

淬火方式对 Ti 微合金化中碳钢组织和性能的影响

王成¹, 郭宏丽², 孙健³, 李德发²

(1. 鄂城钢铁有限公司, 湖北 鄂州 436002; 2. 武汉钢铁有限公司, 湖北 武汉 430080;
3. 广州盖勒斯机械科技有限公司, 广东 广州 511300)

摘要: 设计了一种 Ti 微合金化中碳钢, 在控制轧制后采用在线直接淬火 + 低温回火 (DQ + LT) 和离线再加热淬火 + 低温回火 (RQ + LT) 两种热处理工艺。通过力学性能检测和微观组织观察, 研究了不同淬火方式 (DQ 和 RQ) 对 Ti 微合金化中碳钢微观组织和析出呈现扁平化和等轴化, 扁平化马氏体板条较细长, 方向性明显, 基体位错密度高, 而等轴晶粒的有效晶粒尺寸更细, 晶粒内马氏体板条均匀、无方向性, 基体上有大量细小的碳化物和 (Ti, Mo)C 析出相。组织上的差异使得 DQ 工艺试验钢存在横、纵向性能不均匀、低温冲击性能较差等不足, 而 RQ 工艺试验钢的横、纵向性能均匀、强韧性匹配良好。

关键词: 直接淬火; 离线再加热淬火; 低温回火; 马氏体板条; 析出相; 有效晶粒尺寸

中图分类号: TG156.31

文献标志码: A

文章编号: 0254-6051(2021)06-0111-05

Effect of quenching mode on microstructure and properties of Ti-microalloyed medium carbon steel

Wang Cheng¹, Guo Hongli², Sun Jian³, Li Defa²

(1. Echeng Iron and Steel Co., Ltd., Ezhou Hubei 436002, China;

2. Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan Hubei 430080, China;

3. Guangzhou Guilay Mechanical Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 511300, China)

Abstract: A Ti-microalloyed medium carbon steel was designed, and after controlled rolling, the tested steel was conducted by different heat treatment processes, that was online direct quenching + tempering at low temperature (DQ + LT) and off-line reheat quenching + tempering at low temperature (RQ + LT). By using mechanical properties testing and microstructure observation, effect of quenching mode (DQ and RQ) on microstructure and precipitates of the Ti microalloyed medium carbon steel was studied. The results show that the quenching mode has a significant effect on microstructure and mechanical properties of the tested steel. The grain morphology quenched by DQ and RQ processes is flat and equiaxed, respectively. The flattened martensite lath is slender and directional, and the matrix dislocation density is high. The effective grain size of equiaxed grains is finer, the martensite lath in the grain is uniform and non-directional, and there are a lot of fine carbides and (Ti, Mo)C precipitates in the matrix. Due to the microstructure difference, the tested steel treated by DQ process has some shortcomings, such as uneven transverse and longitudinal performance and poor impact property at low temperature, etc. While the tested steel treated by RQ process has uniform transverse and longitudinal performance and the good match of strength and toughness.

Keywords: direct quenching; off-line reheat quenching; low-temperature tempering; martensite lath; precipitates; effective grain size

高强度且兼具高韧性的钢材在机械制造行业应用较为广泛, 但传统的高强钢存在如下不足, 一方面合金含量高, 生产工艺复杂, 不利于大规模工业化批量生产; 另一方面其韧性较差, 难以满足复杂且严苛的应用要求^[1-4]。为获得高强高韧的钢材, 一般采用离线再加热淬火 (Reheat quenching, RQ) 工艺获得马氏体组织。随着热机械控制轧制 (Thermal mechanical

controlling process, TMCP) 技术的发展, 近年来, 在线直接淬火 (Direct quenching, DQ) 工艺开始应用于高强钢生产。RQ 和 DQ 工艺均能获得马氏体组织^[5-7], 但对马氏体形态、结构的影响研究不够充分, 难以同时提高钢的强度和韧性, 而且工艺的应用还要与材料的成分设计相匹配, 综合利用固溶强化、析出强化、位错强化、细晶强化等强化方式并考虑其对韧性的影响, 才能达到同时提高强度和韧性的目的。

目前文献资料中还鲜有关于 1700 MPa 级且兼具较高韧性的钢铁材料报道。鉴于此, 本文设计了一种 Ti 微合金化中碳钢, 通过优化 C 含量并添加适当的

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 王成 (1986—), 男, 工程师, 主要研究方向为轧钢、热处理工艺及设备, E-mail: G12465@baosteel.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2021.06.023



扫描全能王 创建

Mn、Mo、B 等微合金元素,提高试验钢的淬透性和强度;添加适量的 Ti 元素,并结合控制轧制和热处理工艺实现晶粒细化和析出强化的协同优化效应。在控制轧制的基础上研究了不同热处理工艺,即直接淬火 + 低温回火 (Direct quenching + low-temperature tempering, DQ + LT) 和再加热淬火 + 低温回火 (Reheat quenching + low-temperature tempering, RQ + LT),对 Ti 微合金化中碳钢微观组织形貌和析出相的影响,并探讨了其强化机理,以期达到高强韧性的良好配合,并为实际工业生产的应用提供相关指导。

1 试验材料和方法

在某厂 130 t 转炉冶炼 Ti 微合金化中碳钢,其化学成分见表 1,通过连铸获得 250 mm × 1600 mm 断面的铸坯。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the tested steel (mass fraction, %)						
C	Mn	Si	P	S	Mo + B + Ti	Fe
0.32	1.25	0.23	0.009	0.0023	适量	Bal.

在该厂 4300 mm 宽厚板产线上完成轧制和热处理试验,热处理工艺如图 1 所示。首先将铸坯在步进梁式高炉煤气加热炉内加热至 1200 °C 保温 1.2 h,让合金元素充分固溶进基体中,同时获得适当尺寸的奥氏体晶粒。采用两阶段控制轧制方式完成轧制,第一阶段开轧温度为 1050 ~ 1120 °C,第一阶段累积压下率 ≥ 65%,轧制速度为 5.5 ~ 7.2 m/s,压下速度为 35 ~ 45 mm/s。第二阶段开轧温度为 960 ~ 1020 °C,道次压下率 ≥ 15%,最后道次轧制速度为 3.5 m/s,终轧温度 ≥ 900 °C。轧后在线直接淬火,冷却速率为 50 °C/s,终冷温度控制在 220 ~ 330 °C 之间,制备厚度为 20 mm 的钢板。直接淬火后的试样分为两批试样做对比试验,一批直接采用 200 °C 低温回火 200 min (即 DQ 工艺),另一批再加热至 900 °C 奥氏体区保温 30 min 淬火然后再进行 200 °C 低温回火 200 min (即 RQ 工艺)。

热处理完成后分别沿试验钢的横向和纵向制取试样进行力学性能测试和微观组织分析。拉伸试验参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》执行,拉伸试样为直径 φ8 mm 的圆棒,测试温度为室温,冲击试验参照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》执行,横、纵向冲击试样尺寸 10 mm × 10 mm × 55 mm,测试温度为 -40 °C。试样经打磨后采用电解抛光(电压为 20 V,

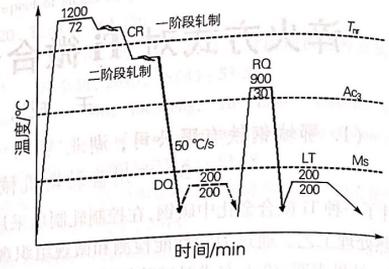


图 1 热处理工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment process

时间为 10 s),在 Quanta450 型场发射扫描电镜下观察微观组织,并采用扫描电镜配备的 EBSD 设备对有效晶粒尺寸和取向分布进行统计,EBSD 扫描步长为 0.1 μm,晶粒取向大于 15° 定义为大角度晶界。透射样品采用电解双喷减薄技术制备,电解液采用体积分数为 6% 的高氯酸乙醇溶液,双喷电压为 25 V,试验温度为 -20 °C,制备完成后在 JEM-2100F 型透射电镜上观察精细组织结构。

2 试验结果与讨论

2.1 淬火方式对马氏体组织和析出相的影响

不同淬火方式的试验钢光学显微组织如图 2 所

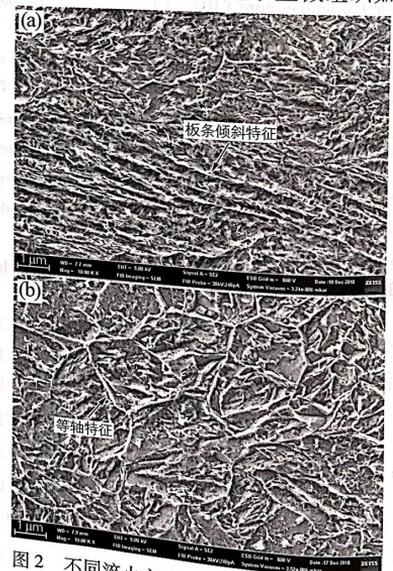


图 2 不同淬火方式试验钢的光学显微组织 (a) DQ 工艺; (b) RQ 工艺

Fig. 2 Optical microstructure of the tested steel after different quenching processes (a) DQ process; (b) RQ process

示。由图2可知,两种工艺试验钢基体组织中均观察到了回火马氏体组织,DQ和RQ工艺处理的试验钢晶粒形态分别呈现扁平化和等轴化。DQ工艺处理的试验钢在奥氏体未再结晶区大压下率轧制使奥氏体扁平化,轧后DQ工艺处理的试验钢发生马氏体转变,原始奥氏体扁平化形态得以保持,晶粒宽度为 $(8.9 \pm 0.52) \mu\text{m}$,晶粒内部马氏体板条呈一定方向性,低温回火对马氏体形态基本无影响。而RQ工艺处理的试验钢在再加热奥氏体化过程中使扁平化晶粒转变为等轴化的奥氏体晶粒,方向性得以消除,等轴晶粒平均直径为 $(3.1 \pm 0.19) \mu\text{m}$ 。

DQ和RQ薄膜试样TEM精细观察结果如图3所示。由图3(a,b)可知,DQ工艺处理的试验钢马氏体板条较细长,方向性明显,宽度为 $(0.18 \pm 0.03) \mu\text{m}$,基体上有大量碳化物颗粒,且位错密度很高,此外还可见少量大颗粒含Ti的TiN氮化物,尺寸为 $40 \sim 60 \text{ nm}$ 。由图3(c,d)可知,等轴晶粒内马氏体板条相互交割,板条宽度为 $(0.21 \pm 0.01) \mu\text{m}$,基体上分布着大量含Ti、Mo,尺寸 $10 \sim 15 \text{ nm}$ 的碳化物,位错密度相对DQ工艺处理的试验钢降低较为明显。此外,还可以看出两种工艺获得的马氏体板条在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温回火后均出现了合并现

象,部分区域马氏体板条边界变得模糊。

从图3可以看出,淬火工艺对马氏体微观组织结构产生了显著影响。DQ和RQ工艺处理的试验钢均能获得板条马氏体组织,不同的是轧制时遗留下来的扁平化晶粒形态和高密度位错在DQ工艺处理后的试验钢中基本得到保持,而且形变储能增加了马氏体相变驱动力,充分细化了马氏体板条,但扁平化的原奥氏体晶界无法消除,马氏体相变首先主要从晶界处开始形核,相变后的新生马氏体板条贯穿扁平化的晶粒而且呈一定的方向性,因此对于组织均匀性要求较高的材料不建议使用DQ工艺。而RQ工艺对应试验钢重新加热使基体组织奥氏体等轴化,形核和长大两个过程决定了等轴化的奥氏体晶粒大小,进而影响马氏体的细化程度,形核位置主要在轧制过程中形成的大角度晶界上,形核位置越多,奥氏体晶粒越细,随后在适当的温度保温一定时间后奥氏体晶粒逐渐长大,吞噬小晶粒和形状非等轴的不规则晶粒,使奥氏体晶粒变得很均匀,最终可以消除轧制造成的晶粒扁平化和方向性。此外,晶内存在板条马氏体相互交割也使得相变后的组织更加均匀和精细。但此时位错和形变储能重新加热过程中进一步减少,

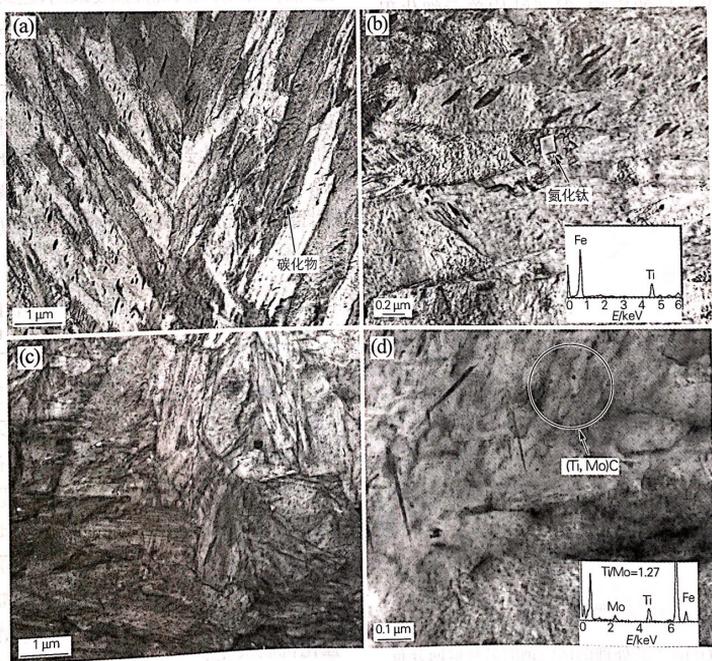


图3 经DQ(a,b)和RQ(c,d)工艺处理的试验钢TEM组织

Fig. 3 TEM microstructure of the tested steel treated by DQ(a,b) and RQ(c,d) processes



削弱了马氏体相变的驱动力,从而使得马氏体板条相对略宽。

淬火方式对含 Ti 的析出相也产生了显著影响。含 Ti 的析出相在试验钢的连铸、铸坯加热、轧制和热处理等生产过程中会随着温度的变化发生显著的动态变化。DQ 工艺处理的试验钢马氏体基体中的含 Ti 析出相颗粒较大,是铸坯加热时未固溶的和奥氏体区轧制时形变诱导析出的,这种析出相均在高温形成,所以颗粒尺寸较大、数量较少。此外,由于轧后直接淬火的冷却速度很大,在较低温度的铁素体温度区间,过饱和的含 Ti 相来不及析出,而在后续的低温回火过程中,只有在热力学上自由能较低的细小碳化物析出,未见纳米级的含 Ti 析出相。而 RQ 工艺处理的试验钢在再加热过程中,过饱和的 Ti、Mo、C 等合金元素持续析出,形成大量细小的碳化物以及 (Ti, Mo)C 等析出相,随着再加热温度升高和保温时间延长,碳化物全部溶解,只保留了细小的含 Ti 析出相。显然 Ti 微合金化钢采用 RQ 工艺更能发挥 Ti 微合金化的析出强化作用。

2.2 淬火方式对有效晶粒尺寸的影响

图 2~图 3 显示了不同淬火方式对最终试验钢马氏体晶粒和亚结构差异的影响,但亚结构单元细化程度、均匀程度以及取向分布还需进一步统计分析。

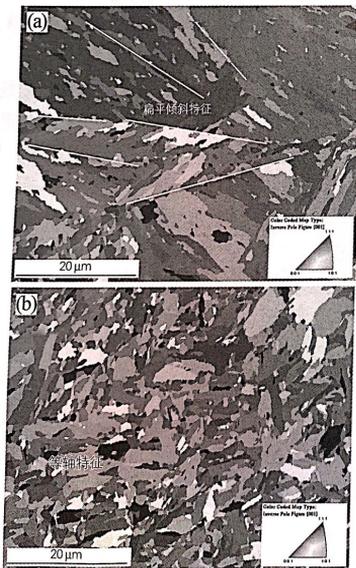


图 4 经 DQ(a)和 RQ(b)工艺处理的试验钢的晶粒取向分布

Fig. 4 Grain orientation distribution of the tested steel treated by DQ(a) and RQ(b) processes

图 4 和表 2 分别为采用 EBSD 分析获得的晶粒取向分布图 (Inverse pole figures, IPF) 和有效晶粒尺寸 (Effective grain size, EGS) 统计结果,不同颜色显示了晶粒取向大于 15° 的有效晶粒。由图 4 和表 2 对应可以看出, DQ 工艺处理的试验钢中亚晶粒取向分布明显,且亚结构尺寸非常不均匀,存在少量尺寸超过 $20 \mu\text{m}$ 的大晶粒和长度超过 $20 \mu\text{m}$ 板条束, RQ 工艺处理的试验钢中亚晶粒大小和分布更加均匀,晶粒取向呈各向异性分布。

表 2 试验钢有效晶粒尺寸的统计结果
Table 2 Statistical results of effective grain size of the tested steel

热处理工艺	最小值/ μm	最大值/ μm	平均值/ μm	标准差
DQ	0.41	21.28	1.13	± 0.76
RQ	0.42	6.54	0.98	± 0.38

2.3 淬火方式对力学性能的影响

经 DQ 和 RQ 两种工艺处理的试验钢力学性能见表 3。可以看出, DQ 工艺处理的试验钢力学性能存在明显的各向异性,横向性能均低于纵向性能,而 RQ 工艺处理的试验钢横向和纵向力学性能均匀。DQ 工艺处理的试验钢纵向抗拉强度最高,达到 1780 MPa ,但横向抗拉强度低于 1700 MPa ,而且横、纵向的塑性和低温冲击性能均较低,分别只有 6.3% 、 7.2% 和 22 、 26 J 。RQ 工艺处理的试验钢纵向强度略低于 DQ 工艺,但均达到了 1700 MPa ,而且横、纵向塑性和低温冲击性能均较好,分别达到 11.5% 、 11.0% 和 50 、 51 J 。由此可见,采用 RQ 工艺处理的试验钢能获得最佳的综合力学性能,横向和纵向性能均匀,抗拉强度均大于 1700 MPa 且具有良好的塑性。

表 3 试验钢的力学性能
Table 3 Mechanical properties of the tested steel

工艺	取样方向	拉伸性能			冲击吸收能量/ J	
		$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	测量值	平均值
DQ	横向	1483	1651	6.3	23, 23, 21	22 ± 0.55
	纵向	1591	1780	7.2	25, 28, 26	26 ± 0.75
RQ	横向	1579	1768	11.5	52, 48, 50	50 ± 1.00
	纵向	1583	1773	11.0	51, 49, 52	51 ± 1.02

材料的强度由固溶强化 (σ_s)^[8]、析出强化 (σ_p)^[9]、位错强化 (σ_d)^[10] 和细晶强化 (σ_g)^[11] 等多种强化机制决定:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_g \quad (1)$$

式中: σ_0 是恒量,其它强化方式会根据成分和微观组



织获得不同的强度增量,本试验两种材料化学成分相同,析出相尺寸和密度、位错密度和晶粒尺寸决定了强度的大小。

DQ工艺处理的试验钢强度增量来源于较高的位错密度和具有方向性的马氏体板条,马氏体板条的方向性也引起了横向和纵向性能的差异,此外,低温回火析出的碳化物也有一定的强化作用。RQ工艺处理的试验钢强度增量主要来源于均匀、细化的马氏体板条和纳米级析出相,以及细晶强化和沉淀强化的共同作用,因此RQ工艺处理的试验钢横向和纵向强度均大于1700 MPa。

材料的低温韧性主要与有效晶粒尺寸有关:

$$T = B - Ad^{-1/2} \quad (2)$$

式中:A、B为常数;d为有效晶粒尺寸。

DQ工艺处理的试验钢平均有效晶粒尺寸较大,但晶粒大小不均匀且呈扁平化,使低温韧性水平较低。RQ工艺处理的试验钢平均有效晶粒尺寸更小且大小均匀,能起到阻碍裂纹扩展的作用,从而提高了低温韧性。此外,韧性还与裂纹形核有关,DQ工艺处理的试验钢基体中存在高密度位错,在切应力作用下,位错合并或在障碍处塞积会促进裂纹形核和扩展。

3 结论

1) Ti微合金化钢通过直接淬火+低温回火(Direct quenching + low tempering, DQ + LT)和再加热淬火+低温回火(Reheat quenching + low tempering, RQ + LT)工艺均能获得1700 MPa高强度,但DQ工艺存在横、纵向性能不均匀、低温冲击性能较差等不足,RQ工艺更适合生产横、纵向性能均匀、强韧性匹配良好的1700 MPa级Ti微合金化高强高韧钢。

2) DQ和RQ两种工艺均能获得回火马氏体组织,DQ和RQ晶粒形态分别呈现扁平化和等轴化,等轴化的有效晶粒尺寸更小、更均匀。DQ工艺使试验钢中的马氏体板条较细长,方向性明显,且位错密度很高,而RQ工艺则使试验钢中的等轴晶粒内马氏体板条相互交割,板条均匀、无方向性。

3) 淬火方式对Ti析出相也产生了显著影响。轧后直接淬火的冷却速度很大,过饱和的含Ti相来不及析出,未见纳米级的含Ti析出相。直接淬火后的再加热奥氏体化过程中,过饱和的Ti、Mo、C等合金元素持续析出,形成大量细小的碳化物和(Ti, Mo)C等析出相。

参考文献:

- [1] Ma X P, Li X D, Langelier B, et al. Effects of carbon variation on microstructure evolution in weld heat-affected zone of Nb-Ti microalloyed steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49: 4824-4832.
- [2] Hu J, Du L X, Ma Y N, et al. Effect of microalloying with molybdenum and boron on the microstructure and mechanical properties of ultra-low-C Ti bearing steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 640: 259-266.
- [3] 孟征兵, 吴光尧, 刘新彬, 等. N-Ti微合金化高强度钢中的含Ti析出物 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 106-110.
- [4] Meng Zhengbing, Wu Guangyao, Liu Xinbing, et al. Precipitates containing titanium in a nitrogen and titanium micro-alloyed high strength steel [J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(4): 106-110.
- [4] 陈颜堂, 郭爱民, 李平和. Nb-Ti微合金化超低碳低合金高强度钢中第二相的析出行为 [J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 51-54.
- [5] Chen Yantang, Guo Aimin, Li Pinghe. Nitride and carbonitride precipitation behavior in a Nb-Ti microalloyed extra low carbon HSLA steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(9): 51-54.
- [5] 李大赵, 庄治华, 申丽媛, 等. 先进高强度钢微观组织调控研究现状及发展趋势 [J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 12-17.
- [6] Li Dazhao, Zhuang Zhihua, Shen Liyuan, et al. Research status and development trend of microstructure control of advanced high strength steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(5): 12-17.
- [6] Deng X, Wang Z, Misra R, et al. Transformation and precipitation behaviour of Ti-Mo bearing high strength medium-carbon steel [J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(9): 1111-1117.
- [7] 谭新伟, 郭成佳. Ti含量对高强度奥氏体区中碳化物析出行为的影响 [J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 26-31.
- [8] Tan Xinwei, Guo Chengqian. Effects of Ti content on precipitation behavior of carbides in austenite of high strength steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(2): 26-31.
- [8] 张利平, 刘艳林, 韩杰, 等. 冷却工艺对Ti微合金高强度钢组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 74-78.
- [9] Zhang Liping, Liu Yanlin, Han Jie, et al. Effect of cooling process on microstructure and properties of Ti-microalloyed high strength steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(1): 74-78.
- [9] Hong S G, Yong W K, Kim J H, et al. Effects of rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of Ti-Mo microalloyed hot-rolled high strength steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 605: 244-252.
- [10] 樊超, 杨忠民, 陈颖, 等. 钕钛与钕钒微合金化钢的高温塑性 [J]. 金属热处理, 2018, 43(1): 28-32.
- [11] Fan Chao, Yang Zhongmin, Chen Ying, et al. High temperature plasticity of Nb-Ti and Nb-V microalloyed steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(1): 28-32.
- [11] Hu B H, Cai Q W, Wu H B. Effect of Mo on the amount of Ti(C, N) precipitated from austenite in Ti-Mo micro-alloy steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(4): 481-488.

