



热处理工艺对桥梁缆索用超高强度 95Si 盘条组织性能影响

徐凯¹, 刘晋源², 程冉², 李阳¹, 阎超楠¹, 陈殿清¹, 高永彬¹, 左锦中¹, 张朝磊²

(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:为探究在线热处理工艺对桥梁缆索用超高强度 95Si 高碳盘条微观组织及性能的影响, 分别在 530、550、570 °C 盐浴温度下对盘条进行热处理, 通过力学性能测试、显微组织表征等, 研究了盐浴温度对珠光体片层间距、球团尺寸等微观组织特征及强塑性影响规律。结果表明, 随温度升高, 珠光体片层间距从 530 °C 时的 74 nm 增至 570 °C 时的 141 nm, 球团尺寸从 2.4 μm 增至 3.4 μm, 珠光体节尺寸从 20.3 μm 增至 23.6 μm, 且大角度晶界占比逐渐降低; 与此对应, 盘条的抗拉强度从 1 491 MPa 降至 1 374 MPa, 断面收缩率从 38.8% 降至 35.0%。盘条在 530 °C 下达到最佳力学性能, 即具有 1 491 MPa 的抗拉强度和 38.8% 的断面收缩率。可见盐浴温度主要影响盘条片层间距和球团尺寸从而改善其强塑性, 在 530 °C 盐浴温度下, 细化的片层间距与球团使其具有较高的大角度晶界数量与位错密度, 从而实现了强度提升, 同时, 借助大角度晶界对裂纹扩展的阻碍作用改善塑性。

关键词:桥梁缆索; 95Si 盘条; 热处理工艺; 组织性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250508 **中图分类号:**TG161

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure Properties of Ultra-high-strength 95Si Wire Rod for Bridge Cables

Xu Kai¹, Liu Jinyuan², Cheng Ran², Li Yang¹, Yan Chaonan¹, Chen Dianqing¹,
Gao Yongbin¹, Zuo Jinzhong¹, Zhang Chaolei²

(1 Wire Rod Research Institute, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2 Institute of Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the influence of online heat treatment process on the microstructure and properties of 95Si high-carbon wire rods for bridge cables, the wire rods were heat-treated in salt baths at 530 °C, 550 °C and 570 °C respectively. Through mechanical property tests and microstructure characterization, the effects law of salt bath temperature on the microstructure characteristics such as pearlite lamellar spacing and globular size, as well as the strength and plasticity were studied. The results show that with the increase of temperature, the pearlite lamellar spacing increases from 74 nm at 530 °C to 141 nm at 570 °C, the globular size increases from 2.4 μm to 3.4 μm, and the pearlite node size increases from 20.3 μm to 23.6 μm. Meanwhile the proportion of high-angle grain boundaries gradually decreases. Correspondingly the tensile strength of the wire rods decreases from 1 491 MPa to 1 374 MPa, and the reduction of area decreases from 38.8% to 35.0%. The wire rods achieve the best mechanical properties at 530 °C, with a tensile strength of 1 491 MPa and a reduction of area of 38.8%. It can be seen that the salt bath temperature mainly affects the lamellar spacing and globular size of the wire rods, thereby improving their strength and plasticity. At 530 °C salt bath temperature, the refined lamellar spacing and globular size result in a higher number of high-angle grain boundaries and dislocation density, thus achieving strength enhancement. At the same time, the plasticity is improved by the hindrance effect of high-angle grain boundaries on crack propagation.

Key Words: Bridge Cable; 95Si Wire Rod; Salt Bath Temperature; Organizational Performance

自从 21 世纪开始, 由于国内双碳战略需求, 桥梁缆索需要向高强度和轻量化发展, 从南京长江二桥采用 1 600 MPa 级别桥梁缆索, 逐步发展到张靖皋大桥的 2 200 MPa 级别^[1]。目前, 建设的伶仃洋大

桥也为适应轻量化发展拟采用 2 100 MPa 级桥梁缆索, 而计划建设的常泰大桥, 正计划用更高强度的桥梁缆索, 国内头部钢厂均已对超高强度桥梁缆索开展了相关研究与开发^[2]。

作者简介: 徐凯(1977—), 男, 高级工程师; **E-mail:** qgxukai@126.com; **收稿日期:** 2025-07-26

通信作者: 张朝磊(1984—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** zhangchaolei@ustb.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

开发更高强度的钢丝,成为当前桥梁缆索领域面临的重大困难,这一困难也促使国内和国外对超高强度原料盘条研究与开发^[3-4]。对于盘条来说,提高强度可以通过增加C含量来实现^[5]。如今,高碳盘条已经由选用82B发展到92Si,甚至将要开发95Si^[6]。不过,碳含量过高会造成盘条中易析出网状渗碳体等现象,因此,可以通过在线或离线盐浴、离线铅浴的生产方式来抑制这种现象^[7]。

为此,国内开始逐步开发在线、离线盐浴热处理的相关装备与技术,以保障高碳盘条具备较高的强度和塑性^[8-9]。近年来,我国青岛钢铁研发出拥有自主知识产权的在线等温热处理技术及装备^[10],这为高碳盘条的工业化生产打下了基础,同时,也打破了日本企业在高端高碳盘条市场的垄断局面。然而,利用在线等温热处理装备生产高碳盘条时,仍存在强塑性不合格、性能波动较大等问题,关于碳含量为0.95%的高碳盘条的热处理工艺,还有待进一步探索和研究。

通过在实验室进行盐浴热处理实验,研究不同热处理工艺下盘条的组织与性能特征,明确不同热处理工艺对片层间距、球团尺寸等微观组织结构特征的影响,旨在为现场工业化生产提供理论支持。

1 实验材料及方法

实验样品为 $\phi 13\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 一火成材工艺盘条,主要用于生产超高强度桥梁缆索。其生产工艺流程为炼铁→铁水“三脱”处理→钢水初炼(转炉)→炉外精炼→连铸→钢坯修磨→高速连轧→盘条→盐浴处理→包装。其中,铸坯尺寸为 $180\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ 。首先使用马弗炉(炉容量为13L)将盘条加热到 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到奥氏体化温度,保温20 min。之后快速放入到盐浴炉(炉容量为4L)进行等温淬火实验,热处理工艺在530、550、570 $^{\circ}\text{C}$ 盐浴槽中并保温10 min后空冷。并对等温淬火后样品进行力学性能及组织性能检测。检测标准如下GB/T 228.1—2021:《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,规定了金属材料室温拉伸试验的方法和要求,适用于M10等金属材料的拉伸性能检测,该标准于2021年发布。95Si盘条化学成分见表1。

表1 95Si盘条化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 95Si wire rod %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Nb	Ti
0.95	1.21	0.65	0.007	0.001	0.017	0.012	0.35	0.038	0.009	0.0053

1)力学性能测试:从不同热处理工艺处理的样品中制备 $\phi 5\text{ mm}$ 的标准拉伸试样,之后,采用万能力学试验机对样品的拉伸性能开展测定。

2)微观组织结构分析:利用线切割技术,从每个样品中截取尺寸为 $\phi 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的金相试样。试样先由磨抛机进行机械抛光后,再使用4%硝酸酒精溶液对其表面进行腐蚀。利用扫描电镜(SEM)观察试样的微观组织形貌与特征,并通过Nano measure软件对多张SEM图像进行分析,从而统计与分析片层间距与珠光体球团的尺寸。

3)电子背散射衍射(EBSD)实验表征:截取 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的试样,经标准磨抛处理后,用振动抛光机消除表面应力。随后,通过电子背散射衍射(EBSD)观察试样的组织形态,利用Nano measure软件处理EBSD数据,统计盐浴处理后样品中珠光体球团的尺寸。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

95Si盘条在不同热处理工艺下的力学性能检测结果如图1所示。当热处理工艺从 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,抗拉强度由 $1\ 374\text{ MPa}$ 提高到 $1\ 491\text{ MPa}$,断面收缩率由35.0%提高到38.8%。盘条强塑性随热处理工艺降低明显提高。盐浴过程中温度降低 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,抗拉强度提高8.5%,断面收缩率提高10.8%。不同热处理工艺95Si样品拉伸断口形貌如图2所示,放射区占比随热处理工艺降低而降低,当热处理工艺降低至 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,放射区占比仅为58.8%。断口中放射区占比越少则塑性越好^[11],断口宏观特征与断面收缩率的变化趋势一致。

2.2 热处理工艺对微观组织影响

95Si盘条金相样品组织形貌如图3所示。可见随着热处理工艺降低珠光体球团尺寸和珠光体片层间距明显细化。

热处理工艺530、550、570 $^{\circ}\text{C}$ 球团尺寸分别为 (2.4 ± 0.8) 、 (2.9 ± 1.3) 、 $(3.4\pm 1.9)\mu\text{m}$,随着热处理工艺的降低球团尺寸细化了41.6%。热处理工艺530、550、570 $^{\circ}\text{C}$ 片层间距分别为 (74 ± 21) 、 (114 ± 13) 、 $(141\pm 14)\text{ nm}$,片层间距细化了90%。

珠光体钢盘条的强度主要受到片层间距的影响,片层间距越小,盘条强度越高。由于片层间距越细,渗碳体阻碍位错的运动导致位错的塞积,导致强度得到提升。根据Eric M. Taleff^[12]提出的屈服强度与片层间距、球团尺寸之间的关系,具体

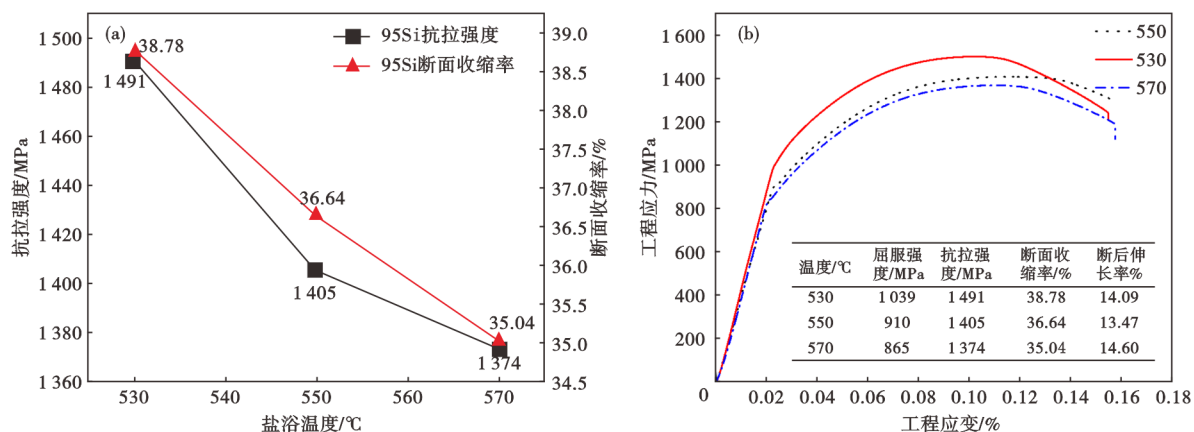


图1 95Si 高碳盘条在加热温度 900 °C 下不同热处理工艺的力学性能曲线:(a)强塑性,(b)工程应力应变

Fig. 1 Mechanical property curves of 95Si high-carbon wire rod under different heat treatment processes at a heating temperature of 900 °C : (a) strength and plasticity, (b) engineering stress-strain

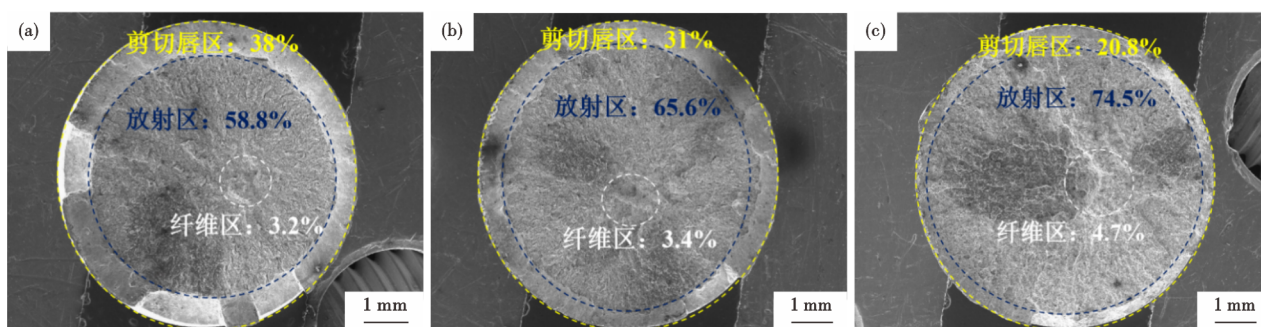


图2 不同热处理工艺 95Si 样品断口形貌:(a)530 °C,(b)550 °C,(c)570 °C

Fig. 2 Fracture morphologies of 95Si samples under different heat treatment processes : (a) 530 °C, (b) 550 °C, (c) 570 °C

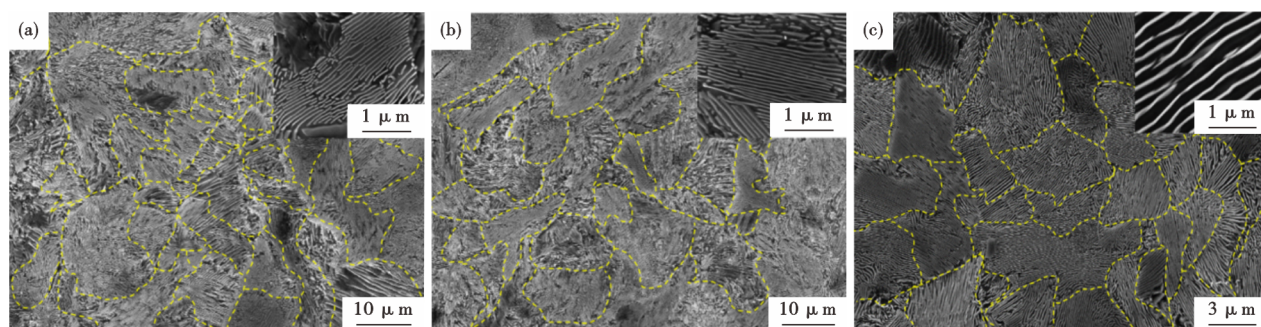


图3 95Si 盘条 900 °C 保温后在不同热处理工艺后组织形貌:(a)530 °C,(b)550 °C,(c)570 °C

Fig. 3 Microstructural morphologies of 95Si wire rod after heat preservation at 900 °C followed by different heat treatment processes : (a) 530 °C, (b) 550 °C, (c) 570 °C

如式(1)。

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

式中, σ_{ys} 为屈服强度, MPa; λ 为珠光体片层间距, μm ; PS 珠光体球团尺寸, μm 。将所测得片层距和球团尺寸代入公式(1)分别计算热处理工艺 530、550、570 °C 成品盘条屈服强度为 1 100、1 005、886 MPa 与

实验结果基本一致。片层间距与珠光体球团尺寸对屈服强度贡献见表 2, 片层间距对强度提升占主导。因为材料的强度本质上是抵抗塑性变形的能力, 而塑性变形主要通过位错的滑移实现。然而片层间距越细位错在单个片层内的“运动自由程”就越短, 位错的运动会受到阻碍。片层间距越细小, 界面总面积越大, 对位错运动阻碍越严重, 越容易造成位错塞

积从而产生应力场,使得强度得到提升。

对于珠光体来说,除了片层间距和球团尺寸,珠光体节尺寸也可以来侧面印证,通过 EBSD 进行表征。Walentek A 等^[13]结合扫描电镜(SEM)与电子背散射衍射(EBSD)技术发现,在铁素体取向偏差 $<13^\circ$ 的区域内存在珠光体节,并且一个珠光体节通常包含多个珠光体球团^[14]。不同热处理工艺下样品的 EBSD 形貌如图 4 所示,经 530、550、570 °C 热处理后,样品的珠光体节尺寸分别为 20.3、20.6、23.6 μm 。不同样品的珠光体节尺寸与珠光体球团尺寸变化基本一致。可知随着热处理工艺的升高珠光体节有明显的粗化。由于晶界可

阻碍裂纹扩展,球团尺寸越小则盘条塑性越高。因此,球团尺寸和珠光体节粗化是导致盘条塑性下降的主要原因^[15]。随着热处理工艺降低,内核平均取向差(Kernel average misorientation)值从 1.82 降到 1.27 盘条中 KAM 值降低,小尺寸球团的 KAM 值低说明晶体内部取向差小,位错分布均匀、堆积少,变形过程中应力集中弱,材料能通过位错的均匀滑移协调塑性变形。

3 结论

1) 盘条强塑性随热处理工艺降低而增加。当热处理工艺从 570 °C 降低至 530 °C 时,盘条抗拉强

表 2 95Si $\phi 13$ mm 盘条盐浴过程样品强化机理计算

Table 2 Calculation of strengthening mechanism for 95Si $\phi 13$ mm wire rod samples during salt bath process

温度/°C	片层间距对抗拉强度贡献值		球团尺寸对抗拉强度贡献值		屈服强度计算值/MPa	实际屈服强度/MPa
	具体数值/MPa	占比/%	具体数值/MPa	占比/%		
530	837	76	263	24	1 100	1 039
550	775	77	230	23	1 005	910
570	688	77	198	23	886	865

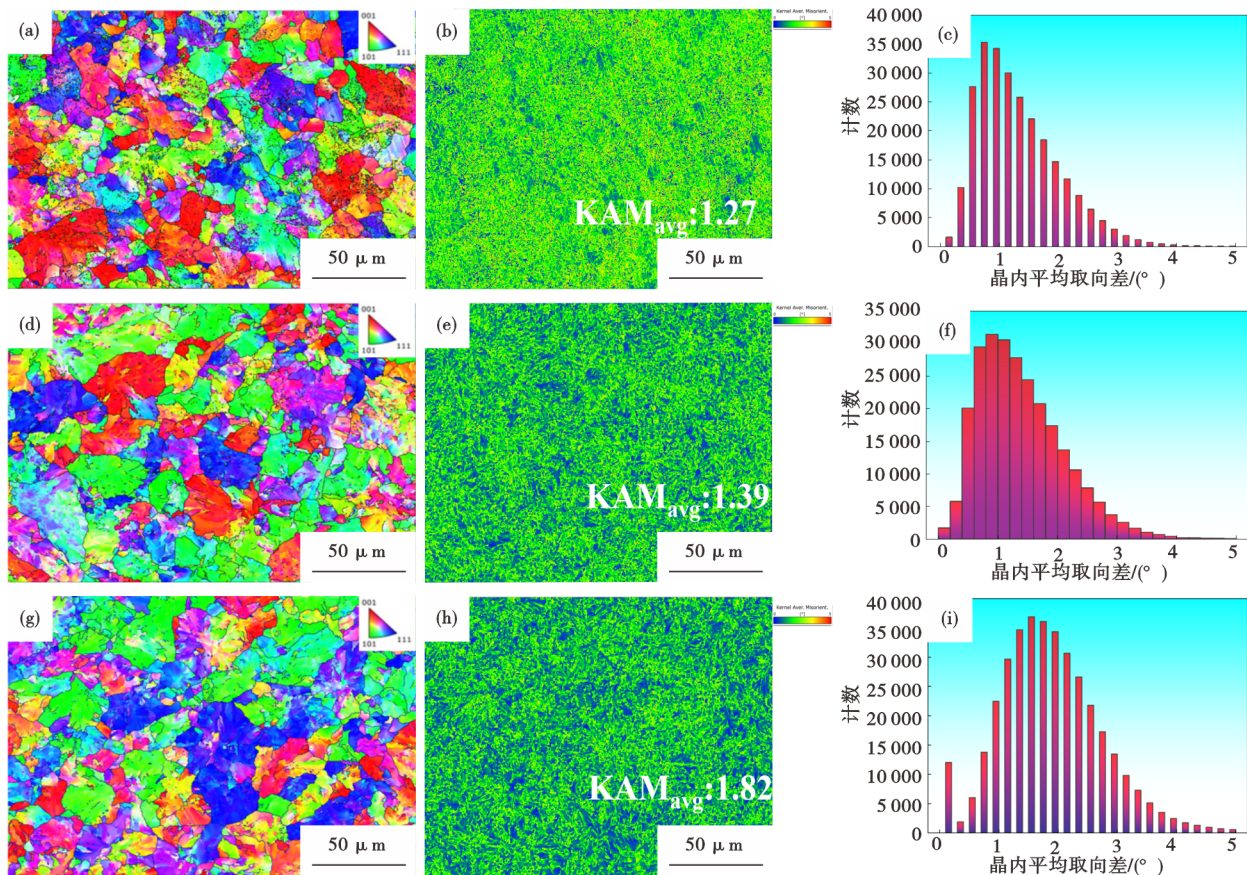


图 4 900 °C 下保温不同热处理工艺 95Si 样品 EBSD 形貌和 KAM 分布图:(a)~(c)530 °C;(d)~(f)550 °C;(g)~(i)570 °C

Fig. 4 EBSD morphologies and KAM distribution maps of 95Si samples with different heat treatment processes after holding at 900 °C; (a)~(c) 530 °C; (d)~(f) 550 °C; (g)~(i) 570 °C

度提升了8.5%,从1 374 MPa增加到1 491 MPa;断面收缩率提升了10.8%,从35.0%增加到38.8%。

2)盘条微观组织结构特征随热处理工艺降低发生明显细化。当热处理工艺从570 °C降低至530 °C时,片层间距细化了90%,从141 nm细化至74 nm;

球团尺寸细化了41.6%,从3.4 μm细化至2.4 μm。

3)盐浴过程中力学性能的提升主要是由于片层间距细化,其中片层间距对于盘条屈服强度贡献为77%左右。球团尺寸的细化导致了大角度晶界数量增多,提高了盘条中的位错密度。

参考文献

- [1] 王林峰,周立初,陈华青,等. $\phi 5.35$ mm-2100 MPa桥梁用锌铝钢丝的工艺与组织性能[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 90-96.
- [2] 母俊莉,姚赞,江晨鸣. 2000 MPa级斜拉桥用高强度钢丝开发[J]. 金属制品, 2020, 46(5): 10-14.
- [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] Bargujer S S, Suri N M, Belokar R M. Pearlitic steel wire: High carbon steel based natural nanomaterial by lead patenting process [J]. Materials Today: Proceedings, 2016, 3(6): 1553-1562.
- [9] 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.
- [10] 李阳,邓铁松. 特殊钢线材在线等温热处理(QM)技术研究进展[J]. 中国冶金, 2024, 34(9): 15-24.
- [11] 方文,王海宾,张朝磊,等. 预应力钢绞线用大规格82B盘条冬季时效期的系统控制[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2408-2412.
- [12] 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.
- [13] Walentek A, Seefeldt M, Verlinden B, et al. Electron backscatter diffraction on pearlite structures in steel [J]. Journal of Microscopy, 2006, 224(3): 256-263.
- [14] 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.
- [15] Mishra K, Singh A. Effect of interlamellar spacing on fracture toughness of nano-structured pearlite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 706: 22-26.