

热机轧制工艺下 $\Phi 8$ mm规格630 MPa高强度盘条钢筋生产实践

王小燕, 王志衡, 杨文博

宝武集团鄂城钢铁有限公司制造管理部, 湖北 鄂州

收稿日期: 2025年2月6日; 录用日期: 2025年3月17日; 发布日期: 2025年3月26日

摘要

为适应国家节能环保要求及建筑用钢筋市场发展需求, 结合宝武集团鄂城钢铁有限公司高线产线热机轧制技术改造以后的能力提升, 根据开发HRB500E的技术经验, 采用NbV复合钢坯和VN微合金化钢坯进行了 $\Phi 8$ mm规格630 MPa高强度盘条钢筋的试制。对比分析两种成分下钢筋头部、中部、尾部的力学性能、金相组织, 明确了VN微合金化工艺的可行性, 并对以后的批量生产提出了优化建议。

关键词

热机轧制, VN微合金化, $\Phi 8$ mm规格, 630 MPa高强度盘条钢筋, 力学性能, 金相组织

Production Practice of $\Phi 8$ mm 630 MPa High-Strength Wire Rod Steel Bar under Hot Rolling Process

Xiaoyan Wang, Zhiheng Wang, Wenbo Yang

Manufacturing Management Department of Baowu Group Echeng Iron & Steel Co., Ltd., Ezhou Hubei

Received: Feb. 6th, 2025; accepted: Mar. 17th, 2025; published: Mar. 26th, 2025

Abstract

In order to meet the national requirements for energy conservation and environmental protection, as well as the development needs of the steel bar market for construction, and in combination with the improved capacity of Baowu Group Echeng Iron and Steel Co., Ltd.'s high-speed production line after the transformation of thermal rolling technology, based on the technical experience of developing HRB500E, NbV composite steel billets and VN microalloyed steel billets were used for the trial

production of 630 MPa high-strength wire rod steel bars with a diameter of 8 mm. By comparing and analyzing the mechanical properties and metallographic structures of the steel bar head, middle, and tail under two different components, the feasibility of VN microalloying process was clarified, and optimization suggestions were proposed for future mass production.

Keywords

Hot Rolling, VN Microalloying, Specification of $\Phi 8$ mm, 630 MPa High-Strength Wire Rod Steel Bar, Mechanical Properties, Metallographic Structure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢铁行业作为资源密集型产业，近年来面临着绿色转型、低碳发展的挑战，而作为建筑结构用量最大的热轧带肋钢筋也开始向强度更高、塑性更好、性能更稳定的方向发展。我国科研院所及部分钢铁企业近年来在推广 400 MPa 与 500 MPa 级别热轧带肋钢筋的同时，已经对 600 MPa 及以上级别高强钢筋进行了大量研究，并取得了显著成效。600 MPa 及以上高强钢筋具有强度高、节省钢材用量、施工方便等优越性，是一种更节约、更高效的新型建筑材料，相比目前国内使用的 400 MPa 与 500 MPa 级钢筋，可分别节约钢筋用量 39% 和 15%，节能减排效果显著。在建筑工程领域中推广使用 600 MPa 及以上高强钢筋，可解决建筑结构中“肥梁胖柱”的问题，增加建筑使用面积，提高建筑使用功能[1]。目前马钢、韶钢、昆钢、陕钢、沙钢、永钢等相关钢铁企业均已成功研发出 630 MPa、635 MPa 以及 650 MPa 级别热轧带肋钢筋，并应用于道路交通中大跨度混凝土结构、国家重点工程、公共设施、军事与人防工程等重要领域[2]。

宝武集团鄂城钢铁有限公司(以下简称鄂钢)高线产线 2000 年投产，主要产品牌号为 HRB400E、HRB500E，规格为 $\Phi 6$ mm~ $\Phi 12$ mm，具备 $\Phi 6$ mm~ $\Phi 16$ mm 规格 HRB400E、HRB500E、HRB600 以及 630MPa 热轧带肋盘条钢筋的生产能力且大量应用于市场建筑结构，获得用户好评。在建筑钢筋市场下行的情况下，为了进一步降低盘条钢筋成本、稳定圆钢产品质量、提升产能，鄂钢于 2023 年年初进行了高线产线热机轧制技术改造，对加热炉、预精轧机组、精轧机组、水冷装置、风冷线等关键设备进行了提升改造。2023 年 4 月份开始研究热机轧制工艺下盘条钢筋的合金优化工作，并先后成功开发 $\Phi 6$ mm~ $\Phi 12$ mm 规格 HRB400E、HRB500E 牌号热轧带肋盘条钢筋，产品尺寸、力学性能、金相组织均符合国家标准。

为了继续保持公司原有 $\Phi 6$ mm~ $\Phi 10$ mm 规格 630 MPa 热轧带肋盘条钢筋的市场占比，进一步提升高强度建筑用钢筋市场竞争力，结合高线产线现有的设备装置、工艺技术和操作水平，在 HRB500E 工艺基础上，用原高线采用的 NbV 复合钢坯和 VN 微合金化钢坯对 $\Phi 8$ mm 规格 630 MPa 高强度盘条钢筋进行了试制开发，并采用拉伸试验机、金相显微镜等设备对同圈钢筋的头部、中部、尾部力学性能、显微组织等进行了检验分析，为后期的稳定化生产提供了工艺参考。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验用坯料

实验用钢坯为尺寸 160 mm × 160 mm × 9000 mm 的连铸钢坯，化学成分考虑采用高线改造前使用的

NbV 复合和 VN 微合金化两种成分。

由于 630 MPa 以上级别超高强度盘条钢筋市场需求量相对较少, 考虑到钢坯混浇以及原产线下控轧控冷能力, 2023 年高线改造以前盘条钢筋采用与直条钢筋相同的 NbV 复合成分。高线热机轧制改造后, 新建了加热炉且增加了轧制道次与水冷回火次数, 提升了加热能力与控冷能力, 有利于合金元素的固溶、析出以及晶粒细化。通过研究 C、Si、Mn、V、N 等元素对钢筋性能的作用机理以及分析热机轧制改造后 HRB500E 盘条钢筋工艺、力学性能, 最终设计了 VN 微合金化成分。具体实验用钢坯成分见表 1 所示。

Table 1. Chemical composition of steel billet

表 1. 钢坯化学成分

钢种	化学成分(质量分数)/%							
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ceq
NbV 复合	0.22~0.28	0.50~0.80	1.40~1.60	≤0.045	≤0.045	0.120~0.160	0.010~0.025	0.50~0.58
VN 微合金化	0.22~0.28	0.50~0.80	1.40~1.60	≤0.045	≤0.045	≤0.120	/	0.50~0.58

2.2. 工艺流程

HRB600 高强度盘条钢筋生产工艺流程如下: 高炉铁水→转炉冶炼→LF 炉精炼→连铸→钢坯检验→钢坯加热炉加热→高线轧制(控轧控冷)→风冷→集卷→检验入库。

2.2.1. 转炉冶炼

将合格的提水与废钢一起在 130 t 氧气转炉中进行顶底复合吹炼, 终点控制要求质量分数为: $W(C) \geq 0.06\%$, $W(P) \leq 0.03\%$ 。出钢过程使用硅铁、硅锰合金、钒合金进行脱氧合金化, 全程使用底吹氩工艺, 促进钢水成分、温度的均匀和非金属夹杂物的上浮排除。

2.2.2. LF 炉精炼

精炼过程进行成分微调, 对钢水温度进行控制, 精炼终点钢水成分达到成分目标控制要求, 温度控制在 1565~1580℃, 精炼时间 30 min 以上, 以保证钢水连铸稳定性。

2.2.3. 连铸

浇铸在 7 机 7 流连铸机上进行, 钢坯断面为 160 mm × 160 mm 方坯, 全程保护浇铸, 中包过热度 20~40℃, 拉速为 2.7~3.5 m/min。

2.2.4. 加热工艺

因为铌的碳化物和氮化物在奥氏体中的溶解度相对较低, 需要通过较高的加热温度来保证溶解, 而钒在奥氏体中有相当高的溶解度, 且即使温度低至 1050℃也可以溶解。为了保证两种成分的钢坯都能形成碳氮化物, 所以加热温度设计时要比 HRB500E 高, 一般控制在 1100~1200℃, 加热时间也较 HRB500E 长 30 min 以上, 确保钢坯开轧温度在 1020℃以上。综上所述制定的加热制度见表 2 所示。

Table 2. Heating system of steel billets

表 2. 钢坯加热制度

钢种	加热温度/℃	加热时间/min	开轧温度/℃
NbV 复合	1150~1200	≥90	≥1050
VN 微合金化	1100~1200	≥90	≥1020

2.2.5. 控轧控冷工艺

因热轧带肋钢筋的微观组织要求为铁素体 F 加珠光体 P, 小规格盘条钢筋在生产过程中因尺寸小, 冷却速率相对较快, 如果控冷温度过低, 微观组织中容易出现贝氏体或马氏体, 虽然可以提高强度, 但会影响拉伸曲线的屈服平台以及塑性, 因此入精轧温度、入减径机温度、吐丝温度等过程参数相对 HRB400E 盘条要高, 可以参照 HRB500E 轧制要点设定控制在 880℃ 以上[3]。综上所述制定的控轧控冷制度见表 3 所示。

Table 3. Controlled rolling and colling system

表 3. 控轧控冷制度

钢种	进精轧温度/°C	进减径机温度/°C	吐丝温度/°C
NbV 复合	880~940	860~920	880~920
VN 微合金化	880~940	860~920	880~920

2.2.6. 风冷工艺

经过吐丝以后的盘卷在斯太尔摩风冷线上进行风冷, 因盘卷平铺在风冷线上必然存在搭接点就会导致同一线圈的冷却速率不同, 辊道速度的快慢会影响线圈与线圈之间的距离, 风机的开启大小则会影响微观组织的相变, 因此风冷工艺至关重要。本次试制, 两种成分的钢筋均采用同样的控冷工艺, 开第一组风机, 按照中间风机开口度小, 两边风机开口度大来控制, 确保控冷效果相同。

3. 实验结果与讨论

3.1. 力学性能

3.1.1. NbV 复合

根据制定的炼钢工艺、轧钢工艺进行 $\Phi 8$ mm 规 630 MPa 高强盘条钢筋试制, 得到了 NbV 复合成分钢筋。为了检验钢筋性能稳定性, 从同一卷钢筋的头部、中部、尾部各取一整圈试样, 将每整圈试样剪切成 8 段并矫直以后按照 GB/T 28900-2022 《钢筋混凝土用钢材试样方法》进行力学性能试验, 数据见表 4 所示, 其中屈服强度最低、最高的拉伸曲线见图 1 所示。

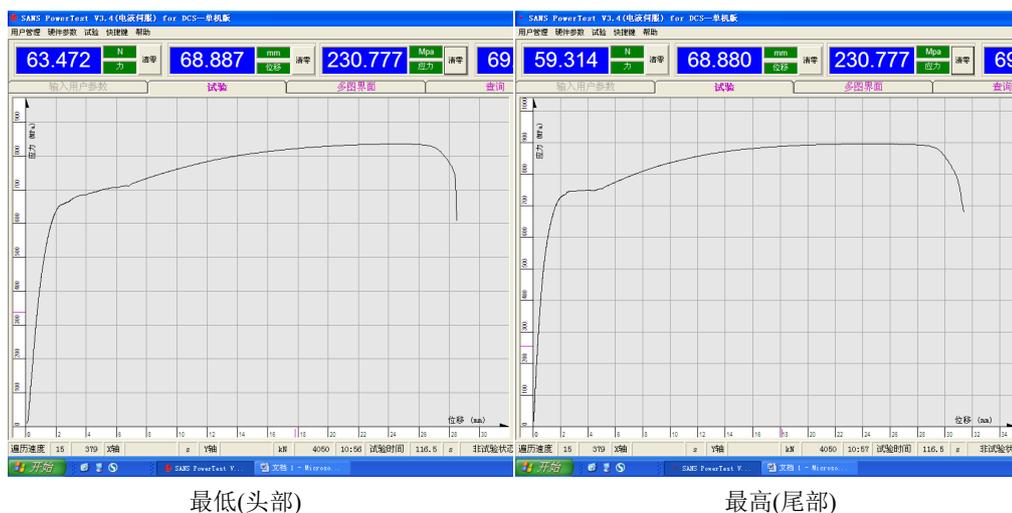


Figure 1. Tensile curves of NbV composite wire rod steel

图 1. NbV 复合盘条钢筋的拉伸曲线

Table 4. Mechanical properties of NbV composite wire rod steel
表 4. NbV 复合盘条钢筋的力学性能

钢种	部位	下屈服强度 R_{eL} /MPa			抗拉强度 R_m /MPa			强屈比		
		最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
NbV 复合	头	654	724	691	828	872	853	1.204	1.277	1.236
	中	682	725	703	838	867	857	1.196	1.252	1.219
	尾	702	736	723	869	896	887	1.217	1.238	1.227
	汇总	654	736	704	828	896	864	1.196	1.277	1.227
技术要求		≥630			≥790			/		

从表 4、图 1 可以看出：

1) 头部、中部、尾部三圈累计 24 个数据的屈服强度、抗拉强度全部满足技术要求，且富余充足，符合用户要求，但是波动较大，下屈服强度 R_{eL} 最小值 654 MPa，最大值 736 MPa，抗拉强度 R_{eL} 最小值 828 MPa，最大值 896 MPa，屈服强度波动达到 82 MPa，抗拉强度波动 68 MPa。

2) 从检验部位来看，头部性能最低，下屈服强度均值 691 MPa，中部次之，下屈服强度均值 703 MPa，尾部最高，下屈服强度均值 723 MPa，头部、中部屈服强度均值相差在 15 MPa 以内，尾部均值较头部高 30 MPa 以上。

3) 从强屈比结果来看，该成分工艺下强屈比最小值 1.196，最大值 1.277，均值 1.227，不能满足抗震能力要求的 ≥ 1.25 。

4) 从拉伸曲线来看，下屈服强度 R_{eL} 最小值 654 MPa 的头部拉伸曲线平台不明显，下屈服强度 R_{eL} 最大值 736 MPa 的尾部拉伸曲线平台相对明显。

3.1.2. VN 微合金化

根据制定的炼钢工艺、轧钢工艺进行 $\Phi 8$ mm 规 630 MPa 高强盘条钢筋试制，得到了 VN 微合金化成分钢筋。为了检验钢筋性能稳定性，与 NbV 复合成分钢筋相同，从同一卷钢筋的头部、中部、尾部各取一整圈试样，将每整圈试样剪切成 8 段并矫直以后按照 GB/T 28900-2022《钢筋混凝土用钢材试样方法》进行力学性能试验，数据如表 5 所示，其中下屈服强度最低、最高的拉伸曲线如图 2 所示。

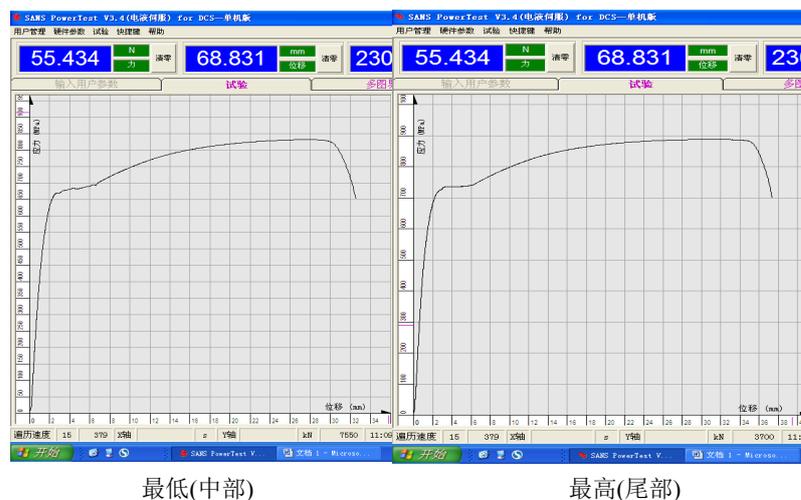


Figure 2. Tensile curves of VN microalloyed wire rod steel
图 2. VN 复合盘条钢筋的拉伸曲线

Table 5. Mechanical properties of VN microalloyed wire rod steel
表 5. VN 微合金化盘条钢筋的力学性能

钢种	部位	下屈服强度 R_{eL}/MPa			抗拉强度 R_m/MPa			强屈比		
		最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
VN 微合金化	头	684	715	699	868	895	878	1.239	1.269	1.257
	中	680	698	692	839	871	861	1.225	1.259	1.244
	尾	705	721	713	874	888	879	1.221	1.245	1.234
	汇总	680	721	701	839	895	873	1.221	1.269	1.245
技术要求		≥ 630			≥ 790			/		

从表 5 可以看出:

1) 头部、中部、尾部三圈累计 24 个数据的屈服强度、抗拉强度全部满足技术要求,且富余充足,相对 NbV 复合成分钢筋来说性能波动小一些,下屈服强度 R_{eL} 最小值 680 MPa,最大值 721 MPa,抗拉强度 R_m 最小值 839 MPa,最大值 895 MPa,屈服强度波动达到 41 MPa,抗拉强度波动 56 MPa。

2) 从检验部位来看,中部性能最低,头部次之,尾部最高。屈服强度方面中部均值较头部均值低 7 MPa,较尾部均值低 21 MPa;抗拉强度方面头部均值和尾部均值相差不大,中部均值较尾部低 18 MPa。

3) 从强屈比结果来看,该成分工艺下强屈比最小值 1.221,最大值 1.269,均值 1.245,虽然仍不能满足 ≥ 1.25 的抗震能力要求,但均值较 NbV 复合成分的强屈比均值高 0.018。

4) 从拉伸曲线来看,VN 微合金化成分工艺的下屈服强度 R_{eL} 最小值和最大值的拉伸曲线平台相对 NbV 复合成分的平台明显。

3.2. 金相组织

根据力学性能检验结果,从两种成分方案中分别选取下屈服强度最低、最高的合计四支钢筋试样进行金相组织检验。金相组织按照国家标准 GB/T 1499.2《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》中的宏观金相、微观组织实验方法,用锯切机将钢筋剪切成圆柱形试样并研磨抛光,使用 4%硝酸酒精溶液侵蚀 5s,得到 NbV 复合成分和 VN 微合金化成分钢筋的表面和芯部的微观组织见图 3、图 4 所示。

采用 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》、GB/T6394-2017《金属平均晶粒度测定方法》标准中的对比法进行分析,NbV 复合成分和 VN 微合金化成分钢筋的微观组织与晶粒度情况见表 6 所示。

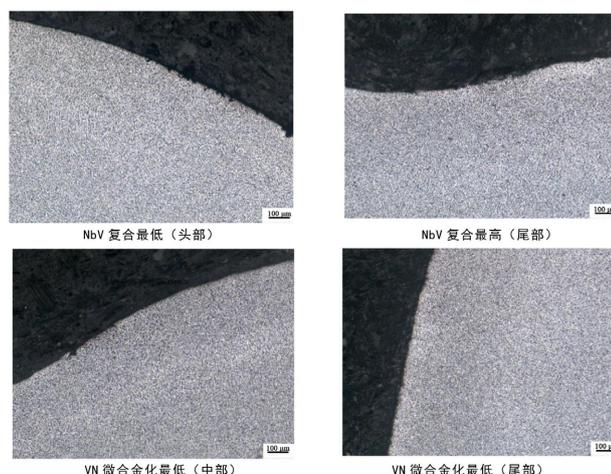


Figure 3. Microstructure of steel bar surface 100×
图 3. 钢筋表面微观组织 100×

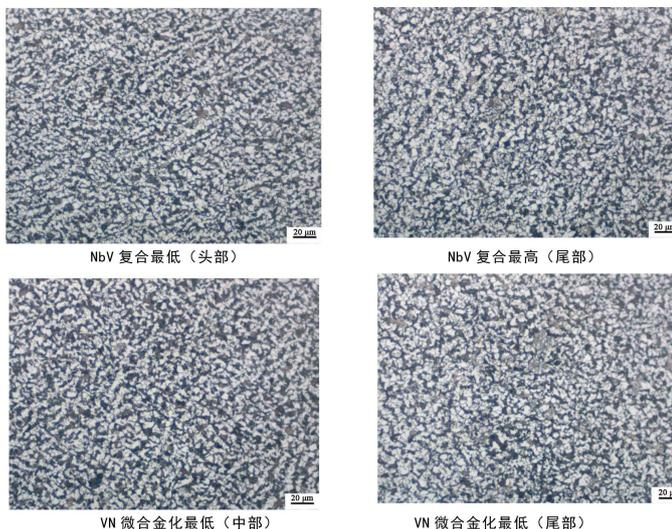


Figure 4. Microstructure of rebar core 500×
图 4. 钢筋芯部微观组织 500×

Table 6. Microstructure and Ferritic grain size of NbV composite and VN microalloyed wire rod steel
表 6. NbV 复合和 VN 微合金化盘条钢筋的微观组织与铁素体晶粒度

钢种	取样部位	表面组织	芯部组织	芯部铁素体晶粒度
NbV 复合	头部	F + P	F + P	11.0
	尾部	F + P	F + P	11.0
VN 微合金化	中部	F + P	F + P	11.0
	尾部	F + P	F + P	11.0

从上述微观组织图、表可知，两种成分工艺方案下，钢筋的头部、中部、尾部的金相组织是均匀且细小的铁素体加珠光体组织，钢筋未出现贝氏体和回火马氏体组织，铁素体晶粒度达到 11.0 级，达到钢筋国家标准要求。

4. 实际应用效果

实验结果表明，热机轧制工艺下，采用 NbV 复合成分和 VN 微合金化成分可以生产 $\Phi 8$ mm 规格 630 MPa 级别高强度非抗震级别盘条钢筋。

(1) 从屈服强度抗拉强度富余量来看，VN 微合金化成分钢筋下屈服强度最小值比 NbV 复合成分要高 26 MPa，抗拉强度最小值高 11 MPa。

(2) 从屈服强度抗拉强度稳定性来看，VN 微合金化成分钢筋下屈服强度头中尾整体波动比 NbV 复合成分要小 41 MPa，抗拉强度波动小 12 MPa。

(3) 从拉伸曲线来看，VN 微合金化成分钢筋的拉伸曲线平台比 NbV 复合成分的平台明显，有利于下屈服强度的读取。

(4) 从钢坯成本来测算，VN 微合金化成分钢坯与 NbV 复合成分钢坯相比，没有添加 Nb 合金且 V 合金元素低，因此 VN 微合金化成分钢坯可以节约生产成本。

按照上述实验方法，采用 VN 微合金化成分工艺小批量试制了 $\Phi 8$ mm 规格的 630 MPa 高强度非抗震盘条钢筋，生产的钢筋力学性能如表 7 所示，未出现因力学性能不合导致的不合格品，且产品金相组织正常，未出现贝氏体及回火马氏体组织。

Table 7. Mechanical properties of $\Phi 8$ mm 630 MPa wire rod steel
表 7. 小批量试制 $\Phi 8$ mm 规格 630 MPa 盘条钢筋的力学性能

钢种	规格/mm	产量/t	R_{eL} 均值/MPa	R_m 均值/MPa	力学性能合格率/%
VN 微合金化	8	140	706	877	100

5. 结论

(1) 当前热机轧制工艺下, 由于增加了水冷段与回复段道次, 通过合适的加热制度和控轧控冷制度, 在取消 Nb 元素并适当降低 V 元素的情况下, 可以充分发挥 VN 化物的弥散析出强化以及不断降温回复过程阻止晶粒长大的晶粒细化作用, 从而达到 $\Phi 8$ mm 规格 630 MPa 盘条钢筋屈服强度、抗拉强度满足技术要求, 且富余量达到 30 MPa 以上。

(2) 当前热机轧制工艺下, 采用 VN 微合金化成分钢坯替代原 NbV 复合成分钢坯, 通过制定相对较高的进精轧温度、进减径机温度、吐丝温度以及合适的斯太尔摩风冷工艺, 生产的 $\Phi 8$ mm 规格 630 MPa 非抗震盘条钢筋显微组织均为铁素体加珠光体, 且晶粒组织均匀细小, 钢筋内部质量较好。

(3) 当前热机轧制工艺下, 采用 VN 微合金化成分钢坯替代原 NbV 复合成分钢坯, 头部、中部、尾部屈服强度、抗拉强度波动变小, 但是中部性能与头尾相比偏低, 后期需要进一步优化斯太尔摩风冷线风冷工艺, 适当提高中部钢筋的冷却速度。

(4) 当前热机轧制工艺下, 采用 VN 微合金化成分钢坯替代原 NbV 复合成分钢坯, 抗震能力指标强屈比稍微提升, 但是仍然达不到用户个性化的抗震性能要求。后期如需满足强屈比 ≥ 1.25 的要求, 还需要进一步优化工艺提高抗拉强度。

参考文献

- [1] 陈伟, 张卫强, 吴光耀, 赵宇, 张瑜. 富氮钒铌微合金化控冷工艺制备 600 MPa 级抗震钢筋应用研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 95-100.
- [2] 杨文博, 李拥山, 刘复兴, 王志衡, 王小燕. 630 MPa 级高强度抗震钢筋开发试制[J]. 金属制品, 2024, 50(3): 26-34.
- [3] 陈情华. $\Phi 6$ mm 盘螺 HRB500E 热轧带肋螺纹钢的开发[J]. 山西冶金, 2023, 46(5): 44-46.