

淬火温度对 Cr23 高铬铸铁组织性能的影响

李毅^{1, 2}, 赵继云¹, 朱鹏霄^{2, 3}

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 江苏徐工工程机械研究院有限公司, 江苏徐州 221004;
3. 中国矿业大学化工学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 通过光学显微镜、显微硬度、洛氏硬度及冲击试验, 研究了不同淬火温度对Cr23高铬铸铁组织性能的影响, 并采用MMW-1立式万能磨损试验机对Cr23的磨损性能进行了测试分析。结果表明: 900 °C淬火后Cr23高铬铸铁中铸态组织未完全消失; 950 °C淬火回火后Cr23高铬铸铁的组织为白色的块状、条状碳化物和回火马氏体, 二次碳化物弥散分布在基体上; 1 000 °C淬火回火后Cr23高铬铸铁中的组织由回火马氏体、残余奥氏体及长条状碳化物组成, 残余奥氏体及回火马氏体都呈现灰黑色。随着淬火温度的增加, 高铬铸铁的硬度先升后降, 冲击韧性呈下降趋势。高铬铸铁中弥散分布的碳化物可有效提高其耐磨性, 回火马氏体基体为碳化物提供支撑, 防止其剥落。试样经过950 °C淬火+250 °C回火后抗磨性最好, 较1 000 °C淬火+250 °C回火处理的试样提高了41.4%。

关键词: Cr23高铬铸铁; 显微组织; 碳化物; 冲击韧性; 抗磨性

高铬铸铁是继白口铸铁和镍硬铸铁之后发展起来的第三代耐磨材料^[1], 其Cr元素的含量为10%~30%, 由于其具有优异的耐磨性能, 在煤矿、建材、冶金等行业得到广泛应用^[2-3]。高铬铸铁最突出的特点是基体中密布的碳化物, C、Cr、Fe三种元素可以形成 M_3C 、 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 三种类型的碳化物, 其中, M_3C 碳化物的显微硬度HV为400~1 100, 以连续网状形式分布在基体中; $M_{23}C_6$ 的显微硬度HV为1 140~1 150, 是一种富铬间隙化合物; M_7C_3 型碳化物显微硬度HV为1 300~1 500, 一般以六角杆状或板条状形式分布于基体中, 对基体的割裂影响远远小于 M_3C ^[4]。

铸态高铬铸铁很少直接使用, 一般采用变质处理和热处理来改变高铬铸铁中碳化物的形态、分布和数量等, 从而改善其宏观力学性能^[5-6]。魏海鸿^[7]研究指出深冷处理不能提升铸态组织高铬铸铁的耐磨性, 但可以通过改变淬火温度来提高其耐磨性。郭健^[8]利用热处理炉进行高铬铸铁轧辊热处理工艺模拟实验, 结果表明, 高铬铸铁随着回火温度的升高, 马氏体中析出碳化物并聚集长大, 硬度呈现先升后降的趋势。种晓宇^[9]总结了耐磨钢铁中强化相的研究现状和计算材料科学在耐磨钢铁强化相研究中的应用, 分析了耐磨材料的成分设计和性能计算与实验的相互统一, 为设计新型耐磨钢铁材料奠定基础。刘秀兰^[10]研究了冷却速率对Cr23高铬铸铁凝固组织的影响, 以及各试样在热碱(NaOH, 80 °C)溶液中的腐蚀行为, 结果表明, 随着冷却速度的增加, Cr23中的碳化物和共晶团细化, 碳化物分布更加均匀; 冷却速度增加, Cr23高铬铸铁的腐蚀效率降低。国内外对Cr23型高铬铸铁的淬火温度的选择以及对其性能影响的研究较少, 本文通过对Cr23高铬铸铁进行热处理, 研究淬火温度与显微组织、冲击韧性和耐磨性之间的关系, 确定最佳淬火温度, 以期对生产实践进行指导。

1 试样制备与试验方法

本次选用自制的Cr23高铬铸铁成分如表1所示。经浇注成形后进行热处理, 其工艺如表2所示。利用线切割取金相试样, 金相试样尺寸为10 mm × 15 mm × 10 mm, 研

作者简介:

李毅(1980-), 男, 博士生, 主要研究方向为金属材料性能提升与分析。E-mail: liyi3@xcmg.com

中图分类号: TG257

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1284-04

收稿日期:

2022-10-27 收到初稿,
2023-02-17 收到修订稿。

表1 Cr23高铬铸铁成分
Table 1 Composition of Cr23 high chromium cast iron

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Co	Fe
2.670	0.688	0.590	0.020	0.018	23.536	0.522	0.263	0.157	0.104	0.028	余量

表2 Cr23高铬铸铁热处理工艺
Table 2 Heat treatment process of Cr23 high chromium cast iron

试样编号	淬火温度/℃	保温时间/h	回火温度/℃	保温时间/h
1 [#]	900	2	250	3
2 [#]	950	2	250	3
3 [#]	1 000	2	250	3

磨抛光后用4%硝酸酒精溶液浸蚀，在莱卡DMI5000M型金相显微镜观察其显微组织，同时根据GB/T 4340.1—2009采用KB 30S显微维氏硬度计测试组织的显微硬度，取三个点的硬度平均值为结果；根据GB/T 230.1—2018采用THRP-150D型数显洛氏硬度计进行硬度测试，标尺为HRC，最终的硬度为6个点的平均值；根据GB/T 229—2020标准利用PTM2200型低温摆锤冲击试验机测试冲击韧性，试样采用无缺口试样，尺寸为55 mm×10 mm×10 mm；利用MMW-1微机控制万能摩擦磨损试验机进行磨损试验，试验机转速为200 r/min，载荷为300 N。试样尺寸为9.8 mm×9.8 mm×20 mm的正方体试样，磨损试验结束后用酒精溶液在超声清洗仪中清洗干净并吹干，用万分之一的分析天平称量其质量，测算试验前后的磨损量，最后利用INSPECT S50扫描电子显微镜观察磨损形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织及显微硬度分析

图1为Cr23高铬铸铁不同淬火温度的显微组织，由图1可以看出1[#]试样中铸态组织未完全消失，白色碳化物呈网状分布，初生固溶体和残余奥氏体呈灰黑色分布在基体中，亮白色的小点为二次碳化物；2[#]试样的组织为白色的块状、条状碳化物和回火马氏体，二次碳化物弥散分布在基体上；3[#]试样的组织由回火马氏体、残余奥氏体及长条状碳化物组成，残余奥氏体及回火马氏体都呈现灰黑色。对其显微组织进行硬度测试，结果如表3所示，随着淬火温度的升高，其白色碳化物和基体的硬度先升后降。

当高铬铸铁从铸态加热至900 ℃时，铬、碳等原子的扩散能力较弱，奥氏体中因含有较多的碳和铬元素，使奥氏体稳定性较高，加上淬火温度较低，导致铸态组织未完全消失，仅有小部分碳和铬以二次碳化物析出。当在950 ℃的淬火保温时，由于温度较高，碳和铬在奥氏体中的溶解度也随之升高，同时Cr、Mo等原子扩散驱动力增大，溶入奥氏体中渗碳体数量增多，提高了奥氏体的稳定性，网状碳化物逐渐转变为块状、条状碳化物，在冷却过程中，奥氏体转变成马

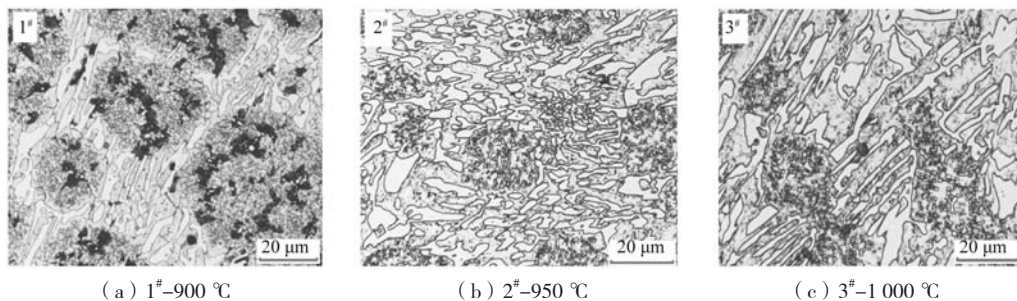


图1 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的显微组织

Fig. 1 Microstructure of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures

表3 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的显微硬度
Table 3 Microhardness of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures

试样编号	淬火温度/℃	维氏硬度HV1			平均值HV1	备注
1 [#]	900	696	706	685	696	白色区域
		534	507	518	520	灰黑色区域
2 [#]	950	757	762	743	754	白色区域
		678	682	689	683	灰黑色区域
3 [#]	1 000	753	761	739	751	白色区域
		676	681	672	676	灰黑色区域

氏体；在随后的回火过程中，合金元素继续扩散，碳化物开始弥散均匀分布^[11]。当淬火温度升至1 000 ℃时，此时Cr、Mo等原子扩散驱动力大大提高，更多的碳化物溶于奥氏体中，奥氏体中碳含量及铬含量增加，导致其稳定性过高，在随后的淬火过程中产生较多的残余奥氏体，同时淬火温度提高，会导致其晶粒长大，塑性下降。

2.2 洛氏硬度及冲击韧性试验结果分析

从图2和图3可以看出，随着淬火温度的升高，三

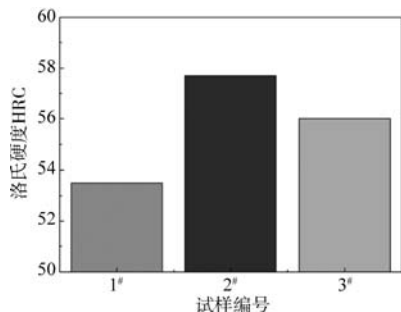


图2 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的洛氏硬度

Fig. 2 Rockwell hardness of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures

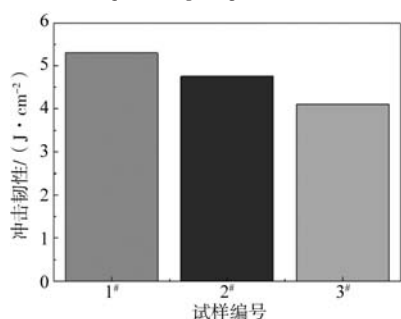


图3 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的冲击韧性

Fig. 3 Impact toughness and wear of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures

种试样的硬度先升后降，冲击韧性呈下降趋势。洛氏硬度是由碳化物和基体的显微硬度共同决定的^[12]。随着淬火温度的增加，高铬铸铁中的合金元素的扩散速度增加，导致碳化物的析出量在逐渐增加，经回火处理后二次碳化物在基体上弥散析出，使Cr23高铬铸铁得到强化，从而使硬度和韧性升高；当淬火温度升高至1 000 ℃时，Cr23高铬铸铁中析出的碳化物聚集、粗化，强化作用下降，同时晶粒会不断粗大，导致其硬度和韧性下降。

高铬铸铁的冲击韧度与内部碳化物的结构和形态关系较大^[13]。1#试样中碳化物呈网状分布，在基体中分布不均匀，但由于其奥氏体转变不充分，残余奥氏体含量较多，其韧性最好。2#试样中碳化物呈块状、条状，均匀分布在基体上，因而其韧性较高。而3#试样中

虽然也存在残余奥氏体，但是其碳化物呈长条状，对基体割裂作用严重，导致其韧性下降。

2.3 磨损试验结果分析

从图4可以看出，随着淬火温度的升高，三种试样的抗磨性先升后降。2#试样的抗磨性能较3#试样提高了41.4%，3#试样的硬度比1#试样的高，但抗磨性低于1#试样，说明韧性对抗磨性有一定的影响。从图5可以看出，1#试样的磨损形貌较严重，出现了少量剥落现象，2#试样磨损划痕较细，且没有碳化物剥落，3#试样出现了严重的剥落现象。这是由于1#试样淬火温度较低，合金元素的扩散能力较弱，奥氏体未完全溶解，导致淬火后的组织中马氏体含量较少，硬度和抗磨性较差，从而出现少量剥落现象。2#高铬铸铁经950 ℃淬火处理后，其组织为白色的块状、条状碳化物和回火马氏体，回火马氏体作为基体组织，具有较高的强度，能够为碳化物提供很好的支撑，并缓冲犁削和切削产生的高应力集中，碳化物断裂机率会大大的减小，有效保证马氏体基体对合金碳化物的保护作用^[14-15]，从而很好地提高高铬铸铁的耐磨性，同时随着淬火温度升高至950 ℃，弥散析出的二次碳化物更多、更细小，可增加裂纹扩散所需的能量，因而耐磨性较好。当淬火温度继续升高至1 000 ℃时，碳和铬在奥氏体中的溶解含量较多，导致 M_s 点下降，淬火后基体中的残余奥氏体含量增多，此时较高的淬火温度会促使晶粒继续生长，导致Cr23高铬铸铁的硬度下降，弱化抵抗磨损的能力，并降低其冲击韧性，因而其剥落最多。

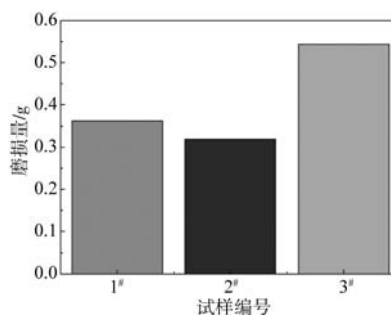
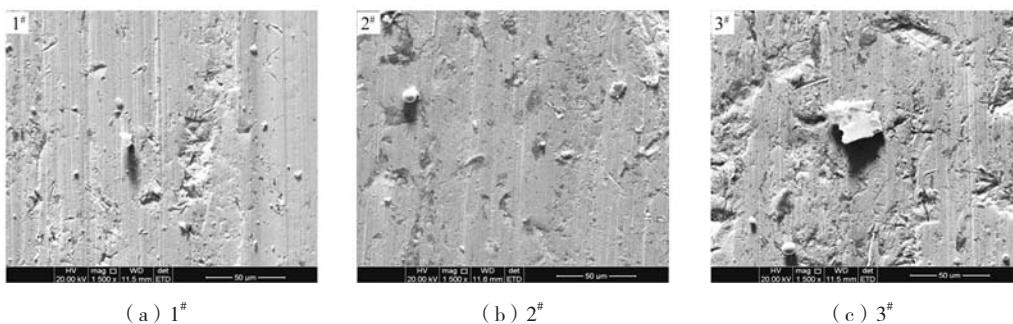


图4 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的磨损量

Fig. 4 Wear of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures



(a) 1#

(b) 2#

(c) 3#

图5 Cr23高铬铸铁不同淬火温度的磨损形貌

Fig. 5 Wear morphology of Cr23 high chromium cast iron at different quenching temperatures

3 结论

(1) 900 °C 淬火后Cr23高铬铸铁中铸态组织未完全消失; 950 °C 淬火回火后Cr23高铬铸铁的组织为白色的块状、条状碳化物和回火马氏体, 二次碳化物弥散分布在基体上; 1 000 °C 回火淬火后Cr23高铬铸铁中的组织由回火马氏体、残余奥氏体及长条状碳化物组成, 残余奥氏体及回火马氏体都呈现灰黑色。

(2) 随着淬火温度的升高, 高铬铸铁的硬度先升后降, 冲击韧性呈下降趋势。

(3) 经过950 °C 淬火+250 °C 回火处理的高铬铸铁, 其抗磨性能较1 000 °C 淬火+250 °C 回火处理的试样提高了41.4%。

(4) 高铬铸铁中弥散分布的碳化物可有效提高其耐磨性, 回火马氏体基体为碳化物提供支撑, 防止其剥落。

参考文献:

- [1] 马壮, 赵越超, 王天驰. 热处理温度对高铬铸铁组织及耐磨性的影响 [J]. 煤炭学报, 2001 (2): 191-194.
- [2] 袁子洲, 匡毅, 于金峰. 大型耐热铸钢坩埚的消失模铸造工艺 [J]. 铸造, 2004 (10): 788-791.
- [3] 翟铁. 高铬铸铁在大型自磨机衬板中的应用 [J]. 矿山机械, 2021 (4): 42-46.
- [4] 杨晓艳. Cr31过共晶高铬铸铁热处理及变质处理组织和性能的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [5] 孙凯, 付拴拴, 唐光东, 等. 高铬铸铁的研究现状 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (12): 53-33.
- [6] 刘嘉, 张锁梅, 赵爱民, 等. 热处理对高铬铸铁组织和硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2010 (9): 28-33.
- [7] 魏海鸿, 张腾, 董立新. 热处理对高铬铸钢组织和性能的影响 [J]. 电焊机, 2021 (2): 41-45.
- [8] 郭健, 杨丽娜, 郝雷, 等. 热处理工艺对高铬铸铁轧辊组织与性能的影响 [J]. 铸造设备与工艺, 2020 (6): 39-41.
- [9] 种晓宇, 汪广驰, 蒋业华, 等. 耐磨钢铁材料中强化相设计与性质计算研究进展 [J]. 中国材料进展, 2019, 38 (12): 1145-1158.
- [10] 李秀兰, 谢文玲, 周新军. 冷却速率对Cr23铸铁凝固组织及在热碱溶液中腐蚀行为的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, (21): 68-71, 79.
- [11] 史磊, 张凤营. 热处理工艺对Cr26型高铬铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2017 (4): 408-410, 417.
- [12] 石管华, 肖平安, 顾景洪, 等. 硅对烧结态高铬铸铁组织与性能的影响研究 [J]. 航空制造技术, 2019 (22): 52-57.
- [13] 苏俊义. 铬系耐磨白口铸铁 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 145-151.
- [14] CHENJE T W, SIMBI D J, NAVARA E. Relationship between microstructure, hardness, impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations [J]. Materials & Design, 2003, 25 (1): 11-18.
- [15] 王学亮, 王勇杰, 刘立艳, 等. 熔模铸造高铬铸铁抛丸器叶片耐磨性 [J]. 山东科学, 2021, 34 (5): 42-47.

Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Properties of Cr23 High Chromium Cast Iron

LI Yi^{1,2}, ZHAO Ji-yun¹, ZHU Peng-xiao^{2,3}

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Jiangsu XCMG Engineering Machinery Research Institute Co., Ltd., Xuzhou 221004, Jiangsu, China; 3. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract:

The effects of different quenching temperatures on the microstructure and properties of Cr23 high chromium cast iron were studied by optical microscope, microhardness, Rockwell hardness and impact test. The wear performance of Cr23 high chromium cast iron was tested and analyzed by using a vertical universal wear tester. As cast structure of Cr23 high chromium cast iron has not completely disappeared after quenching at 900 °C. After quenching at 950 °C and tempering at 250 °C, the microstructure of Cr23 high chromium cast iron is white block, strip carbides and tempered martensite, and the secondary carbides are dispersed on the matrix. After quenching at 1 000 °C and tempering at 250 °C, the microstructure of Cr23 high chromium cast iron is composed of tempered martensite, retained austenite and long strip carbides, and both retained austenite and tempered martensite are gray black. With the increase of quenching temperature, the hardness of high chromium cast iron first increases and then decreases, and the impact toughness shows a downward trend. The dispersed carbides in high chromium cast iron can effectively improve its wear resistance, and the tempered martensitic matrix provides support for the carbides to prevent them from spalling. The wear property of the sample after quenching at 950 °C and tempering at 250 °C is the best, which is 41.4% higher than that of the sample after quenching at 1 000 °C and tempering at 250 °C.

Key words:

Cr23 high chromium cast iron; microstructure; carbide; impact-toughness; wear resistance