

钨对高铬铸铁耐磨性能影响的研究

刘夙伟¹, 季峰², 张艳², 郭宇航²

(1. 江阴职业技术学院 机电工程系, 江苏 江阴 214405; 2. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 利用摩擦磨损实验、XRD 检测和微观组织分析研究了不同热处理工艺以及不同钨含量对高铬铸铁耐磨性能的影响。结果表明, 钨在高铬铸铁中会形成碳化物, 同时还能起到细化 M_7C_3 碳化物的作用, 有利于高铬铸铁硬度和耐磨性能的提高。过量的钨会提高奥氏体向马氏体转变的起始温度, 使基体中残余奥氏体量升高, 造成高铬铸铁耐磨性下降。钨含量为 0.8%, 经(1 020 °C×2 h, 淬火, 250 °C×4 h, 回火)热处理后, 高铬铸铁具有最佳的耐磨性能, 硬度达到 61.4 HRC。

关键词: 高铬铸铁; 碳化物; 耐磨性; 热处理; 钨

中图分类号: TG143.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)12-1126-05

Research on Influence Mechanism of Tungsten on Wear Resistance of High Chromium Cast Iron

LIU Suwei¹, JI Feng², ZHANG Yan², GUO Yuhang²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangyin Polytechnic College, Jiangyin 214405, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The effects of different heat treatment processes and different tungsten content on the wear resistance of high chromium cast iron were studied by friction and wear test, XRD test and microstructure analysis. The results show that carbides can be formed in high chromium cast iron, and at the same time, it can refine M_7C_3 carbides, which is beneficial to improve hardness and wear resistance of high chromium cast iron. However, excessive tungsten will increase the initial temperature of austenite to martensite transformation, increase the residual austenite mass in the matrix, and cause the wear resistance of high chromium cast iron to decrease. The tungsten content is 0.8%, after heat treatment (1 020 °C×2 h, quenching, 250 °C×4 h, tempering), the high chromium cast iron has the best wear resistance and the hardness reaches 61.4 HRC.

Key words: high chromium cast iron; carbide; wear resistance; heat treatment; tungsten

高铬铸铁由于其较高的硬度、优良的耐磨性能, 以及良好的淬透性和淬硬性, 是一种广泛应用于矿山、陶瓷、水泥和骨料加工行业中的耐磨材料^[1-3]。然而, 大量的工业经验表明, 要想扩大高铬铸铁的应用范围, 高铬铸铁的耐磨性能仍需进一步提高。目前强化高铬铸铁的方式有多种, 较为常见的有热处理强化和合金强化这两种。通过热处理, 二次碳化物大量析出, 基体的硬度显著增加。Li^[4]等发现, 经热处理后, 高铬铸铁的耐磨性增加, 但是随着回火温度的升高, 耐磨性能随之下降。Ibrahim^[5]等发现, Nb 的添加所形成的尺寸细小的硬质 NbC 颗粒先于共晶奥氏体析出, 阻碍了奥氏体枝晶生长的发展, 造成了基体组织的细化, 最终提高了高铬铸铁的耐磨

性能。目前, 强化高铬铸铁的合金元素主要以钒、钛、锰等为主, 而钨作为常用的添加合金元素, 既能溶于铁, 又存在于碳化物中, 对基体和碳化物都能产生一定的影响^[6]。本文将热处理强化和合金强化结合, 对比研究不同钨含量以及热处理工艺下, 高铬铸铁的硬度以及耐磨性和组织结构的之间的关系, 探究钨对高铬铸铁耐磨性能的影响机理。

1 实验材料与方法

以废钢、钼铁、低碳铬铁、钒铁、铜丝、纯钛、电解锰、纯镍和钨粉为原材料。采用非自耗真空电弧炉对每个试样都进行 5 次反复熔炼, 具体合金元素配比如表 1。

熔炼完成后用电火花线切割机将铸锭切割成尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm 的试样, 随后将试样分别在 960、990、1 020 °C 温度下保温 2 h 后油淬, 250 °C 回火 4 h, 空冷。金相组织观察选用 ZEISS 光学金相

收稿日期: 2020-06-15

作者简介: 刘夙伟(1981-), 女, 江苏南通人, 博士, 讲师。研究方向:

金属摩擦及热处理研究。电话: 15861637250,

E-mail: justlsw@163.com

表1 合金元素配比
Tab.1 Materials ratio of alloying elements

	C	Cr	Cr/C	V	Mn	Ni	Cu	Mo	Fe	W
1	2.7	22	8.14	1.8	0.6	0.4	1.0	0.6	余量	0.3
2	2.7	22	8.14	1.8	0.6	0.4	1.0	0.6	余量	0.8
3	2.7	22	8.14	1.8	0.6	0.4	1.0	0.6	余量	1.3
4	2.7	22	8.14	1.8	0.6	0.4	1.0	0.6	余量	1.8

显微镜;成分分析选用JSM-6480型扫描电子显微镜附带的能谱仪;硬度测量选用HRS-150型数显式洛氏硬度计;物相分析选用岛津公司产的XRD-6000型X射线衍射仪;磨损实验选用MLD-10型冲击磨料磨损试验机,配对试样为热轧态40Cr钢。

2 结果与讨论

2.1 硬度

图1为不同钨含量高铬铸铁铸态和热处理后的硬度测试结果。可以看到,热处理对高铬铸铁的硬度值有着显著地改善作用,高温淬火后高铬铸铁的硬度值较铸态有了大幅提升。通过高温淬火,大量硬度值较低的奥氏体转化成硬度值较高的马氏体,基体组织的硬度明显上升。此外,1 020℃淬火高铬铸铁的硬度值最高,这是因为热处理温度的升高有利于马氏体中碳含量的增加,最终导致高铬铸铁基体组织的硬度值增加。

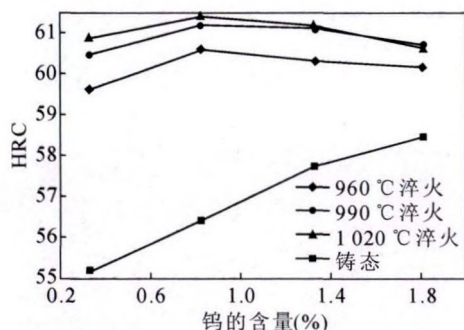


图1 热处理前后高铬铸铁的硬度测试结果

Fig.1 Hardness results of high chromium cast iron sample before and after heat treatment

另一方面,铸态高铬铸铁试样的硬度值与钨的添加量呈正比关系,而热处理后的高铬铸铁试样的硬度值出现了先增加后减小的现象。这是因为钨含量为0.3%~0.8%时,钨的添加既起到了固溶强化的作用,又增加了共晶碳化物的含量,从而使得高铬铸铁宏观硬度值明显增加^[7]。随着钨的添加量继续增加,在钨的作用下,高铬铸铁基体中马氏体转变的 M_s 点降低,基体组织中的残余奥氏体含量增加,导致高铬铸铁的宏观硬度出现下降的现象^[8]。当钨含量为1.8%时,1 020℃淬火温度下的试样硬度值

略小于990℃淬火温度下的试样,这可能是高钨含量和高淬火温度的共同作用,造成了钨型碳化物的尺寸过于粗大所致。在淬火温度为1 020℃,钨含量为0.8%时,高铬铸铁的洛氏硬度达到最大值61.4 HRC,此时抗磨高铬铸铁有着最佳的耐磨性能。

2.2 耐磨性

图2为不同钨含量高铬铸铁铸态和热处理后的磨损实验结果。磨损实验参数为:载荷2 J,磨损时间30 min。可以看到,铸态高铬铸铁的磨损量保持在一个较高的值且随着钨含量的增加并无明显变化,说明钨含量的变化对铸态高铬铸铁耐磨性的影响十分有限。热处理过后,高铬铸铁的磨损量随着钨含量的增加出现了先下降后上升的现象,与硬度测试的结果相呼应。较为反常的是,钨含量为1.8%时,热处理后高铬铸铁的磨损量较高,与图1硬度值测量的结果有些许偏差,这可能是由于钨含量过高,增加了钨型碳化物的尺寸,使其在磨损的过程中易脱落造成磨损量的增加。另一方面,在热处理过程中,钨不仅有抑制碳化物析出的作用,还会降低奥氏体向马氏体转变的 M_s 点,当钨含量大于0.8%时,钨的抑制作用加强,基体中大量的合金元素无法析出,并且基体中残余奥氏体的含量增加,此时高铬铸铁的耐磨性能严重下降。

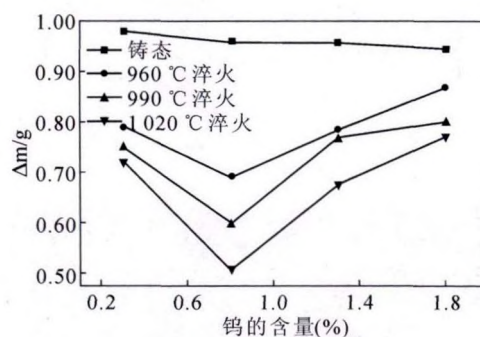


图2 热处理前后高铬铸铁的磨损实验结果

Fig.2 Wear test results of high chromium cast iron before and after heat treatment

图3为不同钨含量下高铬铸铁随着载荷和磨损时间变化的磨损结果。整体上来看,无论钨含量为多少,磨损结果几乎是一条直线,可知整个磨损过程是均匀的。对比图3(a)与(b)可以发现,高铬铸铁的磨损量对载荷的变化较为敏感,图3(a)中,当载荷从4 N增加到5 N时,含钨量为0.3%以及0.8%的高铬铸铁的磨损速度有所下降,这说明尺寸细小,分布均匀的钨型碳化物在较高的载荷作用下仍能与基体组织紧密结合。此外,无论是载荷变化还是磨损时间变化,钨含量为0.8%的抗磨铸铁的磨损量最少,有着最佳的耐磨性能。

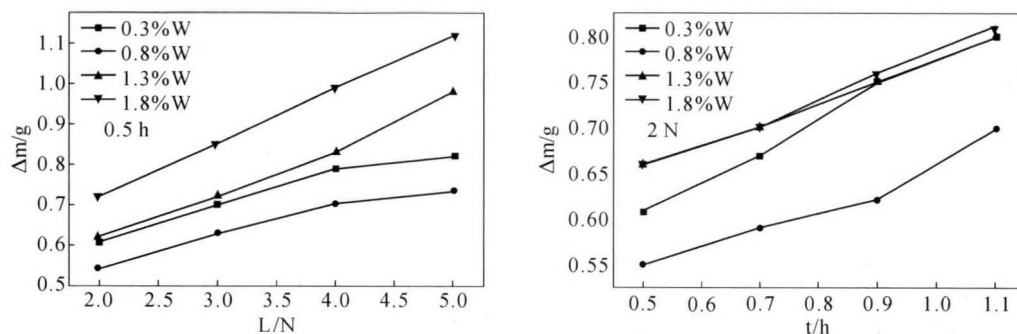


图3 热处理后高铬铸铁试样磨损量随着载荷和时间变化曲线(1 020 °C淬火,250 °C回火)

Fig.3 The wear results of high chromium cast iron specimens with load and wear time

2.3 金相组织和耐磨机理分析

图4为不同钨含量高铬铸铁在铸态和热处理后的金相组织。可以看出,随着钨添加量的增加,图中的白色组织明显细化,经热处理后,白色组织有被拉长的趋势,这应该是奥氏体转变为条状马氏体所引起的。图4(a)和(e)均是钨含量为0.3%的金相组织图,此时钨的含量较低,在图中可以看到明显的六边形白色组织,查阅文献知该成分可能是原始 M_7C_3 型碳化物^[9]。其中图4(e)中的六边形白色组织尺寸较大,与周围碳化物组织的尺寸差距明显,

在磨损过程易剥落形成磨屑^[10]。随着钨含量的逐渐增加,白色碳化物组织的形状发生变化,图4(b)中可以看到大量长条状的白色组织。为确定其组织成分,对图4(f)中长条状白色组织进行EDS测试,测试结果如图5(a)所示,Cr和Fe的原子比之和为68.04%与C的原子比(30.3%)接近7:3。同时图6(a)中的X射线衍射图中也出现了 $(Cr, Fe)_7C_3$ 的衍射峰,可以确定该白色组织为 $(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物。对 $(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物进行显微硬度测试,其硬度值为1 580 HV,这说明 $(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物对提高试样的

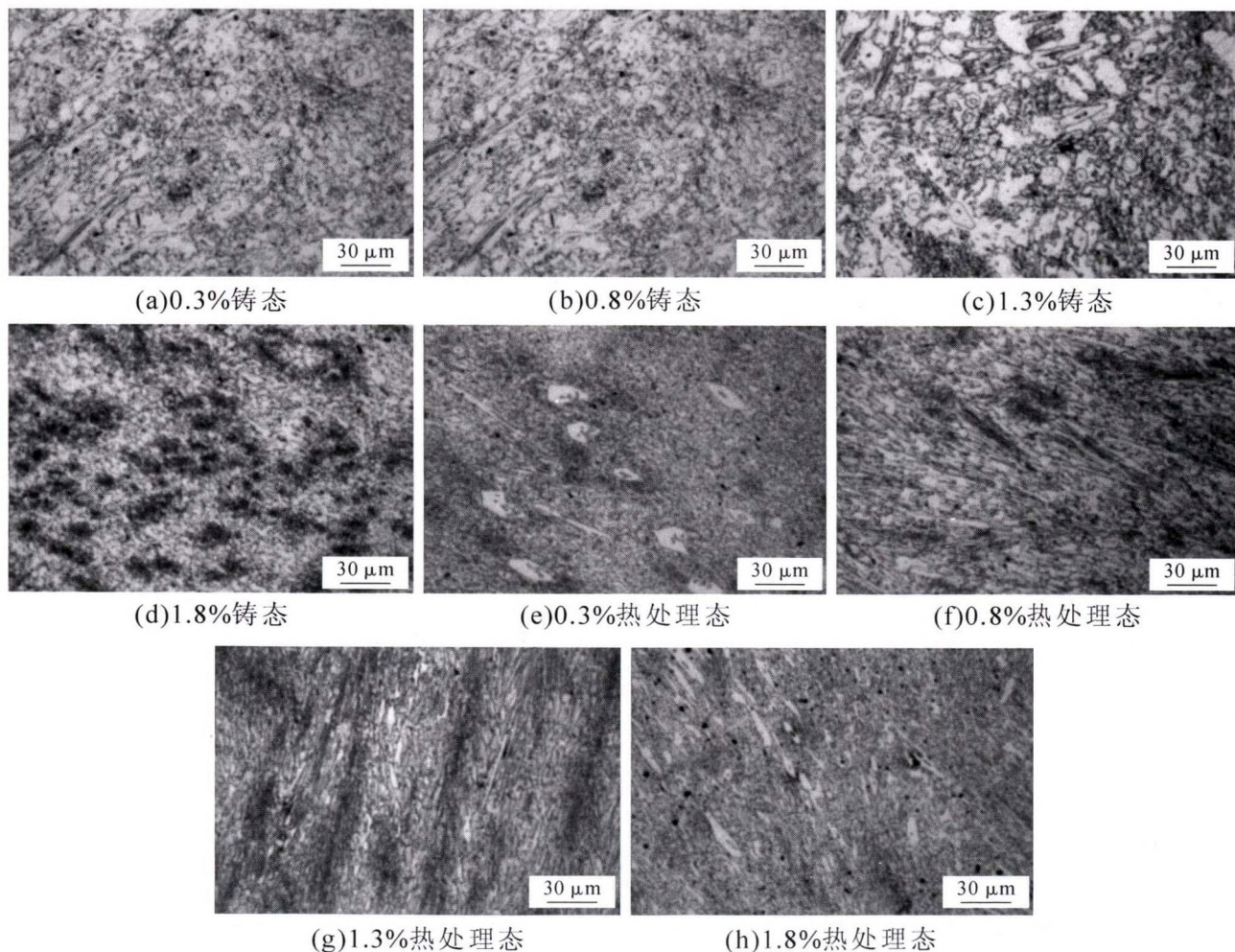
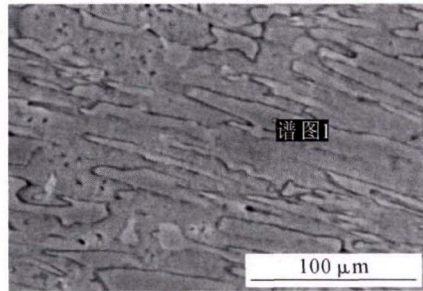


图4 不同钨含量高铬铸铁试样铸态和热处理后的显微组织图

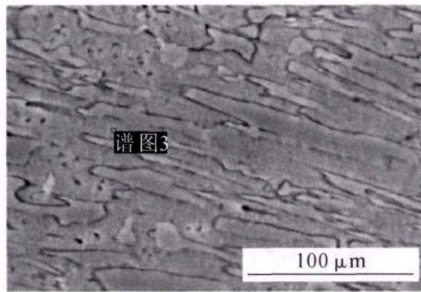
Fig.4 Microstructure of as-cast and heat treated high chromium cast iron with different tungsten content

耐磨性能起到了促进作用。对图 4(f)白色组织以外的基体组织进行了 EDS 测试,其结果如图 5(b)所示,C 的原子比为 15.54%,Fe 的原子比达到 71.4%,可以推断其主要成分为马氏体和残余奥氏体,同时固溶有少量的 Cr 元素和 Si 元素。

图 6 是钨含量为 0.3%和 1.8%的高铬铸铁试样经热处理后的 X 射线衍射图谱。可以看出,随着钨含量的变化,铬的碳化物形式并无变化,试样的组织主要由马氏体、 M_7C_3 型碳化物以及残余奥氏体构成。对比图 6(a)与(b)发现,在衍射角为 35.9° 的地方,图 6(b)中多出了 WC_{1-x} 衍射峰,说明当钨含量大于 0.8%后,钨的碳化物不仅数量增多,种类也有所增加。但是这也导致基体组织中碳含量的减少,从而增加了奥氏体转变成马氏体的起始温度,使得热处理后试样组织中残余奥氏体含量增加,组织成分不均匀,最终降低了试样的硬度值以及耐磨性能。



(a)0.8%热处理态,碳化物颗粒



(b)0.8%热处理态,基体

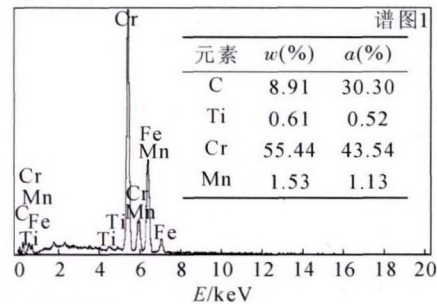
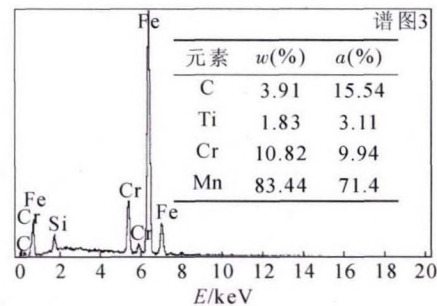
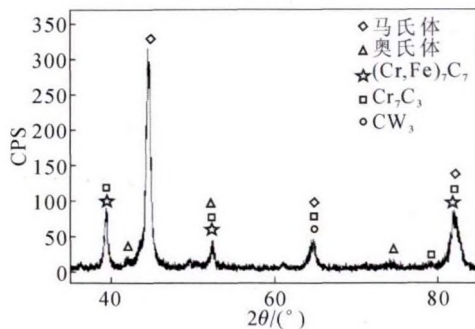
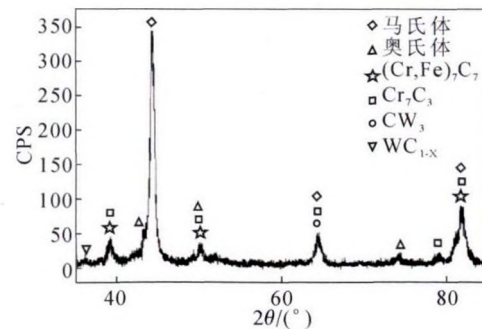


图 5 钨含量为 0.8%的高铬铸铁经热处理后的点能谱分析结果
Fig.5 EDS analysis of heat treated high chromium cast iron with 0.8% tungsten content



(a)0.3%



(b)1.8%

图 6 热处理后高铬铸铁试样的 X 射线衍射图谱
Fig.6 The XRD results of high chromium cast iron sample after heat treatment

图 7 是热处理后不同钨含量高铬铸铁的磨损形貌。可以看出,钨含量 0.3%试样中存在大量凿坑,痕迹较深;钨含量提高到 0.8%后,试样表面光滑,无明显凿坑。众所周知,材料在磨损的过程中的耐磨性能取决于碳化物与基体的相互作用^[1]。由于钨含量从 0.3%增加到 0.8%,形成了数量较多的具有高硬度和高热稳定性的钨型碳化物,这些碳化物分布均匀,使得分布到每一个碳化物晶粒上的磨损载荷随之下降,耐磨性随之提高。然而,当钨含量继续增加时,试样的耐磨性能却随之下降。从图 7(c)和(d)中可以看到试样的表面出现了不少高应力凿削磨损所致的凿坑^[2]。这是因为过量的钨导致了含钨碳化物的粗化,从而使得碳化物在基体中分布不均匀,降低了耐磨性能。也有学者认为是过量的钨延缓了碳化物的析出,导致大量元素在基体中固溶,从而减弱了奥氏体向马氏体的转变,增加了基体中残余奥氏体的含

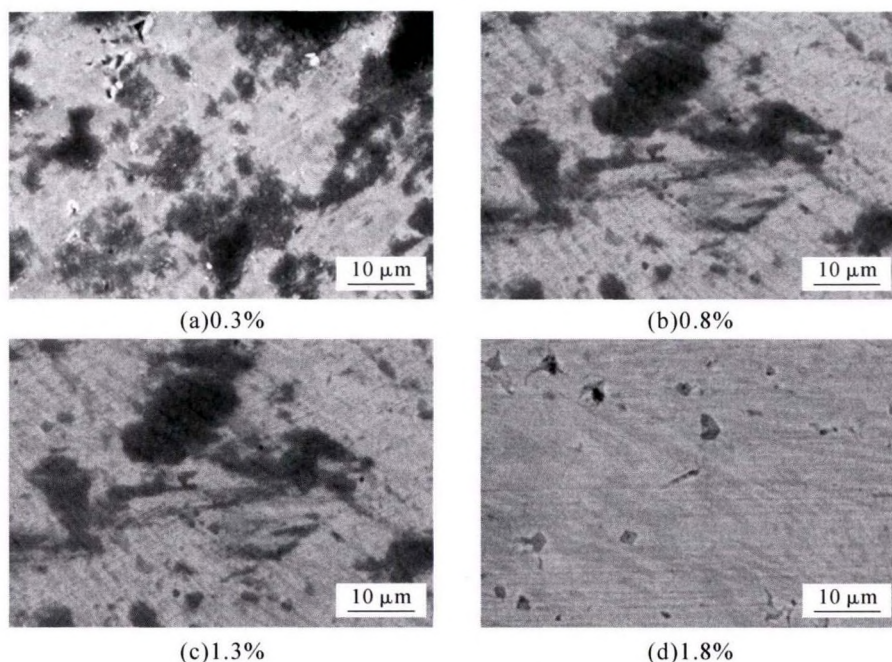


图7 不同钨含量高铬铸铁试样 1 020 °C 淬火 250 °C 回火后的磨损表面形貌

Fig.7 Wear surface morphology of high chromium cast iron with 0.8% tungsten content and heat treated with 1 020 °C quenching and 250 °C tempering

量,最终导致试样耐磨性能的下降。

3 结论

(1)铸态高铬铸铁主要由奥氏体基体和初生 M_7C_3 型碳化物组成。热处理后,大量奥氏体转化成硬度值较高的马氏体,同时出现 M_7C_3 型碳化物被拉长的现象,高铬铸铁的硬度值大幅提升。

(2)钨的添加对高铬铸铁的耐磨性能有着显著的影响,在高铬铸铁中会形成钨型碳化物,并且钨的添加有利于细化 M_7C_3 型碳化物。热处理后在钨含量为 0.8% 时,形成的钨型碳化物硬度较高且分布均匀,提高了高铬铸铁的耐磨性能。但过量的钨提高了奥氏体向马氏体转变的起始温度,增加了基体中残余奥氏体的含量,最终造成高铬铸铁耐磨性能的下降。

(3)在钨含量为 0.8%,热处理工艺为 1 020 °C 淬火,250 °C 回火时,试样硬度达到 61.4 HRC,此时高铬铸铁有着最佳的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 张艳,辛伟,季峰.钒对高铬铸铁耐磨性能的影响机理研究[J].热加工工艺,2011(5): 23-26.
- [2] 王建玲,孙秀伟,张洪潮.合金元素对高铬铸铁耐磨性能的影响[J].热加工工艺,2016(20): 42-44, 47.
- [3] 谭磊.热处理及合金元素对高铬铸铁组织与性能的影响研究[D].湘潭:湘潭大学,2015.

- [4] Yongcun L, Ping L, Ke W, et al. Microstructure and mechanical properties of a Mo alloyed high chromium cast iron after different heat treatments[J]. Vacuum, 2018, 156: 59-67.
- [5] Ibrahim M M, El-Hadad S, Mourad M. Influence of Niobium Content on the Mechanical Properties and Abrasion Wear Resistance of Heat-Treated High-Chromium Cast Iron [J]. International Journal of Metal Casting, 2020(2):1-10.
- [6] Li P, Yang Y, Shen D, et al. Mechanical behavior and microstructure of hypereutectic high chromium cast iron: the combined effects of tungsten, manganese and molybdenum additions [J]. Journal of Materials Research and Technology, 9, 2020: 5735-5748.
- [7] Kopac J. Hardening phenomena of Mn-austenite steels in the cutting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(1/2): 96-104.
- [8] Zhang Jun. Cast Surface Alloying by Centrifugal Casting Proceedings of 61st World Foundry Congress, 1995: 102-104.
- [9] 李玉清,汪慈榕. Cr27 高铬铸铁中的 M_7C_3 [J]. 金属学报, 1992, 5 (6): 459-464.
- [10] 任福战,赵维民,王如,等. 高铬铸铁里的碳化物形貌对力学性能的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2007(2): 23-26.
- [11] Li P, Yang Y, Shen D, et al. Mechanical behavior and microstructure of hypereutectic high chromium cast iron: the combined effects of tungsten, manganese and molybdenum additions [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 5735-5748.
- [12] 刘宇诚. Cr20 高铬铸铁的热处理工艺及磨粒磨损研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2018.