

## 连铸坯中心偏析对 LX72A 钢帘线合股断丝的影响

王世芳 麻 晗 峰公雄  
(沙钢钢铁研究院, 张家港 215625)

**摘 要** 70 t BOF-LF- $\Phi$ 380 mm CC-开坯成 150 mm  $\times$  150 mm 方坯-CR 和 200 t BOF-LF-200 mm  $\times$  200 mm CC-CR 两种工艺路线所生产的  $\Phi$ 5.5 mm 盘条经拉拔成  $\Phi$ 0.22 mm 钢帘线合股过程的断丝率为  $\Phi$ 380 mm 圆铸坯工艺-2.86 次/t, 200 mm  $\times$  200 mm 方坯工艺- <1 次/t。检验结果表明, 圆坯工艺生产的盘条严重的中心偏析是大量断丝的主要因素, 150 mm  $\times$  150 mm 轧坯的宏观碳偏析高达 1.11。采用断面尺寸 200 mm  $\times$  200 mm 以上的方坯连铸工艺流程, 中间包钢水过热度 15 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$ , 拉速恒定, 采用结晶器和末端电磁搅拌, 可有效地减轻中心偏析。

**关键词** 帘线钢 工艺流程 中心偏析 断丝率

## Effect of Central Segregation of Casting Billet on Breakage of Steel LX72A Tire Cord in Stranding Process

Wang Shifang, Ma Han and Mine Kimio  
(Research Institute of Iron and Steel, Shasteel, Zhangjiagang 215625)

**Abstract** The breakage ratio in stranding process of  $\Phi$ 0.22 mm steel tire cord cold-drawn from  $\Phi$ 5.5 mm coil produced both process flow sheet of 70 t BOF-LF- $\Phi$ 380 mm bloom CC-breakdown 150 mm  $\times$  150 mm billet-CR and 200 t BOF-LF-200 mm  $\times$  200 mm bloom CC-CR process is  $\Phi$ 380 mm round bloom process-2.86 times/t and 200 mm  $\times$  200 mm bloom process-less than 1 time/t. Examination results show that the main factor for massive cord breakage is distinct central segregation of coil produced by round bloom, and the macro carbon segregation of 150 mm  $\times$  150 mm rolled billet is up to 1.11. Using bloom casting flow sheet with cross section size more than 200 mm  $\times$  200 mm, control over heating degree of liquid in tundish 15 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$ , constant casting speed and using mold and end electromagnetic stirring are available to decrease the central segregation.

**Material Index** Steel Tire Cord, Flow Sheet, Central Segregation, Breakage

随着中国汽车工业和汽车轮胎制造业的迅速发展, 2009 年帘线钢用量为 150 万 t。为适应汽车轻量化的要求, 钢帘线正在向高强度方向发展,  $\Phi$ 0.20 mm 单丝强度从现有 2 800 MPa 向 3 600 MPa 甚至 4 300 MPa 发展, 日本新日铁、神户制铁等已实现 4 300 MPa 级钢帘线盘条的商业化生产<sup>[1,2]</sup>。帘线钢盘条也在向高碳和微合金化方向发展, 0.72%、0.82% C 的常规级别帘线钢在国内得到普遍应用, 0.86%、0.92% C 以及添加微量 Cr、B、V 的钢种在德国和日本已形成工业化生产, 广泛用于切割钢丝和高级别钢帘线<sup>[3,4]</sup>。

钢材的可加工性是决定帘线钢发展的关键因素, 也是帘线钢品质高低的主要衡量指标<sup>[5]</sup>。盘条经过大拉、中拉、湿拉后, 由  $\Phi$ 5.5 mm 缩减到  $\Phi$ 0.15 ~ 0.38 mm, 随后合股, 成为绳索状钢帘线。加工性好的盘条, 合股过程断丝率低于 1 次/t, 可用于生产小直径的单丝和小捻距的钢帘线, 并能在生产效率高的双捻机上合股。加工性差的盘条, 在湿拉过程就会发生断丝, 合股断丝率甚至高达 3 次/t。

系统研究和分析高断丝率, 对指导实际生产和提高盘条加工性能具有重要意义<sup>[5-8]</sup>。

### 1 实验材料和方法

A 和 B 两条工艺路线生产盘条: A- 全铁水  $\rightarrow$  70 t 转炉  $\rightarrow$  LF 精炼  $\rightarrow$  380 mm 大圆坯连铸  $\rightarrow$  开坯成 150 mm  $\times$  150 mm 方坯  $\rightarrow$  二次加热  $\rightarrow$  高速线材轧制; B- 全铁水  $\rightarrow$  200 t 转炉  $\rightarrow$  LF 精炼  $\rightarrow$  200 mm  $\times$  200 mm 方坯  $\rightarrow$  二次加热  $\rightarrow$  高速线材轧制。A、B 两种盘条在钢帘线用户各试用 4 t, 试用条件相同。

试用之前, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)、碳硫联测仪和氧氮氢联测仪分析盘条的化学成分, 并按照贝卡尔特标准检测盘条质量。使用时, 统计合股过程断丝率, 在线收集合股断头。再用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 进行断口观察, 用电子探针 (EPMA) 对盘条纵截面进行面扫, 以表征盘条偏析程度, 还利用  $\Phi$ 5 mm 合金钻头在方坯上钻屑, 测量 C、S 含量, 表征方坯偏析程度。

### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 盘条检验结果

检测出实验盘条的化学成分如表 1,由表 1 可见 A 盘条碳、硫含量偏高。采用贝卡尔特检测标准对盘条质量进行评分,结果如表 2。从表 2 中可见,两种盘条的夹杂物和其它扣分完全相同,唯一的区别是中心偏析,B 盘条中心偏析扣分为 4.17,而 A 盘条中心偏析扣分高达 13.33,明显严重。采用贝卡尔特检测标准评价中心偏析的方法为:取一定数量盘条的横截面,腐蚀后直接肉

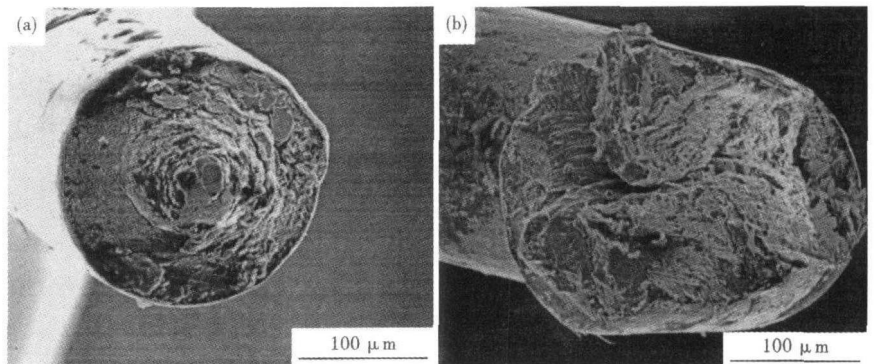


图 1  $\Phi 0.22$  mm 单丝合股断头形貌,SEM:(a)笔尖状;(b)劈裂状

Fig. 1 Morphology of fracture end of  $\Phi 0.22$  mm wire in stranding process, SEM: (a) cuppy fracture; (b) cleavage fracture

表 1 实验盘条 LX72A 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel LX72A coil / %

盘条	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	O	N
A	0.73	0.20	0.53	0.008	0.018	0.0020	0.0008	0.0021	0.0024
B	0.71	0.24	0.49	0.008	0.008	0.0009	0.0004	0.0027	0.0055

表 2 A、B 盘条贝卡尔特评分结果

Table 2 Bekaert penalty points for both A and B coil

盘条	夹杂物扣分	中心偏析扣分	其它扣分	总分
A	73.33	13.33	0	900.00
B	73.33	4.17	0	918.33

眼观察,然后对照贝卡尔特标准偏析图,得出相对应的偏析级别和罚分。

在研究中,A、B 两种盘条炼钢工艺相似,分析夹杂物后,发现两者夹杂物的成分、尺寸和数量相似,并且贝卡尔特夹杂物扣分也完全相同。这就可以排除夹杂物对合股断丝的影响。

## 2.2 工厂试用条件和结果

工厂试用是在相同条件下进行,均利用管式机生产 1522 面线。生产工艺如下: $\Phi 5.5$  mm 盘条→大拉至  $\Phi 3.2$  mm→980 °C 奥氏体化→580 °C 索氏体化→中拉至  $\Phi 1.33$  mm→980 °C 奥氏体化→580 °C 索氏体化→电镀→480 °C 扩散退火→湿拉至  $\Phi 0.22$  mm→管式机合股,生产  $(3+9+15) \times 0.22$  mm + 0.15 mm 的面线,大拉、中拉、湿拉分别指第 1、2、3 道次拉拔,以断面缩减率表征变形量,各道次拉拔断面缩减率依次分别为 66.15%、82.73%、97.26%。统计结果表明,在相同的生产条件下,A 盘条断丝率高达 2.86 次/t,而 B 盘条断丝率小于 1 次/t。在生产过程中跟踪收集一批 A 盘条合股断头。

## 2.3 实验室分析结果

图 1 是 A 盘条合股断头的 SEM 照片,其中图 1(a)

表现出笔尖状断裂形貌,大部分断头属于此类,图 1(b)为劈裂。一般认为合股笔尖状裂纹源产生于拉拔过程,是由拉拔过程的不均匀变形引起,而中心偏析导致了组织的不均匀,是笔尖状断裂的根源<sup>[9,10]</sup>。劈裂可能是由表面缺陷引起的。

A 盘条有严重的正偏析斑和负偏析环,相比之下,B 盘条整个横截面腐蚀后组织均匀一致,肉眼没有发现明显的偏析斑和负偏析白环(图 2)。

将盘条纵截面腐蚀后,A 盘条沿轧制方向有明显的偏析带,利用扫描电子探针(EMPA-1610)对 C、S、P、Mn 4 种易偏析元素进行面扫描,以表征其偏析程度,扫描位置是盘条纵截面中心轴线处,也是出现偏析带的地方。EPMA 试验束斑直径为 1  $\mu$ m,加速电压为 15 kV,离子束电流 6 nA。扫描面积为 604  $\mu$ m  $\times$  453  $\mu$ m,在该面积上分布的数据点为 640 点  $\times$  480 点,放大倍数为 500  $\times$ 。结果表明,C、S、P、Mn 元素沿轧制方向均出现了偏析。这与贝卡尔特判分中出现 13.33 分的中心偏析扣分相一致,均证明 A 盘条存在一定程度的中心偏析。

为了系统追踪偏析程度,对 A 盘条的方坯进行了检测分析。小方坯截面尺寸为 150 mm  $\times$  150

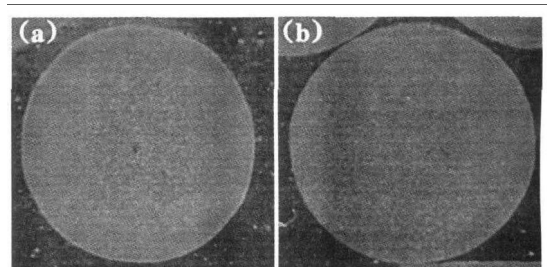


图 2 盘条偏析宏观组织:(a)A 盘条;(b)B 盘条

Fig. 2 Macro structure of segregation of coil: (a) coil A; (b) coil B

mm,低倍酸洗后,观察方坯低倍组织,将中心偏析最为严重的黑斑定为点1,沿对角线钻孔取屑。钻屑的钻头为 $\Phi 5$  mm的合金钻头。铁屑经清洗后测量C、S含量,见表3,盘条的平均值是测量 $\Phi 5.5$  mm盘条得到的C、S含量。其中C、S偏析比是方坯对角线离表面各个点C、S含量分别比上盘条C、S含量所得。实验结果表明,方坯中心C偏析高达1.11。

表3 A盘条的方坯中不同取样点C、S含量数据  
Table 3 Carbon and sulfur content of different sampling location in billet of A coil

钻屑位置	C含量/%	S含量/%	C偏析比	S偏析比
对角线离表面				
中心	0.816	0.018 4	1.11	1.01
3/4处	0.762	0.015 6	1.04	0.86
1/2处	0.742	0.015 4	1.01	0.85
1/4处	0.702	0.013 4	0.96	0.74
盘条中平均值	0.733	0.018 2		

上述实验结果表明,A材料从方坯到盘条都存在严重的中心偏析。中心偏析在连铸过程中形成,后续的加热和轧制只能略微改善,通过热扩散彻底消除中心偏析是不可能的<sup>[3]</sup>。珠光体相变过程中,由于C、S元素在中心处的富集,导致盘条中心处和边缘处组织不完全一样。中心部分C含量高,为过共析钢组织,存在不连续的先共析渗碳体或粗大渗碳体。而且,盘条中心和边缘部分珠光体的片层间距也有较大差异。组织上的差异,直接导致中心和边缘的力学性能差异。大拉和中拉过程中,在轴向拉应力和附加应力作用下,中心偏析处的先共析渗碳体和粗大渗碳体容易被拉断,形成微孔,微孔随着金属的塑性变形而长大,发展成微观裂纹<sup>[9]</sup>。 $\Phi 0.22$  mm单丝合股过程中,由于直径更细,且进一步受到扭转力和拉应力复合作用,微裂纹继续扩展、长大,直至引起材料断裂。心部的S元素,以MnS

的形式存在,在轧制过程中形成长条状的A类夹杂,破坏珠光体组织的连续性,也可能造成合股断裂<sup>[9]</sup>。

### 3 解决中心偏析方法

通过稳定、优化炼钢连铸工艺,能够消除中心偏析。国际上一流水平的帘线钢均采用大方坯连铸,如日本神户制铁采用320 mm×400 mm大方坯,其帘线钢不存在偏析方面的扣分。德国Saarstahl采用150 mm×150 mm小方坯连铸,偏析方面的扣分高出神户制铁10~25分。大方坯连铸一般都配备轻压下或者重压下装置,能显著减轻中心偏析,采用小方坯连铸,一般不配备压下装置,即使是采用强冷工艺和电磁搅拌,也难以有效解决中心偏析问题。经验说明,采用压下装置是消除中心偏析最佳手段。

此外,帘线钢连铸需要专用的钢包和中间包,并且中间包钢水的过热度应始终维持在15~25℃,拉速和二冷水应匹配得当,拉速应保持稳定。采用结晶器和末端电磁搅拌,在一定程度上能提高铸坯的等轴晶率,也是减轻中心偏析的有力手段,但末端搅拌的位置必须与连铸工艺相匹配。最后,提高加热炉的保温温度和延长保温时间,也有助于促进偏析碳元素的扩散,改善中心偏析。

### 4 结论

帘线钢A盘条加工过程断丝率2.86次/t,高于B盘条,主要原因是中心偏析。合股断头呈笔尖状。EPMA分析结果表明,盘条心部C、S、P、Mn元素均存在严重的偏聚。方坯钻屑实验表明,方坯碳偏析高达1.11。要完全消除中心偏析,中间包钢水的过热度控制在15~25℃,连铸过程需配备压下装置,末端电磁搅拌位置应适当。

### 参考文献

- 1 Toshihiko Takahashi, Ikuro Ochiai, Hitoshi Tashiro, et al. Strengthening of Steel Wire for Tire Cord. Nippon Steel Technical Report, 1995, 64(14):42
- 2 Takaaki Minamida, Noriaki Hiraga, Takao Shibata. Developments in Steel Cord Wire Rods. Kobe Steel Engineering Reports, 2000, 50(3):31
- 3 孟宪成,刘宇,史秉华,等.帘线钢坯中心碳偏析的热扩散规律研究.金属热处理,2009,34(11):101
- 4 Han K, Smith G D W, Edmonds D V. Developments in Ultra-high-carbon Steels for Wire Rod Production Achieved Through Microalloying Additions. Materials and Design, 1993, 14(1):79
- 5 黄建波,杭乃勤,刘斌.国内外帘线钢盘条质量分析.武汉科技大学学报,2008,31(4):346
- 6 Michael Zelin. Microstructure Evolution in Pearlite Steels during Wire Drawing. Acta Materialia, 2002, 50:4431
- 7 刘宏玉,郑建强,李玉华,等.帘线钢中Ti夹杂物研究.北京科技大学学报,2010,32(7):866
- 8 高文芳,赵继宇,易卫东,等.钢中非金属夹杂物塑化研究.炼钢,2008,24(6):22
- 9 孟宪成,王勇,刘雅政.72A帘线钢线材冷拔笔尖状断裂分析和改进工艺措施.特殊钢,2009,30(5):55
- 10 齐保定,韩观昌.钢帘线双捻断丝时杯锥状断口的形成机理.金属制品,1991,17(6):11

王世芳(1984-),女,硕士,助理工程师,2007年南京航空航天大学毕业,棒线材新品种开发。

收稿日期:2011-01-19