

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240048

超细晶铁素体-珠光体层状结构 中碳钢微观组织与力学性能

韦浩¹, 张阳¹, 徐晓宁¹, 叶其斌²

(1. 东北大学 数字钢铁全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 江苏 张家港 215625)

摘要: 采用两相区温轧工艺, 在0.41%C中碳钢中获得超细晶铁素体-珠光体层状微观结构. 利用扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、准静态拉伸和系列低温冲击试验, 对比分析3种不同温度(770, 800和830 °C)温轧钢板的微观组织与力学性能. 结果表明, 770, 800和830 °C温轧钢板的铁素体平均晶粒尺寸分别为0.82, 0.89和1.14 μm; 珠光体层比例分别为16.4%, 36.2%, 43.5%, 尺寸分别为0.9, 1.3, 1.8 μm; 屈服强度分别为(696±3), (733±7)和(776±5)MPa; 断后伸长率分别为16.5%, 16.1%和13.8%; -60 °C冲击功分别为119, 114和89 J. 通过两相区不同温度温轧, 可以改变中碳钢层状结构中超细晶铁素体-珠光体比例与尺寸, 显著改善了高珠光体含量中碳钢的低温冲击韧性, 实现强度、塑性与低温冲击性能的协同调控.

关键词: 中碳钢; 两相区温轧; 超细晶; 层状组织; 强度; 低温韧性

中图分类号: TG 142.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)09-0081-06

Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel with Ultrafine-Grained Ferrite-Pearlite Lamellar Structure

WEI Hao¹, ZHANG Yang¹, XU Xiao-ning¹, YE Qi-bin²

(1. State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Research of Iron & Steel, Shagang, Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625, China. Corresponding author: YE Qi-bin, E-mail: qibinye@hotmail.com)

Abstract: Using the warm rolling process in the two-phase region, ultrafine-grained ferrite-pearlite lamellar microstructures were obtained in a 0.41%C medium carbon steel. The microstructures and mechanical properties of the warm rolled steel sheets were characterized using scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), quasi-static tensile tests, and a series of low-temperature impact tests at three different temperatures (770, 800 and 830 °C) for comparative analysis. The results reveal that in the steel sheets rolled at temperatures of 770, 800, and 830 °C, the average grain size of ferrite is measured to be 0.82, 0.89, and 1.14 μm, the proportion of pearlite is 16.4%, 36.2%, 43.5%, with the size of 0.9, 1.3, 1.8 μm, respectively. Furthermore, the yield strength is (696±3), (733±7) and (776±5) MPa, the elongation after fracture is 16.5%, 16.1% and 13.8%, and the impact energy at -60 °C is 119, 114, and 89 J, respectively. The proportion and size of ultrafine-grained ferrite-pearlite in the lamellar structure of medium carbon steel can be changed by warm rolling at different temperatures in the two-phase region. As a result, a remarkable improvement in the low-temperature impact toughness of the medium carbon steel with high pearlite content is achieved. This leads to a synergistic enhancement of strength, ductility, and low-temperature impact toughness.

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 姑苏创新创业领军人才计划项目(ZXL2023243).

作者简介: 韦浩(1996—), 男, 黑龙江绥化人, 东北大学硕士研究生; 叶其斌(1977—), 男, 福建南平人, 江苏省(沙钢)钢铁研究院高级研究员.

Key words: medium carbon steel; warm rolling in two-phase region; ultrafine-grained; lamellar structure; strength; low-temperature toughness

中碳钢具有优异的强度、硬度和耐磨性,在机械结构、工模具、耐磨件、防弹等领域有广泛的应用^[1].随着工程应用技术的发展需求,对中碳钢的综合性能要求也在不断提高.如E级系列耐磨钢,不仅要求高硬度,例如NM400E硬度不低于400 HBW,还要求-40℃冲击功和冷弯性能^[2-3].用于机械吊臂的1200 MPa级超高强工程机械用钢,则要求具备良好的折弯性能^[4-5].中碳钢对强度、塑性和韧性的综合性能要求给其生产带来了新的技术挑战.优化常规生产工艺参数,如提高回火温度,可以提升塑性和韧性,但会显著降低强度和硬度.

在诸多强韧化机理中,只有晶粒细化可以有效提高材料的强度和硬度,同时改善塑性和韧性,因此一直受到广泛关注^[6-9].目前,制备超细晶钢的方法主要可分为两类:一类是通过大塑性变形,如等通道角挤压(ECAP)、高压扭转(HPT)、累积叠轧焊(ARB)等^[10-11];另一类则依赖于先进的形变热处理技术,包括双相区热轧、铁素体动态再结晶与回复处理、马氏体的冷/温轧以及动态相变技术等^[12-13].Hanamura等^[14]研究发现,将285 MPa级别JIS-SM490普碳钢铁素体晶粒尺寸细化到平均2.7 μm时,屈服强度可以提高到536 MPa,与淬火-回火态的548 MPa相当;而夏比冲击韧脆转变温度(DBTT)则低至-113℃,远低于淬火-回火态的-33℃.但是,受到低变形温度和大变形量制备工艺的制约,以往超细晶钢的研究主要集中在低碳钢领域.

本文将超细晶钢制备方法拓展应用于0.41%C中碳钢.以淬火马氏体为初始组织材料,采用两相区温轧工艺解决中碳钢难变形的问題,获得超细晶铁素体-珠光体的层状结构,通过对比研究温轧温度对超细晶层状微观组织特征、拉伸性能及加工硬化行为和低温冲击性能的影响,为开发更高强度、更好塑性和更优低温韧性的中碳超细晶钢提供新的技术思路.

1 实验材料和方法

本研究所用中碳钢主要化学成分(质量分数)为0.41C-1.51Si-1.03Mn-0.52Mo-1.5Al,经真空感应炉熔炼后浇铸成钢锭,先锻造成120 mm×120 mm×360 mm(宽×厚×长)尺寸坯样,随后切成

120 mm×120 mm×80 mm(宽×厚×长)的小方坯以便进行后续轧制试验.为了确定实验钢两相区温度,从钢坯上取φ5 mm×10 mm圆柱试样,在DIL805热膨胀相变仪测得奥氏体转变开始温度 A_{c1} 为763℃、转变终止温度 A_{c3} 为856℃,加热速率为5℃/min,加热到1000℃保温180 s后降温.测得两相区温度后,将3块小方坯在1200℃保温2 h后,在φ450 mm两辊异步轧机经7道次粗轧,从120 mm厚度轧到60 mm厚度的中间坯,然后水冷直接淬火至室温,标注为DQ.将3块水淬中间坯分别加热到两相区的770,800和830℃并保温1 h,通过9道次轧制得到11 mm厚钢板,并空冷至室温.轧制工艺路线示意图如图1所示,将这3块钢分别标注为WA770,WA800和WA830,用RD,ND和TD表示轧向、厚向和宽向.

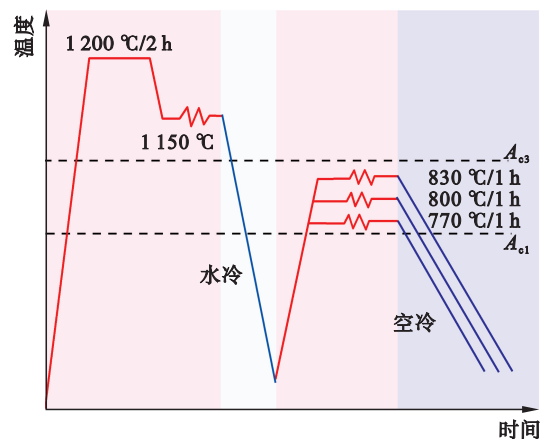


图1 中碳超细晶钢轧制工艺示意图

Fig. 1 Schematic illustration of rolling process for ultrafine-grained medium carbon steel

用电火花线切割在钢板1/4宽度和1/4厚度位置取RD-ND截面试样,按金相试样制备标准方法进行研磨和机械抛光处理,并用4%硝酸酒精溶液腐蚀.样品在Olympus光学显微镜(OM)和ZEISS Ultra55场发射扫描电子显微镜(SEM)下观察.为了获得晶界角度等晶体学特征,电子背散射衍射(EBSD)试样经过机械抛光和电解抛光后,在ZEISS Crossbeam 550场发射扫描电子显微镜下进行EBSD表征,加速电压为20 kV,扫描步长为0.05 μm.

拉伸试样总长为110 mm、标距横截面为6 mm×2 mm、标距长度为20 mm,在AI-7000LA10电子万能拉伸试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速

率为2 mm/min.夏比冲击试验采用标准的10 mm×10 mm×55 mm全尺寸纵向试样,V型缺口位于厚度方向,在美特斯ZBC2452-B摆锤式冲击试验机上进行0℃至-60℃系列低温冲击试验,每个温度重复3组试验,取平均值.

2 结果与分析

2.1 微观组织特征

图2为一次轧制后直接淬火与在两相区770,800和830℃温轧钢板试样的OM显微组织照片.轧后直接淬火钢板的微观组织由两相组成,主要是板条马氏体以及少量铁素体.轧后的铁素体并无明显拉长,其晶界可以观察到清晰的直边和棱角,分散分布在原始奥氏体晶界上,晶粒尺寸为5~7 μm,占比约为31%.而经过不同两相区温度温轧后,钢板微观组织则呈现层状结构特征,铁素体沿轧制方向被明显拉长,组织为长条状铁素体和珠光体交替分布.WA770钢中铁素体和珠光体层宽度较细,而随着温轧温度升高,铁素体层和珠光体层的宽度明显增大,珠光体比例也逐渐增大.在WA800钢和WA830钢中,珠光体的体积分数分别达到36.2%和43.5%.由于温轧钢板的铁素体晶粒较细,金相制样后并没有腐蚀出明显的晶界,在光学显微镜下无法分辨,需用SEM进一步分析.

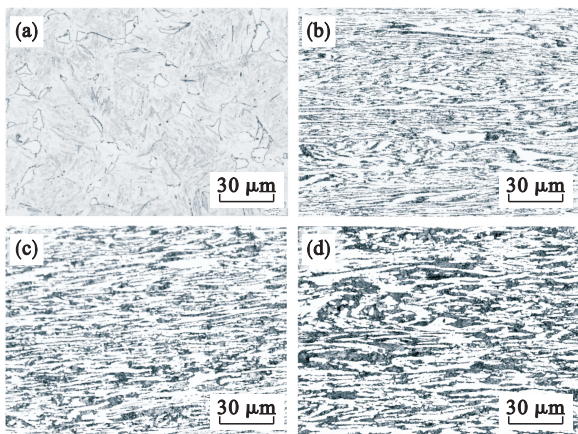


图2 直接淬火态和不同温度温轧钢板试样光学显微组织

Fig. 2 Optical micrographs of steel sheet samples in direct-quenched and warm-rolled states at various temperatures

(a)—DQ; (b)—WA770; (c)—WA800; (d)—WA830.

图3为轧后直接淬火和3个温度温轧钢板的SEM显微图像.通过SEM显微图像,可以详细地

观察到不同处理条件下钢板显微组织的变化.淬火试样中马氏体具有明显的板条特征,而相邻铁素体具有弯曲和直边界面,端部尖锐,这是典型的晶界型铁素体形貌.经过温轧处理的钢板,其组织呈现出不同的形貌:铁素体呈长条状,同一层铁素体晶界不明显.随着温轧温度升高,珠光体尺寸和比例也随之增加.WA770钢中珠光体层细小,大多位于铁素体层界面附近,平均宽度为0.9 μm,呈现典型的解离珠光体特征,由短杆甚至球状渗碳体组成,部分区域只有1条渗碳体.这表明在WA770钢的温轧过程中,珠光体的形成受到一定的限制,不能完全形成连续规则的层状结构.而WA800和WA830钢的珠光体层已具有明显的片层特征,平均片层间距分别为1.3和1.8 μm,这表明在较高温度下进行温轧和随后冷却过程中,能够形成更连续和规则的珠光体层状结构,珠光体转变比较充分.

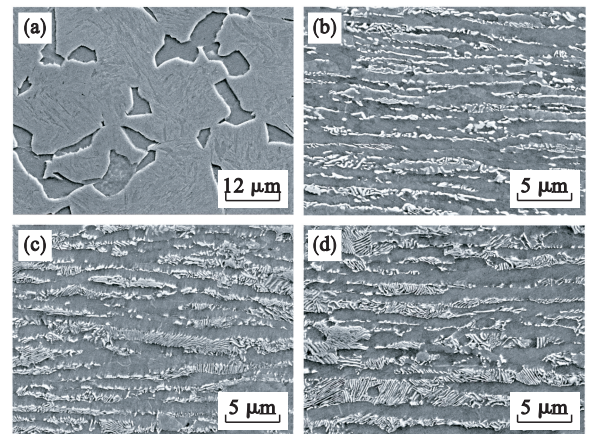


图3 直接淬火和不同亚温温轧钢板试样SEM图像
Fig. 3 SEM micrographs of direct-quenched and warm-rolled steel sheets at various subcritical temperatures

(a)—DQ; (b)—WA770; (c)—WA800; (d)—WA830.

图4显示了WA770,WA800和WA830钢的EBSD图像,与OM和SEM结果相对应,验证了OM和SEM观察到的层状超细晶显微结构特征.由于扫描步长分辨率的限制,珠光体中的渗碳体无法被识别,珠光体层和铁素体层均被识别为bcc相,因此晶界等结果存在一定偏差.红色线代表小角度晶界,取向差为2°~15°,蓝色线代表取向差大于15°的大角度晶界.从EBSD图像中可以看出,在WA770,WA800和WA830试样中15°以上大角度晶界的比例分别为61.8%,66.4%和74.9%,而KAM值和高KAM值线条密度则逐渐减小.从IPF图可知,同一层铁素体或珠光体相基本具有相同的晶体

取向. 而晶界图(图4d~图4f)显示,层间晶界为大角度晶界,一层宽度方向为一个晶粒,同一层内晶粒则多被小角度晶界分割呈竹节状,在对应

KAM图上呈现高密度位错特征.同时,也存在部分晶粒尺寸明显小于层宽的等轴超细晶粒.

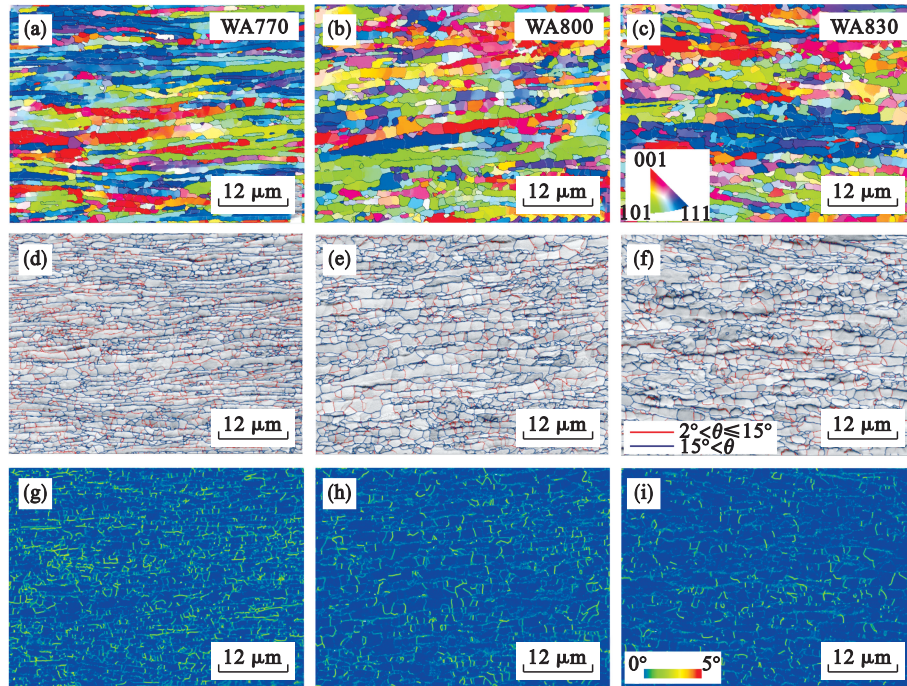


图4 WA770,WA800和WA830钢的IPF图、晶界图和KAM分布

Fig. 4 IPF micrographs, grain boundary maps and KAM distribution for WA770, WA800, and WA830 steels

(a)—IPF, WA770; (b)—IPF, WA800; (c)—IPF, WA830; (d)—晶体分布, WA770; (e)—晶体分布, WA800; (f)—晶体分布, WA830; (g)—KAM, WA770; (h)—KAM, WA800; (i)—KAM, WA830.

图5是基于EBSD数据结果对大角度晶界晶粒尺寸的统计.WA770,WA800和WA830钢的平均晶粒尺寸分别为0.82,0.89和1.16 μm .从晶粒统计结果可以看出,温轧温度越高,超细晶晶粒尺寸越大.同时显微组织观察表明,随着轧制温度升高,层状特征和高密度位错弱化,等轴铁素体晶粒增多,层宽度和晶粒尺寸增大.

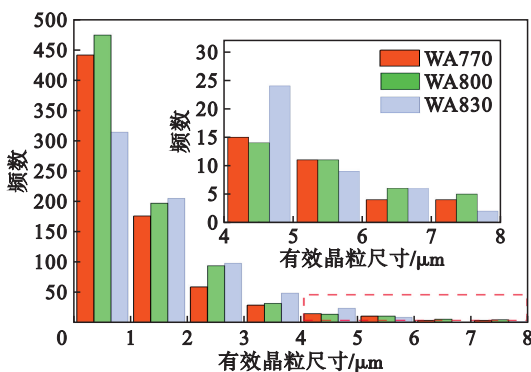


图5 WA770,WA800和WA830钢的晶粒尺寸分布

Fig. 5 Distribution of grain size of WA770, WA800, and WA830 steels

2.2 力学性能

图6为WA770,WA800和WA830钢试样的

拉伸工程应力-应变曲线及对应的加工硬化率-真应变曲线.可以看出,3种钢的拉伸曲线均存在明显的屈服平台,采用下屈服强度作为实验钢的屈服强度,WA770,WA800和WA830钢的屈服强度分别为 (696 ± 3) 、 (733 ± 7) 和 (776 ± 5) MPa,抗拉强度分别为 (881 ± 5) 、 (941 ± 2) 和 (975 ± 2) MPa,断后伸长率分别为16.5%、16.1%和13.8%.屈服强度和抗拉强度随温度升高而提高,延伸率则随之降低.

在加工硬化率-真应变曲线(图6b~图6e)中,可以区分出I,II和III阶段,分别对应拉伸过程中的弹性变形阶段、屈服阶段和应变强化阶段.可以看出,3种钢的加工硬化率在I阶段均急剧下降,但WA770和WA800钢的下降程度弱于WA830钢.在II阶段中,加工硬化率先平缓变化,到最后阶段显著上升并达到一个峰值,对应于拉伸过程的屈服阶段,其中WA770和WA800钢的变化程度小于WA830钢.最后III阶段从II阶段的峰值后开始逐渐平缓降低,对应于强化至抗拉强度的均匀延伸阶段.

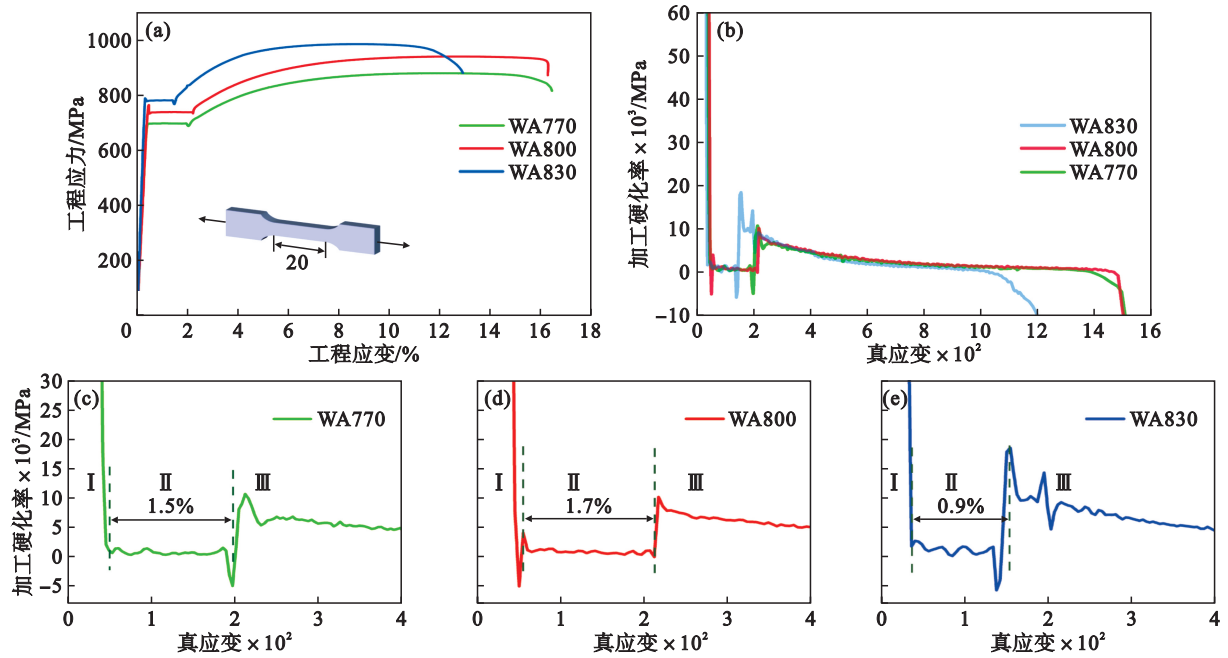


图6 WA770,WA800,WA830钢的拉伸及加工硬化率曲线

Fig. 6 Tensile and work hardening rate curves of WA770, WA800 and WA830 steels

(a)—工程应力-工程应变曲线; (b)~(e)—加工硬化率-真应变曲线.

图7显示了WA770, WA800和WA830钢的夏比冲击吸收功随试验温度的变化.3种钢均具有比较优异的低温冲击韧性,低温韧性随试验温度下降而平缓降低,在0至-60℃范围内均无明显韧脆转变.在试验温度范围内,WA770钢的冲击功最高,WA800钢次之,WA830钢最低,其中-60℃条件下平均冲击功分别为119,114和89 J.

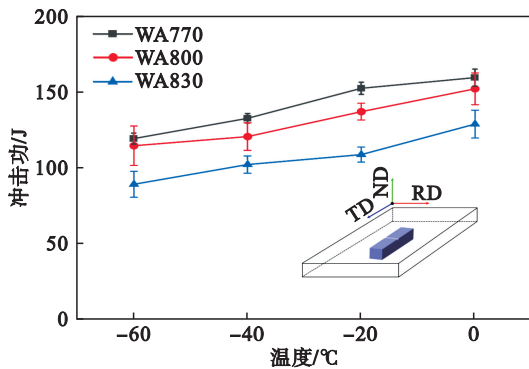


图7 WA770,WA800,WA830钢的冲击吸收功随温度的变化

Fig. 7 Variation of impact absorbed energy with temperature of WA770, WA800 and WA830 steels

3 分析与讨论

0.41%C中碳钢经过直接淬火和两相区温轧处理后,可以获得铁素体和珠光体交替排列的层

状超细晶组织.将淬火后钢板加热到两相区发生奥氏体转变,其奥氏体化程度随加热温度升高而增加,并在保温阶段不断富集C等元素.在后续两相区温轧过程中,铁素体和奥氏体沿轧制方向变形,并随着轧制道次增加变形位错.随着位错密度累积,铁素体区触发回复和再结晶,而奥氏体区由于高碳含量发生珠光体相变.回复机制保留了轧制方向变形铁素体的长条形状,位错移动在高畸变区域重新排列形成小角度晶界(见图4g~图4i)^[15],形成竹节状的长条超细晶铁素体层.同时,部分更大变形区域的铁素体则发生再结晶^[16],形成超细晶等轴铁素体晶粒(见图4d~图4f).而富碳奥氏体在轧制过程中也沿着轧制方向变形,形成奥氏体层,在冷却过程中发生珠光体相变.加热温度不同改变了两相区奥氏体比例,在轧制过程中通过回复与再结晶以及珠光体相变机制的变化,即可改变层状超细晶铁素体晶粒尺寸与珠光体比例,从而达到调控力学性能的目的.

WA770, WA800和WA830钢中铁素体晶粒尺寸和珠光体比例依次增加,决定了拉伸性能和低温冲击性能.因而强度的提高主要归因于珠光体含量的增加,抵消了铁素体晶粒粗化对强度降低的影响.而屈服平台对应铁素体的吕德斯带变形机制,在加工硬化率-真应变曲线中对应II阶段,其长度与铁素体比例有关.WA830钢中珠光体比例高达43.5%,层间距也更大,明显高于

WA800 和 WA770 钢,具有最高的屈服强度和抗拉强度.由于铁素体层中的位错受到更多珠光体层的阻碍,迅速提高了过屈服后的加工硬化率(如图 6e 所示),导致 WA830 钢的均匀延伸率和断后延伸率均最低.

3 种试验钢即使在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下冲击功也达到 80 J 以上(如图 7 所示),表明层状超细晶微观结构显著提高了中碳钢的低温冲击韧性,即使钢中含有高比例的珠光体^[17].WA770 钢由于珠光体含量少且尺寸细小,在低温冲击过程中裂纹启裂位置少,同时其高比例铁素体和超细晶粒吸收了更多裂纹扩展能量,因此具有最高的低温冲击功.

4 结 论

1) 0.41%C 中碳钢在 770, 800 和 830 $^{\circ}\text{C}$ 两相区温轧,通过铁素体回复、再结晶机制和珠光体相变机制,获得了尺寸和相比比例不同的层状超细晶铁素体-珠光体组织.WA770, WA800 和 WA830 钢中铁素体晶粒尺寸分别细化到平均 0.82, 0.89 和 1.16 μm , 珠光体比例分别为 16.4%, 36.2% 和 43.5%, 珠光体宽度分别为 0.9, 1.3 和 1.8 μm .

2) 温轧温度改变了层状超细晶铁素体与珠光体的尺寸和比例,实现了力学性能调控.随着珠光体含量与尺寸增加,WA770, WA800 和 WA830 钢的屈服强度分别为 696, 733 和 776 MPa, 抗拉强度分别为 881, 941 和 975 MPa, 但拉伸延伸率和低温冲击功下降.

3) 层状超细晶铁素体结构明显改善了高比例珠光体中碳钢的低温韧性.WA770, WA800 和 WA830 钢在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下冲击功分别达到 119, 114 和 89 J.

参考文献:

- [1] Jia N N, Guo K, He Y M, et al. A thermomechanical process to achieve mechanical properties comparable to those of quenched-tempered medium-C steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 700(17): 175-182.
- [2] 全国钢标准化技术委员会. 工程机械用高强度耐磨钢板和钢带 GB/T 24186—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
(National Steel Standardisation Technical Committee. High-strength wear-resistant steel plates and strips for construction machinery GB/T 24186—2022 [S]. Beijing: China Standard Press, 2022.)
- [3] 王昭东, 邓想涛, 曹艺, 等. 新型低成本超高强低合金耐磨钢研究及其工业化应用[J]. *钢铁*, 2010, 45(8): 61-64, 69.
(Wang Zhao-dong, Deng Xiang-tao, Cao Yi, et al. Development and industrial application of new low alloy abrasion steel with low cost and ultra-high strength[J]. *Iron & Steel*, 2010, 45(8): 61-64, 69.)
- [4] 郑东升, 范才河, 蹇海根, 等. 工程机械用超高强钢的弯曲性能及弯曲过程中的微观组织演变[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(3): 81-88.
(Zheng Dong-sheng, Fan Cai-he, Qian Hai-gen, et al. Bending properties and microstructure evolution during bending of ultra-high strength steel for construction machinery [J]. *Journal of Heat Treatment of Materials*, 2022, 43(3): 81-88.)
- [5] 蒋月月, 王昭东, 邓想涛. 铈对低合金超高强钢马氏体相变行为的影响[J]. *钢铁*, 2020, 55(6): 84-90.
(Jiang Yue-yue, Wang Zhao-dong, Deng Xiang-tao. Effect of trace rare earth Ce on martensitic transformation behavior of ultra-high strength low alloy steel [J]. *Iron & Steel*, 2020, 55(6): 84-90.)
- [6] Inoue T, Ueki R. Improvement of strength, toughness and ductility in ultrafine-grained low-carbon steel processed by warm bi-axial rolling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 786: 139415.
- [7] Song R, Ponge D, Raabe D, et al. Microstructure and crystallographic texture of an ultrafine grained C-Mn steel and their evolution during warm deformation and annealing [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(3): 845-858.
- [8] Mojtaba D, Fathallah Q, Mahdi G, et al. Effect of inter-cycle heat treatment in accumulative roll-bonding (ARB) process on planar isotropy of mechanical properties of AA1050 sheets [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(9): 2381-2393.
- [9] Ovid'ko I A, Valiev R Z, Zhu Y T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 462-540.
- [10] Shaeri M H, Shaeri M, Salehi M T, et al. Microstructure and texture evolution of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(5): 1367-1375.
- [11] Duan J Q, Quadir M Z, Xu W, et al. Texture balancing in a FCC/BCC multilayered composite produced by accumulative roll bonding [J]. *Acta Materialia*, 2017, 123: 11-23.
- [12] 苏元飞, 李慧杰, 徐晓宁, 等. 温轧对 DP590 钢层状超细晶双相组织与拉伸性能的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(3): 357-362, 369.
(Su Yuan-fei, Li Hui-jie, Xu Xiao-ning, et al. Effect of warm rolling on laminated ultra-fine grained dual-phase microstructure and tensile properties of DP590 steel [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(3): 357-362, 369.)
- [13] Zhao X, Yang X L. Ultrafine-grained steel produced by warm rolling and annealing of lath martensite [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 667/668/669: 863-866.
- [14] Hanamura T, Yin F, Nagai K. Ductile-brittle transition temperature of ultrafine ferrite/cementite microstructure in a low carbon steel controlled by effective grain size [J]. *ISIJ International*, 2004, 44(3): 610-617.
- [15] Zhou Y H, Xiao Y, Li R, et al. In situ investigation on plastic deformation behaviors in austenite-ferrite heterostructured stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857: 144111.
- [16] Zhao L J, Park N, Tian Y Z, et al. Dynamic transformation mechanism for producing ultrafine grained steels [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(7): 1701016.
- [17] Wang P F, Li Z D, Lin G B, et al. Influence of vanadium on the microstructure and mechanical properties of medium-carbon steels for wheels [J]. *Metals*, 2018, 8(12): 978.