

# 低温回火对低碳马氏体超高强钢组织及力学性能的影响<sup>①</sup>

史术华, 高擎, 钱亚军  
(湘潭钢铁集团有限公司, 湖南湘潭 411101)

**摘要:** 研究了低温回火对经过正火+淬火处理的Q1100超高强钢显微组织与力学性能的影响。结果表明, 经正火(890℃×40 min)+淬火(890℃×30 min)+回火(185~320℃×90 min)处理的实验钢主要获得回火马氏体组织。不同温度回火后, 实验钢抗拉强度均大于1360 MPa, 屈服强度均大于1200 MPa, 硬度均大于400HV3, 延伸率均大于13%, -40℃冲击功均大于35.0 J。随着回火温度升高, 实验钢抗拉强度逐渐下降, 屈服强度先上升后下降, 硬度逐渐降低, 断后延伸率先略微下降后逐渐上升, -40℃冲击功先下降后上升。回火温度230℃时, 实验钢抗拉强度(1445 MPa)、屈服强度(1238 MPa)、硬度(429HV3)、塑性(13.8%)和-40℃冲击韧性(47.5 J)均表现优异, 大幅超过Q1100级工程机械用超高强钢的服役标准。

**关键词:** 回火; Q1100; 超高强钢; 马氏体; 强度; 韧性; 冲击功

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.037

文章编号: 0253-6099(2023)06-0174-05

## Effect of Low-Temperature Tempering on Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Martensitic Ultra-High Strength Steel

SHI Shuhua, GAO Qing, QIAN Yajun  
(Xiangtan Iron & Steel Group Co Ltd, Xiangtan 411101, Hunan, China)

**Abstract:** The effects of low temperature tempering on the microstructure and mechanical properties of Q1100 ultra-high strength steel after pretreatment of normalizing and quenching were studied. The results show that tempered martensite were obtained after normalizing (890℃×40 min) + quenching (890℃×30 min) + tempering (185–320℃×90 min) processes. After tempering at different temperatures, all tested steels have their tensile strength higher than 1360 MPa, yield strength higher than 1200 MPa, hardness higher than 400HV3, elongation higher than 13%, and impact energy at -40℃ higher than 35.2 J. With the rising of tempering temperature, the tensile strength and hardness gradually decrease, the yield strength first increases and then decreases, the elongation after fracturing increases after an initial slight decrease, and the impact energy at -40℃ decreases followed by increase. At a tempering temperature of 230℃, the steel in the test has tensile strength of 1445 MPa, yield strength of 1238 MPa, hardness of 429HV3, plasticity of 13.8%, and toughness of 47.5 J, which all largely exceed the service standard of Q1100 ultra-high strength steel for construction machinery.

**Key words:** tempering; Q1100; ultra-high strength steel; martensite; strength; toughness; impact energy

随着环境问题日益严峻, 工程机械领域的节能减排迫在眉睫。国家针对工程机械装备制定了极为严格的排放标准, 推动其步入轻量化发展轨道。超高强度工程机械用钢的使用有助于降低设备钢材使用量和油耗成本, 节约资源和能源, 符合我国节能减排的基本国策。目前, 超高强度工程机械用钢的基体组织主要

为马氏体, 而淬火态马氏体组织处于亚稳态, 强硬度高而塑韧性低, 需要通过适当的回火处理获得优良且稳定的强韧性匹配<sup>[1-4]</sup>。文献[5]研究了回火温度对淬火+回火热处理的低碳马氏体钢组织和性能的影响, 结果表明, 实验钢在低温回火(200℃)时马氏体的板条界清晰且板条束细小, 表现出比在高温回火时更优

① 收稿日期: 2023-07-25

基金项目: 长株潭国家自主创新示范区专项(2018XK2301)

作者简介: 史术华(1986—), 男, 重庆奉节人, 高级工程师, 主要从事超高强钢、管线、桥梁等中厚板品种研究与开发。

良的强韧性匹配。文献[6]研究了回火温度对中碳马氏体钢组织和性能的影响,结果发现,实验钢在低温回火过程中析出的 $\epsilon$ 碳化物能明显改善钢的强韧性。很多研究表明,正火预处理可以促进钢铁材料显微组织的细化 and 均匀化,有潜力进一步优化超高强钢的强韧性<sup>[7-9]</sup>。但关于低温回火对经正火预处理的淬火态超高强钢的组织演变和强韧性影响的研究较少。本文以正火+淬火处理的工程机械用 Q1100 超高强钢为研究对象,研究了低温回火对其微观组织和力学性能的影响,深入研究了其强韧化机理,以期为工厂生产超高强钢的组织调控和性能优化提供参考。

## 1 实验材料与方法

实验材料为某企业生产的工程机械用 Q1100 钢轧制态钢板,厚度为 11 mm,其化学成分如表 1 所示。

表 1 实验钢化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S
0.13~0.15	0.30~0.32	1.10~1.16	0.009~0.010	0.002~0.003
Nb	V	Ti	Ni	Cr
0.022~0.024	0.053~0.056	0.018~0.020	0.32~0.34	0.21~0.22
Mo	B	Al	Fe	
0.54~0.55	0.0018~0.0020	0.03~0.04	余量	

实验钢正火+淬火+回火热处理工艺为:以 10 °C/min 的升温速度将实验钢升温至 890 °C,保温 40 min 后空冷至室温;然后以 10 °C/min 的升温速度将其加热至 890 °C,保温 30 min 后淬火水冷至室温;最后以 10 °C/min 的升温速度将实验钢分别加热至 185 °C、230 °C、275 °C 和 320 °C,均保温 90 min,然后空冷至室温。

在实验钢板 1/2 厚度处切取平行于轧向的试样,用于扫描电子显微镜(SEM, FEI Quanta-200)、电子背散射(EBSD)分析。SEM 试样在观察前须进行机械研磨、抛光和腐蚀,腐蚀液采用体积浓度 4% 的硝酸酒精溶液。EBSD 试样在观察前须进行机械研磨和电解抛光,抛光液为体积浓度 10% 的高氯酸酒精溶液。采用 SIRION200 场发射扫描电镜对样品进行 SEM 观察,采用配备 EBSD 探头的 ZEISS EVO MA10 扫描电镜对样品进行 EBSD(Oxford Nordlysmax2, Oxford, UK)表征,使用 HKL Channel 5 软件对试样进行晶体学取向分析。

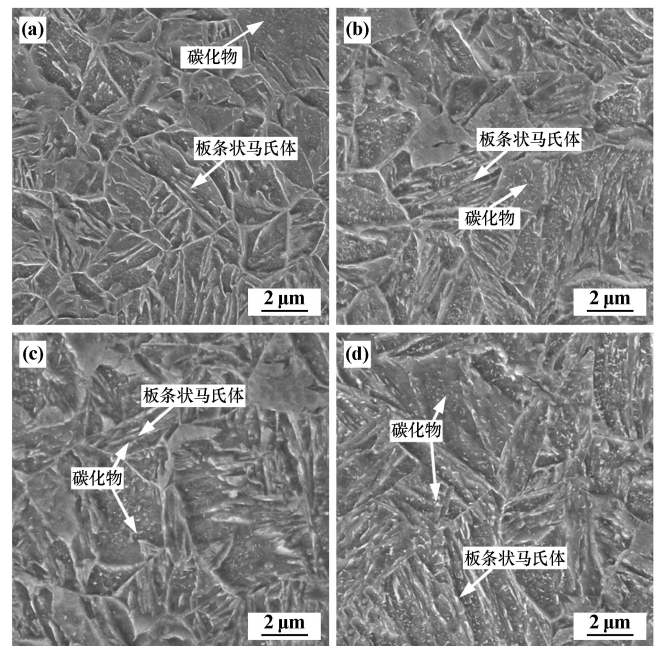
根据 GB 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》进行拉伸试验,在钢板 1/2 厚度

位置取样,加工成标准棒状拉伸试样,直径为 5 mm。采用 MTS-810 力学性能试验机测量室温拉伸性能,测试 3 个平行试样,取其平均值作为最终测试结果。根据 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击试验,在实验钢板 1/2 位置处取样,加工成 10 mm×10 mm×55 mm 的 V 型缺口夏比冲击试样。夏比冲击实验在 -40 °C 环境下进行,测试 3 个平行试样,取其平均值作为最终测试结果。采用维氏硬度仪测量显微硬度(HV3),每个试样测定 8 点硬度,取平均值作为最终硬度结果。

## 2 实验结果及分析讨论

### 2.1 回火温度对显微组织的影响

低碳低合金钢的奥氏体组织在快速冷却至室温时通过无扩散型切变机制形成板条状马氏体<sup>[10]</sup>。淬火后,实验钢中内应力很大,产生的马氏体处于碳的过饱和状态,这种状态下的马氏体组织不稳定,趋于析出碳化物而向稳定状态转变<sup>[11-13]</sup>。图 1 为在不同温度下回火 90 min 后实验钢的微观组织 SEM 照片。可见实验钢均为回火马氏体组织,在板条状马氏体基体上弥散分布有细小颗粒状碳化物,随着回火温度提高,碳化物的析出驱动力增加,析出数量增加且产生粗化,马氏体的分解程度增加,其板条状形貌的清晰度降低。回火温度 185 °C 时,马氏体的板条状形貌清晰,析出的颗粒状碳化物数量少且极为细小;回火温度 230 °C 时,马氏体的板条状形貌清晰度降低,析出的碳化物数量增



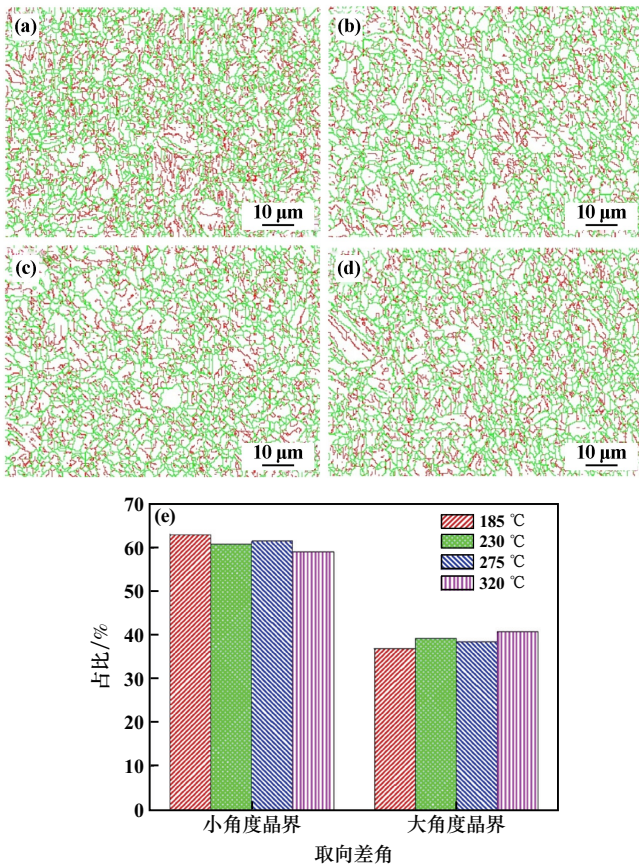
(a) 185 °C; (b) 230 °C; (c) 275 °C; (d) 320 °C

图 1 不同温度下回火后实验钢 SEM 照片

加且尺寸略有增大;回火温度 275 ℃ 和 320 ℃ 时,马氏体板条形状貌的清晰度进一步降低,碳化物进一步粗化且在马氏体板条界面聚集,马氏体板条界面处开始出现明显的碳化物聚集现象,降低界面结合力,可能使钢脆化<sup>[14]</sup>。

## 2.2 回火温度对晶界取向差分布的影响

图 2 为在不同温度下回火 90 min 后实验钢的晶界取向差分布图,取向差角不小于 15° 的为小角度晶界(绿线),取向差角 2°~15° 的为小角度晶界(红线)。低碳钢淬火冷却过程中,组织内的马氏体以极短时间爆炸式形核,形成大量位错和以小角度晶界结合的亚结构,具有较高的小角度晶界占比<sup>[15]</sup>。钢组织内的小角度晶界和大角度晶界占比随回火温度变化而变化。回火温度 185 ℃ 时,组织内小角度晶界占比达到最高值,大角度晶界占比达到最低值,分别为 63.0% 和 37.0%;回火温度 320 ℃ 时,组织内小角度晶界占比达到最低值,大角度晶界占比达到最高值,分别为 59.1% 和 40.9%。回火温度 185~320 ℃ 属于低温回火,实验钢中回复程度逐渐增加,位错运动相互抵消,小角度晶界占比逐渐降低,大角度晶界占比逐渐提高。



(a) 185 ℃; (b) 230 ℃; (c) 275 ℃; (d) 320 ℃; (e) 界面占比统计图

图 2 不同温度下回火后实验钢晶界取向差分布图及其大小角界面占比统计图

## 2.3 回火温度对力学性能的影响

图 3 为不同温度下回火 90 min 后实验钢力学性能。随着回火温度升高,抗拉强度下降,屈服强度先升高后下降,硬度逐渐下降,延伸率先略为升高后逐渐下降。回火处理可能同时产生软化作用和强化作用:一方面,碳原子与合金元素脱溶,固溶强化效果减弱,基体发生软化;另一方面,细小碳化物在基体上析出,弥散强化效果增强,基体发生强化<sup>[16-18]</sup>。回火温度 185 ℃ 时,钢抗拉强度和硬度达到最高值,分别为 1463 MPa 和 438HV3。随着回火温度升高,软化效应大于强化效应,导致实验钢抗拉强度和硬度逐渐下降,回火温度 320 ℃ 时,实验钢抗拉强度和硬度均达到最低值,分别为 1368 MPa 和 408HV3。实验钢在 185~275 ℃ 范围内回火时,碳化物析出数量随回火温度升高而增加,对位错的钉扎作用增强,使钢的屈服强度升高。回火温度 275 ℃ 时,钢的屈服强度达到峰值,为 1270 MPa;回火温度增加到 320 ℃ 时,组织的回复占据主导地位,导致钢的屈服强度降低。钢的回复程度随回火温度升高而增加,有利于其塑性的提高,230 ℃ 回火时延伸率达到峰值,为 13.8%;回火温度升到 275 ℃ 后,碳化物逐渐在马氏体板条界面上偏聚并长大,降低马氏体板条界面的结合力,不利于其微观组织分布的连续性和均匀性,使得实验钢塑性降低<sup>[19]</sup>。

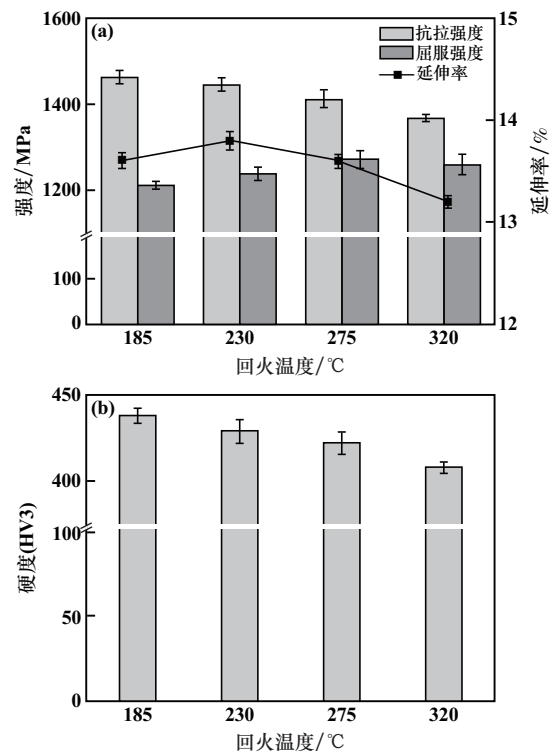
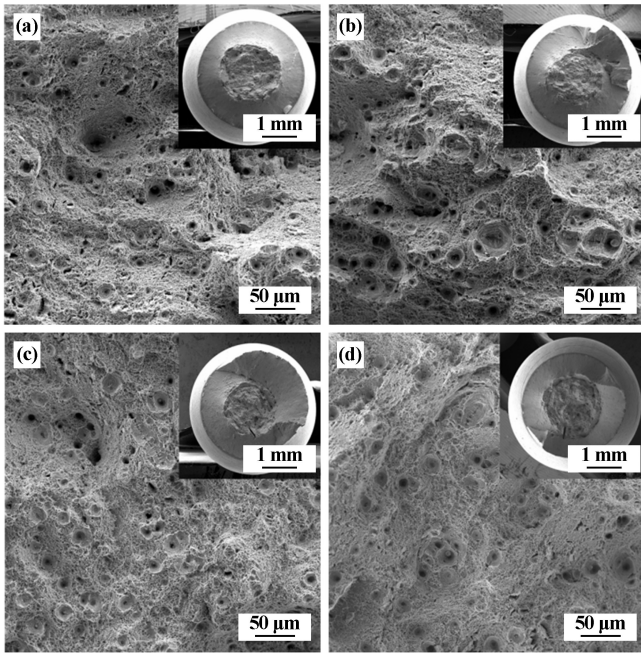


图 3 不同温度下回火后实验钢强度、延伸率与硬度

图 4 为不同温度下回火 90 min 后实验钢的拉伸

断口 SEM 照片。由图 4 可见,在 185~320 °C 范围内回火后实验钢拉伸断口均呈杯锥状形貌,由中心纤维区和边缘剪切唇组成,均未发现放射区,表明试样在断裂前均发生了大量塑性变形,属于韧性断裂。由图可见,不同温度下回火后实验钢中心纤维区均分布有大小、深浅不一的韧窝,表明实验钢的微观组织在断裂过程中均经历微孔的形核、长大和聚合三个阶段而形成韧窝,均具有较好的塑性。其中,回火温度 230 °C 时,实验钢断口的韧窝尺寸最大、深度最深,说明其具有更好的塑性,与其强度实验结果相符。



(a) 185 °C; (b) 230 °C; (c) 275 °C; (d) 320 °C

图 4 不同温度下回火后实验钢拉伸断口 SEM 照片

图 5 为不同温度下回火 90 min 后实验钢冲击功变化图。随着回火温度升高,实验钢冲击功先降低后升高,回火温度 275 °C 时,钢的冲击功达到谷值,为 35.2 J。这种低温冲击韧性随回火温度升高而显著降低的现象与低温回火脆性有关<sup>[20]</sup>。回火温度 275 °C 时,实验钢

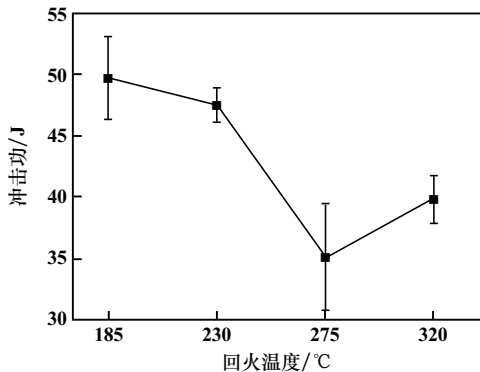
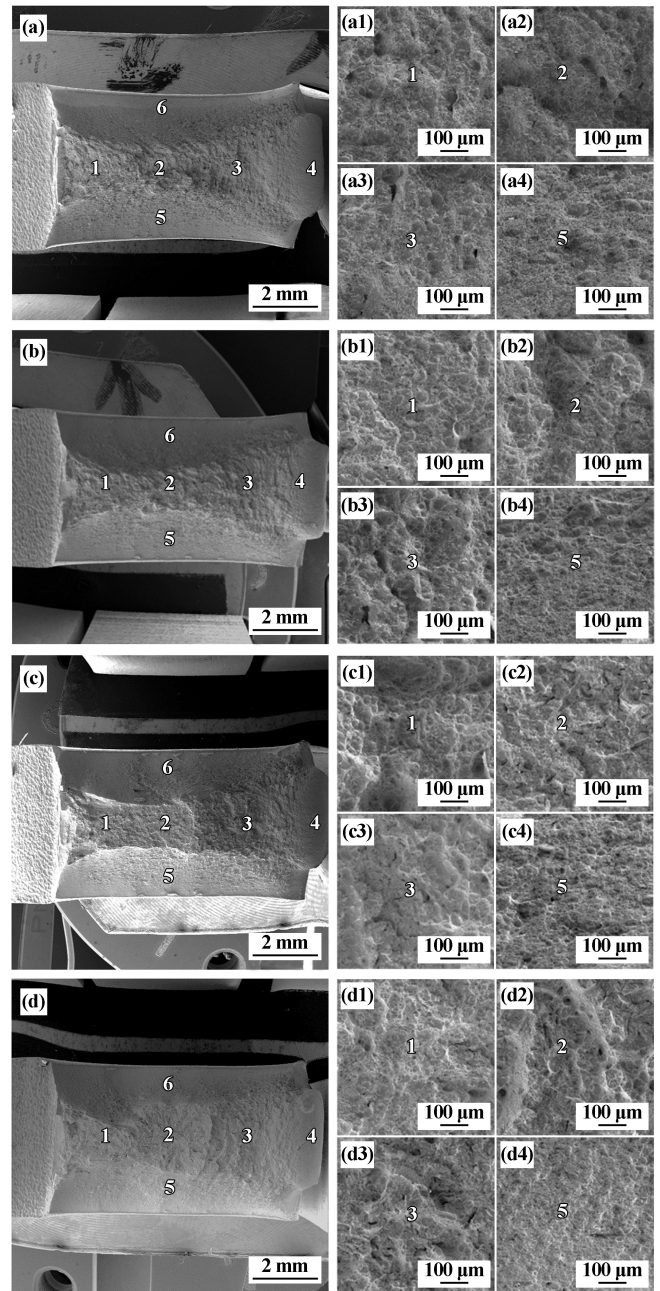


图 5 不同温度下回火后实验钢-40 °C 冲击功

组织中的碳化物粗化且在马氏体板条界面上偏聚,弱化了板条界面的结合力,使界面对裂纹扩展的阻碍能力减弱,从而使钢的冲击韧性降低<sup>[21]</sup>。回火温度升高到 320 °C 时,实验钢组织中的碳化物球化,在一定程度上改善了界面的脆化状态,低温冲击韧性略有回升<sup>[22]</sup>。

图 6 为不同温度下回火 90 min 后实验钢冲击断口 SEM 照片(左侧为宏观形貌,右侧为左侧图中对应点的微观形貌)。图 6(a)~(d)中标示的 1、2、3 区为纤维区,标示的 4、5、6 区为剪切唇。从宏观断口照片中可以看出,185 °C 和 230 °C 下回火后的实验钢断面粗糙不平,纤维区面积较大,表现出韧性较好的特征;



(a) 185 °C; (b) 230 °C; (c) 275 °C; (d) 320 °C

图 6 不同温度下回火后实验钢冲击断口 SEM 照片

275 ℃和320 ℃下回火后的实验钢断面较为光滑,纤维区面积较小,表现为韧性较差。185 ℃和230 ℃下回火后的实验钢微观断口有明显的韧性断裂特征,其纤维区中可观察到大量较深的等轴型韧窝,剪切唇中可观察到大量较深的抛物线型韧窝。275 ℃和320 ℃下回火后的实验钢微观断口以介于韧性断裂与脆性断裂之间的混合型断裂形式存在,其纤维区中可观察到大量较浅的等轴型韧窝、撕裂棱以及解理小刻面,剪切唇中则可观察到抛物线型韧窝和裂纹。

从宏观和微观断口形貌可以看出,185 ℃和230 ℃下回火后的实验钢比275 ℃和320 ℃下回火后的实验钢具有更优秀的低温冲击韧性,这与实验结果相符。

### 3 结 论

1) 不同温度下回火时,实验钢微观组织为板条状马氏体和弥散碳化物,随着回火温度提高,碳化物的析出驱动力增加,析出相数量增加且发生粗化,马氏体的分解程度增加。

2) 随着回火温度升高,实验钢抗拉强度逐渐下降,屈服强度先升高后下降,延伸率先略为升高后逐渐下降,185 ℃回火时抗拉强度最高,275 ℃回火时屈服强度最高,230 ℃回火时延伸率最高。

3) 随着回火温度升高,实验钢冲击功先下降后上升,在高于275 ℃回火时实验钢组织析出的碳化物在马氏体板条界面偏聚,导致低温回火脆性,使钢的塑性和韧性降低。230 ℃回火的实验钢具有较优的综合力学性能。

#### 参考文献:

[1] 李阳华,李红英,王晓峰,等. 回火工艺对超深井用 V150 油套管强韧性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(6): 2244-2251.

[2] 周成,赵坦,叶其斌,等. 回火温度对 1000 MPa 级 NiCrMoV 低碳合金钢微观组织和低温韧性的影响[J]. 金属学报, 2022,58(12): 1557-1569.

[3] 于洪军,宋仁伯,李东,等. 热处理工艺对超高强度马氏体钢性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2018,30(5):392-398.

[4] 李安铭,王向杰,黄丽娟,等. 淬火工艺对 27SiMn 钢组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2007,27(4):80-82.

[5] 刘丹,陈杰,刘文鉴,等. 回火温度对 Q1100 超高强度组织和

性能的影响[J]. 金属热处理, 2022,47(5):111-117.

- [6] 刘志宇,杨达朋,易红亮. 回火温度对不同自回火程度的中碳马氏体钢组织和拉伸性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023(12): 1505-1516.
- [7] 黄豪,倪豪豪,鞠玉琳,等. 正火预处理对高速型用 28MnB5 钢组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023,48(1):139-144.
- [8] 李康丽,李永志,孙国栋. 正火预处理对 42CrMo 曲轴钢调质后的组织与性能影响[J]. 特殊钢, 2020,41(4):26-29.
- [9] AN X, TIAN Y, WANG H, et al. Effect of preheat treatment on microstructure and properties of a gear steel for high-temperature carburizing[J]. Steel Research International, 2020,91(10):2000180.
- [10] 王幸,李红英,汤伟,等. 一种高强度钢的 CCT 曲线的测定与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(4):1090-1098.
- [11] ZHU F, CHAI F, LUO X, et al. Strengthening and toughening mechanism of a Cu-bearing high-strength low-alloy steel with refined tempered martensite/bainite (M/B) matrix and minor inter-critical ferrite[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28:464-478.
- [12] 王全礼,路士平,马龙腾,等. 高强度增强韧性的在线淬火技术开发与应用[J]. 钢铁, 2023(8):149-156.
- [13] 徐祖耀,曹四维. 回火马氏体脆性的机制[J]. 金属学报, 1987, 23(6):477-483.
- [14] 俞学节. 回火结构钢的断裂行为和显微组织的关系[J]. 金属学报, 1984,20(1):141-146.
- [15] 王建景. Q1030 超高强度钢工艺与组织性能研究[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- [16] 张可,雍岐龙,孙新军,等. 回火温度对高 Ti 微合金直接淬火高强度组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2014,50(8):913-920.
- [17] 王军亮,尹登峰,王华,等. Al-Sc-Zr-Er-Ti 铝合金累积叠轧组织性能及结构研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):126-130.
- [18] 聂志诚,张欣,刘筱. 多向锻造变形和退火处理对 AZ31 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6): 194-197.
- [19] 钟士红. 钢的回火工艺和回火方程[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- [20] KONG H J, XU C, BU C C, et al. Hardening mechanisms and impact toughening of a high-strength steel containing low Ni and Cu additions[J]. Acta Materialia, 2019,172:150-160.
- [21] 夏博,王斌,张鹏,等. 回火温度对高强弹簧钢微观组织和冲击性能的影响[J]. 材料研究学报, 2023,37(5):341-352.
- [22] 谢学林,杨钢,陈庚,等. 1Cr12Ni3Mo2VN 耐热钢的回火工艺[J]. 钢铁研究学报, 2017,29(2):156-160.

引用本文: 史术华,高擎,钱亚军. 低温回火对低碳马氏体超高强度组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):174-178.