

# 预应力钢 SWRH82B $\Phi 12.5$ mm 盘条异常断口分析和工艺改进

和红杰 叶凡新 王秋坤 冯文甫 霍雪省  
(邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027)

**摘要** SWRH82B 钢主要用于高强度、低松弛预应力混凝土结构用钢丝和钢绞线, 要求有良好的塑性。邢钢生产的  $\Phi 12.5$  mm SWRH82B 钢 ( $\% : 0.79 \sim 0.86C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.60 \sim 0.90Mn, \leq 0.030P, \leq 0.030S, 0.17 \sim 0.50Cr$ ) 在拉拔过程中出现异常断裂。对异常断口进行金相分析, 发现盘条心部存在明显的网状碳化物, 而对应的铸坯中心碳偏析指数为 1.16。通过优化 280 mm  $\times$  325 mm 坯连铸工艺, 拉速由原 0.5 m/min 提高至 0.7 m/min, 增加轻压下工艺 (1~5 辊, 2 mm, 3.5 mm, 3.5 mm, 4 mm, 2 mm), 使铸坯中心碳偏析指数由 1.16 降至 1.08, V 形偏析明显改善, 盘条断面收缩率由原 35% 提高至 39%, 不合格品率显著降低。

**关键词** 预应力钢 SWRH82B 280 mm  $\times$  325 mm 铸坯 网状碳化物 中心偏析 轻压下 拉速

## An Analysis on Abnormal Fracture of $\Phi 12.5$ mm Coil of Pre-stressed Steel SWRH82B and Process Improvement

He Hongjie, Ye Fanxin, Wang Qiukun, Feng Wenpu and Huo Xuesheng  
(Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027)

**Abstract** The steel SWRH82B is mainly applied to high strength, low relaxation pre-stressed steel wire and strand for concrete structure, required better plasticity. The abnormal fracture of  $\Phi 12.5$  mm coil of steel SWRH82B ( $\% : 0.79 \sim 0.86C, 0.15 \sim 0.35Si, 0.60 \sim 0.90Mn, \leq 0.030P, \leq 0.030S, 0.17 \sim 0.50Cr$ ) produced at Xingtai steel occurs in cold-drawn process. By metallographic analysis on abnormal fracture of coil it is found that there is obvious network of cementite in center of coil, and the center carbon segregation index of corresponding casting bloom is 1.16. With optimizing 280 mm  $\times$  325 mm bloom casting process including increasing casting speed from original 0.5 m/min to 0.7 m/min and adding soft reduction process (No1 ~ No5 roll, 2 mm, 3.5 mm, 3.5 mm, 4 mm and 2 mm), the center carbon segregation index of casting bloom decreases from 1.16 to 1.08, the V-shaped segregation improves obviously, the reduction of area of steel coil increases from original 35% to 39%, and nonqualified rate of steel decreases markedly.

**Material Index** Pre-stressed Steel SWRH82B, 280 mm  $\times$  325 mm Casting Bloom, Network of Cementite, Center Segregation, Soft Reduction, Casting speed

SWRH82B 盘条是生产高强度、低松弛预应力混凝土结构用钢丝和钢绞线的主要原料, 广泛应用于高层建筑、桥梁、石油化工和铁路等工程领域<sup>[1-2]</sup>。SWRH82B 钢丝生产厂主要是从各个特钢厂购买  $\Phi 12.5$  mm SWRH82B 盘条, 经过 8~9 道次的拉拔制成  $\Phi 5.06$  mm 的钢丝, 作为生产钢绞线的原料线。由于拉拔变形较大, 要求特钢厂提供的  $\Phi 12.5$  mm SWRH82B 原始盘条必须有良好的延伸率和断面收缩率。SWRH82B 是一种过共析高碳钢, 拉拔脆断一直是影响 SWRH82B 钢质量提升的一个重要因素。

邢钢生产 SWRH82B 钢工艺为: 脱 S 铁水-80 t 转炉-LF-280 mm  $\times$  325 mm 方坯连铸-初轧开坯-高线轧制的工艺路线, 全程采用硅脱氧, 具体成分如表 1 所示。连铸机是四机四流 12 m 全弧形连铸机, 配有电磁搅拌、二冷配水、线材轧机采用的是斯太尔摩控冷工艺。

表 1 SWRH82B 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel SWRH82B /%

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.79 ~ 0.86	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	0.17 ~ 0.50

### 1 SWRH82B 盘条拉拔脆断原因分析

邢钢 SWRH82B 盘条主要在 5# 机首炉、尾炉生产, 无轻压下, 铸坯断面 280 mm  $\times$  325 mm, 初轧开坯成 160 mm  $\times$  160 mm 方坯, 后经高线轧制成  $\Phi 12.5$  mm 的盘条, 属于二火材。 $\Phi 12.5$  mm 盘条经过 15 天自然时效后进行拉伸试验, 检验延伸率和断面收缩率。2016 年统计,  $\Phi 12.5$  mm SWRH82B 钢由于断面收缩率不合格造成的不合格品约 700 t。断口形貌由 3 部分组成, 内部黑心 + 放射区 + 剪切唇, 具体如图 1 所示。

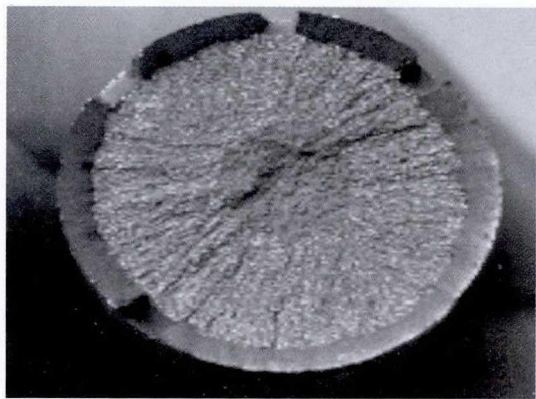


图 1 SWRH82B 钢  $\Phi 12.5$  mm 盘条异常断口形貌

Fig. 1 Morphology of abnormal fracture of steel SWRH82B  $\Phi 12.5$  mm coil

## 2 金相组织检验

对拉伸脆断裂的断口做金相分析。试样横截面经加工制样,用 4% 的硝酸酒精侵蚀后,断口样肉眼可见腐蚀面的中心部位出现了深色蚀痕,属碳偏析现象造成<sup>[3]</sup>。在显微镜下对异常断口进行观察,SWRH82B 钢盘条金相组织如图 2 所示。

由图 2 可知,异常断口有明显的中心网状碳化物,网状碳化物级别为 4 级。网状碳化物是一种脆性相,盘条拉拔过程中,不易变形,从而作为裂纹源出现断裂。

## 3 原因分析

异常断口是由于 4 级网状碳化物造成的断裂,对网状碳化物产生的机理进行分析。

### 3.1 断口 4 级网状碳化物产生的机理

SWRH82B 为过共析钢,终轧温度为 980  $^{\circ}\text{C}$  左右。根据铁-碳平衡相图,在轧后冷却过程中,当奥氏体冷却到稍低于  $A_{cm}$  线时,沿奥氏体晶界析出二

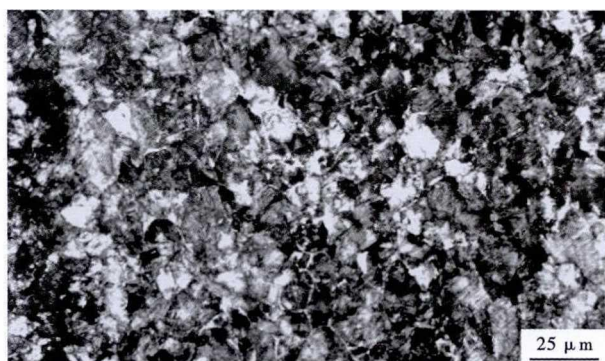


图 2 SWRH82B 钢盘条拉伸脆性断口的组织形貌

Fig. 2 Structure morphology of tensile brittle fracture of steel SWRH82B coil

次渗碳体,到达共析温度 723  $^{\circ}\text{C}$  时,奥氏体通过共析分解转变为珠光体。SWRH82B 盘条中心碳含量越高,加上冷却缓慢,二次渗碳体的析出量就越多。因此,SWRH82B 盘条中心存在严重的碳正偏析,再加上冷却缓慢是形成网状碳化物的主要原因。网状碳化物削弱了晶粒之间的结合力,在钢受力时容易沿晶界首先断裂<sup>[4]</sup>。

### 3.2 首炉 SWRH82B 钢中心偏析现状

邢钢的 SWRH82B 钢属于附带品,主要安排在第一炉生产,首炉生产特点是中间包温度高且无轻压下,理论上中心偏析严重。实际生产过程中,在 SWRH82B 钢炉次取样 5 块,采用  $\Phi 5$  mm 钻头在低倍样上钻样取屑,每 10 mm 距离钻一个点,如图 3 所示。

中心 C 偏析指数为  $X_0$  点 C 含量/所有点的 C 均值。经计算 5 块样做出的 C 偏析指数分别为 1.18、1.15、1.16、1.17、1.14,均值为 1.16,高于连铸坯中心偏析  $\leq 1.10$  的要求,铸坯中心碳偏析是造成盘条中心碳含量高的根本原因。

### 3.3 SWRH82B 钢中心偏析形成原因

为了研究 SWRH82B 钢中心偏析造成的原因,在生产连铸坯上取样做纵剖,低倍纵剖样如图 4 所示。

连铸坯厚度为 280 mm,140 mm 位置为正中心。从纵剖来看,中心区域 100 ~ 180 mm 存在明显的缩孔和 V 型偏析。关于偏析形成的主要理论有溶质元素富集论<sup>[5]</sup>、“晶桥”理论<sup>[6]</sup>、铸坯芯部空穴抽吸理论<sup>[7]</sup>、夹杂物浮力驱动通道说等。V 型偏析符合铸坯芯部空穴抽吸理论,最后凝固的富含 C 元素的浓化钢水会汇集到铸坯心部,在 V 型通道顶部形成

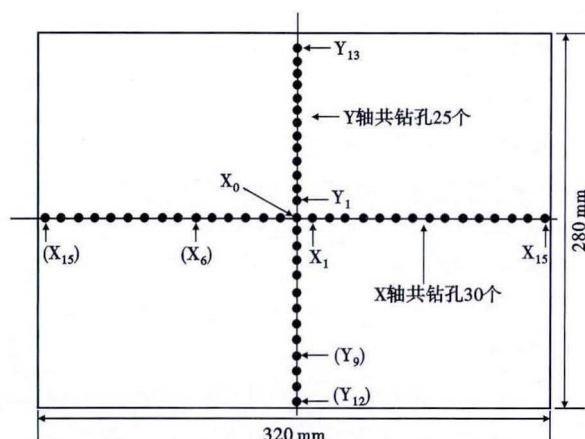


图 3 SWRH82B 钢连铸坯碳偏析取样位置

Fig. 3 Sampling location at steel SWRH82B casting bloom for examination of carbon segregation

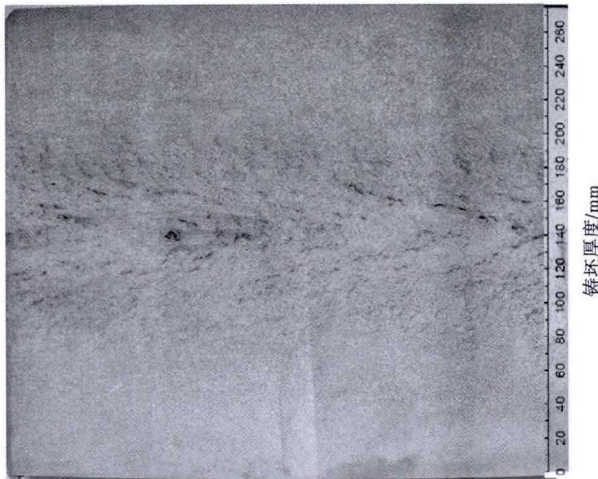


图 4 SWRH82B 钢铸坯 V-型偏析形貌

Fig. 4 Morphology of V-shaped segregation of steel SWRH82B casting bloom

明显的正偏析。

### 3.4 SWRH82B 钢中心偏析解决思路

SWRH82B 作为高碳钢,固液两相区较宽,容易产生偏析。铸坯芯部空穴抽吸理论认为,当铸坯在两相区凝固时会发生体积收缩;当连铸坯二冷区辊距较大以及连铸坯壳较薄或者铸坯液芯静压力过大时,会导致铸坯鼓肚变形,这样就会在铸坯中心产生相当于负压的抽力作用,两相区内偏析元素富集的钢液被吸向芯部,从而形成中心偏析带。在凝固末端施加一定的压下量,可以抑制富集偏析元素的钢水向凝固末端流动,从而改善铸坯的中心偏析<sup>[8]</sup>。

在图 5 所示的 5、6、7 区域内施加轻压下,来补充铸坯芯部钢水收缩所产生的抽吸作用。同时通过将不同辊的压下量进行适当调整,打断铸坯中心约 80 mm 范围内的“V”型通道形成,抑制中心碳偏析,达到控制中心偏析的目的。

## 4 工艺改进

### 4.1 中心偏析方案

SWRH82B 钢铸坯现工艺是首炉生产无轻压下。凝固过程中,形成明显的“V”型通道,从而造成严重的中心偏析。邢钢是拉矫辊作为压下辊,SWRH82B 钢拉速为 0.5 m/min,铸坯到达 1#拉矫辊时,已经全部凝固,不具备投用条件,中心偏析无法得到有效改善。

为解决中心偏析问题,结合其他钢种的经验,通过调整拉速和轻压下量,来解决中心偏析。拉速调整主要是将铸坯固液两相区调整到合适的范围内(0.3~0.7),通过调整轻压下各辊的压下量,达到

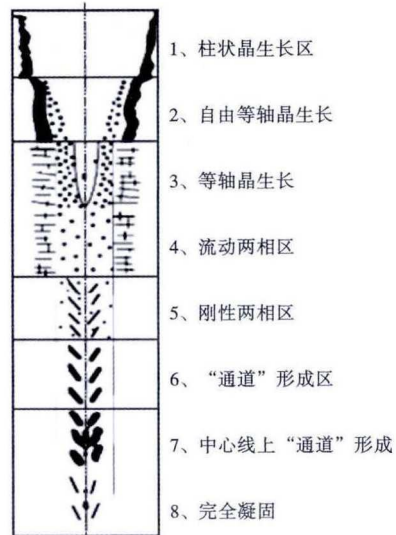


图 5 连铸坯凝固过程示意图

Fig. 5 Schematics of solidification process of casting bloom

表 2 SWRH82B 钢原工艺和优化工艺连铸参数

Table 2 Casting parameters of original and optimized processes for steel SWRH82B

方案	拉速/ (m · min <sup>-1</sup> )	轻压下各辊压下量/mm				
		1#	2#	3#	4#	5#
(a)原工艺	0.50	0	0	0	0	0
(b)方案 1	0.60	2	2.5	3.0	0	0
(c)方案 2	0.65	2	2.5	3.0	2	0
(d)方案 3	0.70	2	3.5	3.5	4	2

抑制中心偏析。具体实验方案如表 2 所示。

生产过程中,在每个方案进行一次实验,均取样 5 块,在铸坯中心 10 cm × 10 cm 范围内对中心偏析指数进行跟踪。

通过拉速和轻压下的调整,首炉 SWRH82B 钢偏析指数由原工艺的 1.16 降低到 1.08(见图 5),中心碳偏析指数得到明显改善,中心碳偏析得到控制,方案 3 为最佳方案。

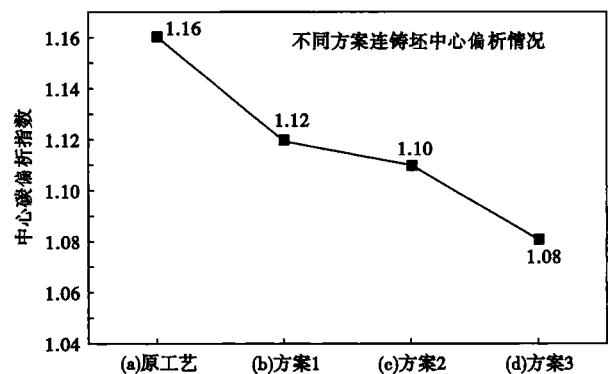


图 6 原工艺(a)和优化工艺(b,c,d)连铸坯碳偏析指数  
Fig. 6 Carbon segregation index of bloom casting by original process (a) and optimized processes (b, c and d)

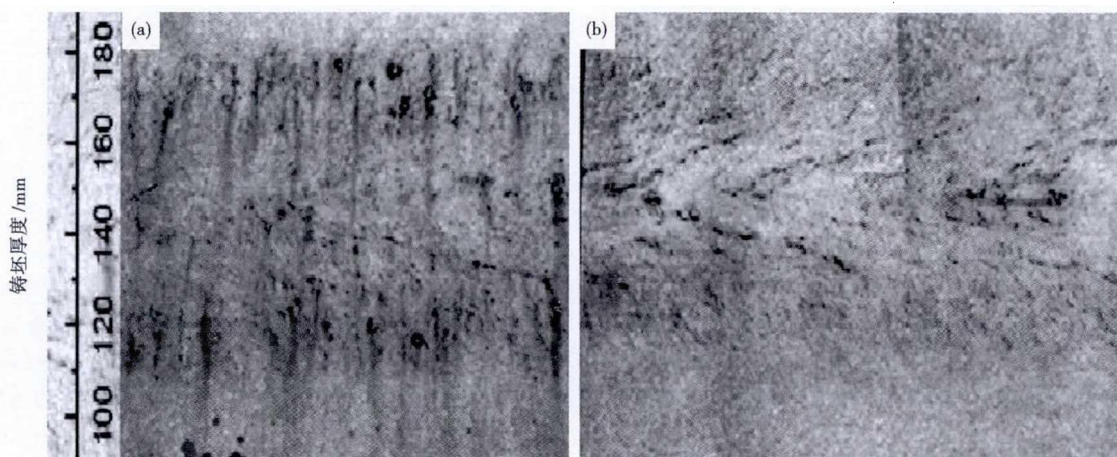


图 7 有轻压下(a- 优化工艺)和无轻压下(b- 原工艺)SWRH82B 钢铸坯 V 型偏析形貌

Fig. 7 Morphology of V-shaped segregation of SWRH82B steel casting bloom with soft reduction (a- optimized process) and without soft reduction (b- original process)

由铸坯纵剖样可见,铸坯中心 80 mm 范围内通道式“V”型偏析得到明显改善。由于投入轻压下,富含 C 元素的流动通道被轧合,减少了 C 在中心区域的富集,如图 7 所示。

连铸坯厚度为 280 mm,140 mm 位置为连铸坯正中心。由图 7 可知,中心区域 100 ~ 180 mm 内 V 型偏析得到明显的改善。投入轻压下的优化工艺的低倍组织几乎看不到通道式“V”型偏析,而原工艺的低倍组织中心区域存在明显的通道式“V”型偏析。

## 5 效果对比

通过连铸拉速和轻压下的优化,SWRH82B 钢的断面收缩率均值由 2016 年的 35% 提高 39%。断面收缩率低造成的不合格品由 2016 年的 60 t/月降到 2017 年的 12 t/月,SWRH82B 钢四级网状碳化物比例降低 80% 以上。

## 6 结论

(1)SWRH82B 钢  $\Phi 12.5$  mm 盘条异常断口是晶界处产生四级网状碳化物脆性相引起。网状碳化物脆性相不具备变形能力,拉拔时作为裂纹源,从而导致 SWRH82B 钢断面收缩率低。邢钢生产的 SWRH82B 钢四级网状碳化物主要由中心碳偏析引起。

(2)通过优化拉速、调整各辊轻压下量,打断了“V”型偏析的形成,将中心偏析指数由原工艺均值 1.16 降低到 1.08 以下。

## 参考文献

- [1] 张翔. 高碳钢 SWRH82B 线材的质量改进[J]. 轧钢, 2001, 18(4): 21-23.
- [2] 李文琴. 预应力钢丝断裂原因分析[J]. 金属制品, 2001, 27(4): 36-37.
- [3] 高速轧机线材生产编写组. 高速轧机线材生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [4] 桂美文. SWRH82B 高碳钢连铸坯中心偏析及线材质量的改善[J]. 炼钢, 2005, 27(4): 33-37.
- [5] 程常桂, 茅洪祥, 胡琳, 等. 轻压下技术在连铸中的应用[J]. 炼钢, 1998, 20(5): 42-44.
- [6] El-Bealy M. Modeling of Interdendritic Strain and Macrosegregation for Dendritic Solidification Processes: Part I. Theory and Experiments[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(2): 331-332.
- [7] 钱刚, 阮小江, 蔡莹莹, 等. 连铸轴承钢大方坯中心偏析的成因及对策[J]. 钢铁, 2002, 37(5): 16-18.
- [8] 钟晓丹, 刘军. 改善 350 mm  $\times$  470 mm 矩形坯宏观偏析研究与实践[J]. 连铸, 2016(4): 6-7.

和红杰(1984-),男,硕士(北京科技大学),工程师,2008 年河北科技大学(本科)毕业,冶金预应力钢等工艺研究。  
E-mail: 921407273@qq.com

收稿日期: 2017-10-22