

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5106

Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性问题探讨

刘仲礼¹, 靳国帅¹, 王玉敏¹, 陈祥²

(1. 烟台大学核装备与核工程学院, 山东烟台 264005; 2. 清华大学材料学院, 北京 100084)

摘要: 淬透性作为白口铸铁的重要基本特性, 其高低直接决定了白口铸铁的工程应用价值, 因此一直是该领域的重要研究方向。通过研究 Fe-Cr-B 白口铸铁的组织、硬度、淬透性曲线及 CCT 曲线等, 讨论了硼加入量极高情况下的淬透性问题。研究表明, 硼的加入绝大部分形成硼化物, 基体中含量极低, 而基体中少量硼的存在有利于提升材料淬透性, 促使铸态基体转变为马氏体。端淬实验及 CCT 曲线的测定也证明了 Fe-Cr-B 白口铸铁具有优异的淬透性。采用分子动力学对硼在基体的含量进行计算, 其含量在 $1 \times 10^{-4}\%$ 量级, 在该含量范围内, 硼有利于 Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性。

关键词: 白口铸铁; 共晶硼化物; 淬透性

中图分类号: TG143

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0571-05

Discussion on the Hardenability of Fe-Cr-B White Cast Iron

LIU Zhongli¹, JIN Guoshuai¹, WANG Yumin¹, CHEN Xiang²

(1. School of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. School of Materials and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The hardenability of white cast iron represents a critical fundamental property, as its level directly dictates the engineering application value of this material, thus remaining an indispensable research direction. The microstructure of the Fe-Cr-B white cast iron, hardenability curves, and CCT curves were analysed to discuss the hardenability issues when boron was added in extremely high amounts. The results show that the addition of boron mostly results in the formation of borides, and its content in the matrix is extremely low. The presence of a small amount of boron in the matrix is beneficial to the hardenability of the material, enabling the matrix to transform into martensite in the as-cast state. End quenching experiments and determination of the CCT curve also confirmed that Fe-Cr-B white cast iron has excellent hardenability. The content of boron in the matrix is calculated via molecular dynamics, and its content is at the $1 \times 10^{-4}\%$ level. Within this content range, boron is beneficial to the hardenability of Fe-Cr-B white cast iron.

Key words: white cast iron; eutectic borides; hardenability

白口铸铁应用历史较为悠久, 因组织中存在高硬度的耐磨共晶相, 所以在抗磨料磨损工况条件下具有独特的优势, 在耐磨钢铁材料中具有不可替代的地位^[1-2]。传统白口铸铁是以共晶碳化物为耐磨相, 发展经历了普通白口铸铁、镍硬白口铸铁和高铬白口铸铁 3 个阶段, 虽然耐磨性能不断提高, 但还是存在韧性偏低、抗冲击能力不足的问题^[3-5]。以共晶硼化物为耐磨相的白口铸铁的研发, 目的是获得一类韧性更好的新型白口铸铁, 这一思路首先由澳大利亚昆士兰大学的 lakeland 教授提出, 并申请了专利^[6]; 内蒙古科技大学及清华大学进行了系列研究, 证明了其可行性。研究表明^[7-11], 共晶硼化物比

共晶碳化物具有更高的硬度, 更适合用于做耐磨相, 而且其韧性在高铬白口铸铁的基础上进一步提高。

众所周知, 极低的硼含量(不高于 $6 \times 10^{-3}\%$)能明显提高钢的淬透性^[12-13]。其提高淬透性的机理与常规合金元素, 如铬、锰、钼、镍等有所不同, 一般认为硼的非平衡偏析特性, 冷却时在奥氏体晶界优先析出, 阻止了铁素体的形核, 从而提高了奥氏体的稳定性^[14]。但是, 如果当硼加入量超过 $6 \times 10^{-3}\%$ 时, 反而降低钢的淬透性, 而且硼对淬透性的影响, 随着碳含量的增加而下降, 在低碳钢时提高淬透性最有效^[15-16]。

以硼化物为耐磨相的白口铸铁, 当硼加入量是常规量的百倍以上时, 根据前人研究, 硼的加入主要

收稿日期: 2025-06-10

作者简介: 刘仲礼, 1973 年生, 博士, 教授. 研究方向为铸铁、特殊钢. Email: liuzhongli@ytu.edu.cn

引用格式: 刘仲礼, 靳国帅, 王玉敏, 陈祥. Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性问题探讨[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 571-575.

LIU Z L, JIN G S, WANG Y M, CHEN X. Discussion on the hardenability of Fe-Cr-B white cast iron[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 571-575.

形成共晶硼化物^[17-18],在基体中也有存在,但难以量化。硼对白口铸铁的淬透性是有利还是有害,需要进一步研究。尤其对于白口铸铁,由于组织中一般含有超过 20%的共晶耐磨相,导热性较差,如果硼对其淬透性有害,则会大大阻碍该类材料的实际应用。本文以 Fe-Cr-B 白口铸铁为基础,讨论其淬透性问题,为工程实际应用提供参考。

1 实验材料与方法

采用 100 kg 碱性炉衬中频炉熔炼 Fe-Cr-B 白口铸铁,出炉温度为 1 550 ~1 600 °C,浇铸温度为 (1 430±10) °C,浇注标准基尔试块,基尔试块模型采用熔模方法制造。除了硼元素的含量外,Fe-Cr-B 白口铸铁其他成分的检测通过 SPECTRO LABM10 直读光谱仪确定,硼元素采用化学分析方法测得。采用 ZEISS 场发射扫描电子显微镜(Sigma300)、X 射线衍射仪(XRD, 7000X, Shimadzu, Japan)等观察组织及相分析。

按照 GB/T 225-2006 标准进行 Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性试验,奥氏体化温度 950 °C。使用膨胀仪进行材料的 CCT 曲线试验。将材料置入热膨胀仪中,从室温升到奥氏体化温度后(升温过程与热膨胀曲线实验相同),再以不同冷却速率冷却至室温(0.05、0.1、0.2、0.5、2、5、10、20、50、100、150、200 °C/s)。根据热膨胀曲线,结合金相法与硬度法,判断其在各种冷却速率下分别产生了何种相转化。然后以温度为纵坐标,时间对数为横坐标进行画图,获得连续冷却曲线,在图中标记出相转变温度点与相转变区,结合不同冷却速率下样品的金相和显微硬度,完成 CCT 曲线。

2 实验结果及讨论

2.1 化学成分、铸态组织及硬度

Fe-Cr-B 白口铸铁的化学成分如表 1 所示。

表1 Fe-Cr-B白口铸铁的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Fe-Cr-B white cast iron (mass fraction/%)

C	B	Cr	Si	Mn	Ni	V	Fe
0.27	1.66	17.23	1.07	1.32	2.67	1.23	Bal.

上述成分是典型的以硼化物为耐磨相的化学成分,具有低碳、高硼的特点,高硼主要用来形成共晶硼化物,由于碳不溶于硼化物,所以主要影响基体,低碳目的是为了基体热处理后形成强韧性较好的板条状马氏体,其铸态组织如图 1 所示。为明确各类元素在铸态集体组织中的分布情况,利用扫描电镜中的 EDS 对基体进行检测,结果如图 2 所示,XRD 衍射图谱如图 3 所示。

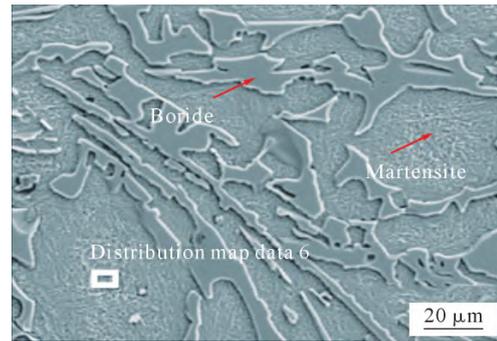


图 1 Fe-Cr-B 白口铸铁铸态组织形貌

Fig.1 As-cast microstructure of Fe-Cr-B white cast iron

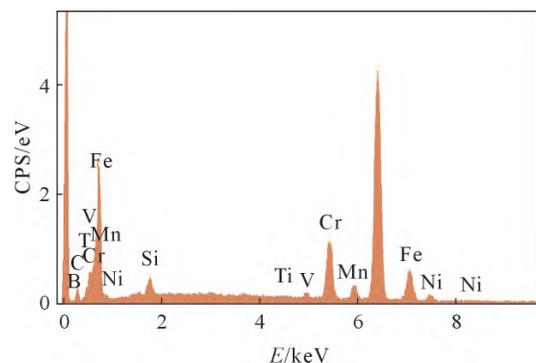


图 2 EDS 检测结果

Fig.2 EDS test results

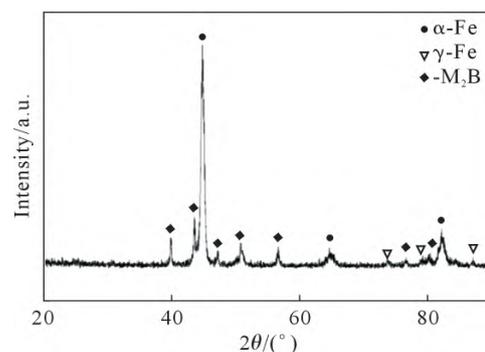


图 3 铸态 Fe-Cr-B 白口铸铁 XRD 分析

Fig.3 XRD pattern of the as-cast Fe-Cr-B white cast iron

由图 1 和 3 可以看出 Fe-Cr-B 白口铸铁铸态组织基本是由条块状共晶硼化物与基体组成。共晶硼化物形态类似于传统高铬白口铸铁中的共晶碳化物,利用 Image-pro 及 Photoshop 软件对铸态下 Fe-Cr-B 白口铸铁组织中硬质相的面积分数进行测定,平均值约为 22.4%。由图 1 可知,基体的板条状马氏体特征明显,结合对基体显微硬度的测量(表 2),可以判定基体为马氏体。在基体中,采用 EDS 检测(图 2),发现 C、Cr、Si、Mn、Ni、V 等元素峰值明显,说明在基体中存在分布,而 B 的峰很低,几乎看不到,但不能说明不存在,由作者以前的工作可知,采用的电子探针检测在基体的峰还是很明显的^[19]。

由以上微观组织及硬度检测结果,在熔模铸造冷却条件下,即非常慢的冷却条件下,基体组织大部

表2 Fe-Cr-B白口铸铁铸态硬度
Tab. 2 As-cast hardness of Fe-Cr-B white cast iron

Macro hardness (HRC)	Matrix micro hardness (HV)	Boride micro hardness (HV)
54.1	378.3	2 164.0

分为马氏体组织,表明 Fe-Cr-B 白口铸铁具有非常好的淬透性。

2.2 端淬实验

标准端淬试验是检验钢铁材料淬透性常用的一种检测手段。本次实验采用 2 个样品进行奥氏体化,然后在试验台上进行喷水冷却。冷却结束后,进行表面加工及硬度检测。实验将 2 个相同参数样品的数据整合在淬透性曲线中,实验结果如图 4 所示。由图可知,2 个相同的样品经过相同工艺参数下的末端淬火之后表现出良好的淬透性,差距并不大。实验材料不同截面位置的硬度没有因为到喷水端距离的远近而存在起伏,相比于以往的铸铁材料会因为距离淬火端距离不同,硬度测试结果有明显降低,Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性异常稳定。这一结果也很好解释了铸态研究中为什么材料在铸锭冷速下也能够得到马氏体基体。

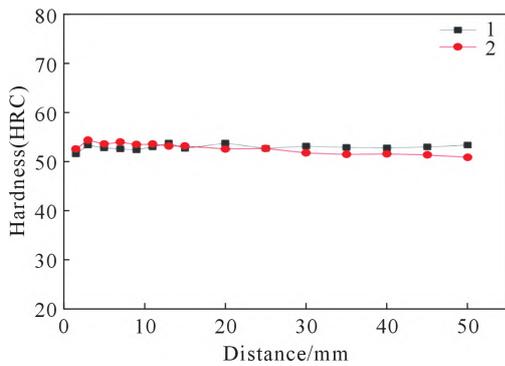


图 4 Fe-Cr-B 白口铸铁淬透性曲线
Fig.4 Hardenability curve of Fe-Cr-B white cast iron

表 3 不同冷却速度下的基体硬度

Tab.3 Microhardness of the matrix at different cooling rates

Cooling rate/(°C·s ⁻¹)	0.05	0.1	0.5	2	5	10	20	50	100
Matrix hardness(HV)	403.4	432.8	463.9	537.6	593.8	603.8	615.9	626.4	635.0

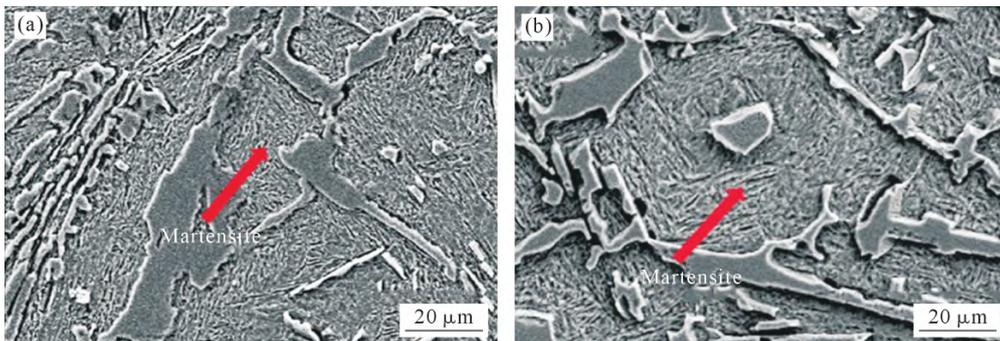


图 6 不同冷速样品的金相组织:(a) 0.05 °C/s;(b) 100 °C/s
Fig.6 Microstructure of samples at different cooling rates: (a) 0.05 °C/s; (b) 100 °C/s

2.3 CCT 曲线

根据热膨胀试验仪实验导出的数据,绘制了 CCT 曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,转变过程中只存在马氏体转变,在 CCT 曲线中没有标注其他转变区域与曲线,仅标注了 Ac1、Ac3 点与奥氏体转变区,以及 Ms、Mf 点与马氏体转变区。

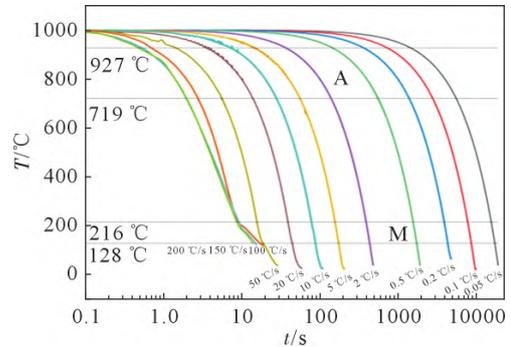


图 5 Fe-Cr-B 白口铸铁 CCT 曲线
Fig.5 CCT diagram of Fe-Cr-B white cast iron

不同冷却速度下,进行基体硬度的检测如表 3 所示。由表 3 可以看出,随冷却速度的提高,基体的显微硬度也增大,这符合低合金合金钢淬火后的性能规律。选择最低冷速和最高冷速,观察其基体形态,均为板条状马氏体。

2.4 讨论

综合铸态基体金相、硬度及端淬实验和 CCT 曲线,可以判断 Fe-Cr-B 白口铸铁具有优良的淬透性能。不论从熔模铸造冷速到能够测量的极低的冷速,如 0.05 °C/s(相当于壁厚 ≥ 100 mm 铸型中冷却速度),还是高冷速条件下,如 100 °C/s(相当于油冷)基体都能获得马氏体,这对于该类材料的应用具有极大的意义。这是由于 Fe-Cr-B 白口铸铁组织中含有超过 20% 的共晶硼化物,该硼化物将极大地降低材料的导热性能,在材料奥氏体化后进行冷却时,会因材

料的导热性能较差而产生较大热应力,加上材料的相变应力,则极易产生淬火裂纹。如果材料具有良好的淬透性,空冷即能使基体产生马氏体相变,使得产生淬火裂纹的趋势大大降低。在本文所研究的 Fe-Cr-B 白口铸铁中,虽然硼含量超过了一般硼钢中的近 280 倍,但材料仍保持了优良的淬透性。

以上系列研究结果表明,Fe-Cr-B 白口铸铁具有优良的淬透性,这里所说的淬透性主要是指基体发生马氏体相变的能力。在设计材料成分时,材料淬透性的提高归功于只存在于基体中的 Si、Ni 合金元素;而添加的 Cr、Mn、V 等在基体中也有分布,也对 Fe-Cr-B 白口铸铁的淬透性有着积极影响,而硼的存在如何影响材料的淬透性是该材料的核心问题。从铸态组织分析可以看出,硼元素主要形成了共晶硼化物,但在基体存在的数量是多少则不得而知,从 EDS 的分析只能知道在基体中是存在的,数量难以测量。硼作为一种合金元素,可以显著提高钢的淬透性,但条件是低碳钢、低含量(不超过 $6 \times 10^{-3}\%$)。从 Fe-Cr-B 白口铸铁成分来看,满足低碳钢条件,硼含量未知。从材料具有的良好淬透性来判断,基体中硼含量应该不高,具体含量需要后续采用更先进的检测手段进行分析。

采用分子动力学手段对 B 在基体中的含量进行了估算,计算所用软件为 Thermo-Calc,数据库为 TCFE3。计算 900、1 000 和 1 100 °C 条件下,硼在基体中的平衡含量如表 4 所示。

表4 不同温度下,硼在基体中的平衡含量
Tab.4 Balanced B content in the matrix at different temperatures

900 °C	1 000 °C	1 100 °C
$1 \times 10^{-3}\%$	$6 \times 10^{-3}\%$	$3 \times 10^{-4}\%$

上述分析可知,基体中的 B 含量在 $1 \times 10^{-4}\%$ 量级,结合图 2,说明 B 在基体中是存在的,但其含量很低。在低含量条件下,Fe-Cr-B 白口铸铁中基体的硼有利于材料的淬透性,所以 Fe-Cr-B 白口铸铁具有优异的淬透性,可以满足空冷淬火。

3 结论

(1)Fe-Cr-B 在熔模铸造条件下,基体即可转变为马氏体,显示了较好的淬透性。

(2)端淬实验及 CCT 曲线的测定结果表明,Fe-Cr-B 白口铸铁具有优良的淬透性,即使在极低冷速条件下,基体也可以转变成马氏体,可以直接空冷淬火。

(3)实验和分子动力学的计算表面,基体中存在的硼含量不高,有利于材料的淬透性。

参考文献:

- [1] QUINTERO-ORTIZ J, GUERRA F V, BEDOLLA-JACUINDE A, PACHECO CEDEÑO J S. Improving the sliding wear and strain behavior of a high-chromium white cast iron modified with Mn and Al[J]. *Wear*, 2025, 16(12): 1387-1390.
- [2] PURBA R H, SHIMIZU K, KENTA KUSUMOTO TODAKA T, SHIRAI M, HARA H, ITO J. Erosive wear characteristics of high-chromium base multi-component white cast irons[J]. *Tribology International*, 2021, 159: 106982.
- [3] JIAN Y X, HUANG Z F, XING J D, ZHENG B C, SUN L, LIU Y Z, LIU Y M. Effect of improving Fe₂B toughness by chromium addition on the two-body abrasive wear behavior of Fe-3.0 wt% B cast alloy[J]. *Tribology International*, 2016, 101: 331-339.
- [4] CAMKERTEN R, DAVUT K, YILMAZ T, NALCACI B, ERDOGAN M. The spheroidization behavior of low alloy white cast iron and its effect on impact toughness and wear resistance [J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2025, 1011: 178373.
- [5] 刘仲礼,陈祥. Fe-Cr-B 白口铸铁的组织与性能研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(4): 371-375.
LIU Z L, CHEN X. Study on the microstructure and properties of Fe-Cr-B white cast iron [J]. *Foundry Technology*, 2023, 44 (4): 371-375.
- [6] GUO C Q. Improving the ductility and toughness of Fe-Cr-B cast irons[D]. Brisbane: Division of Materials, the University of Queensland, 2002.
- [7] SONG S C, YI Y L, XING J D, FU H G. Microstructure evolution, crystallography, nanomechanical properties and wear-resistance of multicomponent M₂B in Fe-B alloy [J]. *Journal of Materials Research*, 2022, 37(8): 1429-39.
- [8] JIAN Y X, NING H Y, HUANG Z F, WANG Y, XING J D. Three-body abrasive wear behaviors and mechanism analysis of Fe-B-C cast alloys with various Mn contents[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1301-1311.
- [9] JIAN Y X, HUANG Z F, LIU X T, SUN J L, XING J D. Microstructure, mechanical properties and toughening mechanism of directional Fe₂B crystal in Fe-B alloy with trace Cr addition [J]. *Journal of Materials Science Technology*, 2020, 57:172-179.
- [10] YI Y L, XING J D, REN X Y, FU H G, LI Q, YI D W. Investigation on abrasive wear behavior of Fe B alloys containing various molybdenum contents[J]. *Tribology International*, 2019, 135: 237-245.
- [11] GAO J, YAN Z L, LIU S, ZHAO Y F, LI T S, TONG W P. Microstructure and mechanical properties of a mo alloyed Fe-Cr-B alloy[J]. *Vacuum*, 2023, 214: 112238.
- [12] AUBAKIROV D, ISSAGULOV A, KVON S, KULIKOV V, CHSHERBAKOVA Y, ARINOVA S. Modifying effect of a new boron-barium ferroalloy on the wearresistance of low-chromium cast iron[J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1153.
- [13] JIANG Z Q, FU H G, YIN E S, TIN Y T. Investigation and application of high strength low alloy wear resistant cast steel [J]. *Materials Technology*, 2011, 26(2): 58-61.
- [14] XIN X Y, XU Y R, GAO L, FENG Y, HU S H, XU J X. Improved phase stability and mechanical properties in Ni-Mn-Sn-B alloys:

- experiments and first-principles calculations [J]. Journal of Alloys Compounds, 2024, 986: 174090.
- [15] HE B B, XU W, HUANG M X. Effect of boron on bainitic transformation kinetics after ausforming in low carbon steels[J]. Journal of Materials Science Technology, 2017, 33(12): 1494-1503.
- [16] ZHENG Y X, ZHANG L, LIN Y, WANG J, WANG K, GUO Z H, CAO R F, ZHU L G, WANG B, ZHANG D, FENG J. Effect of compound addition of Ti-B on hardenability and hot ductility of 22MnB5 hot stamped steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 1173-1193.
- [17] YI Y L, XING J D, WAN M J, YU L L, LU Y F, JIAN Y X. Effect of Cu on microstructure, crystallography and mechanical properties in Fe-B-C-Cu alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 708: 274-284.
- [18] WANG Y W, XU L Y, ZHAO L, HAN Y D, HAO K D, REN W J. Friction and tribocorrosion behavior of Fe-Cr-B alloys manufactured by laser directed energy deposition[J]. Tribology International, 2023, 189: 108932.
- [19] 刘仲礼. 高硼白口铸铁的研究[D]. 北京:清华大学,2008.

(责任编辑:李亚敏)