

## 钢帘线用钢 C82D2 盘条拉拔断丝成因分析和工艺改进

李桂英 李麦麦

(中信特钢青岛特殊钢铁有限公司试验检测所, 青岛 266409)

**摘要** 分析结果表明,连铸坯中心偏析严重,易使盘条在拉拔时,产生杯锥状断裂;盘条中的非金属夹杂物,使盘条在拉拔和捻制变形时,因应力作用而造成钢丝断裂;钢中 O、N 含量过高,会使钢的强度和硬度升高,塑韧性下降。合理的吐丝温度和冷却速度,能保证盘条获得理想的细索氏体组织。通过控制 $[O] \leq 20 \times 10^{-6}$ , $[N] \leq 40 \times 10^{-6}$ ,连铸钢水过热度 $\leq 25$  °C,轧制加热 $1\ 100 \sim 1\ 170$  °C,吐丝 $910 \sim 930$  °C等工艺措施,避免了拉拔断丝。

**关键词** C82D2 钢帘线 中心偏析 夹杂物 质量研究

## Investigation of Drawing Fracture Cause of C82D2 Steel Wire for Steel Cord for Tyre and Process Improvement

Li Guiying and Li Maimai

(Testing Institute, Qingdao Special Iron and Steel Co Ltd of the Citic Special Steel, Qingdao 266409)

**Abstract** Analysis results show that the center segregation of continuous casting billet is serious, easy to cause cup and cone fracture when the rod is drawn; the non-metallic inclusions in the wire rod cause the wire fracture due to the stress when the wire rod is pulled out and twisted; if the content of O and N in steel is too high, the strength and hardness of steel will increase, and the toughness will decrease; reasonable coiling temperature and cooling rate can ensure the ideal micro structure of the wire rod. By controlling  $[O] \leq 20 \times 10^{-6}$ ,  $[N] \leq 40 \times 10^{-6}$ , costing liquid superheating  $\leq 25$  °C, rolling billet heating at  $1\ 100 \sim 1\ 170$  °C and coiling at  $910 \sim 930$  °C etc process measures the drawing fracture is avoided.

**Material Index** C82D2, Steel Cord, Central Segregation, Non-Metallic Inclusions, Quality Investigation

钢帘线作为橡胶骨架材料,主要用于子午线轮胎的带束层和胎体层。用于生产钢帘线的原材料钢帘线用盘条因其生产技术难度高,是超洁净钢的代表产品和钢铁企业线材生产水平的标志性产品,被誉为“皇冠上的明珠”。钢帘线的常规的单丝直径 $\Phi 0.15 \sim 0.38$  mm,目前最细规格达到 $\Phi 0.12$  mm,采用 $\Phi 5.5$  mm的盘条开始拉拔,总减面缩率达95%以上,而在随后的双捻过程中还要经受扭转、弯曲和拉伸等一系列变形,一般要求100 km断丝不超过一次。可见,只有最优质的线材方能保证其使用要求和加工过程的高效进行。

为了进一步提高C82D2钢盘条的质量,对影响C82D2钢盘条质量的因素进行了综合分析和研究,分析了钢帘线盘条断丝成因与成分、夹杂物、生产工艺的关联性;特制定改进工艺措施,加强生产过程控制,以便生产质量更高及拉至更细规格的钢帘线。

坏生产的 $\Phi 5.5$  mm C82D2钢帘线用盘条,盘条的化学成分如表1所示。

生产工艺流程如下:

铁水预处理→100 t顶底复吹转炉冶炼→LF精炼→六机六流弧形连铸机浇注(电磁搅拌+轻压下)→蓄热式加热炉加热→高压水除磷→全线无扭高速线材轧机控轧控冷→精整→检验→打包、称重→入库。

### 2 试验与分析

#### 2.1 化学成分对盘条质量的影响

帘线用钢对于成分的要求较为严格,不同炉次或同炉之间要求成分必须保持均匀(如C控制在 $\pm 0.01\% \sim 0.02\%$ )波动幅度小,Al含量控制在0.005%以下,Cr、Ni、Cu等残余元素总量控制在0.20%以下,否则会造成盘条的通条性能不均匀在

表 1  $\Phi 5.5$  mm C82D2 钢盘条化学成分/%

Table 1 Chemical composition of C82D2 steel  $\Phi 5.5$  mm coil/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al
实测值	0.82	0.22	0.52	0.010	0.006	0.002 1	0.001 5	0.002 8	0.002
标准	0.80 ~	0.15 ~	0.45 ~	$\leq$	$\leq$	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$	$\leq$
范围	0.85	0.30	0.60	0.020	0.010	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$	$\leq 0.08$	0.005

### 1 试验材料与生产工艺

试验材料采用青岛特钢180 mm × 240 mm 规格的矩形

加工过程中造成断丝。

帘线钢中有害元素含量过高<sup>[1]</sup>也会导致拉拔及合股断丝现象的发生。例如,S 含量过高,会降低钢的塑性、韧性及产生热裂;P 含量过高,会造成冷脆及降低塑性;Cu 含量过高,会引起红脆,因此,必须严格控制。Ti 与 N 在凝固中形成小尺寸、带棱角的、硬脆的 TiN 夹杂,即钛夹杂<sup>[2]</sup>。钛夹杂在钢丝拉拔过程中加重模耗,导致拉拔和合股断丝的产生,并严重恶化成品的抗疲劳性能。Al 是强脱氧元素,钢液脱氧过程中一旦析出  $Al_2O_3$  夹杂,精炼过程中无法将它们从钢液中彻底去除;特别是尺寸小于  $10\ \mu\text{m}$  的夹杂,要通过常规的精炼工艺从钢液中去除十分困难。即使将钢液全氧质量分数降低  $(5 \sim 6) \times 10^{-6}$ ,材料疲劳断口上仍然发现直径为  $10 \sim 20\ \mu\text{m}$  的  $Al_2O_3$  夹杂颗粒。另外,钢中 Al 元素还会与渣中的  $TiO_2$  发生反应,使渣中氧化钛被还原后进入钢液中,不利于 Ti 的去除。限制原辅材料中的 Al 含量是非常必要的。此外,Mn、Cr、Ni 等元素含量会影响热处理工艺及产品性能,也必须严格控制。

## 2.2 连铸坯中心偏析对盘条质量的影响

### 2.2.1 中心偏析系数的测定

高碳钢偏析是影响断丝的一个重要因素,偏析高对轧钢组织控制带来不良的影响,同时使夹杂物的分布不均,产生断丝。

钢帘线用钢 C82D2 盘条成材的中心偏析级别一般要求  $\leq 2$  级,盘条的金相组织应主要为索氏体组织,不应有马氏体、网状渗碳体及对性能有害的组织,为此,检测了 C82D2 钢连铸坯中心偏析的情况,结果表明,心部最大含碳量为 1.04%,中心碳偏析系数达到 1.27,远超出标准要求(钢帘线用小方坯中心碳偏析系数  $\leq 1.05$ )。其它元素偏析程度较小。

### 2.2.2 中心偏析的危害及控制

用该连铸坯所轧制的 C82D2 钢  $\Phi 5.5\ \text{mm}$  盘条,用户拉拔后易发生脆断且断口呈杯锥状,纵剖该断口试样发现中心部位存在“V”形裂纹,如图 1(a)所示。金相组织检验发现,中心处存在着网状或半网状晶界渗碳体,如图 1(b)所示,渗碳体本身就硬而脆,不易变形,在晶界处呈网状或半网状分布,其对盘条质量的危害更大,在拉拔时易沿晶界产生裂纹,在进一步拉拔时脆断,究其原因是因为连铸坯本身存在着中心碳偏析,尽管轧制时线材组织处于奥氏体化状态,且轧制温度较高,但由于保温时间有限,心部碳偏析难以消除,从而破坏了线材基体组织

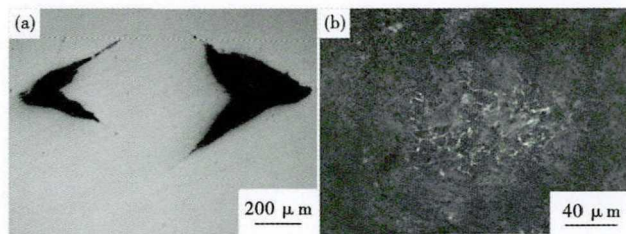


图1 C82D2 钢  $\Phi 5.5\ \text{mm}$  盘条拉拔断口“V”形裂纹,纵向(a)“V”形裂纹中心组织,横向(b)

Fig. 1 “V”- crack at drawing fracture, longitudinal (a), structure at “V”- crack center, cross-section (b), C82D2 steel  $\Phi 5.5\ \text{mm}$  coil

的均匀性能,导致线材在拉拔过程中形成杯锥状断口而断裂。中心偏析是连铸小方坯代表性的缺陷,解决的办法是采用大尺寸矩形坯轧制方坯,因为大尺寸铸坯在轧制时能增加轧制比,消除上述缺陷,所以一般不宜用小于  $120\ \text{mm} \times 120\ \text{mm}$  的连铸方坯,特别是轧制含 C 量大于 0.75% 线材。另外,严格控制钢水的过热度<sup>[3]</sup>,采用较低的过热度浇注 ( $\Delta T \leq 25\ ^\circ\text{C}$ ),采用电磁搅拌及连铸时轻压下技术,同时采用强化连铸二冷段冷却强度和合理的拉速等方法来降低中心偏析。目前公司所生产的产品极大部分中心偏析级别都能满足要求,但也有很小部分盘条中心偏析级别为 2.5 级。其中中心偏析 2.0 级比例达到 99%。

## 2.3 非金属夹杂物对盘条质量的影响

### 2.3.1 帘线钢对夹杂物的要求

国际上,钢帘线用钢最常用的标准为意大利皮拉利标准,该标准对夹杂物的要求为<sup>[4]</sup>:钢中总氧含量  $\leq 30 \times 10^{-6}$ ,夹杂物最大尺寸一般要求直径  $< 15\ \mu\text{m}$ ,更细的丝及高强度帘线要求夹杂物直径小于钢丝直径的 2%,钢中不允许纯  $Al_2O_3$  和 TiN 夹杂存在,复合氧化物夹杂中  $Al_2O_3$  要求质量分数  $\leq 50\%$ ,夹杂物数量根据不同的强度级别、不同钢丝直径的要求,一般要控制在  $1\ 000$  个/ $\text{cm}^2$  以下。皮拉利标准仅仅是对帘线钢夹杂物水平的的最基本要求,实际上,对目前帘线钢生产企业来讲,对夹杂物尺寸的要求一般是:普通强度级别 ( $C = 0.72\%$ ),夹杂物允许尺寸为  $10\ \mu\text{m}$ ,对于更高强度级别的钢帘 ( $C = 0.82\%$ ),夹杂物允许尺寸为  $5\ \mu\text{m}$ 。此外,对于总氧和夹杂物形态的要求也要高于皮拉利标准。

### 2.3.2 夹杂物的危害及控制

通过对 C82D2 钢盘条的非金属夹杂物检验发现,C82D2 钢盘条的非金属夹杂物一般为 A、D 类夹杂,A 类夹杂物级别一般为 0.5 ~ 1 级,D 类夹杂物

表 2 C82D2 钢盘条的夹杂物分布  
Table 2 Distribution of inclusions in C82D2 steel coil

试样 编号	夹杂物分布 / 个				Ti 夹杂	面积/ mm <sup>2</sup>
	1 ~ 2 μm	2 ~ 5 μm	5 ~ 8 μm	>8 μm		
1#	199	24	0	0	0	24.8
2#	123	18	0	0	0	17.5

一般为 0.5 级, B、C 类夹杂物较少, D 类别夹杂物尺寸一般小于 5 μm, 绝大多数为 1 ~ 2 μm, 夹杂物统计结果如表 2 所示。

由图 2(a,b) 可知, 在检验中也发现了 B 类 2.5 级, C 类夹杂 3 级的情况, 观察到的夹杂物最大宽度为 30 μm, 远超过标准要求(标准要求 C 类 ≤ 1 级, B 类 ≤ 0.5 级), 图 2(a,b) 为 B2.5 级, C3 级非金属夹杂物的能谱分析。从夹杂物的成分来看, 夹杂物超标主要是由于结晶器卷渣、水口浸蚀和耐火材料的熔损所造成的。非金属夹杂物存在于盘条中, 对盘条后续加工主要有如下几方面的危害<sup>[5]</sup>:

(1) 拉拔和捻制变形时, 钢基体变形而夹杂物不变形, 这样在钢和夹杂之间首先产生一个裂纹源,

裂纹源沿钢基体扩展。使钢的抗拉强度降低, 当外部拉力大于该缺陷处的抗拉强度时即发生断裂破坏了钢丝基体的连续性, 造成应力集中, 一旦受到拉应力或切应力的作用, 沿夹杂物方向就产生破裂, 造成钢丝拉拔捻制时易断裂, 且断口不规则。

(2) 非金属夹杂物降低钢丝力学性能, 尤其是降低其横向力学性能, 使钢丝塑性降低, 在高变形情况下易断裂、弯曲扭转值降低, 非金属夹杂物成为钢丝疲劳断裂源, 造成钢丝耐疲劳极限降低。

(3) 在钢丝热处理时, 由于非金属夹杂物的膨胀系数与钢丝基体有差异, 在钢丝内割裂钢丝基体连续性, 起局部缺口作用, 造成钢丝热处理过程中形成微裂纹, 在继续拉拔、捻制时微裂纹发展使钢丝断裂。

因此, 为了减少钢中的夹杂物, 制订工艺改进措施。

①防止结晶器卷渣, 使用合适的熔点、熔速保护渣, 控制结晶器液面高度及保持钢水流动的稳定性。优化保护渣性能, 增强保护渣吸附夹杂物能力。

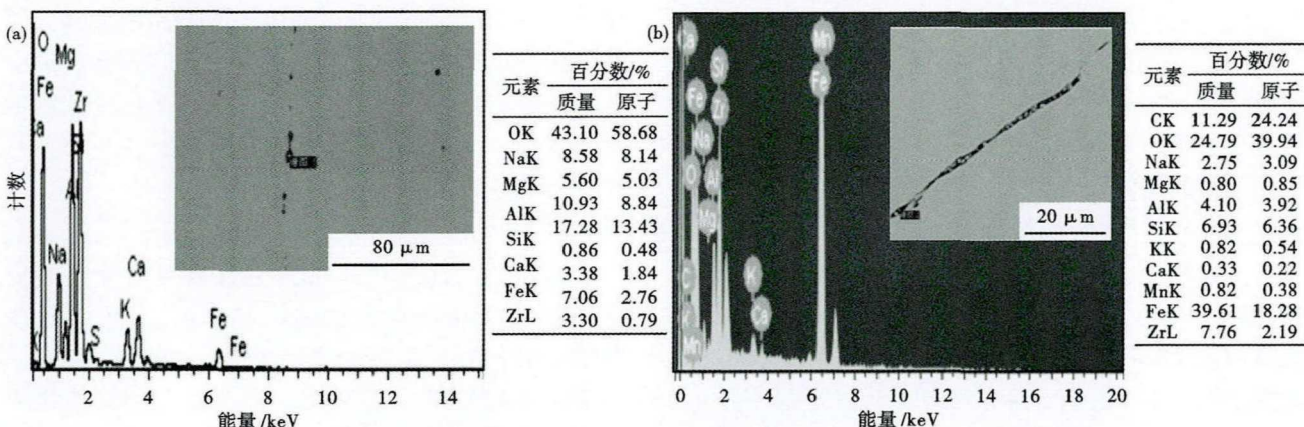


图 2 C82D2 钢盘条 B 类(a)和 C 类(b)非金属夹杂物的形态及成分分析  
Fig. 2 Morphology and analysis of B-type (a) and C-type (b) non-metal inclusion in C82D2 steel coil

②改善内衬耐火材料质量, 减少耐材熔损。

③提高非稳态操作水平, 是提高连铸坯洁净度的关键。

#### 2.4 气体含量对盘条质量的影响

通过对 C82D2 钢盘条 O、N 分析发现, 盘条中的 O 含量一般为  $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ , N 含量一般为  $(20 \sim 40) \times 10^{-6}$ , 盘条中的 O 含量一般能满足标准要求, 盘条中的 N 含量虽然能满足内控标准要求, 但控制水平不稳定, 有时为  $20 \times 10^{-6}$ , 有时大于  $30 \times 10^{-6}$ , 钢中 N 是有害元素, 其对钢的影响主要有以下几个方面: N 在晶界析出, 钢质出现蓝脆; N

与钢中 Ti 或 Al 结合生成 TiN 或 AlN, 弱化晶界强度, 使钢的脆性区发生变化, 铸坯表面易出现裂纹; 降低钢的韧性、焊接性能、热应力区韧性, 提高钢材脆性; N 能增加钢的实效硬化性, 使钢的强度和硬度提高, 塑性、冲击性和韧性显著下降。尤其对于 C82D2 这样的高碳钢, 在加工冷却过程中, 这种现象更为严重。因此为了降低钢中的 N 含量, 采取以下工艺改进措施<sup>[6]</sup>: (1) 转炉工序采取高拉碳一次点吹、高碳出钢、降低炉后增碳剂的使用量, 选用合适的合金种类等。(2) 精炼时, 钢水弱脱氧、减少大氩气搅拌, 采取大渣量、造泡沫渣操作。(3) 合理控制

长水口密封吹氩流量。

钢中的 O 同 N 一样,也会对钢的力学性能产生不良影响,影响程度与 O 的浓度以及含 O 的夹杂物类型、分布、多少有关。研究表明,氧化物夹杂的数量随钢中全氧含量的增加而增加,控制钢洁净度的关键在于把钢中全氧含量降低到较低水平,以减少氧化物夹杂的总量。目前国外高品质帘线用钢的全氧含量一般都控制在  $<20 \times 10^{-6}$  的水平。

## 2.5 轧后控冷工艺对盘条质量的影响

### 2.5.1 控制冷却对强度的影响

C82D2 钢线材需要通过深度拉拔和捻制来生产钢帘线,一般要求具有以索氏体为主的均匀组织,而且追求高的索氏体的体积分数和较小的片层间距。索氏体化的体积分数越高,片间距越小,断面收缩率越高。控制冷却的主要目的是控制过冷度及冷却速度<sup>[7]</sup>,得到强韧化所需求的索氏体组织,根据金属热处理原理加快冷却速度,可以使连续冷却曲线向右下方移动,冷却速度越快,C 曲线向右下方移动越大,Ar<sub>3</sub> 点越低,T<sub>A</sub>c 越小,冷却时的过冷度越大。

对于斯太尔摩标准冷却模式强制风冷来说,其冷却速度不可能达到形成马氏体的临界转变温度,风冷速度越快,奥氏体转变成索氏体越容易。因此,在实际冷却时采用大风量,以求快速冷却,一则可以控制渗碳体的析出,二则可增大过冷度,对强度有特别要求的 C82D2 钢盘条来说,设定较高的吐丝温度以加大冷却速度,可以达到提高强度的效果。随吐丝温度的提高,盘条的抗拉强度有明显的升高,这似乎与吐丝温度越高晶粒越粗大、吐丝温度越低晶粒越细小的理论相矛盾<sup>[7]</sup>。其实,此类钢经过微合金化,加之在轧制时进行了控温轧制,经过回复与再结晶,形变奥氏体晶粒已经相当细,即使提高了吐丝温度,对晶粒的粗化程度相对很小,因而对强度的影响可忽略。应当注意,吐丝温度不能过高,否则由于空冷设备限制,使高碳钢线材组织转变不能在控冷线上完全结束,不仅不能得到预期的组织,同时盘条表面也容易形成较厚的不利于拉拔的氧化铁皮,使盘条的综合性能降低。因此要合理控制吐丝温度及轧后冷却强度,以获得最终组织为模拟铅浴淬火组织,即细索氏体组织,使成品具有较高的强度及良好的塑性。

### 2.5.2 C82D2 钢盘条的组织现状

通过对 C82D2 钢盘条的组织检验,发现组织绝大多数为 S+P,但也有极少量盘条心部出现了晶界渗碳体,其级别为 0.5~2 级。据统计,159 批

C82D2 钢中渗碳体大于 0.5 级的有 6 批(5 批 1.0 级,1 批 2 级),占 3.77%。索氏体化率一般在 90% 左右,(用同一软件测量)与国内外其他钢厂 82 级钢帘线索氏体化率基本相当。

有研究表明,索氏体的抗拉强度与硬度基本上随片间距的减小而呈直线上升,断面收缩率与伸长率等塑性指标开始随过冷度的增大及片间距的减小有所提高,达到一定数值后,稍趋向降低。因此,细索氏体的组织结构最有利于盘条的拉拔,某公司盘条索氏体片层结构相对于国内 C 和国内 A 显得有点粗大,对盘条的拉拔性能有不利的影晌。因此,有待于进一步增强盘条冷却速度,细化索氏体组织结构。

## 3 工艺改进

### 3.1 工艺改进措施

(1) C 含量波动要控制在  $\pm 0.01\% \sim 0.02\%$ ,使用特殊合金及合成渣,尽量将原辅材料中的有害元素限制在最低水平。

(2) 中心偏析是连铸小方坯代表性的缺陷,解决的方法是增大连铸坯尺寸,应  $>180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  为宜,以提高轧制比。

(3) 严格控制钢水的过冷度,采用连铸坯凝固末端轻压下技术及电磁搅拌技术,减小柱状晶及中心偏析,以提高连铸坯内部质量。

(4) 使用合适的保护渣控制结晶器液面高度及钢水流动的稳定性,防止结晶器卷渣。使用优质耐火材料,提高非稳态操作水平。

(5) 严格控制钢中 N 含量,采用低氮增碳剂、低氮合金,高碳出钢、降低炉后增碳剂的使用量,减少大氩气搅拌,合理控制长水口密封吹氩流量。

(6) 强化控轧控冷技术,采用合适的吐丝温度及轧后冷却强度以获得理想的细索氏体组织。

### 3.2 工艺改进前、后的对比

#### 3.2.1 连铸坯中心偏析改善

公司采用  $180 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$  矩形坯生产  $\Phi 5.5 \text{ mm}$  规格 C82D2 钢帘线用盘条。通过射钉法确定了连铸坯凝固末端的位置,结合自主研发的凝固模型确定了最佳的压下区间为  $f_s = 0.40 \sim 0.7$ 。结合拉速选在最佳的压下区间内设计了合理的压下量,保证在该压下量下既能够补偿压下区间内的凝固收缩,减轻中心偏析和中心疏松又避免铸坯产生内裂。经过轻压下工艺优化后盘条的碳偏析指数由 1.20 降低到了 1.05,满足了生产高质量钢帘线用盘条的

需求。通过优化后盘条中心偏析 2.0 级的比例由 96.5% 提高到 99.1%。

### 3.2.2 轧钢工艺优化

由于高碳钢连铸坯普遍存在一定的中心偏析,偏析指数偏高严重影响材料的均匀性,甚至出现异常组织。轧制加热过程通过提高加热炉温度和延长保温时间,促进碳原子的扩散,降低中心偏析的影响。轧制过程合理的吐丝温度和冷却速度保证了盘

条获得了理想的索氏体化组织。工艺优化前后的参数对比如表 3 所示。工艺优化后帘线钢盘条索氏体片层间距变得更加均匀,且铁素体/渗碳体取向一致性较强,更加有利于细丝拉拔,工艺优化前后盘条的组织如图 3 所示。

轧钢工艺优化前后盘条的同圈强度极差如图 4 所示。通过轧钢工艺优化后盘条的抗拉强度极差由 100 MPa 降低到 60 MPa 以内。

## 4 结论

(1) 应严格控制 C82D2 钢盘条化学成分的均匀性和有害元素的含量。

(2) 连铸坯中心偏析严重,易使盘条在拉拔时断裂,产生杯锥状断口。

(3) 盘条中的非金属夹杂物,使盘条在拉拔和捻制变形时,因应力作用而造成钢丝断裂。

(4) 钢中 O、N 含量过高,会使钢的强度和硬度升高,塑韧性下降。

(5) 通过轧制工艺优化后盘条的抗拉强度同圈极差控制在 60 MPa 以内,工艺优化后帘线钢盘条索氏体片层间距变得更加均匀,且铁素体/渗碳体取向一致性较强,更加有利于细丝拉拔。

表 3 C82D2 钢轧钢工艺优化前后对比

Table 3 Comparison of C82D2 steel rolling process between before and after optimization

工艺	加热温度/ ℃	保温时间/ min	吐丝温度/ ℃	冷却速度/ (℃·s <sup>-1</sup> )
优化前	1 050 ~ 1 100	65	850 ~ 870	20
优化后	1 100 ~ 1 170	70	910 ~ 930	25

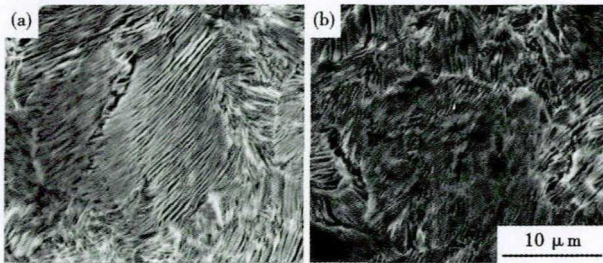


图 3 工艺优化前(a)后(b)C82D2 钢盘条组织对比

Fig. 3 Comparison of C82D2 steel coil structure before (a) and after (b) process optimization

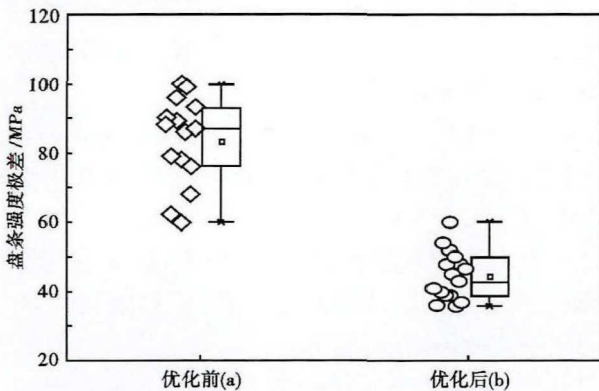


图 4 优化前(a)后(b)C82D2 钢盘条的同圈强度极差

Fig. 4 Range of same circle strength of C82D2 steel in coil before (a) and after (b) process optimization

## 参考文献

[1] 王 勇,王全礼,陈明跃.帘线钢质量影响因素及控制措施[J].天津冶金,2005,34(6):36-39+84.

[2] 卢玉英,王志福.帘线钢质量控制技术[C].中国金属学会:2006年线材制品国际技术研讨会会议文集,2006:5.

[3] 赵荣玖.钢质量的现代进展[J].山东冶金,1996,18(5):26-28.

[4] 易卫东,赵继宇.夹杂物对钢帘线断丝的影响及其控制[C].中国金属学会:全国高速线材生产技术交流会议论文集,2007:7.

[5] 夏木阳,刘建平.非金属夹杂物对钢丝性能的影响[J].金属制品,2001,27(1):44.

[6] 宁 东,张晓军,杨 辉.帘线钢中氮的产生原因及对策[J].鞍钢技术,2008,44(3):38-41.

[7] 王 瑾.低合金高碳钢盘条强韧化途径[J].金属制品,2000,26(B09):31-34.

李桂英(1971-),女,高级工程师,硕士(辽宁科技大学),主任工程师,1993年武汉冶金科技大学(本科)毕业,冶金理化检验。E-mail:liguiying0320@163.com

收稿日期:2021-05-07