



## 桥梁缆索用超高强 92Si 盘条热轧过程 组织性能演变规律

李 阳<sup>1</sup>, 刘晋源<sup>2</sup>, 徐 凯<sup>1</sup>, 陈殿清<sup>1</sup>, 潘晓坤<sup>2</sup>, 张朝磊<sup>2</sup>

(1 青岛特殊钢铁有限公司线材研究所, 青岛 266000; 2 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083)

**摘 要:**针对桥梁缆索用超高强 92Si 盘条全流程热轧过程中组织性能演变规律, 采用力学性能检测、微观组织表征等方法分析了热轧过程中连铸坯、中轧前样品、精轧前样品及成品盘条。结果表明: 随着轧制进行强塑性逐渐提升, 组织细化使得成品盘条相比于铸坯抗拉强度提升了 45%。由铸坯到成品盘条, 片层间距细化了 76%, 球团尺寸细化了 78%。热轧制全过程中, 珠光体片层间距和球团尺寸对屈服强度贡献占比分别为 80% 和 20%。析出相主要为 Ti、V 的碳化物, 而由于轧制过程温度较高, 铸坯中部分析出相发生回熔再析出, 从而使得盘条中析出相数量及尺寸较小。

**关键词:**桥梁缆索; 92Si 盘条; 热轧; 组织性能演变

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00262 **中图分类号:**TG142. 1

## Evolution Law of Microstructure and Properties during Hot-rolling Process of Ultra-high-strength 92Si Wire Rod for Bridge Cables

Li Yang<sup>1</sup>, Liu Jinyuan<sup>2</sup>, Xu Kai<sup>1</sup>, Chen Dianqing<sup>1</sup>, Pan Xiaokun<sup>2</sup>, Zhang Chaolei<sup>2</sup>

(1 Wire Research Institute, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266000, China; 2 College of Carbon Neutrality, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the evolution law of microstructure and properties during the entire hot rolling process of ultra-high strength 92Si wire rod, methods such as mechanical property testing and microstructure characterization were used to analyze the continuous casting billet, samples before intermediate rolling, samples before finishing rolling, and finished wire rod during the hot rolling process. The results showed that with the gradual improvement of strength and plasticity during rolling, the microstructure refinement resulted in a 45% increase in the tensile strength of the finished wire rod compared to the casting billet. From casting billet to finished wire rod, the interlayer spacing has been refined by 76%, and the pellet size has been refined by 78%. During the entire rolling process, the contribution of pearlite interlayer spacing and pellet size to yield strength were 80% and 20%, respectively. The precipitated phases were mainly carbides of Ti and V, and due to the high temperature during the hot rolling process, the some precipitated phases in the middle of the cast billet underwent dissolution and re-precipitation, resulting in a smaller number and size of precipitated phases in the wire rod.

**Key Words:** Bridge Cables; 92Si wire rod; Hot-rolling; Evolution of Microstructure and Properties

21 世纪以来, 桥梁缆索用镀锌钢丝强度已经从南京长江二桥的 1 600 MPa 级别发展到张靖皋大桥的 2 200 MPa 级别<sup>[1-2]</sup>。大跨度桥梁的建设推动了桥梁缆索用钢丝行业的快速发展, 从而进一步推动着原料盘条强度的提升<sup>[3-4]</sup>。对于盘条而言, 提高其 C 含量是当前提升强度最为经济有效的方式之一<sup>[5]</sup>。目前, 高碳盘条中的 C 含量已经从 0.82% 提升到了 0.92%, 甚至达到了 1.00%<sup>[6]</sup>, 这虽然提高了盘条强度, 但由于 C 含量过高仅能通过在线/离线盐

浴、离线铅浴方式生产以抑制盘条中网状渗碳体的析出<sup>[7]</sup>。

目前关于桥梁缆索用盘条的研究多集中于 82B、87MnSi、87Mn 盘条及其冷拉拔工艺性能。屈小波等<sup>[8]</sup>研究了 87MnSi 盘条拉拔过程中组织变化, 发现盘条中的渗碳体在冷拉拔过程中发生扭转弯曲, 且部分破碎溶解, 并在后续热镀锌过程中发生球化。姚赞等<sup>[9]</sup>研究了镀锌时间对于钢丝组织性能影响, 发现随着镀锌时间的增加, 钢丝的扭

转性能急剧下降。罗峰<sup>[10]</sup>研究了全流程下 92Si 盘条非金属夹杂物的演变,发现  $Al_2O_3$  硬质核心包裹 MnS 夹杂形成的复合夹杂物在一定程度上实现了与钢基体的协同变形。胡璠等<sup>[11]</sup>研究了 Mg 对 82B 镀锌钢丝表面耐蚀性能影响,研究发现镀层中加入 Mg 元素后,可有效阻止电化学腐蚀的发生,提高镀层的耐蚀性能。对于桥梁缆索用盘条,控轧控冷工艺是调控其组织性能的重要手段之一<sup>[12]</sup>。而当前关于桥梁缆索用 92Si 盘条热轧全流程力学性能及微观组织结构演变仍未受到广泛关注。

本文研究了高碳盘条 92Si 在轧制过程中的微观组织结构、力学性能变化,及连铸坯与盘条中的析出相特征,揭示了轧制过程中微观组织结构演变规律,为 92Si 高碳盘条质量的进一步提升提供了技术支撑。

## 1 实验材料及方法

实验原材料为超高强度桥梁缆索镀锌钢丝用盘条轧制过程样品,盘条生产采用一火成材工艺,并在热轧后在 540 °C 下进行在线盐浴热处理。其中,连铸坯在加热炉中的预热、加热、均热段温度分别为 (920±20)、(1 160±20)、(1 210±20) °C,在 1 000 °C 左右开轧,之后基本在 900~920 °C 下进行轧制。分别取轧制过程中 180 mm×240 mm 连铸小方坯、 $\phi 90$  mm 中轧前样品、 $\phi 40$  mm 精轧前样品、 $\phi 14$  mm 成品盘条。92Si 钢具体化学成分(质量分数)为 0.95C, 0.99Si, 0.54Mn, 0.36Cr, 0.032V, 0.008P, 0.003S。

(1) 力学性能测试: 分别在不同样品上切取  $\phi 5$  mm 标准拉伸试样,之后通过万能力学试验机进行拉伸性能测试。

(2) 微观组织结构分析: 在不同样品上通过线

切割切取  $\phi 10$  mm×10 mm 金相样品,通过磨抛机将金相样品表面抛光,之后采用 4% 硝酸酒精对样品表面进行侵蚀,通过扫描电镜 SEM (Scanning electron microscope) 观察样品微观组织结构特征。通过 Nano measure 软件分别统计多张扫描电镜图片,从而确定片层间距及珠光体球团尺寸。

电子背散射衍射 EBSD (Electron backscattered diffraction) 实验表征: 在不同样品上切取 10 mm×10 mm×2 mm 样品,通过磨抛机对表面样品进行机械抛光,之后通过振动抛光机对去除表面应力制备 EBSD 试样。通过 Nano measure 软件统计 EBSD 图片,确定珠光体节尺寸。

析出相形貌表征: 分别对连铸坯和盘条的当浸蚀后的金相样品进行表面喷碳,之后将其浸泡在 4% 硝酸酒精中,进行复型萃取实验制备透射样品。通过透射电镜 TEM (Transmission electron microscope) 对连铸坯与盘条中析出相特征进行观察。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 力学性能演变规律

连铸坯、中轧前样品、精轧前样品、成品盘条标准拉伸试样检测力学性能结果如图 1 所示。铸坯抗拉强度为 1 098 MPa,中轧前抗拉强度为 1 203 MPa,精轧前抗拉强度为 1 255 MPa。随着轧制过程的进行,92Si 盘条的强塑性均在提高。在轧制过程中抗拉强度和断面收缩率均有提升。相比于连铸坯样品,成品盘条强度提升了 45%。中轧前样品、精轧前样品与成品盘条的断后伸长率相差不大,均在 11%~12% 之间,而远高于铸坯的断后伸长率。轧制过程样品的断面收缩率增加趋势与强度提升趋势基本一致。

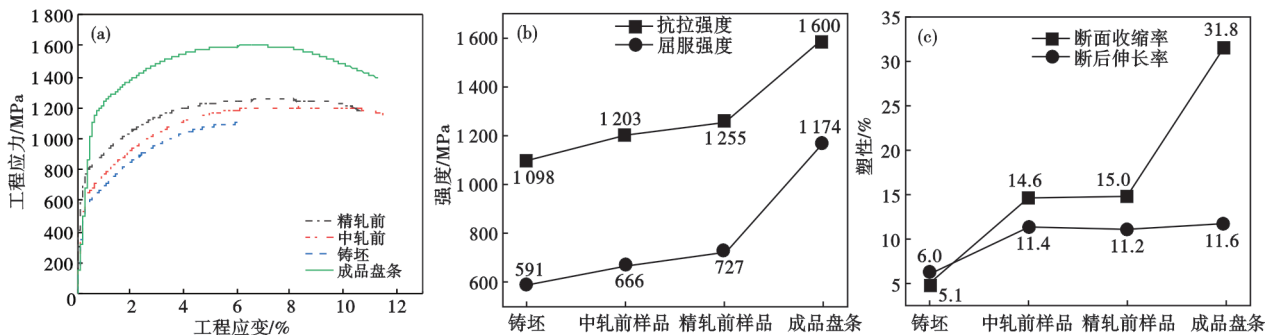


图 1 热轧全流程 92Si 样品的室温拉伸力学性能曲线: (a) 工程应力-应变, (b) 强度, (c) 塑性

Fig. 1 Tensile mechanical properties curve of 92Si sample at room temperature : (a) engineering stress-strain, (b) strength, (c) plasticity

### 2.2 微观组织演变规律

通过扫描电镜对金相样品进行分析,微观结构如图 2 所示。连铸坯中有非常严重的网状渗碳体,在拉伸过程中,网状渗碳体不易变形,从而导致铸坯断后伸长率较低。随着轧制过程的进行,可见珠光体片层及珠光体球团尺寸降低。铸坯、中轧前样品、精轧前样品、成品盘条的片层间距分别为(320±40)、(250±20)、(212±32)、(75±10) nm。可见相比于连铸坯,成品盘条片层间距细化了 76%。随着轧制的进行,片层间距呈现细化趋势。连铸坯、中轧前样品、精轧前样品、成品盘条的球团尺寸分别为(15.4±8.1)、(10.6±5.2)、(8.9±3.4)、(3.4±1.8) μm。相比于连铸坯,成品盘条球团尺寸细化了 78%。

根据 Eric M. Taleff<sup>[13]</sup>提出的屈服强度与片层间距、球团尺寸之间的关系,具体见式(1)。

$$\sigma_{ys} = 310(2^{\frac{1}{2}}\lambda)^{-\frac{1}{2}} + 460PS^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中,λ 为片层间距,μm; PS 为珠光体球团尺

寸,μm。根据所测片层间距和珠光体球团尺寸代入式(1),分别计算连铸坯、中轧前、精轧前、成品盘条的屈服强度为 578、662、723、1 201 MPa,与实验结果基本一致。片层间距与珠光体球团对屈服强度贡献见表 1。

表 1 热轧全流程 92Si 样品的强化机理计算

Table 1 Calculation of strengthening mechanisms of 92Si sample in the entire hot rolling process

样品	片层间距贡献值		球团尺寸贡献		屈服强度计算值/MPa
	具体数值/MPa	占比/%	具体数值/MPa	占比/%	
连铸坯	460	79.5	117	20.5	577
中轧前	521	78.7	141	21.3	662
精轧前	568	78.5	154	21.5	722
盘条	951	79.2	249	20.8	1 200

可见不同样品中片层间距、球团尺寸对于屈服强度贡献基本一致,片层间距贡献占比基本在 80%左右,而球团尺寸占比基本在 20%左右。由于轧制过程中主要是细化晶粒尺寸,可见轧制将球团尺寸

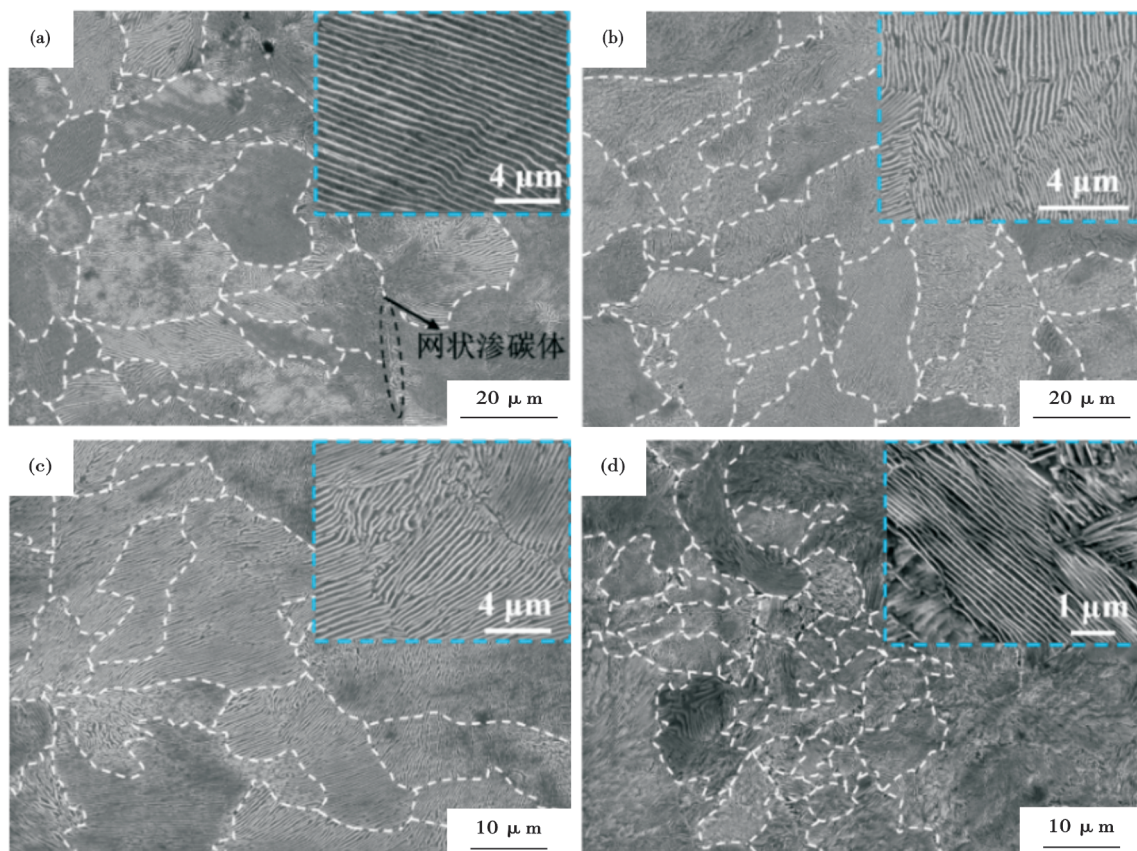


图 2 热轧全流程 92Si 样品显微组织 SEM 形貌:(a)180 mm×240 mm 连铸坯,(b)φ90 mm 中轧前样品,(c)φ40 mm 精轧前样品,(d)φ14 mm 成品盘条

Fig. 2 SEM morphology of microstructure of 92Si sample in the entire hot rolling process: (a) 180 mm×240 mm casting billet, (b) φ90 mm sample before intermediate rolling, (c) φ40 mm sample before precision rolling, (d) φ14 mm finished wire rod

对于屈服强度的贡献提升了 132 MPa。

对于珠光体而言,除了片层间距和球团尺寸,也往往采用 EBSD 表征珠光体节尺寸。Walentek A 等<sup>[14]</sup>结合 SEM 和 EBSD 发现在铁素体取向偏差  $< 13^\circ$  的区域中存在珠光体节,且一个珠光体节往往包含多个珠光体球团<sup>[15]</sup>。珠光体节一般由多个珠光体球团组成。轧制过程样品的 EBSD 形貌如图 3 所示。连铸坯、中轧前样品、精轧前样品、成品盘条的珠光体节尺寸分别为  $(30 \pm 24)$ 、 $(24 \pm 12)$ 、 $(17 \pm 10)$ 、 $(11 \pm 8)$   $\mu\text{m}$ 。通过不同样品的 EBSD 形貌可以更好地对比发现热轧全流程组织细化效果。而不同样品珠光体节尺寸变化与珠光体球团尺寸变化基本一致。可知,随着轧制过程的进行,珠光体微观结构明显细化。

### 2.3 连铸坯与成品盘条析出相对比分析

通过透射电镜观察连铸坯、盘条中的析出相,如图 4 所示。铸坯中析出相形貌如图 4(a-b)所示,析出相尺寸较大,平均尺寸为 59.8 nm。根据析出相 EDS 结果,析出相主要为 Ti、V 的碳化物。盘条中析

出相形貌如图 4(c-d)所示,可见相比于铸坯中析出相数量及尺寸均较低。盘条中析出相的平均尺寸为 36 nm,相比于连铸坯中析出相,尺寸降低了 40%。这可能是由于铸坯在加热炉中加热以及热轧过程中温度较高,部分析出相发生了回熔再析出。

### 3 结论

研究了 1 000  $^\circ\text{C}$  开轧,900~920  $^\circ\text{C}$  轧制,540  $^\circ\text{C}$  在线盐浴处理条件下的 92Si 热轧盘条全流程组织性能演变规律,得到以下结论:

1) 中轧前样品、精轧前样品与成品盘条的断后伸长率相差不大,均在 11%~12% 之间,而远高于铸坯的断后伸长率。这主要是由于连铸坯中存在严重的网状渗碳体使得铸坯在拉伸过程中发生了提前断裂。

2) 随着轧制进行,珠光体结构的细化使得 92Si 盘条的强度塑性不断提升。成品盘条的抗拉强度相比于连铸坯提升了 45%,珠光体球团尺寸细化了 78%,片层间距细化了 76%。不同轧制过

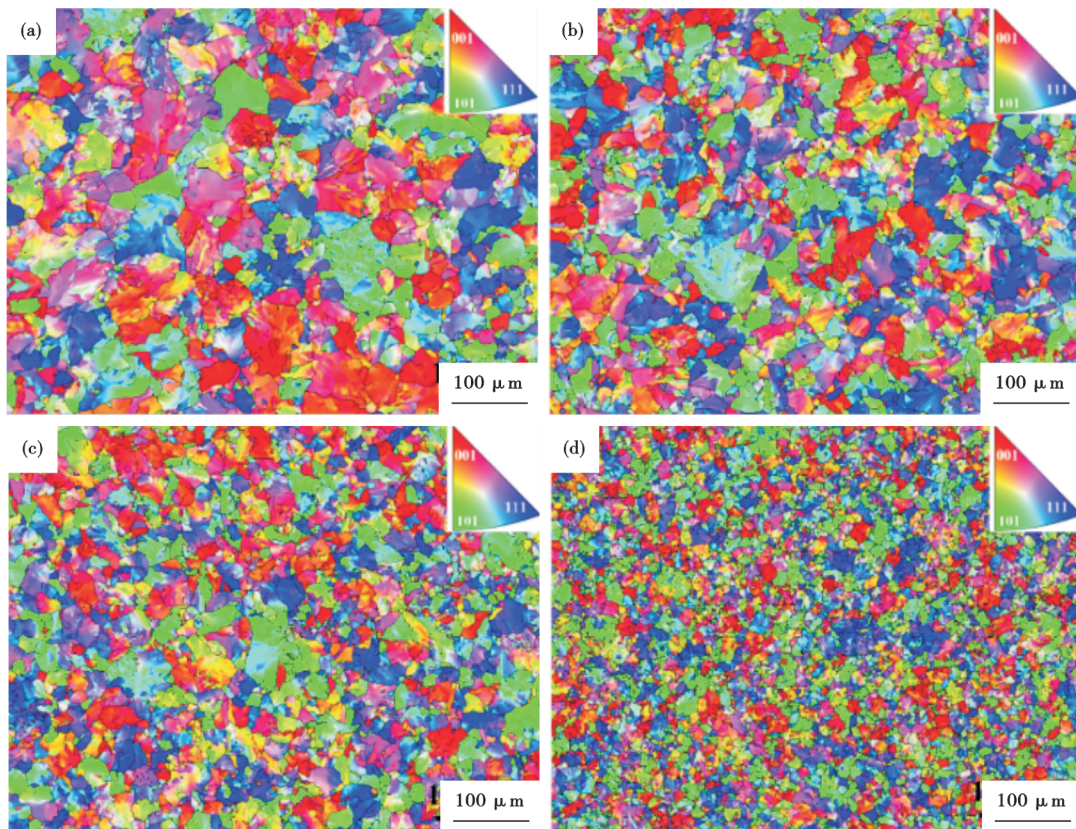


图 3 热轧全流程 92Si 样品的 EBSD 形貌:(a) 180 mm×240 mm 连铸坯,(b)  $\phi 90$  mm 中轧前样品,(c)  $\phi 40$  mm 精轧前样品,(d)  $\phi 14$  mm 成品盘条

Fig. 3 EBSD morphology of 92Si sample in the entire hot rolling process: (a) 180 mm×240 mm casting billet, (b)  $\phi 90$  mm sample before intermediate rolling, (c)  $\phi 40$  mm sample before precision rolling, (d)  $\phi 14$  mm finished wire rod

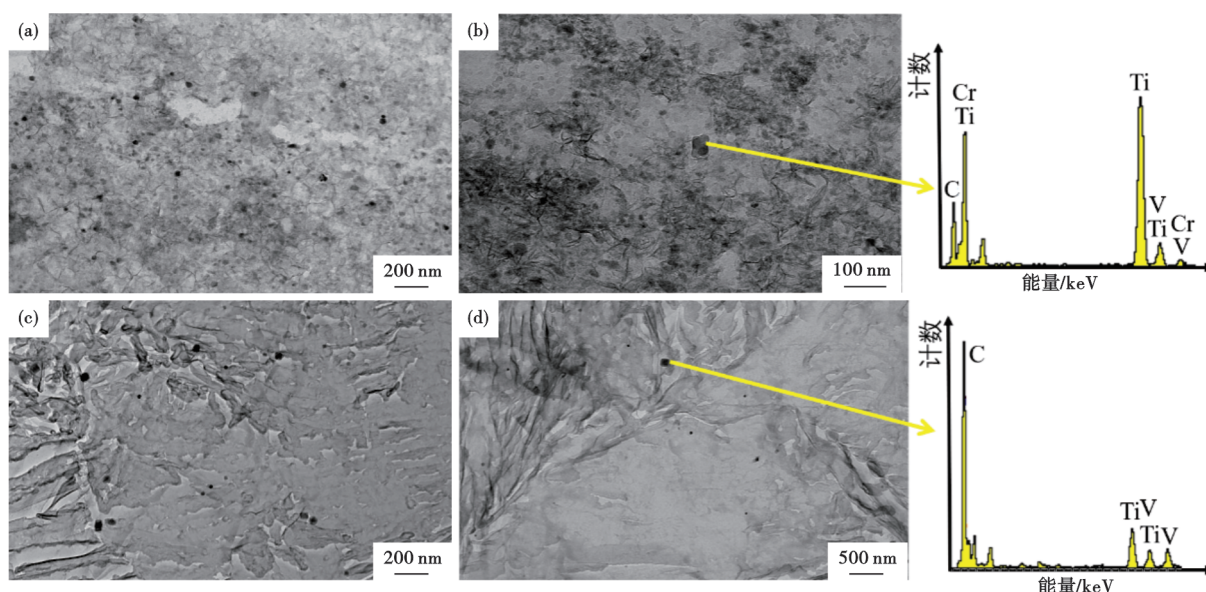


图4 (a~b)92Si连铸坯与(c~d)成品盘条的析出相TEM形貌及EDS能谱

Fig. 4 TEM morphology and EDS spectrum of precipitated phases in (a~b) 92Si casting billet and (c~d) finished wire rod

程样品中片层间距、球团尺寸对屈服强度贡献占比分别为80%、20%。

3) 92Si 盘条及铸坯中析出相主要为Ti、V的碳

化物。相比于连铸坯,成品盘条中析出相数量较少,尺寸减小了40%。这主要是由于热轧过程中温度较高,部分析出相发生了回熔再析出。

#### 参考文献

- [1] 王林烽,周立初,陈华青,等.  $\phi 5.35$  mm-2100 MPa 桥梁缆索用镀锌铝钢丝的工艺与组织性能[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 90-96.
- [2] 冯路路,吴开明,鲁修宇,等. 桥梁缆索用超高强度钢丝的研究现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2020, 39(5): 395-403.
- [3] 刘 祥,孙浩博,张俊峰,等. 高强度桥梁缆索用钢研究现状和发展趋势[J]. 鞍钢技术, 2023(1): 9-13+62.
- [4] 贾 力,胡丞杨,朱晓雄,等. 冷拉拔对Nb微合金化桥梁缆索用钢丝显微组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(7): 947-956.
- [5] Pan X K, Li J C, Zhang C L, et al. Effect of trace niobium on the microstructure and properties of full-pearlite steel used in the high-strength hypereutectoid wire rods [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 954-964.
- [6] 郭洛方,徐 凯,高永彬,等. 盐浴等温热处理对超高强硬线钢100Si组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 84-89.
- [7] 李 阳,甄先锋,王广顺,等. 在线盐浴热处理生产高性能Fe-C-Mn-Si高碳钢线材[J]. 中国冶金, 2023, 33(4): 104-110.
- [8] 屈小波,王 森,曹 磊,等. 桥梁缆索用87MnSi钢线材微观组织演变对力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 114-118.
- [9] 姚 赞,陈常勇,黄宗泽,等. 镀锌时间对桥梁缆索用钢丝组织及扭转性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(5): 139-148.
- [10] 罗 锋. 92Si桥梁缆索用钢中非金属夹杂物全流程演变研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [11] 胡 璠,徐 巍,王林烽,等. 桥梁缆索钢丝热浸镀Zn-Al-Mg镀层的组织与耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 279-286.
- [12] Nobar A H, Serajzadeh S. Modeling of heat transfer during controlled cooling in hot rod rolling of carbon steels [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(4): 487-492.
- [13] Taleff E M, Syn C K, Lesuer D R, et al. Pearlite in ultrahigh carbon steels: Heat treatments and mechanical properties [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(1): 111-118.
- [14] Walentek A, Seefeldt M, Verlinden B, et al. Electron backscatter diffraction on pearlite structures in steel [J]. Journal of Microscopy, 2006, 224(Pt 3): 256-263.
- [15] Khiratkar V N, Mishra K, Srinivasulu P, et al. Effect of interlamellar spacing and test temperature on the Charpy impact energy of extremely fine pearlite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 622-627.