

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.009

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:李喜望,李昊,刘延辉.不同工艺参数下 Q235 低碳钢组织演变及性能分析[J].西安理工大学学报,2024,40(4):532-537.

LI Xiwang, LI Hao, LIU Yanhui. Microstructure evolution and property analysis of Q235 low carbon steel with process parameters[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 532-537.

不同工艺参数下 Q235 低碳钢组织演变及性能分析

李喜望¹, 李昊², 刘延辉²

(1. 西安安泰叶片技术有限公司, 陕西 西安 710021; 2. 陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为探究 Q235 低碳钢的不同微观组织形貌对其性能的影响, 利用拉伸试验机、光学显微镜研究了 Q235 低碳钢在不同拉伸工艺参数下的显微组织及力学性能。实验结果表明: 在应力作用下, 晶粒沿着变形方向逐渐被拉长, 低碳钢内部微观组织由等轴晶逐渐向纤维状转变; 同时由于变形产生了大量的位错和滑移带, 导致强度提高的同时塑性下降。材料的屈服强度和抗拉强度随着温度的升高而降低, 随着应变速率的增大而增大。当变形温度增加到 750 °C 以上时, 屈服强度的增加趋势有所减缓; 当变形温度为 800 °C, 应变速率为 0.001 s⁻¹ 时, 组织呈现出大量细小的等轴再结晶晶粒, Q235 低碳钢的塑性得到大幅提升。

关键词: 低碳钢; 高温拉伸; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG441.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2024)04-0532-06

Microstructure evolution and property analysis of Q235 low carbon steel with process parameters

LI Xiwang¹, LI Hao², LIU Yanhui²

(1. Xi'an Antai Blade Technology Co. Ltd, Xi'an 710021, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different microstructure morphologies on the properties of Q235 low carbon steel, the microstructure and mechanical properties of Q235 low carbon steel with different tensile parameters are studied by means of tensile testing machine and optical microscope. The experimental results show that the grain is elongated along the deformation direction and that the internal microstructure of the low carbon steel changes from equiaxed grain to fibrous shape. At the same time, due to the deformation, a large number of dislocation and slip zone are generated, leading to the increase of strength and the decrease of plasticity. The yield strength and tensile strength of the material decrease with increasing temperature, and they increase with the increase of strain rate. When the deformation temperature increases above 750 °C, the increase trend of yield strength slows down. When the deformation temperature is 800 °C and the strain rate is 0.001 s⁻¹, the microstructure shows a large number of fine equiaxed recrystallized grains, with the plasticity of Q235 low carbon steel greatly improved.

Key words: low carbon steel; high temperature tensile; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2024-03-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20240304.1032.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805308); 陕西省科技厅自然科学基金项目(2019JQ-303)

第一作者: 李喜望, 男, 学士, 中级工程师, 研究方向为航空航天发动机叶片精锻工艺。E-mail: 649819240@qq.com

通信作者: 刘延辉, 男, 博士, 副教授, 研究方向为航空航天材料高温变形行为及组织演变。E-mail: liuyanhu@ust.edu.cn

金属材料的强度、刚度与稳定性不仅与材料的形状、尺寸及所受的外力有关,而且与材料自身的组织及力学性能有关。材料的力学性能也称为机械性能,是指金属材料在外力作用下所表现出的变形、断裂等方面的特征。

低碳结构钢作为一种常用的结构材料,价格便宜、易加工,在工业生产领域应用广泛^[1-4]。低碳钢的微观组织以铁素体为主要相,也含有少量的珠光体相,其强度和硬度均较低,塑性、韧性较好。长期以来,为了研究钢材的高温变形参数对其组织及性能的影响,国内外学者针对碳钢、合金钢的高温热变形行为进行了大量研究^[5-11]。

现有关于 Q235 低碳钢的研究主要集中于其热变形行为、长期腐蚀行为对其性能的影响;而关于其热加工工艺和不同组织形貌对性能的影响规律尚待探究,因此,通过优化热加工工艺参数来获得理想的微观组织和综合性能具有重要的研究意义。

本文通过 UH-100GL 拉伸试验机对低碳钢进行不同工艺参数的高温拉伸实验,以获得其微观组织以及高温应力曲线,然后分析低碳钢在不同工艺参数下的组织对其性能的影响规律。

1 实验部分

实验所用原材料为 Q235 低碳钢。该合金的化学成分(质量分数)为:0.22% C、0.35% Si、1.40% Mn、0.045% P、0.05% S。从 Q235 低碳钢棒材上通过线切割机切取如图 1 所示的拉伸试样。将切取的拉伸试样表面线切割痕迹打磨后,通过 UH-100GL 拉伸试验机分别在变形温度为 650 °C、700 °C、750 °C、800 °C,应变速率为 0.001 s⁻¹、0.01 s⁻¹、0.1 s⁻¹、1 s⁻¹ 条件下对拉伸试样进行高温拉伸实验,以 10 °C/s 的速度将试样的温度升至变形温度,并且保温 5 min,在试样断裂之后,立刻进行水淬,以保留高温变形后的微观组织形貌。在观察金相时,以靠近断口处的表面显微组织为准。

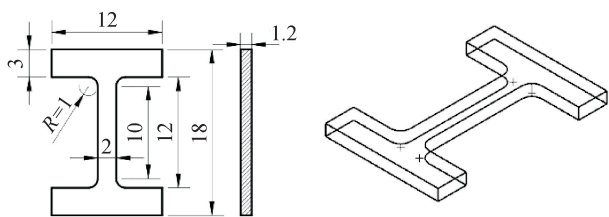


图 1 低碳钢拉伸试样尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Drawing of mild steel tensile specimen size(unit:mm)

对拉伸后的试样采取冷镶法(70% 环氧树脂+30% 固化剂)镶嵌。依次用 80 #、160 #、240 #、600 #、

800 #、1200 #、1500 #、2000 # 的砂纸对试样表面进行粗打磨并使划痕趋于一致。然后用 W1.5、W0.5 的研磨膏抛光。采用光学显微镜对抛光后不同工艺参数下拉伸试样表面的微观组织进行观察。显示金相组织所用的腐蚀剂为 7% HF+3% HNO₃+90% H₂O。

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线

真应力-真应变曲线直观地反映了流变应力与变形条件的相互关系,是材料塑性变形抗力随变形量变化的宏观表现^[12-14]。Q235 低碳钢在不同应变速率和变形温度下的真应力-真应变曲线如图 2 所示。对比分析不同应变速率和变形温度下的真应力-真应变曲线可以看出,试样存在明显的弹性阶段、加工硬化阶段以及动态软化阶段。随着应变速率和变形温度的改变,真应力-真应变曲线表现出不同的应力及应变变化趋势。

2.2 变形参数对微观组织的影响

低碳钢的微观组织是铁素体和少量珠光体。图 3、图 4、图 5、图 6 分别是应变速率一定时,不同变形温度的微观组织图。从图中可以直观地看到,随着温度升高,晶粒越来越细小。

在拉应力作用下,试样的显微结构从等轴向纤维转变,即沿拉伸方向延伸,同时在变形过程中会形成大量的位错和滑移,从而使材料的塑性降低、强度增加,也就是加工硬化。在持续的拉力作用下,试样的断面收缩越来越严重,直至出现颈部收缩,最后断裂。通过显微结构分析,发现除铁素体和珠光体外,在晶界上也存在着碳化物(Fe₃C)。从硬度上看,铁素体硬度低,碳化物硬度高,而珠光体是介于铁素体和碳化物之间的。在拉伸变形中,铁素体能起到协调和加速变形的作用,其次是珠光体,而碳化物颗粒是硬脆的,它不但容易产生脆性,而且还要求相邻的相位进行协调变形,以适应变形要求。结果表明,在拉伸变形期间,由于晶界上碳化物的存在,使晶界结合强度下降,且这种碳化物是长条形的,容易断裂,从而产生孔隙或微裂缝,使裂纹迅速扩大,最后造成试件断裂。在高温拉伸时,会形成与拉伸方向呈一定角度的滑动。在较高的温度下,拉伸变形引起的动态回复在 750 °C 以后,经拉伸变形后,珠光体中的渗碳体从薄层变为颗粒,即珠光体发生球化,铁素体和珠光体的内部滑移带消失,同时,在铁素体、珠光体的内部和晶界周围产生了动态再结晶,并且随着拉力的增大,晶界表面的碳化物周围会产生微小的裂纹或孔洞^[15]。

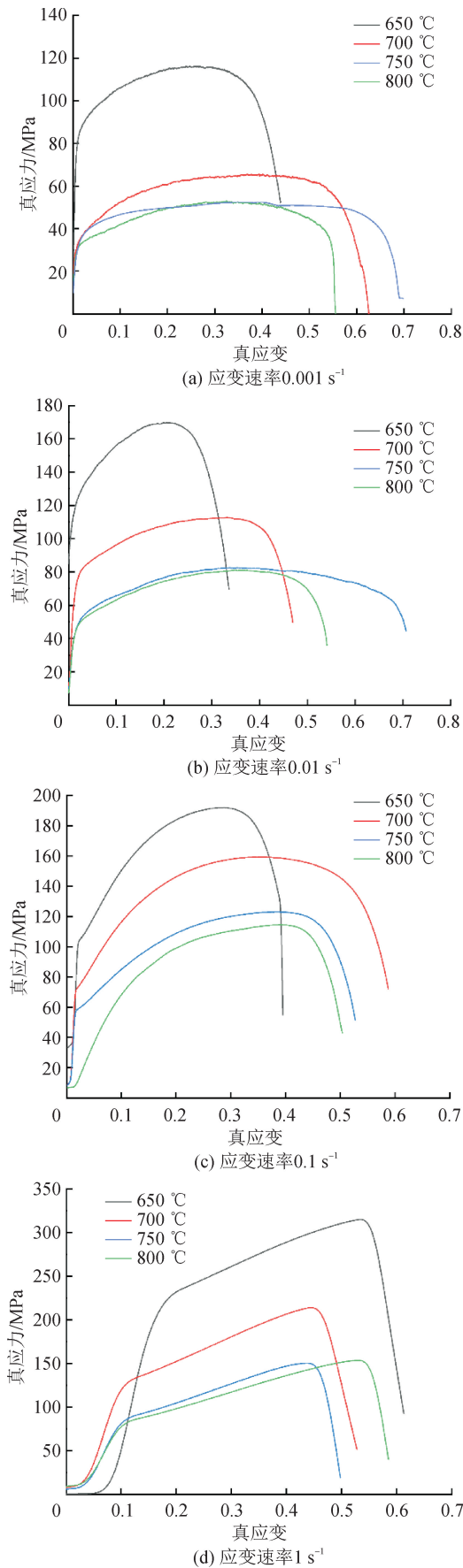


图2 Q235 低碳钢在不同工艺参数下的真应力-真应变曲线
Fig. 2 True stress-strain curves of Q235 mild steel with different process parameters

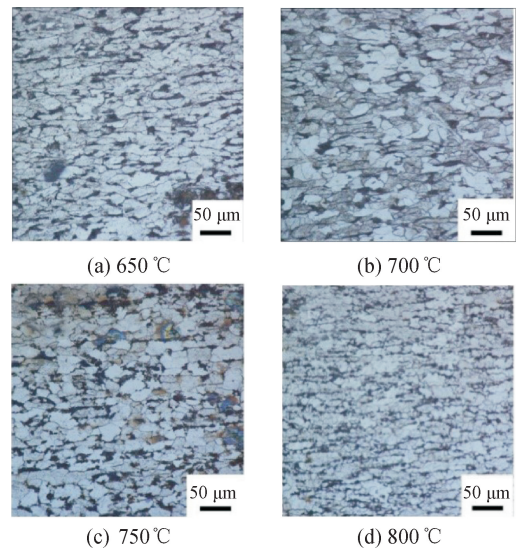


图3 应变速率为 1s^{-1} 时的微观组织
Fig. 3 Microstructure at strain rate of 1s^{-1}

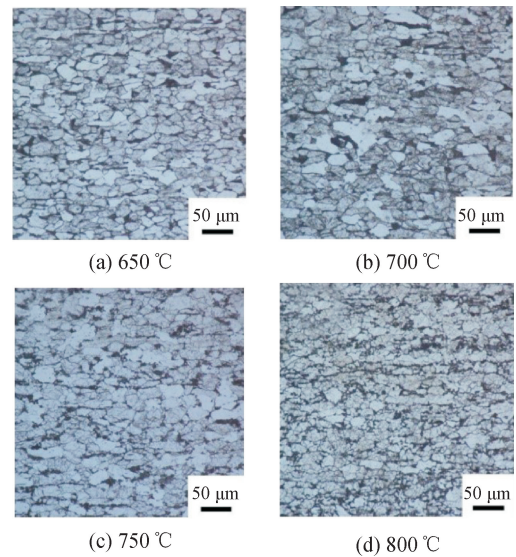


图4 应变速率为 0.1s^{-1} 时的微观组织
Fig. 4 Microstructure at strain rate of 0.1s^{-1}

当达到一定应变速率时,低碳钢内部开始发生动态再结晶,当应变速率较大时,内部组织只有部分晶粒发生了动态再结晶,其动态再结晶并不充分;当应变速率较小时,应变时间加长,晶粒有足够的时间长大,再结晶可充分进行。低应变速率会使晶粒变形过程没有那么明显,晶粒中的晶格畸变能积累速率变慢,不利于激发再结晶形核机制,但同时也增加了晶粒长大的时间。从图3~6可以看出,应变速率越大,越容易发生动态再结晶,且由于应变速率过快,新晶粒来不及长大,所以高应变速率下的晶粒组织较为细密^[16]。

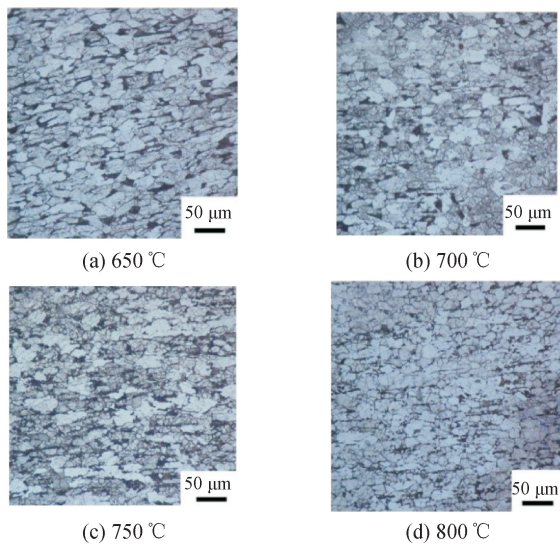


图5 应变速率为 0.01s^{-1} 时的微观组织
Fig. 5 Microstructure at strain rate of 0.01s^{-1}

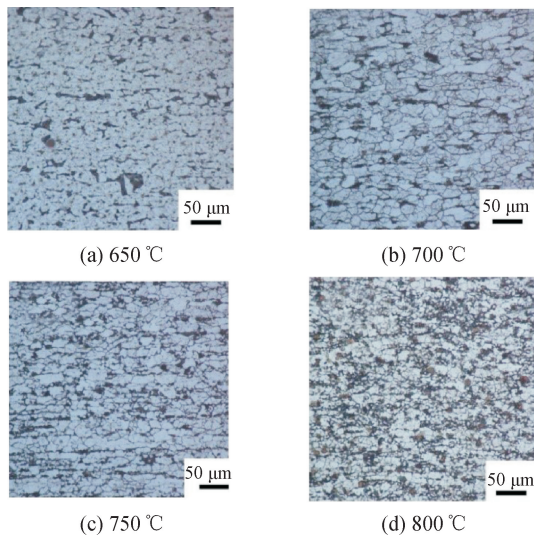


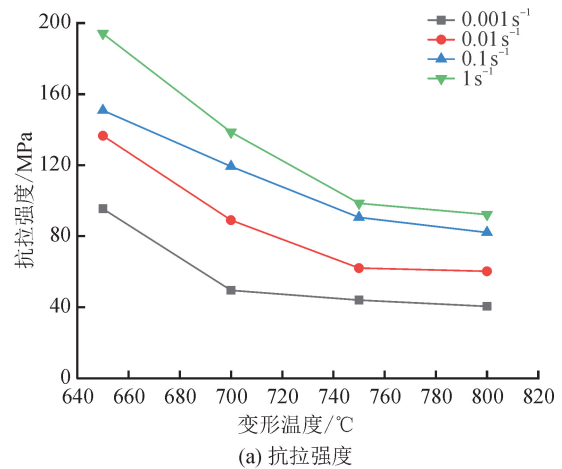
图6 应变速率为 0.001s^{-1} 时的微观组织
Fig. 6 Microstructure at strain rate of 0.001s^{-1}

图3中(应变速率为 1s^{-1}) $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍有大量原始边界存在,但是也发生了一定程度的变形,原始晶粒在热拉伸过程中逐渐变形,在应变速率为 0.1 s^{-1} 时,可以看到在原始边界周围出现了细小等轴晶粒,但是在该变形条件下,动态再结晶不能完全进行,仍有许多原始晶粒,而这些没有发生再结晶的原始晶粒在后续变形过程中被明显拉长了,并且仍然存在原始晶粒,但是原始晶粒周围的细小晶粒没有应变速率在 0.01 s^{-1} 时多,说明应变速率越小,高温合金变形时间越充分,变形晶粒越容易长大。

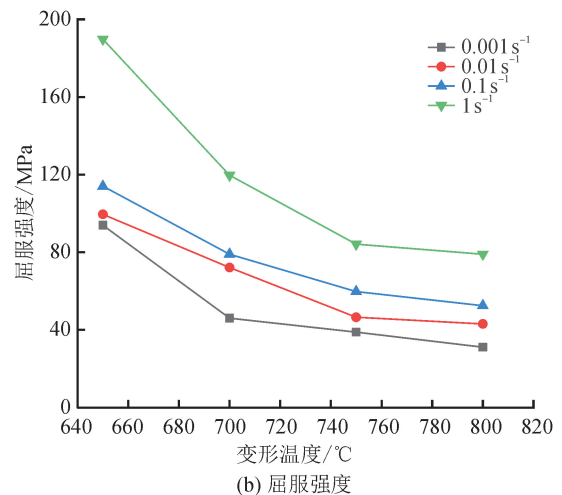
2.3 变形参数对力学性能的影响

抗拉强度表示在拉伸期间所经受的最大应力。当钢在一定程度上屈服后,内部的组织结构发生了变化,从而使材料的变形性能得到了进一步提高,随

着应力的持续增大,这种变化就会逐渐增强,直至达到临界点。在这一阶段,样品的抗形变性能显著下降,而最易受破坏的部位发生了较大的塑性变形。在拉伸断裂以前,最大应力是由低碳钢引起的。在拉伸应力-应变曲线上,最高值为抗拉强度。图7为低碳钢在不同应变速率及不同变形温度下的抗拉强度和屈服强度的变化曲线。



(a) 抗拉强度



(b) 屈服强度

图7 低碳钢在不同工艺参数下的屈服强度和抗拉强度变化曲线

Fig. 7 Curve of yield strength and tensile strength of low carbon steel with different process parameters

由图7可知,随着变形温度的升高,低碳钢的抗拉强度持续降低,当变形温度高于 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,抗拉强度的下降趋势有所减小。在同一变形温度下,抗拉强度随着应变速率的增加而增加,且应变速率越大,抗拉强度上升的趋势就越平缓。在高温应力-应变曲线上,应力和应变在弹性阶段仍然保持着线性关系,但在之后的塑性阶段,随着应变的增大,应力逐渐减小。在较高的温度下进行拉伸,会造成回复和再结晶,使其在回复和再结晶时的应力持续得到释放并逐渐降低。随着温度升高,低碳钢的屈服强

度降低,当温度大于 750 °C 时,低碳钢屈服强度降低的趋势有所减缓,这一点和温度对低碳钢抗拉强度的影响有相似之处。当温度一定时,材料的屈服极限随着应变速率的增大而增大。当应变速率增加到 0.1 s^{-1} 以上时,屈服强度增加的趋势加快,这和抗拉强度的变化规律有相似之处。

3 结 论

本次实验主要通过设定不同拉伸工艺参数来研究不同加工参数下低碳钢的组织及性能变化,并分析高温拉伸过程中变形温度、应变速率对低碳钢的影响规律。

1) 低碳钢在高温变形过程中伴随着动态回复与动态再结晶的相互作用。

2) 温度对低碳钢组织的影响非常明显,随着拉伸温度的升高,低碳钢可以较快地发生动态再结晶,变形温度越高,晶粒组织越容易完全再结晶,且随着变形时间的延长,晶粒组织逐渐被长大的新晶粒取代,呈现均匀的等轴状晶粒,温度越高,晶粒越细小。

3) 随着温度的升高,低碳钢的屈服强度和抗拉强度持续降低,且当温度高于 750 °C 时,屈服强度和抗拉强度下降的趋势有所减小。低碳钢在中低温环境下力学性能良好,在高温环境下力学性能显著降低。

参考文献:

- [1] 赵泽波,臧勇,王婷婷,等. 碳钢高温流变应力模型研究[J]. 北京工业大学学报,2013,39(8):1149-1154.
ZHAO Zebo, ZANG Yong, WANG Tingting, et al. High temperature flow stress model of carbon steel [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(8): 1149-1154.
- [2] 李红斌,田伟,郑明月,等. 基于高速等温压缩试验构建普碳钢考虑温度弹跳的热变形本构方程[J]. 机械工程材料,2014,38(3):102-105, 108.
LI Hongbin, TIAN Wei, ZHENG Mingyue, et al. Constructing thermal deformation constitutive equation with temperature jumping for plain carbon steel based on fast isothermal compression test[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(3): 102-105, 108.
- [3] 包中碧,曹克浩,崔毅. 基于 Origin 的 Q235 碳钢形变热处理复合强化工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,44(16):215-216.
BAO Zhongbi, CAO Kehao, CUI Yi. Study on heat treatment deformation of composite reinforcement technology for Q235 carbon steel based on origin[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(16): 215-216.
- [4] 杨璞,魏森森,赵雪妮,等. Q235 表面 Al-Cr 梯度复合涂层的制备及性能[J]. 陕西科技大学学报,2019,37(4):101-106, 113.
YANG Pu, WEI Sensen, ZHAO Xueni, et al. Preparation and properties of Q235 surface Al-Cr gradient composite coating[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019, 37(4): 101-106, 113.
- [5] 魏洁,唐广波,刘正东. 碳锰钢热变形行为及动态再结晶模型[J]. 钢铁研究学报,2008,20(3):31-35,53.
WEI Jie, TANG Guangbo, LIU Zhengdong. Hot deformation and dynamic recrystallization models of C-Mn steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(3): 31-35, 53.
- [6] 杜林秀,高彩茹,张彩霞,等. 低碳钢应变诱导铁素体相变发生的温度条件[J]. 金属学报,2002,38(10):1031-1036.
DU Linxiu, GAO Cairu, ZHANG Caibei, et al. Investigation on the conditions of strain-induced ferrite transformation of low carbon steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(10): 1031-1036.
- [7] 苗京涛,周昌磊,黄素霞,等. 合金元素对低碳钢热变形行为影响的研究[J]. 热加工工艺,2023,52(14):36-40.
MIAO Jingtao, ZHOU Changlei, HUANG Suxia, et al. Effect of alloying elements on hot deformation behavior of low carbon steel[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(14): 36-40.
- [8] 王立新,李花兵,李国平,等. 2205 和 2507 双相不锈钢双道次热压缩条件下的微观组织演变及变形行为[J]. 材料研究学报,2016,30(12):888-896.
WANG Lixin, LI Huabing, LI Guoping, et al. Microstructural evolution and flow behavior of 2205 and 2507 duplex stainless steel during double pass hot compressive deformation[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2016, 30(12): 888-896.
- [9] 张伟伟,杨明,梁益龙,等. 低碳钢 20CrNi2Mo 的高温热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报,2017,38(8):159-167.
ZHANG Shiwei, YANG Ming, LIANG Yilong, et al. Hot deformation behavior and hot processing map of 20CrNi2Mo low carbon steel at elevated temperature [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(8): 159-167.
- [10] POLIAK E I, JONAS J J. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation [J]. ISIJ International, 2003, 43(5): 684-691.
- [11] 吴建华. 应变对形变诱导铁素体相变影响的研究[J]. 热加工工艺,2009,38(10):58-59.
WU Jianhua. Study on effect of strain on deformation

- induced ferrite transformation[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(10): 58-59.
- [12] 孙兴,于秋颖,兰博,等. 镍基高温合金高温塑性变形的流动应力变化及微观组织特征[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(9): 54-60.
SUN Xing, YU Qiuying, LAN Bo, et al. Flow stress variation and microstructure characteristics of Ni-based superalloys during high-temperature plastic deformation[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(9): 54-60.
- [13] 刘昭昭,王淼,刘延辉. 镍基高温合金 GH4133B 本构模型及热加工图的热模拟研究[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(6): 44-50.
LIU Zhaozhao, WANG Miao, LIU Yanhui. Analysis of deformation behavior and microstructure evolution for GH4133B superalloy based on isothermal compression test[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(6): 44-50.
- [14] GUO Shengli, WU Shuaishuai, GUO Jiangtao, et al. An investigation on the hot deformation behavior and processing maps of Co-Ni-Cr-W-based superalloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 74(11): 100-111.
- [15] 崔桂彬,鞠新华,张清水,等. 温度对低碳钢微观组织与高温力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(5): 123-128.
CUI Guibin, JU Xinhua, ZHANG Qingshui, et al. Effect of temperature on microstructure and high temperature mechanical properties of low carbon steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(5): 123-128.
- [16] 董丹阳,刘杨,王磊,等. 应变速率对 DP780 钢动态拉伸变形行为的影响[J]. *金属学报*, 2013, 49(2): 159-166.
DONG Danyang, LIU Yang, WANG Lei, et al. Effect of strain rate on dynamic deformation behavior of DP780 steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(2): 159-166.

(责任编辑 周 蓓)