

· XXXX ·



焊丝用ER70S-6盘条拉拔断裂失效分析

左锦中¹, 张朝磊², 潘晓坤², 唐庆¹, 闫建升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学院, 北京 100083)

摘要:针对ER70S-6盘条在拉拔过程中发生断裂的问题,通过光学显微镜、扫描电镜等设备对断裂盘条组织进行分析。结果发现:断裂盘条的微观结构中存在硬质异常组织,根据其硬度及形貌判断为贝氏体,贝氏体阻碍组织协调变形,是盘条拉拔断裂的主要原因。断裂盘条的抗拉强度为正常盘条的1.07倍,断面收缩率为正常盘条的95%,力学性能差异进一步增大了拉拔断裂倾向。为改善盘条质量,将 $w[C]$ 控制在0.070%附近;轧后将吐丝温度由880℃降低至850℃,辊道速度由0.15 m/s降低至0.13 m/s,使相变区平均冷却速率由1.2℃/s降低至0.8℃/s。优化后盘条组织以铁素体和珠光体为主,未见明显贝氏体形貌。上述成分与冷却工艺参数有利于促进铁素体和珠光体转变、抑制贝氏体形成,从而改善盘条的拉拔适应性。

关键词:ER70S-6盘条; 断裂; 贝氏体; 拉拔

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260112 中图分类号: TG142. 1

Analysis of Drawing Fracture and Abnormal Structure
Control of ER70S-6 Wire Rod for Welding WireZuo Jinzhong¹, Zhang Chaolei², Pan Xiaokun², Tang Qing¹, Yan Jiansheng²

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

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

Abstract : To investigate the fracture of ER70S-6 wire rod during drawing, the microstructure of the fractured wire rod was examined by optical microscopy and scanning electron microscopy. A hard abnormal constituent was identified as bainite based on its hardness and morphology. Bainite impedes coordinated deformation of the microstructure and is the primary cause of wire-rod fracture during drawing. The tensile strength of the fractured wire rod was 1.07 times that of the normal wire rod, while its reduction of area was 95% of that of the normal wire rod; these differences in mechanical properties further increased its susceptibility to drawing fracture. To improve wire rod quality, the carbon mass fraction was controlled at approximately 0.070%. After rolling, the laying temperature was reduced from 880℃ to 850℃, the roller conveyor speed was reduced from 0.15 m/s to 0.13 m/s, and the average cooling rate in the transformation region was reduced from 1.2℃/s to 0.8℃/s. The optimized wire rod consisted mainly of ferrite and pearlite, with no obvious bainite morphology observed. These composition and cooling-process parameters promote ferrite and pearlite transformation, suppress bainite formation, and thereby improve the drawability of the wire rod.

Key Words : ER70S-6 Wire Rod; Fracture; Bainite; Drawing

CO₂气体保护焊最早出现在20世纪50年代的欧洲,由于这种方法成本低、产品的工艺性能优良、焊接效率高等优点,受到广泛的关注,目前已成为钢结构生产中主要的焊接方法之一^[1-2]。由于ER70S-6盘条经过拉拔形成的焊丝具有焊接适应性好、综合成本低以及适应自动化需求等优势^[3],在CO₂气体保护焊中被广泛使用^[4]。为使成品焊丝具有良好的焊接性能,要求盘条具有尺寸精度高、组织中铁素体比例高、抗拉强度高、塑性好等特点^[5-6]。

盘条的显微组织与后续拉拔稳定性密切相关。

奥氏体向铁素体、珠光体转变过程中,冷却速度、吐丝温度及C、Mn、Cr、V等元素均会影响相变动力学;当局部冷却偏快或合金元素偏析时,易形成贝氏体、马氏体等硬质组织。此类组织与周围软相的变形协调性较差,在拉拔应力作用下易诱发微孔洞和裂纹扩展,最终导致断丝。因此,厘清异常组织的类型、形成条件及其对拉拔稳定性的影响,对于优化盘条成分设计和控冷工艺、提高焊丝生产连续性具有重要意义。涛雅等^[7]在研究中发现盘条拉拔断裂是盘条表面结疤与粒状贝氏体所导致,而高峰

作者简介: 左锦中(1983—),男,硕士,正高级工程师; E-mail: 13706397179@163.com; 收稿日期: 2026-07-25

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

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

等^[8]发现盘条拉拔断裂是由于盘条中存在硬质块状马氏体所致,对盘条中存在的异常组织仍未有明确的结论。

某钢厂生产的ER70S-6盘条在拉拔中发生断裂,且在高的拉拔速度下,断裂现象更加严重。针对在拉拔过程中断裂的ER70S-6盘条,通过光学显微镜、扫描电子显微镜对断口以及母材盘条进行显微观察,对比未断裂盘条力学性能及化学成分检测,以找出断裂原因,为提升ER70S-6盘条性能提供数据支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

失效样品为某钢厂提供的ER70S-6盘条在拉拔中断裂的样品。ER70S-6盘条的生产工艺流程如图1所示。ER70S-6盘条在轧制过程中,要求精轧入口温度为 $(950\pm 20)^{\circ}\text{C}$,吐丝温度为 $(830\pm 20)^{\circ}\text{C}$ 。选取相同生产工艺下的拉拔断裂以及拉拔未断裂ER70S-6盘条进行组织性能分析对比,其中断裂盘条生产炉号为15X305064,未断裂盘条生产炉号为15X305062,两种盘条成分见表1。通过对比发现,断裂的ER70S-6盘条相比于未断盘条,C、Cr、V含量偏高。

1.2 实验方法

对上述两种盘条进行组织性能分析,主要通过以下实验方法进行分析:

1)断口形貌观察:通过电火花线切割设备将断裂的断口切下,在经过超声波清洗后采用FEI Quanta 250扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌。

2)组织性能分析:采用Zeiss Axio Scope.A1光学显微镜(OM)、FEI Quanta 250扫描电子显微镜观察

拉拔断裂后ER70S-6盘条的纵剖面显微组织,并分析对比断裂和未断裂ER70S-6盘条母材的横纵截面金相组织。对两种材料进行拉伸性能测试,对比两种材料的力学性能。

2 结果与讨论

2.1 断口形貌

断口宏观形貌如图2(a)(b)所示,断口呈现笔尖状,表面并不存在明显的夹杂物,而发现存在大量微小孔洞;断口微观形貌如图2(c)所示,断口底部存在二次裂纹以及大量微小孔洞,且在裂纹的起始与终止均存在孔洞。裂纹出现主要是由于在拉拔过程中表层的金属变形大受压应力,心部的金属变形小受拉应力,当拉拔变形到一定程度时,只能以中心裂纹的形成来达到力的平衡和顺应速度场的变化^[9]。

2.2 力学性能

两种盘条力学性能检测结果如图3所示,具体数值见表2。断裂盘条的平均抗拉强度为517.5 MPa,平均断面收缩率为53.5%;未断盘条的平均抗拉强度为481 MPa,平均断面收缩率为55.5%。断裂盘条的抗拉强度明显高于未断盘条,面缩率明显低于未断盘条。这可能是由于断裂盘条中的C、Cr、V元素含量较高使得两种盘条组织比例不同所导致。为进一步分析其原因,对两种盘条的组织进行观察分析。

2.3 微观组织

未断裂盘条组织形貌如图4所示,断裂盘条的微观组织如图5(a)(b)所示,基体组织均为铁素体和珠光体,其中主要为铁素体,在盘条心部发现存在少量异常组织。断裂盘条中珠光体比例为14%,

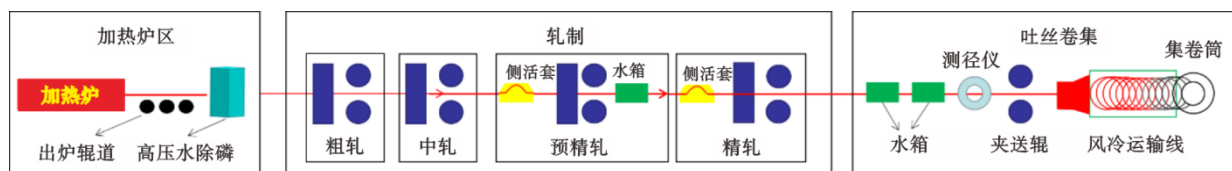


图1 ER70S-6盘条生产工艺流程

Fig. 1 ER70S-6 wire rod production process

表1 ER70S-6盘条的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of ER70S-6 wire rod

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Cu	Fe
未断-ER70S-6	0.070 8	0.830	1.50	0.008	0.011	0.011	0.011	0.004	0.002	97.55
断裂-ER70S-6	0.079 4	0.801	1.48	0.008	0.014	0.015	0.014	0.015	0.003	94.87
标准	0.06~0.10	0.80~1.00	1.40~1.60	≤0.02	≤0.015	≤0.10	≤0.10	≤0.02	≤0.10	≤97.74

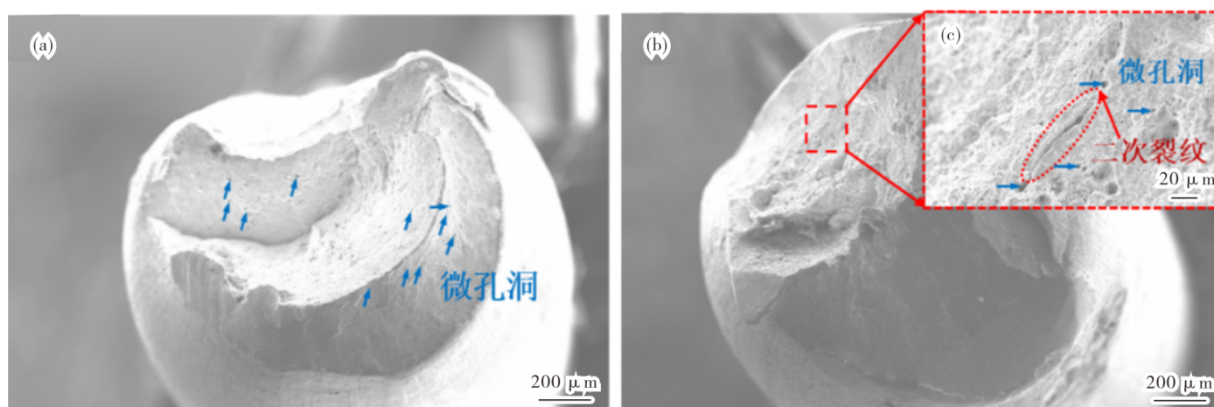


图2 断口SEM形貌:(a) (b)笔尖断口宏观形貌,(c)断口微观形貌

Fig. 2 SEM morphology of the fracture: (a) (b) macroscopic morphology of the pen-tip fracture surface, (c) microscopic morphology of fracture surface

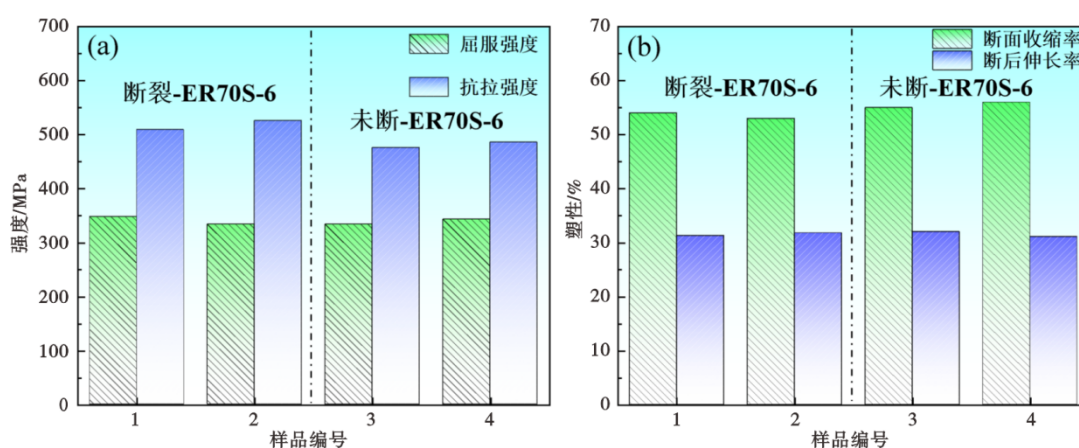


图3 ER70S-6盘条力学性能:(a)强度对比,(b)塑性对比

Fig. 3 Mechanical properties of ER70S-6 wire rods: (a) strength comparison, (b) ductility comparison

表2 ER70S-6盘条的力学性能

Table 2 Mechanical properties of ER70S-6 wire rod

性能	断裂盘条			未断盘条		
	1	2	均值	3	4	均值
抗拉强度/MPa	509	526	517.5	476	486	481
屈服强度/MPa	348	334	341	334	343	338.5
断面收缩率/%	54	53	53.5	55	56	55.5
断后伸长率/%	31.3	31.8	31.5	32	31.1	31.5

而未断盘条的珠光体比例为10%。珠光体比例较高从而导致盘条的抗拉强度较高。在断裂盘条的纵剖面中发现存在严重的带状组织。

断裂盘条断口纵剖面形貌如图5(c)所示,异常组织硬度为337HV_{0.1},明显高于基体。结合异常组织形貌及硬度值,可以认为异常组织为贝氏体。贝氏体的出现可能是由于断裂盘条中Cr元素含量偏高,在盘条冷却过程中扩大了贝氏体的形成区间^[10]。通过图4(d)可以发现异常组织尖端明显存

在微裂纹。由于两种盘条生产工艺一致,且断裂盘条中出现了明显的带状组织,可以认为贝氏体出现主要是由于局部偏析所导致。

2.4 断裂机理及异常组织控制

通过对比两种盘条的组织性能,可以发现盘条断裂主要是由于在拉拔过程中铁素体组织围绕着硬质组织出现流动变形,而硬质组织则会阻碍正常组织的变形,从而在硬质组织的周围出现了一些裂纹,导致拉拔过程中的断裂,断裂盘条机理如图6所示。

根据铁碳相图,对于亚共析钢在近平衡冷却条件下的珠光体质量分数可用杠杆定律近似计算:

$$f_p = (w[C] - w[C]_a) / (w[C]_c - w[C]_a) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $w[C]_a$ 为A₁温度下铁素体中C的溶解度,取0.0218%; $w[C]_c$ 为共析成分,取0.77%。当断裂盘条 $w[C] = 0.0794\%$ 时,计算得到 f_p 约为7.70%;当 $w[C]$ 控制为0.0700%时, f_p 约为6.44%,理论上可使珠光

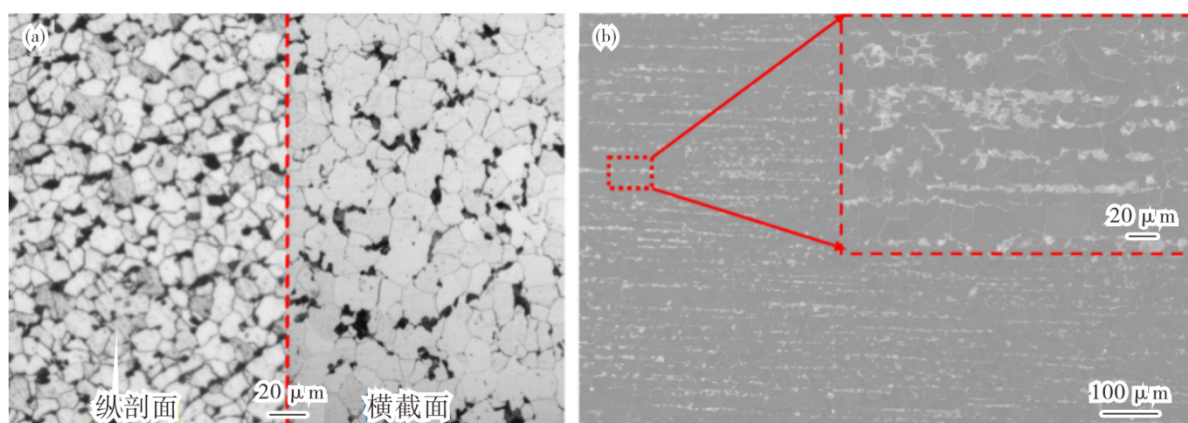


图4 未断裂ER70S-6盘条组织形貌:(a)OM,(b)纵剖面SEM

Fig. 4 Microstructure of the undrawn ER70S-6 wire rod:(a) OM,(b)SEM of longitudinal section

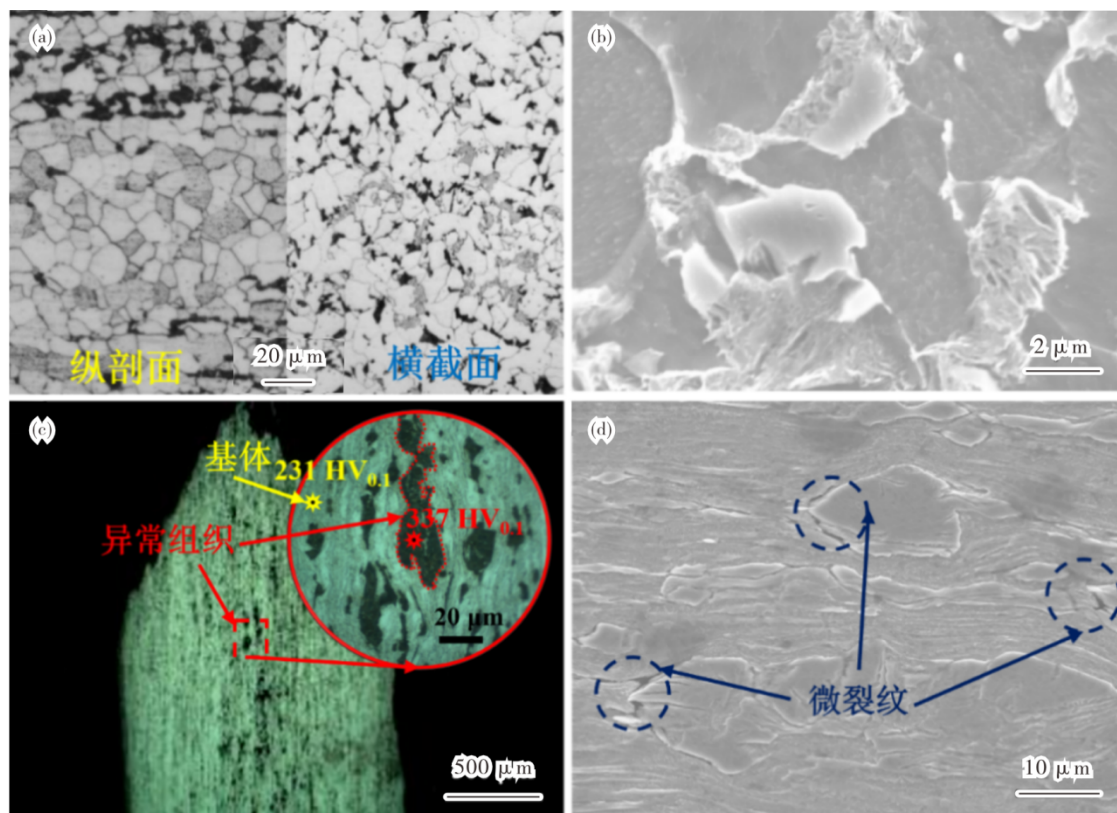


图5 断裂ER70S-6盘条的微观组织形貌:(a)横截面OM形貌及(b)SEM形貌;(c)断口纵剖面OM形貌及(d)SEM形貌

Fig. 5 Microstructure of the fractured ER70S-6 wire rods:(a) cross-sectional OM morphology and (b) SEM morphology;(c) fracture longitudinal section OM morphology and (d) SEM morphology

体比例降低约1.26个百分点,相对降低约16.4%。未断裂盘条实测 $w[\text{C}]$ 为0.0708%,与上述目标值接近,且其珠光体比例由断裂盘条的14%降至10%,说明将 $w[\text{C}]$ 控制在0.070%附近有利于提高铁素体比例、降低盘条强度并改善拉拔塑性。需要说明的是,上述计算为理论计算,实际盘条冷却过程受冷却速率、Mn等合金元素及成分偏析影响,实测珠光

体比例与理论值存在差异。因此,可进一步优化C、Cr、V元素含量,控制 $w[\text{C}]$ 在0.07%,从而降低组织中珠光体的比例,提高盘条的塑性。

此外,在高线轧制后斯太尔摩冷却线上,局部冷速波动可导致珠光体转变区间显著扩展,从而使组织偏离平衡预测值^[11-12]。因此,断裂盘条中珠光体比例较高与现场工艺也具有一定的关系。为防

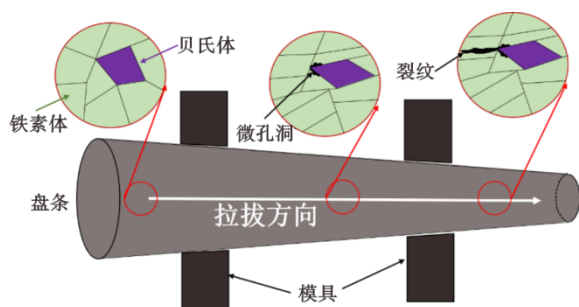


图6 断裂盘条的断裂机理图

Fig. 6 Fracture mechanism diagram of the fractured wire rod

止盘条芯部中出现贝氏体异常组织,将轧制吐丝温度降低了30℃,并降低辊道速度,从而使奥氏体优先完成铁素体和珠光体转变,减少残余奥氏体进入贝氏体转变区,具体优化工艺见表3。工艺优化后盘条微观组织结构如图7所示,优化工艺生产焊丝盘条珠光体比例为8%,且并未出现贝氏体等异常组织。

表3 ER70S-6盘条工艺优化参数

Table 3 Process optimization parameters of ER70S-6 wire rod

工艺	吐丝温度/℃	辊道速度/℃	冷却速率/(℃·s ⁻¹)
优化前	880	0.15	1.2
优化后	850	0.13	0.8

3 结论

1)断裂ER70S-6盘条的金相组织中存在硬质异

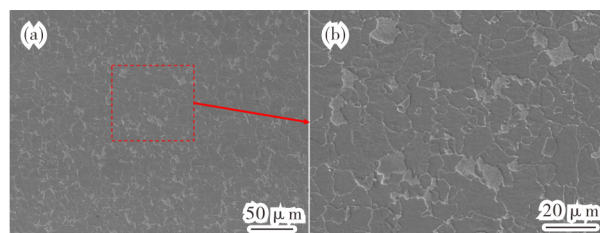


图7 优化工艺后ER70S-6盘条的微观组织结构:(a)低倍视场,(b)高倍视场

Fig. 7 Microstructure of ER70S-6 wire rod after process optimization: (a) low-magnification view, (b) high-magnification view

常组织为贝氏体,在拉拔过程中贝氏体阻止了正常组织的变形,导致产生裂纹,是ER70S-6焊丝断裂的直接原因。此外,断裂盘条中较高比例的珠光体导致其抗拉强度偏高,也增大了盘条在拉拔过程中的断裂几率。

2)断裂盘条中C、Cr、V元素含量相对偏高,其中 $w[C]$ 为0.0794%,高于未断裂盘条的0.0708%;与之对应,断裂盘条的珠光体比例为14%,高于未断裂盘条的10%。因此,成分优化时应将 $w[C]$ 控制在0.070%附近,以减小珠光体比例和贝氏体形成倾向。

3)针对轧后冷却过程,将吐丝温度由880℃降低至850℃、辊道速度由0.15 m/s降低至0.13 m/s,使相变区平均冷却速率由1.2℃/s降低至0.8℃/s。该参数组合延长了盘条在相变区的停留时间,有利于奥氏体优先完成铁素体和珠光体转变,减少残余奥氏体进入贝氏体转变区。

参考文献

- [1] 刘悦,郑晓明,李秋明,等. 轨道车辆转向架用Q690耐候钢的焊接接头性能[J]. 钢铁, 2024, 59(10): 77-85+106.
- [2] 黄鹏飞,张华栋,马超,等. 逆变CO₂焊接电源动特性对焊缝成形影响分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 227-229+237.
- [3] 李皓,张亚运,郭慧英,等. 焊丝钢ER70S-6氧化铁皮机械剥离性能研究[J]. 特殊钢, 2019, 40(4): 66-70.
- [4] 国富兴,韩春良,翁玉娟,等. 含钒铁水冶炼ER70S-6焊丝钢工艺实践[J]. 中国冶金, 2011, 21(10): 41-43+52.
- [5] Oduguwa V, Roy R. A review of rolling system design optimisation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(7-8): 912-928.
- [6] 丁华,王丽,刘雅政,等. 相变区控制冷却速度对ER70S-6钢线材组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2001, 22(6): 18-20.
- [7] 涛雅,赵晓敏,周乐育,等. ER70S-6焊丝钢拉拔断裂原因分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 259-262.
- [8] 高峰,寇沙沙,王亚男,等. ER70S-6焊丝钢拉拔脆断原因分析[J]. 包钢科技, 2018, 44(1): 58-61+95.
- [9] 杨文涛,尚巍巍. 65钢拉拔笔尖状断裂分析及工艺改进[J]. 轧钢, 2015, 32(5): 78-80.
- [10] 侯宇. 合金元素对X80管线钢环焊接头组织和性能的影响[J]. 冶金分析, 2023, 43(4): 24-33.
- [11] 孔祥伟,白云,张剑锋. 8.8级非调紧固件用10B21盘条研究与开发[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 23-26.
- [12] 秦哲,代春朵,荆涛,等. ER50-6焊丝盘条拉拔断裂原因分析与控制优化[J]. 中国冶金, 2025, 35(2): 55-64.