

铁素体含量及分布对马氏体基超高强度双相钢组织及性能的影响^①

钱亚军¹, 刘文鉴²

(1.湘潭钢铁集团有限公司, 湖南 湘潭 411101; 2.中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过热处理制备出不同铁素体含量和分布的马氏体基超高强度钢, 结合微观组织表征和力学性能测试, 研究了铁素体含量及分布对屈服强度超过 1 100 MPa 的马氏体基超高强度钢组织及性能的影响, 分析了微观组织演变和强韧化机理。结果表明: 少量铁素体在马氏体基体中均匀分布时, 实验钢不仅拥有超高的屈服强度 (1 245.44 MPa) 和抗拉强度 (1 411.96 MPa), 还拥有较高的低温冲击功 (80 J), 表现出极佳的综合力学性能; 少量铁素体在局部区域沿轧向连续分布能略微提高拉伸强度, 但不均匀分布的铁素体会增加应力集中程度, 降低韧性; 连续分布的铁素体含量增加时, 拉伸强度提高, 但形成的条带状马氏体和增加的应力集中使得实验钢韧性大幅度降低。

关键词: 铁素体; 马氏体; 超高强度钢; 双相钢; 组织演变机理; 强韧化机理

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.034

文章编号: 0253-6099(2025)04-0186-06

Effect of Ferrite Content and Distribution on Microstructure and Properties of Ultra-high Strength Martensite-Ferrite Dual-Phase Steel

QIAN Yajun¹, LIU Wenjian²

(1. Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd. of Hunan Valin, Xiangtan 411101, Hunan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Martensitic steel with different ferrite content and distribution was firstly fabricated by heat treatment. Then, the effects of ferrite content and distribution on the microstructure and properties of such ultra-high strength martensitic steel with yield strength more than 1 100 MPa was explored based on microstructure characterization and mechanical property tests. The microstructure evolution and strengthening and toughening mechanism were also analyzed. The results show that with a small amount of ferrite uniformly distributed in the martensite matrix, the steel sample in the experiment can exhibit not only ultra-high yield strength (1 245.44 MPa) and tensile strength (1 411.96 MPa), but also higher impact energy (80 J) at low temperature, presenting the optimal comprehensive mechanical properties. A small amount of ferrite in the local area continuously distributed along the rolling direction can slightly improve the tensile strength, but the unevenly distributed ferrite can improve the stress concentration and reduce the toughness. An increase in the content of continuously distributed ferrite can improve the tensile strength, but the formation of banded martensite and improved stress concentration make the toughness of the steel sample in the experiment substantially reduced.

Key words: ferrite; martensite; ultra-high strength steel; dual-phase steel; microstructure evolution mechanism; strengthening and toughening mechanism

超高强度钢的使用有助于减轻装备的钢材质量和降低装备运行油耗^[1-3]。屈服强度 1 100 MPa 以上的

商用工程机械用钢属于超高强度钢, 一般为马氏体钢^[4]。马氏体钢的超高强度往往意味着较低的低温

① 收稿日期: 2025-01-21

作者简介: 钱亚军 (1981—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山与工程机械用高性能钢研究。E-mail: qyj_66@163.com

通信作者: 刘文鉴 (1995—), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, 主要从事工程机械高强度和高钢级管线钢研究。E-mail: 984312670@qq.com

韧性,在低温环境下容易因冲击载荷作用而断裂失效,需要适当的组织调控以获得更为优良的强韧性匹配^[5-6]。亚温淬火是将钢材加热至两相区保温后淬火冷却至室温的工艺,其加热温度低、保温时间短、加工成本低,引入的铁素体相具有良好的塑韧性,有利于马氏体钢韧性的改善^[7-12]。将亚温淬火工艺合理地运用到工程机械用钢的制备中,能在保障实验钢超高强度的同时优化韧性。然而,目前有关铁素体含量和分布对屈服强度超过 1 100 MPa 的马氏体基双相钢组织演变和强韧性的影响研究较少,本文以经亚温淬火+回火和淬火+亚温淬火+回火后的轧制态 Q1100 工程机械用钢为研究对象,研究铁素体含量和分布对其组织性能的影响,深入研究其组织演变和强韧化机理,以期获得超高强度高韧性工程机械用钢。

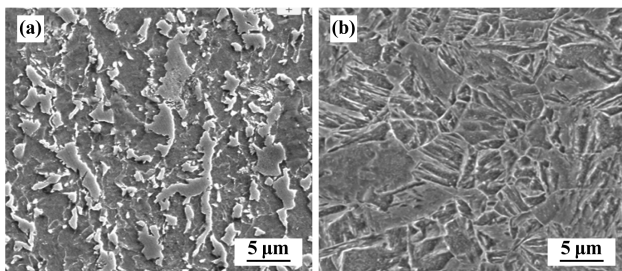
1 实验材料与方法

实验钢为某企业生产的轧制态工程机械用 Q1100 钢,厚度为 11 mm,其化学成分如表 1 所示,轧制态和 860 °C 淬火态实验钢微观组织如图 1 所示。轧制态组织为变形的粒状贝氏体,淬火态组织为完整的马氏体^[13]。将化学成分代入经验公式计算可得,实验钢的 A_{c1} 温度(加热时珠光体向奥氏体转变的温度)和 A_{c3} 温度(加热时转变为奥氏体的终了温度)分别为 723 和 847 °C。

表 1 实验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of experimental steel %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V
0.16	0.30	1.12	0.009	0.002	0.022	0.053
Ti	Ni	Cr	Mo	B	Al	Fe
0.018	0.32	0.21	0.54	0.001 8	0.03	余量



(a) 轧制态; (b) 淬火态

图 1 实验钢的微观组织

Fig. 1 Microstructure of experimental steel

表 2 为实验钢的热处理工艺流程。其中 S1 和 S2 样品采用亚温淬火+回火, S3 样品采用淬火+亚温淬火+回火。

表 2 实验钢的热处理工艺流程

Table 2 Heat treatment process of experimental steel

样品	淬火温度/°C	亚温淬火温度/°C	回火温度/°C
S1	—	840	230
S2	—	820	230
S3	860	840	230

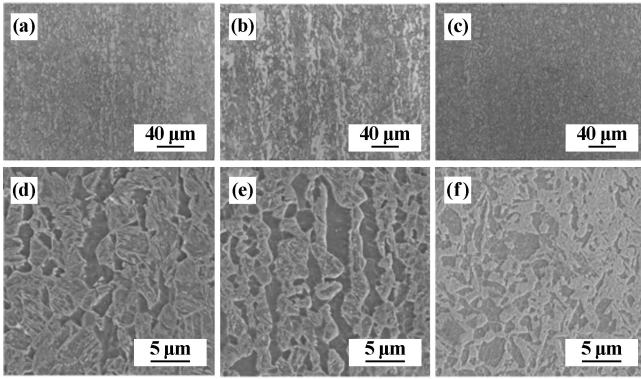
在实验钢板 1/2 厚度处切取试样,采用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和电子背散射衍射(EBSD)技术分析试样。OM 和 SEM 试样观察面用金相砂纸机械研磨,抛光至镜面,最后用体积分数 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 10~14 s。用 Image Pro Plus 软件统计 OM 微观组织。EBSD 样品观察面在机械研磨后用体积分数 10% 高氯酸酒精溶液电解抛光至表面无划痕。采用 SIRION 200 场发射扫描电子显微镜进行 SEM 表征,采用配备 EBSD 探头的 ZEISS EVO MA 10 扫描电子显微镜进行 EBSD 表征,采用 HKL Channel 5 软件分析样品晶体学信息。

在钢板 1/2 厚度位置取样,沿轧向切割成标准棒状拉伸试样,按照国标 GB 228.1—2010,采用 MTS-810 力学性能试验机进行拉伸实验。在钢板 1/2 厚度处取样,加工成 10 mm×10 mm×55 mm 的 V 形缺口夏比冲击试样,采用国标 GB/T 229—2020 进行低温冲击实验,实验温度为-40 °C。对冲击实验后的样品断口进行 SEM 表征。

2 实验结果及分析讨论

2.1 微观组织表征

图 2 为实验钢的 OM 和 SEM 照片。S1 和 S2 样品是轧制态实验钢经亚温淬火和低温回火后得到的,微观组织由不均匀分布的铁素体和回火马氏体组成,其中 S2 样品加热温度更低(820 °C),铁素体含量更多,粗大条带状铁素体沿轧制方向首尾相连,将马氏体分隔成条带状。S1 样品加热温度更高(840 °C),铁素体含量更少,仅在局部区域存在少量铁素体首尾相连,分布不均匀。S1 样品的铁素体含量过少,无法将马氏体分隔成条带状。S3 样品经淬火+亚温淬火+低温回火后得到,微观组织由少量细小均匀的铁素体和大量回火马氏体组成。3 种实验钢的回火马氏体组织均呈板条状形貌,其上分布有细小弥散的碳化物,其中 S2 样品中的马氏体呈连续的条带状分布。对 OM 照片进行两相占比统计, S1、S2、S3 样品的马氏体占比分别为 91.48%、78.98%、89.46%,铁素体占比分别为 10.52%、22.02%、10.54%, S1 和 S3 样品的马氏体占比相近且高于 S2 样品的马氏体占比。



(a) S1, OM; (b) S2, OM; (c) S3, OM;
(d) S1, SEM; (e) S2, SEM; (f) S3, SEM
图2 实验钢的OM和SEM照片

Fig.2 OM and SEM images of experimental steels

图3为实验钢的EBSD照片。图3(a1)~(c1)分别为3种样品的反极图(IPF);图3(a2)~(c2)为用HKL Channel 5软件中的Band Slope工具定性区分出

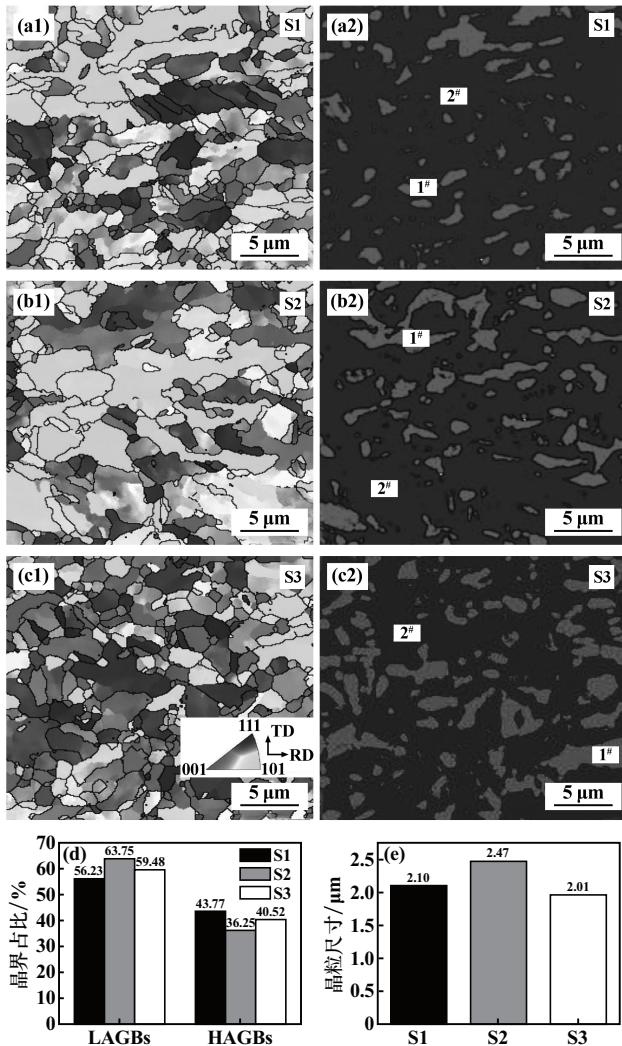


图3 实验钢的EBSD照片

Fig.3 EBSD results of experimental steels

的马氏体和铁素体分布图,1#区域代表铁素体,2#区域代表马氏体。结果表明,S1、S2样品中的铁素体呈不均匀分布的条带状特征,其中S1样品铁素体含量少且仅有少量铁素体连续分布,S2样品的铁素体含量更高,铁素体条带状分布特征更明显,S3样品的铁素体呈均匀分布的等轴状形貌。图3(d)和图3(e)分别为3种实验钢微观组织的大小角度晶界占比和晶粒尺寸统计图,S1、S2、S3样品的小角度晶界(LAGBs)占比分别为56.23%、63.75%、59.48%,大角度晶界(HAGBs)占比分别为43.77%、36.25%、40.52%,平均有效晶粒尺寸分别为2.10、2.47、2.01 μm。S2样品的HAGBs占比低,有效晶粒尺寸大,S1和S3样品的HAGBs占比和有效晶粒尺寸相近。

2.2 力学性能测试

图4为实验钢的拉伸性能曲线和力学性能统计图。S1、S2、S3样品的屈服强度和抗拉强度分别为1 263.73、1 212.61、1 245.44 MPa和1 434.40、1 400.11、1 411.96 MPa,低温(-40 °C)冲击功依次为68、61、80 J。相比之下,S2样品具有更低的强度和韧性,S3样品具

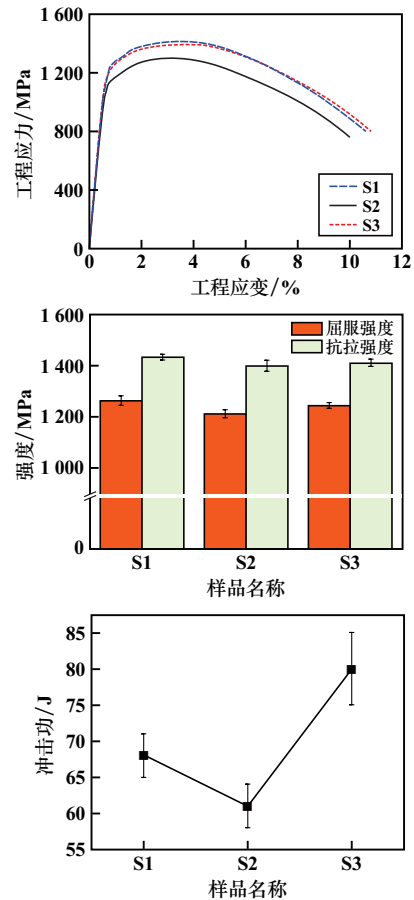


图4 实验钢拉伸曲线和力学性能

Fig.4 Tensile curve and mechanical properties of experimental steels

有与 S1 样品相近的超高屈服强度和更高的韧性。因此, S2 样品综合力学性能差, S3 样品综合力学性能好。

2.3 组织演变机理

图 5 为实验钢的微观组织演变机理示意图。轧态实验钢中的粒状贝氏体晶粒沿轧制方向被拉长, 长条状 MA 组元沿晶界分布。将轧制态实验钢进行亚温淬火和低温回火, 制得 S1 和 S2 试样。MA 组元碳含量较高, 晶界位置也因原子排列不规则、晶格畸变大等原因处于高能量状态, 因此, 贝氏体晶界上的 MA 组元能为奥氏体形核提供所需的浓度起伏、结构起伏和能量起伏, 促进奥氏体优先形核^[14]。由于在两相区加热, 贝氏体无法完全转变为奥氏体, 未转变组织经加热后分解形成铁素体^[15]。在随后的快速冷却过程中, 奥氏体转变为板条状马氏体, 与分解后形成的铁素体一起

形成马氏体/铁素体双相钢。由于轧态实验钢微观组织中长条状 MA 组元沿着贝氏体晶界分布, 奥氏体优先在贝氏体晶界形核和长大并首尾相连, 加热温度相对较低(820 ℃)时, 奥氏体化区域面积小, 加热温度较高(840 ℃)时, 奥氏体化区域面积增大, 首尾相连程度增加。

S3 样品采用淬火+亚温淬火+低温回火工艺制得。实验钢经淬火得到马氏体组织, 再加热至两相区温度, 实验钢的马氏体板条界和原始奥氏体晶界等缺陷密度高的界面处优先析出奥氏体并长大, 快冷后得到马氏体, 未奥氏体化部分的贝氏体高温分解后形成铁素体^[16]。由于淬火态组织中马氏体分布均匀, 没有择优取向, 形成的奥氏体均匀分布, 未奥氏体化区域形成的铁素体也均匀分布。由于 S3 样品加热温度较高(840 ℃), 所得铁素体含量比 S2 样品少。

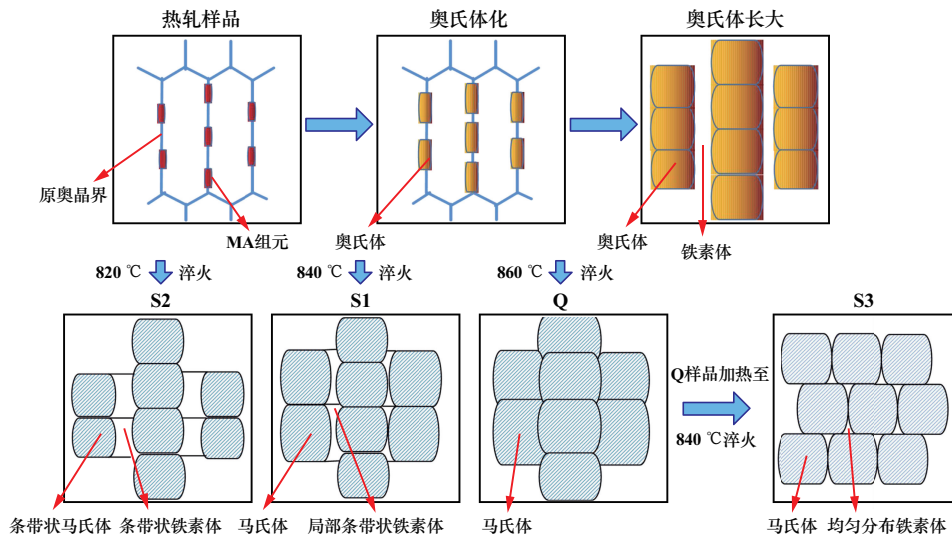


图 5 实验钢微观组织演变机理示意图

Fig.5 Microstructural evolution mechanism of experimental steels

2.4 强韧化机理

如前所述, S1、S2、S3 样品的平均有效晶粒尺寸分别为 2.10、2.47、2.01 μm, 马氏体占比分别为 91.48%、78.98%、89.46%, 铁素体占比分别为 10.52%、22.02%、10.54%。用 100 个方格模拟 S1、S2、S3 实验钢的组织分布, 实验钢微观组织简化图见图 6, 其中有色方格代表马氏体, 占比分别为 94%、80%、90%, 白色方格代表铁素体, 占比分别为 6%、20%、10%, 垂直方向为轧制方向。S1 样品中少量铁素体局部弥散分布, S2 样品中铁素体含量增加并连续分布, S3 样品中少量铁素体均匀分布。如图所示, 垂直于轧制方向共有 90 个两相界面, 其中 S1、S2 和 S3 样品中分别包含 82、76 和 80 个马氏体/马氏体界面。当样品受轧向拉伸应力时, 垂直

于应力连续分布的马氏体硬相成为主要承力结构而有利于强度提高。S2 样品的铁素体相含量多, 沿受力方向马氏体/马氏体界面数量少且晶粒尺寸大, 均不利于强度的提高, 因而其强度低。S1 和 S3 样品微观组织中两相占比相近, 其强度的主要影响因素为两相分布

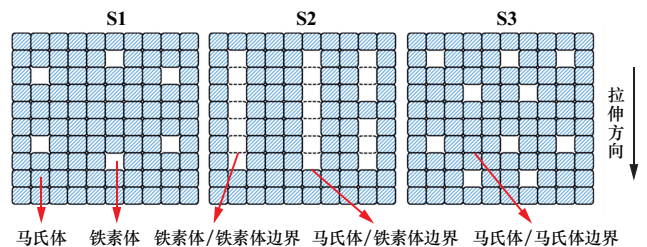


图 6 实验钢微观组织简化图

Fig.6 Schematic diagram of microstructure of experimental steels

和有效晶粒尺寸。一方面, S1 样品沿受力方向马氏体/马氏体界面数量更高, 有利于其强度的提高; 另一方面, S1 样品的有效晶粒尺寸略高于 S3 样品, 其细晶强化效果减弱。如前所述, S1 样品的强度高于 S3, 说明沿受力方向连续分布的马氏体相含量对 S1 样品强度的有利影响占主导地位。

图 7 为实验钢冲击断口的 SEM 照片和韧化机理。S3 样品断口为韧性断裂, 包含均匀分布的韧窝, 表明其具有优良韧性。S3 样品的铁素体均匀分布且平均晶粒尺寸小, 有利于缓解应力集中并阻碍裂纹扩展, 使得 S3 样品韧性高。S1 样品断口为脆脆混合型断裂, 包含不均匀分布的准解理面、韧窝、撕裂棱和微裂纹。局部存在的由细小韧窝组成的撕裂棱说明该区域经历了大量的塑性变形, 吸收变形能量, 可能与 S1 中局部连续分布的铁素体有关^[17]。铁素体在马氏体基体的局部区域连续分布, 两相之间的应变不相容导致局部应力集中, 促进了附近微裂纹的产生, 使得 S1 样品韧性低于 S3 样品^[18-19]。S2 样品断口为脆脆混合型断裂, 包含舌状花样准解理面、等轴型韧窝和微裂纹。断口中大量舌状花样沿垂直方向连续分布, 部分舌状花样的起源部位存在微裂纹。这是因为带状马氏体更容易受到横向冲击的损伤而形成微裂纹, 沿轧向连续分布的条带状马氏体和铁素体加剧了微观组织局部应力集中, 促进裂纹在界面的形核和沿轧向扩展, 因此 S2 样品韧性最差^[20]。

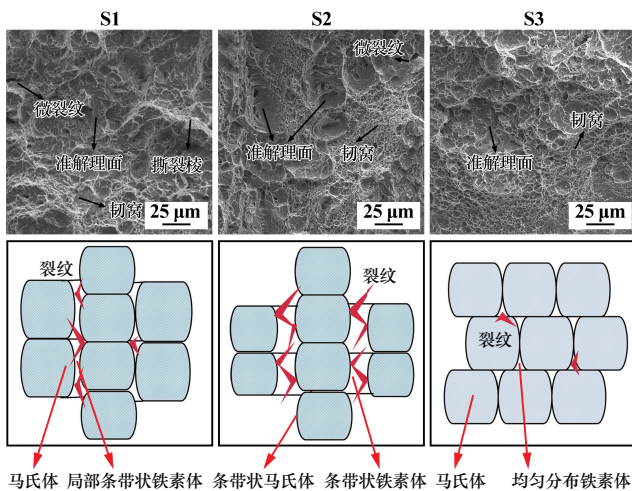


图 7 实验钢冲击断口 SEM 照片和韧化机理

Fig.7 SEM images of impact fracture of experimental steels and illustration of toughening mechanism

3 结论

1) 当铁素体含量约为 10% 时, 均匀分布的铁素体

有利于提高实验钢的综合力学性能, 使实验钢具有超高的屈服强度 (1 245.44)、抗拉强度 (1 411.96 MPa) 和高的低温冲击功 (80 J); 铁素体的局部连续分布能略微提高实验钢的拉伸强度, 但会降低实验钢的低温冲击功。

2) 当连续分布的铁素体含量增加到约 20% 时, 结合力强的马氏体/马氏体界面数量减少, 使得实验钢的拉伸强度明显降低, 并促使形核的微裂纹沿连续铁素体扩展, 降低实验钢的低温韧性。

参考文献 (References):

- [1] 黄志辉, 何卓识, 纪亮, 等. 中国工程机械二氧化碳和污染物排放现状评估[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11): 2108-2117. HUANG Zhihui, HE Zhuoshi, JI Liang, et al. Status assessment of carbon dioxide and pollutant emissions of construction machineries in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(11): 2108-2117.
- [2] 杨宁, 李冰, 徐武彬, 等. 工程机械节能减排现状及发展新趋势[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 297-300. YANG Ning, LI Bing, XU Wubin, et al. Present status and development trend of energy saving and emission reduction of construction machinery[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(1): 297-300.
- [3] 李红英, 赵菲, 刘丹, 等. 工程机械用 Q1100 钢的热变形应变补偿本构方程[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 608-618. LI Hongying, ZHAO Fei, LIU Dan, et al. Thermal deformation strain compensation constitutive equation for Q1100 steel for construction machinery[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(3): 608-618.
- [4] 刘丹, 陈杰, 刘文鉴, 等. 回火温度对 Q1100 超高强钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(5): 111-117. LIU Dan, CHEN Jie, LIU Wenjian, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of Q1100 ultra-high strength steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(5): 111-117.
- [5] 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.
- [6] LIU W J, LI H Y, ZHOU W H, et al. Inter-critically reheated CGHAZ of ultra-high-strength martensitic steel with different cooling rates[J]. Materials, 2023, 16(2): 581.
- [7] 王猛, 刘振宇, 李成刚. 轧后超快冷及亚温淬火对 5%Ni 钢微观组织与低温韧性的影响机理[J]. 金属学报, 2017, 53(8): 947-956. WANG Meng, LIU Zhenyu, LI Chenggang. Effect mechanism of ultra-fast cooling and sub-temperature quenching after rolling on microstructure and low temperature toughness of 5% Ni steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 947-956.
- [8] VARANASI R S, KOYAMA M, SHIBAYAMA Y, et al. Mixed type

- brittle fracture in 1.5 GPa dual-phase steel via {100} ferrite cleavage cracking[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857: 144021.
- [9] WANG J, LI W, ZHU X, et al. Effect of martensite morphology and volume fraction on the low-temperature impact toughness of dual-phase steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832:142424.
- [10] 王兆华,谢章龙,陈锋. 亚温淬火及回火工艺对 E550 级船板钢组织和性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(4):613-618.
- WANG Zhaohua, XIE Zhanglong, CHEN Feng. Effects of intercritical quenching and tempering process on microstructure and properties of ship plate steel with 550 MPa strength grade[J]. *Journal of South-east University(Natural Science Edition)*, 2018, 48(4):613-618.
- [11] 李安铭,王向杰,黄丽娟. 45 钢亚温淬火工艺的研究[J]. *金属热处理*, 2007, 32(10):56-58.
- LI Anming, WANG Xiangjie, HUANG Lijuan. Study on subcritical quenching technique for 45 steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 32(10):56-58.
- [12] 宁博,李志超,武会宾,等. 改善 09MnNi 容器钢低温冲击韧性的机理[J]. *材料研究学报*, 2022, 36(9):660-666.
- NING Bo, LI Zhichao, WU Huibin, et al. Mechanism of improving low temperature impact toughness of 09MnNi vessel steel[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2022, 36(9):660-666.
- [13] 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.
- WANG Xing, LI Hongying, TANG Wei, et al. Determination and analysis of CCT curve of a high strength steel[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(4):1090-1098.
- [14] COUCHET C, BONNET F, TEIXEIRA J, et al. Numerical investigations of phase transformations controlled by interface thermodynamic conditions during intercritical annealing of steels[J]. *Metals*, 2023, 13(7):1288.
- [15] DONG Y, XIANG L, ZHU C, et al. Analysis of phase transformation thermodynamics and kinetics and its relationship to structure-mechanical properties in a medium-Mn high strength steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27:5411-5423.
- [16] 姜世杭,朱智峰,徐有岩,等. 亚温淬火对 22SiMnCrNi2MoA 钢组织和性能的影响[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2019, 22(2):17-20.
- JIANG Shihang, ZHU Zhifeng, XU Youyan, et al. Effect of subcritical quenching on microstructure and properties of 22SiMnCrNi2MoA steel[J]. *Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)*, 2019, 22(2):17-20.
- [17] 王奥文,李全安,陈晓亚,等. Mg-5Gd-3Sm-(1Zn)-0.5Zr 合金组织和力学性能研究[J]. *中国稀土学报*, 2025, 43(2):401-415.
- WANG Aowen, LI Quan'an, CHEN Xiaoya, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-5Gd-3Sm-(1Zn)-0.5Zr alloy[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2025, 43(2):401-415.
- [18] KADKHODAPOUR J, BUTZ A, RAD S Z. Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(7):2575-2588.
- [19] LIU W, LIAN J, MÜNSTERMANN S. Damage mechanism analysis of a high-strength dual-phase steel sheet with optimized fracture samples for various stress states and loading rates[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 106:104138.
- [20] TASAN C C, DIEHL M, YAN D, et al. An overview of dual-phase steels: advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2015, 45:391-431.
- 引用本文:钱亚军,刘文鉴. 铁素体含量及分布对马氏体基超高强度双相钢组织及性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(4):186-191.
- QIAN Yajun, LIU Wenjian. Effect of ferrite content and distribution on microstructure and properties of ultra-high strength martensite-ferrite dual-phase steel[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(4):186-191.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2025年8月