回火温度对 Cr23 高铬合金铸铁组织性能的影响

段艳刚

（中铁城建集团第一工程有限公司，山西太原 030024）

摘要：为优化Cr23高铬合金铸铁在建筑领域的综合性能，本研究系统探讨了回火温度对其组织演变与力学性能的影响机制。试验以Cr23高铬合金铸铁为基材，设置400 ℃、450 ℃、500 ℃、550 ℃四组回火温度梯，通过淬火+回火复合热处理工艺调控材料组织。结果表明：Cr23合金铸铁在不同回火温度下性能差异明显。500 ℃回火时，组织稳定，碳化物分布佳，宏观和显微硬度达最高，屈服与抗拉强度较优，磨损失重最小，耐磨性及抗高温氧化性能最优。400 ℃回火性能较差，450 ℃居中，550 ℃因过回火，碳化物粗化，性能低于 500 ℃的情况。综合来看，500 ℃回火工艺可实现强度、韧性与耐热性的协同优化，为建筑领域高铬铸铁的应用提供了关键技术参数。

关键词：回火温度；高铬合金铸铁；显微组织；拉伸性能；摩擦磨损；高温抗氧化

作者简介：
段艳刚（1980–），男，高级工程师，研究方向：结构工程、施工技术。电话：17788978733

中图分类号：TG143.9
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）11-1496-06

基金项目：
中铁城建集团与盐城工学院合作项目：磷酸镁胶结材料基高性能钢结构防火涂料的应用及性能研究[CJ01-FJ-YCDLDCCF-2020-（ZYFB）00026]。
收稿日期：
2025–05–07 收到初稿，
2025–07–15 收到修订稿。

Cr23高铬合金铸铁是一种具有特定化学成分和性能特点的合金铸铁材料，其中铬（Cr）含量约为23%，这种高铬含量赋予了它独特的性能，使其在建筑及相关领域有着重要应用[1-2]。经过适当的热处理工艺后，Cr23高铬合金铸铁可以获得较高的硬度和强度，能够承受较大的载荷和冲击力[3]。在大型建筑结构的连接件、支撑件等方面，可以保证结构的稳定性和安全性。回火处理作为一种重要的金属热处理工艺，能够明显改变合金铸铁的组织结构，进而对其力学性能、物理性能等产生深远影响[4]。针对不同类型的合金铸铁，合理调控回火温度可有效改善其强度、硬度和抗磨损等性能[5]。为此，本研究以优化建筑合金铸铁综合性能为目标，深入探究回火温度对Cr23高铬合金铸铁组织性能的影响。通过设计不同回火温度条件，全面测试合金铸铁在不同性能方面表现，为建筑工程提供可靠的合金铸铁材料。

1 Cr23高铬合金铸铁的组织性能分析

Cr23高铬合金铸铁因高铬含量，在组织上具有显著特点，主要组织构成包括马氏体、碳化物和残余奥氏体等，在不同的环境下，Cr23高铬合金铸铁的组织和性能会发生一定变化。随着温度升高，马氏体开始发生分解，残余奥氏体也会发生转变，碳化物会发生聚集长大。这些变化会导致材料的硬度和强度下降，韧性会有所改善。通过研究不同回火温度下Cr23高铬合金铸铁的组织变化，可以找到最佳回火温度范围，使合金铸铁获得理想的强度、硬度和韧性等性能组合[6]。这有助于提高合金铸铁在实际应用中的抗磨损性能和抗疲劳性能，延长建筑构件的使用寿命[7]。为此，本文分别设计不同回火温度工艺，并对回火处理后的Cr23高铬合金铸铁组织性能进行测试。

1.1 试验材料与方法

1.1.1 试验材料选择

试验选用的是Cr23高铬合金铸铁原材料。Cr23高铬合金铸铁，其铬（Cr）含量

约为23%[8]。高铬含量赋予材料优异的耐磨性、耐腐蚀性和高温稳定性[9]。此外，材料中还含有其他合金元素，以综合提升材料性能。原材料化学成分如表1所示。

表1 成分分析
Tab. 1 Component analysis w_B/%

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

在Cr23高铬合金铸铁的铸造过程中，采用中频感应电炉进行熔炼，通过精确控制碳含量、铬含量及合金元素（Mo、V）的配比，确保成分均匀以避免夹杂物生成；随后选用树脂砂或水玻璃砂及适用耐火涂料造型与制芯，以减小型腔表面粗糙度和铸件粘砂风险；浇注时将温度严格控制在1 500~1 550 ℃范围内，避免因温度过高导致晶粒粗大或过低引发冷隔缺陷，同时将模具预加热至200~300 ℃以减缓冷却速度并降低热应力；最终在落砂后通过喷丸清理去除表面氧化皮，但需严格控制冲击力度以防止微裂纹产生，从而为后续热处理提供高质量的毛坯。试验所用试样为正方体，尺寸为长 × 宽 × 高 = 10 cm × 10 cm × 10 cm。

1.1.2 热处理工艺设计

对试样毛坯进行清洗，去除表面油污和杂质等，保证热处理过程不受外界干扰[10-11]。回火处理分别设计四种试样，每种试样采用不同回火温度，设计回火升温速率为5~10 ℃/min，四组试样回火温度与回火方式具体设计如表2所示。

其中淬火冷却与回火冷却分别采用油冷和空冷方式。

1.2 性能测试方法

1.2.1 金相显微组织分析

Cr23高铬合金铸铁凭借其高硬度、良好的耐磨性和一定的耐腐蚀性，在建筑机械和矿山设备等领域有着广泛应用。回火作为热处理工艺的重要环节，能消除淬火应力，稳定组织，改善性能。不同回火温度会使铸铁内部组织发生转变，进而影响其力学性能和使用寿命。开展本次金相显微组织分析，旨在清晰揭示不同回火温度下Cr23高铬合金铸铁试样金相组织的变化规律，为优化热处理工艺、提升铸铁性能提供理论依据。选取经过不同回火温度处理的试样，使用从150#到3 000#的湿砂纸依次对试样进行打磨，确保试样表面达到合适的光洁度[12]，随后，采用4%的硝酸酒精腐蚀试样，并通过ML8000型金相数码显微镜观察试样的金相组织，以便对不同回火温度下的金相组织特征进行详细记录和分析。

表2 不同试样回火温度设计
Tab. 2 Tempering temperature designs of different samples

热处理指标	试样编号			
	Cr23-400	Cr23-450	Cr23-500	Cr23-550
淬火温度/℃	950	950	950	950
淬火保温时间/h	2	2	2	2
回火温度/℃	400	450	500	550
回火保温时间/h	3	3	3	3

1.2.2 硬度测试

在Cr23高铬合金铸铁的硬度测试中，宏观与微观分析分阶段进行。宏观硬度测试采用HD-187.5型洛氏硬度计，设备可自动读取并显示试样表面硬度值，快速评估材料整体抗变形能力[13]。显微硬度测试则选用VICKERS 402 MVD型显微硬度计，通过显微镜精准定位测试区域，以金刚石压头在设定微小载荷下缓慢压入试样，形成菱形微压痕[14]。系统通过测量压痕对角线长度自动换算显微硬度值（HV），以揭示材料晶界和碳化物分布等微观组织的硬度差异，为分析其耐磨性、热处理效果及成分均匀性提供关键数据支撑。

1.2.3 拉伸性能测试

Cr23高铬合金铸铁的拉伸性能试验采用WDW系列万能拉伸试验机进行。试验前，依据GB/T 228.1—2010标准加工试样，确保尺寸精度与表面粗糙度符合要求。安装时，将试样稳固夹持于试验机夹具中，严格对中试样轴线与加载轴线，避免偏心加载导致数据偏差。试验采用位移控制模式，以0.05 mm/min的速率施加拉力。加载初期，试样发生线性弹性变形；随载荷增加，材料进入屈服阶段，表现为载荷小幅波动而变形持续增大，此阶段对应的应力值即为屈服强度[15]。此时，试验机记录下的力值即为屈服力，通过公式（1）可以计算出试样的屈服强度：

$$\sigma_s=F_s/S_o \quad (1)$$

式中：σ_s为屈服强度，F_s为屈服力，S_o为试样原始横截面积。

随着拉力持续增加，试样进入强化阶段，直至达到最大拉力值，此拉力值对应的强度即为抗拉强度。

1.2.4 摩擦磨损性能测试

为模拟合金铸铁在复杂工况下的磨损行为，本研究采用MLD-10型冲击磨料磨损试验机开展测试。试验选用石英砂作为磨料，通过砂流量控制系统将给料速率稳定在50 kg/h，确保磨料以连续、均匀的流态冲击试样表面。冲击参数设定为：单次冲击功2 J，冲击频率100次/min，总试验时长1 h，以复现高应力和高频率的工程磨损场景。试验全程采用精密天平实时监测试样质量损失，以量化其耐磨性能。试验结束后，利用Quanta 200环境扫描电子显微镜对磨损表面进行微观形貌分析。

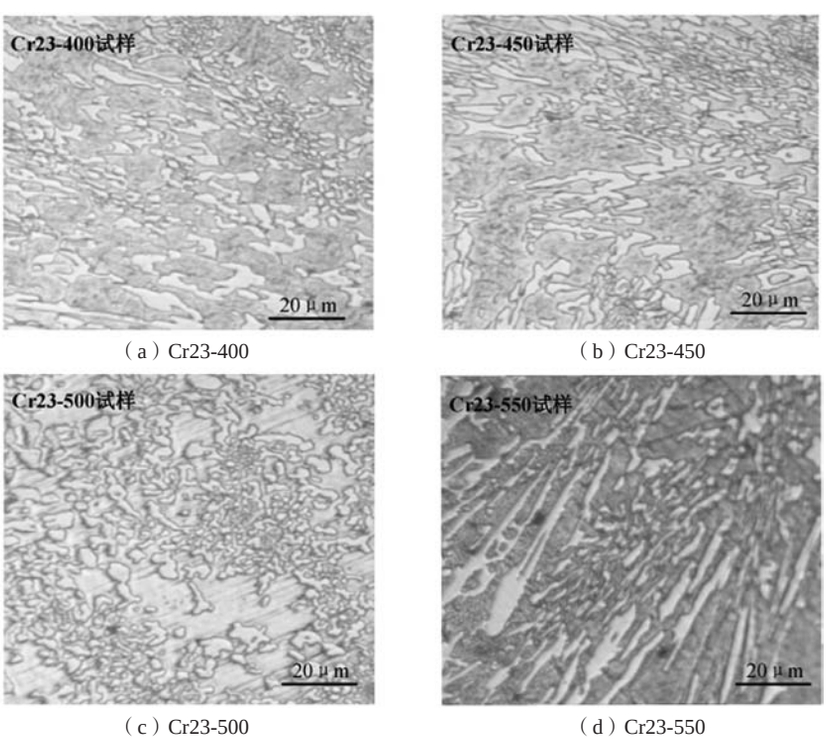
1.2.5 高温抗氧化性能测试

本研究依据GB/T 13303—1991标准开展高温氧化试验，采用可控硅调温型高温电阻炉作为氧化热处理设备，其控温精度可达 ± 1 ℃，确保1 100 ℃恒温氧化试验的温度稳定性。试验设定氧化温度为1 100 ℃，持续保温120 h，以模拟极端服役环境下的材料氧化行为。试验过程中，采用周期性称重法监测氧化质量变化：每间隔20 h将试样坩埚从炉内取出，经冷却干燥后使用精密天平称量，并详细记录质量数据。通过绘制氧化增重-时间曲线，可直观表征合金铸铁的氧化动力学特征。

2 试验分析

2.1 试样金相显微组织分析

分别分析四种回火温度下，Cr23高铬合金铸铁金相显微组织变化，分析结果如图1所示。



（a）Cr23-400　（b）Cr23-450

（c）Cr23-500　（d）Cr23-550

图1 金相显微组织分析

Fig. 1 Metallographic microstructure analysis

通过图1分析可知，回火温度对试样组织形态影响较为明显。在400~450 ℃回火区间，合金铸铁试样中开始出现粒状碳化物。此阶段，合金铸铁内部组织结构开始调整。当回火温度达到500 ℃时，马氏体与残余奥氏体大量析出粒状二次碳化物，这种分布状态赋予合金铸铁稳固的强化效果，得益于细小碳化物颗粒对基体位错运动的阻碍作用，有效提升了合金铸铁强度与硬度。而当回火温度进一步升高至550 ℃，金相组织呈现新变化。原本弥散分布于基体上的细小碳化物颗粒开始聚集长大，颗粒间密集程度下降，间距增大。

2.2 硬度分析

分别分析经过四种回火温度处理后，每种合金铸铁试样的硬度变化，分析结果如表3所示。

表3 试样硬度分析
Tab. 3 Hardness analysis of samples

试样编号	宏观硬度HRC	显微硬度HV
Cr23-400	55.6	682.2
Cr23-450	61.7	752.4
Cr23-500	64.4	795.3
Cr23-550	60.2	735.8

随着回火温度从400 ℃升高到500 ℃，Cr23合金铸铁试样的宏观硬度和显微硬度均呈现上升趋势；当回火温度进一步升高到550 ℃时，硬度出现下降。Cr23-400试样宏观硬度为HRC 55.6，显微硬度为HV 682.2。此时组织中可能存在部分未充分转变的马氏体，以及少量的残余奥氏体。较高的硬度表明，组织的稳定性相对较低，内部存在较大的内应力，使得原子间结合力较强，抵抗变形的能力较强。Cr23-450试样宏观硬度提升至HRC 61.7，显微硬度达到HV 752.4。在这个回火温度下，组织中的马氏体发生了进一步的分解，材料的强度和耐磨性有所提升，组织的稳定性较400 ℃回火时有所改善。Cr23-500试样宏观硬度达到最高的HRC 64.4，显微硬度为HV 795.3，组织稳定性进一步提高。Cr23-550试样宏观硬度下降至HRC 60.2，显微硬度为HV 735.8。当回火温度达到550 ℃时，可能发生了过回火现象，碳化物开始粗化，其对基体的弥散强化效果减弱，导致硬度下降。因此，在400~500 ℃回火温度区间内，500 ℃的回火温度可以保障更高的硬度。

2.3 拉伸性能分析

分析四种回火温度试样在试验过程中的拉伸性能，分析结果如表4所示。

表4 试样拉伸性能分析
Tab. 4 Analysis of tensile properties of samples

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
Cr23-400	1 056.8	1 356.3
Cr23-450	1 123.4	1 409.5
Cr23-500	1 204.5	1 543.9
Cr23-550	1 088.7	1 311.8

由表4可知，400 ℃回火的屈服强度为1 056.8 MPa，500 ℃时升高到1 204.5 MPa。然而，当回火温度升至550 ℃时，屈服强度下降至1 088.7 MPa。抗拉强度变化趋势与屈服强度类似，500 ℃达到最高的1 543.9 MPa。在这个温度区间内，碳化物的弥散强化效果以及组织稳定性得到提升。但在550 ℃回火后，抗拉强度降至1 311.8 MPa，同样是由于过回火致使组织性能劣化，降低了材料抵抗拉伸断裂的能力。综合分析发现，在500 ℃回火温度下，Cr23合金铸铁试样的屈服强度和抗拉强度可以保持较高水平，保障了材料的力学性能。

2.4 摩擦磨损性能分析

分析四种不同回火温度试样的磨损失重情况，分析结果如图2所示。

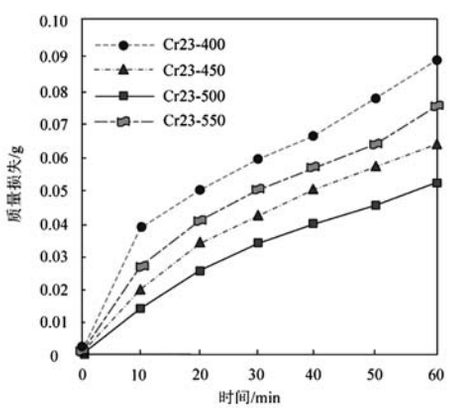


图2 不同试样磨损失重分析
Fig. 2 Analysis of wear loss of different samples

通过图2可知，在不同的摩擦时长下，四种回火温度的Cr23合金铸铁试样的磨损失重均呈现出随时间增加而上升的趋势。在10 min的摩擦时间下，Cr23-400试样的磨损失重约为0.040 g，Cr23-450试样约为0.025 g，Cr23-500试样约为0.015 g，Cr23-550 试样约为0.030 g，其中Cr23-500试样的磨损失重最小。当摩擦时间延长至60 min时，Cr23-400试样的磨损失重约为0.090 g，Cr23-450试样约为0.060 g，Cr23-500试样约为0.049 g，Cr23-550试样约为0.075 g，此时依旧是Cr23-500试样的磨损失重最小，因此该试样的回火温度能够有效保障其耐磨性能。

分析四种不同回火温度试样的磨损形貌，以评估每种回火温度对试样表面磨损性能的影响，分析结果如图3所示。

从磨损形貌与组织性能关联性分析，不同回火温度下Cr23高铬铸铁的耐磨性差异显著。Cr23-400试样表面呈现严重剥落与深划痕，其根源在于400 ℃回火后组织中残留大量未分解马氏体及残余奥氏体。马氏体的高硬度导致摩擦局部应力集中，而残余奥氏体在受力时易发生马氏体相变，诱发组织内应力波动，加速材料剥落，故其耐磨性表现最差。Cr23-450试样磨损程度有所缓解，因450 ℃回火促进马氏体分解及碳化物均匀析出，但碳化物弥散强化效果尚未达到峰值，耐磨性提升幅度有限。Cr23-500试样磨损痕迹最轻微，归因

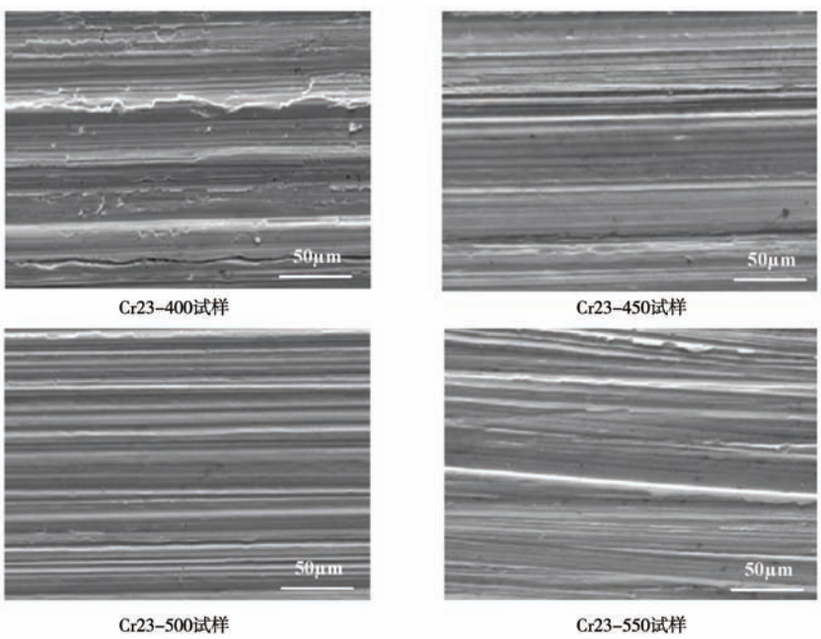


图3　磨损形貌分析

Fig. 3 Wear morphology analysis

于该温度下内应力充分释放，组织稳定性显著增强，碳化物分布与基体匹配最优，抗磨损能力达到最佳平衡。Cr23-550试样因过回火导致碳化物粗化，虽塑性略有改善，但粗大碳化物对基体的钉扎作用减弱，耐磨性较500 ℃试样下降，但仍优于低温回火状态。

2.5　高温抗氧化性能分析

分析四种退火温度试样在高温氧化条件下的氧化质量增加动力学曲线，以此评估每种试样的耐高温氧化性能，分析结果如图4所示。

通过图4的氧化动力学曲线分析可知，四种回火温度下的Cr23合金铸铁试样在1 100 ℃高温氧化过程中均呈现质量持续增加的趋势，表明合金基体与氧气持续反应生成氧化物。其中，Cr23-500试样的氧化增重速率最低，这得益于其表面形成的致密氧化膜结构。该氧化膜可有效阻碍氧气向基体内部扩散，抑制连续氧化反应的进行，因此展现出最优的抗高温氧化性能。相比之下，Cr23-450试样的氧化速率居中，其氧化膜虽具有一定保护作用，但致密度不及500 ℃试样，导致氧气渗透速率相对较高。而Cr23-400试样氧化增重最为显著，表明该回火温度下合金的氧化膜结构疏松，无法有效隔绝氧气，导致基体持续剧烈氧化。Cr23-550试样氧化速率虽低于400 ℃，但因碳化物粗化导致晶界弱化，氧化膜防护能力下降。综合来看，500 ℃回火处理可显著提升合金的高温抗氧化稳定性。

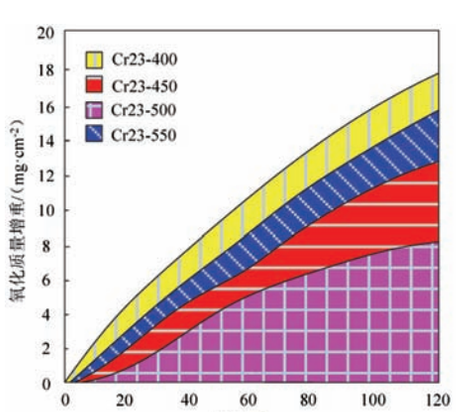


图4　抗高温氧化效果分析

Fig. 4 Analysis of oxidation resistance at high temperature

3　结论

（1）回火温度对Cr23合金铸铁组织影响显著。400~450 ℃时，粒状碳化物开始析出；500 ℃时马氏体与残余奥氏体大量析出细小二次碳化物，强化效果最佳；550 ℃时碳化物粗化，弥散强化效果减弱。

（2）500 ℃回火温度下，试样综合力学性能最优，宏观硬度达HRC 64.4，显微硬度HV 795.3，屈服强度1 204.5 MPa，抗拉强度1 543.9 MPa。此温度下碳化物分布与基体匹配最优，兼顾了强度与韧性。

（3）500 ℃回火试样耐磨性最佳，10 min摩擦时长下磨损失重仅0.015 g，60 min时为0.049 g，磨损痕迹最轻。这归因于组织稳定性增强和致密氧化膜的形成，有效阻碍了磨损过程中的材料剥落。

（4）500 ℃回火试样在1 100 ℃高温氧化120 h后氧化增重速率最低，氧化膜致密性最佳，显著优于其他温度试样。

因此，500 ℃回火温度能使合金获得理想性能组合，提升其在建筑应用中的抗磨损与抗疲劳性能，保障建筑构件安全可靠。

参考文献：

[1] 崔陈，朱协彬，程敬卿，等. 等离子熔覆Fe基/WC-10Co-4Cr涂层的组织与性能研究 [J]. 表面技术，2023，52（7）：167–176.
[2] 凌晨，李尚平，林筠，等. Co-Cr-Nb-W合金碳化物组织转变及力学性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程，2024，53（3）：815–824.
[3] 申晓凤，黄娇，李志康，等. 超音速火焰喷涂制备Cr涂层及其高温氧化性能 [J]. 表面技术，2023，52（2）：412–421.
[4] 卞宏友，王美男，刘伟军，等. DZ125合金激光沉积CoCrW涂层的组织与性能 [J]. 热加工工艺，2024，53（19）：121–127.
[5] 斯松华，郑孟勤，徐震霖，等. Cr_3C_2对激光选区熔化316L合金组织及力学性能的影响 [J]. 表面技术，2024，53（3）：191–199.
[6] 孙文强，周珠，徐阿敏，等. 热处理工艺对高铬低活化铁素体-马氏体钢力学性能的影响 [J]. 特殊钢，2024，45（2）：105–111.
[7] 袁志钟，刘海明，鞠玉琳，等. 亚临界热处理对高铬铸铁组织及性能的影响 [J]. 金属热处理，2024，49（10）：1–7.
[8] 张宇，李圣阳，魏晓蓼，等. 铬合金化Q&P钢的热处理工艺优化与碳配分行为 [J]. 金属热处理，2024，49（9）：110–116.
[9] 迟蕊，徐志远，孟双，等. Cr元素及不同工艺对Al-Mg-Si合金组织和性能的影响 [J]. 锻压技术，2024，49（8）：88–93.
[10] 丁怀博，陈兵兵，李思功，等. Cr涂层对锆合金包壳管脉冲TIG焊接工艺的影响 [J]. 热加工工艺，2023，52（23）：55–57.
[11] 卓润杰，罗烨，范慧敏，等. 亚快速凝固制备Al-6La-Fe/Co/Ni合金的组织和性能 [J]. 铸造，2025，74（2）：150–157.
[12] 胡雨欣，胡梓轩，徐雄辉，等. Nb-22.5Cr-2.5Mo-5Si合金制备及性能研究 [J]. 上海金属，2023，45（4）：25–29.
[13] 袁江淮，王振玉，马冠水，等. Cr_2AlC涂层相结构演变对力学性能的影响 [J]. 金属学报，2023，59（7）：961–968.
[14] 寇元哲. 模具钢CrWMn碳化物偏析的热处理工艺研究 [J]. 模具技术，2017（2）：60–63.
[15] 项辉宇，黄辉琼，冷崇杰，等. 模具和工艺参数对铝合金成形件回弹仿真研究 [J]. 计算机仿真，2024，41（2）：386–390.

Effect of Tempering Temperature on the Microstructure and Properties of Cr23 High Chromium Alloy Cast Iron

DUAN Yan-gang
(China Railway Urban Construction Group No.1 Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract:
In order to optimize the comprehensive performance of Cr23 high chromium alloy cast iron in the construction field, this study systematically explored the influence mechanism of tempering temperature on its microstructure evolution and mechanical properties. Taking the Cr23 high chromium alloy cast iron as base material in the experiments and setting four tempering temperatures of 400 ℃, 450 ℃, 500 ℃, and 550 ℃, the material structures were regulated by using of quenching and tempering composite heat treatment processes. The results show that the performances of Cr23 alloy cast irons vary significantly at different tempering temperatures. When tempered at 500 ℃, the alloy exhibits a stable microstructure, with uniformly and well-dispersed carbides; both macroscopic and microscopic hardness reach the maximum values, yield strength and tensile strength are excellent, wear loss is minimal, and it exhibits optimal wear resistance and high-temperature oxidation resistance. The tempering performance is poor at 400 ℃, intermediate at 450 ℃, and inferior to 500 ℃ due to over tempering and coarsening of carbides at 550 ℃. Overall, the 500 ℃ tempering process can achieve synergistic optimization of strength, toughness, and heat resistance, providing key technical parameters for the application of high chromium cast iron in the construction field.

Key words:
tempering temperature; high chromium alloy cast iron; microstructure; tensile property; friction and wear; high temperature oxidation resistance

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）