文章编号：1005-0523(2025)01-0105-08

40CrNiMoA钢组织与耐磨性能研究

罗 杰[1]，李 祥[1]，杨 旭[1]，韩佳龙[2]，吴韦莉[2]

（1. 贵州航天精工制造有限公司，贵州 遵义 563000；2. 南昌航空大学材料科学与工程学院，江西 南昌 330063）

摘要：为了解决40CrNiMoA钢硬度低和耐磨性能差的问题，设计了一种热处理工艺，采用水、盐溶液、油3种不同淬火介质，对40CrNiMoA钢进行高频淬火+低温回火热处理。采用HV-2000型维氏硬度计测试热处理后试样表面硬度，采用SFT-2M球-盘摩擦磨损试验机检测其耐磨性能。试验结果表明，当淬火介质为盐溶液时，回火马氏体更为细小，经热处理后的试样表面硬度最高，达到431.2 $HV_{0.2}$，同时其磨损量最小。经盐溶液淬火后，可得到细小的回火马氏体，使得40CrNiMoA钢的硬度提高，试样磨损量减少，耐磨性能增强。

关键词：高频淬火；淬火介质；表面硬度；摩擦磨损性能

中图分类号：TG161；[U25] **文献标志码：**A

本文引用格式：罗杰，李祥，杨旭，等. 40CrNiMoA钢组织与耐磨性能研究[J]. 华东交通大学学报，2025，42(1)：105-112.

Research on Microstructure and Wear Resistance of 40CrNiMoA Steel

Luo Jie[1], Li Xiang[1], Yang Xu[1], Han Jialong[2], Wu Weili[2]

(1. Guizhou Aerospace Precision Manufacturing Co., Ltd., Zunyi 563000, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to solve the problem of low hardness and poor wear resistance of 40CrNiMoA steel, a heat treatment process was designed, and three different quenching mediums were used, including water, salt solution and oil, to carry out high-frequency quenching and low-temperature tempering heat treatment of 40CrNiMoA steel. The HV-2000 Vickers hardness tester was used to test the surface hardness of the sample after heat treatment, and the SFT-2M ball-disc friction and wear testing machine was used to test its wear resistance. The results show that when the quenching medium was salt solution, the tempered martensite was smaller, and the surface hardness of the specimen after heat treatment was the highest, reaching 431.2 $HV_{0.2}$, and the wear was the smallest. After quenching in salt solution, fine tempered martensite can be obtained, resulting in increased hardness of 40CrNiMoA steel, less wear of the specimen and enhanced wear resistance.

Key words: high frequency quenching; quenching medium; surface hardness; friction and wear properties

Citation format: LUO J, LI X, YANG X, et al. Research on microstructure and wear resistance of 40CrNiMoA steel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 105-112.

收稿日期：2024-05-20

基金项目：贵州航天精工制造有限公司与南昌航空大学合作课题（GK202101048）

长期以来，我国在高端结构钢的研发领域进展缓慢，高度依赖从日本和德国进口。这种对进口原料的严重依赖极大地制约了我国相关产业的成长速度。鉴于此，国家亟待加速推进高端钢铁产品的国产化进程。因此，深入研究钢铁材料的热处理技术及强韧化机制，对于推动我国高端钢铁产业的蓬勃发展具有极其重要的现实意义[1]。

40CrNiMoA钢，作为一种优质高淬透性调质钢，因其具备的高强度、韧性、淬透性和出色的抗过热稳定性而引人注目。这些优异的材料特性使其生产工艺相对简单，并且综合力学性能卓越。基于这些特点，40CrNiMoA钢在航空、新能源汽车等多个领域得到了广泛的应用[2]，特别是在重型机械制造领域，40CrNiMoA钢常用于制造那些需要高强度、大截面尺寸和复杂结构的承载或传动零部件，如卧式锻造机的传动偏心轴、齿轮、飞机起落架和紧固件等[3-4]。

在轨道交通这一关键领域中，40CrNiMoA钢更是发挥着不可替代的作用。它被广泛应用于车站站台、轨道梁以及其他关键结构部件，以支持列车的正常运行并承受沉重的负载。研究表明，通过使用这类高质量的材料，可以有效保障整个轨道交通系统的稳定运营，减少事故发生的风险，提升乘客的安全指数，同时也可以延长系统的使用寿命[5]。合理的热处理工艺是调控40CrNiMoA钢组织与力学性能的重要手段[6]。采用淬火工艺使奥氏体化的组织尽可能地转变为马氏体，随后配以不同温度回火来获得所需要的各种性能。吴寅杰等通过调控淬火组织的配比优化了热处理工艺，并发现40CrNiMoA钢在750 ℃淬火时具有高强韧性；他们深入研究了淬火温度对40CrNiMoA钢组织与性能的影响，并通过微结构调控获得了铁素体-马氏体双相组织，实现了强塑性更佳的超高强钢[7]。李世键等研究了回火温度对40CrNiMoA钢力学性能的影响，发现该钢的抗拉强度和剪切强度均随回火温度的升高而逐渐降低，但其塑性基本不变[8]。其他学者也发现随回火温度的升高，40CrNiMoA钢的强度和硬度均降低[9-10]。另外，一些学者也研究了其他热处理工艺对40CrNiMoA钢组织与性能的影响[1,11-13]。

40CrNiMoA钢零部件在恶劣环境中使用通常易遭受磨损而导致失效，为提高其耐磨性能需进行表面热处理。除了对其进行渗氮[14]以外，也可采用高频淬火技术对其表面进行热处理以提高材料的耐磨损性能[15]。目前，对40CrNiMoA钢进行高频淬火的研究还鲜有报道。为此，本文探讨了通过高频淬火结合回火的热处理手段来调控40CrNiMoA钢的组织结构和性能，同时考虑了高频淬火过程中冷却介质的作用。研究深入分析了不同热处理工艺对40CrNiMoA钢摩擦磨损性能的影响规律，为这种钢材在工业领域的应用提供了有价值的参考。此外，研究还着重考察了采用不同淬火介质进行高频淬火后，再配以低温回火处理对40CrNiMoA钢的硬度和耐磨性能所产生的具体影响，这一研究具有重要的实际意义。

1 实验材料及方法

试验选用材料为40CrNiMoA钢，尺寸为10 mm×10 mm×10 mm，其化学成分如表1所示。依据40CrNiMoA钢的平衡相图（图1），可知其微观组织两相区温度为680~754 ℃。40CrNiMoA钢的热处理工艺如图2所示，首先对试样进行高频淬火处理，加热时间为8 s，冷却时间为5 s；然后分别在水、油、盐溶液（成分为7%的碳酸钠、3%的硫酸镁、2%的焦磷酸钠水溶液）3种介质中进行快速冷却；最后对试样在350 ℃下进行回火处理，回火保温时间为2 h，以获得回火马氏体组织。

按照《金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验》（GB/T 12444—2006）方法，采用SFT-2M球-盘摩擦磨损试验机对热处理后的试样进行摩擦磨损实验[16]，试验转速为120 r/min，载荷为10 N，试验时间为20 min，对磨试样为SiC硬质球，所有试验均在室温下进行。① 高频淬火采用SPG-60B型高频感应加热设备，在实验准备阶段，首先样品需在丙酮中进行超声洗涤5 min，然后用电子天平（准确度为0.1 mg）称取样品磨损前后的重量，计算试样的磨损失重；② 采用LWD200-4XC型光学显微镜

表1 40CrNiMoA钢的化学成分（质量分数/%）

Tab.1 Chemical composition of 40CrNiMoA steel (mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.390	0.260	0.656	0.003	0.002	0.845	1.330	0.187	余量

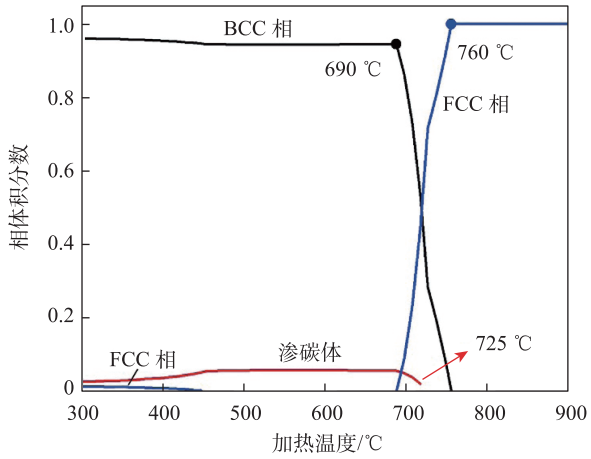


图1　40CrNiMoA钢的平衡相图[7]

Fig. 1　Equilibrium phase diagram of 40CrNiMoA steel

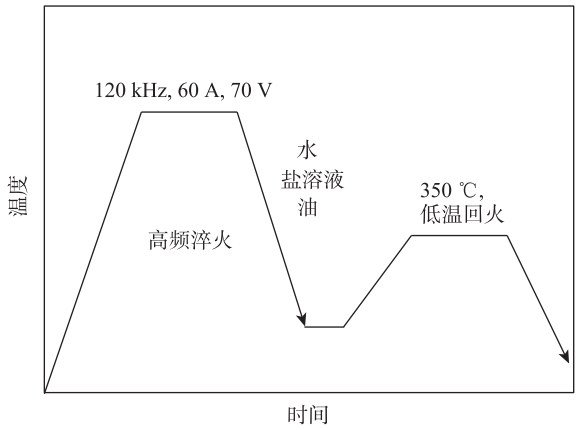


图2　实验室钢热处理工艺示意图

Fig. 2　Schematic diagram of laboratory steel heat treatment process

观察其金相显微组织，金相腐蚀剂选用体积分数为4%的硝酸酒精溶液，由无水酒精和浓硝酸配制而成，制备方法为将4 mL的浓硝酸加入96 mL的酒精中；③ 采用ZEISS SUPRA™55型场发射扫描电镜观测试样磨损形貌；④ 采用美国ZYGO白光干涉仪观测试样磨损形貌；⑤ 采用HV-1000型维氏硬度计测试热处理后试样表面显微硬度，测试参数为加载载荷200 g，保压时间5 s。

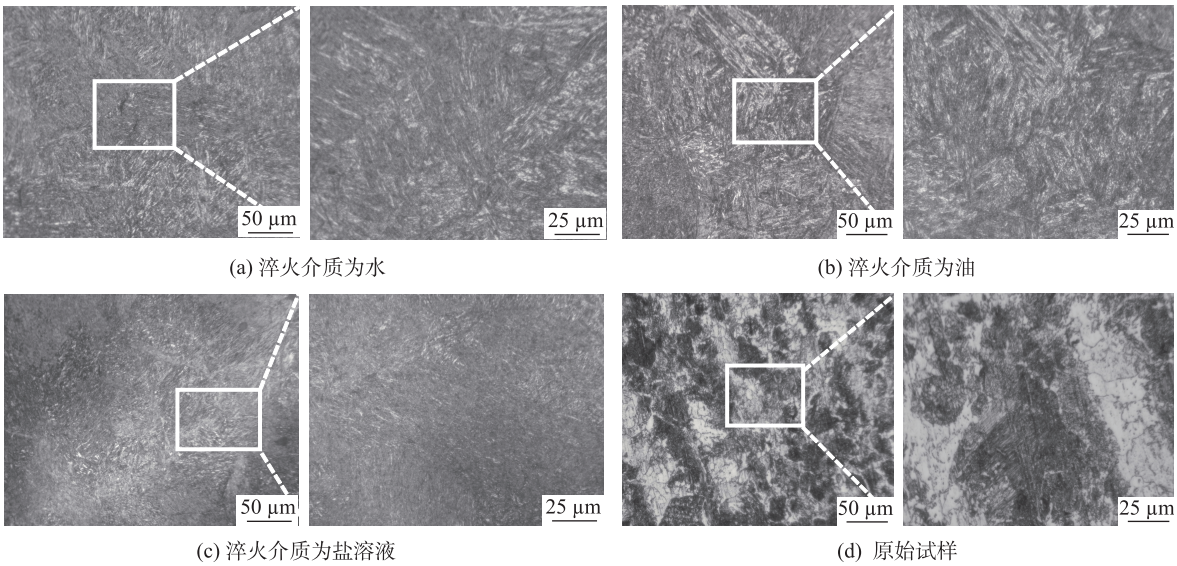
2　实验结果与讨论

2.1　热处理组织分析

图3为40CrNiMoA钢在不同高频淬火冷却介质的金相组织图。如图3(a)所示，当淬火介质为水时，组织为层片状回火马氏体。当淬火介质为油时，如图3(b)所示，组织为片状回火马氏体。当淬火介质为盐溶液时，如图3(c)所示，组织为细小的回火马氏体。由图可知，在盐溶液中淬火得到的马氏体尺寸更小，分布更加均匀。原始试样组织如图3(d)所示，组织为铁素体和珠光体。

2.2　硬度分析

图4为40CrNiMoA钢试样在不同淬火介质下回火后的表面硬度。从图4中可以看出，经3种介质淬火后试样硬度较原始试样均有所提高。当淬火介质



(a) 淬火介质为水　　(b) 淬火介质为油

(c) 淬火介质为盐溶液　　(d) 原始试样

图3　40CrNiMoA钢在不同淬火介质下回火的金相组织

Fig. 3　Metallographic structure of 40CrNiMoA steel tempered under different quenching media

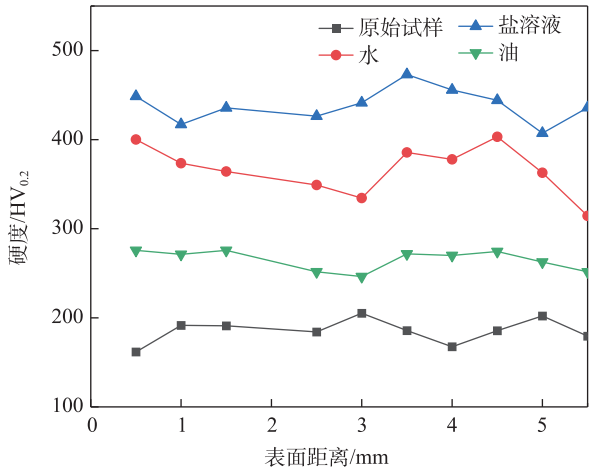


图4 40CrNiMoA钢在不同介质下回火后的硬度
Fig. 4 Hardness of 40CrNiMoA steel after tempering under different media

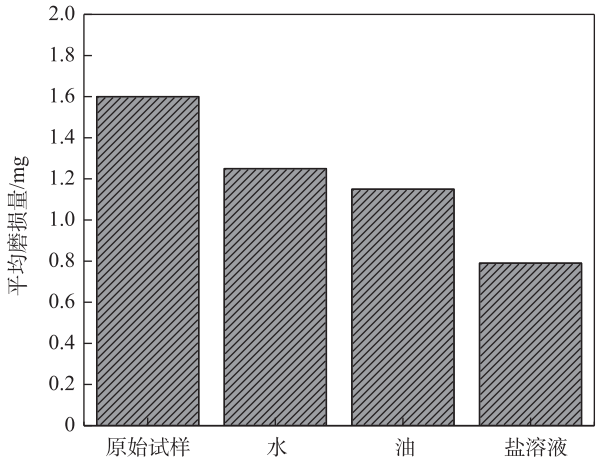


图5 不同淬火介质40CrNiMoA钢的摩擦磨损量
Fig. 5 Friction and wear of 40CrNiMoA steel with different quenching media

为水、盐溶液和油时，试样表面平均显微硬度分别为367.6, 431.2 $HV_{0.2}$和255.3 $HV_{0.2}$，其中盐溶液淬火介质的硬度最高。显微组织对力学性能的影响主要包括：① 碳化物的尺寸、形态和分布；② 马氏体的形态。马氏体形态对钢强韧性起着决定性的作用。由图3可知，与油淬和水淬相比，盐溶液淬获得的回火马氏体组织更加细小，从而提高了试样的硬度。

2.3 磨损性能分析

2.3.1 磨损量分析

图5为不同淬火介质下40CrNiMoA钢的磨损量，由图可知经盐溶液处理后试样的磨损量最小。这是由于经盐溶液淬火后晶粒尺寸细化，根据Hall-Petch方程，晶粒尺寸减小，材料硬度提高，导致材料耐磨性提高[17]。

2.3.2 表面磨损形貌分析

利用Gwyddion软件生成磨痕三维形貌图，图6为不同淬火介质下40CrNiMoA钢的磨痕光学形貌，图7为其对应的磨痕深度。从图6和图7可以看出，经过高频淬火后3种淬火介质试样的磨痕深度均有所降低，当淬火介质为盐溶液时，样品具有最小的磨痕深度，为0.57 μm；当淬火介质为油和水

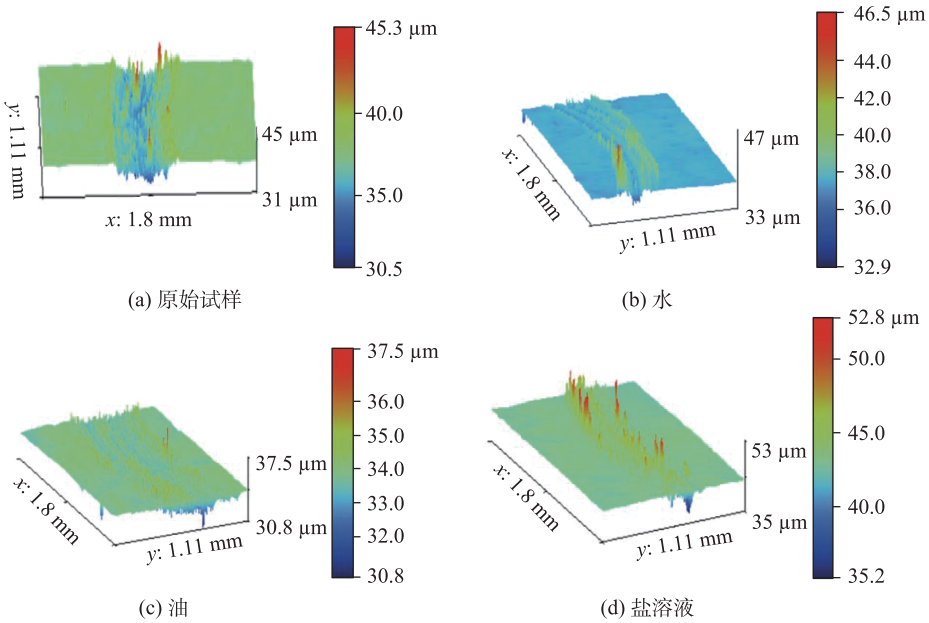


图6 不同淬火介质下40CrNiMoA磨痕三维形貌
Fig. 6 Three-dimensional morphology of 40CrNiMoA wear marks under different quenching media

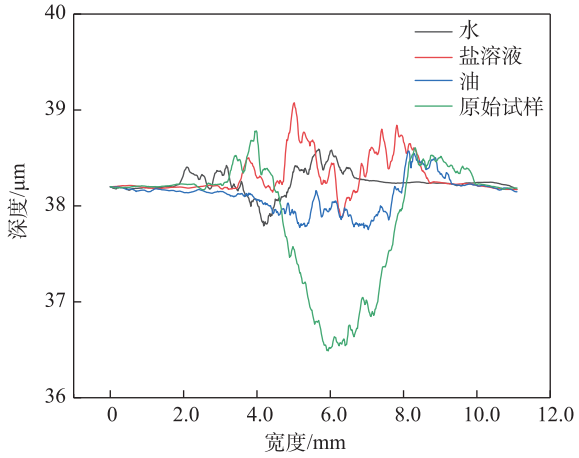
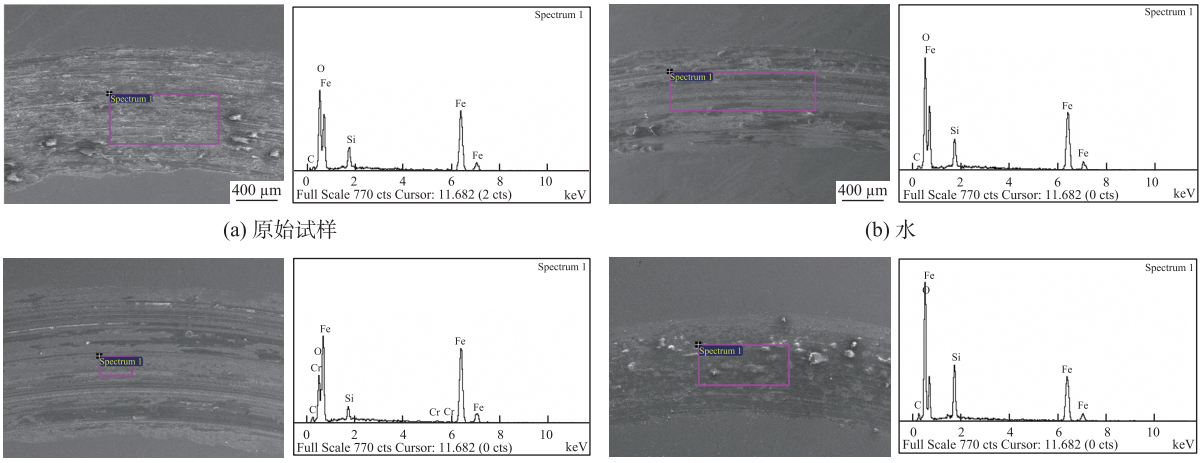


图7　不同淬火介质40CrNiMoA钢的摩擦深度
Fig. 7　Friction depth of 40CrNiMoA steel with different quenching media

时,磨痕深度和宽度略有增加,磨痕深度分别为0.67 μm和0.77 μm。磨痕深度越小,表明材料表面耐磨性能越好。由图6可知,经盐溶液淬火后,材料表面磨痕有明显起伏毛刺,这是由于表面硬度较高,磨屑未脱落造成的。

图8为不同淬火介质下40CrNiMoA钢的磨损表面形貌。从图中可以看出,原始试样表面存在大量划痕,且磨损表面存在磨屑碎片,部分区域还存在剥落坑,其磨损机制主要以磨粒磨损和氧化磨损为主。其中磨粒磨损是指在摩擦过程中,外界硬颗粒或者对磨表面上的硬突起物或粗糙峰引起的表面材料脱落现象[18]。这种现象常常发生在介质中磨粒与其他材料之间,可以减少材料的使用寿命,造成经济损失。氧化磨损是化学磨损的一种,属于腐蚀磨损的范畴,本质是在空气中对金属材料进行氧化,并在其表面形成一层氧化膜[19]。如图8(b)能谱分析所示,经水溶液淬火后,划痕表面含有较高的氧元素和铁元素[20],说明表面存在着大量的氧化物;另外其表面形貌较原始磨损试样更平滑,其磨损机制主要以氧化磨损和磨粒磨损为主。如图8(c)所示,经油淬火后,表面氧元素含量较原始磨损试样更少,而且表面形貌较原始磨损试样更加平滑,其磨损机制主要为磨粒磨损。



(a) 原始试样　(b) 水

(c) 油　(d) 盐溶液

图8　试样表面能谱分析
Fig. 8　Surface energy spectrum analysis of the original sample

在磨损过程中,由于产生了大量的摩擦热会导致材料表面温度升高。在空气环境下,材料表面会发生氧化,形成氧化膜。又因为氧化膜与基体的热物理性能存在明显的差异[21],在摩擦力作用下,材料表面会产生裂纹,并随着摩擦的进行而发生扩展,进一步贯通、破裂形成磨屑[22]。不同的淬火介质改变了40CrNiMoA钢磨损性能。由表2~表5可知,经盐溶液淬火后,表面含有较高的氧元素,表明表面有大量氧化物形成,其磨损机制主要以氧化磨损为主[23-25]。这些氧化物黏附在材料表面阻止了磨粒磨损的发生和裂纹的扩展[26-27],进而提高了

表2　原始试样表面能谱分析(质量分数/%)
Tab.2　Surface energy spectrum analysis of the original sample (mass fraction/%)

C	O	Si	Fe
4.16	24.38	4.40	余量

表3 经水淬火后试样表面能谱分析(质量分数/%)
Tab.3 Surface energy spectrum analysis of samples after water quenching (mass fraction/%)

C	O	Si	Fe
3.58	28.21	5.07	余量

表4 经油淬火后试样表面能谱分析(质量分数/%)
Tab.4 Surface energy spectrum analysis of samples after oil quenching (mass fraction/%)

C	O	Si	Cr	Fe
5.27	11.78	2.35	0.76	余量

表5 经盐溶液淬火后试样表面能谱分析(质量分数/%)
Tab.5 Surface energy spectrum analysis of samples after quenching with salt solution (mass fraction/%)

C	O	Si	Fe
5.36	35.85	8.60	余量

40CrNiMoA钢耐磨性能。

3 结论

本文对40CrNiMoA钢进行高频淬火+低温回火热处理,并测试热处理后该材料的性能,得到以下结论。

1)40CrNiMoA钢在水、盐溶液、油3种介质高频淬火回火后,组织主要为回火马氏体,且当淬火介质为盐溶液时,回火马氏体更细小。

2)经水、盐溶液、油3种介质淬火回火后,试样表面平均显微硬度分别为367.6,431.2 $HV_{0.2}$和255.3 $HV_{0.2}$。采用盐溶液淬火可获得更细的回火马氏体,因此提高了试样的硬度。

3)经盐溶液淬火后,40CrNiMoA钢的磨损量最小,其磨损机制主要以氧化磨损为主,这些氧化物粘附在材料表面阻止了磨粒磨损的发生和裂纹的扩展,进而提高了试样的耐磨性能。

参考文献:

[1] 周泽杰,黄志超,李绍杰. AA5052/SPFC440异种金属自冲铆接数值模拟及试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 84-93.
ZHOU Z J, HUANG Z C, LI S J. Numerical simulation and experimental study on self-piercing riveted AA5052/SPFC440 dissimilar metals[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 84-93.

[2] 彭艳, 石宝东, 刘才溢, 等. 板带轧制装备-工艺-产品质量综合控制融合发展综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 96-118.
PENG Y, SHI B D, LIU C Y, et al. Review of the integrated development of strip rolling equipmentprocess-product quality control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 96-118.

[3] 孔德军, 张垒, 付贵忠. 激光淬火对40CrNiMo高强度钢拉伸性能与断口形貌的影响[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 996-1002.
KONG D J, ZHANG L, FU G Z. Effect of laser quenching on tensile properties and fracture analys of 40CrNiMo high strength steel[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7): 996-1002.

[4] 张可, 魏宏宇, 魏伟, 等. 热处理工艺对40CrNiMo钢组织及力学性能的影响[J]. 金属功能材料, 2024, 31(1): 63-70.
ZHANG K, WEI H Y, WEI W, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of 40CrNiMo steel[J]. Functional Materials for Metals, 2024, 31(1): 63-70.

[5] 刘李彦, 杨豪, 张军辉, 等. 公路路基工程智能建养关键技术研究与展望[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 59-87.
LIU L Y, YANG H, ZHANG J H, et al. Research and prospect of key technologies for intelligent construction and maintenance of highway subgrade engineering[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 21(1): 59-87.

[6] 王敬忠, 李科元, 刘阿娇, 等. 40CrNiMo钢国内外研究现状[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 1-10.
WANG J Z, LI K Y, LIU A J, et al. Research status of 40CrNiMo steel at home and abroad[J]. Iron and Steel, 2018, 53(5): 1-10.

[7] 吴寅杰, 孙国胜, 李顺强, 等. 40CrNiMo钢淬火组织调控及其对力学性能的影响[J]. 轧钢, 2024, 41(1): 13-19.
WU Y J, SUN G S, LI S Q, et al. Control of quenching microstructure of 40CrNiMo steel and the correlation with mechanical properties[J]. Steel Rolling, 2024, 41(1): 13-19.

[8] 李世键, 潘新, 刘艳梅, 等. 回火温度及磷化工艺对40CrNiMoA钢性能和组织的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(12): 99-102.
LI S J, PAN X, LIU Y M, et al. Effects of tempering temperature and phosphating on mechanical properties and microstructure of 40CrNiMoA steel[J]. Heat Treatment of

Metals, 2022, 47(12): 99-102.

[9] 王浩楠, 闫晋文, 李顺强, 等. 回火工艺对40CrNiMo钢组织与性能的影响[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46 (3): 367-372.
WANG H N, YAN J W, LI S Q, et al. Effect of tempering on microstructure and properties of 40CrNiMo steel[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46 (3): 367-372.

[10] 潘乐, 王玲奇. 回火温度对40CrNiMo钢显微组织和力学性能的影响[J]. 热处理, 2020, 35(4): 26-28.
PAN L, WANG L Q. Effect of tempering temperatureon microstructure and mechanical property of 40CrNiMo steel[J]. Heat Treatment, 2020, 35(4): 26-28.

[11] 孙进晨. 40CrNiMo钢锻件退火后加工异常原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2023 (10): 115-118.
SUN J C. Analysis of abnormal processing causes of40CrNiMo steel forgings after annealing[J]. Metal Processing(Hot Working), 2023 (10): 115-118.

[12] 王踊海, 张伟强. 调质处理工艺对ZG40CrNiMo钢组织和性能的影响[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(3): 43-46, 85.
WANG Z H, ZHANG W Q. Effect of quenching and tempering on microstructure and mechanical properties of ZG40CrNiMo steel[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2018, 37(3): 43-46, 85.

[13] 马维. 齿轮轴用40CrNiMo钢的表面热处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(10): 2252-2254.
MA W. Surface heat treatment process of steel 40CrNiMo used for gear shaft[J]. Casting Technology, 2014, 35 (10): 2252-2254.

[14] 孙启锋. 装炉方式对40CrNiMo钢离子渗氮表面粗糙度的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44 (6): 146-149.
SUN Q F. Influence of charging mode on surface roughness of plasma nitrided 40CrNiMo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(6): 146-149.

[15] 侯琦, 刘广鑫, 杨光, 等. MoCr铸铁激光淬火组织及磨损性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(6): 657-660.
HOU Q, LIU G X, YANG G, et al. Study on the microstructure and wear property of MoCr cast lron treated by laser quenching[J]. Applied Laser, 2015, 35(6): 657-660.

[16] 王东宁, 安秀娟, 王淑花. 热处理工艺及磨损条件对Cr12钢磨损性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 68-70.
WANG D N, AN X J, WANG S H. Effect of heat treatment and wear conditions on the wear resistance of Cr12 steel[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2012, 35(1): 68-70.

[17] 邱应堃, 王林志, 张祺. 热处理对选区激光熔化Ti6Al4V合金力学性能和耐磨性的影响[J]. 钛工业进展, 2024, 41(1): 8-14.
QIU Y K, WANG L Z, ZHANG Q. Effect of heat treatment on mechanical properties and wear resistance of selective laser melting Ti6Al4V alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2024, 41(1): 8-14.

[18] 于亚磊. AZ31与GW83镁合金的磨损机理和摩擦变形行为研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
YU Y L. Research on the wear mechanism and friction deformation behavior of AZ31 and GW83 magnesium alloys[D]. Jinan: Shandong Construction University, 2023.

[19] 黄博鑫. 浅析金属材料磨损失效及防护措施[J]. 世界有色金属, 2023(21): 205-207.
HUANG B X. Analysis of wear and failure of metal materials and protective measures[J]. World Nonferrous Metals, 2023(21): 205-207.

[20] 淡勇. HFC-134a预热器失效分析[J]. 化工机械, 2010, 37(1): 103-106, 117.
DAN Y. Failure analysis of HFC-134a preheater[J]. Chemical Machinery, 2010, 37(1): 103-106, 117.

[21] 任云丰. 蠕变损伤对TP347H钢蒸汽氧化性能的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
REN Y F. Effect of creep damage on the steam oxidation behavior of TP347H[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2019.

[22] 杜三明, 张永振, 刘维民, 等. 氧气气氛中CrNiMo钢的高温高速干滑动摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2008 (4): 361-365.
DU S M, ZHANG Y Z, LIU W M, et al. Tribological behavior of CrNiMo steel at very high speed and elevated temperature in oxygen atmosphere[J]. Journal of Tribology, 2008 (4): 361-365.

[23] 陈玉珍, 高玉周. 干摩擦条件下不同滑板材料的摩擦磨损性能[J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(1): 105-107.
CHEN Y Z, GAO Y Z. Tribological properties of the different materials of the skid board under dry friction and wear[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2012, 38 (1): 105-107.

[24] 杨耀升, 王婷. 激光合金化改善6061铝合金薄板性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(12): 98-105.
YANG Y S, WANG T. Laser alloying for improving the properties of 6061 aluminum alloy thin sheet[J]. Applied Laser, 2022,42 (12): 98-105.

[25] 孙璐, 李元东, 马颖, 等. A356铝合金微弧氧化膜微动磨损行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(3): 796-806.
SUN L, LI Y D, MA Y, et al. Fretting wear behavior of microarc oxidation film on A356 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024,53 (3): 796-806.

[26] 代桂林, 刘洋, 李国平. 一步淬火-配分处理对20CrMnTi钢组织及摩擦磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(1): 131-139.
DAI G L, LIU Y, LI G P. Effect of one-step quenching-partitioning treatment on microstructure and friction and wear properties of 20CrMnTi steel[J]. Journal of Material Heat Treatment, 2022,43 (1): 131-139.

[27] 王小龙, 谭业发, 谭华, 等. 42CrMo合金钢耐磨粒磨损性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2008(1): 10-12.
WANG X L, TAN Y F, TAN H, et al. Study on the abrasive wear resistance of alloy 42CrMo[J]. Machine Building and Automation, 2008(1): 10-12.

第一作者:罗杰(1994—),男,本科,高级工程师,研究方向为金属材料表面热处理。E-mail:15286264030@163.com。

通信作者:李祥(1983—),男,本科,高级工程师,研究方向为金属材料表面加工。E-mail:han0104l@163.com。

(责任编辑:吴海燕)