DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2023.3107

化学成分及热处理工艺对高铬铸铁力学性能的影响

张　松，车广东，韩翔宇，郑显伟，李进福
（内蒙古工业大学 材料科学与工程学院，内蒙古 呼和浩特 010051）

摘　要：为了得到综合性能优秀的双金属耐磨锤头耐磨端材料，利用正交实验法研究了成分(碳含量和铬含量)和热处理工艺(淬火温度和回火温度)对高铬铸铁力学性能的影响，具有一定的工程应用价值。实验结果表明，各因素对热处理后高铬铸铁力学性能影响关系为 w(Cr)/%＞回火温度＞淬火温度＞w(C)/%，优化后的高铬铸铁成分及热处理工艺为 2.8% C，20% Cr(质量分数)，淬火温度 1 040 ℃，保温 2 h，空冷，回火温度 250 ℃，保温 2 h，空冷。硬度为 60.17 HRC，冲击韧性 α_k 为 9.88 J/cm^2。

关键词：高铬铸铁；力学性能；正交实验；热处理

中图分类号：TG25　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)09-0837-06

Effect of the Chemical Composition and Heat Treatment Process on the Mechanical Properties of High Chromium Cast Iron

ZHANG Song, CHE Guangdong, HAN Xiangyu, ZHENG Xianwei, LI Jinfu
(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To obtain the wear-resistant end material of a bimetallic wear-resistant hammer with excellent comprehensive performance, the effects of the composition (carbon content and chromium content) and heat treatment process (quenching temperature and tempering temperature) on the mechanical properties of high chromium cast iron were studied by the orthogonal experimental method. The results show that the effects of four factors on the mechanical properties of heat-treated high chromium cast iron are as follows: w(Cr)/%>tempering temperature>quenching temperature>w(C)/%. With the optimized composition (w(C)=2.8%, w(Cr)=20%) and heat treatment process in which the quenching temperature is 1 040 ℃ with heating for 2 h and air cooling and the tempering temperature is 250 ℃ with heating for 2 h and then air cooling, the hardness and the impact toughness α_k reach 60.17 HRC and 9.88 J/cm^2, respectively.

Key words: high chromium cast iron; mechanical properties; orthogonal experiment; heat treatment

高铬铸铁是现代工业不可或缺的一种耐磨材料，由于其优秀的性能被广泛应用于矿山、冶金、能源等各种工作环境下作为机械的主要磨损部件[1]，锤式破碎机是一种用于破碎煤矿、石料、金属等材质的大型设备，其锤头是由高锰钢，高铬铸铁或镍硬铸铁等高硬度耐磨材料铸造[2]，一般高冲击载荷下使用高锰钢材料较多，低冲击载荷下使用高铬铸铁材料较多。耐磨端工件的更换频率极大影响着生产效率，因此对其的研究具有很大的现实意义。高铬铸铁优秀的耐磨性能取决于基体组织、碳化物种类及其分布形态[3]。近些年来对高铬铸铁的研究主要从成分、热处理工艺及变质处理等方面进行研究，王玉江等[4]通过调整 C 元素含量，对两组试样的铸态及热处理组织进行一系列研究，发现高铬铸铁硬度随 C 含量的增加而增加，耐磨性随 C 含量增加而减弱，热处理对高铬铸铁的耐磨性能有正面影响。Nayak 等[5]试制了不同 Cr 元素的高铬铸铁试样，对其铸态组织进行研究并使用 MatCalc 软件对两种材

收稿日期：2023-05-11
基金项目：内蒙古自然科学基金(2018LH05034)；呼和浩特市科技计划项目[2013－重－工－23]
作者简介：张　松，1998 年生，硕士生. 研究方向为耐磨材料. Email: 18143614937@163.com
通讯作者：车广东，1976 年生，硕士，副教授. 研究方向为材料表面改性，耐磨耐热材料研究. Email:nmgche@163.com
引用格式：张松，车广东，韩翔宇，等. 化学成分及热处理工艺对高铬铸铁力学性能的影响[J]. 铸造技术，2023, 44(9): 837-842.
ZHANG S, CHE G D, HAN X Y, et al. Effect of the chemical composition and heat treatment process on the mechanical properties of high chromium cast iron[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 837-842.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

料在铸态条件下的共晶碳化物相分数和元素分布进行模拟计算，发现较高含量的 Cr 元素能得到更多的$(Fe,Cr)_{23}C_6$及$(Fe,Cr)_7C_3$碳化物，更高的 C 元素含量能保证基体的硬度，不同的 Cr/C 值会影响铸态高铬铸铁的基体类型。Sasaguri 等[6]研究了 Cr/C 值为 2~15 的高铬铸铁的连续冷却相变及相变过程，发现 Cr/C 值大于 10 时，高铬铸铁发生贝氏体、珠光体及马氏体转变，A_{Cl}及珠光体转变温度，M_s、M_f都随着 Cr/C 改变而发生变化，同样热处理奥氏体化温度亦对 M_s及 M_f温度有影响，通过研究发现 Cr/C 值为 6~7 时铸态状态下硬度较高。本文采用正交实验法，综合考虑 C 含量、Cr 含量及后续热处理工艺等影响因素对高铬铸铁硬度及冲击韧性的影响，通过实验得到综合性能最优的高铬铸铁作为双金属复合锤头的耐磨端材料，为后续研发双金属复合锤头提供一定的理论支持。

1 实验方法及过程

1.1 实验方案设计

高铬铸铁中 C、Cr 元素直接影响碳化物类型，淬火温度及回火温度影响耐磨材料性能，因此制定表 1 所示四因素三水平正交实为保证性能，额外添加合金元素成分[7-17]：0.8%Si、1.0%Mn、1.5%Mo、0.8%Cu(质量分数)。计算配料后使用中频感应电炉将称量好的废钢、铬铁、锰铁、钼铁、紫铜等原料进行冶炼，使用 kw-602 快速热电偶对铁液测温，出炉温度控制在 1 500~1 550 ℃左右即可，浇入树脂砂型中成型。

表1 高铬铸铁正交实验表
Tab.1 Orthogonal test table for high chromium cast iron

组别	A[w(C)/%]	B[w(Cr)/%]	C(淬火温度 /℃)	D(回火温度 /℃)
1	2.4(1)	15(1)	960(1)	250(1)
2	2.4(1)	20(2)	1 000(2)	400(2)
3	2.4(1)	25(3)	1 040(3)	550(3)
4	2.8(2)	15(1)	1 000(2)	550(3)
5	2.8(2)	20(2)	1 040(3)	250(1)
6	2.8(2)	25(3)	960(1)	400(2)
7	3.2(3)	15(1)	1 040(3)	400(2)
8	3.2(3)	20(2)	960(1)	550(3)
9	3.2(3)	25(3)	1 000(2)	250(1)

1.2 热处理参数制定

使用 SX-2.5-12 电阻炉对试样进行热处理，根据 Cr15、Cr20、Cr25 高铬铸铁相图以及前人实验资料整理[18-19]，确定如图 1 所示热处理工艺。将材料升温至 710 ℃，保温 0.5 h，奥氏体化温度分别为 960、1 000、1 040 ℃，保温 2 h 后空冷，回火温度分别为

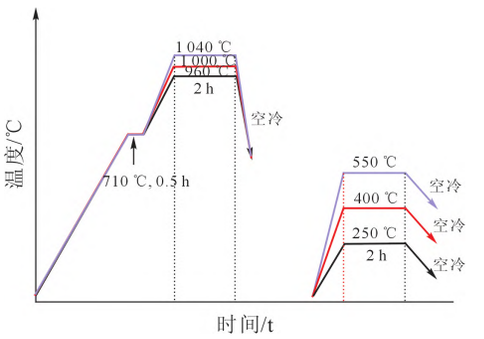


图 1 高铬铸铁热处理工艺曲线
Fig.1 The heat treatment process curve of high chromium cast iron

250、400、550 ℃，保温 2 h 后空冷。

1.3 组织观察及力学性能测试

使用 JBN-300 摆锤式冲击实验机对热处理后的 10 mm×10 mm×100 mm 无缺口冲击试样进行冲击韧性测试，取平均值；采用 HR-150A 洛氏硬度计测试多个点硬度取平均值；使用质量分数为 4%的硝酸酒精溶液对金相试样进行腐蚀，使用奥林巴斯(GX71)倒置式金相显微镜进行金相组织观察，使用 Rigaku D/MAX-2500/PC 型 X 射线衍射仪进行物相分析。

2 实验结果及讨论

2.1 正交实验结果及分析

9 组正交实验及其结果如表 2 所示，性能方面以硬度及冲击韧性两种性能为主要指标，综合评分标准为：硬度 62 HRC 为 100 分，60 HRC 为 90 分，其余按比例计算；冲击韧性 α_k=12 J/cm² 为 100 分，α_k=10 J/cm² 为 90 分，其余按比例计算，材料想得到优秀的耐磨性能，硬度与冲击韧性数值都很重要，根据材料实际应用认为硬度值相对重要，确定 2 种性能的权重为硬度:冲击韧性 =6:4，计算得到表 2 所示 9 组试样综合评分。

表2 高铬铸铁正交实验因素水平表
Tab. 2 The orthogonal test factor level table of high chromium cast iron

组别	HRC	α_k/(J·cm^{-2})	综合评分
1	61.28	8.03	89.90
2	61.56	6.50	87.68
3	55.95	7.33	72.51
4	60.61	7.81	87.45
5	60.17	9.88	90.27
6	58.42	7.27	79.80
7	58.61	6.63	79.09
8	57.06	10.07	81.32
9	58.78	7.99	82.32

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正交结果分析见表 3 及图 2，K_1、K_2、K_3 为各个因素在不同水平实验的结果之和，k_1、k_2、k_3 分别为 K_1、K_2、K_3 的平均值，R 为不同因素的极差，代表该因素的权重。根据极差 R，各因素对性能的影响主次关系为 B>D>C>A，根据图 2，实验得到的理论最优性能组应为 A2B2C2D1，与第 5 组 A2B2C3D1 的淬火温度不同，根据表 4 已知此因素对综合评分的影响较低，为保证实验结果足够严谨，以 A2B2C2D1 条件进行补充实验，得到的实验数据为 60.39 HRC，α_k=7.51 J/cm^2，综合性能略低于实验组 5 的 60.17HRC，α_k=9.88 J/cm^2，故可认定组别 5 性能最为理想。

表3 正交实验结果分析

Tab.3 Analysis of the orthogonal array test results

组别	A[w(C)/%]	B[w(Cr)/%]	C(淬火温度 /℃)	D(回火温度 /℃)
K_1	250.09	256.44	251.02	262.49
K_2	257.52	259.27	257.45	246.57
K_3	242.73	234.63	241.87	241.28
k_1	83.36	85.48	83.67	87.50
k_2	85.84	86.42	85.82	82.19
k_3	80.91	78.21	80.62	80.43
R	4.93	8.21	5.19	7.07

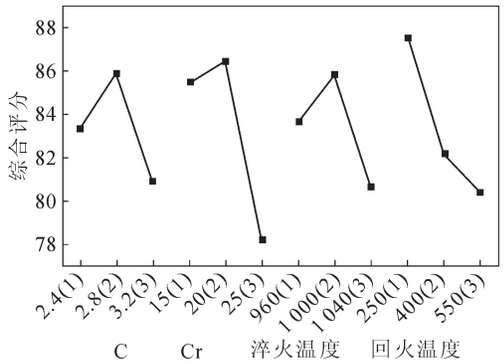


图 2 高铬铸铁实验指标综合评分曲线

Fig.2 Comprehensive score curve of the test index of high chromium cast iron

2.2 C、Cr 含量对高铬铸铁组织及力学性能的影响

根据正交实验结果，图 3 为实验组 4、5、6 在 w(C) 为 2.8%时 Cr15、Cr20、Cr25 高铬铸铁热处理态金相及对应的 XRD 图谱。

根据相组成分析，Cr15 高铬铸铁多了(Fe,Cr)$_3$C 碳化物。根据金相照片，Cr15 碳化物整体呈粗大网状结构，Cr20 为碳化物，呈密集罗列状态，Cr25 碳化物相对分布较稀疏，整体从 Cr15 到 Cr25，高铬铸铁中碳化物是呈逐渐变细的趋势，从性能上看，Cr15 到 Cr25，洛氏硬度值逐渐降低，这是由于在高铬铸铁中 Cr 元素与 C 有着极大的亲和性，随着 Cr 含量的增加，形成的碳化物越多，基体中 C 含量必定会

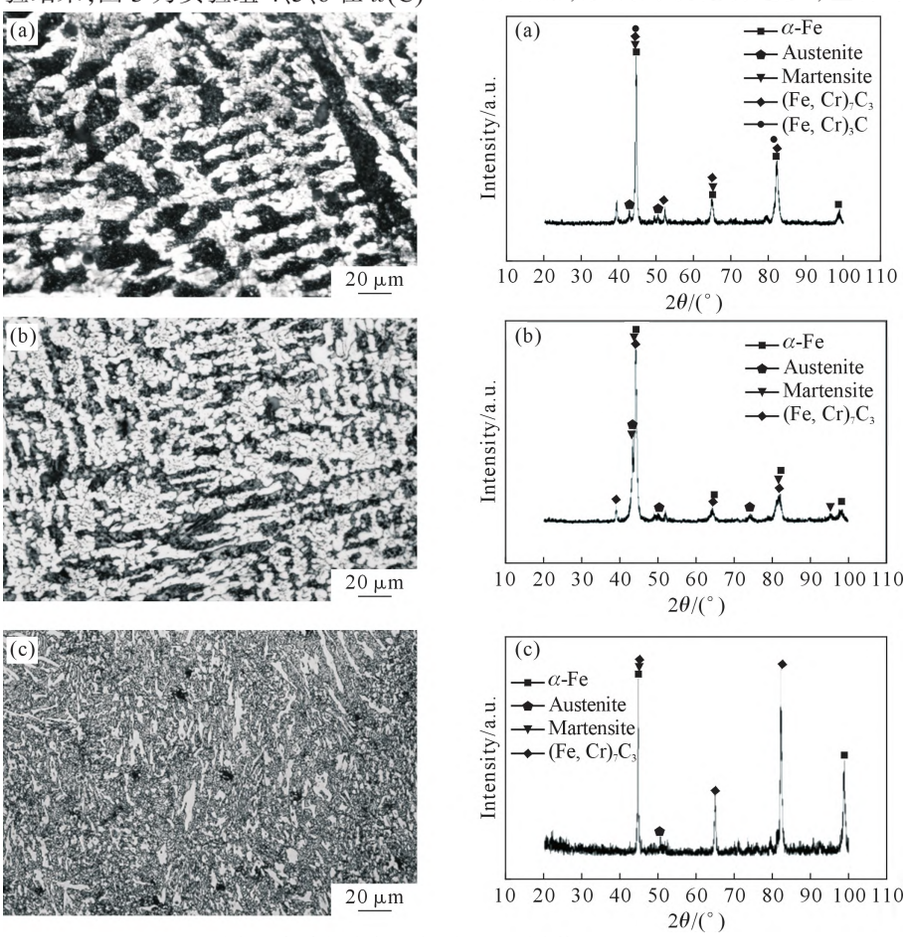


图 3 实验组金相组织及 XRD 图谱：(a) 4#, (b) 5#, (c) 6#

Fig.3 The metallographic structure and XRD patterns of experimental groups: (a) 4#, (b) 5#, (c) 6#

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

减少，造成基体硬度减小[5]。且$(Fe,Cr)_3C$与$(Fe,Cr)_7C_3$碳化物相比显微硬度较低，且多呈网状，在磨损过程中极易大片脱落，失重严重。综合以上实验数据及分析结果，认为C含量为2.8%，Cr含量为20%时组织及性能较为良好。此时高铬铸铁的组织主要为马氏体+$(Fe,Cr)_7C_3$型碳化物，磨损性能更为优秀。

图4为实验组2、5、8在Cr20时C含量为2.4%、2.8%、3.2%高铬铸铁热处理态金相及对应的XRD图谱。结合图4的XRD衍射图谱，3种C含量的热处理态组织都包含铁素体，残余奥氏体，马氏体及$(Fe,Cr)_7C_3$碳化物。当C元素含量为2.4%时，其相组成相比另外两种多了$(Fe,Cr)_{23}C_6$碳化物。$(Fe,Cr)_{23}C_6$碳化物一般由晶界间析出[21]，具有层片状、短杆状及颗粒状等特征，含C量相对$(Fe,Cr)_7C_3$碳化物较小，即基体中会含有更多的C含量强化马氏体。因此C含量为2.4%时，其硬度值高于C元素含量为2.8%及3.2%的式样，相对地，其冲击韧性值会降低。

2.3 热处理工艺对高铬铸铁组织及力学性能的影响

由图2可知，淬火温度对综合评分的影响为先提高再降低，回火温度对综合评分的影响为逐渐降低，由前文分析可知，回火温度对性能的影响要大于淬火温度，又经过补充实验，因此热处理工艺上的选择为C3D1。高铬铸铁的热处理过程中[22-23]，随着温度的提高，铁素体转化为奥氏体，奥氏体中的C与其他合金元素的扩散能力逐渐增强，在淬火过程中一部分形成二次碳化物，同时提高马氏体转变温度，马氏体在基体中所占的比例逐渐增加，残余奥氏体减少，因此基体硬度提升，韧性下降。随着回火温度升高，洛氏硬度降低，冲击韧性先升高后降低，综合评分降低。回火工艺有减少材料内应力的作用，回火温度越高，则会给残余奥氏体元素扩散提供一定的能量，使马氏体与残余奥氏体形成回火索氏体，提高硬度降低韧性；回火温度低，提供的能量较低，则残余奥氏体与马氏体含量变化较小。

2.4 正交实验结论

根据正交实验组织及性能分析，含2.8% C，20% Cr高铬铸铁经过1 040 ℃保温空冷淬火及250 ℃低温回火工艺处理综合性能最优，其主要组织为$(Fe,Cr)_7C_3$碳化物、马氏体组织、残余奥氏体组织及一定含量的珠光体，如图5~6所示。这样的组织由分析高铬铸铁的合金元素成分及正交实验法的热处理工艺影响后获到，高铬铸铁材料的耐磨损机理是依

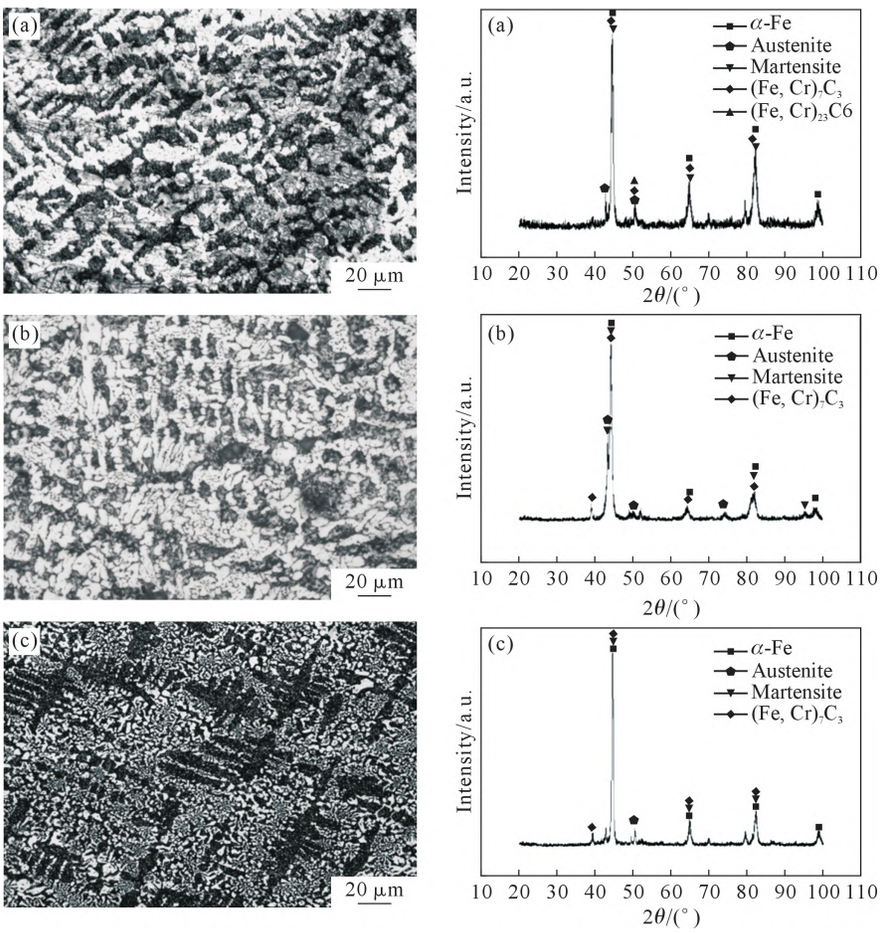


图4 实验组金相组织及XRD图谱：(a) 2#, (b) 5#, (c) 8#

Fig.4 The metallographic structure and XRD patterns of experimental groups: (a) 2#, (b) 5#, (c) 8#

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

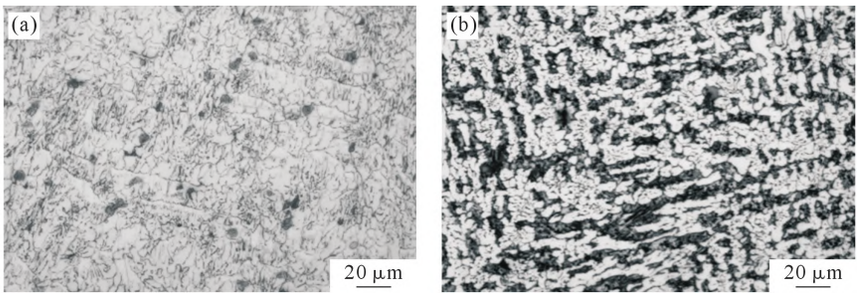


图 5 实验组 5 高铬铸铁金相组织：(a) 铸态，(b) 热处理态

Fig.5 Microstructure of high chromium cast iron in experimental group 5: (a) as-cast, (b) heat treated

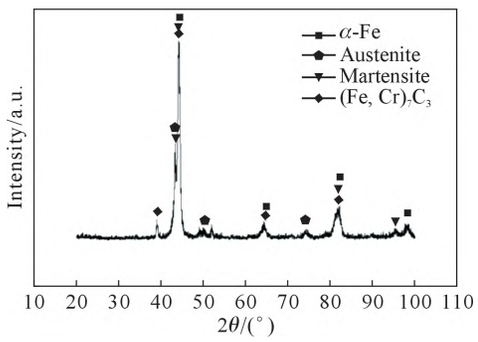


图 6 实验组 5 热处理态高铬铸铁 XRD 图谱

Fig.6 The XRD pattern of heat-treated high chromium cast iron in experimental group 5

靠高硬度基体和碳化物之间的紧密结合，$(Fe,Cr)_7C_3$ 碳化物及马氏体基体组织提供良好的耐磨损性能，各类基体组织保护碳化物尽量避免脱落提高使用寿命，而残余奥氏体组织及珠光体决定了材料能保持较高水平的冲击韧性，经过力学性能检测，认为此组合为当下正交实验法所能得到的最优性能组合。

3　结论

(1)w(C)/%、w(Cr)/%、淬火温度及回火温度 4 个因素对高铬铸铁材料综合性能的影响关系为 w(Cr)/%>回火温度>淬火温度>w(C)/%，综合正交实验及后续补充实验得到的最优实验组为：w(C)=2.8%，w(Cr)=20%，淬火温度 1 040 ℃，保温 2 h，空冷，回火温度 250 ℃，保温 2 h，空冷。

(2)优化后的性能为 60.17 HRC，α_k=9.88 J/cm^2，作为高铬铸铁材料性能较为理想。

(3)高铬铸铁材料 Cr 与 C 的共同作用决定了产生的碳化物的种类及形貌。

(4)热处理组织相对于铸态组织，对高铬铸铁碳化物形态及数量有明显的改善，间接提高了其耐磨性能。

参考文献：

[1] 李秀兰，周新军，谢文玲，等. 多元微合金化对高铬铸铁凝固组织及冲击磨损性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程，2015, 38(2): 18-22.
LI X L, ZHOU X J, XIE W L, et al. Influence of multi element micro alloying on solidification microstructure and impact wear properties of high chromium cast iron[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2015, 38(2): 18-22.

[2] SUDHAKAR A N, MARKANDEYA R, SRINIVASA RAO B, et al. Effect of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of high chromium white cast iron and Ni-Hard iron [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 61: 1006-1014.

[3] 魏世忠，徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展[J]. 金属学报，2020, 56(4): 523-538.
WEI S Z, XU L J. Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 523-538.

[4] 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): 30-34.
WANG Y J, SONG B L, WEI S C, et al. Effects of carbon content and heat treatment process on microstructure and wear resistance of high chromium cast iron[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(2): 30-34.

[5] NAYAK U P, GUITAR M A, MÜCKLICH F. A comparative study on the influence of chromium on the phase fraction and elemental distribution in as-cast high chromium cast irons: Simulation vs. experimentation[J]. Metals, 2020, 10(1): 30.

[6] SASAGURI N, YAMAMOTO K, YOKOMIZO Y, et al. Effect of Cr/C value on behavior of continuous cooling transformation in plain high chromium cast iron[J]. Materials Transactions, 2019, 60(12): 2537-2541.

[7] KAÑA V, ZÁDĚRA A, KRUTIŠ V. Effect of alloying elements on properties and structure of high chromium cast irons[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2018, 63(2): 609-614.

[8] 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): 44-48.
GUO K X, XIA P J. Effect of molybdenum on microstructure and wear resistance of high chromium cast iron in metal mold casting [J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2019, 42(4): 44-48.

[9] WANG X D, CHEN Y B, WEI S Z, et al. Effect of carbon content on abrasive impact wear behavior of Cr-Si-Mn low alloy wear resistant cast steels[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 153.

[10] 马金荣，马剑飞，王峰，等. 钼对高铬铸铁组织和高温性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程，2022, 45(5): 115-119.
MA J R, MA J F, WANG F, et al. Effect of Mo on microstructure and high temperature properties of high chromium cast iron [J].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Ordnance Materials Science and Engineering, 2022, 45(5): 115-119.

[11] SCANDIAN C, BOHER C, DE MELLO J D B, et al. Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear[J]. Wear, 2009, 267(1-4): 401-408.

[12] 孙志平,沈保罗,高升吉,等. Mo、Cu 对高铬铸铁凝固组织和亚临界热处理硬化行为的影响[J]. 金属热处理,2004(8): 8-12.
SUN Z P, SHEN B L, GAO S J, et al. Effect of Mo and Cu on solidification structure and hardening behavior of high chromium white cast iron subjected to subcritical treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2004(8): 8-12.

[13] 斯松华,方继明,张弛,等. 添加 Mo 对高铬铸铁组织及亚临界处理硬化作用的影响研究[J]. 材料保护,2021, 54(4): 32-35, 52.
SI S H, FANG J M, ZHANG C, et al. Influence of molybdenum addition on the microstructure and the subcritical treatment hardening effect of high-chromium cast iron[J]. Materials Protection, 2021, 54(4): 32-35, 52.

[14] CHEN X R, ZHAI Q J, DONG H, et al. Molybdenum alloying in cast iron and steel[J]. Advances in Manufacturing, 2020, 8: 3-14.

[15] 农登,郑开宏,宋东福,等. 含钼镍高铬铸铁中温三体磨损性能研究[J]. 铸造技术,2012, 33(7): 762-764.
NONG D, ZHENG K H, SONG D F, et al. Research on 3-body abrasive wear of Mo-Ni-contained high chrome cast iron in middle temperature[J]. Foundry Technology, 2012, 33(7): 762-764.

[16] 段汉桥. 锰对高铬铸铁奥氏体化过程的影响[J]. 铸造,2001(9): 545-549.
DUAN H Q. Effect of manganese on austenitization of high chromium cast iron[J]. Foundry, 2001(9): 545-549.

[17] BYELIKOV S, VOLCHOK I, NETREBKO V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast irons[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 58(3): 895-897.

[18] SARE I R, ARNOLD B K. The influence of heat treatment on the high-stress abrasion resistance and fracture. Toughness of alloy white cast iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995, 26: 1785-1793.

[19] 崔晓明,王宁,白朴存,等. 热处理工艺对 Cr15 高铬铸铁力学性能影响[J]. 热加工工艺,2015, 44(18): 224-226, 231.
CUI X M, WANG N, BAI P C, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of Cr15 high chromium cast iron[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(18): 224-226, 231.

[20] OANH N T H, VIET N H. Precipitation of $M_{23}C_6$ secondary carbide particles in Fe-Cr-Mn-C alloy during heat treatment process[J]. Metals, 2020, 10(2): 157.

[21] 刘秀华. 热处理对高铬铸铁硬度与冲击韧性的影响[J]. 热加工工艺,2020, 49(12): 157-159.
LIU X H. Effect of heat treatment on hardness and impact toughness of high chromium cast iron [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(12): 157-159.

[22] 于洪军,宋传颂馨,程福超,等.不同热处理条件下亚共晶高铬铸铁的组织和性能[J]. 金属热处理,2021, 46(8): 56-60.
YU H J, SONG C S X, CHENG F C, et al. Microstructure and properties of a hypoeutectic high-Cr cast iron under different heat treatment conditions[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(8): 56-60.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net