

热处理工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢组织与硬度的影响^①

刘冬¹, 陶军¹, 匡园²

(1.中冶检测认证有限公司, 北京 100088; 2.中国石油大学(北京) 新能源与材料学院, 北京 102249)

摘要: 采用 OM、SEM、XRD 分析, 硬度测试等手段研究了不同温度下淬火、回火对退火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织与硬度的影响。结果表明, 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织主要为马氏体, 富含 V、W、Mo 的 MC 碳化物, 富含 W、Mo 的 M₆C 碳化物和残余奥氏体; 随着回火温度升高, W6Mo5Cr4V2 钢组织中的碳化物尺寸增大, 硬度先升高后降低; 1 160 °C 淬火+540 °C 回火(3 次)的 W6Mo5Cr4V2 钢中碳化物尺寸细小、分布均匀, 残余奥氏体基本得到消除, 硬度达到 64.2HRC。

关键词: W6Mo5Cr4V2; 高速钢; 淬火; 回火; 显微组织; 硬度; 热处理

中图分类号: TG161

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.030

文章编号: 0253-6099(2025)04-0164-04

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of W6Mo5Cr4V2 Steel

LIU Dong¹, TAO Jun¹, KUANG Yuan²

(1. Inspection and Certification Co., Ltd. MCC, Beijing 100088, China; 2. College of New Energy and Materials, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: Effects of quenching and tempering at different temperatures on the microstructure and hardness of annealed W6Mo5Cr4V2 steel were studied by means of OM, SEM, XRD analysis and hardness test. The results show that the microstructure of quenched W6Mo5Cr4V2 steel is mainly composed of martensite, MC carbide rich in V, W and Mo, and M₆C carbide rich in W and Mo, as well as residual austenite. As tempering temperature rises, the carbide in the microstructure of W6Mo5Cr4V2 steel grows in size, and the hardness decreases after an initial increase. After quenching at 1 160 °C plus three times of tempering at 540 °C, W6Mo5Cr4V2 steel has its carbide become smaller and evenly distributed, and its residual austenite almost eliminated, showing the hardness up to 64.2HRC.

Key words: W6Mo5Cr4V2; high speed steel; quenching; tempering; microstructure; hardness; heat treatment

高速工具钢又称高速钢,是经过特殊热处理后兼具高硬度和高耐磨性的耐热耐磨钢种,多用于制造机加工刀具。当前我国通用的高速钢以 W 系和 W-Mo 系为主, W6Mo5Cr4V2 钢作为典型的 W-Mo 系高速钢,碳化物均匀性好,力学性能优良,已成为当前我国广泛应用的高速钢种之一^[1-2]。合适的热处理工艺不但可以降低 W6Mo5Cr4V2 钢中残余奥氏体含量,避免残余奥氏体转变为脆性较高的马氏体,同时还对 W6Mo5Cr4V2 钢中碳化物数量、尺寸和分布等重要影响,通过热处理可以改善 W6Mo5Cr4V2 钢的综合力

学性能,提升其使用寿命。近年来一些学者对 W6Mo5Cr4V2 钢的热处理工艺进行了较多研究,并取得了一些成果^[3-4]。硬度高和耐磨性好是 W6Mo5Cr4V2 钢的显著优点,合适的淬火工艺可使 W6Mo5Cr4V2 钢中的碳化物稳定分布在基体中,从而提高其硬度,合适的回火工艺可以使 W6Mo5Cr4V2 钢中的合金碳化物弥散析出,消除组织中的残余奥氏体,形成稳定的组织,提升材料的综合性能。本文研究了淬火、回火工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢微观组织与硬度的影响规律,研究成果可为 W6Mo5Cr4V2 钢的实际生产

① 收稿日期: 2025-01-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0209606)

作者简介: 刘冬(1984—),女,陕西商洛人,硕士,高级经济师,主要研究方向为金属材料、冶金工程。E-mail: liudong@cribc.com

通信作者: 陶军(1982—),男,江西鄱阳人,高级工程师,主要研究方向为金属材料、冶金工程。E-mail: marstars521@sina.com

应用提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用钢为退火态 W6Mo5Cr4V2 钢棒材,实测其化学成分如表 1 所示。

表 1 W6Mo5Cr4V2 钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of W6Mo5Cr4V2 steel %

C	W	Mo	Cr	V	P	S	Si	Mn	Fe
0.87	5.85	4.72	4.21	1.98	0.007	0.003	0.212	0.257	余量

1.2 热处理工艺与表征方法

合适的淬火既要保证 W6Mo5Cr4V2 钢中粗大的碳化物充分溶入基体,又要保证其晶粒不发生粗化。后续的回火可使 W6Mo5Cr4V2 钢组织中析出细小、弥散的碳化物,使 W6Mo5Cr4V2 钢具有更高的硬度和更优的耐磨性。结合文献[3]、[5]的相关研究成果设计本次 W6Mo5Cr4V2 钢的淬火、回火试验,具体工艺为:采用高温箱式电阻炉将退火态 W6Mo5Cr4V2 钢试样分别加热到 1 140、1 160、1 180、1 200 °C 并保温 30 min,再油淬,得到淬火态样品,取样测试其硬度并对其微观组织进行观察;采用箱式电阻炉将淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢分别加热到 510、540、570、600 °C,均回火处理 3 次,每次回火保温 1 h,空冷,得到回火态样品,最终通过微观组织观察和硬度测试确定 W6Mo5Cr4V2 钢的最佳回火工艺。

采用 THR-150DX 洛氏硬度计测试淬火态和回火态 W6Mo5Cr4V2 钢硬度,每种试样测量 7 个硬度点,取平均值为测试结果,加载载荷 150 kg,保荷时间 30 s。在 Axiover-200 MAT 光学显微镜和 Sirion 2000 型扫描电子显微镜上观察 W6Mo5Cr4V2 钢淬火态和回火态试样的微观组织形貌,并用 EDS 能谱仪分析淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳化物成分。采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪分析 W6Mo5Cr4V2 钢试样物相。

2 试验结果

2.1 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢的硬度与组织

图 1 为淬火温度对 W6Mo5Cr4V2 钢硬度的影响。由图 1 可见,随着淬火温度升高,W6Mo5Cr4V2 钢硬度先升高后降低。淬火温度 1 160 °C 时,W6Mo5Cr4V2 钢的硬度最高,为 66.5HRC。1 140 °C 淬火时,由于淬火温度较低,W6Mo5Cr4V2 钢组织中的碳化物溶解有限,固溶不充分,所以 W6Mo5Cr4V2 钢的硬度较低。淬火

温度升高到 1 160 °C 时,元素的扩展能力增强,C 与合金元素更充分地溶入基体,固溶效果较好。淬火温度继续升高到 1 180 和 1 200 °C 时,W6Mo5Cr4V2 钢中碳化物大量溶解,对晶界钉扎效果减弱,W6Mo5Cr4V2 钢的晶粒开始长大粗化,最终使得 W6Mo5Cr4V2 钢硬度开始下降。因此,确定 W6Mo5Cr4V2 钢适宜的淬火温度为 1 160 °C。

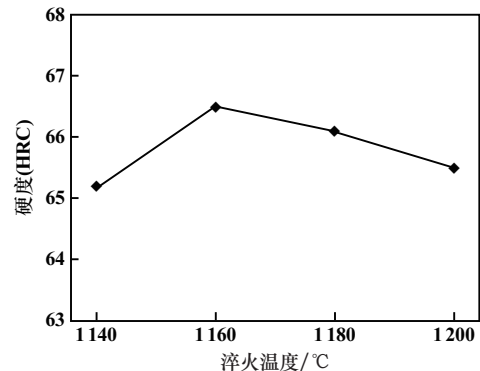


图 1 淬火温度对 W6Mo5Cr4V2 钢硬度的影响

Fig. 1 Effect of quenching temperature on hardness of W6Mo5Cr4V2 steel

图 2 为 1 160 °C 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢的 SEM 组织。由图 2 可见,淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织主要为马氏体、残余奥氏体和碳化物,结合文献[5]结果可确定,钢中的碳化物主要为 MC、M₆C。对 1 160 °C 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢中 MC、M₆C 碳化物进行 EDS 能谱分析,结果见图 3。由图 3 可见:W6Mo5Cr4V2 钢中 MC 碳化物中 V 元素含量极高,W 元素、Mo 元素含量次之;M₆C 碳化物中 W 元素含量极高,其次是 Mo 元素。

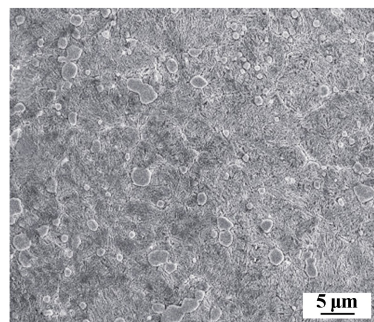


图 2 1 160 °C 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢的 SEM 组织

Fig. 2 SEM images of W6Mo5Cr4V2 steel quenched at 1 160 °C

2.2 回火态 W6Mo5Cr4V2 钢的硬度与组织

回火温度对 1 160 °C 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢硬度的影响见图 4。由图 4 可见,随着回火温度升高,W6Mo5Cr4V2 钢硬度先升高后降低。回火温度 540 °C 时,W6Mo5Cr4V2 钢硬度最高,为 64.2HRC。

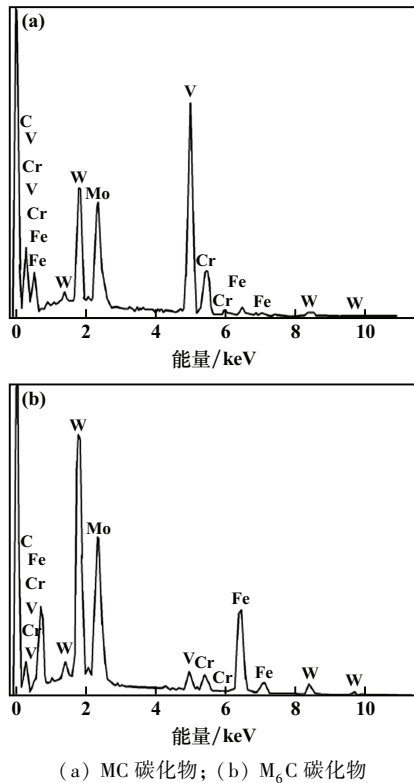


图3 1 160 ℃ 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢中 MC、M₆C 碳化物能谱分析结果

Fig.3 Energy spectrum analysis of MC and M₆C in W6Mo5Cr4V2 steel quenched at 1 160 ℃

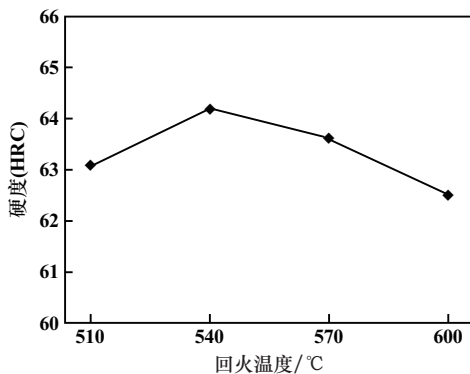
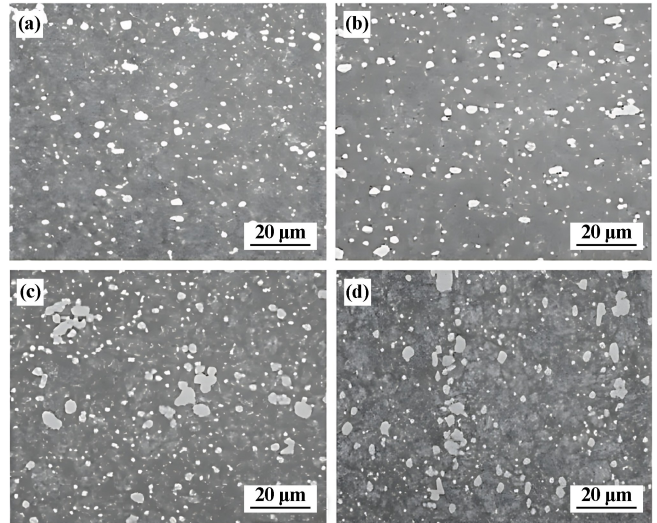


图4 回火温度对 W6Mo5Cr4V2 钢硬度的影响
Fig.4 Effect of tempering temperature on hardness of W6Mo5Cr4V2 steel

图5 为不同回火温度下 W6Mo5Cr4V2 钢的显微组织。由图5可见,1 160 ℃ 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢经过回火处理后组织中析出了大量弥散碳化物。在 510~600 ℃ 区间,随着回火温度升高,W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳化物含量逐渐提高,碳化物尺寸增大,540 ℃ 回火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳化物尺寸细小、分布均匀。



(a) 510 ℃ ; (b) 540 ℃ ; (c) 570 ℃ ; (d) 600 ℃
图5 不同回火温度下 W6Mo5Cr4V2 钢的显微组织
Fig.5 Microstructure of W6Mo5Cr4V2 steel tempered at different temperatures

图6 为 1 160 ℃ 淬火和 1 160 ℃ 淬火+540 ℃ 回火(3次) W6Mo5Cr4V2 钢的 XRD 图谱。由图6可见,1 160 ℃ 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢的 XRD 图谱中残余奥氏体衍射峰较为明显,而回火态 W6Mo5Cr4V2 钢的 XRD 图谱中已基本无奥氏体衍射峰,由此可知,回火后,淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢中的残余奥氏体基本得到消除^[6-9],转变为马氏体。

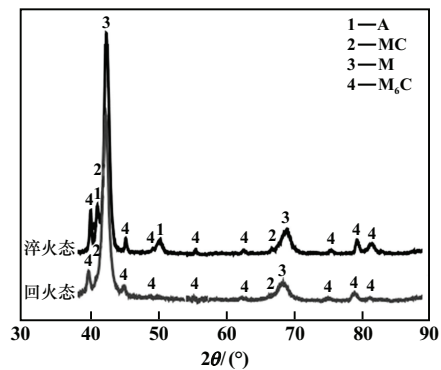


图6 淬火态和回火态 W6Mo5Cr4V2 钢的 XRD 图谱
Fig.6 XRD patterns of quenched and tempered W6Mo5Cr4V2 steel

3 结论

1) 淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢组织主要为马氏体,富含 V、W、Mo 元素的 MC 碳化物,富含 W、Mo 元素的 M₆C 碳化物和残余奥氏体。W6Mo5Cr4V2 钢的最佳淬火温度为 1 160 ℃,此时其硬度为 66.5HRC。

2) 随着回火温度升高,W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳

化物含量逐渐提高,碳化物尺寸增大,540 ℃回火的 W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳化物尺寸细小、分布均匀。

3) 1 160 ℃淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢经过 3 次 540 ℃回火处理后,其组织为马氏体、MC 和 M_6C 碳化物,硬度为 64.2HRC。W6Mo5Cr4V2 钢的最佳热处理工艺为:1 160 ℃×30 min 淬火+540 ℃×1 h 回火(3 次)。

参考文献(References):

- [1] YUAN K, WU H C, YANG L, et al. Experiments, analysis and parametric optimization of roll grinding for high-speed steel W6Mo5Cr4V2[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020,109(5):1275-1284.
- [2] RASTEGAEV I A, RASTEGAEVA I I, MERSON D L, et al. The wear features of a plasma thin-film coating on high-speed steel[J]. Journal of Friction and Wear, 2020,41(2):160-168.
- [3] 王琦,卢军,杨威,等. 高速钢降温淬火、回火工艺研究[J]. 热处理技术与装备, 2013,34(4):16-18.
WANG Qi, LU Jun, YANG Wei, et al. Study on cooling quenching and tempering process of high speed steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013,34(4):16-18.
- [4] 卢军,王琦,蔡红,等. W6Mo5Cr4V2 高速钢深冷处理研究[J]. 热处理, 2009,24(4):40-44.
LU Jun, WANG Qi, CAI Hong, et al. Influence of deep cryogenic treatment on properties of W6Mo5Cr4V2 high speed steel[J]. Heat Treatment, 2009,24(4):40-44.
- [5] 何星,李炎铮,雷雄辉,等. 热处理工艺对 CM2 高速钢组织性能的影响[J]. 上海金属, 2019,41(1):66-70.
-
- (上接第 163 页)
- [20] WANG X K, SHI J, MI L W, et al. Hierarchical porous hard carbon enables integral solid electrolyte interphase as robust anode for sodium-ion batteries[J]. Rare Metals, 2020,39(9):1053-1062.
- [21] WANG J C, ZHAO J H, HE X X, et al. Hard carbon derived from hazelnut shell with facile HCl treatment as high-initial-coulombic-efficiency anode for sodium ion batteries[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2022,33:e00446.
- [22] 张畅,解强,沙雨桐,等. 低灰低硅竹炭的制备及衍生硬炭的电化学性能[J]. 化工学报, 2025,76(6):3073-3083.
ZHANG Chang, XIE Qiang, SHA Yutong, et al. Preparation of bamboo char with low ash and silicon content and electrochemical properties of its derived hard carbon[J]. CIESC Journal, 2025,76(6):3073-3083.
- [23] 汪昆平,徐乾前. 几种不同处理方法对活性炭表面化学性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012,6(2):373-380.
WANG Kunping, XU Qianqian. Effect of several different treatment methods on surface chemical properties of activated carbon[J]. Chinese

- Journal of Environmental Engineering, 2012,6(2):373-380.
- [24] ZHANG Y H, WU C, CHEN Q H, et al. Revealing the structural influence mechanism of intrinsic potassium/calcium elements on bio-waste-derived hard carbon for sodium-ion batteries[J]. Chemical Communications, 2024,60(91):13380-13383.
- [25] 王磊,杨程,高彦峰,等. 菠萝蜜核衍生硬碳的制备与储钠机理[J]. 广州化学, 2024,49(4):36-41.
WANG Lei, YANG Cheng, GAO Yanfeng, et al. Preparation of hard carbon derived from jackfruit seeds and its mechanism of sodium storage[J]. Guangzhou Chemistry, 2024,49(4):36-41.
- HE Xing, LI Yanzheng, LEI Xionghui, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of CM2 high speed steel[J]. Shanghai Metals, 2019,41(1):66-70.
- [6] 李亮军,张家敏,迟宏宵,等. 热处理工艺对 M2 高速钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(9):72-79.
LI Liangjun, ZHANG Jiamin, CHI Hongxiao, et al. Influence of heat treatment process on microstructure and properties of M2 high speed steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021,46(9):72-79.
- [7] 史术华,高擎,钱亚军. 低温回火对低碳马氏体超高强钢组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):174-178.
SHI Shuhua, GAO Qing, QIAN Yajun. Effect of low-temperature tempering on microstructure and mechanical properties of low-carbon martensitic ultra-high strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):174-178.
- [8] LI J J, YAN X G, LIANG X Y, et al. Influence of different cryogenic treatments on high-temperature wear behavior of M2 steel[J]. Wear, 2017,376-377:1112-1121.
- [9] 李敏,姚玉梅,李俊杰,等. 淬火-配分处理对齿轮轴用钢组织性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):170-174.
LI Min, YAO Yumei, LI Junjie, et al. Effect of quenching and partitioning treatment on microstructure and properties of steel for gear shafts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):170-174.

引用本文:刘冬,陶军,匡园. 热处理工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢组织与硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):164-167.

LIU Dong, TAO Jun, KUANG Yuan. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of W6Mo5Cr4V2 steel [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):164-167.

引用本文:杜浩杰,张磊,王亲猛,等. 竹基硬炭负极材料不同除杂工艺及其储钠性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):158-163.

DU Haojie, ZHANG Lei, WANG Qimmeng, et al. Sodium storage performance of bamboo-derived hard carbon materials prepared by different impurity removal processes [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):158-163.