



桥梁缆索用 87MnSi 钢线材微观组织演变 对力学性能的影响

屈小波¹, 王 森¹, 曹 磊¹, 王鲁义¹, 饶子才¹, 纪文杰¹, 吴彦欣², 武晓燕², 王天祥², 江海涛²
(1 江苏永钢集团有限公司, 张家港 215628; 2 北京科技大学高效轧制与智能制造国家工程研究中心, 北京 100083)

摘 要: 针对桥梁缆索用 87MnSi 钢线材的异常断裂现象, 对其盘条和生产工艺过程中钢丝的微观组织和力学性能演变规律进行系统分析。结果表明, 盘条组织由珠光体和少量的先共析铁素体组成, 且渗碳体片层随机分布。冷拉拔后, 渗碳体片层发生扭转弯曲或减薄纤维化, 且部分渗碳体发生破碎溶解, 溶解量为 1.40% (占比 9.69%)。热镀锌后, 溶解的渗碳体发生球化。盘条 (329.8HV) 在冷拉拔-热镀锌-稳定化处理过程中的显微硬度呈现先增大 (450.2HV) 后减小 (447.9HV) 再增大 (469.6HV) 的变化趋势; 冷拉拔过程中溶解的渗碳体使得钢丝硬度值上升至 468.3HV, 而热镀锌过程渗碳体的球化, 导致硬度值下降至 439.8HV, 并恶化拉伸性能。当边部的渗碳体球化程度明显时, 使得钢丝内外组织和力学性能存在较大差异, 并在稳定化处理过程中因受力不均匀而导致断裂。

关键词: 桥梁缆索; 87MnSi 钢; 热镀锌; 稳定化处理; 断裂; 渗碳体球化

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2023-00211 **中图分类号:** TG115.21

Effect of Microstructure Evolution on Mechanical Properties of 87MnSi Steel Wire Rod for Bridge Cable

Qu Xiaobo¹, Wang Miao¹, Cao Lei¹, Wang Luyi¹, Rao Zicai¹, Ji Wenjie¹, Wu Yanxin²,
Wu Xiaoyan², Wang Tianxiang², Jiang Haitao²

(1 Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Zhangjiagang, 215628, China; 2 National Engineering Research Center for Advanced Rolling and Intelligent Manufacturing, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the abnormal fracture phenomenon of 87MnSi steel wire rod for bridge cable, the evolution of microstructure and mechanical properties during production processing were systematically analyzed. The results show that the microstructure of the rod is composed of pearlite and a small amount of proeutectoid ferrite, and the cementite lamellae are randomly distributed. After cold drawing, the cementite lamellae are rotated or fibrotic, and some cementite are broken and dissolved, the dissolution amount is 1.40wt. % (9.69%). After hot-dip galvanizing, the dissolved cementite is spheroidized. In the process of cold drawing, hot-dip galvanizing and stabilization treatment, the microhardness of wire rod (329.8HV) increases (450.2HV) firstly, then decreases (447.9HV) and increases (469.6HV) finally. The cementite dissolved in the cold drawing process increases the hardness of the steel wire to 468.3HV, while the spheroidized cementite in the hot galvanizing process decreases the hardness to 439.8HV, and deteriorates tensile property. When the degree of spheroidization of cementite on the edge is obvious, the microstructure and mechanical properties of the steel wire inside and outside are greatly different, and the fracture is eventually caused by uneven force during stabilizing treatment.

Key Words: Bridge Cable; 87MnSi Steel; Hot-dip Galvanizing; Stabilizing Treatment; Fracture; Cementite Spheroidization

目前, 桥梁建设面临着跨径较大, 以及服役环境趋于严苛等问题, 导致现有级别强度的钢丝无法满足现有斜拉/悬索等桥梁的使用需求。因此, 开发高强度桥梁缆索用的热镀锌钢丝已经成为现阶段特大型桥梁建设和推广应用亟待解决的关键问题^[1-4]。高碳钢盘条经过冷拉拔-热镀锌-稳定化处理工艺制备成镀锌钢丝, 再通过集索或扭转而成桥梁缆索钢绳, 所以, 盘条和钢丝的组织 and 性能在很大程度上决定了桥梁缆索的质量。

关于盘条组织对桥梁缆索钢丝力学性能的影响, 前人已有大量研究^[5-8]。如李玉岗等^[9]研究了 87Mn 镀锌钢丝的扭转失效, 发现钢材中心偏析促进了二次渗碳体的析出, 并导致扭转分层断裂。吴兴亮等^[10]研究了 SWRH82B 高碳钢钢丝的异常断裂情况, 发现断口附近组织中的中心网状碳化物级别不合格, 即组织上的明显差异导致钢丝在冷拉拔过程中不均匀变形, 进而引发断裂; 李朋等^[11]对 DY105 高碳钢钢丝在冷拉拔过程中的断裂进行了分析, 发

现组织中存在的针状马氏体和夹杂物是导致其断裂的主要原因。因此,高碳钢盘条一方面通过转炉、精炼和连铸冶炼过程的工艺创新优化,减少钢液中夹杂物数量和尺寸,改善铸坯中心偏析;另一方面通过轧后冷却工艺的调控,避免异常组织的生成,提高索氏体化率。除此之外,钢丝生产工艺对桥梁缆索的质量也具有至关重要的影响,如桥梁缆索钢丝在热镀锌后扭转性能会下降,甚至发生扭转失效断裂^[12]。因此,非常有必要对桥梁缆索钢丝生产过程中的微观组织演变和力学性能演变规律进行系统的研究,但是鲜有文献报道。

江苏永钢集团近期开发的87MnSi高碳钢盘条在稳定化处理过程中出现了异常断裂现象,为此,对87MnSi钢异常断裂和正常绞断的盘条和钢丝试样进行取样,并对盘条和钢丝生产过程的微观组织和力学性能演变进行系统的研究,分析钢丝异常断裂原因。研究结果有利于提升桥梁缆索用钢的质量,为高强度桥梁缆索热镀锌钢丝的开发提供科学的理论指导。

1 实验材料及方法

实验材料采用永钢生产的87MnSi桥梁缆索线材用钢,其主要化学成分见表1。由表1可知,永钢采用高Si($w[\text{Si}]$ 为0.79%)的设计方案,保证热镀锌钢丝的强度,同时提高塑性^[13-14]。为控制连铸坯的非金属夹杂物,通过转炉、精炼、连铸冶炼过程工艺创新优化,将桥梁缆索用钢的全氧质量分数控制在 $w[\text{O}] \leq 0.0006\%$,硫质量分数控制在 $w[\text{S}] \leq 0.0012\%$,氮质量分数控制在 $w[\text{N}] \leq 0.0013\%$ 。减少钢液中夹杂物数量和降低夹杂物尺寸,夹杂物最大尺寸降至 $10 \mu\text{m}$ 以下,纯净度控制在0.02%以下。同时对连铸坯抛丸、全扒皮修磨以及探伤。钢丝的生产工艺为铸坯→热轧盘条 $\phi 13 \text{ mm}$ (吐丝温度 $880 \sim 920 \text{ }^\circ\text{C}$,采用斯太尔摩风冷线进行冷却)→酸洗去除氧化皮→表面磷化→九道次冷拉拔至 $\phi 5.4 \text{ mm}$ 钢丝→酸碱洗→热镀锌钢丝($450 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \sim 30 \text{ s}$,水冷)→稳定化处理($380 \text{ }^\circ\text{C}$, $3 \sim 5 \text{ s}$,施加 $40\% \sim 50\% \sigma_b$ (σ_b 为抗拉强度),风冷)→收线入库。

表1 桥梁缆索用87MnSi钢的主要化学成分(质量分数)
Table 1 Main chemical composition of 87MnSi steel for bridge cable

%					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.88	0.79	0.66	0.009 3	0.001 2	Bal.

对87MnSi桥梁缆索用钢的盘条和各工序钢丝进行取样,将线切割后的试样进行镶嵌,粗磨到2000#砂纸后进行抛光。用4%硝酸酒精溶液进行侵蚀,并采用激光共聚焦(OLYMPUS OLS4100 3D)和扫描电镜(FEI QUANTA FEG 450)对其微观组织进行观察。采用XRD衍射仪对盘条和冷拉拔钢丝的物相进行鉴定,盘条的测试位置为试样横截面中心;钢丝心部测试位置为试样横截面中心,边部测试位置尽量靠近试样横截面边缘处。扫描速率为 $4(^\circ)/\text{min}$,扫描角度为 $20^\circ \sim 100^\circ$ 。通过振动样品磁强计(VSM8604)对87MnSi钢冷拉拔前后的比饱和磁化强度进行测量,实验参数为磁化强度变化范围: $-1 \sim 1 \text{ T}$,测试温度为室温,测量精度为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ emu}$ 。试验样品尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,在测试前对试样的质量进行至少三次测量,取平均值。采用差式扫描热分析仪(DSC250)对87MnSi钢冷拉拔钢丝进行热分析实验,实验参数:温度为 $50 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$,升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,气氛环境为 N_2 。将稳定化未断和稳定化断裂钢丝加工成标准拉伸试样尺寸,并采用万能拉伸试验机对其进行室温拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/s ,各自3根平行试样,以确保数据的准确性。

2 实验结果与讨论

为了分析87MnSi钢丝的断裂失效机制,对其盘条和冷拉拔-热镀锌-稳定化过程中钢丝的微观组织和力学性能演变规律进行了表征。87MnSi钢盘条心部和边部的金相组织如图1所示。从图1可见,原始盘条中没有发现类似网状渗碳体和心部马氏体等异常组织。边部和心部的珠光体团簇尺寸存在差异,且边部($15 \mu\text{m}$)的团簇尺寸要明显小于心部($30 \mu\text{m}$)。这是因为盘条的冷却方式为斯太尔摩风冷,在冷却的过程中盘条边部的冷速大于心部。

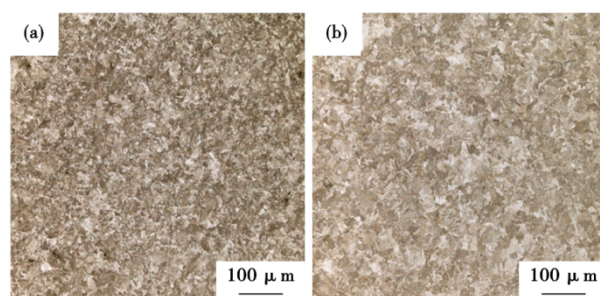


图1 87MnSi钢盘条金相组织:(a)边部,(b)心部
Fig. 1 Metallographic structure of 87MnSi steel wire rod: (a) edge, (b) core

87MnSi 盘条在冷拉拔过程中的组织演变如图 2 所示。从图 2(a)和(b)可见,原始盘条组织由珠光体和少量的先共析铁素体组成,且各珠光体团簇之间边界明显,渗碳体片层结构清晰。采用截线法对 87MnSi 钢渗碳体片层间距进行统计,其平均值为 142.6 nm。从图 2(c)和(d)可见,盘条经过冷拉拔后,珠光体团边界变得模糊,渗碳体片层被拉长而呈纤维状,珠光体片层间距明显变小。由于原始盘条中渗碳体片层的方向是随机分布的,与拉拔方向夹角较小或者平行于拉拔方向的渗碳体片层直接被拉拔减薄,而与拉拔方向夹角较大,甚至垂直于拉拔方向的渗碳体片层,首先沿拉拔方向发生扭转弯曲,最后才被拉拔减薄。且边部的渗碳体基本呈现拉拔减薄的情况,而心部依然存在扭转弯曲情况,这是因为心部的渗碳体主要受拉拔力和压应力的作用;而表层渗碳体还受到巨大的摩擦力作用,更大的作用力导致了更剧烈的变形。同时,更大的作用力也导致边部渗碳体发生破碎溶解。

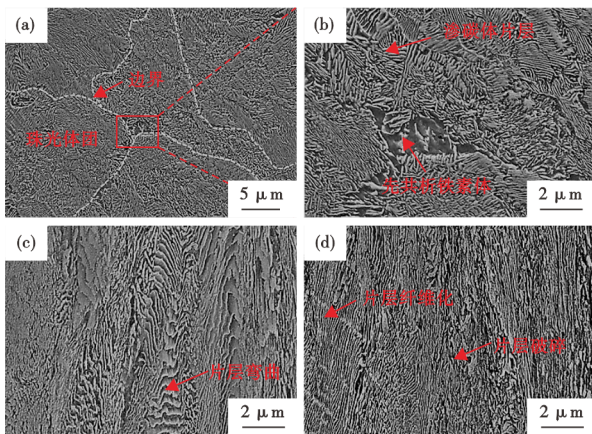


图 2 87MnSi 钢冷拉拔过程中的组织演变: (a) 盘条低倍, (b) 盘条高倍, (c) 拉拔钢丝心部, (d) 拉拔钢丝边部
Fig. 2 Microstructure evolution during cold drawing of 87MnSi steel: (a) macrostructure of wire rod (b) microstructure of wire rod, (c) core of drawing wire, (d) edge of drawing wire

为了进一步表征片层渗碳体的破碎溶解行为,对 87MnSi 钢盘条和冷拉拔钢丝进行 XRD 物相分析,结果如图 3(a)所示。盘条的衍射谱中除了铁素体峰外,还存在明显的渗碳体峰,而冷拉拔钢丝的渗碳体衍射峰减弱显著,且钢丝边部的渗碳体衍射峰强度进一步减弱甚至消失。这证实了渗碳体在冷拉拔后的破碎溶解行为。同时为了对渗碳体的溶解进行定量分析,采用振动样品磁强计(VSM)分别测量了 87MnSi 钢盘条和冷拉拔钢丝的比饱和磁化强度,并

由此来计算渗碳体的溶解含量,具体步骤如下。

假设钢丝中的铁素体和渗碳体的体积分数分别为 $\varphi_{\alpha-Fe}$ 和 φ_{Fe_3C} ,相应的比饱和磁化强度分别为 $M_s^{\alpha-Fe}$ 和 $M_s^{Fe_3C}$,则整个钢丝样品的比饱和磁化强度 M_s 可以表示为:

$$M_s = M_s^{\alpha-Fe} \varphi_{\alpha-Fe} + M_s^{Fe_3C} \varphi_{Fe_3C} \quad (1)$$

又因为铁素体为强铁磁相,而渗碳体为弱铁磁相,即 $M_s^{\alpha-Fe} \gg M_s^{Fe_3C}$,式(1)可以简化为:

$$M_s \approx M_s^{\alpha-Fe} \varphi_{\alpha-Fe} \quad (2)$$

由此推出:

$$\varphi_{Fe_3C} = 1 - \varphi_{\alpha-Fe} = \left(1 - \frac{M_s}{M_s^{\alpha-Fe}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

其中, $M_s^{\alpha-Fe} = 231.47 \text{ emu/g}$ 。

图 3(b)为 87MnSi 钢盘条和钢丝的磁滞回线,在磁场强度为 1T 的作用下,盘条和钢丝均完全饱和,且从放大图中可知,钢丝的比饱和磁化强度值大于盘条的比饱和磁化强度值,即钢丝中的渗碳体含量小于盘条,所以钢丝中的渗碳体发生溶解。根据公式(3)可计算得到试样盘条中的渗碳体含量为 14.44%,而钢丝中的渗碳体含量为 13.04%,以此得到相应的渗碳体溶解量为 1.40%(占比 9.69%)。

冷拉拔后的钢丝经矫直后需进行热镀锌和稳定化处理,其相应的组织如图 4 所示。从图 4 中可

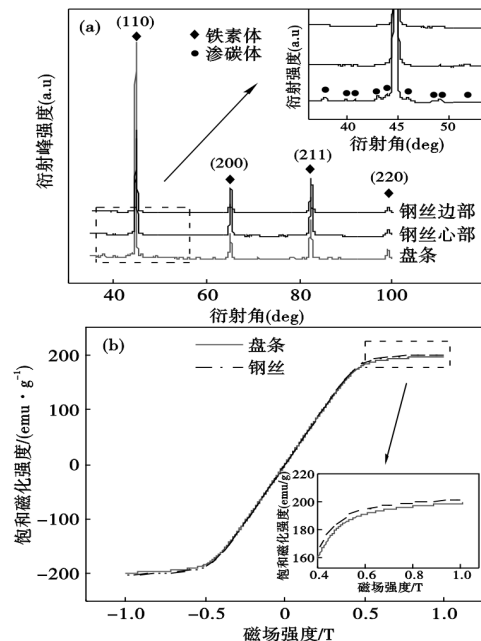


图 3 87MnSi 钢冷拉拔后渗碳体溶解行为的定性和定量分析: (a) XRD 衍射峰, (b) 磁化曲线
Fig. 3 Qualitative and quantitative analysis of the dissolution behavior of 87MnSi steel cementite after drawing: (a) XRD diffraction peak, (b) magnetization curve

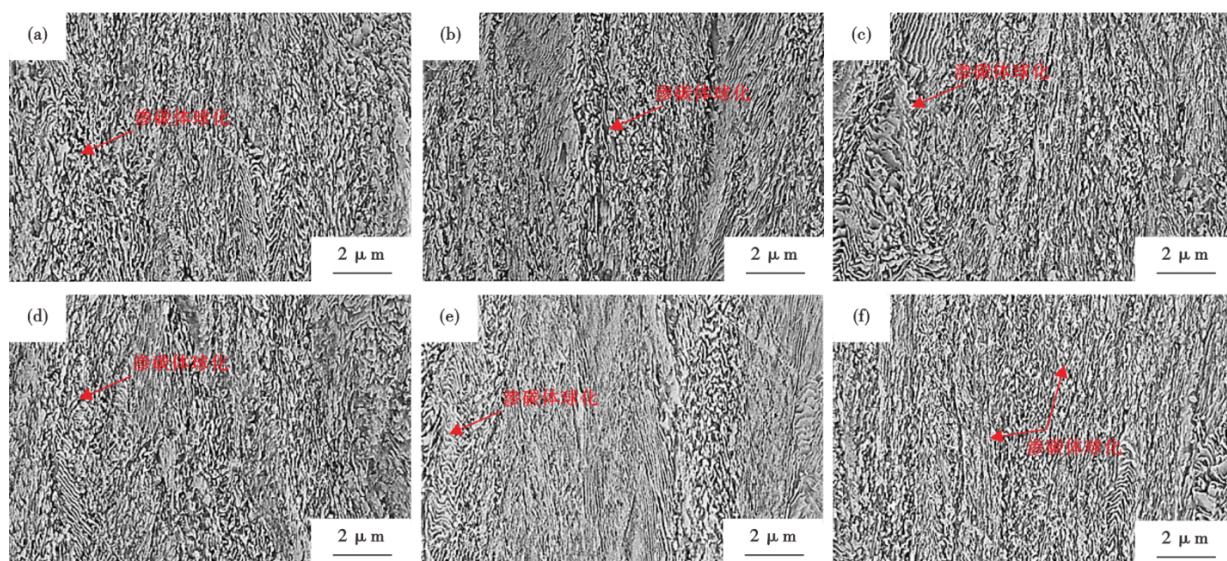


图4 87MnSi 钢丝热镀锌和稳定化处理微观组织: (a)热镀锌-心部, (b)热镀锌-边部, (c)稳定化处理-心部, (d)稳定化处理-边部, (e)稳定化断裂试样-心部, (f)稳定化断裂试样-边部

Fig. 4 Microstructure of 87MnSi steel hot dip galvanizing and stabilization treatment: (a) hot dip galvanizing-core, (b) hot dip galvanizing-edge, (c) stabilization-core, (d) stabilization-edge, (e) stabilization fracture sample-core, (f) stabilization fracture sample-edge

知,破碎的渗碳体在热镀锌和稳定化处理后发生球化,且边部的球化程度要大于心部。这主要是在冷拉拔过程中边部破碎的渗碳体量比心部多,而热镀锌(450 °C, 20~30 s)和稳定化处理(380 °C, 3~5 s)过程相当于短时热处理,使得破碎的渗碳体发生球化长大。对比图4(d)和(f)可知,稳定化断裂试样的边部渗碳体球化程度要明显大于稳定化未断丝试样。

87MnSi 冷拉拔钢丝的差示扫描量热分析(DSC)曲线如图5所示。从图5中可知,曲线在100~150 °C存在一个吸热峰,该温度大致与冷拉拔过程中产生的温升相对应,即渗碳体溶解;在150~170 °C存在一个放热峰,对应着溶解渗碳体

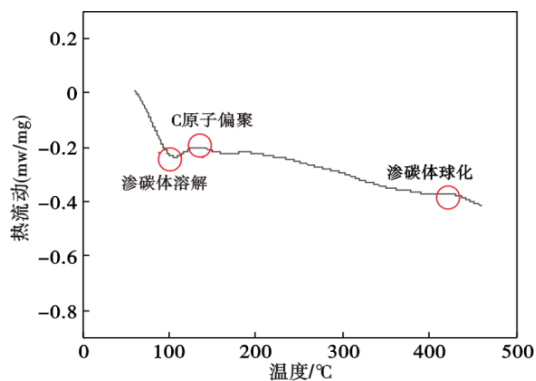


图5 87MnSi 钢冷拉拔钢丝的差示扫描量热分析曲线

Fig. 5 DSC curve of 87MnSi cold drawing wire

中的C原子偏聚在铁素体/渗碳体晶界位错处; 400~450 °C存在一个放热峰,与热镀锌温度(440~460 °C)相对应,即渗碳体球化。

盘条在冷拉拔-热镀锌-稳定化处理过程中的显微硬度值变化规律见表2。可见,盘条硬度值呈现先增大(冷拉拔)后减小(热镀锌)再增大(稳定化处理)的趋势。盘条边部硬度值(342.4HV)稍大于心部(329.8HV),这主要是边部珠光体团簇尺寸更小,晶界强化效果更明显所致;盘条在冷拉拔形变过程中,产生了显著的加工硬化效果,且表层摩擦产生的温升造成破碎溶解的碳原子以碳化物的形式析出,钉扎位错,所以冷拉拔钢丝边部硬度值(468.3HV)高于心部(450.2HV)。热镀锌相当于一个短时低温热处理过程,组织发生回复,位错密度降低,使得硬度值下降,且边部由于渗碳体球化程度更明显,导致其硬度值(439.8HV)小于心部(447.9HV),即试样边部硬度值在热镀锌后的下降程度明显大于心部。稳定化过程为热处理的同时施加一定的张力,且由于热处理时间太短(3~5 s),所导致的退火软化效果不如加工硬化效果,所以硬度值上升。通过对比稳定化未断和断丝的硬度值发现,断丝试样边部的硬度值(454.7HV)明显小于心部(465.5HV),而未断丝试样边部的硬度值(469.6HV)则稍小于心部(474.8HV),且稳定化断裂试样与未断试样的

硬度值主要区别于边部。可见, 钢丝边部渗碳体严重球化, 使得内外组织和性能存在较大差异, 在稳定化处理过程中受力时发生不均匀变形, 最终导致断丝。

表 2 盘条和冷拉拔-热镀锌-稳定化处理钢丝的显微硬度值

Table 2 Microhardness value during the process of wire rod - cold drawing - hot dip galvanizing - stabilization

位置	显微硬度值(HV)				
	盘条	冷拉拔 钢丝	热镀锌 钢丝	稳定化 钢丝	稳定化 断丝
边部	329.9 ~ 354.9	455.2 ~ 481.4	424.5 ~ 455.1	459.1 ~ 490.5	438.4 ~ 471.0
心部	319.1 ~ 340.5	438.8 ~ 461.6	433.7 ~ 462.1	453.2 ~ 486.0	450.6 ~ 480.4

参考文献

- [1] 钱刚, 许晓红, 张剑锋. 绿色低碳高效超高强度桥梁缆索钢用线材的研发及应用[J]. 现代交通与冶金材料, 2021, 1(4): 75-82.
- [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] Zheng H, Fu L M, Ji X B, et al. Microstructural evolution and mechanical property of ultrafine-grained pearlitic steel by cold rolling: The influence of cementite morphology [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 824: 141860.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 桥梁缆索钢丝用盘条: YB/T 4264—2020[S]. 北京: 冶金工业出版社.
- [6] Zhou L C, Fang F, Wang L P, et al. Torsion performance of pearlitic steel wires: Effects of morphology and crystallinity of cementite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 425-435.
- [7] 和红杰, 叶凡新, 王秋坤, 等. 预应力钢 SWRH82B Φ 12.5 mm 盘条异常断口分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 30-33.
- [8] 李桂英, 李麦麦. 钢帘线用钢 C82D2 盘条拉拔断丝成因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 30-34.
- [9] 李玉岗, 路晨龙, 薄宇. 桥梁缆索用 87Mn 镀锌钢丝扭转异常断裂分析[J]. 天津冶金, 2021(1): 45-48+66.
- [10] 吴兴亮, 刘列喜, 李海, 等. 高碳绞线钢 SWRH82B“笔尖”断裂分析与工艺改善[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 43-46.
- [11] 李朋, 陈修君, 郭立波. DY105 高碳钢丝冷拔断裂分析和工艺改进实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(6): 35-37.
- [12] 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.
- [13] 王雷, 麻哈, 李平, 等. Si 在高碳钢盘条开发中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(6): 54-56.
- [14] 王雷, 麻哈, 李平, 等. Si 在高碳钢盘条开发中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(6): 54-56.

3 结论

(1) 盘条组织由珠光体和少量的先共析铁素体组成, 渗碳体片层随机分布, 并在冷拉拔过程中发生扭转弯曲或减薄纤维化, 且部分发生破碎溶解, 溶解量为 1.40% (占比 9.69%)。

(2) 盘条在冷拉拔-热镀锌-稳定化处理过程中, 显微硬度呈现先增大后减小再增大的变化趋势, 且渗碳体的溶解和球化导致钢丝边部显微硬度分别增加和减小。

(3) 破碎溶解的渗碳体在热镀锌过程中发生球化, 当边部球化程度严重时, 使得钢丝的内外组织和力学性能差异明显, 并在稳定化处理过程中因受力不均匀而发生断裂。