

添加硼和热处理工艺对高铬白口铸铁组织和性能的影响

吕刚磊, 刘 军, 刘正颖, 宋海涛
(郑州科技学院机械工程学院, 河南郑州 450064)

摘要: 通过光学显微镜和扫描电镜观察以及硬度、冲击性能和耐磨性测试, 研究了添加硼和热处理工艺对高铬白口铸铁组织和性能的影响。结果表明, 对加硼0.5%的高铬白口铸铁进行热处理, 在不降低韧性的情况下提高了耐磨性。改进的热处理工艺方案B与常规热处理工艺相比, 改善了常规9645和含硼9630两种合金的磨损和硬度性能, 而且提高了含硼9630合金的耐冲击性。

关键词: 高铬白口铸铁; 加硼合金; 热处理工艺; 铸铁组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2018) 06-0529-05

Effects of Boron Addition and Heat Treatment on the Microstructure and Properties of High Chromium White Cast Iron

LÜ Gang-lei, LIU Jun, LIU Zheng-ying, SONG Hai-tao
(College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, Henan, China)

Abstract: The effects of boron addition and heat treatment on the microstructure and properties of high chromium white cast iron were studied by optical microscopy and scanning electron microscopy, as well as the tests of hardness, impact properties and abrasion resistance. The results show that after the high chromium white cast iron with 0.5% boron addition is heat-treated, the wear resistance of the alloy can be increased without reducing the toughness. Comparing with the conventional heat treatment process, the improved heat treatment process B not only improves the wear resistance and hardness properties of two alloys including the traditional alloy 9645 and the boron-containing alloy 9630, but also improves the impact resistance of the boron-containing alloy 9630.

Key words: high chrome white cast iron; boron-containing alloy; heat treatment process; cast iron microstructure; mechanical property

高铬白口铸铁是继普通白口铸铁和镍硬铸铁发展起来的第三代白口铸铁。高铬白口铸铁含铬量大于11%, 铬、碳含量的比值在4~8之间。这种条件下, 高硬度的 M_7C_3 型碳化物基本全部代替了 M_3C 型碳化物。 M_7C_3 型的碳化物以孤立中空六角形存在, 和呈网状连续分布的 M_3C 型碳化物比较, 大大增强了基体连续性, 而使整体材料的韧性显著提高^[1]。对于较高的铬浓度, 渗碳体变得不稳定, 并且被 M_7C_3 孤立中空六角形碳化物替代。碳化铬的显微硬度在HV1 500~1 800的范围内, 而渗碳体的显微硬度在HV1 000~1 200的范围内。白口铸铁具有优异的耐磨性, 但由于高的碳化物浓度, 致使韧性太低^[2], 常规热处理又难以在不降低韧性的情况下增加白口铸铁的耐磨性^[3]。

本试验对加硼0.5%的高铬铸铁进行热处理, 观察

其微观组织的变化, 并对其硬度、耐磨性和耐冲击性进行研究, 以期在不降低韧性的情况下增加耐磨性。

1 试验方法

本试验对常规白口铸铁(9645)和含硼白口铸铁(9630)采用不同热处理工艺, 然后对合金组织和性能进行研究。利用感应炉熔化合金, 砂型铸造, 浇注尺寸为80 mm×400 mm×400 mm的试样。两种合金的化学组成如表1所示。

试样在电炉中进行热处理, 第一种热处理方案是常规热处理, 即先在1 050 °C下奥氏体化4 h, 在空气中冷却, 然后在450 °C回火4 h, 在空气中冷却。其他热处理方案根据奥氏体化温度和回火温度的不同编码分别为A、B、C、D、E、F和G, 其热处理工艺参数如表2所示。

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(18B460020); 河南省科技厅自然科学基金项目(172102210536); 河南省科技厅科技计划项目(20171103000226)。

收稿日期: 2017-02-27收到初稿, 2018-01-19收到修订稿。

作者简介: 吕刚磊 (1983-), 男, 副教授, 主要从事机械设计制造及其自动化。电话: 0371-67899901, E-mail: 328993407@qq.com

表1 两种白口铸铁的化学成分

Table 1 The chemical compositions of two kinds of

合金	white cast iron								$w_B/\%$
	C	Si	Mn	Ti	Cr	Mo	B	Fe	
常规白口铸铁 (9645)	2.70	0.55	1.0	0.06	22	1.6	-	余量	
含硼白口铸铁 (9630)	2.80	0.60	0.90	0.04	22	1.1	0.5	余量	

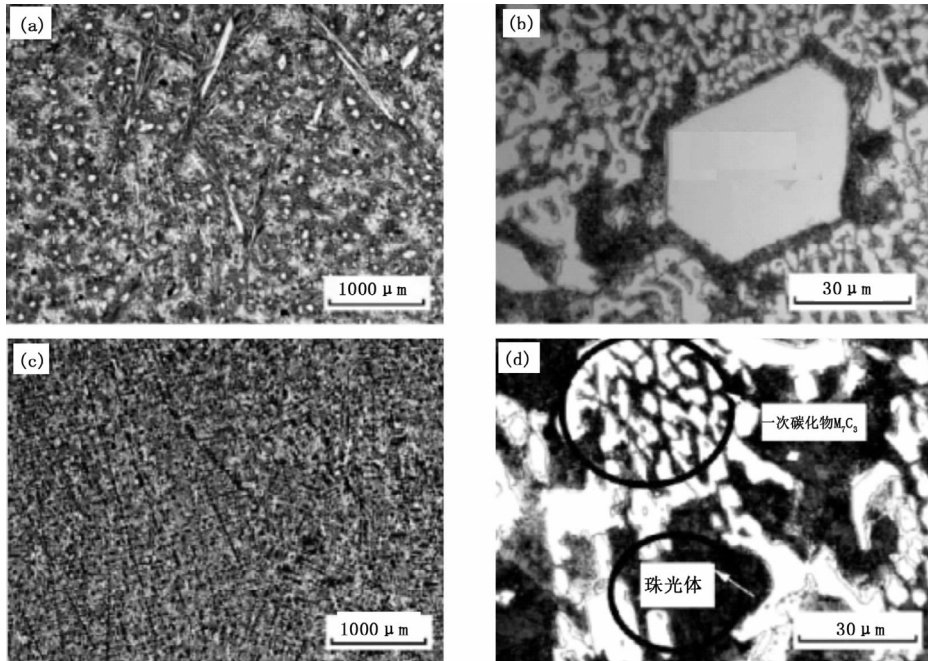
利用型号NIKON L160光学显微镜与型号JEOL JSM 6435FFEG扫描电镜进行显微组织观察。利用EMCO通用测试设备与ZWICK 1501冲击测试设备分别进行洛氏硬度和冲击试验^[4]。利用直径为12 mm的 Al_2O_3

表2 热处理工艺参数

Table 2 Heat treatment process parameters

热处理方案	热处理工艺
常规	1 050 °C下奥氏体化4 h, 出炉空冷+450 °C回火4 h, 出炉空冷
方案A	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+970 °C, 奥氏体化2.5 h, 出炉空冷
方案B	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+970 °C奥氏体化4 h, 200 °C回火4 h, 出炉空冷
方案C	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+970 °C奥氏体化4 h, 出炉空冷+在450 °C下回火4 h, 出炉空冷
方案D	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+在1 000 °C下奥氏体化4 h, 出炉空冷+在200 °C下回火4 h, 出炉空冷
方案E	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+在1 000 °C下奥氏体化4 h, 出炉空冷+在450 °C下回火4 h, 出炉空冷
方案F	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+在1 100 °C下奥氏体化4 h, 出炉空冷+在200 °C下回火4 h, 出炉空冷
方案G	600 °C下亚临界热处理6 h, 出炉空冷+在1 100 °C下奥氏体化4 h, 出炉空冷+在450 °C下回火4 h, 出炉空冷

与常规热处理不同, 在600 °C下亚临界热处理方案A, 使基体中的二次碳化物沉淀均匀化。9630和9645合金经热处理方案A后的微观组织如图2所示, 它们是在亚临界处理后, 再在970 °C下进行马氏体转变。图中可见, 9630合金的基体有大量的粗大二次碳化物析出, 说明970 °C不足以使奥氏体完全均匀化, 而且粗大二次碳化物体积百分比随着铬含量的增加而增加。



(a)、(b) 9645合金; (c)、(d) 9630合金

图1 合金铸态微观组织图

Fig. 1 The as-cast microstructures of two kinds of alloys

磨损球以3 m/s线速率和20 N负载下连续10 min磨损试验得到 Al_2O_3 的损失重量 (g)。

2 结果与讨论

2.1 显微组织研究

9645和9630合金铸态微观组织如图1所示。含硼合金 (9630) 含有六方晶系 M_7C_3 碳化物和共晶碳化物, 缓慢冷却, 形成细的珠光体组织。常规9645合金缓慢冷却, 基体完全是珠光体。对于9645常规合金, 组织由枝晶状奥氏体基体和粗板状一次 M_7C_3 碳化物组成。

较高的铬导致碳在基体中的不均匀分布, 这使得低碳区域变成马氏体, 高碳区域变成珠光体。亚临界处理后的高铬白口铸铁 (600 °C), 有二次碳化物析出, 在970 °C这些二次碳化物未溶解, 在基体中析出, 一次 M_7C_3 碳化物变成球状。对于9645常规合金, 铸态组织在热处理后没有改变很多, 枝晶状奥氏体转变成粗马氏体, 在亚临界处理期间析出非常细小的碳化物。

不同热处理后两种合金的显微组织分别如图3和图4所示。与热处理方案A不同，热处理方案B在200 °C下回火4 h，基体完全是马氏体，并且存在相对粗的碳化物。热处理方案C，在450 °C下回火，粗化了二次碳化物。热处理方案D和E，奥氏体化温度为1 000 °C，富含碳的基体完全转变成马氏体。热处理方案F和G，奥氏体化温度为1 100 °C，由于一次和二次碳化物的部分

溶解，在基体中的碳量增加，在稳定化处理之后形成残余奥氏体，二次碳化物在回火后略微析出。

对于9645合金，在热处理（亚临界和回火）中，二次碳化物变粗并且数量增加，枝晶状组织保持未溶解，并且一次碳化物部分保持其自身的针状形态，而在9630合金中，一次碳化物为球状，均匀分散，因而含硼9630合金比9645合金具有较高的耐磨性。

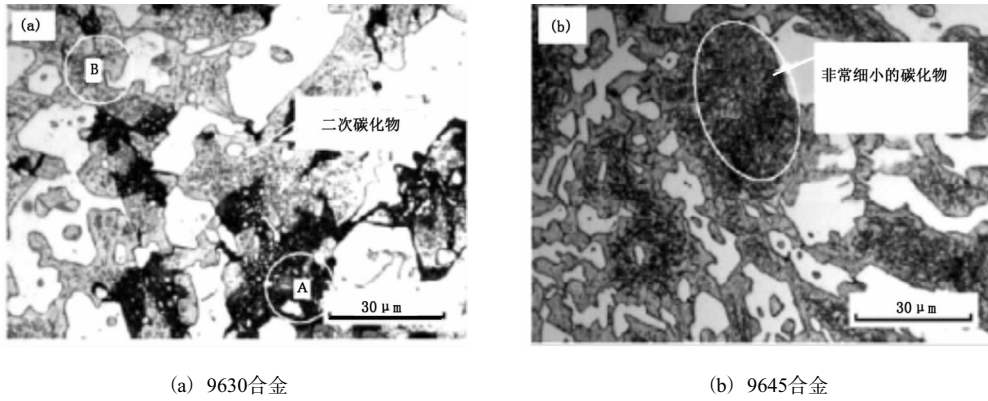


图2 热处理方案A后的合金微观组织

Fig. 2 The microstructures of two alloys after heat treatment A

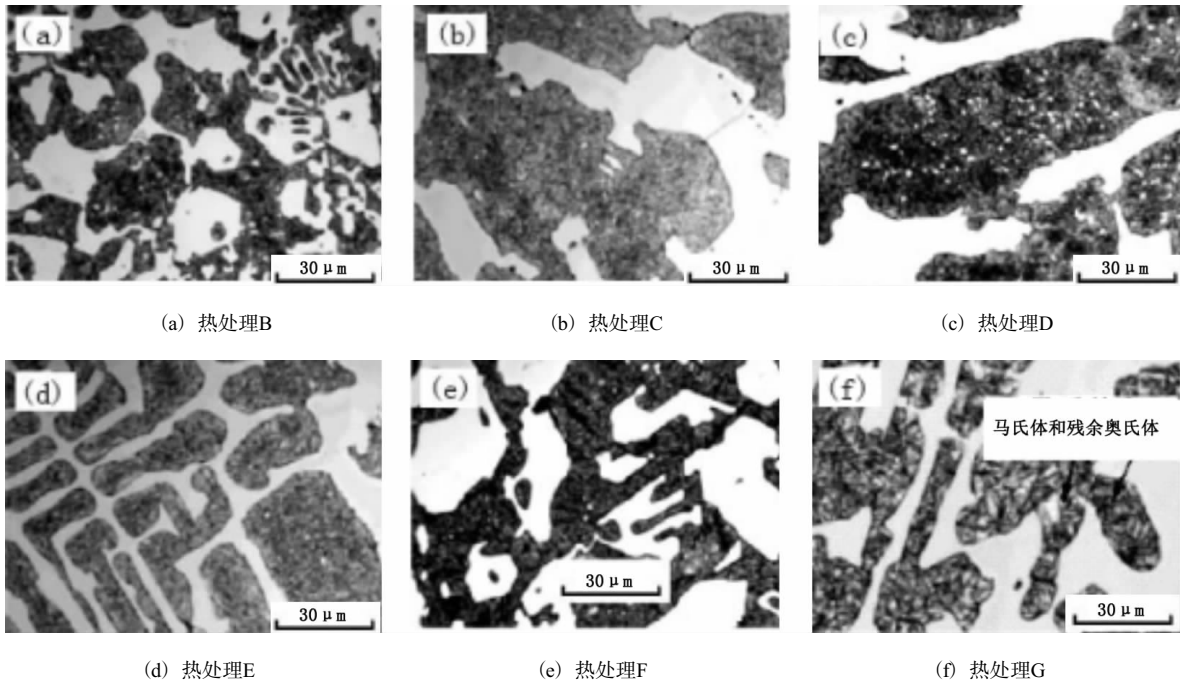


图3 含硼9630合金在不同热处理后的微观组织

Fig. 3 Microstructures of boron-containing alloy 9630 after various heat treatments

对于9645合金，970 °C和1 000 °C是热处理的临界温度，1 000 °C以上为不稳定温度，在亚临界热处理期间(600 °C)，析出的二次碳化物溶解，如果热处理的临界温度提高到1 100 °C，则硬度、耐磨性会降低，这种现象的主要原因是由于高的热处理临界温度增加了残余奥氏体量^[7]，当基体中的碳量增加时，在高碳马氏体基体中形成更稳定的残余奥氏体，当再次回火温度升高到450 °C时，由于二次碳化物的粗化，耐磨性降低^[8]。

图5为9630合金的SEM和EDS分析结果。事实上，在含硼9630合金中，一次碳化物是富铬的高温 M_7C_3 碳化物，通过亚临界热处理，稳定的含硼 $M_{23}C_6$ 碳化物首先析出，如图5b所示。在9645合金中，一次碳化物是富铬的 Cr_7C_3 碳化物，如图6所示，这些一次沉淀的针状碳化物降低了材料的韧性。

2.2 力学性能

由上述给定的热处理方案获得的两种合金的力学性

能如表3所示。由于其组织中粗硬的一次碳化物，这些白口铸铁是脆性的，每种合金成分的抗冲击性通常较低。从表3可以看出，通过将奥氏体基体转变成马氏体和通过在二次回火期间二次碳化物的析出，使两种合金在常规热处理后，硬度和磨损性能突然提高。经过热处理方案A后，由于在亚临界热处理期间析出了二次碳化物，使奥氏体的碳含量降低，继而使硬度和耐

磨性降低。在200 °C回火的热处理方案D，析出的二次碳化物提高了耐磨性和硬度，所以经热处理方案D的9630合金获得最高的硬度。通过奥氏体化温度为1 000 °C的热处理，其中在亚临界热处理时析出的二次碳化物变得较粗，所以经热处理方案D的9630合金的冲击韧度为1.5/(J·cm²)，低于常规热处理的冲击韧度1.56/(J·cm²)。

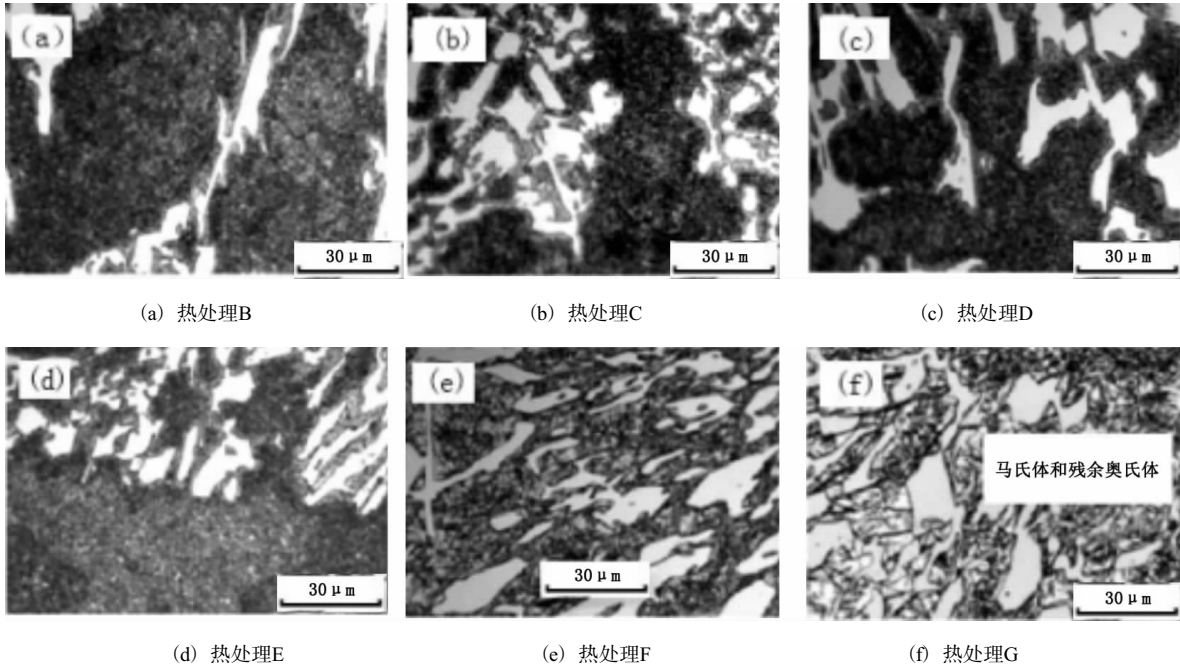
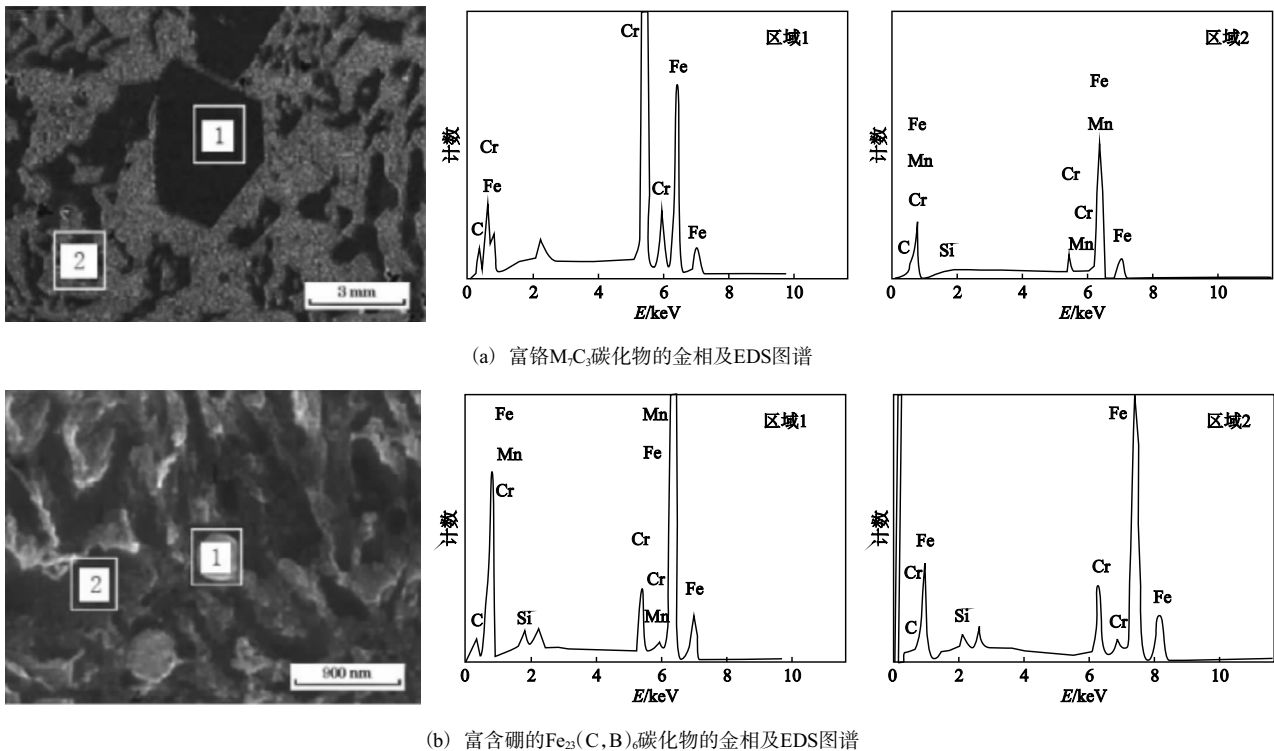


图4 9645合金在不同热处理后的微观组织

Fig. 4 Microstructures of 9645 alloy after various heat treatments



(b) 富含硼的Fe₂₃(C,B)₆碳化物的金相及EDS图谱

图5 9630合金的SEM-EDS分析图

Fig. 5 SEM-EDS analysis of 9630 alloy

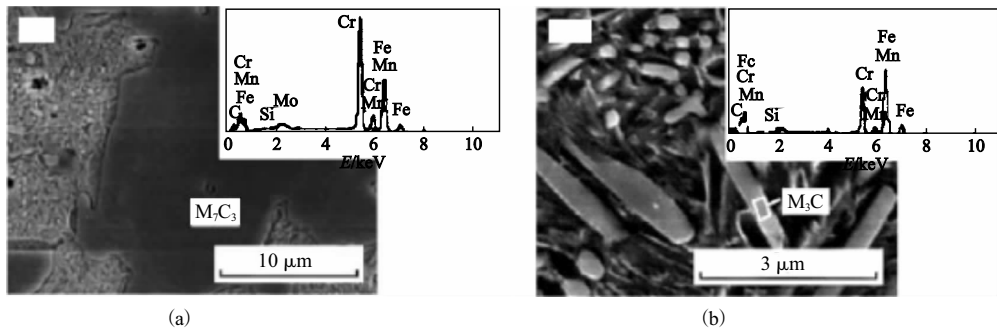


图6 9645合金的SEM-EDS分析图
Fig. 6 SEM-EDS analysis of 9645 alloy

热处理方案B是通过在970 °C进行奥氏体化4 h, 200 °C回火4 h, 出炉空冷, 出现了非常细的一次沉淀碳化物和非常细的马氏体, 因此9630合金获得最佳冲击/磨损和硬度性能, 耐磨性为198.7 g, 比常规热处理

提高了145%, 硬度达到HRC62.8, 比常规热处理提高了3.9%。与常规热处理得到的冲击韧度和硬度相比, 在不降低韧性的情况下提高了耐磨性, 从而找到了一种提高高铬白口铸铁综合力学性能的热处理工艺方案。

表3 两种合金在不同热处理后的力学性能

Table 3 Mechanical properties of two kinds of alloys after different heat treatments

热处理类型	合金	硬度HRC	冲击韧度/(J·cm ²)	磨损面积/μm ²	耐磨性/g
铸造	9 630	41.3	1.12	41 080.88	1
	9 645	42.9	1.10	35 875.11	1.1
常规热处理	9 630	60.4	1.56	505.8	81.21
	9 645	60.2	1.41	427.48	96.1
热处理工艺A	9 630	55.6	1.045	9 597.64	4.2
	9 645	58.8	1.025	4 518.8	9.09
热处理工艺B	9 630	62.8	2.3	206.69	198.7
	9 645	60.65	1.22	361.93	113.1
热处理工艺C	9 630	61.7	1.09	393.81	104.3
	9 645	60	0.8	605	67.9
热处理工艺D	9 630	63.6	1.5	183.14	224.3
	9 645	62.9	1.3	540.85	75.9
热处理工艺E	9 630	61.9	1.13	365.04	112.5
	9 645	61.7	1.5	546.33	75.1
热处理工艺F	9 630	63.4	1.22	205.3	200
	9 645	59.3	1.5	688.7	59.6
热处理工艺G	9 630	62.5	1.13	395.55	103.85
	9 645	58.3	1.54	712.71	57.6

3 结论

对常规白口铸铁(9645)和含硼0.5%白口铸铁(9630)采用不同热处理工艺, 观察其微观组织的变化, 并对其硬度、耐磨性和材料的耐冲击性进行研究, 找到了一种合理的热处理工艺方案, 即在970 °C进行奥氏体化4 h, 200 °C回火4 h, 出炉空冷。经这种热处理后的含硼0.5%白口铸铁(9630)与常规热处理相比, 在不降低韧性的情况下提高了耐磨性, 与常规热处理相比耐磨性提高了145%, 同时也改善了合金的硬度性能, 硬度达到HRC62.8, 比常规热处理提高了3.9%。

参考文献:

[1] 李峰, 黎振华, 岑启宏. 提高亚共晶高硼白口铸铁性能的研究[J]. 铸造, 2016, 28 (4): 255-258.

[2] 艾云龙, 丁家圆, 邓锋. 铬系白口铸铁的研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (3): 417-421.
 [3] 曾静, 李智, 吴煜, 等. 硼对铬系白口铸铁性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2016 (8): 99-102.
 [4] 库光全, 苏勇, 龚胜伟. 热处理工艺对高铬磨球组织与性能的影响研究[J]. 铸造, 2011, 21 (6): 29-31.
 [5] 董允, 林晓婷, 姜晓霞. 铬、钼对不锈钢腐蚀与腐蚀磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 22 (6): 39-42.
 [6] 张小彬, 刘常升, 吕俊英, 等. 镍基高温合金长期时效过程中第二相的析出[J]. 东北大学学报, 2005, 26 (4): 253-256.
 [7] 魏爱玲. 镍基合金028材料在高含氯离子环境中的抗腐蚀性[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (3): 427-432.
 [8] 谢锡善, 董建新, 胡尧和. 铁镍基高温耐蚀合金的研究与发展[J]. 世界钢铁, 2009, 9 (1): 50-55.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2018年第6期)