

中碳伪共析钢在不同温轧温度下的组织与力学性能

侯冀腾, 曹 阔, 冯运莉

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 为了强化普碳钢的力学性能, 将经预处理后为伪共析组织的 45 钢, 在不同温度 (450、550 和 650 °C) 下温轧。利用扫描电镜、电子背散射衍射分析技术和拉伸试验的方法, 研究中碳伪共析钢在温轧过程中的组织演变和力学性能。结果表明: 试验钢温轧后得到的铁素体与珠光体组织呈多尺度层状分布, 随着温轧温度的升高, 渗碳体片层逐渐熔断、球化、长大并且分布趋于均匀。当温轧温度从 450 °C 升高至 650 °C 后, 平均晶粒尺寸由 0.34 μm 增大至 0.59 μm , 抗拉强度由 1424 MPa 下降至 1013 MPa, 伸长率由 5.5% 升高至 7.0%。在 550 °C 温轧时强度和塑性达到最优组合, 强塑积最高, 为 8350 MPa · %。研究表明, 通过构筑多尺度层状异质结构, 可在一定程度上强化普碳钢的力学性能。

关键词: 中碳伪共析钢; 温轧; 多尺度层状异质结构; 组织演变; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.016

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0118-07

Microstructure and mechanical properties on medium carbon pseudo-eutectoid steel at different warm rolling temperatures

Hou Jiteng, Cao Kuo, Feng Yunli

(Metallurgical Energy Source Academy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to strengthen the mechanical properties of plain carbon steel, 45 steel with pseudo-eutectoid structure after pretreatment was warm rolled at different temperatures (450, 550 and 650 °C), and the microstructure evolution and mechanical properties of medium carbon pseudo-eutectoid steel during the warm rolling process were studied by means of scanning electron microscope, electron backscattered diffraction analysis and tensile test. The results show that the microstructure of ferrite and pearlite obtained after the warm rolling of test steel is multi-scale layered distribution. With the increasing of warm rolling temperature, the cementite lamellae gradually fuses, spheroidizes, grows up and distributes evenly. When the warm rolling temperature increases from 450 °C to 650 °C, the average grain size increases from 0.34 μm to 0.59 μm , the tensile strength decreases from 1424 MPa to 1013 MPa, and the elongation increases from 5.5% to 7.0%. When the warm rolling temperature is 550 °C, the strength and plasticity achieve the optimal combination, and the product of strength and plasticity is the highest, which is 8350 MPa · %. This research results show that the mechanical properties of plain carbon steel can be strengthened to a certain extent by constructing multi-scale layered heterostructures.

Key words: medium carbon pseudo-eutectoid steel; warm rolling; multi-scale layered hetero structure; structural evolution; mechanical properties

近年来, 高强度低合金 (High Strength Low Alloy, HSLA) 钢由于具有优异的综合使用性能, 在汽车工业、船体设计和海洋工程中得到了广泛的应用^[1-3], 高强度低合金钢需添加价格昂贵的合金元

素且制造工艺复杂。在工业生产中普碳钢的制造成本较低, 但是综合力学性能还需进一步提升。为达到碳达峰、碳中和^[4]与绿色钢铁发展^[5]的目的, 调控普碳钢的组织使其达到低合金钢的性能指标已成为研究热点。异质结构的提出是受 Lu K^[6]的材料素化概念的启发以及新型高强汽车用钢生产研发和加工制备技术^[7-8]革新的影响, 在不改变材料本身化学组成的情况下, 通过调控微观组织结构, 实现强度与塑性的协同作用, 在保证强度提升的同时不以牺牲塑性作为代价, 以达成材料“素化”的目的。异质结构材料可以被分为层状结构^[9-13]、梯度结

收稿日期: 2023-08-18; 修订日期: 2023-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974134); 河北省科技重大专项 (21281008Z)

作者简介: 侯冀腾 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2286298336@qq.com

通信作者: 冯运莉 (1965-), 女, 博士, 教授

E-mail: tsfengyl@163.com

构^[14-18]、双/多相结构^[19-22]、谐波（核-壳）结构^[23-25]、多模态结构^[26-29]等。上述材料具有一个共同特征：不同区域之间的强度存在显著差异，而区域的大小和几何形状可能相差很大，具有典型的跨晶粒等级，软域和硬域的存在产生微观结构异质性^[30-31]。这些结构优异的力学性能是由异质结构强化引起的，因此，如何调控普碳钢微观结构并引入多尺度层状异质结构成为研究重点。

本文以含碳量（质量分数）为0.45%的普通中碳钢为试验材料，通过预处理获得伪共析组织，然后在不同温度下温轧获得多尺度层状异质结构，并结合扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope, SEM）、电子背散射衍射技术（Electron Backscattered Diffraction, EBSD）和拉伸试验探究温轧温度对微观组织与力学性能的影响规律。

1 试验材料与方法

试验材料采用的是工业热轧态45钢棒材，直径为 $\Phi 40$ mm。利用电火花线切割机在棒材上切割出尺寸为16 mm×16 mm×110 mm的长方体试样，用箱式电阻炉以 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加热速率随炉升温至870 $^{\circ}\text{C}$ ，保温45 min后，放入90 $^{\circ}\text{C}$ 的水中进行淬火处理，冷却速度约为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

将淬火后的试样放入设备型号为RX₄-85-13型的箱式加热炉中，分别加热至450、550和650 $^{\circ}\text{C}$ 后，对其保温15 min，随后进行温轧试验，每道次的压下量为20%，一共轧制8道次，轧后板厚为2.4 mm。利用电火花线切割机分别在初始试样、预处理后试样、温轧后试样上切取5 mm×3 mm×8 mm

（轧向RD×横向ND×法向TD）的试样，用砂纸研磨并抛光至镜面，用体积分数为4%的硝酸酒精溶液侵蚀样品表面。利用FEIQuanta-650FEG型场发射扫描电子显微镜观察试样表面。将试验样品研磨并电解抛光，电解液由80%乙醇、15%高氯酸、5%丙三醇（体积分数）组成，利用SEM和EBSD对试样的轧制方向进行扫描。最后将试样按照GB/T 228.1—2021^[32]沿轧制方向加工为骨型试样，试样尺寸如图1所示，并在电子万能拉伸试验机上进行拉伸速率为 $0.0075\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、应变速率为 $5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 的拉伸试验。

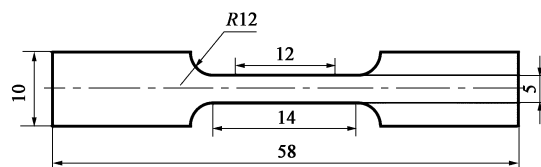


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Sizes of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 中碳钢初始态与淬火态的显微组织特征

图2a为中碳钢初始态的显微组织，图2b为中碳钢在90 $^{\circ}\text{C}$ 热水进行淬火处理后得到的伪共析组织的显微组织。中碳钢的初始态显微组织由56%珠光体和44%铁素体组成，经预处理后原始组织转变为伪共析组织，珠光体含量约为89%，先共析铁素体含量约为11%，铁素体含量显著下降，珠光体含量急剧增加。细条状先共析铁素体沿珠光体晶界分布，有利于在随后的轧制过程中随压下拉长形成层状结构，从而引入多尺度、多相结构^[33]。

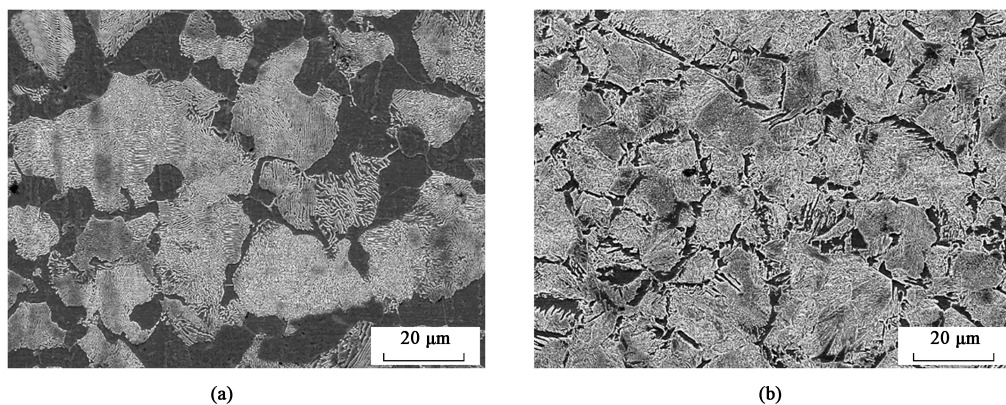


图2 中碳钢初始态 (a) 与淬火态 (b) 显微组织

Fig. 2 Microstructures of medium carbon steel in initial state (a) and quenched state (b)

2.2 轧制温度对组织演变的影响

图 3 为试验钢经不同温度 (450、550 和 650 °C) 温轧后的 SEM 图。不同温度温轧后的组织

均呈多尺度层状结构, 先共析铁素体在应力作用下沿轧制方向被不同程度地拉长, 渗碳体在轧制过程中产生了不同程度的弯曲、扭折, 部分被熔断、球化。

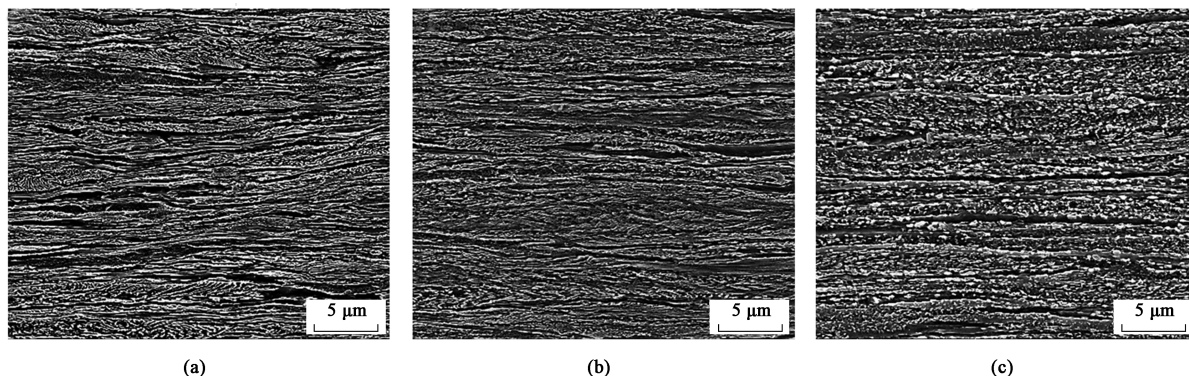


图 3 中碳伪共析钢在不同温度下温轧后的显微组织

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C

Fig. 3 Microstructures of medium carbon pseudo-eutectoid steel after warm rolling at different temperatures

在 450 °C 温轧时, 珠光体中的渗碳体片层大部分未发生熔断, 但也产生了不同程度的弯曲、扭折。与 450 °C 温轧相比, 550 °C 温轧后的渗碳体片层大部分被熔断为颗粒状或短棒状, 分布在原珠光体区。部分渗碳体片层在轧制变形过程中发生转动, 与轧制方向呈一定倾斜角度, 使得片层状渗碳体的稳定性增加。经 650 °C 温轧后, 渗碳体发生片层溶解、球化等行为, 几乎全部呈颗粒状分布。随着轧制温度的升高, 动态再结晶程度加深, 进而降低了缺陷密度, 使碳原子的溶解度下降, 碳在铁素体中析出, 形成细小的渗碳体, 弥散分布于铁素体基体上, 从而弱化了试验钢组织的层状分布情况。由此分析, 渗碳体的球化行为实质上是碳原子的扩散过程^[34], 碳原子沿位错通道扩散, 具有较低的扩散激活能和较高的频率^[35], 球化率的提升是因为随着轧制温度

的上升, 碳原子的扩散途径增多, 扩散速率升高^[36]。

在温轧过程中, 珠光体和铁素体的变形抗力不同, 导致变形不均匀, 从而呈现出明显的多尺度层状结构。随着轧制温度的升高, 显微组织变得更加均匀, 碳原子的扩散能力增大, 渗碳体更加弥散地分布于整个铁素体基体^[37]。

图 4 为不同温度温轧后的 EBSD 图, 图 5a~图 5c 为不同温度温轧后的晶粒尺寸分布图, 图 5d 为平均晶粒尺寸图。在 450 °C 温轧时, 部分先共析铁素体晶粒长大且呈长条状, 同时较高的轧制温度使得发生再结晶的铁素体晶粒增多, 形成层状结构。550 °C 温轧时, 先共析铁素体被拉长并变宽, 发生动态回复和动态再结晶的铁素体晶粒增多, 形成多尺度层状结构, 细晶与粗晶的分布形态呈双峰结构。

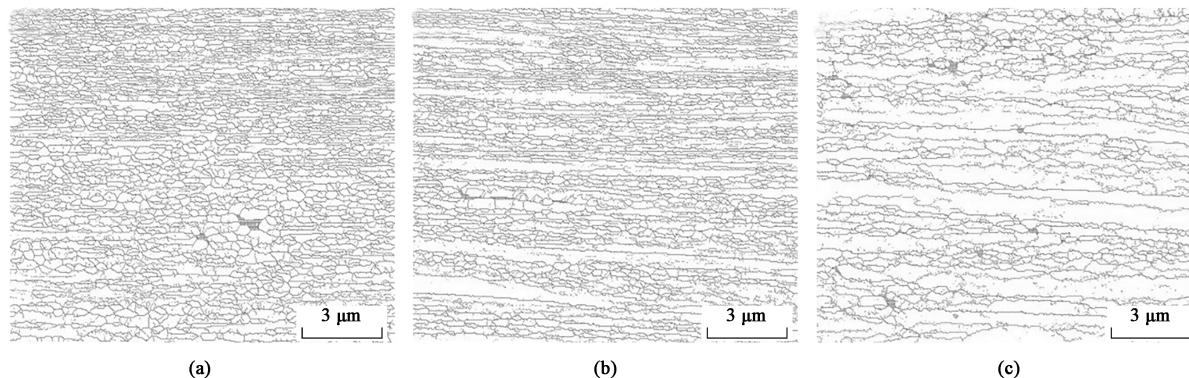


图 4 中碳伪共析钢在不同温度温轧后的 EBSD 图

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C

Fig. 4 EBSD images of medium carbon pseudo-eutectoid steel after warm rolling at different temperatures

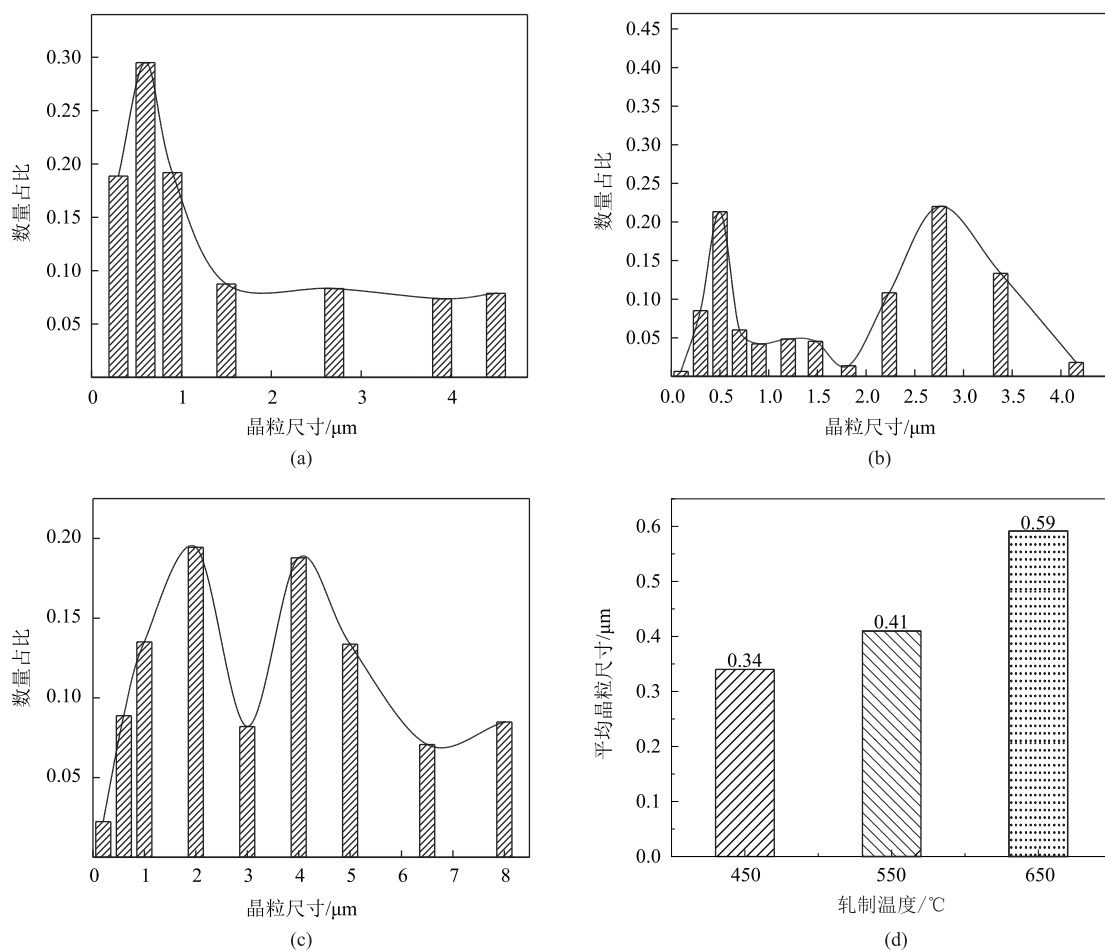


图5 中碳伪共析钢在不同温度温轧后的晶粒尺寸分布

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C (d) 平均晶粒尺寸

Fig. 5 Distributions of grain size for medium carbon pseudo-eutectoid steel after warm rolling at different temperatures

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C (d) Average grain size

650 °C温轧时,大部分铁素体发生明显的动态再结晶行为,晶粒尺寸显著增大,先共析铁素体在被拉长的同时明显加厚、变宽。温轧引起的组织变化是由位错生成、动态回复与再结晶、晶界迁移之间的动态竞争控制的,较大的轧制压下量为动态再结晶提供了更强的驱动力,随着温轧温度的上升,样品的再结晶程度增加,晶粒不断长大,但较大变形量导致位错钉扎晶界,阻碍铁素体的动态再结晶行为^[30],在两者共同作用下,晶粒呈现多尺度层状分布。

相较于450 °C,550 °C温轧后具有较多粗晶存在,同时细小晶粒仍然保持较多占比,且层状结构明显。650 °C温轧时动态再结晶明显,较多粗晶存在是引起材料强度下降的重要原因。从450~650 °C温轧,其平均晶粒尺寸分别为0.34、0.41和0.59 μm。在450 °C温轧的晶粒尺寸分布在0~5 μm,550 °C温轧的铁素体晶粒尺寸呈双峰分布,集中分布在0.1~1.0 μm和2.5~3.5 μm。

从图6可以看出,随着轧制温度的升高,大角度晶界($\theta \geq 15^\circ$,其中 θ 为晶界取向差)不断增多,小角度晶界($2^\circ \leq \theta < 15^\circ$)不断减少,这是因为随着轧制温度的升高,使得位错运动更加剧烈,形成位错墙,并不断地转化为亚晶,使得相邻晶粒之间的能量差变大,亚晶不断吸收能量长大,小角度晶界比例降低,随轧制温度的升高小角度晶界占比分别为61.2%、53.1%和49.8%,大角度晶界占比为38.8%、46.9%和50.2%。

由此分析可知,试验钢在550 °C温轧时未发生明显的动态再结晶行为,铁素体晶粒呈双峰结构且保有相对明显的多尺度双相层状结构。

2.3 力学性能

图7为试验钢经不同温度(450、550和650 °C)温轧的室温拉伸曲线图。表1列出了样品的力学性能,其中强塑积为抗拉强度与伸长率的乘积^[38],是一种反映金属材料强韧水平的综合指标,

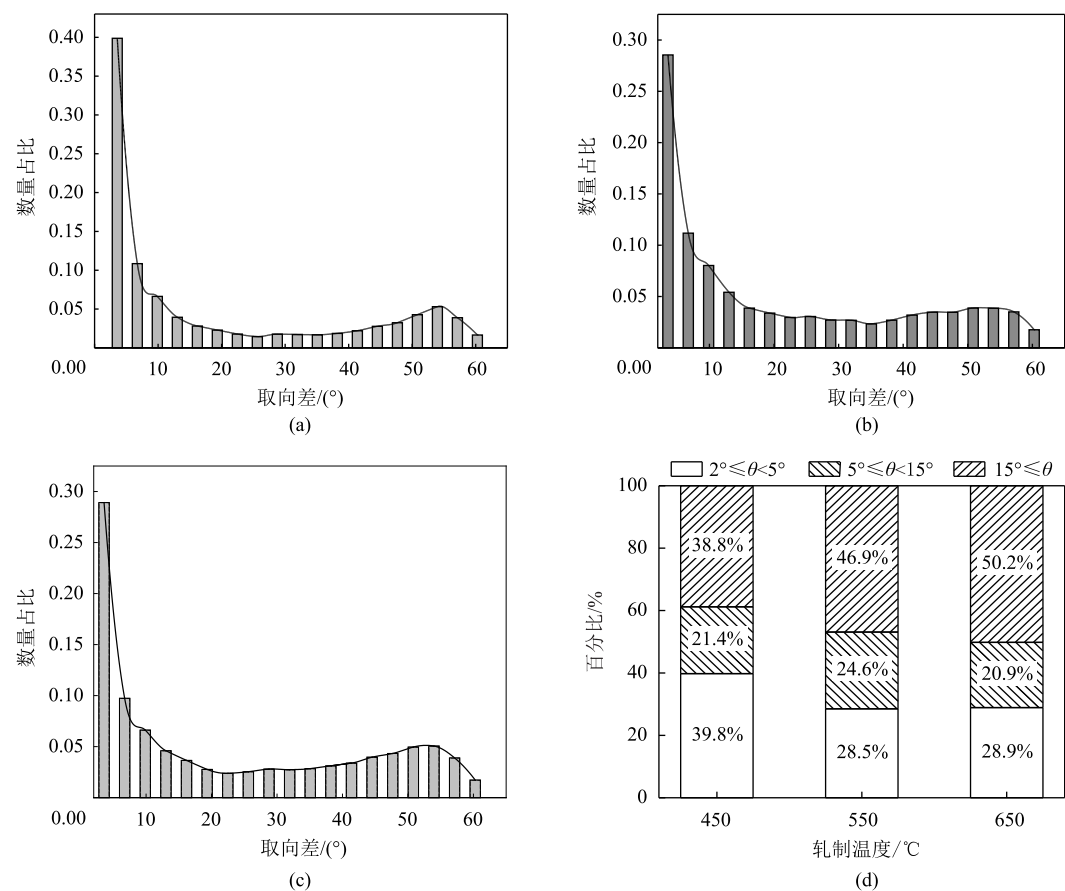


图 6 中碳伪共析钢在不同温度温轧后的取向差分布

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C (d) 晶界分布统计图

Fig. 6 Distributions of orientation difference for medium carbon pseudo-eutectoid steel after warm rolling at different temperatures

(a) 450 °C (b) 550 °C (c) 650 °C (d) Statistical diagram of grain boundary distribution

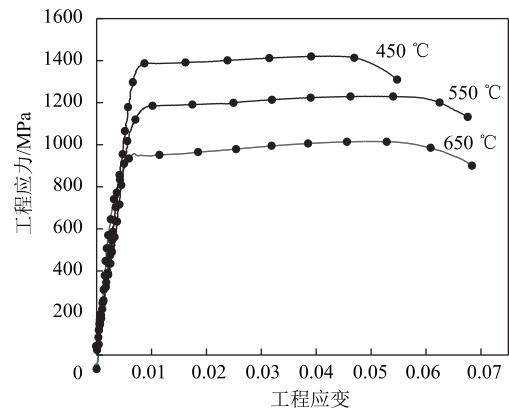


图 7 不同轧制温度下中碳伪共析钢的工程应力-工程应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-engineering strain curves of medium carbon pseudo-eutectoid steel at different rolling temperatures

与塑性正相关，其值越大则表示在变形过程中吸收的能量越大^[39-40]，不同温度温轧下的强塑积分别为 7832、8350 和 7091 MPa · %。

试验钢的强度随着温轧温度的升高逐渐降低，

表 1 不同温度温轧后中碳伪共析钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of medium carbon pseudo-eutectoid steels after warm rolling at different temperatures

温轧温度/ °C	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率/ %	强塑积/ (MPa · %)
450	1390	1424	5.5	7832
550	1178	1228	6.8	8350
650	958	1013	7.0	7091

而塑性随着温轧温度的升高逐渐增加。塑性的明显差异是由动态再结晶程度不同，铁素体晶粒的尺寸、分布和形态不同引起的。试验钢在 450 °C 温轧时，珠光体的变形抗力较大，片层结构完好，珠光体团的位向改变较小，随后在轧制过程中铁素体晶粒细化，所以 450 °C 温轧的试样强度较高。550 °C 温轧时，碳原子向铁素体扩散但未完全扩散，降低了对位错运动的阻力，使得位错缠结的形成更加困难，珠光体的变形抗力减小，部分铁素体显著长大，

力学性能上表现出强度下降不显著的同时伸长率升高。而 650 °C 温轧时,珠光体的变形抗力显著降低,铁素体发生显著的动态再结晶现象,晶粒长大明显,渗碳体几乎全部呈颗粒状分布,碳原子已发生明显的扩散现象,部分颗粒状渗碳体在铁素体中重新析出,接近球状,分布更加均匀,导致强度显著降低。

当温轧温度较低时,碳原子扩散驱动力不足,碳化物在晶界上聚集,以钉扎位错,使晶粒长大受限。温轧温度的升高使碳原子向铁素体晶内扩散的能力增强,位错运动使动态再结晶更加明显,粗晶占比增多,使材料软化,强度降低。

由此分析可知,在 550 °C 温轧时其层状结构相对明显,粗细晶的匹配效果良好,此时强塑积最高,为 8350 MPa·%,实现了强度与塑性的最优组合。

3 结论

(1) 随着轧制温度的上升,中碳伪共析钢中的珠光体的变形抗力降低,铁素体动态再结晶程度增加。在 450、550 和 650 °C 温轧时平均晶粒尺寸分别为 0.34、0.41 和 0.59 μm 。试验钢在 450 °C 温轧时晶粒尺寸较小且均匀分布,650 °C 温轧时其大部分晶粒发生动态再结晶,存在较多尺寸大于 5 μm 的晶粒,使强度显著降低。在 550 °C 温轧时有较大尺寸晶粒存在的同时细小晶粒占比未显著降低,晶粒尺寸集中分布在 0.1~1.0 μm 和 2.5~3.5 μm 两个区域,呈现出明显的双峰分布。试验钢在 550 °C 温轧时呈多尺度层状分布,力学性能较好。

(2) 试验钢随着轧制温度的升高,抗拉强度由 1424 MPa 下降至 1013 MPa,伸长率由 5.5% 升高至 7.0%,在 550 °C 时强度和塑性达到良好匹配,强塑积最高,为 8350 MPa·%,说明该温度为最佳轧制温度。

参考文献:

- [1] Lu J, Yu H, Yang S F. Mechanical behavior of multi-stage heat-treated HSLA steel based on examinations of microstructural evolution [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 803: 140493.
- [2] Pamnani R, Karthik V, Jayakumar T, et al. Evaluation of mechanical properties across micro alloyed HSLA steel weld joints using automated ball indentation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 214–223.
- [3] Lu J, Yu H, Duan X N, et al. Investigation of microstructural evolution and bainite transformation kinetics of multi-phase steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 774: 138868.
- [4] 顾恬玮, 彭建. 基于自然的碳达峰、碳中和解决方案: 关键议题 [J]. *生态学报*, 2023, 43 (9): 3384–3391.
Gu T W, Peng J. Nature-based solutions for carbon peaking and carbon neutrality goals: Key issues [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (9): 3384–3391.
- [5] 宛刚. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策 [J]. *化工管理*, 2018, (27): 108–109.
Yuan G. Engineering science and technology strategy and countermeasures for green development of China's iron and steel industry [J]. *Chemical Industry Management*, 2018, (27): 108–109.
- [6] Lu K. Stabilizing nanostructures in metals using grain and twin boundary architectures [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1 (5): 16019.
- [7] 韩刚. 多相组织高强度低合金钢纳米 Cu 析出相演化规律及其对强塑性影响的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
Han G. Study on the Evolution of Nano Cu Precipitates in High Strength Low Alloy Steel with Multiphase Structure and Its Effect on Strength and Plasticity [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [8] 李鹏飞. 高强度低合金钢织构形成及其对力学性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Li P F. Texture Formation and Its Effect on the Mechanical Properties of High Strength Low Alloy Steel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [9] Wu X L, Yang M X, Yuan F P, et al. Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112 (47): 14501–14505.
- [10] Zhu Y T, Wu X L. Perspective on hetero-deformation induced (HDI) hardening and back stress [J]. *Materials Research Letters*, 2019, 7 (10): 393–398.
- [11] Li Z K, Fang X T, Wang Y F, et al. Tuning heterostructures with powder metallurgy for high synergistic strengthening and hetero-deformation induced hardening [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 777: 139074.
- [12] Li Z K, Liu Y J, Wang Y F, et al. Hierarchical strain band formation and mechanical behavior of a heterostructured dual-phase material [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 162: 25–37.
- [13] Fang X T, He G Z, Zheng C, et al. Effect of heterostructure and hetero-deformation induced hardening on the strength and ductility of brass [J]. *Acta Materialia*, 2020, 186: 644–655.
- [14] Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients [J]. *Science*, 2014, 345: 1455–1456.
- [15] Wu X L, Jiang P, Chen L, et al. Extraordinary strain hardening

- by gradient structure [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111 (20): 7197-7201.
- [16] Wu X L, Jiang P, Chen L, et al. Synergetic strengthening by gradient structure [J]. Materials Research Letters, 2014, 2 (4): 185-191.
- [17] Fang T H, Li W L, Tao N R, et al. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper [J]. Science, 2011, 331 (6024): 1587-1590.
- [18] Chen A Y, Liu J B, Wang H T, et al. Gradient twinned 304 stainless steels for high strength and high ductility [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 667: 179-188.
- [19] Calcagnotto M, Adachi Y, Ponge D, et al. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging [J]. Acta Materialia, 2011, 59 (2): 658-670.
- [20] Li Z, Pradeep K G, Deng Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off [J]. Nature, 2016, 534 (7606): 227-230.
- [21] Park K, Nishiyama M, Nakada N, et al. Effect of the martensite distribution on the strain hardening and ductile fracture behaviors in dual-phase steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 604: 135-141.
- [22] 郭鹤, 张玉华. 基于 MMC 准则的双相高强度 HC820/1180DPD+Z 断裂失效模型分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 235-244.
- Guo H, Zhang Y H. Analysis on fracture failure model for dual-phase high-strength steel HC820/1180DPD+Z based on MMC criterion [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 235-244.
- [23] Sawangrat C, Kato S, Orlov D, et al. Harmonic-structured copper: Performance and proof of fabrication concept based on severe plastic deformation of powders [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49 (19): 6579-6585.
- [24] Zhang Z, Vajpai S K, Orlov D, et al. Improvement of mechanical properties in SUS304L steel through the control of bimodal microstructure characteristics [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 598: 106-113.
- [25] Vajpai S K, Ota M, Watanabe T, et al. The development of high performance Ti-6Al-4V alloy via a unique microstructural design with bimodal grain size distribution [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46 (2): 903-914.
- [26] Wang Y M, Chen M W, Zhou F H, et al. High tensile ductility in a nanostructured metal [J]. Nature, 2002, 419 (6910): 912-915.
- [27] Han B Q, Huang J Y, Zhu Y T, et al. Strain rate dependence of properties of cryomilled bimodal 5083 Al alloys [J]. Acta Materialia, 2006, 54 (11): 3015-3024.
- [28] Han B Q, Lavernia E J, Lee Z, et al. Deformation behavior of bimodal nanostructured 5083 Al alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36 (4): 957-965.
- [29] Zhao Y, Topping T, Bingert J F, et al. High tensile ductility and strength in bulk nanostructured nickel [J]. Advanced Materials, 2008, 20 (16): 3028-3033.
- [30] Zhang D, Zhang M, Cao K, et al. Effect of annealing time on microstructure stability and mechanical behavior of ferrite-cementite steel with multiscale lamellar structure [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52 (2): 1023-1033.
- [31] 喻昇双. 高强度低合金钢非均质组织调控及强韧性机理研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- Yu Y S. Mechanism of Heterogeneous Microstructure Regulation and Toughness of High-strength Low-alloy Steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [32] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [33] Zhang D M, Zhang M H, Lin R, et al. Strengthening and strain hardening mechanisms of a plain medium carbon steel by multiscale lamellar structures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 827: 142091.
- [34] Zhang S L, Sun X J, Dong H. Effect of deformation on the evolution of spheroidization for the ultra high carbon steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 432 (1): 324-332.
- [35] Tanaka K, Takamiya H, Iwata N, et al. Microstructure and bond strength of steels using low-Cr-substituted cementite foil [J]. ISIJ International, 2011, 51 (3): 423-428.
- [36] 李志杰. 碳素钢温塑性成形过程组织动态演变及力学行为研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- Li Z J. Study on Microstructure Dynamic Evolution and Mechanical Behavior of Carbon Steel During Thermoplastic Forming [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [37] 田亚强, 赵志浩, 杨子旋, 等. 温轧温度对中碳钢组织与力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (6): 19-25.
- Tian Y Q, Zhao Z H, Yang Z X, et al. Effect of warm rolling temperature on microstructure and mechanical properties of medium carbon steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (6): 19-25.
- [38] Ma E, Wu X L. Tailoring heterogeneities in high-entropy alloys to promote strength-ductility synergy [J]. Nature Communications, 2019, 10 (1): 5623.
- [39] Ning J L, Zhang Y T, Huang L, et al. Stabilized uniform deformation in a high-strength ferrite-cementite steel with multiscale lamellar structure [J]. Materials & Design, 2017, 120: 280-290.
- [40] Min X, Kimura Y, Kimura T, et al. Delamination toughening assisted by phosphorus in medium-carbon low-alloy steels with ultrafine elongated grain structures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 649: 135-145.