,应用化学
职称要求:不限
性别要求:不限
年龄要求:30~50岁
经验要求:3年以上
工作地区:上海·嘉定 广东·深圳·宝安
户口要求:不限
截止日期:2022-03-23
外语要求:不限
工资待遇:面议
招聘人数:2人

其他福利:周末双休、带薪年假、五险一金、奖金丰厚、年终分红、出差补贴、住房补贴、高温补贴、话补、节日福利、定期体检

职位描述(Job Description)

(1)电化学,金属表面处理,应用化学等专业大专以上学历。(2)具备丰富的市场营销知识和实践经验;(3)掌握电镀化工知识,熟悉电镀行业市场分布;(4)具有良好的沟通,表达能力和团队合作能力。(5)具有强烈的工作责任心。

岗位职责:(1)带领业务团队,对区域市场的销售目标负责;(2)完成区域销售目标,并保持持续发展;(3)掌握电镀化工知识,熟悉电镀行业市场分布,掌握一定的客户和人脉。

公司名称:厦门市华兴工贸有限公司

电话:0592-5981498 柯小姐或纪小姐