DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.003

# 共晶高铬铸铁的成分设计与热处理工艺研究

张业炜,殷凤仕,丁　震,薛　冰
(山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255049)

**摘　要**:通过 Jmatpro 软件模拟设计了一种共晶成分的高铬铸铁,并研究了热处理工艺对共晶高铬铸铁的显微组织、硬度、耐磨性的影响。结果表明,共晶区间含碳量范围随 Cr 含量的升高而下降,近似呈线性关系,共晶区间含碳量为 0.2%。共晶高铬铸铁成分设计中确定 Cr 含量为 19% ~20%,对应含碳量为 3.45% ~3.65% 为共晶成分且满足 Cr/C 比在 5 ~6 的设计条件。共晶高铬铸铁淬火温度为 1 000 ℃和 1 050 ℃时,250 ℃和 400 ℃回火时,磨损失重变化不明显;在 400 ~500 ℃回火会出现二次硬化现象,硬度迅速升高,磨损失重大幅度减小;回火温度高于 500 ℃时,马氏体分解严重,硬度迅速下降,磨损失重迅速增加。实验材料的热处理最佳工艺为 1 000 ℃淬火 ×2 h 空冷 +500 ℃回火 ×2 h 空冷,其组织主要为回火马氏体,M7C3 碳化物、二次碳化物、残余奥氏体。该热处理工艺下实验材料的维氏硬度值是 843 HV1,磨损失重为 4.9 mg。

**关键词**:共晶高铬铸铁;热处理;耐磨性;硬度
**中图分类号**:TG143.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0662-05

## Study on Composition Design and Heat Treatment Process of Eutectic High Chromium Cast Iron

ZHANG Yewei, YIN Fengshi, DING Zhen, XUE Bing
(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

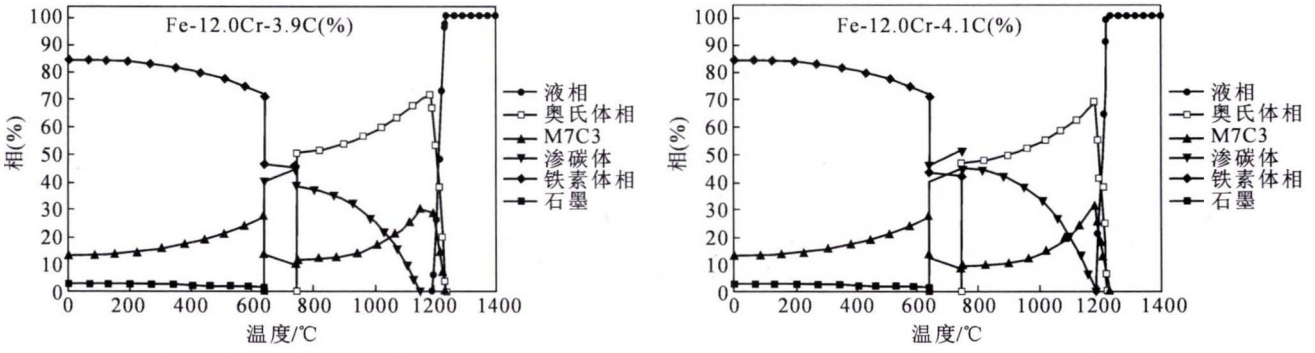
**Abstract**: A kind of eutectic high chromium cast iron was simulated and designed by JMATPRO software, and the effect of heat treatment process on the microstructure, hardness and wear resistance of eutectic high chromium cast iron was studied. The results show that the carbon content in the eutectic interval decreases with the increase of Cr content, and the carbon content in the eutectic interval is 0.2%. In the composition design of eutectic high chromium cast iron, it is determined that the Cr content is 19% ~ 20%, the corresponding carbon content is 3.45% ~ 3.65%, which is eutectic and meets the design conditions of Cr/C ratio in 5 ~ 6. When quenching temperature is 1 000 ℃ and 1 050 ℃, and when tempering temperature is 250 ℃ and 400 ℃, the wear weight loss of eutectic high chromium cast iron does not change obviously. At 400 ~ 500 ℃ tempering will appear secondary hardening phenomenon, hardness increases rapidly, wear weight loss greatly reduced. When the tempering temperature is higher than 500 ℃, the martensite decomposes seriously, the hardness decreases rapidly, and the wear weight loss increases rapidly. The optimal heat treatment process of the experimental material is 1 000 ℃ quenching for 2 h air cooling and 500 ℃ tempering for 2 h air cooling, and its structure is mainly tempered martensite, M7C3 carbides, secondary carbides, residual austenite. The Vickers hardness value of the experimental material under the heat treatment process is 843 HV1, and the wear loss is 4.9 mg.

**Key words**: high chromium cast iron; heat treatment; wear resistance; hardness

高铬白口铸铁作为第 3 代耐磨材料之一,具有高硬度,耐磨性优良的力学性能,其耐磨性优于合金钢,并且具有耐高温,抗腐蚀的优良性能,广泛用于各种工业过程,例如采矿、铣削、水泥、矿物加工等领域,在工业生产中常担任抵抗磨损的关键要素[1-4]。黄钧声等研究了热处理参数对高铬铸铁试样的硬度的影响,以 960 ℃ ×2.5 h 空冷淬火 +450 ℃ ×3.5 h 回火的方案热处理,获得最高硬度 61.6 HRC[5],朱丽娟等利用正交试验法,研究对 Cr26 高铬铸铁热处理后力学性能的影响因素大小顺序为:淬火温度,回火温度,淬火保温时间。史磊等曾对经过热处理的高铬铸铁的力学性能进行过研究,在 750 ~950 ℃的温度内,随着淬火温度的上升,高铬铸铁的硬度上升,且在淬火温度 950 ℃时,硬度值达到最高[6]。高铬铸铁性能研究对于许多磨损严重部件寿命延长有着重要意义,铸态高铬铸铁的综合性能较差,热处

**收稿日期**:2021-04-23
**作者简介**:张业炜(1999—),山东淄博人,本科生. 主要研究方向:材料成型及控制工程. 电话 19862512389, Email:1145697647@qq.com
**通讯作者**:薛　冰(1966—),山东桓台人,高级实验师,硕士. 研究方向:从事金属材料成型与控制工程. 电话 13953317861, Email:xuebing@sdut.edu.cn

理后高铬铸铁的微观组织主要由马氏体组织、碳化物构成，其数量、形貌、尺寸大小都会对宏观性能产生影响，高铬铸铁的硬度、耐磨性主要取决于马氏体组织以及 M7C3 的含量及形貌，在实际铸造过程中加入其他辅助合金元素，一些合金元素如 Mo、V、Cu 等在高温下固溶在奥氏体中，起到细晶强化的作用，一些合金元素可以与碳形成新的抗磨相，从而在宏观上优化性能[7-9]。在铸造过程中，选择接近共晶成分的合金能够提高铸造性能，减少铸件出现缩孔、缩松、冷隔、浇不足等缺陷，提高铸件质量。因此本论文着重于通过改变铁、铬、碳 3 者含量模拟高铬铸铁的共晶区间，选择共晶成分的高铬铸铁，并加入其他辅助合金元素探究不同热处理工艺对高铬铸铁硬度、磨损性能的影响。




(a)Cr含量为12%的含碳量下限模拟结果　　(b)Cr含量为12%的含碳量上限模拟结果

图 1 Cr 含量为 12% 的模拟平衡相图

Fig. 1 Simulated equilibrium phase diagram with 12% Cr content

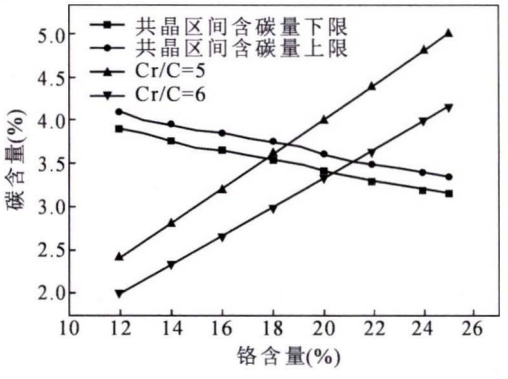



图 2 共晶区间计算结果

Fig. 2 Calculation results of eutectic interval

由于高铬铸铁的碳化物类型主要取决于 Cr/C 比，共晶碳化物形貌经历了由连续网状→片状→杆状连续程度减小的过程，共晶碳化物晶体类型经过 M3C→M3C + M7C3→M7C3 的变化过程，当 Cr/C 比高于 8.75 时，碳化物呈网状分布严重影响到铸件的使用性能，当 Cr/C 比为 7.5 时碳化物逐渐向块状转变[11-12]。为了尽可能得到 M7C3 碳化物，并且使碳化物呈长条状分布，实验材料成分配比中 Cr/C 比应控制在 5 ~ 6，并且加入 Ni、Mo、Mn 等合金元素，起到固溶强化，细晶强化以及提高淬透性等作用。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 成分设计

首先通过 Jmatpro 进行热力学计算模拟，单独改变 Cr、Fe、C 3 者质量含量，首先确定 Cr 含量从 12% 开始，再通过平衡相图确定 C 含量范围，见图 1，依次计算出 Cr 含量在 12% ~ 25%，对应共晶成分的含碳量，可见图 2。

### 1.2 实验方法

实验材料是由淄博澳亨液压机械公司提供，通过常规工艺进行离心铸造而成耐火材料圆筒模具，通过线切到 10 mm × 10 mm × 10 mm 高铬铸铁试块，实验材料化学成分见表 1，在共晶设计区间内。使用 5X- G07125 电阻炉进行热处理实验。热处理工艺淬火温度为 1 000、1 050 ℃，升温速度为 10 ℃/min，保温时间为 2 h，保温后空冷处理。考虑到升温过程中会产生内应力，所以在升温至 650 ℃时保温 1 h 处理。回火温度分别为 250、400、500、600 ℃，保温 2 h，保温后空冷处理。对热处理后的试样分别在 180、400、800、1 200 砂纸进行打磨，使用氧化铝抛光膏进行抛光，并使用浓度为 4% 的硝酸溶液进行腐蚀，利用扫描电镜（Quanta 250）观察显微组织。通过 X 射线衍射仪对试样进行 XRD 分析。利用 MH-VK 维氏硬度计在不同部位分别取 10 个点作硬度测试，取平均值。

采用（MM- U10G）摩擦磨损试样机对 10 mm × 10 mm × 10 mm 试块进行摩擦磨损，摩擦磨损上试样见图 3，上试样材料为 GCr15，硬度为62 ~ 64 HRC，磨损之前使用万分之一精度的天秤称重得到原始重量，采用转速为 120 r/min，加载力范围设为 160 ~ 180 N，磨损时间为 1 h，磨损后，对试样进行清洗，吹干后进行称重，磨损量为原始重量减去磨损后的质量。

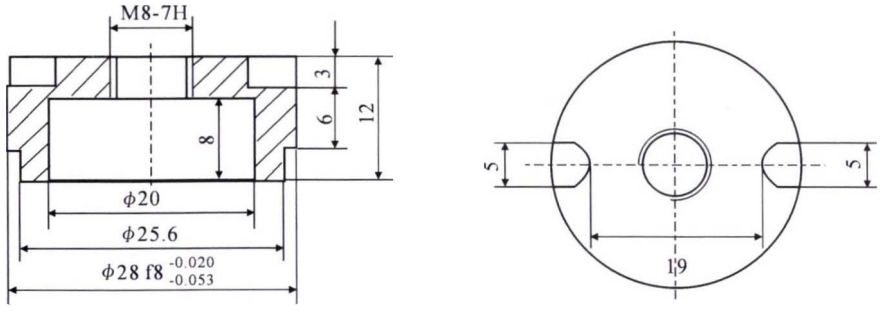



图 3 摩擦磨损上试样

Fig. 3 Friction and wear on samples

**表 1 实验材料合金元素的化学成分 $w$(%)**

**Tab. 1 The chemical composition of the experimental material alloy elements**

| 元素 | C | Cr | Mo | Si | Ni | Mn | V | P | S | Cu | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 3.650 | 19.700 | 0.937 | 0.538 | 0.123 | 1.150 | 0.316 | 0.028 | 0.040 | 0.937 | 余量 |

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 共晶高铬铸铁的 XRD 分析

图 4 为经过热处理后的 XRD 分析能谱，由图可知经热处理后形成的主要组织为马氏体组织 + M7C3 碳化物 + 少量残余奥氏体奥氏体，在本试验材料成分下，含碳量较高，高碳奥氏体在迅速冷却过程中转化的马氏体含碳量较高，有利于提高材料的硬度、耐磨性。M7C3 碳化物是高铬铸铁中提高硬度，耐磨性的主要强化相。在加热保温过程，M3C 会向 M7C3 转变[12]。相比与未经热处理之前硬度耐磨性有了很大程度的提高主要取决于形成的马氏体组织与 M7C3 碳化物。对比图 4(a)、(b)、(c)、(d)可得随着回火温度得升高，马氏体衍射峰值略有升高。

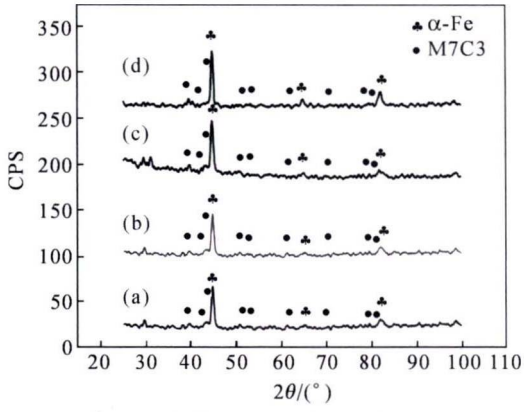


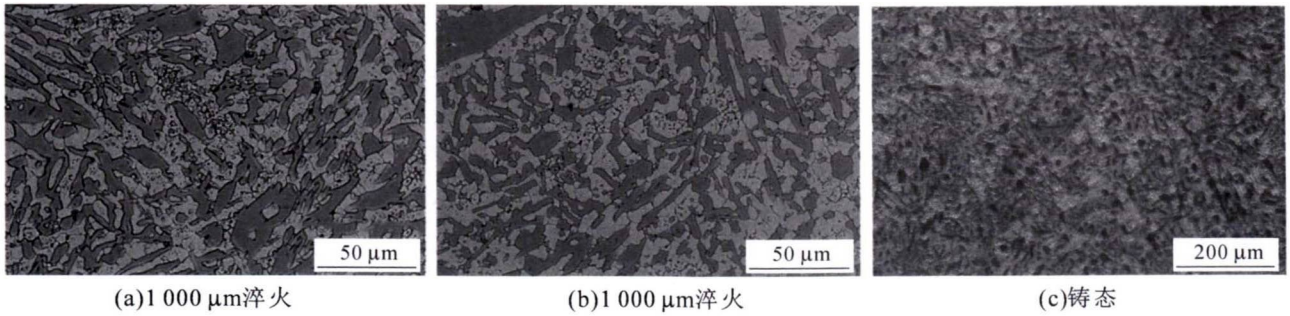

图 4 高铬铸铁的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 XRD pattern of high chromium cast iron

### 2.2 共晶高铬铸铁的金相分析

#### 2.2.1 淬火工艺对微观组织的影响

图 5(a)和(b)分别为淬火态试样的微观组织，图 5(c)为铸态组织。由图(c)可以看出铸态下为共晶组织，验证了所设计的共晶成分。经过淬火工艺后，主要的组织为淬火片状马氏体组织以及呈骨架状的 M7C3 碳化物形成的共晶组织，M7C3 碳化物多呈骨架状不连续分布，少数呈现六棱角状，由于在淬火冷却方式为空冷，所以在冷却过程中，马氏体组织发生了自回火效应脱溶析出了颗粒状的二次渗碳体，呈弥散分布，沿片状马氏体晶界处析出较多。对比图(a)和图(b)，随着淬火温度的升高，图(b)较图(a)溶入奥氏体的碳化物增多，冷却后，图(b)淬火试样得到的 M7C3 碳化物较图(a)较为细短，趋于六棱角状碳化物较为细小。



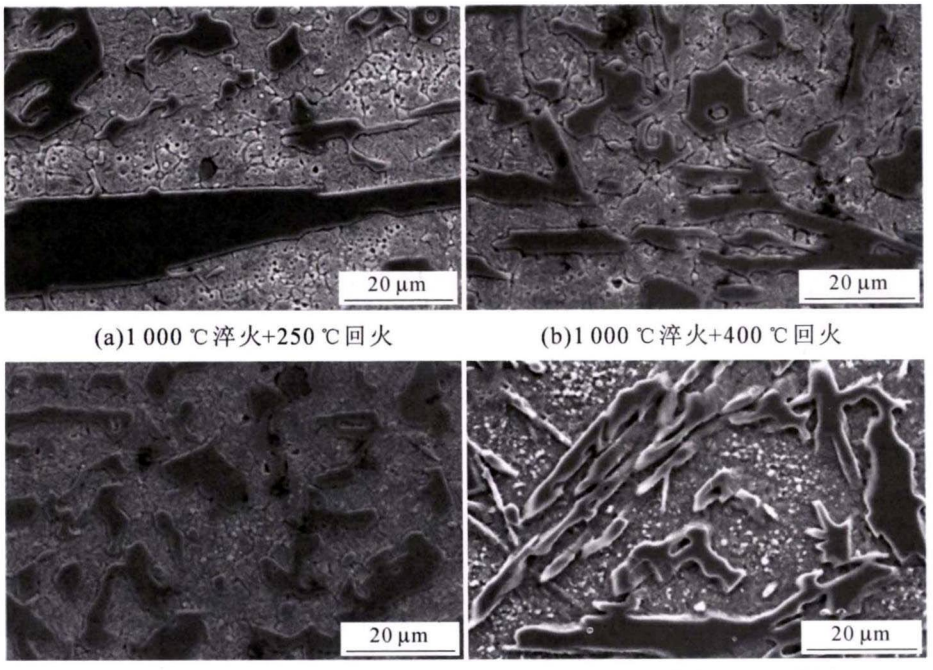

(a)1 000 μm淬火　(b)1 000 μm淬火　(c)铸态

图 5 铸态试样与淬火试样显微组织

Fig. 5 Microstructure of as-cast and quenched specimens

### 2.2.2　回火工艺对微观组织的影响

图6(a)(b)(c)(d)分别为相同淬火温度不同回火温度的显微组织，经过回火处理后得到的是回火马氏体，以及分布在基体上的骨架状 M7C3 碳化物和少量二次碳化物。由图(a)可以看出在250 ℃进行回火时，基本保留了在淬火冷却过程中自回火析出的二次碳化物，在 250 ℃回火过程中析出的二次碳化物较少。颗粒状的二次碳化物弥散分布在马氏体晶界处。随着回火温度升高至 400 ℃，见图(b)，沿马氏体晶界脱溶析出的二次碳化物数量仍然较少。回火温度在 400 ~ 500 ℃，对比图(b)与图(c)，二次碳化物析出数量逐渐增多，造成二次硬化现象，有利于材料宏观性能的改善。回火温度在 500 ~ 600 ℃，对比图(c)和图(d)，马氏体分解严重，大量二次碳化物析出，骨架状 M7C3 逐渐变的细长。




(a)1 000 ℃淬火+250 ℃回火　(b)1 000 ℃淬火+400 ℃回火

(c)1 000 ℃淬火+500 ℃回火　(d)1 000 ℃淬火+600 ℃回火

图6 淬火 + 回火处理后试样的显微组织

Fig. 6 Microstructure of the samples after quenching and tempering

## 2.3　共晶高格铸铁的硬度和耐磨性能分析

### 2.3.1　热处理工艺对硬度的影响

图7为不同热处理工艺下的硬度曲线，图8为不同热处理工艺下的磨损失重曲线。

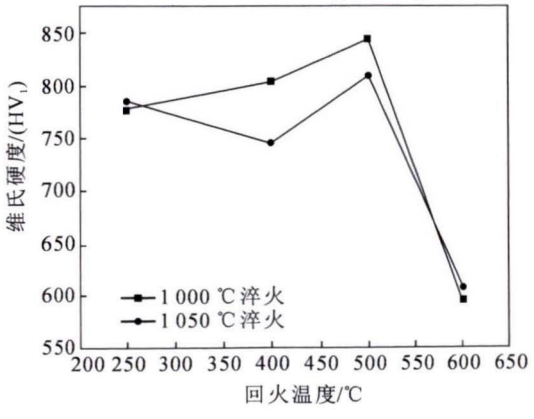



图7 不同热处理工艺下的硬度曲线

Fig. 7 Hardness curves under different heat treatment processes

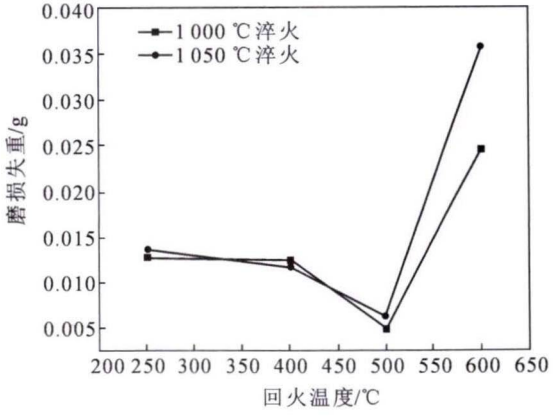



图8 不同热处理工艺下的磨损失重曲线

Fig. 8 Wear weight loss curves under different heat treatment processes

从图7图8可见，回火温度为250 ℃时，1 000 ℃淬火与 1 050 ℃淬火硬度、耐磨性变化不大，在 400 ~ 500 ℃回火，1 000 ℃淬火试样硬度明显高于 1 050 ℃淬火试样，其硬度最高为 843 HV1，当回火

温度高于500 ℃时,硬度、耐磨性都有显著下降的趋势,但1 000 ℃淬火试样硬度要略高于1 050 ℃淬火试样硬度。可见虽然随着淬火加热温度的升高,碳化物、铬等合金元素进一步溶解在奥氏体中,提高了奥氏体的稳定性,导致淬火冷却所保留的残余奥氏体的含量也相继增多,剩余未溶解渗碳体含量减少,由于第二相碳化物的硬度要明显高于基体,另外淬火温度过高引起的晶粒粗大,相对于1 000 ℃淬火,1 050 ℃淬火冷却后得到的马氏体组织相对粗大,以上这些因素引起材料宏观上硬度、耐磨性有所下降。

**2.3.2** 热处理工艺对耐磨性的影响

从图7和图8中可见,1 000 ℃淬火保温2 h后经不同回火温度,在250 ℃到500 ℃回火温度,硬度逐渐增加、磨损失重变化不大,而1 050 ℃淬火后保温2 h后经不同温度回火,在250 ℃到500 ℃硬度先下降后上升,磨损失重变化不大,在250 ℃回火时得到的是回火马氏体 + M7C3 + 二次碳化物 + 少量残余奥氏体,高铬铸铁中含有大量的铬、镍、钼等合金元素,能够抑制马氏体的分解,使在一定温度下硬度变化不太明显,呈骨架状的M7C3碳化物具有高硬,高耐磨的特性,附着马氏体基体上,作为抵抗磨损的关键因素。回火温度在400 ~ 500 ℃,随着回火温度的升高饱和的马氏体会析出碳化物,实验材料的韧性能够得到良好的改善,但硬度会出现上下浮动,磨损失重会逐渐减少,起主要抵抗磨损的骨架状M7C3在磨损过程中较脆容易在磨损过程中破碎脱落,但由于二次硬化现象,在马氏体晶界处析出二次碳化物,在磨损过程中,颗粒状二次碳化物弥散分布在马氏体晶界处,起一定的钉扎作用,使得马氏体在磨损过程中微观塑性变形抗力增加,有利于减少磨损失重,从而使得宏观硬度、耐磨性没有下降反而有所升高。随着500 ℃回火温度升高,马氏体分解析出碳化物增多,马氏体的正方度降低,马氏体分解程度严重,马氏体中碳含量大大降低,碳化物在 α - Fe 起钉扎作用明显减弱以及高温使得晶粒粗化降低了表面强度。使得500 ℃以上回火后的实验材料硬度迅速下降,磨损失重迅速增加。

## 3 结论

(1) Fe - Cr - C 合金共晶区间含碳量范围随 Cr 含量的升高而下降,近似呈线性关系,共晶区间含碳量为0.2%。在本论文中实验材料铸态下为共晶组织,使得设计结果得以验证。

(2) 共晶高铬铸铁淬火温度为1 000 ℃和1 050 ℃时,250 ℃和400 ℃回火时,硬度磨损失重变化不明显,在400 ~ 500 ℃回火会出现二次硬化现象,硬度迅速升高,磨损失重大幅度减小,回火温度高于500 ℃时,马氏体分解严重,硬度迅速下降,磨损失重迅速增加。

(3) 最佳热处理工艺为:650 ℃保温1 h + 1 000 ℃淬火 ×2 h 空冷 +500 ℃回火 ×2 h 空冷,其最终组织为片状马氏体 + M7C3 碳化物 + 二次碳化物 + 少量残余奥氏体,该热处理工艺下实验材料的维氏硬度值是843 HV1,磨损失重是4.9 mg。

**参考文献:**


[1] 王文革,胡妙,索忠源,等. 淬火工艺对 Cr20 高铬铸铁组织及力学性能影响[J]. 热加工工艺,2020,49(22):143-146.

[2] 王玉江,宋百隆,魏世丞,等. 含碳量及热处理工艺对高铬铸铁组织与耐磨性的影响[J]. 金属热处理,2018,43(2):31-34.

[3] SINGH K K, VERMA R S, MURTY G M D. Optimizing wear resistance and impact toughness in high chromium iron Mo-Ni alloy [J]. Journal of materials engineer and performance 2009,18(4):438-440.

[4] SUN T, SON R B, WANG X. Abrasive wear behavior and merchanism of high chromium cast iron[J]. Science Direct,2015,22(2):84-90.

[5] 孙凯,邢兆林,付拴拴,等. 高铬铸铁热处理工艺研究现状[J]. 热加工工艺,2012,41(14):178-179.

[6] 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,2017,66(4):408-410.

[7] 欧阳海青,蒋业华,周荣. 合金化元素对高铬铸铁中碳化物的影响研究进展[J]. 热加工工艺,2016,45(8):34-40.

[8] 马幼平,宋绍峰,李秀兰,等. 多合金化对共晶 Cr31 高铬铸铁碳化物的影响[J]. 钢铁研究学报,2011,23(8):41-48.

[9] 郭克星,夏鹏举. 钼对金属型铸造高铬铸铁组织和耐磨粒磨损的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(4):45-48.

[10] 龚沛,赵曜,杨浩,等. 碳、铬含量及热处理工艺对高铬铸铁力学性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(9):138-142.

[11] 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):23-25.

[12] 钱兵羽,何晓静,刘磊. 保温时间对高铬铸铁组织和性能的影响[J]. 黑龙江科技大学学报,2018,28(6):665-667.



欢迎到当地邮政局(所)订阅2021年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52 - 64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本