

## 铌含量及铸锭加热温度对 HRB400 螺纹钢组织性能的影响

周 云 杨晓伟 陈焕德 张 宇  
(江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625)

**摘 要** 利用 Gleeble 热模拟仪、高温激光共聚焦显微镜、透射电子显微镜研究了铌含量(0.011%~0.055%)及加热温度(1 100~1 250 ℃)对 HRB400 钢 20 mm 板组织和性能的影响。结果表明,1 180 ℃加热 1 h 时 20 mm 钢板中随铌含量增加,铁素体比例减少,贝氏体比例增加,屈服强度升高;铌含量 0.024% 时,组织中铁素体比例 50.8%、珠光体比例 39.0%,贝氏体比例 10.2%,屈服强度 426 MPa,抗拉强度 685 MPa,伸长率 24.0%,断面收缩率 61.3%。铌析出物尺寸随加热温度升高逐渐细化,数量逐渐增多;1 180 ℃加热时铌含量析出物尺寸 7~88 nm,呈弥散分布。

**关键词** 铌微合金化 HRB400 钢 加热温度 珠光体 贝氏体

## Effect of Niobium Content and Ingot Heating Temperature on Microstructure and Property of HRB400 Steel Rebar

Zhou Yun, Yang Xiaowei, Chen Huande and Zhang Yu  
(Institute of Research of Iron and Steel (IRIS) of Shasteel, Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625)

**Abstract** The effects of niobium content (0.011%~0.055%) and heating temperature (1 100~1 250 ℃) on microstructure and properties of HRB400 steel rebar 20 mm plate are studied by thermal simulator Gleeble, high temperature laser con-focal microscope and transmission electron microscope. In 20 mm plate with heating at 1 180 ℃ for 1 h, with increasing content of niobium addition, the bainite content in steel increases to inhibit ferrite transformation, leads to increasing yield strength. Addition of 0.024% niobium, the microstructure has 50.8% ferrite, 39.0% perlite and 10.2% bainite, which corresponds to yield strength of 426 MPa, tensile strength of 685 MPa, elongation of 24.0% and reduction of area 61.3%. The size of niobium precipitates gradually refine with the increasing of heating temperature, the number is gradually increasing, and the disperse distributed niobium-containing precipitates with a size range of 7~88 nm can be produced at a heating temperature of 1 180 ℃.

**Material Index** Nb-Microalloying, HRB400 Steel, Heating Temperature, Pearlite, Bainite

采用微合金化的技术路线生产的钢筋性能稳定、节能环保,在工程应用上具有明显优势。其中微合金化元素铌由于具有相对稳定的价格优势及显著的强化效果,目前已用于生产各类建筑结构用高强钢筋。

含铌钢中的铌以固溶和碳氮化物的形式同时存在<sup>[1-2]</sup>,通过细晶强化、析出强化和贝氏体相变强化等方式发挥作用<sup>[3]</sup>。研究表明,添加铌会影响加热过程奥氏体化温度、冷却过程铁素体、珠光体相变温度,进而影响组织中的各相尺寸和比例<sup>[4]</sup>。为控制钢筋的屈服现象,同时保证轧后铌的细晶强化效果及控制组织比例,需要合理设计合适的铌含量。不同加热温度会影响铌的碳氮化物的回溶,进而影响原始奥氏体晶粒尺寸、变形后组织尺寸及第二相粒子的析出量<sup>[5]</sup>,最终影响钢筋的综合力学性能。为了兼顾细晶强化和析出强化,实现细小的奥氏体晶粒控制以及保证一定的铌固溶量,需要研究奥氏体晶粒长大的规律及铌的析出规律。

因此,采用铌微合金化技术路线开发 HRB400

级别及以上高强钢筋时,要充分考虑铌含量及加热温度两个重要因素。本文针对 HRB400 钢筋,旨在探究不同铌含量对相变的影响规律以及不同加热温度对奥氏体长大、铌析出的影响规律,为含铌钢筋的生产制定合理的工艺参数提供依据。

### 1 试验方法

铌含量试验中,试验钢设计冶炼化学成分(%)为 C 0.22~0.25, Si 0.28~0.35, Mn 1.45~1.55, Nb 0.01/0.02/0.03/0.04, P≤0.045, S≤0.045,其余为铁。将 140 mm×140 mm 截面坯料在试验室轧机上轧制成 20 mm 厚的钢板,加热温度 1 180 ℃,保温时间 2 h,开轧温度 1 020 ℃,终轧温度 990 ℃,轧后喷水冷却至 880 ℃。

加热温度试验中,采用试验钢化学成分(%)为 C 0.23~0.25, Si 0.28~0.35, Mn 1.45~1.55, Nb 0.015~0.020, P≤0.045, S≤0.045,其余为铁。试验过程:

(1) 高温金相试验:将试验钢加工成

Φ5.5 mm × 3 mm 的圆柱形样品, 保证两端面齐平, 并将一端进行抛光处理, 放在氧化铝坩埚中; 采用日本 Lasertec 公司型号为 VL2000DX 高温激光共聚焦显微镜进行高温金相试验, 工艺为: 以 5 °C/s 的速度从室温分别加热至 1 100、1 150、1 200、1 250 °C, 保温 60 min, 观察并采集图像, 后以 0.8 °C/s 速度冷却至 150 °C, 随后空冷至室温。

(2) 铌固溶温度探究试验: 在铸锭上取样, 将试样在高温炉中加热到 1 100、1 150、1 200、1 250 °C, 保温 1 h 后空冷至室温。

(3) 铌析出热模拟试验: 在铸锭上取样, 将试样加工成热模拟圆棒样品, 试样长 82 mm, 标距段直径为 Φ6 mm, 长为 10 mm, 以 10 °C/s 将试样加热到 1 000 °C, 再以 1 °C/s 将试样分别加热到 1 100、1 140、1 180、1 220 °C, 保温 5 min; 以 10 °C/s 将试样分别冷却到 940、980、1 020、1 060 °C, 保温 5 s, 随后进行单道次压缩变形, 应变速率 1 s<sup>-1</sup>, 应变量 60%; 压缩后分别以 0.8 °C/s 的速度冷却至 150 °C 以下。

试样经磨抛、4% 硝酸酒精溶液浸蚀, 利用 ZEISS 光学显微镜与 ZEISS EVO18 扫描电子显微镜观察金相组织。采用萃取复型方法制备透射样品, 对腐蚀后的金相样进行喷碳, 划出格子后用 8% 的硝酸酒精进行溶液浸泡, 将浮下的碳膜捞到铜网上进行烘干, 用 JEM-2100F 透射电镜对试样的析出相进行观察分析。硬度测试采用 TKU2500 维氏硬度仪, 试验载荷 5 kg。拉伸试验在 1200 kN 拉伸试验机上进行, 测试钢筋力学性能。

## 2 试验结果及分析讨论

### 2.1 铌含量试验

采用真空炉冶炼 150 kg 小钢锭, 对冶炼好的小钢锭进行成分分析, 结果如表 1 所示。试验钢 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 中实测成分中铌含量分别为 0.011%、0.024%、

表 1 试验钢 HRB400 化学成分/%

编号	C	Si	Mn	Nb	P	S
1 <sup>#</sup>	0.23	0.31	1.53	0.011	≤0.045	≤0.045
2 <sup>#</sup>	0.23	0.34	1.54	0.024	≤0.045	≤0.045
3 <sup>#</sup>	0.23	0.33	1.59	0.055	≤0.045	≤0.045

表 2 试验钢 HRB400 20 mm 板力学性能

Table 2 Mechanical properties of HRB400 tested steel 20 mm plate

编号	R <sub>10.2</sub> 强度/MPa	下屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
1 <sup>#</sup>	383	382	647	24.9	65.1
2 <sup>#</sup>	426	-	685	24.0	61.3
3 <sup>#</sup>	448	-	716	22.4	52.2

注:“-”表示未出现明显下屈服点

0.055% (见表 1)。

在试验室轧机对小钢锭进行轧板试验, 参照国标 GB/T228.1-2010 加工成 M12 的标准拉伸试样, 测试力学性能。力学性能结果如表 2 所示。可知 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 屈服强度为 383 MPa、426 MPa、448 MPa, 抗拉强度为 647 MPa、685 MPa、716 MPa, 伸长率为 24.9%、24.0%、22.4%, 断面收缩率为 65.1%、61.3%、52.2%。

小钢锭轧板后的金相组织如图 1 所示。利用 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup> 组织中铁素体(F)比例分别为 51.5%、50.8%、49.2%, 珠光体(P)比例分别为 43.4%、39.0%、12.5%, 贝氏体(B)比例 5.1%、10.2%、38.3%。

随铌含量增加, 屈服强度及抗拉强度升高, 断后伸长率及断面收缩率降低。这主要是由组织中珠光体比例降低、贝氏体增加决定的。由于珠光体相变是受碳扩散控制的相变, 铌原子在奥氏体晶界偏聚<sup>[6]</sup>, 导致奥氏体晶粒的界面活性降低, 碳的扩散系数相应下降, 即在钢中有碳化物形成元素铌存在的情况下, 碳扩散所需克服的势垒升高, 因而珠光体的生长速率变慢。

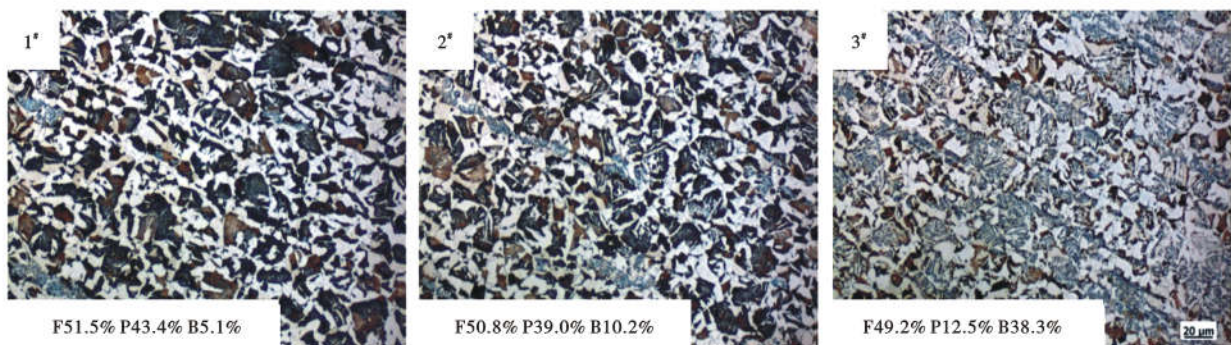


图 1 试验钢 20 mm 轧板的显微组织: 1<sup>#</sup>0.011% Nb; 2<sup>#</sup>0.024% Nb; 3<sup>#</sup>0.055% Nb

Fig. 1 Microstructure of 20 mm rolled plate of tested steel: 1<sup>#</sup>0.011% Nb; 2<sup>#</sup>0.024% Nb; 3<sup>#</sup>0.055% Nb

在连续冷却的钢中,这意味着固溶的铌降低了铁素体、珠光体转变开始温度,提高了铁素体、珠光体转变结束温度,提高了贝氏体转变温度,铌微合金化钢筋贝氏体相变区间明显变宽<sup>[7]</sup>,最终铁素体转变不充分,贝氏体体积分数增加。综合来讲,组织中珠光体比例减少,贝氏体比例增加,从而导致强度升高,塑性降低。同时,贝氏体含量高于一定比例后,多相组织钢筋在拉伸时屈服平台消失。原因主要包括两方面<sup>[8]</sup>,一是贝氏体中位错密度高,需要开启的滑移力大,随应力增加,位错迅速增殖并加工硬化,基体也随之强化,应力随应变增加而增加,二是贝氏体相变偏向于切变型,溶质原子扩散受阻导致溶质原子少,形成的柯氏气团少,屈服行为没有表现出明显的先脱离柯氏气团、后继续在低应力下滑移的特点,因此拉伸时应力-应变曲线平滑,无明显屈服平台。屈服无平台对于钢筋的工程推广应用不利。

2.2 加热温度的试验

2.2.1 高温金相

图 2 所示为不同加热温度(1 100 ~ 1 250 °C)保

温 1 h 后奥氏体晶粒形貌,利用 miaps 软件对不同加热温度、不同保温时间奥氏体进行晶粒尺寸统计,晶粒尺寸随保温时间的变化关系如图 3 所示。

在相同加热温度下,随保温时间的增加,奥氏体晶粒出现合并、长大的趋势,具体方式为奥氏体晶界的迁移<sup>[9]</sup>;在相同的保温时间下,随加热温度由 1 100 °C 提高至 1 250 °C 时,奥氏体晶粒逐渐粗化。目前预测加热过程中奥氏体晶粒长大规律时通常采用 Sellar<sup>[10]</sup>模型,即在等温过程中,随保温时间的增加,奥氏体晶粒尺寸变化基本满足抛物线规律<sup>[11-13]</sup>,符合公式  $D = K \cdot t^n$ ,其中 K 和 n 为与材料、温度有关的常数。依据图 3 数据,拟合不同温度,不同时间,晶粒尺寸变化过程,拟合结果参数见表 3。根据表 3,即可预测,1 200 °C 加热时,奥氏体晶粒尺寸为  $D_{1200\text{ °C}} = 35.84 \cdot t^{0.236}$ ,据此,可预测该钢种在 1 200 °C 保温 0 ~ 1 h 的过程中奥氏体晶粒大小,为奥氏体晶粒尺寸控制提供依据。

在 1 200 °C 时,n 值最高,表示奥氏体晶粒在 1 200 °C 加热时长大倾向最明显,高于此加热温度,

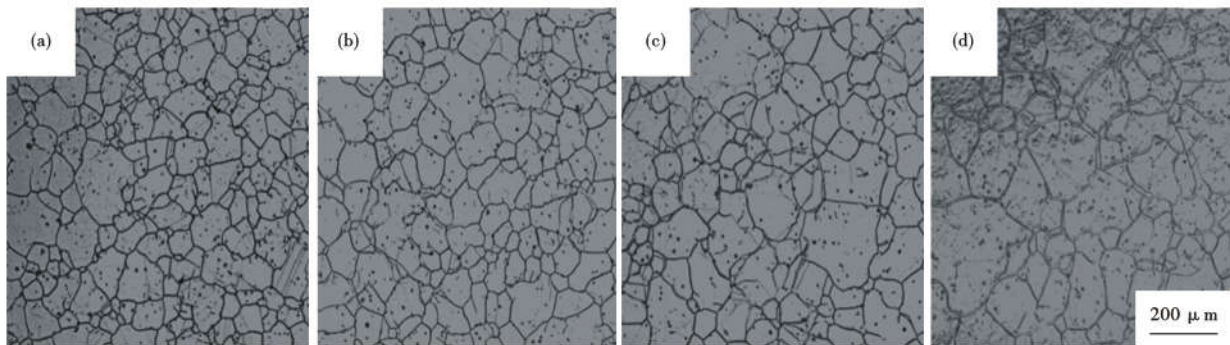


图 2 HRB400 钢锭:(a) 1 100 °C,(b) 1 150 °C,(c) 1 200 °C,(d) 1 250 °C 加热 1 h 奥氏体晶粒形貌

Fig. 2 Morphology of austenite grains of HRB400 steel ingot heating at 1 100 °C (a), 1 150 °C (b), 1 200 °C (c) and 1 250 °C (d) for 1 h

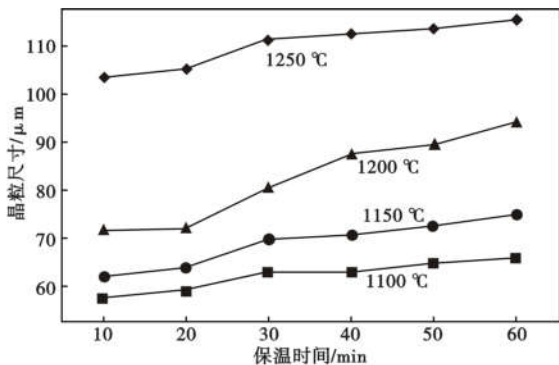


图 3 保温时间及加热温度对 HRB400 钢奥氏体晶粒尺寸的影响  
Fig.3 Effect of heating temperature and holding time on austenite grain size of HRB400 steel

表 3 1 100 ~ 1 250 °C 加热时 HRB400 钢奥氏体晶粒尺寸与保温时间的拟合参数

Table 3 Fitting parameters between austenite grains size and holding time for HRB400 steel heating at 1 100 ~ 1 250 °C

拟合公式	加热温度/°C	K	n
$D = K \cdot t^n$	1 100	45.57	0.090
	1 150	43.84	0.131
	1 200	35.84	0.236
	1 250	83.75	0.080

奥氏体晶粒尺寸  $\geq 70 \mu\text{m}$ ,对于后续的晶粒尺寸控制不利,预测加热温度 1 150 ~ 1 200 °C 合适。

2.2.2 铌回溶-析出热模拟试验

含铌钢在炼钢后凝固时会形成大尺寸含铌未溶

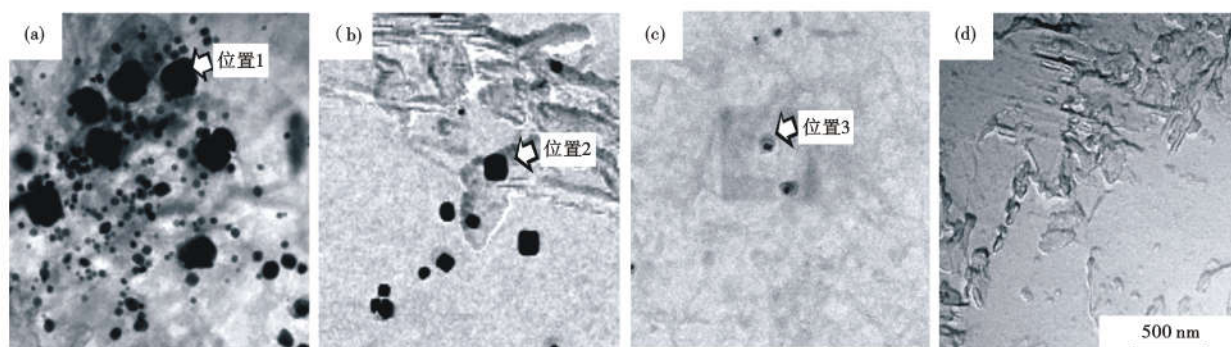


图 4 (a) 1 100 °C, (b) 1 150 °C, (c) 1 200 °C, (d) 1 250 °C 1 h 固溶处理, 铸态 HRB400 钢析出物形貌, TEM

Fig. 4 Morphology of precipitation in as-cast HRB400 steel solid-solution treated at 1 100 °C (a), 1 150 °C (b), 1 200 °C (c) and 1 250 °C (d) for 1 h, TEM

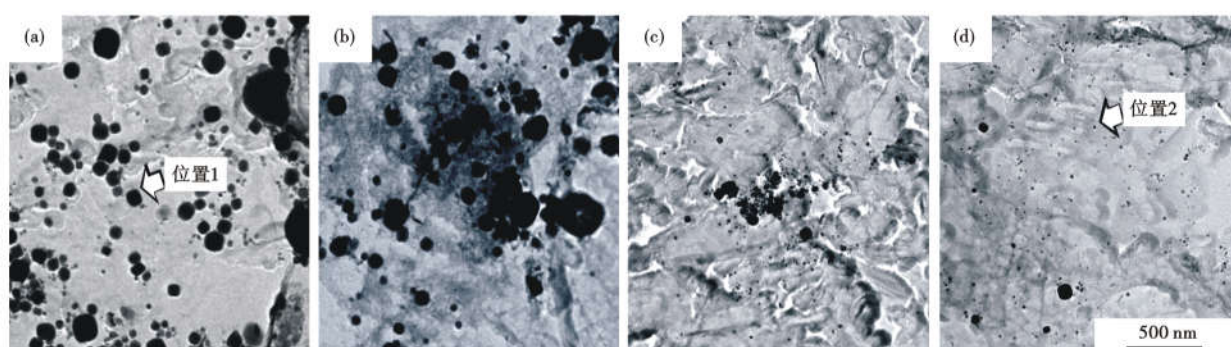


图 5 (a) 1 100 °C, (b) 1 140 °C, (c) 1 180 °C, (d) 1 220 °C 模拟加热时 HRB400 钢析出物形貌, TEM

Fig. 5 Morphology of precipitation in HRB400 steel simulated heating at 1 100 °C (a), 1 140 °C (b), 1 180 °C (c) and 1 220 °C (d), TEM

颗粒, 图 4 所示为 1 100 ~ 1 250 °C 固溶后的复型透射结果。1 100 °C 时未溶颗粒尺寸在 22 ~ 292 nm, 1 150 °C 时未溶颗粒尺寸在 19 ~ 260 nm, 1 200 °C 时未溶颗粒尺寸在 29 ~ 58 nm, 1 250 °C 固溶后未发现明显团聚状未溶颗粒分布, 对图 4(a) (b) (c) 中典型析出物形貌进行能谱分析, 半定量结果显示未溶析出物中铌含量分别为 46.7%、24.0%、0.7%, 主要属于铌的碳化物这一类型。

图 5 所示为 1 100 ~ 1 220 °C 模拟加热温度下的复型透射结果。加热温度 1 100 °C 时典型颗粒尺寸在 51 ~ 292 nm, 加热温度 1 140 °C 时典型颗粒尺寸在 59 ~ 262 nm, 加热温度 1 100 °C 及 1 140 °C 时典型析出物均属于连铸凝固时形成的, 后续加热过程中没有熔入基体的含铌未溶颗粒, 加热温度 1 180 °C 时典型颗粒尺寸在 7 ~ 88 nm, 既包含大尺寸未溶颗粒, 也包含加热固溶后形成的细小的铌析出物, 加热温度 1 220 °C 下典型颗粒尺寸在 11 ~ 96 nm, 无明显团聚状大尺寸未溶颗粒存在, 析出中绝大部分属于加热固溶后形成的细小的铌的析出物。对图 5 中加热温度 1 100 °C 及 1 220 °C 时典型析出物形貌进行

能谱分析表明, 析出类型为铌的碳化物。

分析结果, 加热过程, 在铸锭冷却阶段形成的铌的碳化物回溶到基体中, 这些固溶的铌在轧制及冷却过程中以细小的碳化铌的形式析出。析出相的强化作用主要来源于微合金碳氮化物等析出物的作用, 是析出物颗粒和位错之间相互作用的结果, 其析出强化作用的关键取决于钢中铌的析出行为。

根据微合金碳氮化物沉淀强化的 Orowan 机制, 析出强化增量可采用 Orowan-ashby 方程表示:  $\sigma_p = (0.538Gb^{1/2}/X) \ln\{X/(2b)\}$ 。式中  $G$  为剪切模量 (MPa), 对应铁基合金剪切模量 8.16 GPa,  $b$  为柏氏矢量的大小 (mm), 对应铁素体柏氏矢量 0.248 nm,  $f$  为析出相粒子的体积分数,  $X$  为析出相粒子的直径 (mm)。由此可知, 析出强化的效果取决于析出相的数量和弥散度, 质点越多、越细小弥散, 析出强化的效果越突出, 模拟加热温度提升至 1 220 °C, 经统计铌析出体积分数为 2.73%, 平均析出物尺寸在 16 nm, 理论计算析出强度增量达到 37 MPa, 对于含铌微合金化路线制备的 HRB400, 第二相析出强化效果显著。

采用 Thermol-calc 软件计算该合金成分下, 铌的平衡溶解温度在 1 141 ℃, 说明该成分下, 铌在 1141 ℃ 即可平衡固溶, 而加热模拟结果则显示 1 180 ℃ 下能够达到较好的固溶、析出效果。综合考虑实际加热过程<sup>[14]</sup>, 坯料温度稍低于炉气温度, 加热温度在 1 180 ℃ 及以上时更有利于铌析出强化作用的发挥。

### 3 结论

(1) 含铌 HRB400 钢随铌含量增加, 铁素体比例减少, 贝氏体比例增加, 屈服强度升高, 屈服平台

消失; 铌含量 0.024%, 加热至 1 180 ℃ 保温 2 h, 开轧温度 1 020 ℃, 终轧温度 990 ℃, 终冷温度 880 ℃; 组织中铁素体比例 50.8%、珠光体比例 39.0%; 贝氏体比例 10.2%; 屈服强度 426 MPa, 抗拉强度 685 MPa, 伸长率 24.0%, 面缩率 61.3%。

(2) 随加热温度由升高, 铌析出物尺寸逐渐细化, 数量逐渐增多; 1 180 ℃ 加热, 大量、细小铌碳化物析出, 尺寸 7~88 nm; 1 200 ℃ 以上加热时, 析出相的尺寸和数量变化不明显。

### 参考文献

[1] Cao J C, Liu Q Y, Yong Q L, et al. Effect of Niobium on Isothermal Transformation of Austenite to Ferrite in Hsla Low-Arbon Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2007, 14(3): 51-55.

[2] 王生朝, 张学锋. 大规格 Nb 微合金化 HRB400 钢筋的开发[J]. 钢铁研究, 2007, 35(2): 25-28.

[3] Chen Y, Zhang D T, Liu Y C, et al. Effect of Dissolution and Precipitation of Nb on the Formation of Acicular Ferrite/Bainite Ferrite in Low-Carbon HSLA Steels[J]. Materials Characterization, 2013, 84: 232-239.

[4] 完卫国, 李德华, 郭 湛, 等. 节约型铌微合金化 HRB400 钢筋的成分与工艺研究[J]. 钢铁研究, 2011, 39(1): 18-22.

[5] Hong S C, Lim S H, Hong H S, et al. Effects of Nb on Strain Induced Ferrite Transformation in C-Mn Steel[J]. Materials Science & Engineering, 2003, 355(1-2): 241-248.

[6] 于庆波, 张仲波, 李子林, 等. Nb 对低碳钢奥氏体晶粒长大的影响[J]. 钢铁, 2006, 41(12): 70-74.

[7] 杨晓伟, 周 云, 陈焕德, 等. Nb 微合金化 HRB400 钢筋的开发[J]. 金属热处理, 2019, 44(11): 140-144.

[8] 邱守福. HRB400E 螺纹盘条屈服不明显分析与改进[J]. 金属材料与冶金工程, 2017, 45(Z1): 67-72.

[9] Manohar P A, Dunne D P, Chandra T, et al. Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels[J]. ISIJ International, 1996, 36(2): 194-200.

[10] Sellars, C M, Whiteman, J A. Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling[J]. Metal Science Journal, 1979, 13(3-4): 187-194.

[11] Duan L N, Wang J M, Liu Q Y, et al. Austenite Grain Growth Behavior of X80 Pipeline Steel in Heating Process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 17(3): 62-66.

[12] 赵英利, 时 捷, 曹文全, 等. 加热温度对含 Nb 中碳钢奥氏体晶粒长大的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(4): 67-70.

[13] 钟云龙, 刘国权, 刘胜新, 等. 新型油井管钢 33Mn2V 的奥氏体晶粒长大规律[J]. 金属学报, 2003, 39(7): 699-703.

[14] 陈焕德, 丁美良, 胡 磊, 等. 蓄热式步进梁轧钢加热炉保温性能分析及优化措施[J]. 上海金属, 2018, 40(2): 69-73 + 82.

周 云 (1988-), 女, 硕士(北京科技大学), 研究员, 2011 年燕山大学(本科)毕业, 低合金棒线材研究。  
E-mail: zhouyun20090526@163.com

收稿日期: 2020-07-29

### “讲文明树新风”公益广告

绿化环境  
从我做起