

回火处理对高铬铸铁组织与冲击-腐蚀-磨损行为的影响

陈容钦¹, 孙 肖², 王 帅^{2*}, 李金伟¹, ARTUR Pokrovsky³, 郑志斌², 龙 骏²

(1. 中交广州航道局有限公司, 中交广航疏浚有限公司, 广东 广州 510290; 2. 广东省科学院新材料研究所, 广东省金属强化技术与应用重点实验室, 广东省钢铁基复合材料工程研究中心, 广东 广州 510650; 3. 白俄罗斯国家科学院物理技术研究所, 明斯克 220084)

摘 要:以高铬铸铁为研究对象, 开展不同温度回火处理, 结合 OM、SEM、EDS 等微观表征与硬度、冲击韧性、冲击-腐蚀-磨损等性能测试, 研究回火温度对其显微组织、力学性能及冲击-腐蚀-磨损行为的影响。结果表明, 回火后高铬铸铁组织主要由共晶碳化物、回火马氏体及二次碳化物构成。随着回火温度升高, 网状共晶碳化物发生重组, 基体针状马氏体特征减弱, 并逐步向回火屈氏体、回火索氏体转变; 低温回火($\leq 320\text{ }^{\circ}\text{C}$)下材料硬度(HRC)维持在 60 以上, 550 $^{\circ}\text{C}$ 高温回火后硬度(HRC)大幅降至 48.09; 回火温度对冲击韧性影响较小, 材料整体仍呈脆性断裂特征。在低于 450 $^{\circ}\text{C}$ 回火时, 不同冲击载荷下的质量损失率均稳定保持在 21.6 ~ 26.2 mg/h 范围, 当回火温度升高至 550 $^{\circ}\text{C}$, 质量损失率显著增大至 34.8 ~ 38.4 mg/h, 抗冲击-腐蚀-磨损性能急剧恶化。

关键词:回火处理; 高铬铸铁; 显微组织; 损伤行为

中图分类号: TF76, TG156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0092-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of tempering treatment on the microstructure and impact-corrosion-wear behavior of high chromium cast iron

CHEN Rongqin¹, SUN Xiao², WANG Shuai^{2*}, LI Jinwei¹, ARTUR Pokrovsky³,
ZHENG Zhibin², LONG Jun²

(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guanghang Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510290, Guangdong, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Guangdong Provincial Iron Matrix Composite Engineering Research Center, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. Physico-technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk 220084, Belarus)

Abstract: In this study, high chromium cast iron was subjected to tempering treatment at different temperatures. The effects of tempering temperature on its microstructure, mechanical properties, and impact corrosion-wear behavior were investigated using OM, SEM, EDS, as well as property tests of hardness, impact toughness and impact-corrosion-wear tests. The results show that the tempered microstructure of high chromium cast iron mainly consists of eutectic carbides, tempered martensite, and second-

收稿日期: 2026-05-05; 修回日期: 2026-06-16; 接受日期: 2026-06-29

基金项目: 广东省科学院项目(2022GDASZH-2022010103&2022GDASZH-2022010107); 广东省国际科技合作项目(2025A0505020062); 清远市科技计划项目(2024BQW018); 广东特支计划资助项目(2023TX07C512&2025TQ09C948)。

作者简介: 陈容钦, 1983 年出生, 广东增城人, 本科, 工程师, 主要从事疏浚船舶轮机管理方面研究工作。E-mail: 13828420043@163.com; *通信作者: 王帅, 1992 年出生, 男, 辽宁锦州人, 博士, 主要从事耐磨蚀钢铁及其复合材料方面的研究, E-mail: wangshuai@gdinm.com。

ary carbides. As the tempering temperature increases, the network eutectic carbides undergo reorganization, the characteristic of acicular martensite in the matrix weakens, and the matrix gradually transforms into tempered troostite and tempered sorbite. After low-temperature tempering ($\leq 320\text{ }^{\circ}\text{C}$), the hardness(HRC) remains above 60, whereas after high-temperature tempering at $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, the hardness(HRC) significantly decreases to 48.09. The tempering temperature has a minor effect on impact toughness, and the material still exhibits predominantly brittle fracture characteristics. When tempered below $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, the mass loss rate under different impact loads remains stable within the range of 21.6-26.2 mg/h. However, when the tempering temperature rises to $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, the mass loss rate significantly increases to 34.8-38.4 mg/h, indicating a sharp deterioration in the impact-corrosion-wear resistance.

Key words: tempering treatment; high chromium cast iron; microstructure; damage behavior

0 引言

高铬铸铁作为一种重要的耐磨材料,已广泛应用于矿山破碎、工程基建、石油化工以及航道疏浚等领域^[1-3]。其组织中高体积分数、高硬度的碳化物能够显著提升材料的抗磨能力^[4-6]。然而,随着服役工况的日益复杂与严苛,像磨机衬板、磨球、疏浚泵叶轮、泵壳等典型高铬铸铁耐磨件在实际使用过程中常面临冲击、冲刷、腐蚀与磨损等多因素交互作用。在上述多场耦合环境下,传统高铬铸铁材料的性能局限性日益显著,已难以满足相关结构件对长寿命与稳定服役的应用需求^[6-8]。

为提升高铬铸铁的综合性能,研究者常通过调节 Cr/C 质量比、添加合金元素(如 Ni、Mo、Ti、Nb、W 和 V 等)以及热处理等手段,来优化组织中奥氏体、马氏体与碳化物的形貌、尺寸、体积分数等特征参量^[9-12]。方伟等^[13]研究发现,随着 Cr/C 质量比增大,高铬铸铁中碳化物的类型依次经历 M_3C 、 M_3C_2 、 M_7C_3 、 M_{23}C_6 等转变,其形态也从长针状、连续网状、板条状逐步转变为碎块状和菊花状;当 Cr/C 为 6.99~8.10 时,材料的硬度与冲击韧性均达到最大值。魏海波等^[14]指出,增加 Ni 含量可促进组织中奥氏体形成,细化枝晶间共晶组织,有利于改善韧性和抗热疲劳性能。Shimizu 等^[15]研究表明,Mo 能提高 M_7C_3 碳化物的硬度,并促进高硬度、高熔点 M_2C 碳化物的生成,从而有效改善高铬铸铁在 $1\,173\text{ K}$ 下的冲击腐蚀磨损性能。W 在高铬铸铁中可形成 WC,并细化 M_7C_3 碳化物,有助于提升硬度和耐磨性;但过量的 W 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增加,反而导致材料耐磨性下降^[16]。Silva 等^[17]研究发现,添加 Nb 能够细化组织,降低碳化物尺寸,同时改善材料的切削加工性能。廖薛宇等^[10]指出,V 不仅能促进 M_7C_3 型碳化物的形成,还能细化碳化物,从而提高材料的抗拉强度与断裂韧性。此外,V 可形成细小

的 VC 颗粒,同时其自身固溶于基体中,有助于提升电极电位和高温抗氧化能力。

在热处理方面,选择合适的淬火介质是控制高铬铸铁中碳化物形貌与综合性能的有效策略^[3, 18-20]。Al-Hamadi^[3]比较了氮气、水、油以及空气等不同淬火介质,发现水淬更有利于硬度、强度、延展性与耐磨性的协同提升。于洪军等^[1]研究表明,随着淬火温度升高和保温时间延长,亚共晶高铬铸铁的硬度和冲击韧性呈先升高后下降的趋势;再经回火处理,可保证较高的硬度(HRC)(58)与冲击韧性(15 J/cm^2)。此外,采用 $1\,040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温淬火+风冷+ $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温回火,高铬铸铁组织中的枝晶与碳化物均得到细化,马氏体与二次碳化物界面更为清晰,且奥氏体枝晶芯部发生明显的马氏体转变。该工艺使材料硬度提高(HRC)2.9,相对耐磨性提升至 1.43 倍;同时,冲击韧性仅降低 0.6 J/cm^2 ,但耐腐蚀性能出现一定程度的下降^[19]。Lee 等^[21]则发现,回火处理会促进初生 γ 相向 α 相转变,并诱导细小碳化物的析出;然而,碳化物与 α 相之间的面积比及间距驱动的电化学效应,使得热处理态的选择性腐蚀速率高于铸态。

综上所述,对于高铬铸铁材料的热处理,现有研究主要聚焦于淬火介质、淬火参数以及回火工艺等对高铬铸铁硬度、韧性、耐磨性与常规电化学腐蚀性能的影响,而关于回火处理对高铬铸铁在冲击与腐蚀耦合作用下的磨损行为(即冲击-腐蚀-磨损)的研究仍有限,对其微观组织演化与动态损伤机制的认识尚不充分。因此,笔者对高铬铸铁分别在 200 、 320 、 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行回火处理,分析不同回火温度对材料微观组织与碳化物形貌特征的影响,同时探究回火温度对高铬铸铁硬度、冲击韧性等力学性能的作用规律,并进一步揭示在冲击-腐蚀-磨损条件下回火温度对材料损伤行为的影响机制。旨在为开发适用于海洋工程苛刻工况的高性能耐磨蚀高铬铸铁材料提供理论依据与热处理工艺设计参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料使用 GB/T 8263-2025《耐磨白口铸铁件》规定的 BTMCr12-GT 牌号高铬铸铁, 化学成分如表 1 所示。所有回火样品为 200 mm×150 mm×70 mm 的块状试样(图 1), 回火温度分别设置为 200、320、450 ℃ 及 550 ℃。具体回火工艺如下: 将样品以 80 ℃/h 的加热速率从室温加热至目标温度, 再保温 6 h 并进行油冷处理, 最终获得不同回火状态的试验样品。

表 1 高铬铸铁化学成分

Table 1 Chemical composition of high-chromium cast iron (HCCI) %

C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
2.40	0.50	0.37	10.43	≤0.04	≤0.04	Bal.



图 1 试验样品实物

Fig. 1 Photograph of the experimental sample

1.2 试验方法

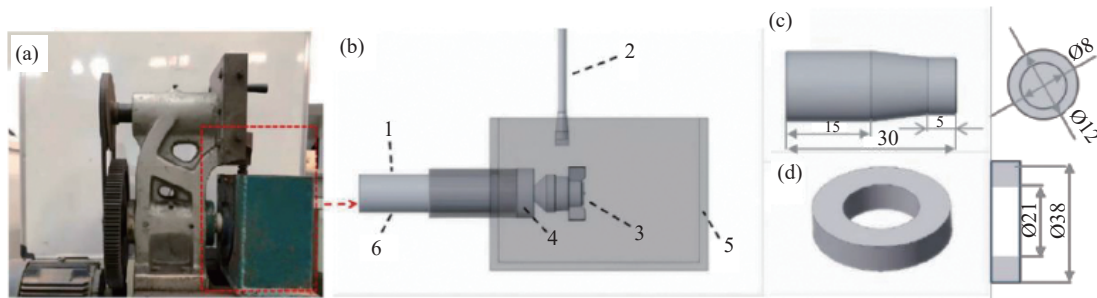
回火处理后的试样通过线切割, 获得用于金相组织观察、硬度测试、冲击韧性测试及冲击-腐蚀-磨损试验的样品。金相试样尺寸为 10 mm×10 mm×

10 mm, 依次经 100[#]、400[#]、800[#]、1 200[#]和 2 000[#]砂纸逐级打磨, 再以粒度为 2.5 μm 的金刚石研磨膏抛光, 最后用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀。在室温下使用 HR-150A 型洛氏硬度计进行硬度测试, 为保证测试结果准确, 每个样品在不同位置选取 5 个测试点, 取平均值。冲击试验则通过 JB-500 型摆锤式冲击试验机于室温下进行, 试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm, 无缺口, 每种回火状态样品制备 3 个平行试样, 取其平均值。

冲击-腐蚀-磨损试验通过改进的 MLD-10 试验机进行, 具体试验方法已在前述文章详细介绍^[22-23]。如图 2 所示, 上试样为高铬铸铁试样(图 2(c)), 下试样为硬度相近的高铬钢(图 2(d))。试验介质为 3.5% NaCl 溶液(模拟海水)与 10% 质量分数、平均粒径 300 μm 的石英砂混合浆料。分别设置 3 J 和 6 J 冲击功, 每组条件重复测试三次以保证数据可靠性。试样每间隔 10 min 进行一次超声清洗、干燥, 并采用精度 0.1 mg 的分析天平称重, 每个试样累计试验 3 次, 试验总时长为 30 min。

1.3 试验表征

采用 Leica DMI 3000M 型金相显微镜观察试样的金相组织; 并利用配备 EDS 能谱的 Gemini SEM 300 型场发射扫描电子显微镜进一步表征微观组织形貌与成分。同时, 通过 SEM 观察冲击断口及冲击腐蚀磨损试样的表面与截面形貌, 用以分析断裂机制、磨损表面特征及亚表层裂纹萌生与扩展行为。



1-密封盖; 2-上试样; 3-搅拌器; 4-下试样; 5-试验槽; 6-主轴
(a)实物; (b)示意图; (c)上试样及尺寸; (d)下试样及尺寸

图 2 冲击腐蚀磨损试验机(单位:mm)

Fig. 2 Impact-corrosion-wear testing machine

2 结果与讨论

2.1 组织形貌

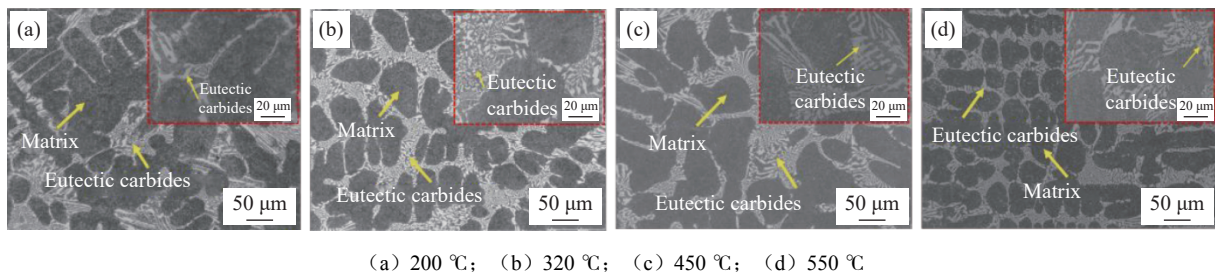
图 3 为经 200、320、450 ℃ 和 550 ℃ 不同温度回火处理后高铬铸铁的金相组织。从图中可以看出, 四种试样的组织均由深色基体相(回火马氏体)与白

色 (Fe, Cr)₇C₃ 型共晶碳化物构成, 但随回火温度升高, 其形貌呈现一定差异。200 ℃ 回火, 基体部分区域被网格状 (Fe, Cr)₇C₃ 共晶碳化物分割, 形成尺寸不一的椭圆形或圆形区域, 如图 3(a)。当回火温度升至 320 ℃, 如图 3(b)所示, 网格状 (Fe, Cr)₇C₃ 共晶碳化物数量明显增多, 马氏体基体近乎完全被

隔离成不同尺寸的椭圆形或圆形结构。回火温度达到 450 °C(图 3(c)),组织中的网格状 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 共晶碳化物包围的椭圆形或圆形基体出现长大的趋势。相比之下,在 550 °C 回火,网格状 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 共晶碳化物发生重组与连接,最终将马氏体基体分割成尺寸较小且分布均匀的近圆形结构,如图 3(d)。

图 4 为不同回火状态下高铬铸铁的 SEM 组织形貌。从图 4 中可以看出,经回火处理后四种试验材料的组织都是由回火马氏体、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 共晶碳化物以及二次碳化物组成。在低温回火条件下,基体保持典型的针状回火马氏体特征,同时 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 共晶碳化物轮廓清晰,二次碳化物呈弥散分布,如图 4(a)(b)。随着回火温度升高至 450 °C 及

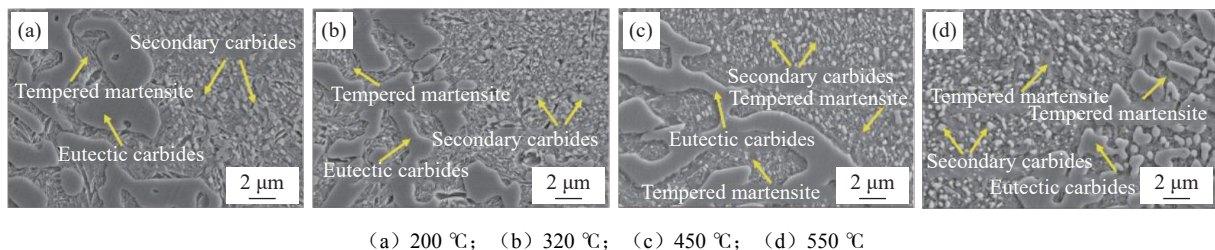
以上,针状马氏体基体的组织特征逐渐消失,并伴有碳化物球化与聚集,组织逐步向回火屈氏体或回火索氏体转变(图 4(c)和 4(d))。与此同时,从马氏体中析出的二次碳化物也随着回火温度升高而逐渐长大,550 °C 回火时出现明显的粗化。该现象主要受回火过程中扩散行为影响,低温回火时碳原子短程扩散,基体收缩小,网格共晶碳化物变化不明显;回火温度升高,残余奥氏体与马氏体相继分解,针状马氏体特征逐渐模糊,碳化物析出增多;高温回火时,原子扩散加剧,二次碳化物因 Ostwald 熟化显著粗化,共晶碳化物发生球化、溶解-再析出,共晶碳化物重组连接,马氏体分解为铁素体与碳化物混合组织(回火屈氏体/索氏体)^[5, 19, 22]。



(a) 200 °C; (b) 320 °C; (c) 450 °C; (d) 550 °C

图 3 不同回火状态高铬铸铁金相组织

Fig. 3 Microstructure of high-chromium cast iron under different tempering conditions



(a) 200 °C; (b) 320 °C; (c) 450 °C; (d) 550 °C

图 4 不同回火状态高铬铸铁 SEM 组织形貌

Fig. 4 SEM microstructural morphology of high-chromium cast iron under different tempering conditions

2.2 力学性能

试验材料在不同回火状态下的洛氏硬度与冲击吸收功,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,当回火温度是 200 °C 和 320 °C 时,材料的洛氏硬度(HRC)均在 60 以上,但 320 °C 回火对应的材料硬度(HRC)略高,为 61.57。此阶段材料的冲击吸收功由 3.25 J 提升至 4.05 J,韧性也出现小幅改善。随着回火温度进一步升高至 450 °C,材料的洛氏硬度与冲击吸收功均有 10% 左右的下降,此时洛氏硬度(HRC)与冲击吸收功分别降低至 55.06 和 3.6 J。当回火温度升至 550 °C,洛氏硬度(HRC)进一步降低至 48.09,较峰值下降了约 21.9%;但冲击吸收功与 450 °C 回火相比,有 34.7% 的提升并达到峰值,为 4.85 J。

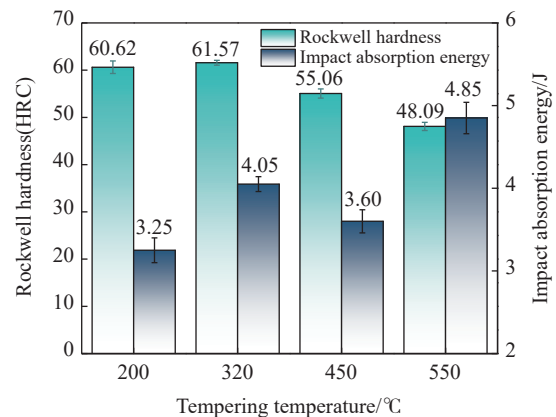
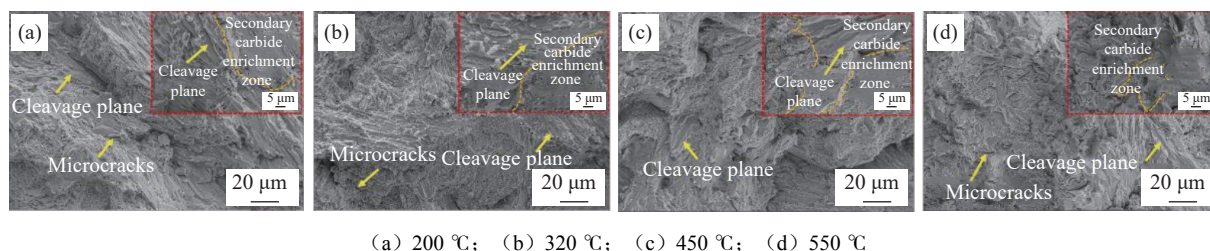


图 5 不同回火状态高铬铸铁洛氏硬度与冲击吸收功

Fig. 5 Rockwell hardness and impact energy absorption of high-chromium cast iron under different tempering conditions

整体来看,在 200~550 ℃ 的回火温度区间内,材料硬度随回火温度升高呈下降趋势,而冲击韧性则经历了先上升、后下降、再上升的趋势。320 ℃ 出现的硬度峰值可能与低温回火阶段马氏体分解、细小碳化物析出带来的二次硬化效应有关^[19, 22],见图 3 和图 4。320 ℃ 时因回火脆性及网格状共晶碳化物增多隔离基体,韧性下降。450 ℃ 后碳化物开始球化、基体软化,回火脆性减弱,韧性逐步回升。而 550 ℃ 高温回火时,共晶碳化物的分解、重组,并将基体分割成细小均匀的近圆形结构(图 2(d)),可能是导致硬度降低、韧性提升的主要原因^[22, 24]。



(a) 200 ℃; (b) 320 ℃; (c) 450 ℃; (d) 550 ℃

图 6 不同回火状态高铬铸铁冲击断口形貌

Fig. 6 Morphology of impact fracture surfaces in high-chromium cast iron under different tempering conditions

2.3 冲击-腐蚀-磨损行为

图 7 为四种回火状态高铬铸铁分别在低冲击载荷(3 J)和高冲击载荷(6 J)条件下,持续磨损 30 min 后的质量损失率计算结果。

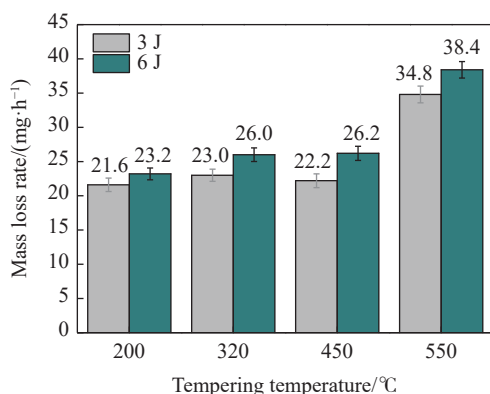


图 7 不同回火状态高铬铸铁在不同冲击载荷条件的质量损失率

Fig. 7 Mass loss rates of high-chromium cast iron after different tempering treatment under varying impact loading conditions

由图 7 可知,在低冲击载荷条件下,当回火温度处于 200~450 ℃ 时,试样的质量损失率稳定在 21.6~23.0 mg/h 范围内,表明该回火温度区间对高铬铸铁的冲击-腐蚀-磨损行为未产生显著影响。当回火温度升高至 550 ℃,试样的质量损失率显著上升至 34.8 mg/h,抗冲击-腐蚀-磨损性能出现明显恶化,说明高温回火对材料的耐磨蚀性能产生不利影

响。图 6 为不同回火状态下高铬铸铁的冲击断口形貌。从图中可以看出,四种试样的断口均呈现典型的脆性断裂特征,低倍下可见清晰的河流花样,高倍观察则显示断口组织中存在大量多簇相互平行且高度不等的解理面,并伴有少量的微裂纹。这表明在冲击载荷作用下,组织中较脆的共晶碳化物优先发生开裂与破碎,其形貌显著影响裂纹的扩展路径^[24-25]。解理面主要分布于共晶碳化物区域。与此同时,组织中析出的大量细小二次碳化物(图 4)可在一定程度上阻碍裂纹沿共晶碳化物的扩展,因而在解理台阶边缘观察到明显的二次碳化物富集现象,如图 6 所示。

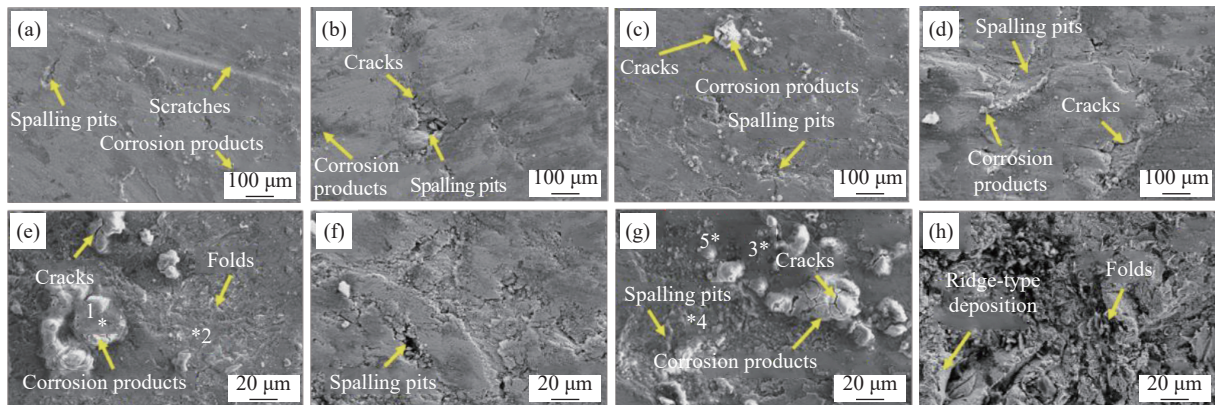
响。在高冲击载荷作用下,不同回火状态高铬铸铁的质量损失率变化趋势与低冲击载荷条件下基本一致。当回火温度不高于 450 ℃ 时,材料的质量损失率维持在 23.2~26.2 mg/h。相比之下,在经历 550 ℃ 高温回火后,材料的质量损失率快速上升至 38.4 mg/h,抗冲击-腐蚀-磨损能力大幅下降。这是因为 550 ℃ 回火处理虽然小幅度提高了材料的韧性,但整体硬度显著降低(图 5),硬度的下降可能是导致材料质量损失率显著增大的主要因素^[22, 26]。

此外,对于经同一温度回火处理的高铬铸铁,其质量损失率与冲击载荷呈正相关,6 J 冲击载荷下的质量损失率始终高于 3 J 冲击载荷。同时,随着回火温度从 200 ℃ 升高至 550 ℃,两种冲击载荷下的质量损失率差值逐渐增大,从初始的 1.6 mg/h 增至 4.4 mg/h。这一结果表明,回火温度的升高会增加高铬铸铁质量损失率对冲击载荷的敏感性,即回火温度越高,冲击载荷对材料磨损程度的影响越显著。

通过 SEM 对不同冲击载荷下试样的表面损伤形貌进行观察,如图 8 所示。结果表明,不同载荷下试样表面都出现明显的磨痕、瘤状腐蚀产物、裂纹、剥落坑及褶皱等典型的损伤特征。在 3 J 低冲击载荷的腐蚀-磨损条件下,200 ℃ 回火试样的表面损伤主要以机械磨损作用为主,特征表现为不同方向的磨痕与离散的剥落坑,表面仅存在少量的腐蚀产物,如图 8(a)所示。随着回火温度的升高,试样表面逐

渐出现腐蚀产物团聚现象,且腐蚀产物普遍存在明显的开裂,如图8(c)(e)(g)。结合表2的EDS能谱结果,不同区域的元素含量存在显著差异。点1、点3处O、Cl含量相对较高,Fe含量较低,表明这些区域覆盖有较厚的铁铬氧化物及氯化物腐蚀产物;与之相反,点2、点4、点5处O含量较低,Cl含量极少或接近零,Fe含量较高,说明这些区域的腐蚀产物已剥落,暴露出新鲜基体。进一步对比发现,点5处Cr含量为10.09%,明显高于其他点,这可能与局

部共晶碳化物富集有关,碳化物周围的基体腐蚀后暴露出富Cr碳化物颗粒。结合图8的形貌观察,开裂的腐蚀产物在磨料的循环冲击、挤压、切削、耕犁等作用下更易发生剥落,导致基体表面暴露并进一步诱发腐蚀与磨损的协同损伤。其中550℃回火试样的表面形成了尺寸更大、更深的剥落坑(图8(g)),表明高回火温度显著加剧了低载荷下的冲击-腐蚀-磨损损伤程度。该结果与图8中的质量损失率结果一致。



200 °C: (a) 3 J, (b) 6 J; 320 °C: (c) 3 J, (d) 6 J; 450 °C: (e) 3 J, (f) 6 J; 550 °C: (g) 3 J, (h) 6 J

图8 不同回火状态高铬铸铁在3 J和6 J载荷下的冲击腐蚀磨损表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of impact-corrosion wear in high-chromium cast iron with different tempering conditions under 3 J and 6 J impact loads

表2 冲击腐蚀磨损后损伤表面 EDS 分析

Table 2 EDS analysis of damaged surfaces by impact-corrosion-wear %

Point	C	O	Cr	Cl	Fe
1	3.24	25.06	5.31	4.68	61.71
2	7.66	10.02	6.69	0.24	75.39
3	2.01	29.08	2.00	3.03	63.88
4	8.09	3.26	7.96	2.16	78.53
5	4.36	2.86	10.09	0.04	82.65

在6 J高冲击载荷的腐蚀-磨损条件下,所有试样的表面损伤程度均明显加剧,且表面未观察到腐蚀产物团聚现象,推测高冲击载荷作用已将大部分生成的腐蚀产物剥离,试样表面形貌主要呈现出磨损特征,如图8(b)(d)(f)(g)所示。对于回火温度低于550℃的三种试样,表面损伤形貌具有较高的相似性,整体表面比较平整,损伤以磨损剥落为主,如图8(b)(d)(f)。相比之下,550℃回火试样的损伤形貌与前三者存在显著差异,表面观察到大面积的塑性褶皱,局部还出现了明显的脊形堆积(图8(g))。产生这种现象的主要原因在于,550℃高温回火显著降低了材料的硬度(图5),导致其在同等高冲击

载荷条件下更容易发生塑性变形。在循环冲击与磨料的挤压、切削、耕犁等共同作用下,磨损表面最终形成褶皱与脊形堆积。

为进一步探究试验材料的损伤机理,选取6 J高冲击载荷腐蚀-磨损条件下的样品进行截面形貌观察,结果如图9所示。从图中可以看出,四种回火状态材料的磨损截面都呈现波浪起伏特征,主要是由材料表面剥落与少量冲击变形引起。然而,不同回火温度下试样截面损伤形态存在一定差异。如图9(a)(b)所示,200℃和320℃回火试样的剥落坑呈“浅而长”的形态,最大深度分别为13 μm和12.6 μm,表明损伤主要以浅层材料的连续剥落为主,冲击对材料的深层破坏有限。这归因于两者较高的硬度(HRC)(60,图4)能有效抵抗磨料的冲击与磨损作用。450℃回火试样剥落坑深浅不均,长度缩短,但局部最大深度达17.8 μm(图9(c))。相比之下,550℃回火试样的剥落坑则呈现“大而深”的特征,如图9(d)所示,局部最大深度增至20 μm。产生这一现象的主要原因是,回火温度升高导致材料硬度下降,尤其是550℃时硬度(HRC)迅速降至48.09,较低的硬度显著削弱了材料抵抗冲击损伤的能力,从而加剧剥落^[22, 27]。

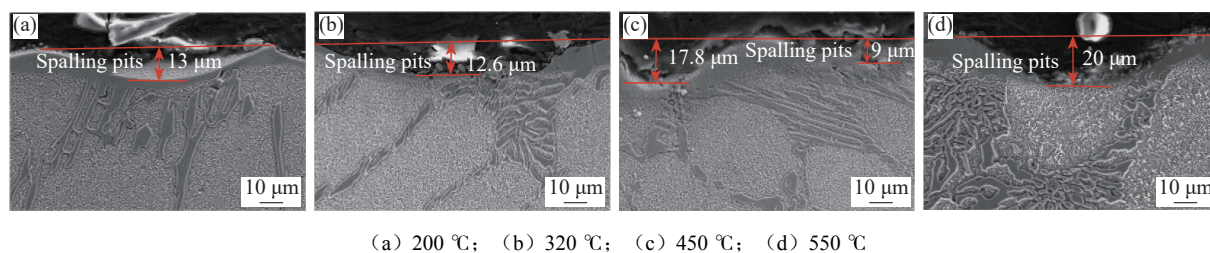


图9 高冲击载荷条件下不同回火状态高铬铸铁的冲击腐蚀磨损截面形貌

Fig. 9 Cross-sectional morphology of impact-corrosion wear in high-chromium cast iron under high impact loads for different tempering conditions

3 结论

1) 高铬铸铁回火组织主要由共晶碳化物、回火马氏体和二次碳化物构成。随着回火温度从 200 °C 升至 550 °C, 网格状共晶碳化物发生重组, 将基体分割成更均匀的近圆形结构; 同时, 析出的细小二次碳化物也逐渐粗化。

2) 200 °C 和 320 °C 低温回火处理后, 高铬铸铁的硬度(HRC)仍能保持在 60 以上, 随着回火温度进一步升高至 550 °C, 洛氏硬度有 20% 左右的下降。

3) 低温回火与高温回火对高铬铸铁的冲击韧性影响有限, 经过不同温度回火处理后四种试验材料的冲击韧性始终在 3 ~ 5 J 波动, 断口呈现典型的脆性断裂特征。

4) 高铬铸铁在低于 450 °C 回火时, 不同冲击载荷下的质量损失率均稳定保持 21.6 ~ 26.2 mg/h 范围内; 当回火温度升高至 550 °C 时, 不同冲击载荷下质量损失率显著增大至 34.8 ~ 38.4 mg/h, 抗冲击-腐蚀-磨损性能急剧恶化。

参考文献

- [1] 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与性能[J]. 金属热处理, 2021, 48(8): 56-60.
Yu Hongjun, Song Chuansongxin, Cheng Fuchao, et al. Microstructure and properties of a hypoeutectic high-Cr cast iron under different heat treatment conditions[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 48(8): 56-60.
- [2] Jena P S M, Sahu J K, Rai R K, et al. Influence of duplex ferritic-austenitic matrix on two body abrasive wear behaviour of high chromium white cast iron[J]. Wear, 2018, 406-407: 140-148.
- [3] Al-Hamadi R A, Tao Xipeng, Zhang Rui, et al. Microstructure and tribological response of a high-chromium cast iron: Role of post-normalization cooling[J]. Tribology International, 2026, 214: 111183.
- [4] Shen Yinzong, Wo Jianxing. M_3C_2 (Cr_3C_2 Type) carbides formed in steel[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106280.
- [5] Wang Menghu, Ren Wubin, Tong Shuai, et al. Wear mechanism of wear-resistant martensite steel with $(Fe, Cr)_7C_3$ reinforced phase particles[J]. Wear, 2026, 590: 206550.
- [6] 陆添爱, 蒋文昊, 吴伟, 等. 基于接地材料功能需求的耐蚀铸铁表面改性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(6): 1443-1453.
Lu Tianai, Jiang Wenhao, Wu Wei, et al. Surface modification of corrosion-resistant cast iron based on functional requirements of grounding materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(6): 1443-1453.
- [7] 王洋波, 李卫, 李杰. Q-P 钢、Q-T 钢和 Mn13Cr2 钢的腐蚀磨料磨损行为研究[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(10): 1382-1394.
Wang Yangbo, Li Wei, Li Jie. Corrosion abrasive wear behavior of Q-P steel, Q-T steel and Mn13Cr2 steel[J]. Journal of Iron Steel Research, 2025, 37(10): 1382-1394.
- [8] 杨淞普, 黄诗雨, 李刚, 等. 极地航行船舶用高强钢的磨损腐蚀交互作用机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(4): 894-904.
Yang Songpu, Huang Shiyu, Li Gang, et al. Interaction behavior of wear and corrosion of high strength marine steels for polar navigation vessels[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(4): 894-904.
- [9] 董晓蓉, 郑志斌, 龙骏, 等. 含钒铸造耐磨钢铁材料国内专利技术分析[J]. 材料研究与应用, 2022, 16: 766-775.
Dong Xiaorong, Zheng Zhibin, Long Jun, et al. Analysis of domestic patent technology of vanadium-containing cast wear-resistant steel materials[J]. Materials Research and Application, 2022, 16: 766-775.
- [10] 廖薛宇, 郑志斌, 张浩宇, 等. V 含量对高铬合金钢组织与力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(2): 207-216.
Liao Xueyu, Zheng Zhibin, Zhang Haoyu, et al. Effect of vanadium content on microstructure and mechanical properties of high chromium alloys steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(2): 207-216.

- [11] Wiengmoon A, Pearce J T H, Nusen S, et al. Electron microscopy study of carbides precipitated during destabilization and tempering heat treatments of 25wt.%Cr-0.7wt.%Mo high chromium cast irons[J]. *Micron*, 2021, 143: 103025.
- [12] 王茂森, 王帅, 龙骏, 等. TiC-TiWC₂ 增强高铬铸铁基复合材料的组织与磨损性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2025, 19(1): 164-170.
Wang Maosen, Wang Shuai, Long Jun, et al. Investigation of microstructures and wear properties of TiC-TiWC₂ reinforced high chromium cast iron matrix composites[J]. *Materials Research and Application*, 2025, 19(1): 164-170.
- [13] 方伟, 尹振兴, 仰明, 等. Cr/C 比对高铬铸铁中碳化物形态及尺寸参数的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2025, 43: 811-821, 867.
Fang Wei, Yin Zhenxing, Yang Ming, et al. Effects of Cr/C ratio on the morphology and size parameters of carbides in high chromium cast iron[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2025, 43: 811-821, 867.
- [14] 魏海波. 镍含量对高铬铸铁组织结构及性能的影响研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2024.
Wei Haibo. Study on the effect of nickel content on microstructure and properties of high-chromium cast iron[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2024.
- [15] Shimizu K, Kusumoto K, Yaer X, et al. Effect of Mo content on erosive wear characteristics of high chromium cast iron at 1173 K[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 542-548.
- [16] 刘凤伟, 季峰, 张艳, 等. 钨对高铬铸铁耐磨性能影响的研究[J]. *铸造技术*, 2020, 41: 1126-1130.
Liu Suwei, Ji Feng, Zhang Yan, et al. Research on influence mechanism of tungsten on wear resistance of high chromium cast iron[J]. *Foundry Technology*, 2020, 41: 1126-1130.
- [17] Silva A E D, Melo I N R D, Pinheiro I P, et al. Characterisation and machinability of high chromium hardened white cast iron with and without the addition of niobium[J]. *Wear*, 2020, 460-461.
- [18] Yilmaz S O, Teker T. Effect of TiBAl inoculation and heat treatment on microstructure and mechanical properties of hypereutectic high chromium white cast iron[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 672: 324-331.
- [19] 方伟, 尹振兴, 陶修坤, 等. 成分及热处理对高铬铸铁组织与性能的综合影响[J]. *材料热处理学报*, 2025, 46(12): 204-214.
Fang Wei, Yin Zhenxing, Tao Xiukun, et al. Comprehensive influence of composition and heat treatment on microstructure and properties of high chromium cast iron[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2025, 46(12): 204-214.
- [20] 王军, 崔艳雄, 刘志学, 等. 回火形变对亚温淬火中碳低合金钢组织和性能的影响[J]. *材料研究与应用*, 2022, 16(6): 976-984.
Wang Jun, Cui Yanxiong, Liu Zhixue, et al. Effect of tempering deformation on the microstructure and properties of medium-carbon low-alloy steel after intercritical quenching[J]. *Materials Research and Application*, 2022, 16(6): 976-984.
- [21] Lee J S, Basanjav O, Lee J H, et al. Effect of tempering-induced microstructural evolution on the corrosion behaviour of high chromium cast iron[J]. *RSC Advances*, 2025, 15(19): 14730-14738.
- [22] Xie Wenxiang, Chen Shengqian, Wang Shuai, et al. Microstructure-dependent impact-abrasion-corrosion failure of hypoeutectic high chromium cast iron in chloride environments[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 39: 3180-3191.
- [23] Zou Jinliang, Liu Shenglin, Zheng Zhibin, et al. Research on impact-abrasion-corrosion behavior of three typical wear-resistant steels under high impact energy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(6): 4343-4353.
- [24] 何建军, 陈荐, 任延杰, 等. 固液混合铸造高铬铸铁的拉伸性能和冲击性能的研究[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(3): 14-17.
He Jianjun, Chen Jian, Ren Yanjie, et al. Study on tensile strength and impact property of high chromium cast iron prepared by solid-liquid mixed casting process[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(3): 14-17.
- [25] 李宋宁. 高铬铸铁热塑性变形行为及断裂模型研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2025.
Li Songning. Study on thermoplastic deformation behavior and fracture model of high chromium cast iron[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2025.
- [26] Li Yongcun, Li Ping, Wang Ke, et al. Microstructure and mechanical properties of a Mo alloyed high chromium cast iron after different heat treatments[J]. *Vacuum*, 2018, 156: 59-67.
- [27] Wang Shuai, Liao Xueyu, Zheng Zhibin, et al. Exploring the hardness-independent wear behavior of typical wear-resistant materials under dynamic and static conditions[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 6798-6809.