

400 MPa 级铌微合金化抗震钢的控轧控冷工艺实践

杨伟勇

(芜湖新兴铸管有限责任公司, 芜湖 241002)

摘要 在化学成分合理设计的基础上 HRB400E 钢($\% : 0.21 \sim 0.25\text{C}, 0.40 \sim 0.65\text{Si}, 1.40 \sim 1.55\text{Mn}, \leq 0.040\text{P}, \leq 0.040\text{S}, 0.015 \sim 0.025\text{Nb}, 0.005 \sim 0.008\text{N}$), 研究了不同加热温度及控轧控冷温度对力学性能、金相组织和钢筋表面时效锈蚀的影响。提出了最佳的轧制温度参数: 加热温度为 $1140 \sim 1170\text{ }^\circ\text{C}$ 、开轧温度为 $1040 \sim 1060\text{ }^\circ\text{C}$ 、精轧温度为 $1000 \sim 1030\text{ }^\circ\text{C}$ 、终轧后的冷床温度是 $870 \sim 890\text{ }^\circ\text{C}$ 。结果表明, 铌微合金化 HRB400E 钢屈服强度 $450 \sim 475\text{ MPa}$, 其析出物主要为粒径大小为 $300 \sim 600\text{ nm}$ 的 Nb(C, N), 分布在网状碳化物上、网状碳化物边缘以及晶界附近的晶粒内部。

关键词 铌微合金化 加热温度 控冷 锈蚀 析出物

Controlled Rolling and Controlled Cooling Process Practice of 400 MPa Grade Nb Microalloyed Seismic Steel

Yang Weiyong

(Wuhu Xinxing Ductile Pipes Co., Ltd., Wuhu 241002)

Abstract Based on the reasonable design of chemical composition HRB400E steel ($\% : 0.21 \sim 0.25\text{C}, 0.40 \sim 0.65\text{Si}, 1.40 \sim 1.55\text{Mn}, \leq 0.040\text{P}, \leq 0.040\text{S}, 0.015 \sim 0.025\text{Nb}, 0.005 \sim 0.008\text{N}$), the effects of different heating temperature and controlled rolling and controlled cooling temperature on the mechanical properties, metallographic structure and aging corrosion of steel bar surface are studied. The optimum rolling temperature parameters are: the heating temperature $1140 \sim 1170\text{ }^\circ\text{C}$, the starting rolling temperature $1040 \sim 1060\text{ }^\circ\text{C}$, the finishing rolling temperature $1000 \sim 1030\text{ }^\circ\text{C}$, and the cold bed temperature $870 \sim 890\text{ }^\circ\text{C}$ after the final rolling. Results show that the yield strength of niobium microalloyed HRB400E steel is $450 \sim 475\text{ MPa}$, the precipitates in steel are mainly Nb(C, N) with a particle size of $300 \sim 600\text{ nm}$, which are distributed on the network carbide, the edge of the network carbide and the inside of the grain near the grain boundary.

Material Index Niobium Microalloying, Heating Temperature, Controlled Cooling, Corrosion, Precipitate

基于新版螺纹钢标准的发布实施, 钒氮合金价格波动较大, 2018 年至今, 钒氮合金价格从 $16 \sim 78$ 万元/t 不等。国内市场铌铁供应量充足, 价格相对低廉且价格稳定^[1-2], 以适当的铌铁替代钒氮进行螺纹钢微合金化, 将极大地降低生产螺纹钢的成本。

Nb 微合金化元素的添加可在钢的晶界或晶内以 Nb(C, N) 的形式析出, 提高奥氏体再结晶温度, 细化奥氏体晶粒; 在轧制时抑制奥氏体形变再结晶, 使奥氏体相变温度降低, 细化显微组织, 并在铁素体中有部分未溶的 Nb 产生析出强化, 最终提高钢的强度和塑性等综合机械性能^[3-4]。然而铌微合金化螺纹钢的生产虽有相关报道, 但其工艺尚未成熟, 有铌钢高温塑性差易出现表面裂纹、角裂、脱方等缺陷^[5-6], 成分设计及控轧控冷不当造成强度偏低、贝氏体占比高造成无屈服平台^[7]、组织不满足国标要求及钢筋自然时效锈蚀严重等现象。为此, 钢厂在保证 HRB400E 螺纹钢各项指标满足 GB1499-2018 要求的前提下, 改用成本低廉的铌微合金化工

艺在 HRB400E 钢上进行大批量铌微合金化工艺生产试验分析, 提出了较合理的铌微合金化工艺模型。

1 工艺流程和工艺设计依据

1.1 工艺流程

该厂生产的 HRB400E 钢工艺流程为: 120 t 转炉-120 t LF-180 mm × 180 mm 方坯连铸-加热炉加热-平立交替轧机(粗轧机组-中轧机组-控冷段-精轧机组-控冷段)-精整-检验-入库。

平立交替轧机机组包括粗轧机组 8 道次、中轧机组 8 道次、精轧机组 4 道次, 依据粗轧机、中轧机、精轧机各段压下量逐级递减的原理, 粗中轧阶段坯料厚、温度高, 应尽可能进行大压下, 迅速轧成接近成品的毛坯, 以减少精轧机的负担采用大压下量; 精轧阶段, 以小变形量将毛坯轧成各种成品, 从而得到良好的表面和精确的尺寸。粗轧、中轧、精轧道次对应各规格螺纹的压下变形率如表 1 所示。

控轧控冷主要通过精轧前及终轧后的水冷系统

表 1 $\Phi 20 \sim 32$ mm HRB400E 钢筋对应轧机各道次的变形率/%Table 1 Deformation rate of each pass of mill for $\Phi 20 \sim 32$ mm HRB400E steel reinforced bar /%

道次	规格 /mm			
	$\Phi 20$	$\Phi 22$	$\Phi 25$	$\Phi 32$
粗轧	88.1	88.1	88.1	88.1
中轧	86.2	81.6	76.4	65.7
精轧	40.8	46.2	45.9	39.1

控轧,水冷系统为精轧前预冷水箱 2 段以及终轧后控冷水箱 4 段,每段长度 4 m,穿水管压力在 0.5 ~ 2 MPa,阀门流量开度可调,每段水箱降温能力 100 °C。

1.2 成分和工艺设计

1.2.1 Mn、Nb 成分设计

本次成分设计的主要思路是从提高铌钢表面质量及降合金成本考虑,基于相关研究表明,Nb 微合金化钢经轧制变形可析出弥散细小的碳氮化铌,能细化晶粒,提高钢的强韧性,但铌含量越高,易在连铸凝固过程中第二相粒子的大量析出,延伸了第Ⅲ脆性温度区,更易造成铸坯各裂纹缺陷倾向加重^[8-9],影响轧材表面质量;另提高钢中 Mn 的含量可在提高固溶强化的同时,使奥氏体在较低的温度下分解,故成核率高、长大速度低,使铁素体晶粒细化^[10]。

依据国标要求,在碳、硅等元素含量一定的前提下,执行提锰降铌工艺的成分设计方案,且铌铁合金较硅锰合金的合金成本高,因此,适当降低 Nb 含量,提高 Mn 含量可以降低加工成本。本次试验的钢坯化学成分设定如表 2 所示。

1.2.2 加热温度

铌微合金化钢随着加热温度的提高,铌溶解度增大,Nb 充分溶解防止奥氏体晶粒粗化长大,有效提高钢筋强度,且适当提高加热温度可降低轧制时的变形阻力^[11]。根据 Nb 的强化机理,若 Nb 要得到充分溶解,钢筋强度才能得到有效提高,有研究表明,随着加热温度继续升高,固溶 Nb 含量增加,同时晶粒直径增大,加热至 1 200 °C 时,晶粒尺寸从 50 μm 增大至 120 μm ;在高于 1 200 °C 时,晶粒粗

表 2 HRB400E 试验钢坯化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of HRB400E test steel billet /%

C	Si	Mn	P	S	Nb	N
0.21 ~ 0.25	0.40 ~ 0.65	1.40 ~ 1.55	≤ 0.040	≤ 0.040	0.015 ~ 0.025	0.005 ~ 0.008

化^[12],因此应尽量控制加热温度在 1 200 °C 以内。

根据 Nb 微合金碳、氮化物在奥氏体中的固溶度 Irvine 公式(1)计算合金化的固溶温度,以此作为加热温度的参考值。

$$\log[\text{Nb}][\text{C} + 12/14\text{N}] = -6\,670/T + 2.26 \quad (1)$$

结合 C、N、Nb 元素的实际含量控制,依据固溶度公式(1)得出适宜的加热温度为 1 060 ~ 1 170 °C,说明上述的成分设计对应的加热温度在合理范围内。

1.2.3 控轧控冷

有研究报道指出,粗轧采取奥氏体再结晶温度区轧制,预精轧在奥氏体未再结晶温度区轧制,终轧温度控制在稍高于 A_{r3} 。含铌钢在 950 °C 以下都属于奥氏体未再结晶区,开轧温度控制在再结晶温度下 1 000 ~ 1 100 °C 轧制,能细化组织,消除混晶,有效提高韧性^[13]。经粗中轧轧制后,通过控制未再结晶温度 950 °C 左右进入精轧轧机组进行轧制,奥氏体反复变形,为相变形核提供了有利条件。合理降低终轧温度,能晶粒细化,提高机械性能^[14];铌在终轧后冷却过程中的析出强化作用,细化相变后的铁素体晶粒,提高了钢的屈服强度,控轧控冷工艺可改善组织晶粒及优良的机械性能。

2 试验结果与分析

2.1 加热温度的影响

依据上述试验方案,在化学成分、轧制速度、轧后控冷温度等其它工艺参数相同的条件下,按两种不同的均热段加热温度各试验 5 批 HRB400E 钢进行了力学性能对比试验。控冷温度由终轧后设定的各段穿水管压力及水管流量控制,本次工艺试验采用 2 段穿水管,穿水管压力为 0.8 ~ 1.1 MPa,水管流量为 180 ~ 200 L/s,轧制速度为 13.5 m/s,对应的控冷温度为 880 ~ 900 °C,其不同加热工艺对应的力学性能如表 3 所示,提高加热温度,相应的开轧温度升高,经变形后钢筋的抗拉强度较屈服强度提高明显,则对应的强屈比(抗拉强度/屈服强度)也相应提高。说明适当高的加热温度,Nb 在钢中的溶解度增大,Nb 被充分固溶阻止了奥氏体晶粒的粗化,有效提高钢筋强度及抗震指标,更有利于抗震钢筋的生产。

2.2 精轧前温度的影响

经粗中轧轧制后,通过控制未再结晶温度 950 °C 以下进入精轧轧机组进行轧制,奥氏体反复变形,有利于相变形核考虑。在其它工艺条件相同

表3 加热温度对HRB400E钢筋力学性能的影响

Table 3 Effect of heating temperature on mechanical properties of HRB400E steel reinforced bar

加热温度/ ℃	开轧温度/ ℃	控冷温度/ ℃	力学性能指标				抗震指标	
			屈服强度 ≥400 MPa	平均屈服强度 ≥400 MPa	抗拉强度 ≥540 MPa	平均抗拉强度 ≥540 MPa	强屈比 ≥1.25	平均屈特比 ≤1.30
1 080 ~ 1 110	1 000 ~ 1 020	880 ~ 900	434 ~ 452	442	590 ~ 620	606	1.34 ~ 1.39	1.36
1 140 ~ 1 170	1 040 ~ 1 060	880 ~ 900	449 ~ 470	457	630 ~ 655	640	1.38 ~ 1.42	1.39

表4 精轧前钢坯温度对HRB400E钢筋晶粒度和力学性能的影响

Table 4 Effect of billet temperature before finishing rolling on grain size and mechanical properties of HRB400E steel reinforced bar

进精轧前 控冷工艺	进精轧温度/ ℃	铁素体晶粒度		力学性能指标			抗震指标	
		边部	心部	平均屈服强度 ≥400 MPa	平均抗拉强度 ≥540 MPa	伸长率 ≥17%	平均强屈比 ≥1.25	平均屈特比 ≤1.30
预穿水	910 ~ 940	11 ~ 12	10 ~ 11	456	618	20.5	1.36	1.14
未预穿水	1 000 ~ 1 030	10.5 ~ 11	10 ~ 10.5	446	621	23.5	1.39	1.12

的条件下,采用预穿水段控冷后进精轧机以及不采用预穿水控冷直接进精轧机两种工艺各试验5批次进行对比,其进精轧机前不同的控冷工艺对应的力学性能如表4所示。

由表4结果表明,钢筋进精轧机前采用预穿水段水冷工艺,预穿水冷却后更有利于相变形核,边部晶粒明显细小,但心部晶粒差异不大;进精轧机前钢温降90℃时轧制,其平均屈服强度提高10MPa,但塑性降低、抗震指标也相应降低,且开启预穿水段冷却设备后,精轧机电流偶有超载荷造成精轧设备损耗增加、同时能源介质消耗以及劳动强度额外增加,最终导致生产成本增加。因此,依据HRB400E钢的产品需求,经综合各因素考虑,批量化生产可不采用精轧机前的预穿水段冷却工艺,直接轧后控冷工艺,产品的力学性能也满足抗震钢标准要求。

2.3 终轧后控冷温度的影响

有研究报道,铌微合金化钢在终轧后的控冷过程中析出的Nb(C, N)等第二相颗粒能显著提高钢的屈服强度,基于此,在相同控轧条件下设计了四组终轧后控冷工艺试验(每组试验各生产4批次),其轧后控冷温度(上冷床温度)对应的力学性能如表5所示。

表5实验结果表明,轧后控冷温度在840~

940℃,金相组织仍为铁素体和珠光体,未有其它显微组织产生。随着轧后控冷温度的降低,钢筋的晶粒尺寸细化,屈服强度、抗拉强度均有提高,而伸长率及强屈比有降低的趋势。说明在合理的冷却条件下,适当降低轧后控冷温度有利于钢筋力学性能的提高,维持产品质量的稳定。

2.4 冷床温度对钢筋锈蚀的影响

在一定的轧后控冷温度范围内,随着冷床温度的降低,铌微合金钢的强度有提高趋势,但相应地螺纹钢表面锈蚀研究鲜有报道,考虑到后续客户的存储及加工使用性能,本文进行了四组不同上冷床温度的工艺试验,并将对应温度区间的钢筋同时放置在露天环境下进行时效锈蚀观察。

铌微合金化HRB400E钢筋不同的上冷床温度锈蚀对比试验表明:在线生产当天,上冷床温度870~940℃的钢筋表面均无锈迹,呈亮蓝色;而上冷床温度840~860℃的钢筋表面颜色暗淡,无光泽。试验钢筋经30天的露天放置,其冷床温度840~860℃的1组钢筋表面出现明显的通体锈蚀,而870~880℃、900~910℃、930~940℃的3组钢筋表面除两端部锈蚀外,未见其他明显锈蚀。故为了保证钢筋产品质量(表面、机械性能)及节约成本考虑,试验结果认为Nb微合金化螺纹钢的上冷

表5 终轧后冷却温度对HRB400E钢筋组织和力学性能的影响

Table 5 Effect of cooling temperature after finishing rolling on microstructure and mechanical properties of HRB400E steel reinforced bar

轧后控冷 温度/℃	金相检验		力学性能指标			抗震指标	
	组织	平均晶粒度/ 级	平均屈服强度 ≥400 MPa	平均抗拉强度 ≥540 MPa	伸长率 ≥17%	平均强屈比 ≥1.25	平均屈特比 ≤1.30
930 ~ 940	铁素体 + 珠光体	9.5 ~ 10.5	435	609	26.5	1.40	1.09
900 ~ 910	铁素体 + 珠光体	10 ~ 11	440	612	24.5	1.39	1.10
870 ~ 880	铁素体 + 珠光体	10.5 ~ 12	458	628	22.0	1.37	1.15
840 ~ 860	铁素体 + 珠光体	11 ~ 13	475	637	20.5	1.34	1.19

床温度工艺设定为 870 ~ 890 °C 为宜。

3 优化控冷工艺的实践结果

3.1 力学性能分析

依据上述试验结果,按工艺优化后的参数,批量生产了 48 批次铌微合金化螺纹钢,其屈服强度在 450 ~ 475 MPa,抗拉强度 600 ~ 640 MPa,伸长率 20% ~ 25.5%,强屈比在 1.35 ~ 1.40,屈特比 1.12 ~ 1.19,且较工艺优化前的屈服强度更为稳定,说明轧制工艺优化后对应的力学性能指标均满足 HRB400E 抗震钢筋要求,产品质量有了整体提升,其工艺优化前、后的轧制参数如表 6 所示。

3.2 微观组织分析

抽取工艺优化后的铌微合金化钢筋试样对其进行金相组织、晶粒度检验,其显微结果如图 1 所示。金相组织的横截面衬度均匀,均为铁素体和珠光体组织,由于边部冷却速度较快,边部晶粒相对较心部

表 6 工艺优化前后的轧制参数

Table 6 Rolling parameters before and after process optimization

工艺	加热温度/ °C	开轧温度/ °C	进精轧前 控冷段水箱	终轧后控 冷段水箱	上冷床温度/ °C	屈服强度/ MPa
优化前	1 080 ~ 1 110	1 000 ~ 1 020	使用	使用 0 ~ 3 段	860 ~ 930	410 ~ 495
优化后	1 140 ~ 1 170	1 040 ~ 1 060	未使用	使用 2 ~ 3 段	870 ~ 890	450 ~ 475

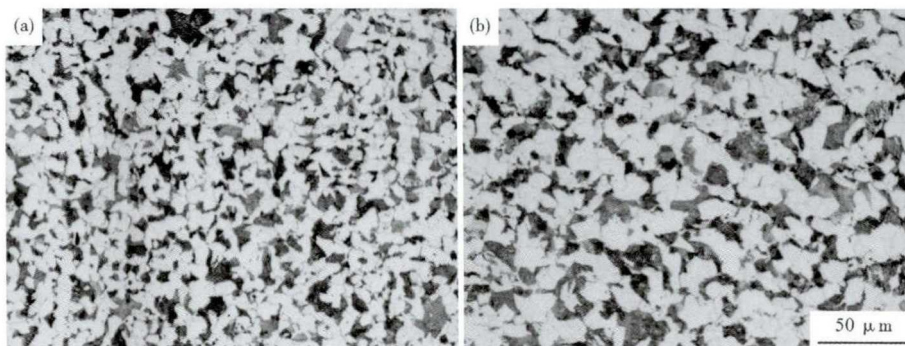


图 1 HRB400E 螺纹钢边部(a)和心部(b)组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of HRB400E steel reinforced bar edge (a) and center (b)

小,边部铁素体晶粒尺寸在 7.5 ~ 8.5 μm、晶粒度 11 级左右,心部晶粒尺寸在 9.0 ~ 10 μm、晶粒度 10 级左右;铁素体与珠光体的比例基本上在 60% 和 40% 左右,铁素体占比较高,表明在满足一定的强度指标的前提下,钢材塑性也得到了提高。

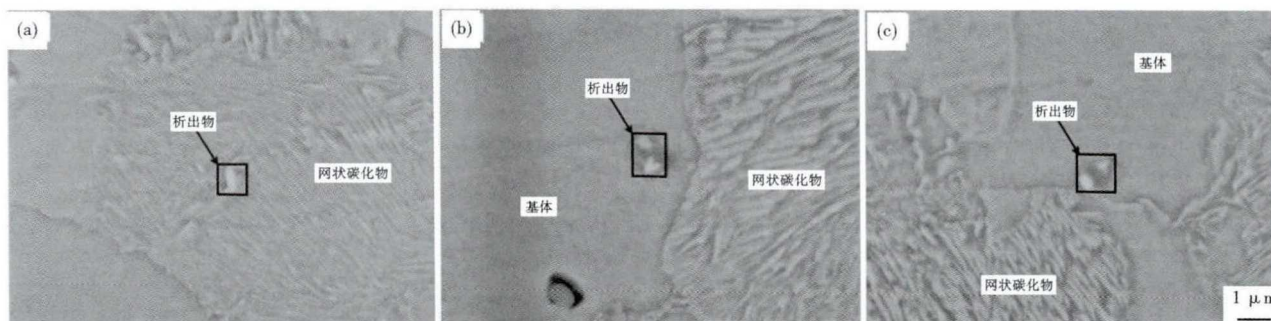


图 2 基体(a)、网状碳化物内(b)和网状碳化物边缘(c)析出物背散射电子图像

Fig. 2 Back scattered electron figure of precipitates at matrix (a), internal network of cementite (b) and edge of network of cementite (c)

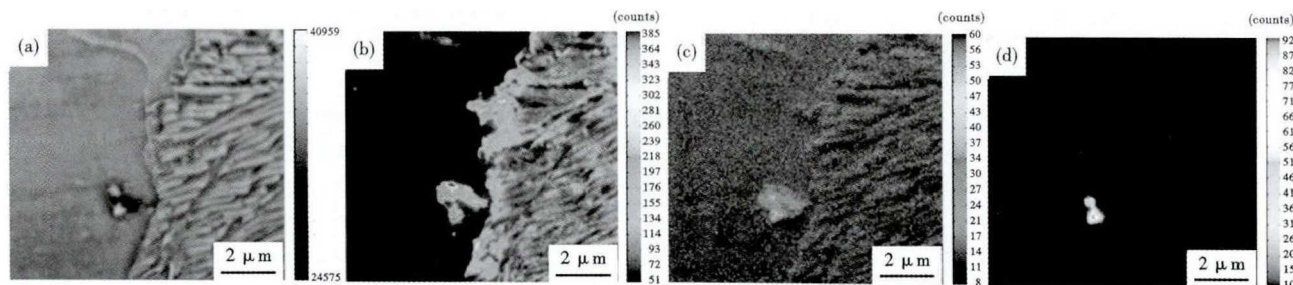


图 3 亮白色析出区域背散射电子像(a)和 C(b),N(c)和 Nb(d)分布图

Fig. 3 Back scattered electron figure (a) and distribution diagram of C (b), N (c) and Nb (d) at bright white precipitation area

3.3 电子探针(EPMA)分析

3.3.1 电子探针观察

为进一步观察铌微合金化螺纹钢的析出相形貌,利用岛津 EPMA-1720 型电子探针对试样的不同位置进行背散射形貌观察,如图 2 所示。

在背散射模式下,图 2(a)表明主要由基体及网状碳化物两部分组成,网状碳化物分布于晶界附近。进一步放大倍数发现在基体、网状碳化物上存在有亮白色析出相,直径为 300 ~ 600 nm,呈粒状分布在网状碳化物上、网状碳化物边缘以及晶界附近的晶粒内部,如图 2(b~c)所示。

3.3.2 电子探针面分析

选取含有典型亮白色析出相的区域,在背散射模式下进行元素面扫分析,元素面扫分布结果如图 3 所示。结果表明网状碳化物及附近发现亮白色析出相主要由 C、N、Nb 元素组成,为 Nb(C,N)复合析出相,说明在适当的加热温度及控冷工艺条件下,微量的 Nb 元素与 C、N 结合成 NbC、NbN 及 Nb(C,N),能产生强烈的细晶强化和沉淀强化作用,同时表明在终轧变形完成冷却至室温过程中会有细小弥散的析出物产生,从而显著提高了钢材的强度和韧性。

参考文献

- [1] 赵宇,陈伟,杜顺林. 昆钢 Nb 微合金化 HRB400 热轧带肋钢筋的开发[J]. 轧钢,2005(1):19-22.
- [2] 付俊岩. Nb 微合金化和含铌钢的发展及技术进步[J]. 钢铁,2005,40(8):1-6.
- [3] 郭守真,杨王玥,陈国安,等. 铌对低碳钢形变强化相变的影响[J]. 北京科技大学学报,2007,6(6):586-590.
- [4] 刘建华,马党参,张占普,等. 铌含量对 C₈WMo₂V₂SiNb 钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2008,29(6):55-57.
- [5] 东涛,曹铁柱. 中国铌微合金化钢发展方向[J]. 钢铁,2002,37(7):68-72.
- [6] 王键,任科社,郭达. 铌微合金化小方坯生产工艺优化与实践[J]. 山东冶金,2019,41(4):13-15+18.
- [7] 张朝晖,折媛,巨建涛,等. Nb 微合金化建筑钢筋微观组织与屈服行为的关系[J]. 铸造技术,2007(10):1309-1313.
- [8] 曹磊,王国连,史志强,等. Nb-V-Ti 微合金低碳钢 Q550D 250mm×1820mm 连铸板坯角部横裂纹的控制工艺[J]. 特殊钢,2017,38(5):47-49.
- [9] 王新华,王文军,刘新宇,等. 减少含铌、钒、钛微合金化钢连铸板坯角横裂纹的研究[J]. 钢铁,1998,34(1):24-27.

4 结论

(1)适当高的加热温度,铌在钢中的溶解度增大,有效提高钢筋强度及强屈比,更有利于抗震钢筋的生产。

(2)合理降低精轧前和终轧后的控冷温度,晶粒尺寸变小,钢筋强度提高,塑性相应降低。

(3)铌微合金化钢筋的时效锈蚀试验表明,轧后控冷温度(上冷床温度)840 ~ 860 ℃的钢筋自然时效锈蚀严重,而上冷床温度 870 ~ 940 ℃的钢筋时效后无明显锈迹,最佳控冷工艺设定上冷床温度 870 ~ 890 ℃为宜。

(4)该含铌 HRB400E 试验钢在加热温度 1 140 ~ 1 170 ℃,开轧温度 1 040 ~ 1 060 ℃,上冷床温度 870 ~ 890 ℃的最佳工艺条件下,得到的最佳力学性能指标为屈服强度 450 ~ 475 MPa,抗拉强度 600 ~ 640 MPa,伸长率 20% ~ 25.5%,强屈比在 1.35 ~ 1.40,屈特比 1.12 ~ 1.19。

(5)该铌微合金化钢的析出物主要为 Nb(C,N),析出物尺寸在 300 ~ 600 nm,析出物分布在网状碳化物上、网状碳化物边缘以及晶界附近的晶粒内部。

- [10] 张晓光,王云阁. HRB400 低合金螺纹钢工艺试验研究[J]. 金属制品,2006(6):35-37.
- [11] 沈奎,江卓俊,于学森,等. 微合金化铌钒对高碳钢组织转变影响[J]. 特殊钢,2019,40(4):62-65.
- [12] 张志波,刘清友,张晓兵,等. 加热温度对管线钢奥氏体晶粒尺寸和铌固溶的影响[J]. 钢铁研究学报,2008(10):36-39.
- [13] 刘俊杰,曾群红. 铌微合金化 HRB400 热轧带肋钢筋在高速线材机上的生产实践与探讨[J]. 贵州科学,2007(S1):45-49.
- [14] 叶晓瑜,孙新军,张开华,等. 控轧控冷工艺对抗 H₂S 腐蚀 X70 管线钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2019,40(6):55-59.

杨伟勇(1985-),男,硕士(2011年燕山大学),工程师,2008年东华理工大学(本科)毕业,特殊钢控轧控冷工艺研究。
E-mail:wyyang1012@126.com

收稿日期:2020-06-05