

引用格式: 苏允海, 武兴刚, 戴志勇, 等. B对不锈钢药芯焊丝堆焊层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(15): 41-45.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20211246  
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

# B对不锈钢药芯焊丝堆焊层组织及性能的影响

苏允海, 武兴刚, 戴志勇, 王英第, 梁学伟, 杨太森

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:**为了研究B元素对不锈钢药芯焊丝堆焊合金的组织及性能的影响,采用熔化极气体保护焊在碳钢板表面制备出不同B含量的不锈钢合金层,然后对堆焊层进行显微组织、物相组成、硬度及耐磨性分析。结果表明:堆焊层以奥氏体为基体,硬质相为 $M_2B$ 相和少量的 $Fe_3(C,B)$ 相;加入适量的B可以显著提高堆焊层的硬度和耐磨性,当B含量为2%时,堆焊层性能最佳,最大硬度值达到43.5 HRC,磨损量最小;随温度的升高堆焊层合金的磨损机理由磨料磨损逐渐向黏着磨损转变,磨损量逐渐增多。

**关键词:**硼元素;不锈钢药芯焊丝;微观组织;硬度;磨损性能

中图分类号: TG422.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)15-0041-05

## Effect of B on Microstructure and Performance of Surfacing Layer of Stainless Steel Flux Cored Wire

SU Yunhai, WU Xinggang, DAI Zhiyong, WANG Yingdi, LIANG Xuwei, YANG Taisen

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In order to study the effect of B element on the structure and performance of stainless steel flux-cored wire surfacing alloy, stainless steel alloy layers with different B contents were prepared on the surface of carbon steel plate by MIG welding, and the microstructure, phase composition, hardness and wear resistance of the surfacing layer were analyzed. The results show that the matrix of the surfacing layer is austenite, and the hard phase is  $M_2B$  phase and a small amount of  $Fe_3(C,B)$  phase. Adding a proper amount of B can significantly improve the hardness and wear resistance of the surfacing layer. When the B content is 2%, the performance of the surfacing layer is best, the maximum hardness value reaches 43.5 HRC, and the wear amount is minimum. With the increase of temperature, the abrasive wear of the surfacing layer alloy is gradually transformed from abrasive wear to adhering wear, and the wear amount gradually increases.

**Key words:** boron element; stainless steel flux-cored wire; microstructure; hardness; wear property

磨损是发生在金属材料表面的一种普遍的现象,是材料的主要失效形式之一。特别是价格相对低廉、制作用途比较广泛的钢铁材料,由于工作环境的不同往往存在着不同程度的磨损<sup>[1]</sup>。磨损也发生在阀门与阀体之间,阀门的密封面通常采用Fe1合金粉末进行堆焊处理,Fe1合金粉末具有耐腐蚀性以及耐磨性,但Fe1合金粉末需要采用等离子焊机进行堆焊。相比较,药芯焊丝更具有操作方便等特点。在药芯焊丝成分设计时要考虑到堆焊层的耐蚀性、耐磨性以及合金元素的过渡系数,所以药芯焊丝

中添加的合金粉末要不降低耐蚀性的同时提高耐磨性。B作为微合金化元素,硼化物具有较高的强度,可以改善合金的力学性能,还可形成硼化物陶瓷相。此外,硼化物具有高硬度、高熔点、耐蚀性、高耐磨性和高抗氧化性等特点,常常作为磨料用来添加,是耐蚀材料和硬质合金的制作材料<sup>[2]</sup>。相比较其他合金元素,B还具有价格低廉等特点<sup>[3]</sup>。

为了研究B元素在钢中的作用机理,大量科研学者展开了研究,主要研究含硼铁基合金的显微组织与耐磨性以及力学性能<sup>[4-5]</sup>。20世纪90年代,李兵研究发明了Fe-Cr-B合金<sup>[6]</sup>,经研究表明适量的B元素可以极大提高钢的耐磨性,其作用是其他合金元素的成百上千倍,其次B在钢中和其他元素相互作用可以更进一步改善钢的强度、硬度、耐磨性等性能。Wang<sup>[7]</sup>等人通过调整B的含量研究了B的添加对热处理高铬多晶镍基高温合金的组织 and 高温应力

收稿日期:2021-05-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1103603);辽宁省自然科学基金计划重点项目(20180510030)

作者简介:苏允海(1980-),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,博士,主要从事材料焊接及表面强化技术的科研和教学工作;

E-mail: 289646841@qq.com

断裂性能的影响,结果表明,硼的加入改变了合金的晶界特性,从而延缓了裂纹的产生,同时证实了硼在合金中以富铬形式存在。王凯<sup>[8]</sup>研究了不同硼含量对高硼铁基合金的铸态组织和力学性能的影响,结果表明铸态组织由铁素体、马氏体与奥氏体组成,硼化物呈网状分布,主要为  $Fe_2B$  和  $Fe_{23}(B,C)$ ,随硼含量增加,硬度和耐磨性逐渐增加。而 B 元素在不锈钢中的耐磨性鲜有报道,因此本文以 B 元素为研究对象,研究不同 B 含量对不锈钢组织及耐磨性的影响规律。

## 1 试验材料与方法

试验采用纯度大于 99.9% 的 Cr、Ni 以及硼含量为 18% 的硼铁合金粉末。药粉需要事先烘干,因为药粉长期放置吸收水分。药粉使用前要严格检验,不干燥的药芯焊丝易产生气孔、裂纹等缺陷。

按照硼含量分别为 0、0.5%、1%、1.5%、2%, 配制成不同合金粉末加入钢带中,经轧制和拉拔制成  $\phi 2.4\text{mm}$  的药芯焊丝,药粉填充率为 40%。304 钢带化学成分如表 1 所示。将基底碳钢表面进行打磨,去除氧化皮,用无水乙醇清洗之后采用熔化极气体保护焊将药芯焊丝堆焊到低碳钢板上,焊接电流 200 A,焊接电压 24 V,焊接速度 10 cm/min,气体流量 12 L/min<sup>[9]</sup>。

表 1 304 钢带的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of 304 steel strip (wt%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
<0.08	≤1	≤2	8	18	余量

采用 X-ray diffraction(XRD)衍射仪采集堆焊层的相结构,具体参数为:纯铜靶材、电压 40 kV、电流 30 mA、步长 2 (°)/min、扫描范围 20°~90°。在配备能谱仪(EDS)的 SEM4300 扫描电子显微镜上观察组织形貌。采用洛氏硬度计在 150N 载荷作用下测试硬度值,采用销盘磨损试验机测试堆焊层耐磨性能,试验参数为:压力 200 N,转速 100 r/min,时间 30 min。摩擦副采用 42CrMo 钢,调质处理后洛氏硬度为 35~38 HRC,磨损试样尺寸为  $\phi 3.9\text{mm} \times 15\text{mm}$ ,采用 BL410F 电子天平(0.0001 g)对试样磨损前后质量进行对比,计算磨损量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 B 含量对堆焊合金相结构的影响

图 1 为不锈钢合金堆焊层 X 射线衍射对比分

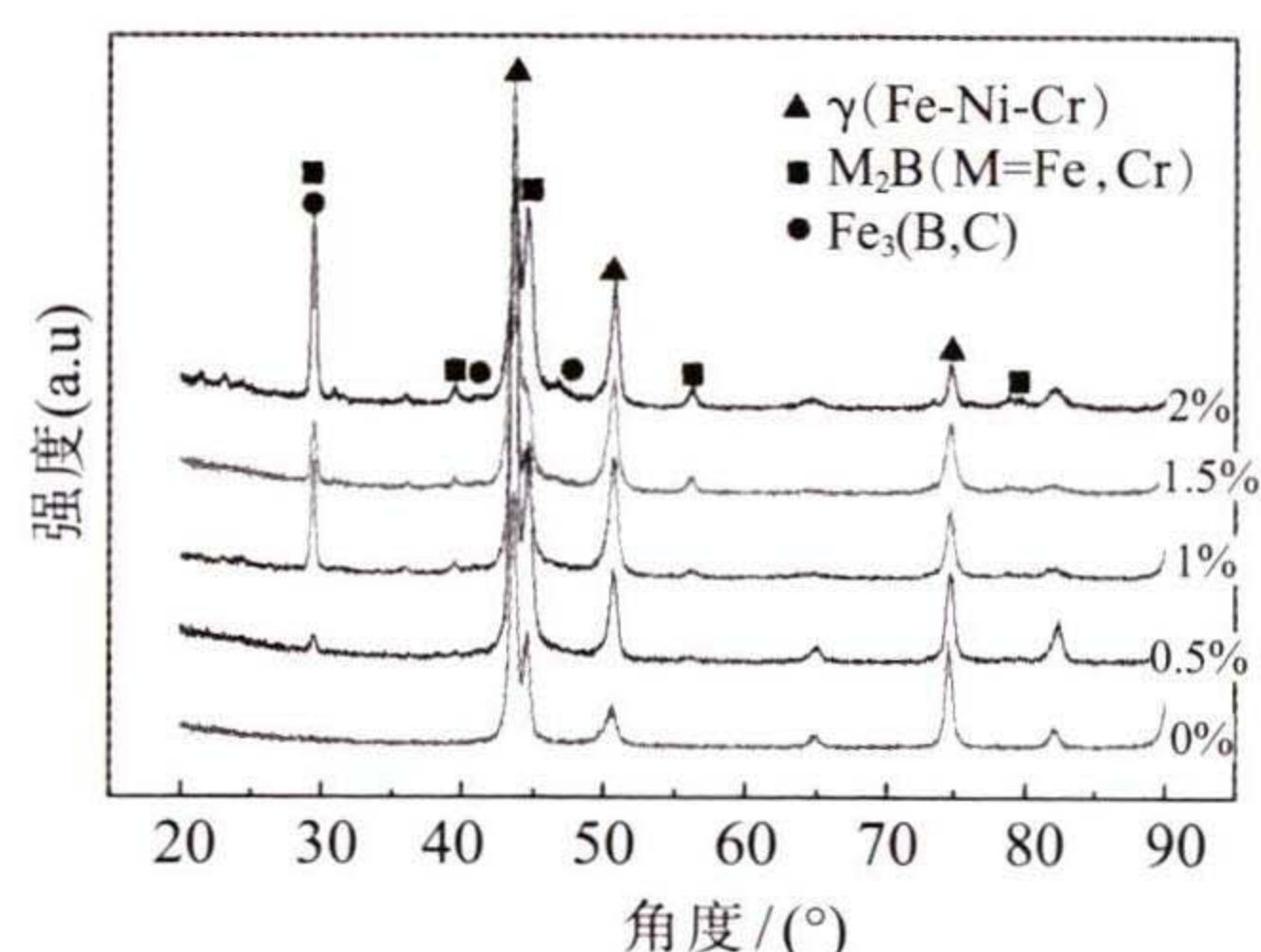


图 1 不同 B 含量堆焊合金 X 射线衍射对比分析  
Fig.1 X-ray diffraction comparative analysis of surfacing alloy with different B contents

析图。把试样的 X 射线衍射图谱与标准的 PDF 卡片进行对比,结果表明,药芯焊丝中 B 的含量为 0 时的堆焊层组织主要为 Fe-Ni-Cr 奥氏体相。随着 B 含量的增加,通过与标准 PDF 卡片对比发现堆焊层的主体为 Fe-Ni-Cr 奥氏体相以及  $M_2B$  ( $M=Fe, Cr$ ) 和少量的  $Fe_3(B,C)$  硬质相。

### 2.2 B 含量对堆焊合金微观组织的影响

图 2 为不同 B 含量的不锈钢堆焊层的扫描电镜(SEM)形貌。结合 XRD 图谱可知,合金由基体 Fe-Cr-Ni 和硼化物组成,随着硼含量的增加,合金基体上的硼化物逐渐增多,硼化物主要为暗灰色的长棒富铬硼化物以及少量的亮白色的富 Mo 网状硼化物。图 2(a)为不添加 B 的复合合金堆焊层的显微组织,其基体组织为  $\gamma$  奥氏体(箭头所示),为连续且均匀密集分布的网状树枝晶。与不添加 B 相比,B 含量较低的合金组织出现明显的网格状硼化物与棒状硼化物,主要分布在晶界位置,如图 2(b)、(c)所示。B 含量较高的合金与 0.5%、1%B 的合金相比,组织形貌相似,如图 2(d)、(e)所示。由于硼含量的增加为硼化物的生长提供了条件,使网状硼化物与分散的棒状硼化物连接起来。

由文献[10-11]可知  $M_2B$  形成主要是因为 B 在奥氏体中的溶解度比较低,B 元素沿着奥氏体晶界生成非平衡的偏析  $Fe_2B$  相。此外,因为 Cr 和 Fe 的晶格常数相似,在焊缝凝固过程中, $Fe_2B$  中一定量的 Fe 原子被 Cr 原子置换形成富 Cr 的  $M_2B$  硼化物。随着 B 含量的增加组织中的硼化物逐渐增多,合金组织发生明显的变化,富 Cr 的棒状硼化物的尺寸逐渐变大,数量变多,网状硼化物也逐渐变粗且网格密集程度变大。另外,一部分  $Fe_2B$  发生  $Fe_2B \rightarrow Fe_3(B,C)$  相转变,这与 Fe-Cr-B-C 相图中的凝固原则一致<sup>[12]</sup>。B 原子与基体中的其他原子半径相差较

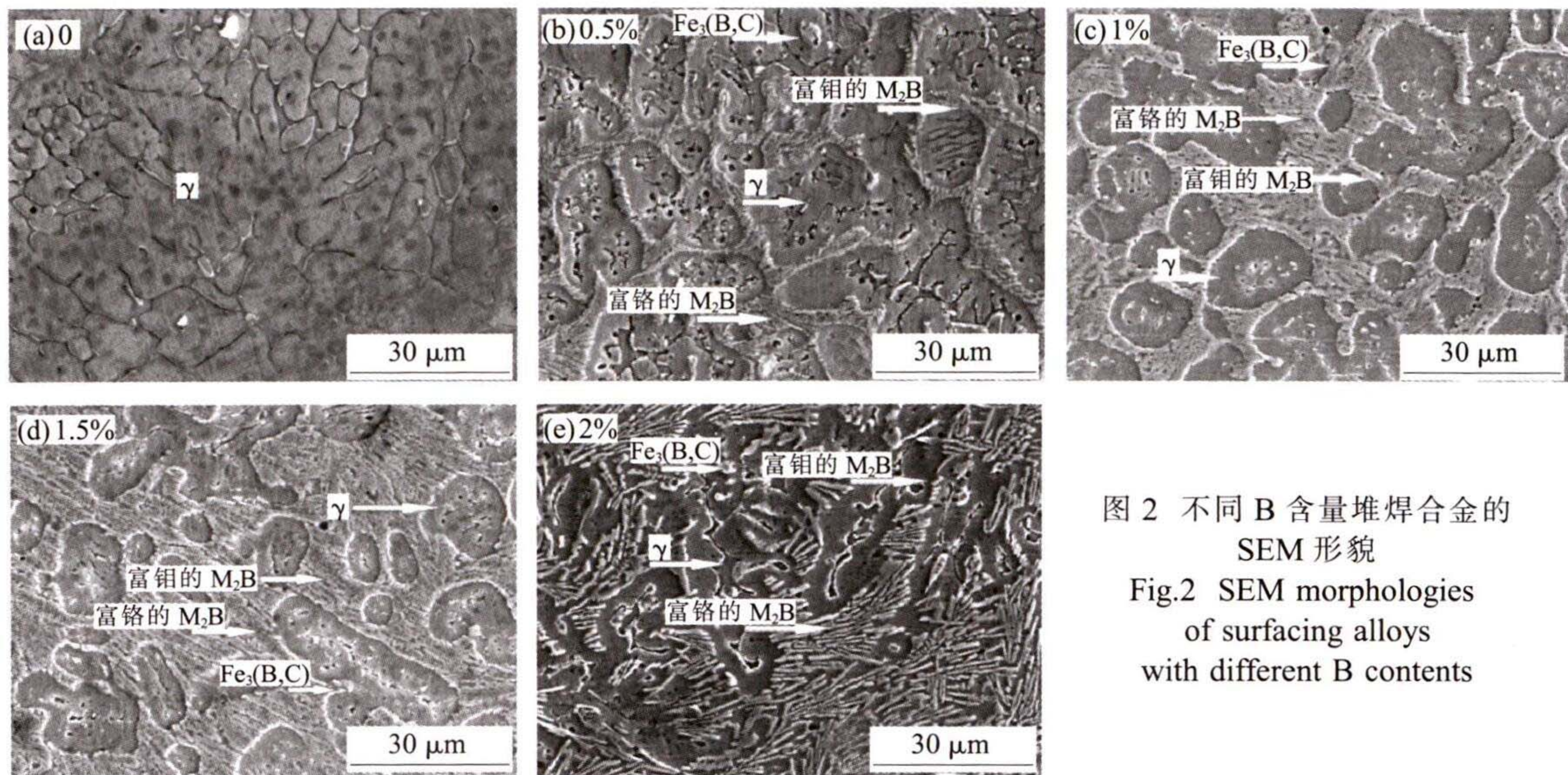


图2 不同B含量堆焊合金的SEM形貌  
Fig.2 SEM morphologies of surfacing alloys with different B contents

大,与位错、强化晶界和空位等缺陷的弹性结合能较大,因此在这些位置上偏析的驱动力较大,且B具有向晶界偏聚的特性,使晶界处的B浓度高于基体中的B浓度<sup>[13]</sup>,析出相在晶界处连续向晶内生长。随着焊缝金属不断凝固硼化物析出,消耗掉大量硼原子的同时焊接熔池中出现成分不均匀现象,由于冷却速度较快,硼原子扩散受到限制,在局部区域形成的贫硼液相转变为铁镍奥氏体相。根据Fe-B-C三元合金相图及金子秀付<sup>[14]</sup>的研究结果,可知试样为亚共晶合金。

### 2.3 B含量对硬度和耐磨性的影响

堆焊合金的硬度及耐磨性主要取决于合金中硼化物的数量、形态、成分以及基体相的硬度。由图3可知,随着硼含量的增加,洛氏硬度呈现逐渐增大的趋势。当B含量为2%时洛氏硬度值最高,为43 HRC,约为基体(18HRC)的2.4倍。当B含量为2%时,由于B含量较高,形成大量的棒状和富Cr的M<sub>2</sub>B硼化物,提高了堆焊层的硬度。堆焊层的磨损

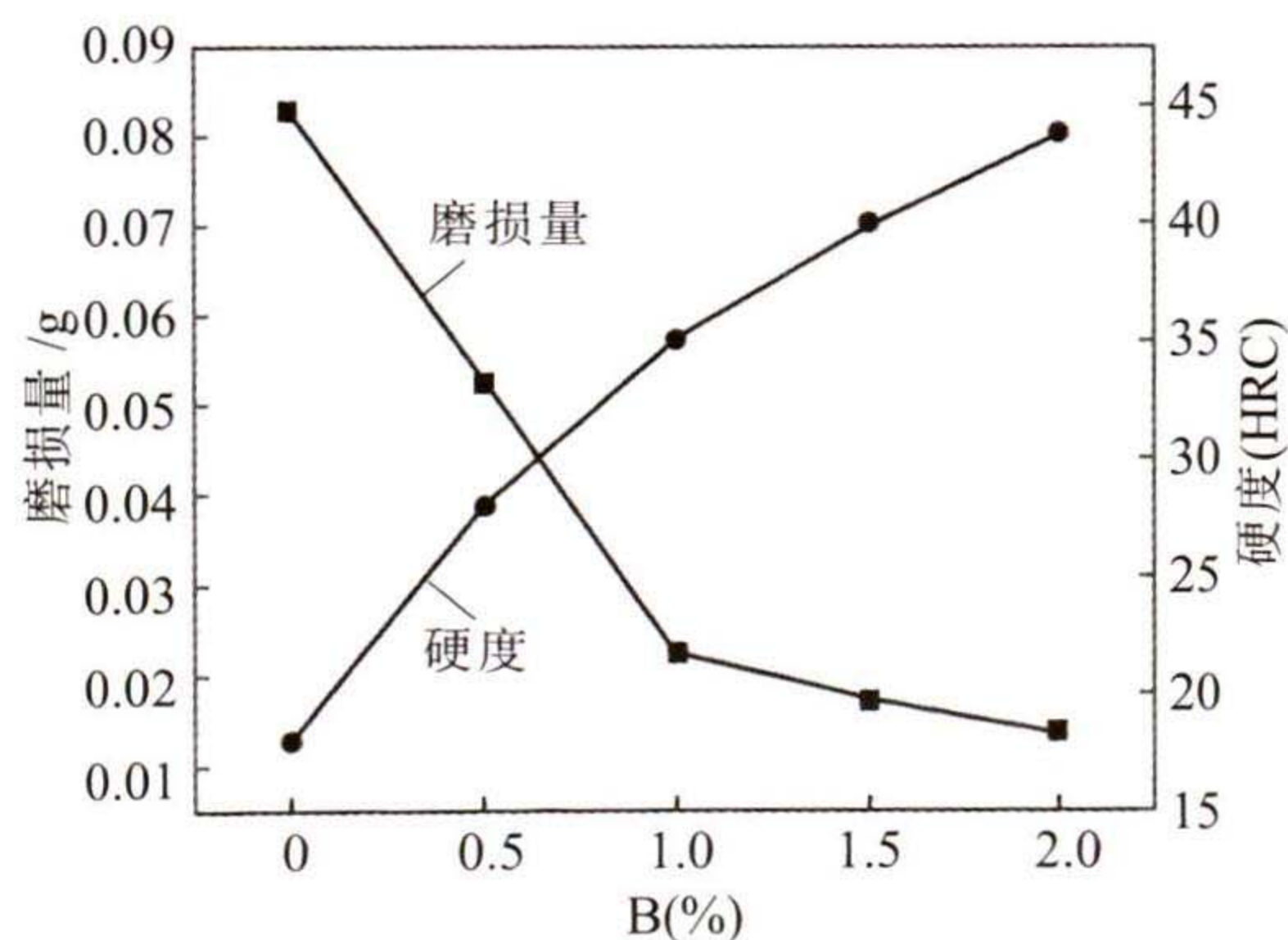


图3 堆焊合金的洛氏硬度及磨损量

Fig.3 Rockwell hardness and wear amount of surfacing alloys

量随堆焊层硬度的升高减小,当B含量为2%时堆焊层的磨损量最小,为0.0141g,约为不含硼的堆焊合金的20%~30%。由此可见B的添加可以明显提高堆焊层的耐磨性。

如图4所示,随硼含量增加,堆焊层的磨损机理由磨粒磨损逐渐转变为磨粒磨损和少量的黏着磨损。从磨损程度来看,不含硼的堆焊合金属于奥氏体不锈钢,塑性和韧性好,硬度较差,因此磨损比较严重,犁沟比较深且存在大片块状剥落。含B的堆焊合金组织主要为奥氏体及M<sub>2</sub>B、Fe<sub>3</sub>(C,B)型硼化物,因此耐磨性得到显著提高,随着B含量的增加,棒状硼化物逐渐增多,使得堆焊合金耐磨性增加,磨损形貌表现为犁沟逐渐变浅,块状剥落物逐渐变小。犁沟和块状剥落产生的原因在于:由于试样和摩擦副表面粗糙,在实验初期,试样与摩擦副表面微凸起部分相互接触,并在外加载荷以及切应力作用下发生相对摩擦及滑动而从基体剥落,其中一部分形成磨屑从磨面中脱落,另一部分没有脱离磨面,在应力作用下被压入材料的磨面,进而在摩擦磨损过程中的切向力作用下在磨面产生犁沟以及塑性变形。由于发生相对摩擦的过程中会产生大量的热,致使接触面温度升高,磨损机制由磨粒磨损向黏着磨损转变,因此会有一部分的磨屑被压粘在磨面上,随着磨损时间的延长,表面形成的粘附物逐渐增多变大,达到一定的体积后形成块状脱落<sup>[15]</sup>。

由上述可知,在室温下堆焊层的耐磨性随硼含量的增加而增加,由于实际应用存在不同的温度环境,所以进一步对室温、100、200℃下不同硼含量的

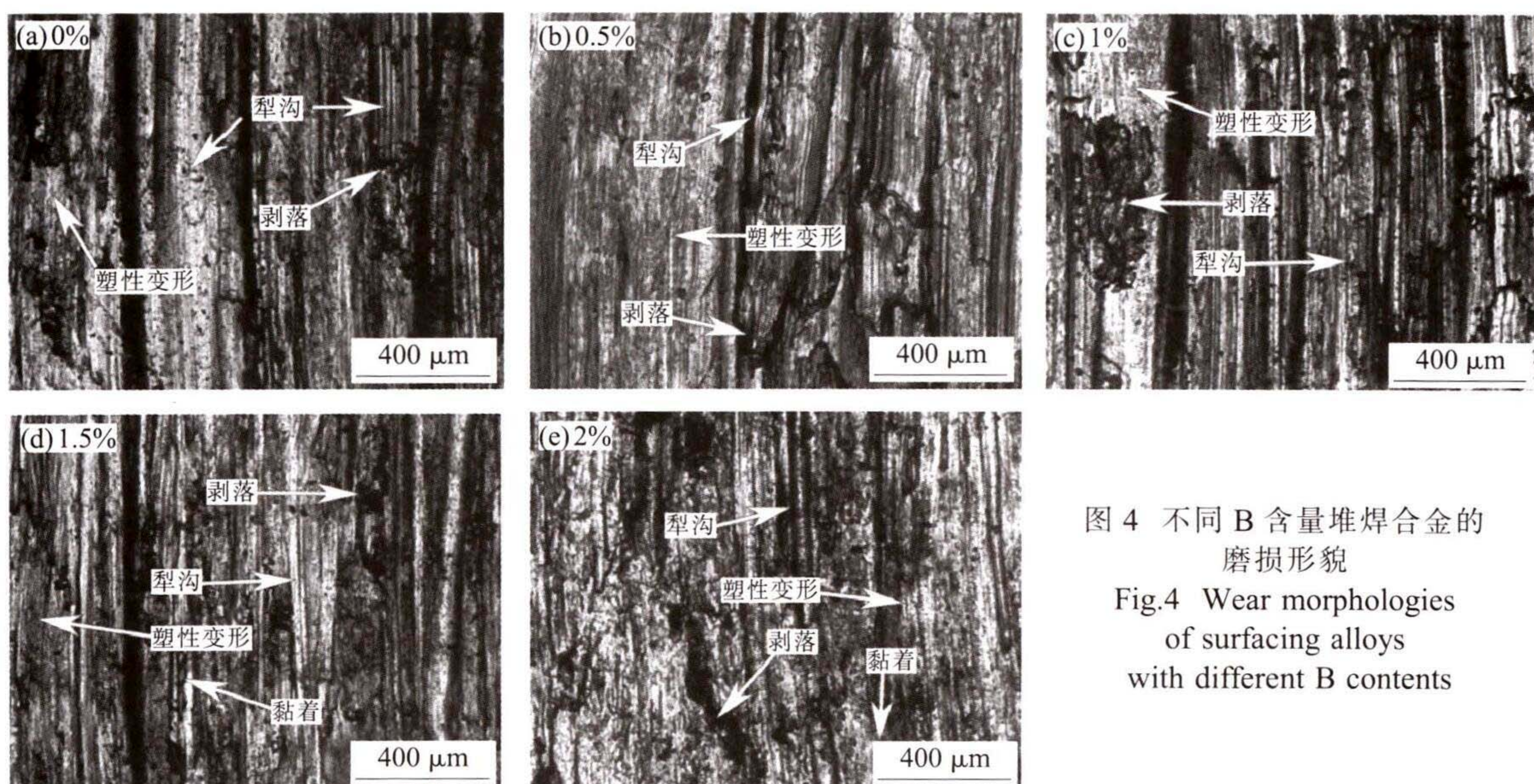


图4 不同B含量堆焊合金的  
磨损形貌  
Fig.4 Wear morphologies  
of surfacing alloys  
with different B contents

堆焊层磨损进行研究。图5为不同温度下堆焊合金的磨损量曲线,磨损量随温度的升高逐渐加大,主要由于实验开始时初始温度不同,奥氏体导热性较差,且在摩擦过程中产生大量的热,初始温度越高试样表面达到的温度越高,试样与摩擦副表面发生相对

摩擦时越容易发生塑性变形以及凸起部分脱落后被碾压发生黏着磨损。在室温和100℃下随B含量从0增加到1%磨损量快速下降。因此,材料的耐磨性主要由材料的硬度决定,硼含量较高时,堆焊层的硬度较高,堆焊层的耐磨性更好。

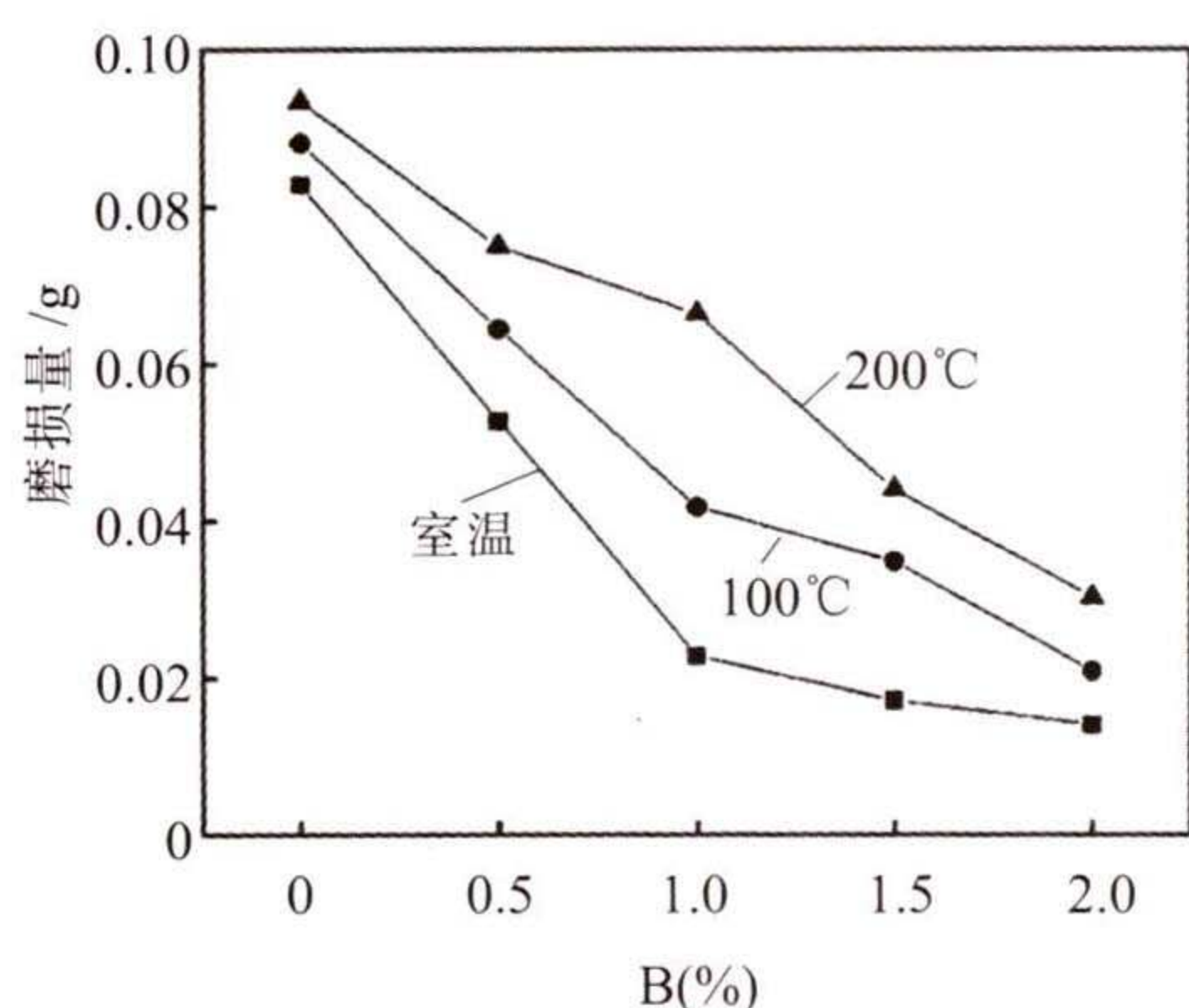


图5 不同温度下堆焊合金的磨损量曲线  
Fig.5 Wear loss curves of surfacing layers  
at different temperatures

由图5磨损曲线可知,不同温度下堆焊合金的磨损趋势大致相同,相同温度下在硼含量为2%时的耐磨性最佳。对硼含量为2%的堆焊合金磨损形貌进行分析,如图6所示,磨损形貌主要为犁沟和磨损剥落层,磨损机制为磨料磨损和黏着磨损以及轻微的塑性变形。室温下的磨损形貌主要以较浅的犁沟和较大的片状脱落物为主,100℃下的犁沟变深,片状剥落物变小同时数量变多,200℃下的磨损形貌中出现大量的黏着磨损区域,同时相比前两组温度,犁沟深度加大,片状脱落物变小。由此可知随温度升高磨损的机制由磨料磨损逐渐向黏着磨损发生转变。

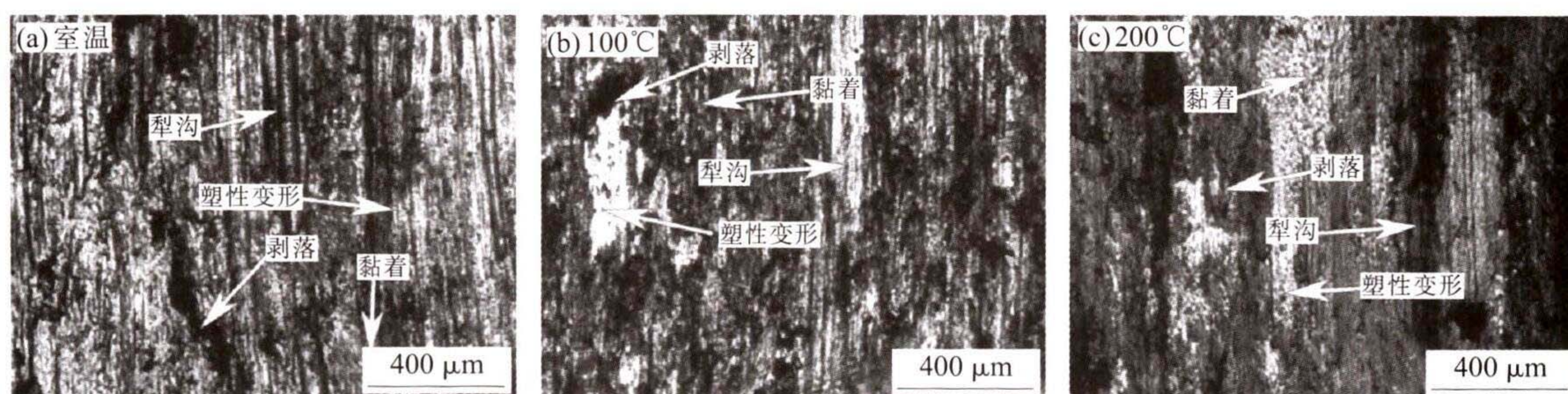


图6 不同温度下2%B含量的堆焊合金的磨损形貌  
Fig.6 Wear morphologies of surfacing alloys with 2% B content at different temperatures

### 3 结论

(1) 堆焊合金主要以 Fe-Ni-Cr 固溶体为主,含硼相主要为  $M_2B$  及少量的  $Fe_3(C,B)$ , 硼化物形貌主要为棒状和少部分的网状。随着 B 含量的增加,硼化物逐渐增多。


(2) 随着 B 含量增加,堆焊层在常温下的磨损机制由磨粒磨损转变为磨粒磨损和少量的黏着磨损,硼含量为 2% 时,硬度为 43.5HRC,耐磨性达到最佳。

(3) 堆焊层在不同温度下的磨损形貌基本相似,随温度的升高堆焊层的磨损机制由磨粒磨损逐渐向黏着磨损转变,磨损量逐渐增大。

#### 参考文献:

- [1] 符寒光,邢建东. 耐磨铸件制造技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 郭长庆,高守忠. 新型铁基耐磨材料 FCB 合金 [J]. 铸造,2004,53(10):761-764.
- [3] Wang M,Gao R,Gao H,et al. Improved corrosion resistance of Ni-modified Fe-Cr-B steel in molten zinc via phase transformation and microstructure control [J]. Surface & Coatings Technology,2019,374:975-986.
- [4] 马跃,符寒光,袁园,等. 铸造 Fe-Cr-B-Al 合金相图计算及实验验证[J]. 铸造,2015,64(10):950-954.
- [5] Lv Z,Fu H,Xing J,et al. Microstructure and crystallography of

borides and mechanical properties of Fe-B-C-Cr-Al alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds,2016,662:54-62.

- [6] 李兵. Ce、W 元素对 Fe-Cr-B 合金组织及耐铝液腐蚀-磨损性能的影响[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [7] Wang H W,Yang J X,Meng J,et al. Effects of B content on microstructure and high-temperature stress rupture properties of a high chromium polycrystalline nickel-based superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds,2020,72(7):1823-1835.
- [8] 王凯. B 含量及 Q&P 工艺对高硼铁基耐磨合金组织和力学性能的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2020.
- [9] Ouyang X M,Chen G P,Yin F C,et al. Effect of molybdenum on the microstructures of as-cast Fe-B alloys and their corrosion resistance in molten zinc[J]. Corrosion,2017,73:942-952.
- [10] Tian Y,Ju J,Fu H,et al. Effect of chromium content on microstructure,hardness,and wear resistance of as-cast Fe-Cr-B alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2019,28(10):6428-6437.
- [11] 陈维平,刘路生,张先满,等. 热处理对 Fe-Cr-B 铸钢组织和耐铝液腐蚀性能的影响[J]. 铸造,2017,66(1):58-63.
- [12] Wang Y,Xing J,Fu H,et al. Interfacial morphology and corrosion-wear behavior of cast Fe-3.5 wt.% B steel in liquid zinc[J]. Corrosion Science,2018,131:290-299.
- [13] 焦恩理. Ni-Cr-B 系高硼堆焊合金及其耐磨耐蚀性的研究[D]. 济南:山东大学,2015.
- [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.
- [15] 刘海英. Fe90/WC<sub>p</sub> 复合涂层组织与性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2017. 

(上接第 40 页)

#### 参考文献:

- [1] Lee H,Jo M C,Sohn S S,et al. Microstructural evolution of liquid metal embrittlement in resistance-spot-welded galvanized twinning-induced plasticity (TWIP) steel sheets [J]. Materials Characterization,2019,147:233-241.
- [2] Karbasian H,Tekkaya A E. A review on hot stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology,2010,210 (15): 2103-2118.
- [3] Peng H,Peng W J,Lu R,et al. Diffusion and cracking behavior involved in hot press forming of Zn coated 22MnB5[J]. Journal of Alloys and Compounds,2019,86:195-205.
- [4] 张帆,李芳,华学明,等. Al-Si 镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究 [J]. 中国激光,2015,42(5):96-103.
- [5] Vierstraete R,Ehling W,Pinard F,et al. Laser ablation for

hardening laser welded steel blanks [J]. Industrial Laser Review,2010,25(2):6-11.

- [6] Kim C,Kang M J,Park Y D. Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel [J]. Procedia Engineering,2011,10 (7): 2232-2237.
- [7] Ehling W,Cretteur L,Pic A,et al. Development of a laser decoating process for fully functional Al-Si coated press hardened steel laser welded blank solutions [C]//Proceedings of 5th International WLT-conference on Lasers in Manufacturing. Munich,Germany,2009.
- [8] Kang M, Kim C. Laser welding for hot-stamped tailor-welded blanks with high-strength steel/high-energy absorption steel [J]. Journal of Laser Applications,2014,26(3):032007.
- [9] Dulal C S,Biro E, Gerlich A P,et al. Fiber laser welding of Al-Si-coated press-hardened steel [J]. Welding Journal,2016,95(5):147-156. 