DOI：10.11973/jxgccl202308010

水淬预处理对铁道机车用轴承钢组织与力学性能的影响

张 晶[1]，赵晓磊[2]，胡素芬[2]
（1. 吉林铁道职业技术学院东北亚高铁学院，吉林 132200；2. 大连理工大学 材料科学与工程学院，大连 116024）

摘 要：对铁道机车用轴承钢锻坯进行水淬预处理，再分别对锻坯和水淬预处理钢进行奥氏体化＋等温淬火处理，研究了水淬预处理对轴承钢显微组织和力学性能的影响。结果表明：轴承钢锻坯的显微组织为珠光体＋铁素体，水淬预处理后组织变为马氏体＋少量铁素体；奥氏体化＋等温淬火处理后，锻坯和水淬预处理钢中都出现了细长贝氏体板条束和块状马氏体/奥氏体（M/A）岛，水淬预处理钢中的贝氏体板条束更细小，M/A 岛数量更多且尺寸更小；奥氏体化＋等温淬火处理后，水淬预处理钢的抗拉强度和屈服强度较锻坯分别提高了 8.68％和 17.07％，冲击功也高于锻坯，但两者的断后伸长率相近。

关键词：轴承钢；锻坯；水淬预处理；显微组织；力学性能

中图分类号：TG146.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3738(2023)08-0059-06

Effect of Water Quenching Pretreatment on Structure and Mechanical Properties of Bearing Steel for Railway Locomotive

ZHANG Jing[1], ZHAO Xiaolei[2], HU Sufen[2]
(1. School of Northeast Asia High-Speed Rail, Jilin Railway Technology College, Jilin 132200, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Forging stock of bearing steel used for railway locomotive was pretreated by water quenching. The forging stock and water quenching pretreated steel were subjected to austenitizing and isothermal quenching. The effect of water quenching pretreatment on the microstructure and mechanical properties of the bearing steel was studied. The results show that the microstructure of forged bearing steel was composed of pearlite and ferrite, and after water quenching pretreatment was composed of martensite and a little ferrite. After austenitizing and isothermal quenching, slender bainite slat bundles and massive martensite/austenite (M/A) islands appeared in both forging stock and water quenching pretreated steel. The bainite slat bundles in the water quenching pretreated steel were smaller, and M/A islands were more in amount and smaller in size. The tensile strength and yield strength of the water quenching pretreated steel after austenitizing and isothermal quenching were 8.68% and 17.07% higher than those of the forging stock, respectively, and the impact energy was also higher than that of the forging stock. But the elongation after fracture of the two was similar.

Key words: bearing steel; forging stock; water quenching pretreatment; microstructure; mechanical property

0 引 言

在铁道机车轴承钢的生产过程中，需将钢材加工成所需形状后再进行奥氏体化、等温淬火等热处理，以达到所要求的力学性能[1]。轴承用 Fe-0.18C-1.6Si-1.2Mn 贝氏体钢通常先经过铸造、热锻等工艺来获得所需的形状，再进行热处理（等温淬火等）以调整其显微组织，从而获得所需的力学性能。热处理前轴承钢不同的初始显微组织会显著影响热处理后的显微组织和力学性能[2-3]，但目前相关的研究报道还较少[4-7]。因此，作者以铁道机车用轴承钢锻坯为试验对象，通过水淬预处理改变其初始显微组织，研究了不同组织轴承钢经过奥氏体化＋等温淬火处理后的

收稿日期：2022-05-22；修订日期：2023-07-05
基金项目：吉林省科技发展计划项目（20200401033HY）；吉林省教育厅数学改革研究课题（2020ZC2021）
作者简介：张晶（1983－），女，吉林延边人，讲师，硕士

显微组织、拉伸性能和冲击性能。研究结果有助于了解初始组织状态对热处理态组织与性能的影响规律，并为轴承钢的工业化生产提供一定的理论参考。

1　试样制备与试验方法

试验原料为吉林吉钢钢铁集团有限公司提供的铁道机车轴承用Fe-0.18C-1.6Si-1.2Mn钢锻坯，尺寸为40 cm×50 cm×150 cm，锻造温度为980～1 180 ℃，锻造后空冷至室温。采用电感耦合等离子发射光谱法测得试验钢的化学成分如表1所示。

表1　试验钢的化学成分

Table 1　Chemical composition of tested steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
质量分数/%	0.18	1.69	1.28	0.010	0.004	1.82	0.50	0.36	余

采用线切割法从锻坯上加工出尺寸为25 cm×45 cm×125 cm的矩形坯料，将坯料置于CarboliteGero HTK型箱式电阻炉中进行945 ℃×20 min奥氏体化处理，水淬至室温，得到水淬预处理钢。使用Gleeble 3500型热模拟试验机测得锻坯和水淬预处理钢的马氏体开始转变温度分别为375，366 ℃，据此将等温淬火温度设定为385 ℃。在锻坯和水淬预处理钢上分别取尺寸为ϕ5 mm×8 mm的圆柱体试样，使用Nabertherm LHT08/18型热处理炉进行945 ℃×20 min奥氏体化处理，水淬至室温后使用箱式炉和DM-75-8型井式盐浴炉进行385 ℃×60 min等温淬火处理，介质为质量比1∶1的硝酸钾和亚硝酸钠。

采用线切割方法加工出尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的金相试样，依次经过砂纸打磨、机械抛光和体积分数4%硝酸乙醇溶液腐蚀（观察晶粒形貌则采用沸腾的饱和苦味酸溶液腐蚀）后，使用奥林巴斯GX 71型光学显微镜（OM）和SU-500型扫描电子显微镜（SEM）观察显微组织。使用扫描电子显微镜附带的电子背散射衍射（EBSD）组件进行EBSD表征，试样需在机械抛光后使用体积分数10%高氯酸+90%无水乙醇溶液进行电解抛光。使用Image-Pro plus软件测量晶粒的平均尺寸[8]。使用D8 ADVANCE型X射线衍射仪（XRD）进行物相分析，采用铜靶，K_α射线，步进扫描方式，扫描步长为0.02°。取透射电镜试样，打磨至50 μm后冲压成直径3 mm的薄片，使用Tenupol-5型双喷离子减薄仪在体积分数8%高氯酸+92%冰乙酸混合溶液中、−45 ℃条件下进行双喷减薄，使用JEOL-2100型透射电子显微镜（TEM）观察微观形貌。取如图1(a)所示拉伸试样，根据GB/T 228.1—2010，使用MTS-810型万能材料试验机进行室温拉伸试验，拉伸速度为2 mm·min^{-1}。取如图1(b)所示冲击试样，根据GB/T 229—2020，使用JB-300B型摆锤冲击试验机进行室温冲击试验。拉伸和冲击试验各测3个试样取平均值。

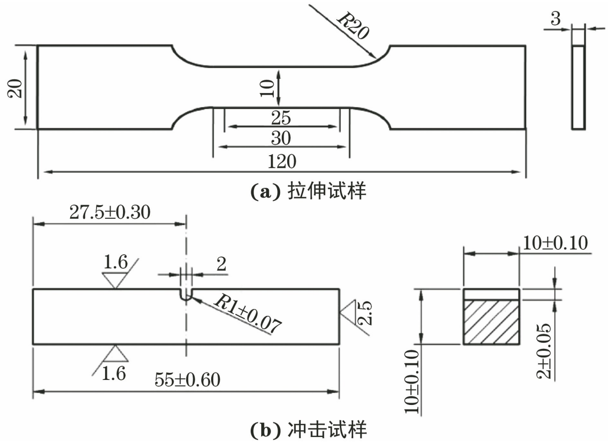


图1　拉伸和冲击试样的形状和尺寸

Fig.1　Shape and size of tensile (a) and impact (b) specimens

2　试验结果与讨论

2.1　显微组织与物相组成

由图2可见，轴承钢锻坯的显微组织为珠光体和铁素体，水淬预处理后的显微组织为马氏体和少量铁素体。

由图3可见：轴承钢锻坯经过奥氏体化处理后，基体中出现了尺寸不等的奥氏体晶粒，平均晶粒尺寸为35.7 μm；水淬预处理并经奥氏体化处理后，晶粒明显细化，平均晶粒尺寸为8.7 μm。由此可见，水淬预处理有助于减小轴承钢奥氏体化后的奥氏体晶粒尺寸。

由图4可见，经奥氏体化+等温淬火处理后，锻坯和水淬预处理钢的基体组织均为针状贝氏体铁素体（BF）+细长板条贝氏体（LB）+马氏体/奥氏体（M/A）岛，同时存在颗粒状残余奥氏体以及位于板条状贝氏体间的薄膜状残余奥氏体（A_f）。相比于未水淬处理的锻坯，水淬预处理钢中的贝氏体组织更细小，M/A岛数量更多且尺寸更小。这是因为奥氏体化处理后水淬预处理钢的奥氏体晶粒较为细小，板条贝氏体的形核和长大无法穿越奥氏体相界，贝氏体组织的粗化与长大受到抑制[9-11]；此外，奥氏体晶粒细化会增加晶界数量，从而增加M/A岛形核位置，因此M/A岛数量增多且尺寸减小。

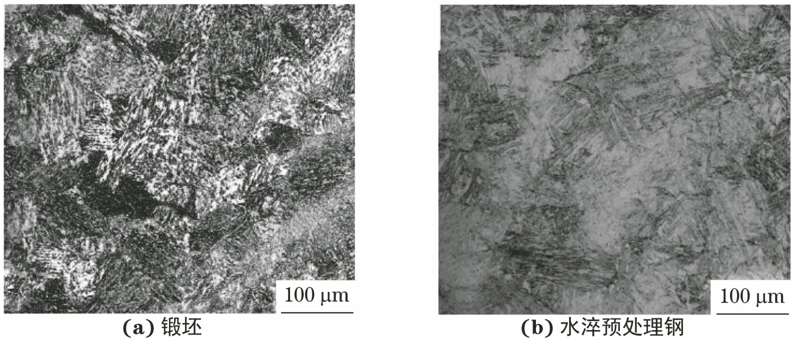


图 2　锻坯和水淬预处理钢的显微组织

Fig.2　Microstructures of forging stock (a) and water quenching pretreated steel (b)

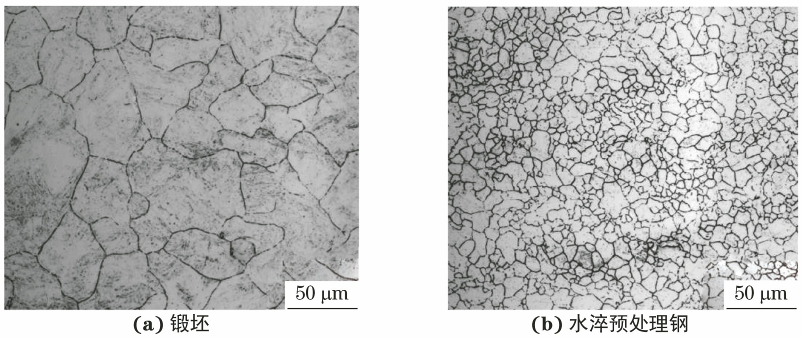


图 3　奥氏体化处理后锻坯和水淬预处理钢的晶粒形貌

Fig.3　Grain morphology of forging stock (a) and water quenching pretreated steel (b) after austenitizing treatment

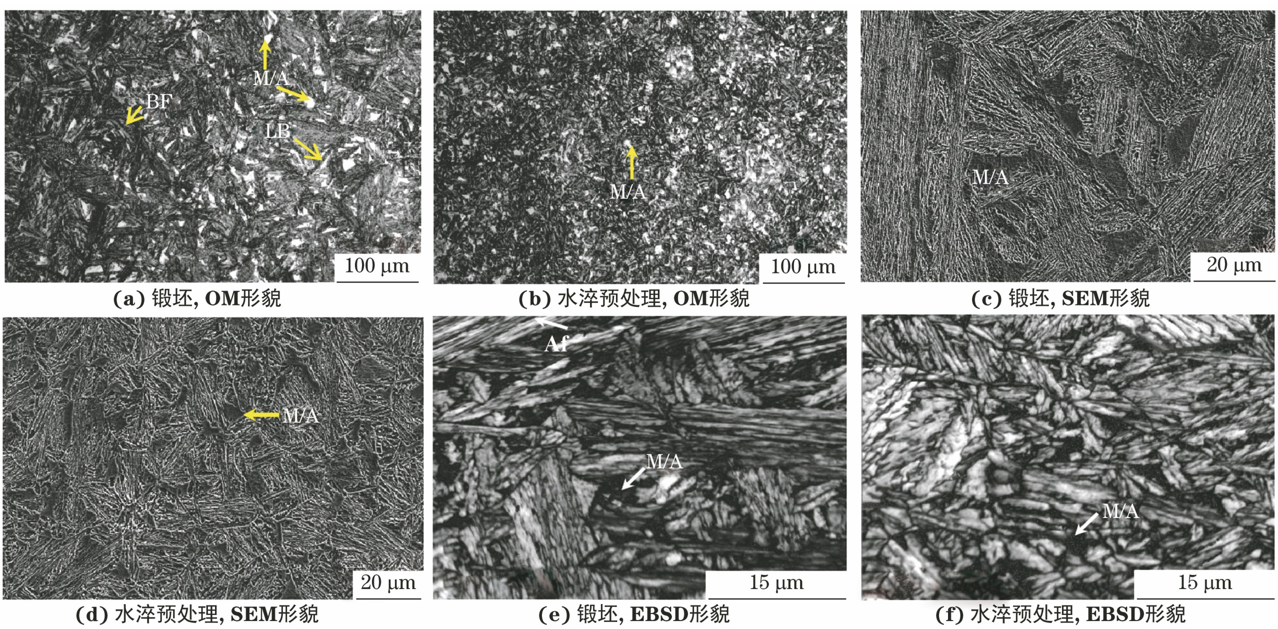


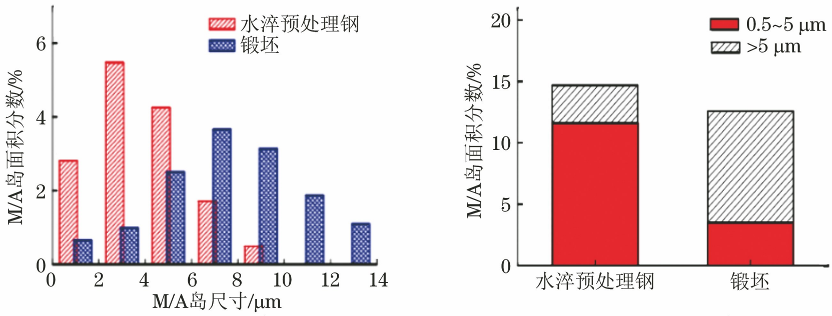
图 4　奥氏体化+等温淬火处理后锻坯和水淬预处理钢的显微组织

Fig.4　Microstructures of forging stock (a,c,e) and water quenching pretreated steel (b,d,f) after austenitizing and isothermal quenching treatment: (a−b) OM images; (c−d) SEM micrographs and (e−f) EBSD micrographs

由图 5 可见:经过奥氏体化+等温淬火处理后,锻坯中 M/A 岛的尺寸主要在 6~10 μm、平均尺寸约为 7.9 μm,而水淬预处理钢的 M/A 尺寸主要在 0~6 μm,平均尺寸约为 3.5 μm,且未出现尺寸在 10 μm 以上 M/A 岛组织;锻坯中尺寸在 0.5~5 μm 和大于 5 μm 的 M/A 岛的面积分数分别约为 3.4% 和 9.2%,水淬预处理钢中尺寸在 0.5~5 μm 和大于 5 μm 的 M/A 岛的面积分数分别约为 11.5% 和

3.2%。由此可见，水淬预处理有助于减小 M/A 岛的尺寸并增加 M/A 岛的面积分数。

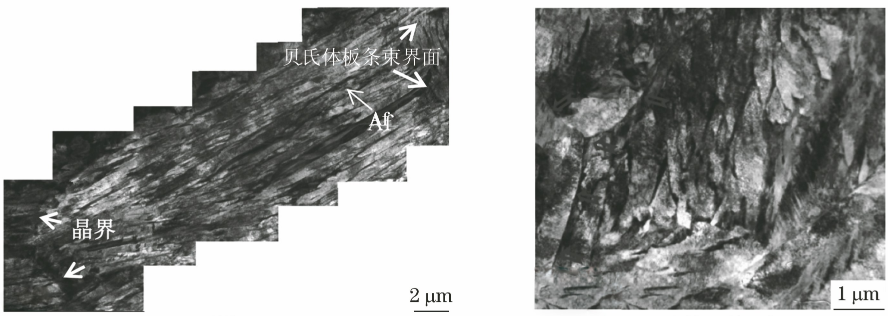
由图 6 可见：锻坯组织中的薄膜状残余奥氏体分布在贝氏体铁素体板条束间，未发现明显碳化物的存在；水淬预处理钢的组织与锻坯相似，但贝氏体板条相对更短，这与前文的 OM 和 SEM 观察结果相吻合。选取 TEM 照片 20 张，采用截距法[12]统计得到锻坯和水淬预处理钢中的贝氏体铁素体板条真实厚度分别为(232±42)，(209±33) nm。由此可见，水淬预处理有助于减小奥氏体化+等温淬火处理后轴承钢中的贝氏体铁素体板条的真实厚度。



(a) 尺寸分布　　(b) 面积分数直方图

图 5　奥氏体化+等温淬火处理后锻坯和水淬预处理钢中 M/A 岛的尺寸分布和面积分数直方图

Fig.5　Size distribution (a) and area fraction histogram (b) of M/A island in forging stock and water quenching preheated steel after austenitizing and isothermal quenching treatment



(a) 锻坯　　(b) 水淬预处理钢

图 6　奥氏体化+等温淬火处理后锻坯和水淬预处理钢的 TEM 形貌

Fig.6　TEM morphology of forging stock (a) and water quenching pretreated steel (b) after austenitizing and isothermal quenching

由图 7 可见，奥氏体化+等温淬火处理后，锻坯和水淬预处理钢均主要由 α+γ 相组成。根据文献[13]的方法计算得到锻坯和水淬预处理钢中残余奥氏体体积分数分别为 9.2%和 8.5%。由此可见，水淬预处理不会改变等温淬火后轴承钢的物相组成，但会减小残余奥氏体体积分数。这可能是因为水淬预处理细化了奥氏体晶粒，使得等温淬火过程中更多的奥氏体转变为二次马氏体而减少了残余奥氏体含量[14]。

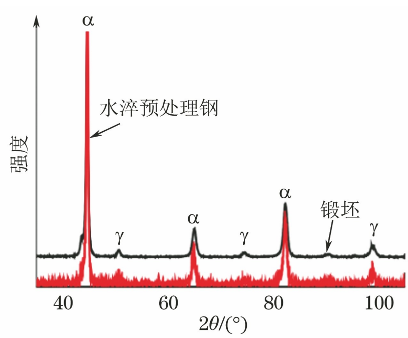


图 7　奥氏体化+等温淬火处理后锻坯和水淬预处理钢的 XRD 谱

Fig.7　XRD patterns of forging stock and water quenching pretreated steel after austenitizing and isothermal quenching

2.2　力学性能

由图 8 和表 2 可知，奥氏体化+等温淬火处理后，水淬预处理钢的抗拉强度和屈服强度较锻坯分别提高了 8.68%和 17.07%，但两者的断后伸长率相近。此外，水淬预处理钢的冲击功也高于锻坯。由此可见，水淬预处理有助于提高等温淬火态轴承钢的室温强度和冲击韧性，但对断后伸长率的影响不大。

轴承钢锻坯的显微组织为珠光体+铁素体，经过水淬预处理后转变为马氏体+少量铁素体，且晶粒尺寸较小。晶粒细化可以提升材料的屈服强度[15]，

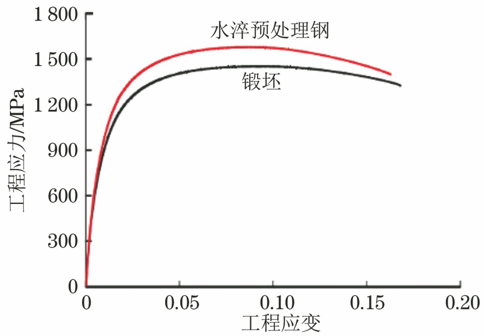


图 8　奥氏体化＋等温淬火处理后轴承钢的工程应力-工程应变曲线

Fig. 8　Engineering stress-engineering strain curves of bearing steel after austenitizing and isothermal quenching

表 2　奥氏体化＋等温淬火处理后轴承钢的室温力学性能

Table 2　Room temperature mechanical properties of bearing steel after austenitizing and isothermal quenching

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	冲击功/(J·cm^{-2})
锻坯	703±5	1 463±4	17.9±0.2	80±5
水淬预处理钢	823±6	1 589±5	17.5±0.3	97±5

且塑性变形能分散到更多晶粒内，从而提高塑性和韧性[16]。与锻坯相比，奥氏体化＋等温淬火处理后水淬预处理钢中的贝氏体板条束更短，残余奥氏体体积分数略有减少。由于无碳化物贝氏体中的贝氏体板条束相当于有效晶粒[17]，因此水淬预处理钢的强度增大，而断后伸长率基本不变。此外，水淬预处理钢中 M/A 岛的数量更多且尺寸更小，贝氏体板条束更短，晶粒更加细小，裂纹扩展阻力相对更大[18]，并且裂纹扩展至晶界时消耗的能量更多[19]，因此，淬火预处理钢的冲击韧性提高。

3　结　论

(1) 轴承钢锻坯的显微组织为珠光体＋铁素体，水淬预处理后的显微组织为马氏体＋少量铁素体；经过奥氏体化处理后，锻坯和水淬预处理钢的平均晶粒尺寸分别为 35.7，8.7 μm。

(2) 奥氏体化＋等温淬火处理后，锻坯和水淬预处理钢中均出现了细长贝氏体板条束和块状 M/A 岛，水淬预处理钢中的贝氏体板条束更细小，M/A 岛数量更多且尺寸更小。

(3) 奥氏体化＋等温淬火处理后，水淬预处理钢的抗拉强度和屈服强度较锻坯分别提高了 8.68%和 17.07%，两者的断后伸长率相近；水淬预处理钢的冲击功也高于锻坯。

参考文献：

[1] 王坤，胡锋，周雯，等. 轴承钢研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金，2020，30(9)：119-128.
WANG K, HU F, ZHOU W, et al. Research status and development trend of bearing steel[J]. China Metallurgy, 2020, 30(9): 119-128.

[2] FANG H S, GAO G H, ZHENG Y K, et al. The development of Mn-series air-cooled and water-quenched bainitic steels in China[J]. Materials Science Forum, 2010, 654/655/656: 57-61.

[3] 朱祖昌，杨弋涛，许雯. 第一、二、三代轴承钢及其热处理技术的研究进展(十)[J]. 热处理技术与装备，2020，41(4)：67-74.
ZHU Z C, YANG Y T, XU W. Research progress of the first, second and third generation bearing steel and its heat treatment technology (X)[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2020, 41(4): 67-74.

[4] BANIS A, BOUZOUNI M, GAVALAS E, et al. The formation of a mixed martensitic/bainitic microstructure and the retainment of austenite in a medium-carbon steel during ultra-fast heating[J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101994.

[5] 蔡锋，田俊羽，胡海江，等. AM 对低碳贝氏体钢等温相变和显微组织的影响[J]. 钢铁研究学报，2022，34(4)：380-387.
CAI F, TIAN J Y, HU H J, et al. Effect of AM on isothermal transformation and microstructure of low carbon bainite steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(4): 380-387.

[6] LIU N, CHENG G, ZHANG L F, et al. Composition evolution and deformation of different non-metallic inclusions in a bearing steel during hot rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(4): 552-562.

[7] 孙小东，王云广，王红伟，等. 高淬透性轴承钢等温淬火工艺研究[J]. 热处理技术与装备，2020，41(4)：27-29.
SUN X D, WANG Y G, WANG H W, et al. Research on isothermal quenching of high hardenability bearing steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2020, 41(4): 27-29.

[8] LONG X Y, ZHAO G C, ZHANG F C, et al. Evolution of tensile properties with transformation temperature in medium-carbon carbide-free bainitic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 775: 138964.

[9] ZHAO J, WANG T S, LYU B, et al. Microstructures and mechanical properties of a modified high-C-Cr bearing steel with nano-scaled bainite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 628: 327-331.

[10] FRANCESCHI M, MIOTTI BETTANINI A, PEZZATO L, et al. Effect of multi-step austempering treatment on the microstructure and mechanical properties of a high silicon carbide-free bainitic steel with bimodal bainite distribution[J]. Metals, 2021, 11(12): 2055.

[11] TIAN J Y, XU G A, JIANG Z Y, et al. Effect of austenisation

temperature on bainite transformation below martensite starting temperature[J]. Materials Science and Technology, 2019,35(13):1539-1550.
[12] ZHAO L J, QIAN L H, ZHOU Q A, et al. The combining effects of ausforming and below-M_s or above-M_s austempering on the transformation kinetics, microstructure and mechanical properties of low-carbon bainitic steel[J]. Materials & Design, 2019, 183:108123.
[13] ZHAO L J, QIAN L H, LIU S A, et al. Producing superfine low-carbon bainitic structure through a new combined thermo-mechanical process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685:300-303.
[14] 田亚强,张明山,董福涛,等. 低碳钢淬火等温碳配分中粒状贝氏体组织演变及性能[J]. 钢铁研究学报,2017,29(5):420-424.
TIAN Y Q, ZHANG M S, DONG F T, et al. Granular bainite microstructure evolution and mechanical properties of low carbon steel in quenching isothermal carbon partition process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(5): 420-424.
[15] 武会宾,巨彪,车英建. 等温温度对超细贝氏体钢组织演变规律的影响[J]. 工程科学学报,2016,38(12):1741-1746.
WU H B, JU B, CHE Y J. Effect of austempering temperature on the microstructure evolution of ultrafine bainite steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38 (12):1741-1746.
[16] LI Z Y, LI P F, LUO Y, et al. Effect of austenitizing temperature and prior martensite on ultra-fine bainite transformation kinetics[J]. Metals, 2019, 9(12):1309.
[17] ZHOU Y T, HOJO T, KOYAMA M, et al. Effect of austempering treatment on the microstructure and mechanical properties of 0.4C-1.5Si-1.5Mn TRIP-aided bainitic ferrite steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 819: 141479.
[18] 姚春霞,蓝慧芳,杜林秀. 等温淬火工艺对超高强贝氏体钢组织性能影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(7):948-951.
YAO C X, LAN H F, DU L X. Effect of austempering process on microstructure and mechanical property of ultra-high strength bainitic steel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(7):948-951.
[19] LIU E Z, LI Q G, NASEEM S, et al. Effect of isothermal transformation times below M_s and tempering on strength and toughness of low-temperature bainite in 0.53 C bainitic steel[J]. Materials, 2020, 13(10):2418.

(上接第 44 页)

[9] CAO F J, CHEN S J, DU C C. Investigation of hot-wire TIG welding based on the heat-conduction[J]. Energy Procedia, 2018, 144:9-15.
[10] PAI A, SOGALAD I, BASAVARAJAPPA S, et al. Assessment of impact strength of welds produced by cold wire and hot wire gas tungsten arc welding (GTAW) processes[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 983-994.
[11] 李挺,黄健康,陈秀娟,等. 旁路耦合微束等离子弧焊熔滴过渡特性分析[J]. 热加工工艺,2018,47(5):182-185.
LI T, HUANG J K, CHEN X J, et al. Analysis of droplet transfer characteristics in bypass double-electrode micro-plasma arc welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (5):182-185.
[12] 刘海华,赵淘,张志臣,等. 横向稳态磁场作用下微束等离子电弧数值分析[J]. 材料科学与工艺,2021,29(1):59-65.
LIU H H, ZHAO T, ZHANG Z C, et al. Numerical analysis of micro-plasma arc under the action of transverse steady state magnetic field[J]. Materials Science and Technology, 2021, 29(1):59-65.
[13] 张孟良,汤文博,李百奇,等. 等离子熔覆添加和内生联合 WC 颗粒增强铁基涂层的组织和性能[J]. 金属热处理,2022,47(2):200-205.
ZHANG M L, TANG W B, LI B Q, et al. Microstructure and properties of additional and in situ synthesized WC particle reinforced iron-based coatings prepared by plasma cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2):200-205.
[14] 张洋,宋博瀚,薛峰. 稀释率对镍基合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光,2016,36(3):259-264.
ZHANG Y, SONG B H, XUE F. Influence of dilution on microstructure and properties in Ni based laser clad coating [J]. Applied Laser, 2016, 36(3):259-264.
[15] 王署光,石拓,傅戈雁,等. 激光内送粉高速熔覆 Cr50Ni 合金稀释率及单道形貌分析[J]. 表面技术,2020,49(7):311-318.
WANG S G, SHI T, FU G Y, et al. Analysis of dilution rate and single channel morphology of high-speed cladding Cr50Ni alloy by laser inside-beam powder feeding process[J]. Surface Technology, 2020, 49(7):311-318.