

# BOF-LF-CC 生产 SWRH82B 硬线钢的洁净度研究

张游游<sup>1)</sup>, 刘建华<sup>1)</sup>✉, 苏晓峰<sup>1)</sup>, 崔衡<sup>2)</sup>, 张杰<sup>1)</sup>, 季益龙<sup>1)</sup>

1) 北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083 2) 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083  
✉ 通信作者, E-mail: liujianhua@metall.ustb.edu.cn

**摘要** 采用系统取样与实验室综合分析, 对 BOF-LF-CC 工艺生产的 SWRH82B 钢洁净度演变规律进行研究。结果表明, 钙处理后钢中 T[O] 和显微夹杂物数量显著下降, 轻微增氮; 浇铸过程增氧增氮严重; 铸坯中  $< 5 \mu\text{m}$  显微夹杂占 97%, 主要是棱角分明的纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 球状复合氧化物与 CaS 和 MnS 的复合夹杂, 简单氧化物或氮化物与 MnS 的复合夹杂; LF 精炼后钙处理, 脱氧显著, 但使得铸坯中出现很多  $\text{Al}_2\text{O}_3$  硬性夹杂, 对 SWRH82B 盘条质量造成严重的危害; 中间包结构不合理, 卷渣、内衬侵蚀和二次氧化严重, 连铸过程钢液洁净度下降。

**关键词** 高碳钢; 夹杂物; 洁净度; 卷渣; 二次氧化; 钙处理  
**分类号** TF761<sup>+</sup>.4

## Cleanliness study of SWRH82B hard wire steel produced by BOF-LF-CC processes

ZHANG You-you<sup>1)</sup>, LIU Jian-hua<sup>1)</sup>✉, SU Xiao-feng<sup>1)</sup>, CUI Heng<sup>2)</sup>, ZHANG Jie<sup>1)</sup>, JI Yi-long<sup>1)</sup>

1) Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
✉ Corresponding author, E-mail: liujianhua@metall.ustb.edu.cn

**ABSTRACT** The cleanliness evolution of SWRH82B steel produced by the BOF-LF-CC process was studied by systematic sampling and lab comprehensive analysis. The results show that the content of oxygen and the number of micro-inclusions significantly decrease after calcium treatment, while the content of nitrogen in molten steel slightly increases. Both the contents of oxygen and nitrogen sharply increase during the casting process. 97% of the micro-inclusions in casting billets are smaller than  $5 \mu\text{m}$ . They mainly include trenchant angularity single  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions, spherical complex inclusions of oxides with CaS and MnS, and complex inclusions of simple oxides or nitrides with MnS. Calcium treatment after LF refining removes oxygen from molten steel efficiently, but increase the amount of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions in casting billets, which is harmful to the quality of SWRH82B steel. Due to serious lag entrapment, refractory erosion and reoxidation caused by unreasonable tundish structure, the cleanliness of liquid steel decreases.

**KEY WORDS** high carbon steel; inclusions; cleanliness; slag entrapment; reoxidation; calcium treatment

SWRH82B 高碳钢作为高强度预应力钢丝和钢绞线的典型用钢, 广泛运用于铁路、公路、桥梁、核电站、水泥制品等领域<sup>[1-6]</sup>。此类产品要求严格控制化学成分、有害元素含量和非金属夹杂物的数量、尺寸和类型<sup>[7-8]</sup>, 这就要求在冶炼过程中减少脆性夹杂的数量及提高钢水的洁净度<sup>[9-12]</sup>。本研究对国内某厂 BOF-LF-CC 工艺生产 SWRH82B 钢进行洁净度分析, 找出

影响铸坯洁净度原因, 为现场操作和工艺改进提供参考。

## 1 实验内容及研究方法

### 1.1 生产工艺概况

国内某厂 SWRH82B 高碳硬线钢的主要生产流程为 130 t 顶底复吹转炉—130 t LF 精炼—钙处理—软

吹—连铸—高速线材轧制。采用转炉炉后加入硅锰、高碳锰和铬铁进行脱氧合金化; LF 进行造白渣操作, 加入硅钙进行深脱氧, 加入少量合金进行成分微调, 精炼后喂高钙线进行钙处理, 软吹后进行方坯连铸, 铸坯

断面  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 。表 1 是 SWRH82B 钢的主要成分。过程中未采用真空处理, 中间包未采用挡坝挡墙和湍流控制器。中间包三视图见图 1, 并对各流次进行编号。

表 1 SWRH82B 钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of SWRH82B steel

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	%
标准值	0.79~0.86	0.15~0.35	0.60~0.90	$\leq 0.025$	$\leq 0.025$	0.20~0.40	
平均值	0.82	0.23	0.78	0.014	0.0033	0.20	

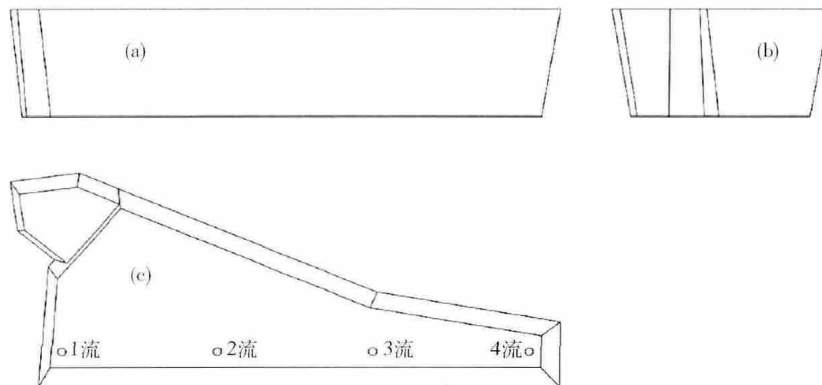


图 1 中间包三视图。(a) 正视图; (b) 左视图; (c) 俯视图

Fig. 1 Orthographic views of the tundish: (a) front view; (b) left view; (c) vertical view

## 1.2 研究方法

根据炼钢厂生产经验, 分别对一个浇次浇铸的开浇坯、交接坯和正常坯所对应的三炉钢进行系统取样。取样地点分别为 LF 精炼后钙处理前、软吹后、铸坯各流内外弧。采用以下方法结合研究 BOF-LF-CC 工艺生产的 SWRH82B 钢洁净度及夹杂物衍变规律。

(1) 用扫描电子显微镜专用颗粒物分析系统面扫描, 对金相样中显微夹杂数量、尺寸分布和成分进行统计;

(2) 用大样电解法对铸坯样中大型夹杂物含量和粒径分布进行分析;

(3) 用扫描电镜和能谱分析仪对夹杂物形貌和成分进行分析;

(4) 用化学分析方法对钢样中氧、氮、总铝等元素含量进行分析;

(5) 用荧光分析法对炉渣及中间包内衬进行分析。

## 2 钢中 T[O] 和 N 含量变化分析

钢中全氧含量是评价钢水洁净度的重要指标之一, 氮含量变化是判断钢水是否吸入空气的一个重要指标<sup>[13-14]</sup>。图 2 是各个工序位置钢中平均 T[O] 含量和 N 含量的变化情况。

图 2 表明: (1) 钙处理软吹过程前后钢中 T[O] 质

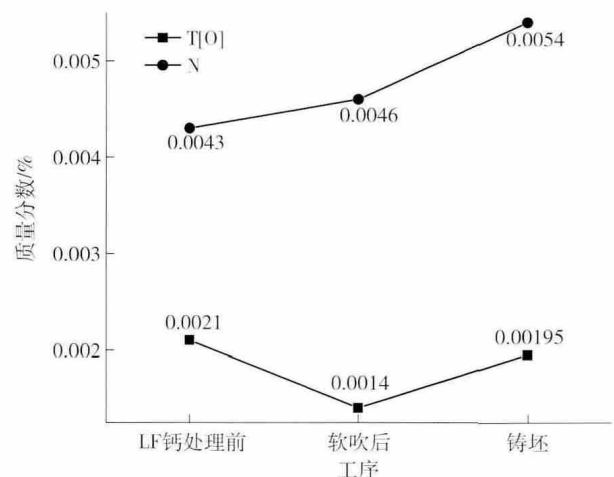


图 2 各工序 T[O] 和 N 含量变化情况

Fig. 2 Variations of T[O] and N contents in each steelmaking process

量分数降低了  $0.0007\%$ , N 质量分数元素增加了  $0.0003\%$ , 说明钙处理软吹过程可以显著脱氧, 因为软吹氩气过程能够促进夹杂物的碰撞长大和去除, 从而降低了全氧含量; 该过程有轻微增 N, 需要加强液面保护和氩气流量控制; (2) 铸坯中 T[O] 质量分数较软吹后增加了  $0.00055\%$ , N 质量分数增加了  $0.0009\%$ , 氧氮增加幅度较大, 说明连铸浇铸过程中有二次氧化现象, 或中间包卷渣现象较严重<sup>[13]</sup>, 要加强保护浇铸; (3) 铸坯中 T[O] 质量分数为  $0.00195\%$ , N 质量分数

为 0.0054% ,与国内外先进厂家生产的 SWRH82B 钢相比偏高<sup>[15]</sup> .

### 3 钢中显微夹杂物分析

#### 3.1 钢中显微夹杂物类型和数量

利用扫描电镜 Feature 统计功能对金相样上随机 100 个视场内的夹杂物进行面扫描 ,显微夹杂物类型分析结果见表 2.

由表 2 可知: (1) LF 钙处理前钢中显微夹杂主要有 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>、MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO ,呈球状 ,少数含有 CaS 还存在少量 MnO、MnS 夹杂; (2) 经过钙处

理软吹后 ,MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>转变为 MgO-SiO<sub>2</sub>-CaO ,呈球状 ,MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-CaS 夹杂增多且和钙处理前相比 CaO 和 CaS 含量升高; (3) 铸坯中典型夹杂主要有第一类是棱角分明的纯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂 ,第二类是球状 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO 或 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-CaS 与 MnS 的复合夹杂 ,第三类是简单氧化物与 MnS 的复合夹杂、少量含有 CaS 以及存在少量单纯 MnS 夹杂 ,第四类是被 MnS 包裹 TiN 夹杂并存在少量单纯 TiN 夹杂 ,第五类是规则球形的 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 夹杂. 97% 以上的显微夹杂物均 < 5 μm. 图 3 是典型显微夹杂物形貌.

表 2 显微夹杂物类型  
Table 2 Typical kinds of micro-inclusions

工序	夹杂物类型	
	主要夹杂物成分	少量夹杂物成分
LF 钙处理前	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> , MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -CaO	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -CaO-CaS , MgO-SiO <sub>2</sub> -CaO-CaS , MnO ,MnS
软吹后	MgO-SiO <sub>2</sub> -CaO MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -CaO-CaS	MgO-SiO <sub>2</sub> -CaO-CaS , SiO <sub>2</sub> -CaO ,MnO , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
铸坯	MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -CaO-CaS-MnS , MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -CaO-MnS , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,氧化物-MnS ,TiN-MnS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> ,MnS , SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MnO ,TiN

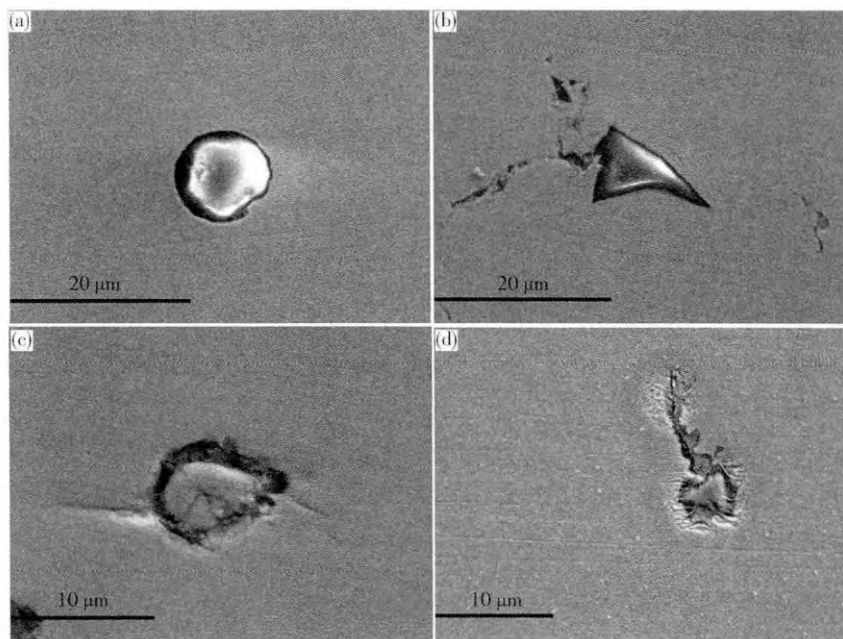


图 3 典型显微夹杂物形貌 . ( a ) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO; ( b ) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ( c ) MnS; ( d ) TiN-MnS

Fig. 3 Typical morphologies of micro-inclusions: ( a ) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO; ( b ) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ( c ) MnS; ( d ) TiN-MnS

根据扫描电子显微镜 Feature 面扫对各工序金相样中显微夹杂数量变化情况统计结果见图 4.

图 4 表明: (1) LF 精炼后钙处理前到软吹后 ,显

微夹杂物数量减少 5 mm<sup>-2</sup> ,说明钙处理软吹过程对于减少钢中显微夹杂物数量效果良好; (2) 铸坯中显微夹杂较软吹后增加 29 mm<sup>-2</sup> ,增加幅度非常大 ,说明整

个浇铸过程中显微夹杂物增加非常明显,增加的主要是  $Al_2O_3$  夹杂、硫化物复合夹杂和氮化物复合夹杂。铸坯中显著增加的硫化物复合夹杂和氮化物复合夹杂的原因是钢中 Ti 质量分数 (0.003%) 和 N 质量分数 (0.0054%) 较高,凝固过程生成 TiN 夹杂,而凝固过程随着温度降低伴随 S 偏析,硫化物以氧化物或 TiN 为核心生成复合的硫化物夹杂,存在少量单纯夹杂。

### 3.2 铸坯中 $Al_2O_3$ 夹杂产生原因分析

从现有生产工艺流程可知,整个炼钢到连铸过程中没有采用铝脱氧,精炼结束直到软吹后几乎没有出现纯  $Al_2O_3$  夹杂,而铸坯中出现了大量  $Al_2O_3$  夹杂。针对这一情况,进一步进行探究。

由于精炼后只经历了钙处理、软吹和连铸过程,钢水只有在钙处理过程中引入了大量钙元素。因此在三元相图中主要考虑 CaO、CaS 和  $Al_2O_3$  的变化情况。各工序夹杂物的成分变化见图 5,图中黑色实心点是平均成分;各工序总铝和夹杂物部分平均成分变化见图 6;铸坯中单纯  $Al_2O_3$  夹杂数量变化见图 7。

图 5 表明:(1) LF 精炼后钙处理前,大部分夹杂物中含有少量或不含 CaO,有少量的夹杂物含有较多的 CaO,绝大多数均含有  $Al_2O_3$ ,平均成分 CaO 含量低于  $Al_2O_3$ ;(2) 软吹结束后,夹杂物发生较大变化,CaO 含量占比明显增加, $Al_2O_3$  含量降低,出现较多不含

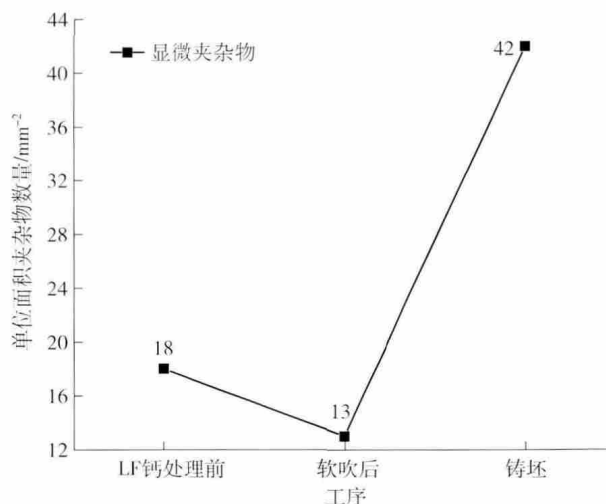


图 4 各工序显微夹杂物数量变化情况

Fig. 4 Change in quantity of micro-inclusions in each steelmaking process

$Al_2O_3$  的夹杂物,平均成分 CaO 含量远高于  $Al_2O_3$ ;(3) 铸坯中,大多数夹杂物成分均含有  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  和 CaO,复合夹杂物中三者相对含量与软吹后变化不大,平均成分 CaO 含量远小于  $Al_2O_3$ 。图中显示平均成分远远偏离了夹杂物主要落点区,这是因为夹杂物中存在大量单纯  $Al_2O_3$  夹杂,在相图中无法显示出来。

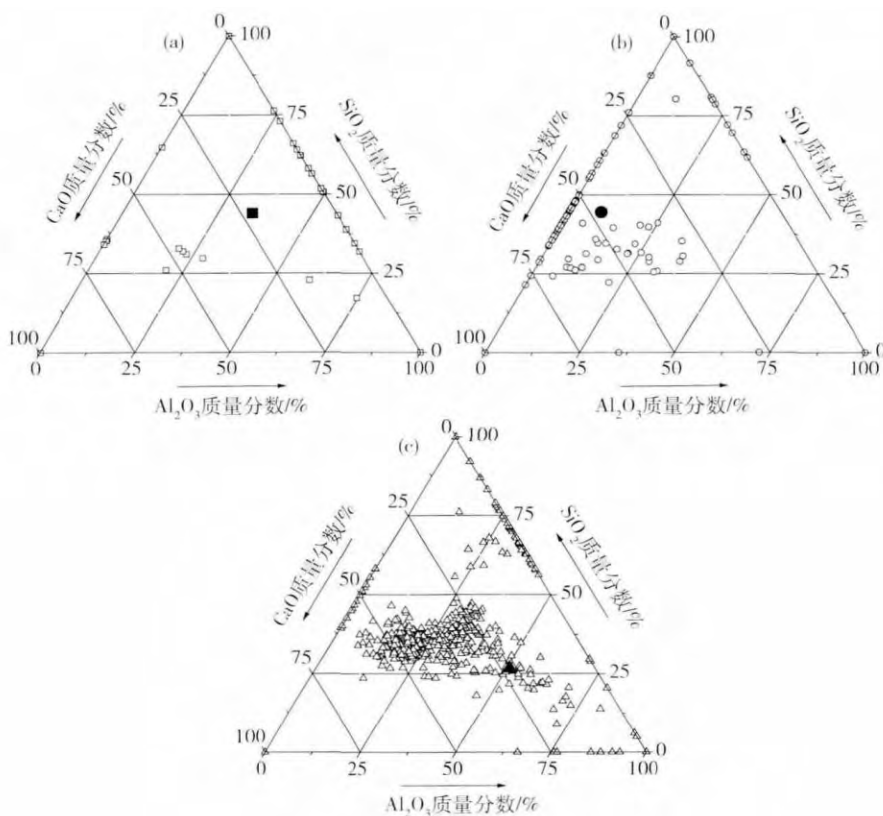


图 5 各工序夹杂物成分变化。(a) LF 钙处理前;(b) 软吹后;(c) 铸坯

Fig. 5 Chemical composition variations of micro-inclusions in each steelmaking process: (a) before LF calcium treatment; (b) after soft blowing; (c) casting billet

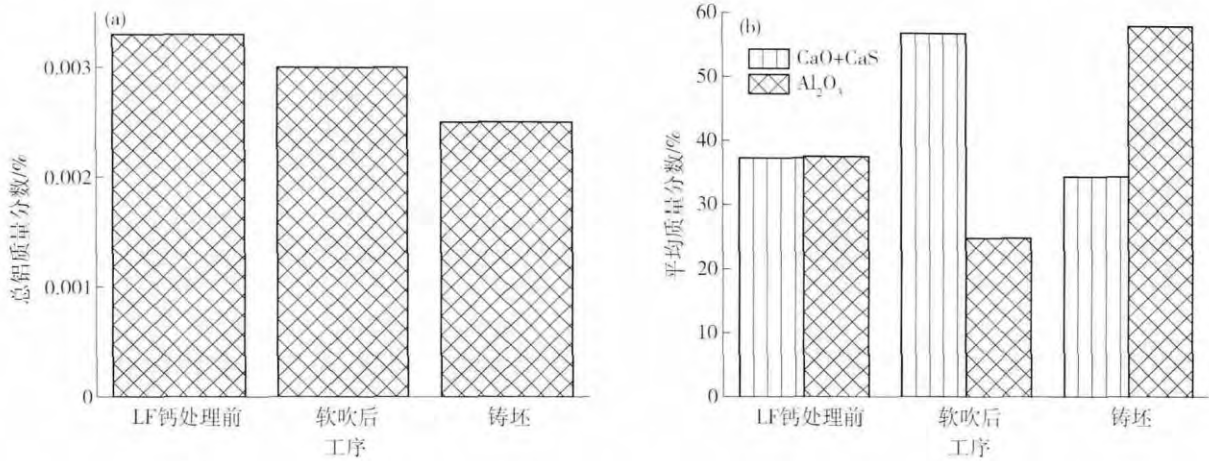


图 6 各工序平均成分变化. (a) 总铝; (b) 显微夹杂物  
 Fig. 6 Average composition variations in each steelmaking process: (a) total aluminum (ALT); (b) micro-inclusions

图 6 表明: (1) LF 精炼后到铸坯过程钢中总铝含量呈轻微减少的趋势; (2) LF 精炼后到铸坯过程中, 夹杂物中 CaO + CaS 平均含量软吹后较 LF 钙处理前增幅很大, 在铸坯中大幅度减少, 整个过程呈现先增后减的趋势, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平均含量变化趋势正好相反.

由图 7 可知, 随着浇铸的进行, 铸坯中单纯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂逐渐减少, 开浇坯和交接坯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂含量很高, 远远高于正常坯.

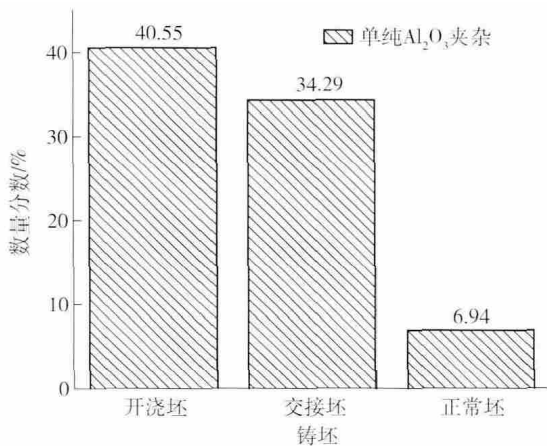


图 7 铸坯中夹杂物数量变化情况  
 Fig. 7 Quantity variations of micro-inclusions in casting billet

出现上述变化的原因是 LF 精炼后整个钢水中氧含量很低, 而钙处理过程又加入了大量强脱氧元素钙, 使得钙元素将夹杂物中铝元素给置换出来进入到钢水中, 到了连铸过程, 发生二次氧化, 使得钢水中铝元素再次被氧化成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 有相当一部分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 没来得及和其他夹杂物碰撞长大上浮而存留在铸坯中. 开浇时中间包流场不稳定, 钢液波动较大, 钢水吸入了较多氧气或卷渣, 二次氧化现象严重, 并且不利于夹杂物上浮, 较多 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂残留在铸坯中. 随着浇铸的进行, 越来越稳定, 二次氧化现象减弱, 夹杂物上浮较充分, 就使得 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂迅速减少.

### 4 铸坯中大型夹杂物分析

#### 4.1 铸坯中大型夹杂物含量和粒径分布

用大样电解法分离得到铸坯中的大型夹杂物, 再运用扫描电镜进行粒径统计, 铸坯大样电解统计结果见表 3.

由表 3 可知: 铸坯中大型夹杂物较多, 主要是在 80 ~ 300 μm, 达 81.68%, 数量波动较大, 不同位置分布不均匀. 开浇坯中最低 8.21 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>, 最高 16.00 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>; 过渡坯中最低 5.74 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>, 最高 14.51 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>; 正常坯中最低 1.64 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>, 最高 7.37 mg · (10 kg)<sup>-1</sup>, 这与大型夹杂物随机分布有关.

经现场测温, 不同流次温度波动很大, 最大可以达到 9 °C, 不同流次大型夹杂物含量变化也大, 表明中间包流场不稳定, 各流次变化大.

开浇坯大型夹杂物含量远高于交接坯和正常坯, 对铸坯质量产生严重的危害, 严重影响铸坯的成材率. 开浇时, 钢水流动不稳定, 对耐材冲刷严重, 卷渣严重, 二次氧化严重等原因造成的.

#### 4.2 铸坯中大型夹杂物成分、类型及来源分析

使用扫描电镜结合能谱分析仪对大型夹杂物进行分析, 并结合连铸相关渣及耐材成分对大型夹杂物来源进行分析. 表 4 是连铸相关渣及耐材原料主要成分, 正常坯大型夹杂物在相图中分布见图 8, 典型的大型夹杂物形貌见图 9.

由表 4 结合图 8 和图 9 可知, 铸坯中大型夹杂物的主要类型为: (1) 由复合氧化物和 CaS 构成的复合夹杂物 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-CaS(图 9(a)). 该类夹杂物呈近似球形, 主要以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO 为主, 含有少量 MgO, 该类夹杂物主要以中包覆盖剂为主, 与耐火材料、复合脱氧产物和钢液凝固析出相相互作用生成成分复杂的大型夹杂物. (2) 以 MgO、CaO 为主的复

表 3 铸坯中大型夹杂物含量和尺寸分布情况  
Table 3 Quantity and size variations of large-scale nonmetallic inclusions in casting billet

铸坯	电解样 质量/kg	夹杂物总 量/ $\text{mg}\cdot(10\text{kg})^{-1}$	夹杂物数 量/ $(10\text{kg})^{-1}$	夹杂物粒径分布/%			
				< 80 $\mu\text{m}$	80 ~ 140 $\mu\text{m}$	140 ~ 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$
开浇坯 1 流内弧	1.81	13.78	259.10	31.91	38.30	23.40	6.38
开浇坯 1 流外弧	1.81	16.00	391.83	7.04	38.03	52.11	2.82
开浇坯 2 流内弧	1.98	10.10	171.72	23.53	32.35	23.53	20.59
开浇坯 2 流外弧	1.95	9.75	174.54	20.59	41.18	29.41	8.82
开浇坯 3 流内弧	1.95	14.35	153.77	13.33	30.00	36.67	20.00
开浇坯 3 流外弧	1.95	8.21	107.80	4.76	47.62	19.05	28.57
开浇坯 4 流内弧	1.91	8.37	141.29	37.04	29.63	29.63	3.70
开浇坯 4 流外弧	1.94	10.33	361.38	30.00	35.71	32.86	1.43
过渡坯 1 流内弧	1.74	5.74	126.29	27.27	27.27	36.36	9.09
过渡坯 1 流外弧	1.67	7.77	119.55	35.00	25.00	35.00	5.00
过渡坯 2 流内弧	1.59	14.51	138.80	13.64	31.82	36.36	18.18
过渡坯 2 流外弧	1.85	5.93	151.02	17.86	46.43	32.14	3.57
过渡坯 3 流内弧	1.69	7.68	94.51	6.25	31.25	56.25	6.25
过渡坯 3 流外弧	1.69	7.69	224.72	18.42	52.63	23.68	5.26
过渡坯 4 流内弧	1.48	6.07	195.55	17.24	51.72	31.03	0.00
过渡坯 4 流外弧	1.48	7.42	236.01	31.43	25.71	37.14	5.71
正常坯 1 流内弧	1.76	7.37	107.71	15.79	36.84	31.58	15.79
正常坯 1 流外弧	1.76	3.98	45.51	—	12.50	75.00	12.50
正常坯 2 流内弧	1.88	1.60	32.00	16.67	83.33	—	—
正常坯 2 流外弧	1.82	3.84	49.40	11.11	55.56	22.22	11.11
正常坯 3 流内弧	1.82	1.65	93.56	35.29	58.82	5.88	—
正常坯 3 流外弧	1.81	2.76	44.15	—	37.50	62.50	—
正常坯 4 流内弧	1.92	2.08	36.44	14.29	28.57	28.57	28.57
正常坯 4 流外弧	1.83	1.64	49.18	11.11	66.67	11.11	11.11
平均	1.80	7.44	146.08	18.32	40.19	32.15	9.35

表 4 连铸渣及耐材原料主要成分(质量分数)  
Table 4 Chemical composition of continuous casting slag and refractory materials %

样品	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
中间包内衬	2.86	13.77	0.46	78.57	3.68	0.03	
结晶器保护渣	30.05	39.20	2.73	1.78	1.52	0.69	19.37
中包覆盖剂	62.12	11.76	15.61	1.21	2.71	0.81	2.72

合夹杂物(图 9(b)),该类夹杂物形状不规则,含有很高 MgO,认定该类夹杂物产生主要与中间包内衬有关。(3) CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Na<sub>2</sub>O 为主的复合氧化物(图 9(c)) 形状近似球形,认为该类夹杂物主要与结晶器卷渣有关。(4) 含有 MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 为主的复合氧化物(图 9(d)),该类夹杂物形状呈规则的球形,含有较高的 MnO,该类夹杂物是二次氧化产物。(5) 棱角分明单纯的 SiO<sub>2</sub>(图 9(e)),该类夹杂物与引流砂 X 射线衍射和电子探针分析结果一致,认为其来源于引

流砂。(6) 单纯的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂(图 9(f)),该类夹杂物是钢水中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂没有得到有效去除,碰撞聚集长大而成,实际生产中出现 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物造成的水口结瘤,絮流事故发生。由文献[16]可知当水口结瘤时,也会使得中间包钢水临界液位急剧上升,使得钢水流动场不稳定,造成卷渣。

对铸坯中大型夹杂物来源进行统计,见图 10。由图 10 可知,开浇坯、交接坯到正常坯过程中,中间包覆盖剂、二次氧化和结晶器保护渣来源的大型夹杂所占

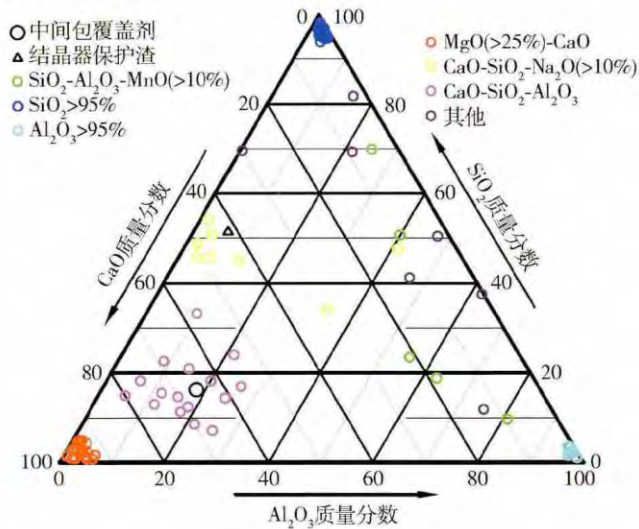


图 8 正常坯大型夹杂物在相图中分布

Fig. 8 Variations of large-scale nonmetallic inclusions in normal casting billets in the phase diagram

比重逐渐减少. 这是因为随着浇铸进行, 越来越稳定, 中间包卷渣、结晶器卷渣越来越少, 浇铸过程从空气中吸收氧含量越来越少, 与保护渣、耐材等反应的二次氧化产物逐渐减少. 耐材、氧化铝和引流砂来源夹杂物所占比重逐渐增加, 从柱状图中可以看出这三种来源夹杂物数量变化幅度不大, 并且有减小的趋势, 大型夹杂物总个数快速减少造成其所占比重增大.

总之, 中间包卷渣、结晶器卷渣、二次氧化和中间包内衬侵蚀严重. 为进一步提高铸坯洁净度水平, 降低大型夹杂物含量, 需加强保护浇铸, 优化中间包结构和连铸工艺, 防止卷渣和二次氧化.

### 5 结论

(1) 采用 BOF-LF-CC 可生产洁净度满足要求的 SWRH82B 硬线钢, 铸坯中全氧质量分数可以达到 0.002% 以下, N 质量分数为 0.005% 左右. 钙处理过

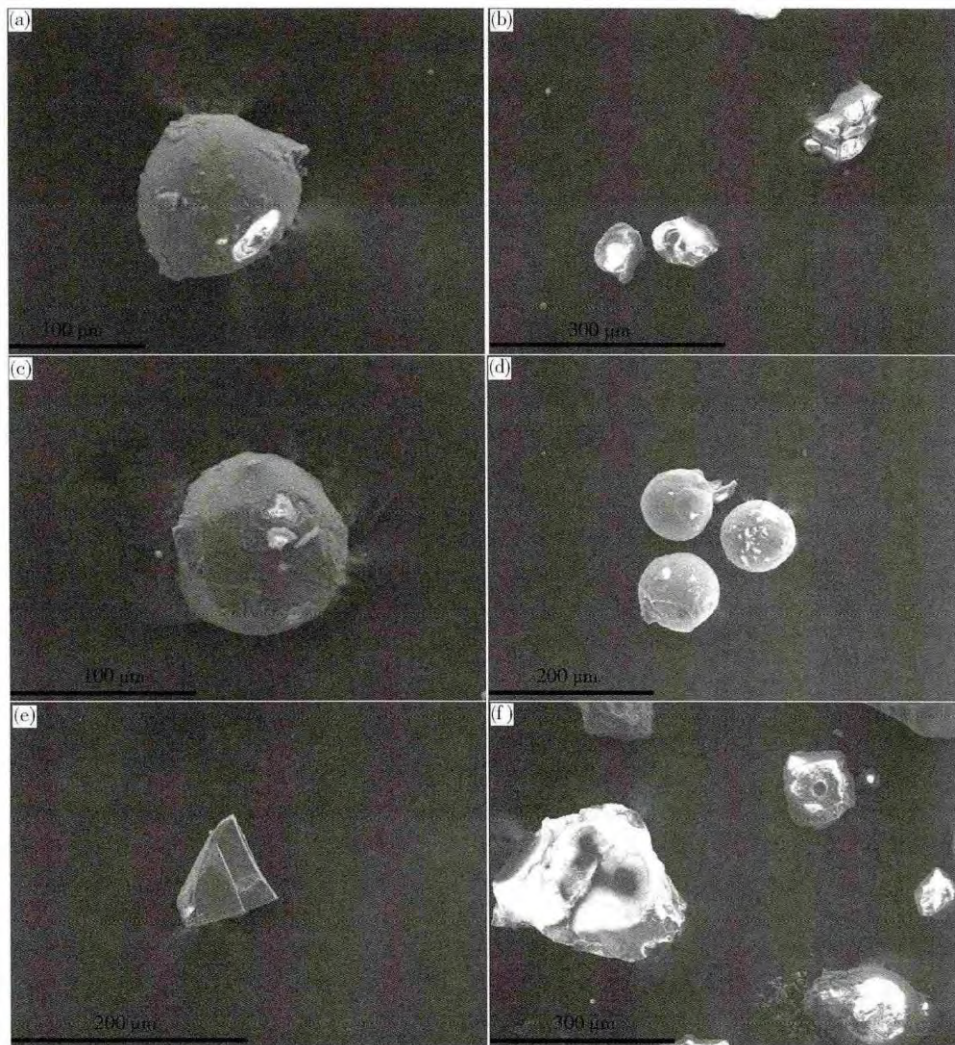


图 9 铸坯中大型夹杂物典型形貌. (a) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-CaS; (b) MgO 和 CaO 为主; (c) CaO、SiO<sub>2</sub>和 Na<sub>2</sub>O 为主; (d) MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 SiO<sub>2</sub>为主; (e) 单纯 SiO<sub>2</sub>; (f) 单纯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig. 9 Typical morphologies of large-scale nonmetallic inclusions in casting billets: (a) MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-CaS; (b) mainly including MgO and CaO; (c) mainly including CaO, SiO<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>O; (d) mainly including MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>; (e) single SiO<sub>2</sub>; (f) single Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

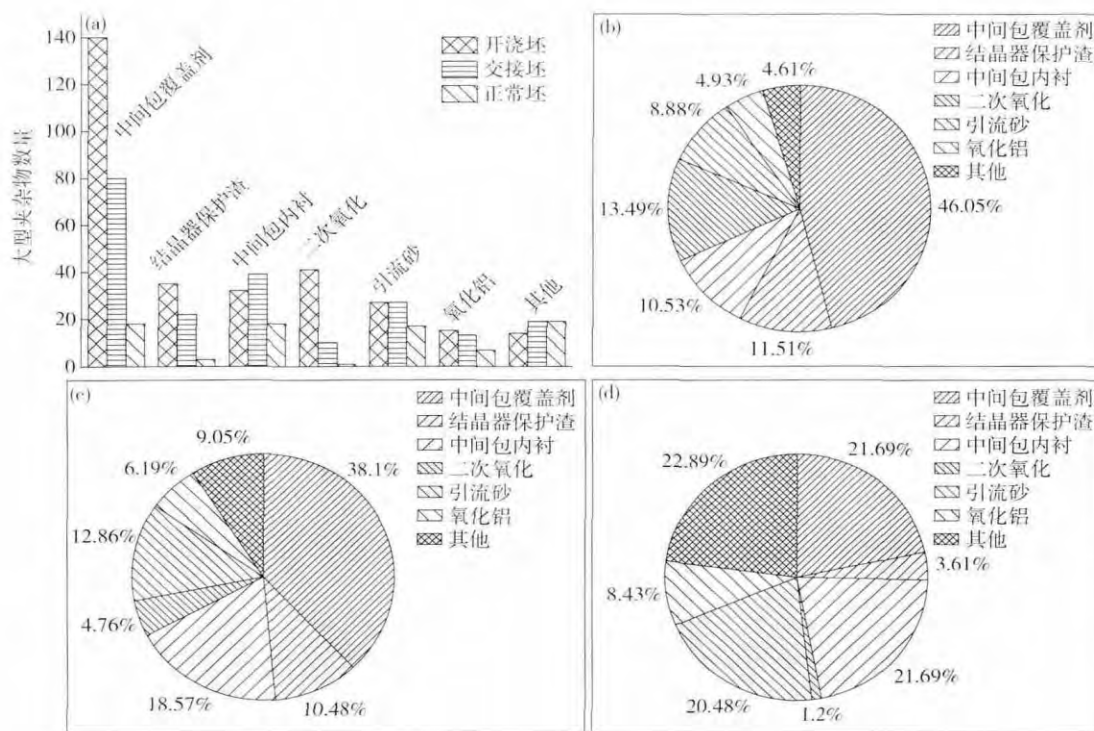


图 10 铸坯大型夹杂物来源分布。(a) 大型夹杂物数量; (b) 开浇坯; (c) 交接坯; (d) 正常坯

Fig. 10 Source variations of large-scale nonmetallic inclusions in casting billets: (a) quantity variations of large-scale nonmetallic inclusions; (b) the first billet; (c) transition billet; (d) normal billet

程轻微增氮, 有显著的脱氧去夹杂作用, 但使得铸坯中出现较多  $Al_2O_3$  硬性夹杂, 对 SWRH82B 盘条质量造成严重危害, 需进一步优化工艺将  $Al_2O_3$  夹杂消除。浇铸过程中增氧增氮明显, 应加强保护浇铸。

(2) 铸坯中典型显微夹杂为球形复杂氧化物与 CaS 和 MnS 的复合夹杂, 简单氧化物或氮化物与 MnS 的复合夹杂, 单纯的  $Al_2O_3$  夹杂, 粒径主要在  $5 \mu m$  以内, 高于总数 97%。 $Al_2O_3$  夹杂、硫化物、氮化物的复合夹杂大量增加, 使得铸坯中夹杂物增加明显。

(3) 铸坯中大型夹杂物主要来源于中间包覆盖剂、结晶器保护渣、中间包内衬、引流砂和二次氧化。81.68% 大型夹杂物尺寸大于  $80 \mu m$ , 含量波动很大, 尤其是开浇坯含量远高于正常坯, 铸坯质量不稳定, 降低成材率。

(4) 中间包结构不合理, 造成各流温差较大, 中间包卷渣、内衬侵蚀和钢液二次氧化严重, 中间包不仅没有发挥精炼功能, 而且对钢液造成严重污染。为进一步提高铸坯洁净度水平, 需加强保护浇铸, 优化中间包结构和炼钢工艺。

#### 参 考 文 献

[1] Zhang J Q, Liang Y L, Xiang S, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of SWRH82B wire rod. *Adv Mater Res*, 2010, 97-101: 752  
 [2] Sychkov A B, Zhigarev M A, Zhukova S Y, et al. Production of

wire rod for high-strength reinforcing cord. *Steel Transl*, 2010, 40 (1): 78

- [3] Carneiro Filho C J, Mansur M B, Modenesi P J, et al. The effect of hydrogen release at room temperature on the ductility of steel wire rods for pre-stressed concrete. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527 (18-19): 4947  
 [4] Sychkov A B, Zhigarev M A, Perchatkin A V, et al. High-carbon wire rod made of high-chromium steel. *Metallurgist*, 2006, 50 (3): 183  
 [5] Ni B, Lin Y, Zou Z S. Study of oxide inclusion controlling in 82B steel. *Ind Heat*, 2007, 36(6): 41  
 (倪冰, 林媛, 邹宗树. 82B 钢中氧化物系夹杂物的控制研究. *工业加热*, 2007, 36(6): 41)  
 [6] Xing M L, Bao Y P, Lin L. Process practice on control of nitrogen content in high carbon steel SWRH82B produced by 130 t BOF-LF-150 mm  $\times$  150 mm CC billet flow sheet. *Spec Steel*, 2015, 36 (2): 25  
 (邢梅峦, 包燕平, 林路. 130t BOF-LF-150mm  $\times$  150mm CC 流程控制高碳钢 SWRH82B 氮含量的工艺实践. *特殊钢*, 2015, 36(2): 25)  
 [7] Cai K K. Cleanliness controlling of steel // *Proceedings of the Tenth National Steel Annual Meeting*. Zhengzhou, 1998: 70  
 (蔡开科. 钢洁净度的控制 // 第十届全国炼钢学术会议论文集. 郑州, 1998: 70)  
 [8] Yang L L, Liu J H, Bao Y P, et al. Researches on X70 cleanliness in refine and continuous casting process. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(Suppl 1): 97  
 (杨伶俐, 刘建华, 包燕平, 等. X70 钢的清洁度在精炼与连



- 铸过程中的变化. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊1): 97)
- [9] Wang X H, Wang L F. Control of the non-metallic inclusions in hard wire steels. *Steel Wire Prod*, 2005(5): 14  
(王新华, 王立峰. 硬线钢中非金属夹杂物控制. 金属制品, 2005(5): 14)
- [10] Chai G Q, Wang F M, Fu J, et al. Deformability control of  $Al_2O_3-SiO_2-MgO-CaO-MnO$  system inclusions in high carbon hard wire 82B steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(6): 730  
(柴国强, 王福明, 付军, 等. 高碳硬线钢 82B 中  $Al_2O_3-SiO_2-MgO-CaO-MnO$  系夹杂物塑性化控制. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 730)
- [11] Gu K J, Wei J, Cai K K, et al. Non-metallic inclusions in 72A steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2003, 25(1): 26  
(顾克井, 魏军, 蔡开科, 等. 72A 钢非金属夹杂物行为. 北京科技大学学报, 2003, 25(1): 26)
- [12] Qin Z G, Gui M W, Zhou X L. Research on inclusion in refining high carbon steel 82B. *Steelmaking*, 2004, 20(3): 37  
(覃之光, 桂美文, 周新龙. 高碳钢 82B 精炼过程夹杂物的研究. 炼钢, 2004, 20(3): 37)
- [13] Wu H J, Yuan P F, Yue F. Cleanliness of DH36 ship plate steel produced by BOF-LF-RH-CC processes. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(Suppl 1): 131  
(吴华杰, 元鹏飞, 岳峰. BOF-LF-RH-CC 生产 DH36 船板钢洁净度. 北京科技大学学报, 2011, 33(增刊1): 131)
- [14] Liu J H, Bao Y P, Li T Q, et al. Refining process analysis of clean pipe steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(8): 789  
(刘建华, 包燕平, 李太全, 等. 高级别管线钢精炼工艺分析. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 789)
- [15] Feng J, Chen W Q. Quality contrast of domestic and overseas advanced high carbon wire rod steel. *China Metall*, 2005, 15(10): 22  
(冯军, 陈伟庆. 国内外高级硬线钢实物质量对比. 中国冶金, 2005, 15(10): 22)
- [16] Luo L H, Zuo X J. Investigation on controlling molten steel level in tundish during continuous casting process. *Continuous Cast*, 2011(4): 13  
(罗利华, 佐祥均. 连铸过程中小方坯中间包钢水液位控制的研究. 连铸, 2011(4): 13)