DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.002

锰对高硼铁基合金凝固组织的影响

陈　金[1],吴　润[1],徐　凯[1],曾松盛[2]

(1. 武汉科技大学材料与冶金学院，湖北 武汉 430081;2. 华菱安赛乐米塔尔汽车板材有限公司技术中心，湖南 娄底 417000)

摘　要:设计了 2%、4%、6%、8%、10% 5 种锰含量的高硼耐磨合金钢,研究了凝固过程和锰含量对铸态组织及力学性能的影响。结果表明,高硼耐磨合金的铸态组织由树枝状基体组织和共晶组织(γ+硼化物)构成;随着锰量的增加,树枝状基体组织的含量呈下降趋势,硼碳化合物量变化不大;随着锰含量的增加,材料的硬度在 HRC 45~65 变化,呈现先上升后下降的趋势;冲击韧度在 1.5~3.0 J/cm² 波动,呈现先下降后上升的趋势。

关键词:高硼铁基合金;凝固;锰;硼化物

中图分类号: TG244　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0436-05

Effect of Manganese on Solidification Structure of High Boron Iron-Based Alloy

CHEN Jin[1], WU Run[1], XU Kai[1], ZENG Songsheng[2]

(1. School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Technology Center, Valin ArcelorMittal Auto Sheet Co., Ltd., Loudi 417000, China)

Abstract: High boron wear-resistant alloy steels with manganese content of 2%, 4%, 6%, 8% and 10% were designed, the effects of solidification process and manganese content on the as-cast microstructure and mechanical properties of casting were studied. The results show that the as-cast microstructure of high boron wear-resistant alloy is composed of dendritic matrix and eutectic microstructure (γ+boride). With the increase of manganese content, the content of dendritic matrix decreases, but the content of borocarbon does not change. With the increase of manganese content, the hardness of the materials changes within the range of HRC 45~65, showing a trend of increasing first and then decreasing. The impact toughness fluctuates between 1.5~3.0 J/cm², showing a trend of decreasing first and then increasing.

Key words: ferroboron-based alloy; solidification; manganese; boride

目前,我国矿山、冶金、电力等行业的机械设备中广泛应用的耐磨材料是镍硬铸铁、高铬铸铁、高锰钢和低合金耐磨钢[1]。但是都存在一些不足,有的耐磨性不好,有的昂贵的合金元素较多使得生产成本较高。

我国硼元素资源丰富且价格低廉,目前,一种新型的耐磨材料高硼铁基耐磨合金(Fe-B 合金)受到广泛关注,它以共晶硼化物 M_2B 为耐磨骨架,表现出优异的耐磨性能,改变了以碳化物为硬质相的传统格局。与碳化物相比,硼化物具有更高的硬度和热稳定性。除了优异的耐磨性外,它还具有低合金消耗、铸造工艺简单以及生产成本低等优点[2,3]。本文设计了 2%、4%、6%、8%、10% 5 种锰含量的高硼耐磨合金钢,对其凝固过程和锰对铸态组织及力学性能的影响进行研究。

1　试验方法

试验设计的合金的化学成分如表 1。以废钢、生铁、锰铁等为原材料,按照表 1 设计成分计算配比后进行配料,在中频感应炉中熔炼,出炉后铁模浇注成 230 mm×ϕ115 mm 的圆锭,浇注温度 1 440～1 580 ℃。

表 1 本试验用钢的化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical compositions of the experimental steels

元素	C	Si	Mn	Al	Ti	B	V	Nb	S	P
含量	0.45	1.00	2~10	1.50	0.30	2.70	0.05	0.03	<0.06	<0.06

本次合金分为 5 组,分别标记 A 组、B 组、C 组、D 组和 E 组,其中锰元素的含量依次为 2%、4%、6%、8%、10%。在铸锭靠近表面位置用线切割机切取 10 mm×10 mm×15 mm 的试样,经过打磨并抛光后,用苦味酸酒精溶液腐蚀,采用蔡司金相显微镜(OM)和 Nova 400 型扫描电子显微镜(SEM)观察其显微结构及表面形貌;在 JB50B 型摆锤式冲击试验机上测试冲击韧度,用 HRS-150 型硬度计测量洛氏硬

收稿日期:2018-12-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771139)
作者简介:陈　金(1993-),湖北孝感人,硕士生.研究方向:耐磨钢.电话:15671624875,E-mail:2295207348@qq.com

度，用 SH-318-III 型数显显微硬度计测量维氏硬度。

2　试验结果及分析

2.1　高硼铁基合金的铸态组织

选取 B 组(4%Mn)进行合金固态组织的分析。试样 B 的枝晶金相组织如图 1(a)所示，可以清楚地看到枝晶由中心白色部分(250~300 HV)与边缘灰色部分(700~850 HV)组成，并且灰色部分中有针状组织。图 1(b)是枝晶的扫描电镜图，中心块状组织即为金相图中的白色部分，针状组织区域即为灰色部分，两种组织中间有另一种层片状组织，由于量太少在金相图中未看见。通过显微组织图和维氏硬度可以初步知道枝晶组织从边缘到心部依次为针状马氏体、珠光体和铁素体。

由于合金中钛、铌、钒、锰等合金元素的总含量超过 7%[4]，这些元素部分溶于奥氏体，使得奥氏体的稳定性增加，C 曲线右移，导致合金的淬透性增加。又由于硅、锰的分配系数都小于 1，在枝晶长大过程中也不断向周围液相中析出 B、C、Mn 等元素，使得初晶 γ 从心部到边缘合金元素量逐渐增加[5]，淬透性增加，奥氏体的稳定性增加，发生马氏体相变的程度大。因此，在空冷条件下，过冷奥氏体从边缘到心部依次发生马氏体相变和珠光体相变，所以最终铸态基体组织由针状马氏体和珠光体组成，中心部分为铁素体存在。

试样 B 的典型共晶金相组织如图 2 所示。从金相图中可看出，共晶组织主要以鱼骨状、长条状和板块状存在，其中以长条状共晶组织居多。鱼骨状共晶组织像鱼骨，中间有一条脊，“鱼骨”是共晶奥氏体，“鱼骨”之间和“鱼脊”都是硬质相(Fe_2B)。长条状共晶组织由共晶奥氏体和硬质相交替分布形成。板块状共晶体则为共晶奥氏体上分布着块状的硬质相[6]。

2.2　锰对高硼铁基耐磨合金的凝固组织及过程的影响

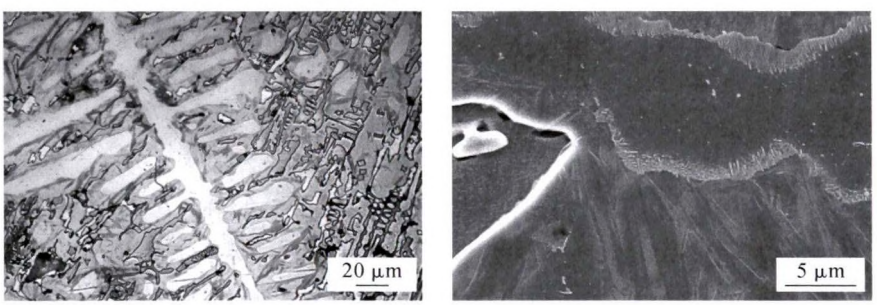
图 3 分别是试验用钢中锰含量从 2%~10%变化时合金的铸态组织，组织由树枝状基体组织和共晶组织(γ+硼化物)构成。从图可以观察到，初生奥氏体的形状随着锰含量的增加发生了巨大的变化：枝晶变粗，二次枝晶间距减小，甚至没有二次枝晶，只剩下像小团状的晶粒；同时初生奥氏体发生转变的现象更加明显。

对合金中的初生奥氏体进行定量，结果如表 2 所示。可以看出，随着锰含量的增加，初生奥氏体的体积分数呈现下降的趋势。这是因为锰量的增加降低了初生奥氏体开始析出的温度，合金的结晶凝固温度范围缩小，不利于奥氏体树枝晶的发展[7]，使得初生奥氏体含量呈减小趋势。

表2 合金初生奥氏体平均含量

Tab.2 The average content of primary austenite in the alloy

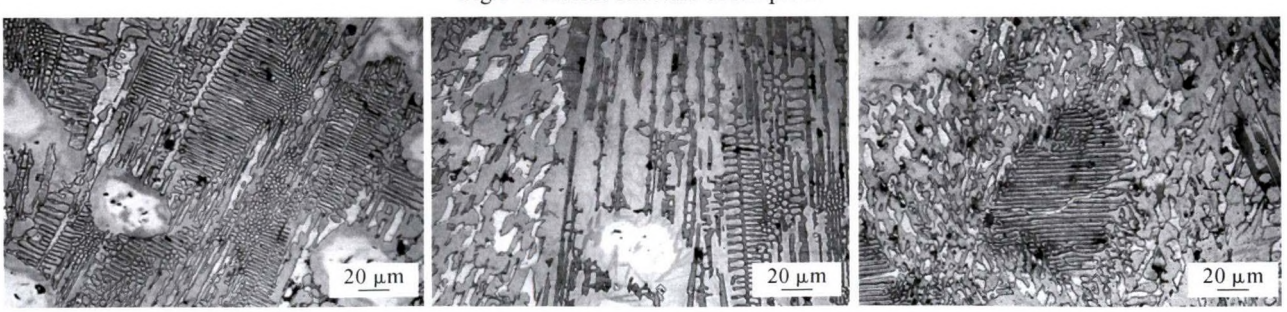
锰含量(%)	2	4	6	8	10
平均枝晶含量(%)	20.51	19.47	18.12	17.50	17.24



(a)金相组织　　(b)扫描电镜组织

图 1　试样 B 枝晶组织

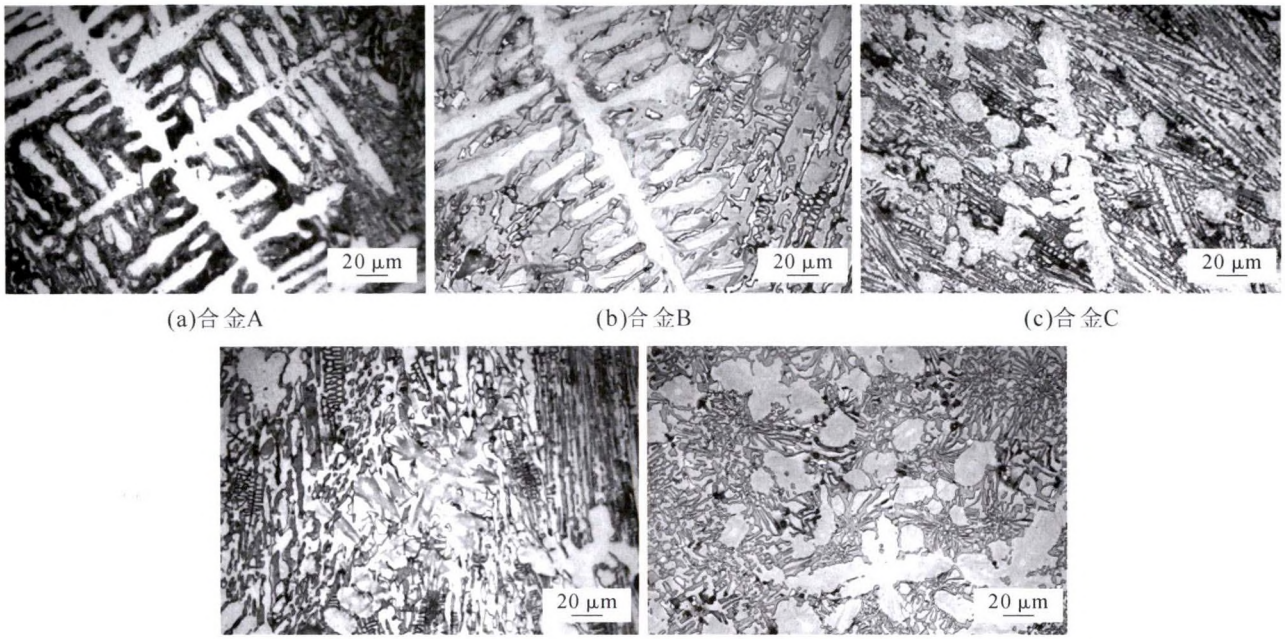
Fig.1 Dendritic structure of sample B



(a)鱼骨状　　(b)长条状　　(c)块状

图 2　试样 B 共晶组织

Fig.2 Eutectic structure of sample B

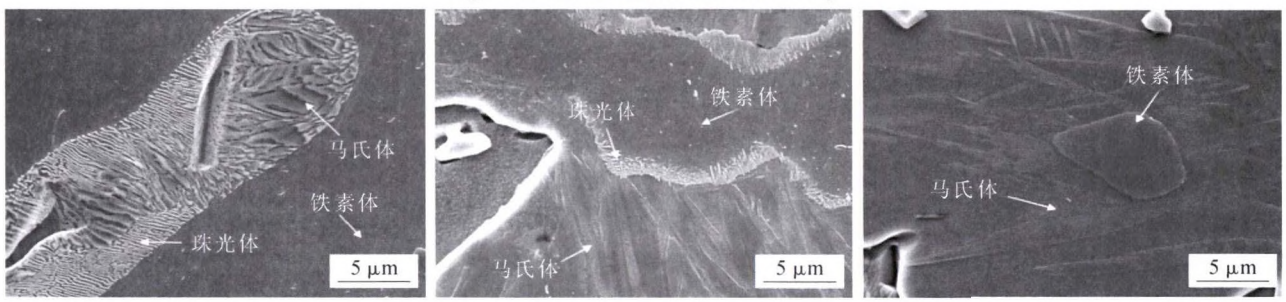


(a)合金A (b)合金B (c)合金C

(d)合金D (e)合金E

图 3 合金的铸态组织

Fig.3 As-cast microstructure of the alloy



(a)合金A (b)合金B (c)合金E

图 4 枝晶组织的 SEM 图

Fig.4 SEM images of dendritic structure

图 4 为 A、B、E 三组中枝晶组织的扫描电镜图。结合图 5 的金相图可知，从试样 A 到试样 E，随着锰含量的增多，初生奥氏体转变为马氏体的量增多，即初生奥氏体转变为马氏体的程度更明显，铁素体量减少，并且低锰含量时有少量珠光体出现，高锰含量时没有珠光体组织，但有部分残留奥氏体。

锰对初生奥氏体转变的影响与合金固态枝晶组织形成过程类似。随着锰含量的增加，溶于奥氏体中的合金元素越多，使得奥氏体的稳定性增加，C 曲线右移更多，钢的淬透性增加，所以在空冷条件下初生奥氏体转变为马氏体的量增多，铁素体量减少。

试验用钢中锰含量从 2%~10%变化时合金的铸态共晶组织如图 5 所示。与试样 B 的共晶组织类似，共晶组织主要以鱼骨状(1 300~1 450 HV)、长条状(1 100~1 180 HV)和板块状(1 070~1 150 HV)存在。当锰含量达到 6%时，在奥氏体晶粒周围，除了有共晶组织以外，还开始形成了较多的菊花状组织(850~950 HV)。这是由于当合金中锰达到一定含量时，在凝固过程中继续发生了 $L+Fe_2B \rightarrow \gamma+Fe_3(C、B)$ 的三元包共晶反应，最终在凝固组织中出现了比较明显的 $Fe_2B+\gamma+Fe_3(C、B)$ 三元包共晶组织。随着锰含量的增加，硼碳化合物团簇增多，团簇尺寸增大，包共晶组织的数量明显增加。

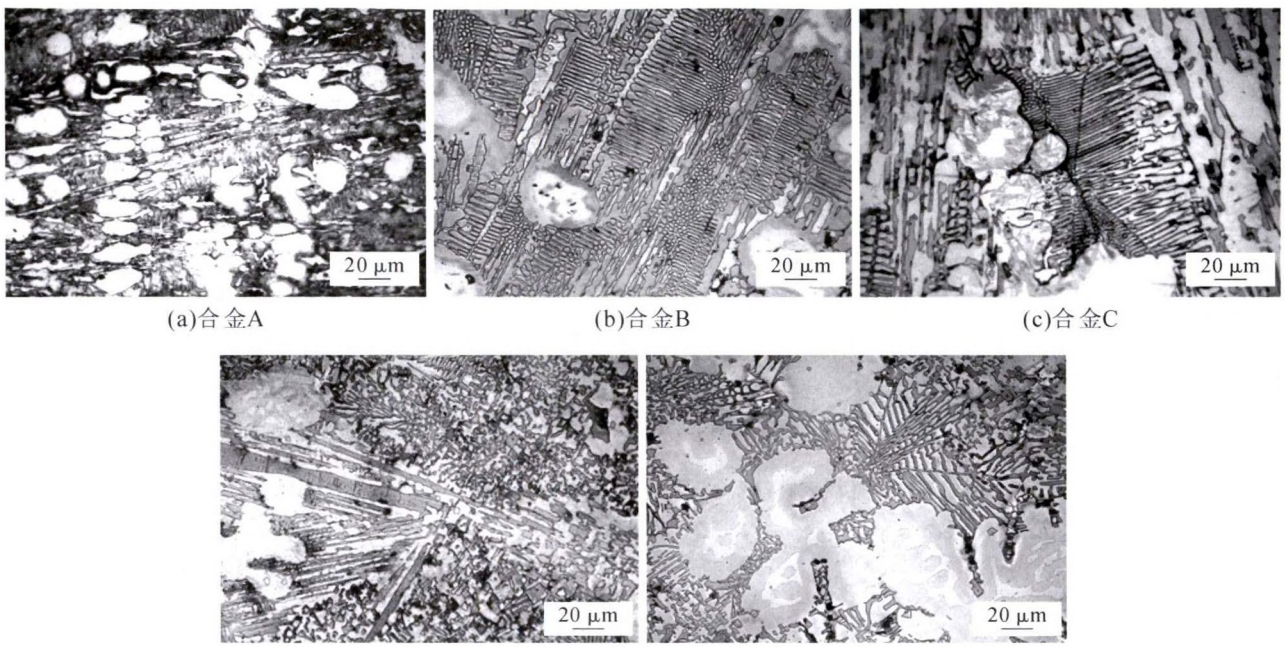
对锰含量从 2%~10%变化的合金的硼化物进行定量，结果如表 3。从表 3 看出，随着锰含量的增加硼化物量变化不大，说明锰对高硼铁基合金的硼化物影响不大。锰含量为 10%时，硼化物量稍多一些，这是因为此时的菊花状组织即三元包晶组织 $Fe_2B+\gamma+Fe_3(C、B)$ 较多[8]。

表3 合金的硼化物量

Tab.3 The amount of boride in the alloy

锰含量(%)	2	4	6	8	10
硼化物量(%)	27.00	27.75	30.50	27.75	36.00

综合以上分析，高硼铁基合金的的凝固过程如下：合金开始从液态析出初晶 γ 相，初晶 γ 相以树枝



(a)合金A　(b)合金B　(c)合金C

(d)合金D　(e)合金E

图 5 合金共晶组织

Fig.5 Eutectic structure of the alloy

晶的形式生长，由于锰、硼等元素在 γ 相的分配系数小于 1，合金元素向液相扩散，当周围液相的含硼量增加到 3.8%、温度达到 1 149 ℃时，发生 L→γ+Fe_2B 的共晶反应。当锰含量较高时合金没有全部转变为固态，而是在共晶组织和初生相的周围还存在液相，剩余液相发生三元包晶反应 L+ Fe_2B→γ+Fe_3(C、B)。所以高硼铁基耐磨合金高温状态下的凝固组织由初生奥氏体相 + 共晶组织(γ+Fe_2B)+ 包晶组织(γ+Fe_2B+ Fe_3(C、B))构成[9]。

2.3 高硼铁基耐磨合金的性能

表 4 列出了高硼铁基合金的性能，可以看出，试验用钢的冲击韧度、相对耐磨性(ε= 合金磨损量 / 标样 NM500 磨损量）及洛氏硬度随着合金成分的不同都发生了明显的变化：A~E 试样碳和硼含量基本不变，随着锰含量从 2%~10%，材料的硬度在 45~65 HRC 变化，呈现先上升后下降的趋势；相对耐磨性的变化与硬度变化一致，合金的耐磨性较好；冲击韧度在 1.5~3.0 波动，呈现先下降后上升的趋势，与硬度的趋势完全相反。

表4 合金的性能

Tab.4 Properties of the alloy

锰含量(%)	2	4	6	8	10
洛氏硬度(HRC)	45.30	64.37	63.43	53.33	48.10
冲击韧度 /(J/cm²)	3.00	1.50	2.35	2.35	2.85
相对耐磨性 ε	7.83	10.83	9.05	4.50	4.28

合金的洛氏硬度(宏观硬度)是由基体和硬质相的硬度分布以及体积分数共同决定的[10]。试样 A 由于枝晶中铁素体含量最多，所以硬度最低，冲击韧度较好。由上文可知锰含量高于 6%时会出现三元包晶组织，其硬度比共晶组织低，并且锰含量较高时组织中会出现部分残余奥氏体，所以试样 B~E 随着锰含量的增多，鱼骨状共晶组织减少，菊花状组织增多，导致随着锰含量的增多冲击韧度提高，硬度下降。本合金的硼含量较高，硼化物较多，使得合金的冲击韧度不太好，但耐磨性良好。后期实验可以适当减少合金中的硼含量，进行合适的热处理提高合金的性能。

3 结论

(1)高硼耐磨合金的铸态组织由树枝状基体组织和共晶组织(γ+硼化物)构成。随着锰含量的升高，初生奥氏体转变为马氏体的量增多，铁素体量减少，并且低锰含量时有少量珠光体出现，高锰含量时没有珠光体，但有部分残留奥氏体。

(2)在高硼耐磨合金钢中，随着锰含量的升高，树枝状基体组织的含量呈下降趋势，硼化物含量变化不大。共晶组织主要以鱼骨状、长条状和板块状存在，高锰含量时会出现菊花状的三元包晶组织。

(3)随着锰含量从 2%~10%，合金的硬度在 45~65 HRC 变化，呈现先上升后下降的趋势；冲击韧度在 1.5~3.0 J/cm² 波动，呈现先下降后上升的趋势，与硬度的趋势完全相反，耐磨性较好。

参考文献：

[1] 张艳玲. 耐磨高硼低碳铸造合金的研究 [J]. 铸造，2014，63(12): 1273-1276.

[2] 钱旭东，李德，许秉坤，等. Ti-Al 和 Ti-Al-Ce 复合改性剂对高硼

铁基耐磨合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2017,27(8):1687-1692.

[3] 李颖,杜忠泽,符寒光,等. Fe-Cr-B 合金的组织性能研究与应用发展前景[J]. 热加工工艺,2012,41(22):76-79.

[4] 杨柏俊. 含铌奥-贝球铁的组织及耐磨性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2007.

[5] 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.

[6] 葛会军. 过共晶高硼铸钢组织细化研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2009.

[7] 段汉桥. 锰对高铬铸铁凝固过程和组织的影响 [J]. 热加工工艺,2001,30(3):23-25.

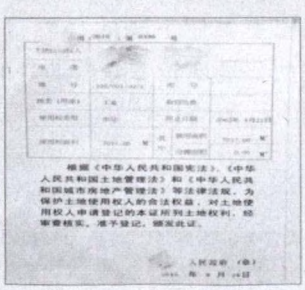
[8] 庄明辉,李慕勤,王军,等. 碳化硼对粉 / 丝复合堆焊高硼铁基合金组织结构的影响[J]. 焊接学报,2015,36(10):57-60.

[9] 严军. 高硼耐磨合金钢铸态组织与力学性能的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.

[10] 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.

转让出售信息

抢

本公司位于山东省蒙阴县境内，厂区占地65亩，钢结构厂房。铸造车间5 400 m²，机加工车间2 300 m²，制壳车间1 800 m²，打磨车间1 800 m²，4台1t中频电炉。40 t粘土砂砂处理线一条，钢丸覆膜砂浇注线一条。

铸造环评手续、土地证件齐全，另有2个闲置厂房，本公司现对外转让出售，欢迎洽谈，联系电话:15854853968。