热处理对高硼低碳铸钢显微组织和性能的影响

师文校[1], 符寒光[2,3], 蒋志强[2], 黄黎明[3], 邢建东[3]

(1. 焦作电力集团股份有限公司, 河南 焦作 454001; 2. 郑州航空工业管理学院工业工程系, 河南 郑州 450015; 3. 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘　要: 在含碳量小于 0.2% 的低碳铸钢中加入 1.0% B, 获得了高强度高硼耐磨铸钢, 并研究了淬火温度对高硼铸钢显微组织和性能的影响。结果显示, 在 900 ~ 1 050 ℃内淬火, 均可获得单一的马氏体组织, 淬火温度的变化对硬度影响不明显。随着淬火温度提高, 硼化物由连续网状分布变成断网状分布, 导致冲击韧性提高; 淬火温度超过 1 000 ℃后, 冲击韧性变化不明显。另外, 在 900 ~ 1 050 ℃内淬火, 高硼铸钢均具有优良的耐磨性。

关键词: 高硼铸钢; 淬火; 显微组织; 硬度; 冲击韧性; 耐磨性

中图分类号: TG156.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1004 - 7638(2007)04 - 0056 - 06

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Property of High Boron and Low Carbon Cast Steel

Shi Wenxiao[1], Fu Hanguang[2,3], Jiang Zhiqiang[2], Huang Liming[3], Xing Jiandong[3]

(1. Jiaozuo Electric Power Group Ltd, Jiaozuo 454001, Henan, China; 2. Department of Industrial Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautics, Zhengzhou 450015, Henan, China; 3. School of Materials Science & Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: A high boron cast steel with high strength and wear - resistant is obtained by adding 1.0% B to the low carbon steel whose carbon content is < 0.2%. The effect of quenching temperature on the microstructures and properties of high boron cast steel is investigated. The results show that the unitary martensite matrix can be obtained by quenching at 900 ~ 1 050 ℃, and the hardness of high boron cast steel has no obvious change when the quenching temperature is changed. With the rising of quenching temperature, the boride transforms from continuous networked into broken network, and the impact toughness of high boron cast steel increases. After the quenching temperature being above 1 000 ℃, the impact toughness has no obvious change. Moreover, high boron cast steel has excellent wear resistance quenching at 900 ~ 1 050 ℃.

Key words: high boron cast steel; quenching; microstructure; hardness; impact toughness; wear resistance

0 引言

近年来, 耐磨材料科学蓬勃发展, 耐磨材料的种类在不断增多, 质量在不断提高。其中铬系耐磨材料应用最普遍, 特别是高铬铸铁, 因其良好的耐磨性一直深受用户欢迎。为了改善高铬铸铁的淬透性, 通常需要加入镍、钼等元素[1-3]。随着冶金工业的发展, 镍、钼、铬等合金的供应日趋紧张, 价格飞速上

收稿日期: 2007 - 05 - 22

作者简介: 师文校(1974—), 男, 河南辉县人, 焦作电力集团股份有限公司副总工程师, 主要从事材料和铸造技术研究工作。

涨,高铬铸铁生产成本不断攀升。因此,尽快开发低成本、高性能耐磨材料,满足我国工业生产的需要,已显得迫在眉睫。硼是我国富有元素,价格低且稳定,在低碳铸钢中,加入适量硼,可以获得高硬度的硼化物,改善材料的耐磨性,另外,基体组织通过淬火可获得强韧性好的板条马氏体,使高硼低碳铸钢具有优良的力学性能和耐磨性。目前,以硼作为主要合金元素的铸造铁基合金的研究国外已有报道[4~8]。日本学者[4]介绍了具有不同硼、碳含量的 Fe - 25Cr - C - B 合金,硼含量大于 2%和碳含量小于 1%时,铸态下转变成贝氏体,而硼小于 1%和碳大于 2%的合金则转变成珠光体。淬火条件下,合金都转变成了马氏体。低碳高硼合金即使在铸态下也有很高的硬度,接近 HRC60。白俄罗斯的 Kukuy 等人[5]研究了硼对铸钢显微组织和性能的影响,发现铸钢中硼的加入可增加硼化物数量,并明显增加钢的硬度,但降低钢的韧性,在此基础上提出了工程应用高硼钢的硼加入量应控制在 4.0%以内。俄罗斯学者[6]介绍了一种高硬度和高耐磨性还保留有较好韧性的用于铸造的高硼钢,其成分(%)为:0.2 ~ 0.5C, 2.1 ~ 3.5B, 0.15 ~ 0.60Si, 1.5 ~ 6.0Mn, 1.0 ~ 4.0Co,这种材料中含有较多的钴,将显著增加高硼钢生产成本。俄罗斯的 Goldshtein 等人[7, 8]的研究发现,在含铬高硼铸钢中加入钛元素,可以使硼化物形态和分布改善,随着钛含量的增加,共晶硼化物由$(Cr, Fe)_2B \rightarrow (Cr, Fe)_2B + TiB_2 \rightarrow TiB_2 + (Cr, Fe)_2B \rightarrow TiB_2$ 转变,使硼化物由连续网状分布,变为断网状、孤立状分布,有利于改善高硼铸钢的力学性能。笔者主要研究淬火温度对含 1.0% B 和小于 0.2%C 铸钢显微组织、力学性能和耐磨性的影响,为高硼铸钢的工业应用提供指导。

1　高硼铸钢成分设计

碳:碳是高硼铸钢中的主要元素,其主要作用是提高淬硬性和淬透性。

硼:硼是高硼铸钢中的主要合金元素,主要是为了得到高硬度的硼化物,改善高硼铸钢耐磨性,部分硼溶入基体,改善高硼铸钢的淬透性和淬硬性。

钛:高硼铸钢中加钛是为了细化凝固组织,改善硼化物形态和分布,提高高硼铸钢的力学性能。

锰:锰是扩大 γ 相区的元素,锰在高硼铸钢中除了部分进入硼化物外,主要溶于基体,明显改善高硼铸钢淬透性。

铬:铬在高硼铸钢中部分进入硼化物,提高硼化物的稳定性,部分进入基体,改善高硼铸钢的淬透性和回火稳定性。

铜:铜是非碳化物和硼化物形成元素,主要溶于基体,明显提高基体淬透性,改善耐蚀性。

高硼铸钢主要化学成分见表 1。

表 1　高硼铸钢主要化学成分

Table 1　Chemical composition of high boron cast steel　　%

C	B	Ti	Mn	Cr	Cu	Si	P	S
0.15 ~ 0.20	0.8 ~ 1.0	< 0.5	0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	< 0.5	< 1.0	< 0.04	< 0.04

2　试验方法

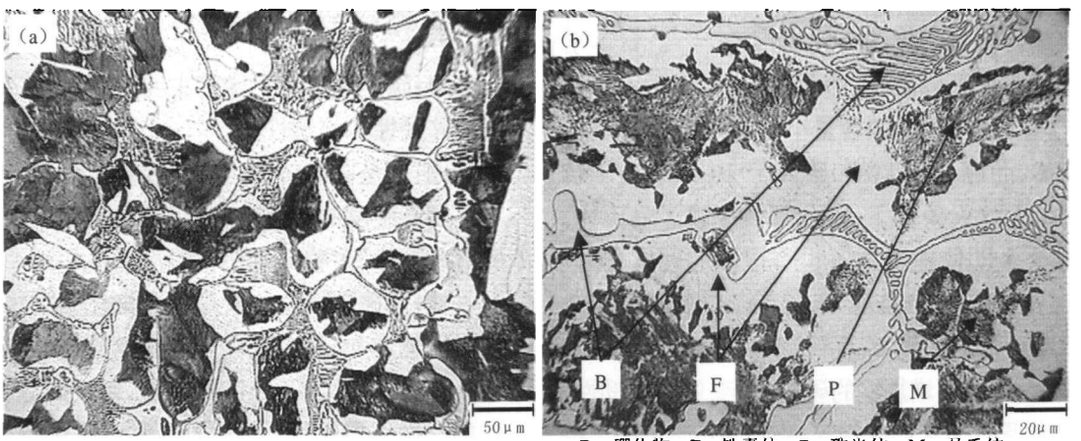
高硼铸钢在 50 kg 中频感应电炉内熔炼，炉料为生铁、废钢、硼铁、硅铁、锰铁、铬铁、钛铁和电解铜。待钢水过热至 1 600 ~ 1 650 ℃时，经造渣、扒渣和铝终脱氧后，加入钛铁和硼铁合金。所有试样都取自蜡模浇注的基尔试块，合金化学成分列于表 1。试样热处理在箱式电阻炉中进行，淬火加热温度分别为 900、950、1 000 和 1 050 ℃，回火温度为 200 ℃。在 JB30A 型摆锤式冲击试验机上测试高硼铸钢的冲击韧性 a_k，试样尺寸为 20 mm × 20 mm × 110 mm，无缺口。用 HR—150A 型硬度计测量高硼铸钢硬度，试样尺寸为 15 mm × 15 mm × 12 mm。用 Neophot32 光学金相显微镜进行试样金相组织的观察与分析。采用 MXP21VAHF 高温 X 射线衍射仪对高硼铸钢中的物相进行定性分析，具体参数：采用 Cu - K_α 辐射，管流管压分别为 200 mA 和 40 kV，扫描速度为 2 (°) /min，10° ~ 90°耦合连续扫描，步进 0.02°。磨损试验在 MLD - 10 型三体动载冲击磨损试验机上进行，试样尺寸 10 mm × 10 mm × 30 mm，下试样对磨材料为 40Cr，其硬度 (HRC) 61.2，磨料是 0.5 ~ 1.5 mm 精制石英砂，流量 1 kg/min，冲击频率 150 次/min，冲击功 2.5 J，试验前试样跑合 5 min，冲 3 000 次后测量失重值。磨损数据取 3 个试样的平均值，失重值用精度万分之一克的电光分析天平测定。

3 试验结果及分析

3.1 高硼铸钢凝固组织研究

高硼铸钢的低倍和高倍铸态金相组织如图 1 所示,由图 1 可见,铸态组织中存在大量共晶硼化物,X 射线衍射分析(图 2)表明,高硼铸钢中的硼化物为 Fe_2B。基体组织是铁素体、珠光体和少量马氏体,由初生奥氏体和共晶奥氏体在凝固冷却过程中转变而成。高硼铸钢中的 Fe_2B 具有高硬度和良好的热稳定性,测试其硬度(HV)为 1 430 ~ 1 480。另外,Fe_2B 硼化物沿晶界呈网状分布。

3.2 淬火温度对高硼铸钢显微组织的影响



B—硼化物; F—铁素体; P—珠光体; M—马氏体

图 1 铸态高硼铸钢低倍(a)和高倍(b)组织

Fig.1 Macrostructure (a) and microstructure (b) of as - cast high boron cast steel

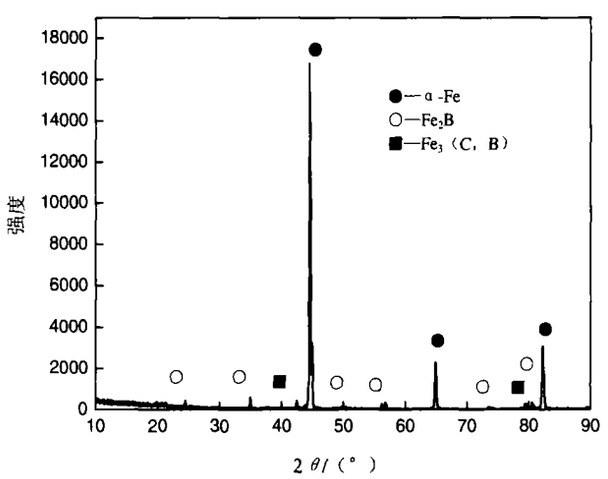


图 2 铸态高硼铸钢的 X 射线衍射谱线

Fig.2 X - ray diffraction spectrum of as - cast high boron cast steel

高硼铸钢的铸态组织为铁素体、珠光体、少量马氏体和分布不均匀的网状共晶碳化物,高温加热的目的是使部分硼化物溶解于基体,提高基体的淬透性和淬硬性。淬火温度对高硼铸钢显微组织的影响见图 3,随着淬火温度提高,高硼铸钢基体组织中溶解铬、锰、硼、碳等元素增加,淬透性增加。在 900 ~ 1 050 ℃淬火,基体都可获得单一板条马氏体,且随着淬火温度升高,硼化物形态由连续网状向断网状分布转变,如图 3(e)和 3(g)中的箭头所示。高温热处理时,共晶硼化物由表面自由能较高的网状向断网状转化是热力学过程发展的必然趋势,从图 3(e)和图 3(g)中可以看出,溶解过程中共晶硼化物发生断网主要是由于在网的某些局部位置优先溶解的结果,且这些部位主要是位于网的连接缝隙处和网状连接中的"缩颈"部位即网状连接中的截面突变部位。

3.3 淬火温度对高硼铸钢力学性能的影响

淬火温度对高硼铸钢硬度和冲击韧性的影响见图 4,随着淬火温度的升高,高硼铸钢硬度变化不明显,这是因为高硼铸钢在 900 ~ 1 050 ℃淬火,都可获得单一的板条马氏体基体组织,且硼化物稳定性好,淬火温度的变化对硼化物数量的影响不明显,因此硬度变化不大。由于高硼铸钢中的碳含量较低,因此基体的淬硬性较差,淬火后的硬度(HRC)仅维持在 48 ~ 50。同时由于基体碳含量较少,高硼铸钢具有良好的强韧性,比高铬白口铸铁明显提高,且随着淬火温度提高,出现较多断网状硼化物,韧性进一步提高,淬火温度超过 1 000 ℃后,由于基体中固溶的碳、硼、锰、铬等元素增加,基体塑性下降,尽管硼化物形态的进一步改善有利于冲击韧性的提高,综合结果导致冲击韧性变化不明显。淬火温度 1 000 ℃时,硬度(HRC)值接近50,冲击韧性超过16 J/cm^2,高硼铸钢具有良好

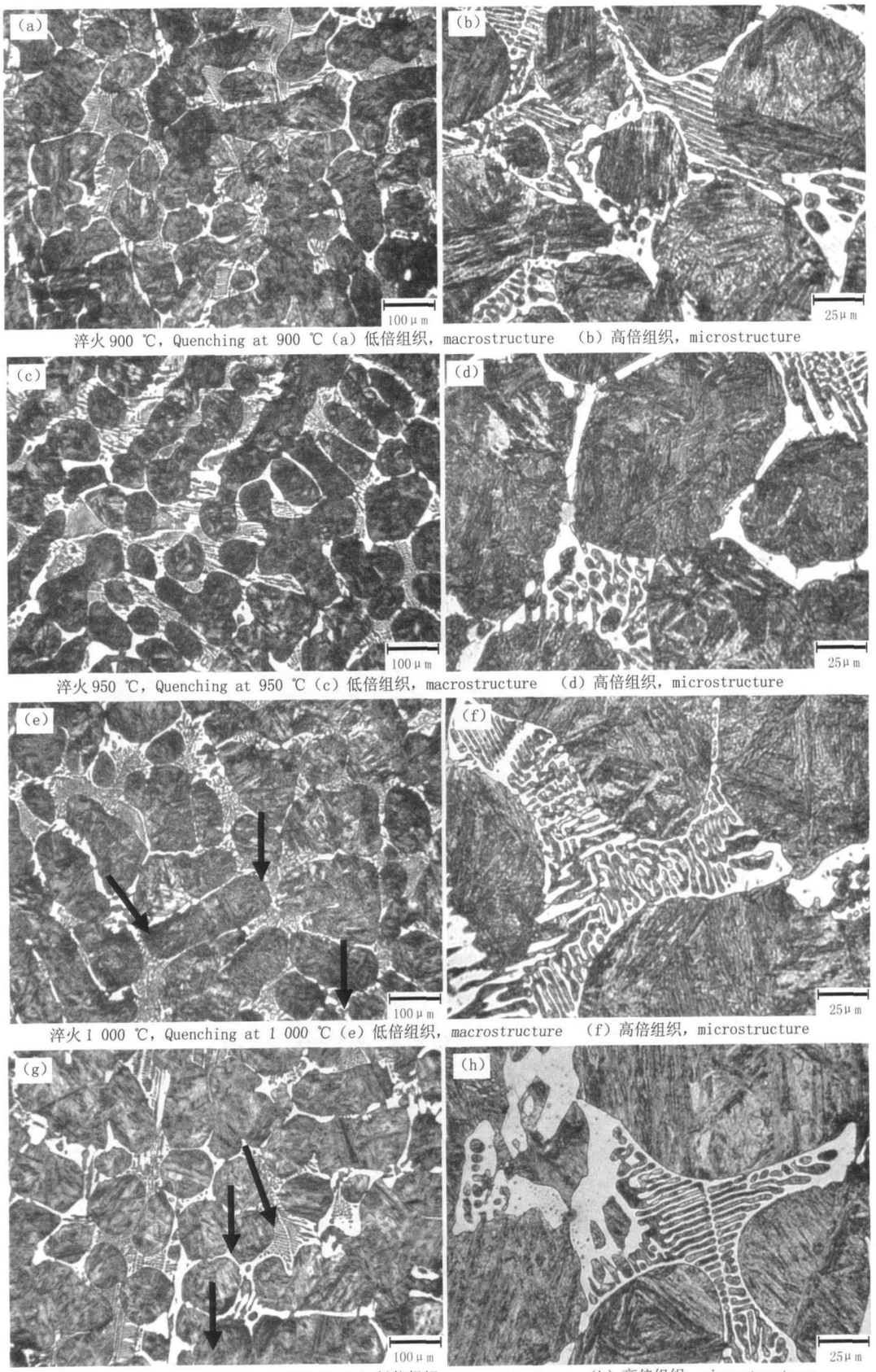


图 3　高硼铸钢在不同淬火温度时后的金相组织

Fig.3　Structure of high boron cast steel quenching at different temperature

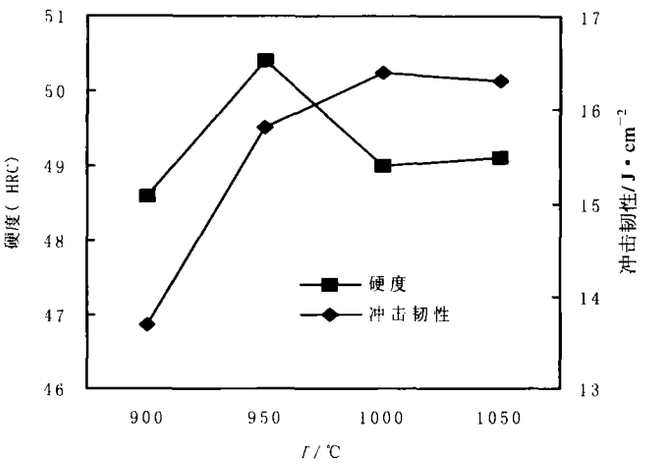


图 4 淬火温度对高硼铸钢硬度和冲击韧性的影响

Fig.4 Effect of quenching temperature on hardness and impact toughness of high boron cast steel

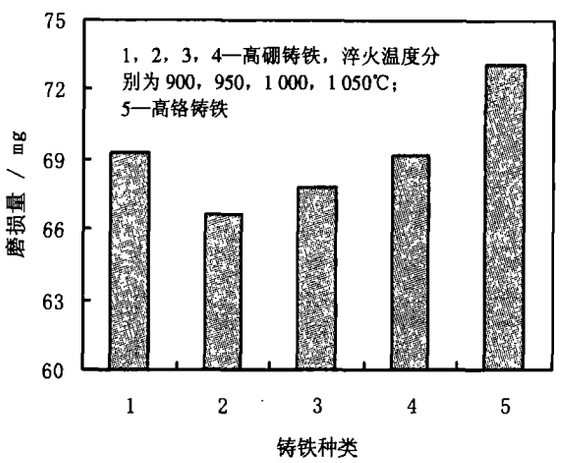
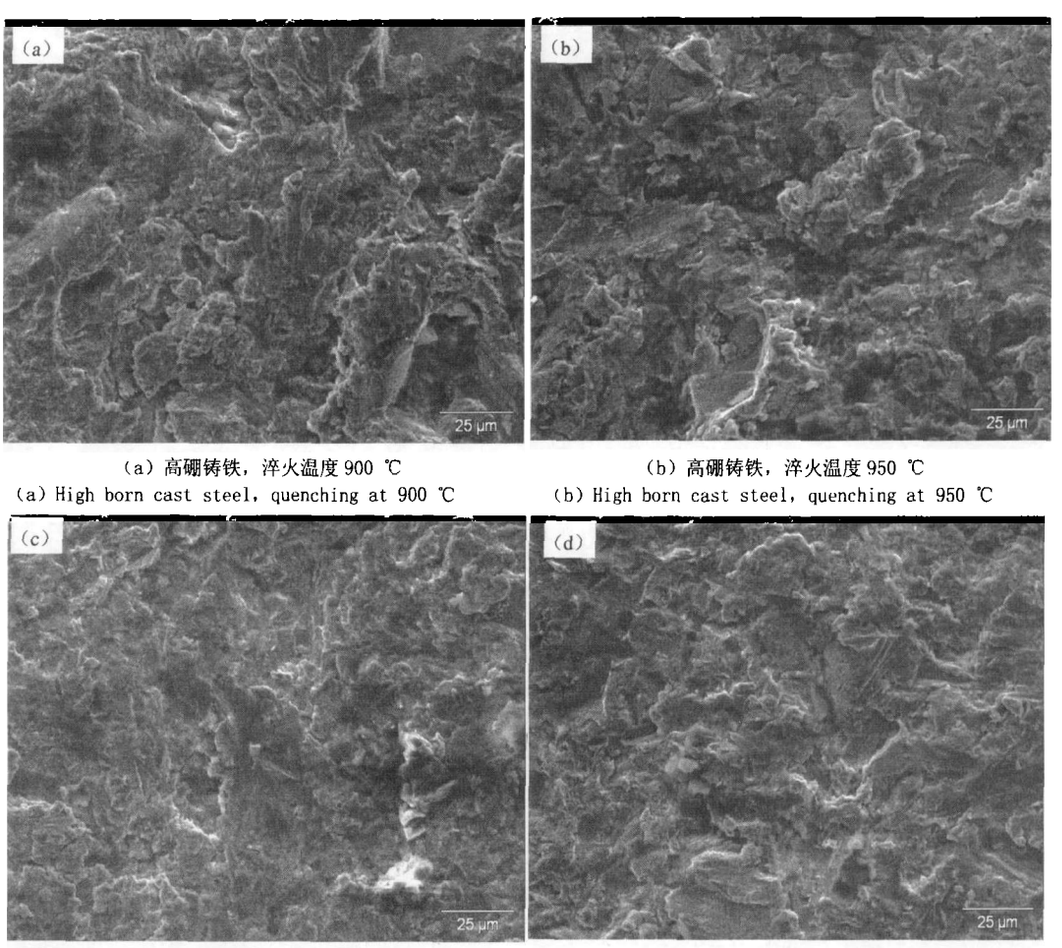


图 5 高铬白口铸铁和不同淬火温度下高硼铸钢的磨损失重对比

Fig.5 Contrast of wear loss for high chromium cast iron and high boron cast steel at different quenching temperature



(a) 高硼铸铁，淬火温度 900 ℃

(a) High born cast steel, quenching at 900 ℃

(b) 高硼铸铁，淬火温度 950 ℃

(b) High born cast steel, quenching at 950 ℃

(c) 高硼铸铁，淬火温度 1 050 ℃

(c) High born cast steel, quenching at 1 050 ℃

(d) 高铬白口铸铁

(d) High chromium white cast iron

图 6 高硼铸钢在不同温度淬火后与高铬白口铸铁磨损面形貌对比

Fig.6 Contrast of worn surface for high boron cast steel quenching at different temperature and high chromium white cast iron

的综合力学性能。

3.4　淬火温度对高硼铸钢耐磨性的影响

淬火温度对高硼铸钢耐磨性的影响见图 5,淬火温度的变化对高硼铸钢的磨损失重影响不明显。从图 5 的结果看,高硼铸钢比 Cr15Mo3 高铬白口铸铁具有更低的磨损失重和更好的耐磨性。在冲击磨损过程中,磨粒流过上试样和下试样,试样在磨损过程中不仅受到磨粒在冲击力作用下对试样表面的刻入和挤压等磨损过程,而且还在下试样带动下产生切向力对试样表面切削、推挤和犁沟等磨损过程。高硼铸钢由于基体含碳量低,塑性好,具有良好的抵抗塑性变形的能力,而且含有较多的高硬度硼化物,具有良好的抵抗切削磨损的能力,因此表现出优异的耐磨性,其磨损面形貌见图 6(a) ~ 图 6(c)。高铬铸铁尽管硬度高(HRC 60 ~ 62),具有良好的抵抗切削磨损的能力,但基体含碳量高,脆性大,抵抗塑性变形能力差,磨损过程中易产生疲劳、剥落,其磨损面形貌见图 6(d),因此,磨损失重高于高硼铸钢,耐磨性不及高硼铸钢好。高硼铸钢在 900 ~ 1 050 ℃淬火,均具有优良的耐磨性。

4　结论

(1)以硼为主要合金元素,开发了一种含 0.8% ~ 1.0% B、0.15% ~ 0.20% C、0.8% ~ 1.0% Cr、< 0.5% Ti、0.8% ~ 1.2% Mn、< 0.5% Cu 和 < 1.0% Si 的高硼低碳铸钢,该钢具有良好的韧性和耐磨性。

(2)对高硼铸钢采用较高温度加热淬火和适当温度回火可明显改善硼化物形态及分布,显著提高其冲击韧性。

(3)高硼铸钢经 900 ~ 1 050 ℃淬火,可获得单一的板条马氏体基体组织。

(4)淬火温度变化对高硼铸钢的磨损失重影响不明显,冲击磨损条件下的磨损失重小于高铬白口铸铁,高硼铸钢在 900 ~ 1 050 ℃淬火,具有优良的耐磨性。

参考文献:

[1] Arikan M M, Cimenoglu H, Kayali E S. The Effect of Titanium on the Abrasion Resistance of 15Cr - 3Mo White Cast Iron[J]. Wear, 2001, 247: 231 - 235.

[2] Dogan O N, Hawk J W, Laird H G. Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White irons[J]. Met. Mater. Trans., 1997, 28A: 1315 - 1328.

[3] Guo M L T, Chiang C H, Tsao C Y A. Microstructure and Wear Behavior of Spray - formed and Conventionally Cast Rolls of 18Cr - 2.5Mo - Fe Alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A326: 1 - 10.

[4] Hartono W, Goto S, Aso S, Komatsu Y. Wear Characteristics of Fe - 25Cr - C - B Eutectic Cast Alloys[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2004, 17(4): 206 - 212.

[5] Kukuy D, Nevar N, Fasevich Yu. The Effect of Boron on the Structure and Properties of a Cast Steel[A]. Proceeds of the 65th World Foundry Congress[C]. Gyeongju, Korea, 2002.247 - 352.

[6] Nevar N F, Belskii E I. High - boron Alloy Steel for Casting[P]. SU 1581771, 1990 - 07 - 30.

[7] Goldshtein Ya E, Mizin V G. Some Peculiarities of the Structure of High Boron Steels[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1989, 30(7): 479 - 484.

[8] Egorov M D, Sapozhnikov Yu L, Shakhnazarov Yu V. Effect of Carbon Content on the Structure, Hardness, and Thermal Stability of Boron - chromium Cast Steels[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1989, 30(5): 387 - 391.

编辑　杨冬梅