

回火温度对两相区淬火态40CrNiMo钢组织和力学性能的影响

何晓波¹,魏宏宇²,张可^{1,2},于萌¹,白玉静¹

(1. 安阳钢铁集团有限责任公司技术中心,安阳455004;2. 安徽工业大学冶金工程学院,马鞍山243032)

摘要:采用740℃两相区淬火工艺对40CrNiMo钢进行油淬,然后在不同温度(570, 600, 630℃)下进行回火处理,研究了回火温度对试验钢组织和力学性能的影响,并与850℃完全淬火再回火钢进行对比。结果表明:两相区淬火再回火后试验钢的组织均由回火索氏体、铁素体及渗碳体组成,随回火温度的升高,颗粒状渗碳体加速析出并聚集长大,α铁素体再结晶程度增大,试验钢硬度由203 HV降低至194 HV,且低于完全淬火再回火的试验钢。两相区淬火再回火处理时,回火温度的变化未对试验钢的低温冲击韧性产生显著影响,−20℃冲击吸收能量变化幅度在4~5 J,且−20℃冲击吸收能量高于完全淬火再回火的试验钢;不同回火温度下的冲击断口呈明显的韧性断裂特征,韧窝尺寸和数量变化不大。在试验参数范围内,试验钢两相区淬火再回火的最佳回火温度为630℃,回火后的−20℃冲击吸收能量为33 J,满足工程应用要求,同时具有较高的硬度(194 HV)。

关键词:40CrNiMo钢;两相区淬火;回火温度;显微组织;冲击韧性

中图分类号:TG156 文献标志码:A 文章编号:1000-3738(2025)03-0049-06

0 引言

40CrNiMo钢是一种强度高、综合力学性能优异的中碳合金钢,因其生产工艺简单且具有较高的抗过热稳定性,被广泛应用于齿轮、机轴等传动零部件^[1-5]。对于中碳合金钢,通常采用调质工艺(即淬火和高温回火处理)对其性能进行调控^[6-7];作为淬火后的重要一环,合理的回火温度可有效改善材料的最终性能^[8-10]。随着应用领域的扩大,40CrNiMo钢的服役环境愈发苛刻,对其力学性能尤其是低温韧性提出了更高的要求。虽然通过常规调质处理可满足40CrNiMo钢的强度要求,但其塑韧性往往难以达到要求。

两相区淬火处理是提高钢的低温韧性、细化晶粒尺寸的有效手段;该工艺通过将钢材加热到 A_{c1} (钢加热时铁素体开始转变为奥氏体的温度)至 A_{c3} (钢加热时铁素体完全转变为奥氏体的温度)温度范围后进行淬火,来控制马氏体和铁素体的比例,从而在保证钢材高强度的同时提高其韧性,该工艺又

称为亚温淬火^[11]。推测可以采用两相区淬火处理来提高40CrNiMo钢的低温韧性,实现其强韧性匹配。40CrNiMo钢的组织和相变行为相对复杂,两相区淬火和回火处理可能涉及更复杂的相变机制。目前,40CrNiMo钢的热处理工艺研究主要集中在 A_{c3} 以上温度完全淬火处理及回火方面,关于两相区淬火及回火尤其是回火温度对钢组织和力学性能影响方面的研究较少。基于此,作者采用两相区淬火工艺对40CrNiMo钢进行油淬,然后在不同温度下进行回火处理,研究了回火温度对组织和力学性能的影响,并与完全淬火及回火钢进行对比,以为40CrNiMo钢的工业生产和性能调控提供理论依据。

1 试样制备与试验方法

试验材料为某企业锻造生产的商用40CrNiMo钢,主要化学成分(质量分数/%)为0.39C, 0.25Si, 0.046(Cu+Al), 0.013(P+S), 0.57Mn, 0.22Mo, 0.70Cr, 1.37Ni, 余Fe。采用JMatPro热力学计算软件计算得到该钢的 A_{c3} 和 A_{c1} 分别为754℃和680℃。将试验钢在850℃下保温2 h后空冷,然后分别在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ (740℃)和 A_{c3} 以上温度(850℃)进行两相区淬火和完全淬火,保温时间均为0.5 h,油冷,最

收稿日期:2024-07-05;修订日期:2025-01-23

基金项目:河南省博士后科研启动项目(202103098);安徽省高等学校科学研究项目(2023AH051090)

作者简介:何晓波(1970—),男,四川广安人,正高级工程师,学士

通信作者:张可副教授

后在 570, 600, 630 °C 下进行回火处理, 保温时间为 2 h, 空冷。

在不同工艺热处理后的试验钢上截取金相试样, 经打磨、抛光, 用体积分数 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀后, 采用 GX51 型光学显微镜(OM) 观察显微组织。采用 NANO SEM430 型场发射扫描电镜(SEM) 观察微观结构, 并用 SEM 附带的能谱仪(EDS) 进行微区成分分析。按照 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》, 利用 HV-1000 型维氏硬度计测试试验钢的显微硬度, 载荷为 4.9 N, 保载时间为 10 s, 相同热处理工艺下测 7 次, 去掉最大值和最小值后取平均值。按照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》, 在不同工艺热处理后的试验钢上截取尺寸为 2.5 mm×10 mm×55 mm 的开 V 型缺口的标准冲击

试样, 采用 JBN-300N 型冲击试验机进行 -20 °C 冲击试验, 测 3 次取平均值。采用 SEM 观察冲击断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 1 可以看出: 当淬火温度为 740 °C 时, 不同温度回火后 40CrNiMo 钢的显微组织均主要为回火索氏体、 α 铁素体和渗碳体, 随着回火温度的升高, α 铁素体相的再结晶程度增大, 渗碳体在 α 铁素体晶界处加速析出并聚集而长大; 当淬火温度为 850 °C 时, 不同温度回火后的组织均为典型的回火索氏体, 粒状渗碳体与针状 α 铁素体相形成交错排列的网状结构, 随着回火温度的升高, 细小的粒状渗碳体迅速聚集粗化。

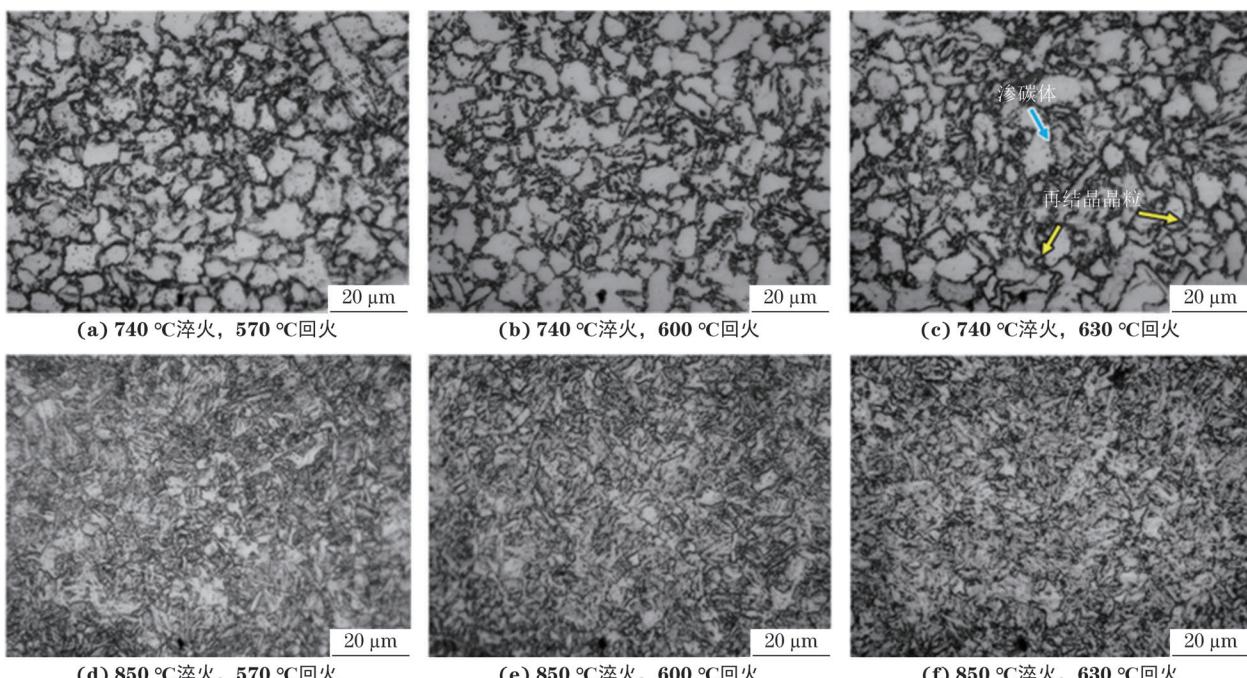


图 1 不同温度淬火 + 不同温度下回火后试验钢的显微组织

Fig. 1 Microstructures of test steel after quenching and tempering at different temperatures

由图 2 和图 3 可以看出: 当淬火温度为 740 °C 时, 570 °C 回火后试验钢的 α 铁素体晶内和晶界分布着少量间断且形状不规则的渗碳体颗粒; 600 °C 回火后 α 铁素体晶界上的渗碳体增加, 分布更弥散, 尺寸增大, 渗碳体的钉扎作用可以在一定程度上抑制晶粒的长大^[12]; 630 °C 回火后 α 铁素体晶界处的合金元素铬、锰与铁、碳形成的合金碳化物粗化并合并, 同时在 α 铁素体晶内也析出了少量白色的近似球形的合金渗碳体。当淬火温度升高至 850 °C 时, 回火后形成了具有马氏体板条取向的回火索氏体, 大量

α 铁素体仍保持针状或板条状, 合金渗碳体呈细粒状; 随着回火温度的升高, α 铁素体的再结晶程度增大, 原马氏体板条向特征减弱, 渗碳体沿 α 铁素体晶界析出并聚集长大, 同时呈弥散分布。

2.2 硬度和低温冲击韧性

由图 4 可以看出, 当淬火温度为 740 °C 时, 随着回火温度的升高, 试验钢的硬度略有降低, 在 194~203 HV 范围内变化。随着回火温度的升高, 渗碳体从回火索氏体中加速析出, 并脱离与基体之间的共格关系, 随后进一步聚集球化长大, 同时 α 铁素

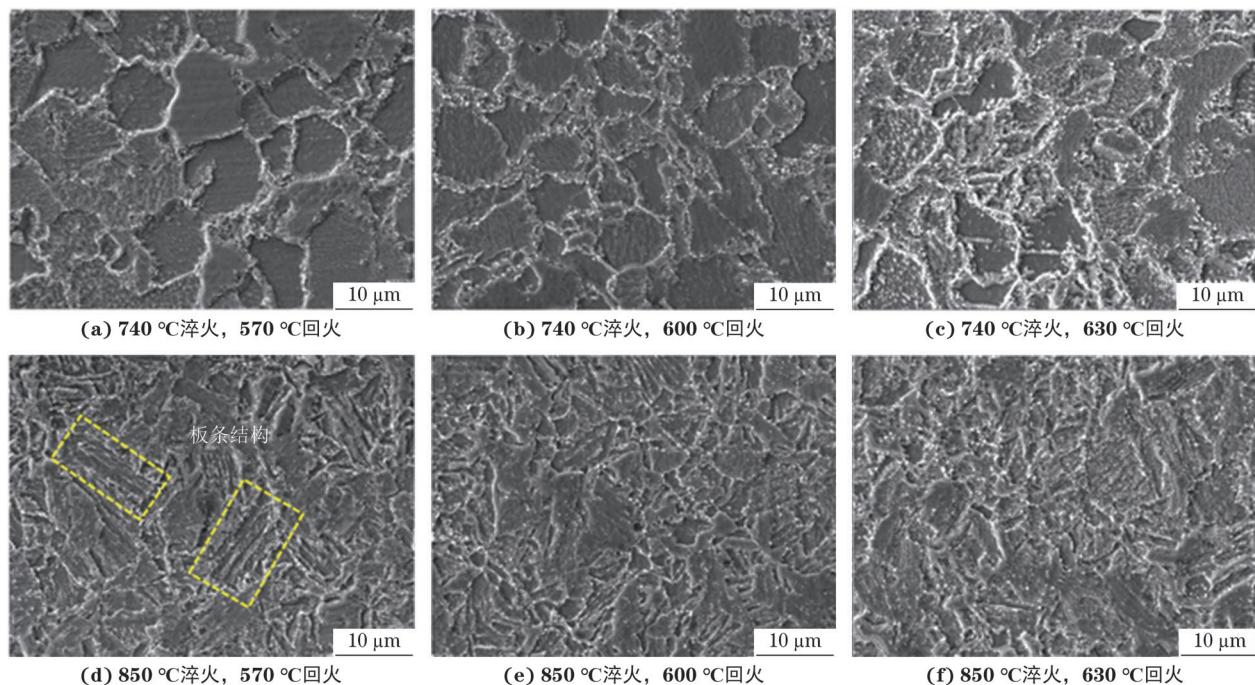


图 2 不同温度淬火 + 不同温度回火后试验钢的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphology of test steel after quenching and tempering at different temperatures

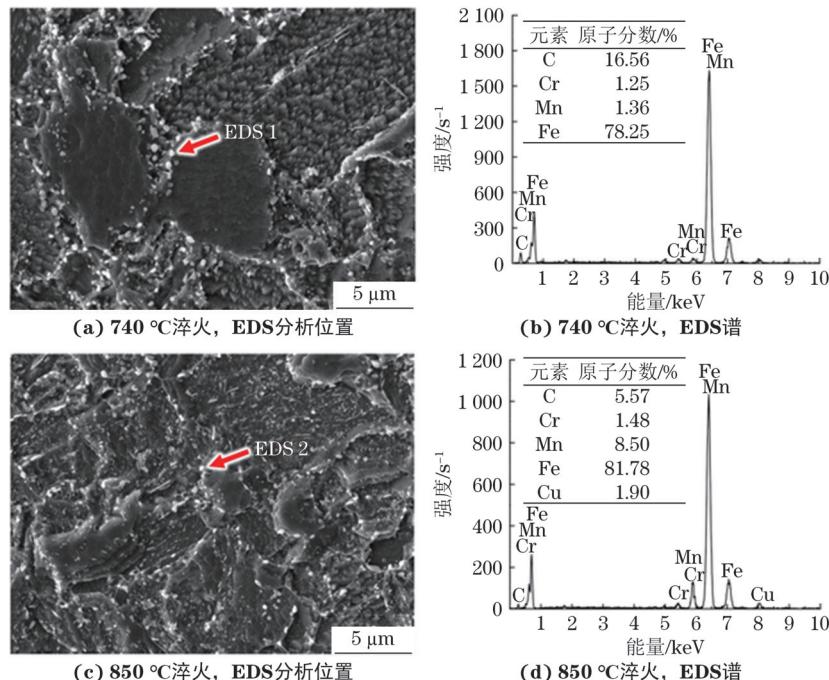


图 3 不同温度淬火 + 630 °C回火后试验钢的 EDS 分析位置及 EDS 能谱

Fig. 3 EDS analysis position (a, c) and EDS spectra (b, d) of test steel after quenching at different temperatures and tempering at 630 °C

体发生再结晶^[13],因此试验钢的硬度降低,但降幅较小。当淬火温度为850 °C时,随回火温度由570 °C升至630 °C,试验钢的硬度由264 HV降低至236 HV,降低幅度较大。当回火温度为570 °C时,显微组织为具有马氏体板条取向的回火索氏体,大量细小的渗碳体沿 α 铁素体晶界析出,因此试验钢具有较高

的硬度;当回火温度升高至630 °C时,原马氏体位向特征逐渐减少^[14],回火索氏体中碳含量不断降低^[15-16],同时细粒状渗碳体大量析出并聚集为粗粒状,分布更加均匀, α 铁素体的再结晶程度增大^[17-18],因此试验钢的硬度降低。740 °C淬火再回火后试验钢中保留有部分铁素体软相,因此显微硬度略低于

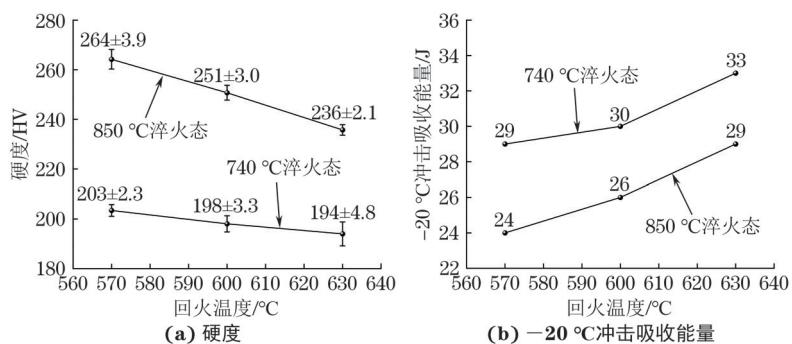


图 4 不同温度淬火态试验钢的硬度和-20 °C 冲击吸收能量随回火温度的变化曲线

Fig. 4 Curves of hardness (a) and -20 °C impact absorbed energy (b) vs tempering temperature of different temperature quenched test steel

850 °C淬火再回火试验钢。回火温度的变化并未对试验钢的低温冲击韧性产生显著影响, -20 °C冲击吸收能量随回火温度升高略微增大, 变化幅度在4~5 J。冲击韧性略微提高的主要原因是随着回火温度的升高, 马氏体的碳含量不断减少, 生成的粒状渗碳体与基体脱离共格关系, 使基体中的内应力降低, 进而提高了试验钢的塑韧性^[1, 13]。回火过程中 α 铁素体的再结晶程度增加也是试验钢冲击吸收能量提高的一个原因。两相区淬火再回火试验钢的-20 °C冲击吸收能量高于完全淬火再回火的试验钢, 低温冲击韧性更好。综上, 在试验参数范围内, 两相区淬火态试验钢的最佳回火温度为630 °C, 此时-20 °C冲击吸收能量为33 J, 满足27 J的工程应用要求^[19], 同时又具有较高的硬度(194 HV), 符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》标准中的相关要求。

由图5可以看出, 不同温度淬火和回火后试验钢冲击断口中均观察到大量细小的韧窝, 呈明显的韧性断裂特征。随着回火温度的升高, 冲击断口中韧窝的尺寸和数量变化不明显, 因此试验钢的冲击吸收能量变化幅度较小^[20]。完全淬火再回火钢的冲击断口表面出现更多的孔洞缺陷, 因此其低温冲击韧性比两相区淬火再回火的试验钢差。

3 结 论

(1) 两相区淬火+570~630 °C回火后试验钢的组织由回火索氏体、 α 铁素体及渗碳体组成, 随回火温度的升高, α 铁素体再结晶程度增大, 颗粒状渗碳体沿 α 铁素体晶界处加速析出并聚集长大; 完全淬火+570~630 °C回火后试验钢的组织为回火索氏体, 随着回火温度的升高, 大量细小的粒状渗碳体不

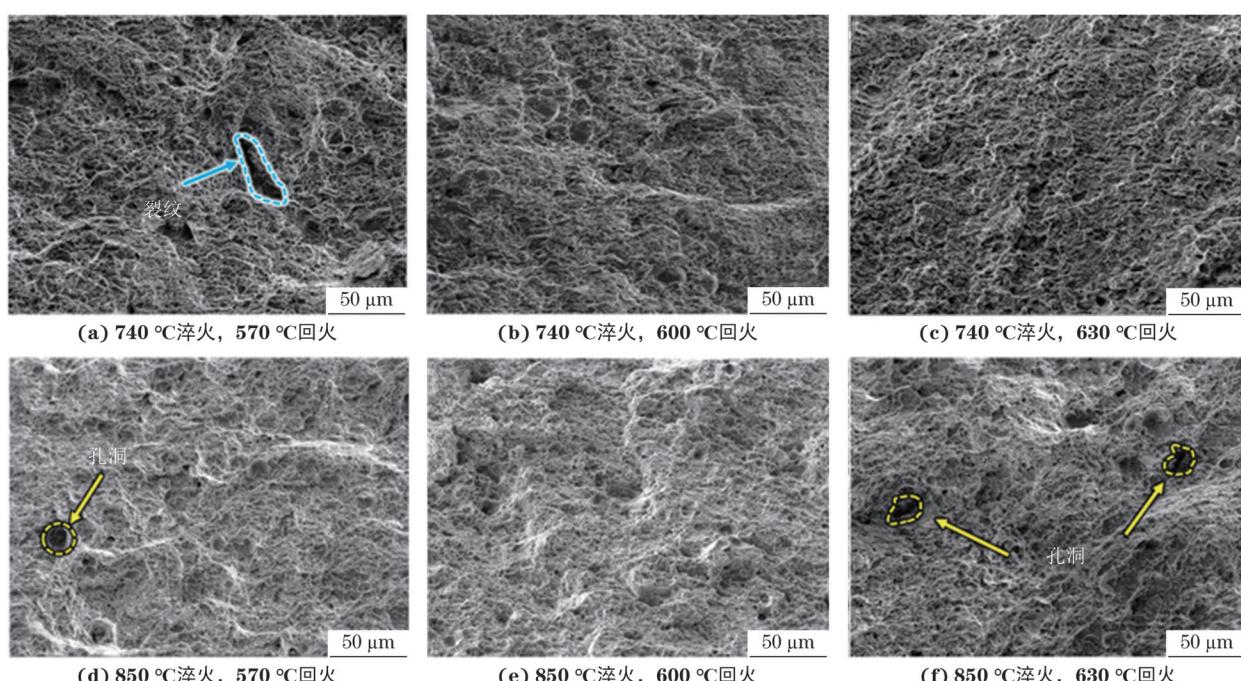


图 5 不同温度淬火+不同温度回火后试验钢的冲击断口形貌

Fig. 5 Impact fracture morphology of different temperature quenched test steel after quenching and tempering at different temperatures

断析出, 并沿 α 铁素体晶界聚集粗化, 针状 α 铁素体的再结晶程度增大, 原马氏体板条位向特征减弱。

(2) 两相区淬火+回火后, 随着回火温度由570 °C升高至630 °C, 试验钢的硬度由203 HV降低至194 HV, 并且硬度低于完全淬火+回火的试验钢。

(3) 回火温度的变化未对试验钢的低温冲击韧性产生显著影响, -20 °C冲击吸收能量变化幅度在4~5 J; 两相区淬火再回火试验钢的-20 °C冲击吸收能量高于完全淬火再回火试验钢。两相区淬火+570~630 °C回火后试验钢的冲击断口呈明显的韧性断裂特征, 断口上孔洞相比于完全淬火再回火试验钢少。

(4) 两相区淬火态试验钢的最佳回火温度为630 °C, 此时试验钢的冲击吸收能量为33 J, 满足工程应用要求, 同时又具有较高的硬度(194 HV)。

参考文献:

- [1] 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 & Steel, 2018, 53(5): 1-10.
- [2] 李继红, 李岩, 张海存, 等. 回火温度对40CrNiMo7钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(7): 28-31.
LI J H, LI Y, ZHANG H C, et al. Influence of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of 40CrNiMo7 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(7): 28-31.
- [3] PARK J, JEON J, SEO N, et al. Microstructure and mechanical behavior of AISI 4340 steel fabricated via spark plasma sintering and post-heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 862: 144433.
- [4] JAMI M, GIL E, USHINA E, et al. Determine hardness and torsional resistance of AISI/SAE 4340 steel, treated by quenching at 860 °C and tempering at 300 °C, 350 °C and 400 °C [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 49: 35-42.
- [5] BAKHSHI S, MIRAK A. Textural development, martensite lath formation and mechanical properties variation of a super strength AISI4340 steel due to austenitization and tempering temperature changes[J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111923.
- [6] 谢波. 34CrNiMo6钢高承载曲轴热处理工艺研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
XIE B. Study on heat treatment process of 34CrNiMo6 steel high load crankshaft [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [7] 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 temperature on microstructure and mechanical property of 40CrNiMo steel [J]. Heat Treatment, 2020, 35(4): 26-28.
- [8] 陈俊丹, 莫文林, 王培, 等. 回火温度对42CrMo钢冲击韧性的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1186-1193.
CHEN J D, MO W L, WANG P, et al. Effects of tempering temperature on the impact toughness of steel 42CrMo [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(10): 1186-1193.
- [9] 支龙, 陈红斌, 袁满, 等. 回火温度对淬火态40CrNiMoA钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 200-202.
ZHI L, CHEN H B, YUAN M, et al. Effects of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of quenched 40CrNiMoA steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(18): 200-202.
- [10] LI H F, DUAN Q Q, ZHANG P, et al. The relationship between strength and toughness in tempered steel: Trade-off or invariable? [J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(4): 1801116.
- [11] 张蒙, 吴光亮. NM500耐磨钢的QLT热处理工艺[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 157-162.
ZHANG M, WU G L. QLT heat treatment process of NM500 wear-resistant steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(10): 157-162.
- [12] 王艾竹, 王志刚, 李宁, 等. 一种高碳耐磨高温合金的组织和性能[J]. 金属功能材料, 2021, 28(6): 110-114.
WANG A Z, WANG Z G, LI N, et al. Microstructure and properties of a high carbon wear-resistant superalloy [J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(6): 110-114.
- [13] 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 mechanical properties of 40CrNiMo steel [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(3): 367-372.
- [14] 方琴, 陈庚, 吴永波, 等. 热处理对34CrNiMo6钢组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(8): 1866-1867.

- FANG Q, CHEN G, WU Y B, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel[J]. Foundry Technology, 2017, 38(8): 1866-1867.
- [15] 郭浩, 尚勇, 魏金. 热处理温度对34CrNiMo6钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 170-173.
- GUO H, SHANG Y, WEI J. Effects of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of 34CrNiMo6 steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(24): 170-173.
- [16] 王靖博, 连明洋, 付雅迪, 等. 回火温度对40CrNiMo调质钢CMT堆焊HAZ组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 99-103.
- WANG J B, LIAN M Y, FU Y D, et al. Effect of tempering temperature on HAZ microstructure and properties of CMT welded 40CrNiMo quenched and tempered steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(5): 99-103.
- [17] 徐盛, 刘雅政, 周乐育, 等. 热处理对45CrNiMoV钢析出相和力学性能影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 127-132.
- XU S, LIU Y Z, ZHOU L Y, et al. Effect of heat treatment on precipitate and mechanical properties of 45CrNiMoV steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3): 127-132.
- [18] 刘铭杰, 周为群, 董瀚, 等. 回火温度对含钒42CrMo钢-40℃冲击韧性的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(4): 62-70.
- LIU M J, ZHOU W Q, DONG H, et al. Effect of tempering temperatures on impact toughness of vanadium-containing 42CrMo steel at -40 °C [J]. Shanghai Metals, 2023, 45(4): 62-70.
- [19] 王宇哲, 张凯, 杨甘生, 等. 南极钻机的耐温材料和保温方式的优选[J]. 钻探工程, 2023, 50(增刊1): 82-89.
- WANG Y Z, ZHANG K, YANG G S, et al. Optimization of temperature resistant materials and insulation methods for Antarctic drill rigs[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 82-89.
- [20] 杜畅, 毕庆霞, 宫新勇, 等. 基于亚温淬火的40Cr强韧化处理[J]. 煤矿机械, 2019, 40(11): 94-96.
- DU C, BI Q X, GONG X Y, et al. Strengthening and toughening treatment of 40Cr based on subcritical quenching[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(11): 94-96.

Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Intercritical Quenched 40CrNiMo Steel

HE Xiaobo¹, WEI Hongyu², ZHANG Ke^{1,2}, YU Meng¹, BAI Yujing¹

(1. Technology Center, Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang 455004, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: 40CrNiMo steel was treated by oil intercritical quenching at 740 °C, and then was tempered at different temperatures (570, 600, 630 °C). The effects of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of the test steel were investigated and compared with those of the steel treated by fully quenching at 850 °C and tempering. The results show that after intercritical quenching and tempering, the microstructure of the test steel consisted of tempered sorbite, ferrite and cementite. With the increase of tempering temperature, the granular cementite precipitated rapidly and aggregated to grow up, the recrystallization degree of α ferrite increased, and the hardness of the test steel decreased from 203 HV to 194 HV and was lower than that of the fully quenched and tempered test steel. Under intercritical quenching and tempering, the change of tempering temperature had no significant effect on the low-temperature impact toughness of the test steel, and the variation range of the impact absorption energy at -20 °C was 4-5 J. The impact absorption energy at -20 °C of the intercritical quenched and tempered test steel was higher than that of the fully quenched and tempered test steel. The impact fracture at different tempering temperatures showed obvious ductile fracture characteristics, and the size and number of dimples did not change much. Within the range of test parameters, The optimal tempering temperature for the intercritical quenching and tempering treatment of the test steel was 630 °C; at this time, the -20 °C impact absorption energy of the test steel was 33 J, which met the engineering application requirements, and the steel also had a relatively high hardness (194 HV).

Key words: 40CrNiMo steel; intercritical quenching; tempering temperature; microstructure; impact toughness