

## 转炉冶炼低碳钢终点氧含量控制

蔡开科

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 用户对钢的洁净度要求越来越高, 为此必须尽力减少钢中非金属夹杂物数量和尺寸, 尤其是对高品质冷轧产品更为重要。首先要控制转炉冶炼终点钢水中氧活度和渣中(FeO + MnO)含量, 因为这是产生钢中夹杂物的根源。根据在工厂进行的调查研究工作, 讨论了冶炼低碳钢转炉终点氧含量控制因素, 转炉终点氧含量对RH脱碳结束氧的影响。并提出了降低转炉终点氧含量的技术措施。

**关键词:** 低碳钢; 转炉; 终点氧

**中图分类号:** TF71 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2009)05-0027-05

## Controlling Oxygen Activity in the Molten Steel at Blowing End-Point of BOF Steelmaking

CAI Kai-ke

(Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Steel cleanliness is increased under customer's requirement. Steel producers are striving to produce cleaner steels. Therefore, to reduce the quantity and size of nonmetallic inclusions in the steel is imperative, especially for high quality cold-rolled products. The main controlling is oxygen activity in the molten steel and FeO + MnO in the slag at the blowing end-point of BOF steelmaking, because they are the main source of producing nonmetal inclusions. Based on our study work and recent literature, oxygen content control of low carbon at the blowing end-point of BOF and influence of the oxygen content at the blowing end on decarburization in the RH vessel are discussed. According to the results, decreasing measurements of end-point oxygen content are put forward.

**Key words:** low carbon steel; BOF; end-point oxygen content

当转炉吹炼到终点时, 钢水中溶解了过多氧称为溶解氧 $[O]_r$  (或 $a_{[O]}$ )。出钢时钢水脱氧合金化的目的: 把钢水中 $[O]_r$ 脱掉, 转变为脱氧夹杂物; 合金化达到规定的钢种成分(C、Si、Mn、Al<sub>s</sub>等)。

经过脱氧和炉外精炼操作(吹Ar、LF、VD、RH), 脱氧所生成夹杂物( $Al_2O_3$ 、 $MnO \cdot SiO_2$ 、 $CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$ 、 $CaO \cdot Al_2O_3$ )。大部分上浮到钢包顶渣, 夹杂物尺寸绝大部分 $< 30 \mu m$ , 钢水中总氧 $w(T[O])$ 可以达到 $< 30 \times 10^{-6}$ , 甚至小于 $10 \times 10^{-6}$ , 也就是说钢水很“干净”了。因此, 可以用钢的总氧量 $T[O]$ 来表征钢的洁净度, 也就是钢中夹杂物水平。故 $T[O]$ 可表示为: $T[O] = [O]_r + [O]_j$ 。因此要降低 $T[O]$ , 则: 降低 $[O]_r$ , 降低转炉吹炼终点氧, 这是产生夹杂物的源头; 降低 $[O]_j$ , 也就是减少钢中夹杂物: 降低脱氧产物, 控制脱氧和精炼操作促进原生的脱氧产物上浮; 减少新的夹杂物生成, 也就是减少在连铸过程中钢水二次氧化。

生产实践表明, 冷轧深冲薄板表面线状缺陷(Sliver)和表面起皮缺陷(Pencil blister)主要来源

于连铸板坯皮下含有 $Al_2O_3$ 、 $CaO \cdot Al_2O_3$ 等类型夹杂物。因此要提高冷轧板表面质量, 就要降低钢中脱氧夹杂物, 而要降低钢中夹杂物首先就要降低转炉终点钢水氧含量, 这是产生夹杂物的源头。

### 1 转炉冶炼低碳钢终点钢中氧含量控制

钢中总氧含量 $T[O]$ 可表示为:

$$T[O] = [O]_r + [O]_j$$

$$\text{出钢时: } [O]_j = 0, T[O] = [O]_r$$

根据作者与合作者在某钢厂的生产统计表明, 转炉终点 $[O]_r$  ( $a_{[O]}$ ) 决定于<sup>[1]</sup>:

(1) 终点[C]

从某厂转炉冶炼终点由副枪测定的[C]和 $a_{[O]}$ 统计关系如图1所示, 由图可知:

区: $[O]_r$  波动在C-O平衡曲线附近

$$w(C) < 0.04\%, w([O]) = (600 \sim 900) \times 10^{-6},$$

$$w([C]) \cdot w([O]) = 0.0027, \text{炉龄} < 2500 \text{ 炉};$$

区: $[O]_r$  远离C-O平衡曲线

$$w(C) < 0.04\%, w([O]) = (800 \sim 1400) \times 10^{-6},$$

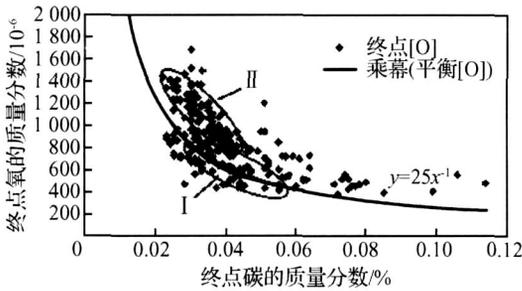


图 1 转炉冶炼终点 C-O 关系图

Fig. 1 Relationship between C and O at the end-point of BOF

$w([C]) \cdot w([O]) = 0.0031 \sim 0.0037$ , 炉龄 > 2500 炉。

当炉龄大于 3000 炉, 达到 7500 炉甚至 10000 炉, 钢水中 [C][O] 积远离平衡线, 钢水中 [O]<sub>r</sub> 波动较大, 这可能与采用溅渣护炉操作, 降低了复吹冶金效果有关。

(2) 终点温度

生产统计转炉终点钢水温度与终点 [O]<sub>r</sub> 关系如图 2 所示。

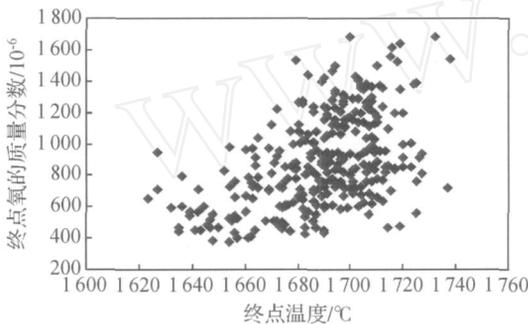


图 2 终点温度与 [O]<sub>r</sub> 关系

Fig. 2 The relationship between dissolved oxygen and temperature of liquid steel at the end-point of BOF

当终点  $w([C]) = 0.025\% \sim 0.040\%$  时, 随着温度的升高, 终点 [O]<sub>r</sub> 呈上升趋势。当温度 > 1680 时, 终点 [O]<sub>r</sub> 明显增加。

(3) 终渣 (FeO)

如图 3、4 所示, 当终点  $w([C]) = 0.02\% \sim 0.06\%$  时, 终点渣中  $w((FeO + MnO))$  为 14% ~ 24%, 而终点 [O]<sub>r</sub> 波动较大。

(4) 后吹操作

如图 5 所示, 终点  $w([C]) = 0.02\% \sim 0.06\%$ , 氧耗量在 48 ~ 58 m<sup>3</sup>/t 之间。说明终点 [C] 越低(或后吹), 吹入氧主要用来氧化铁, 使渣中 FeO 大增(图 4), 同时增加了终点 [O]<sub>r</sub>(图 3)。后吹小于 1

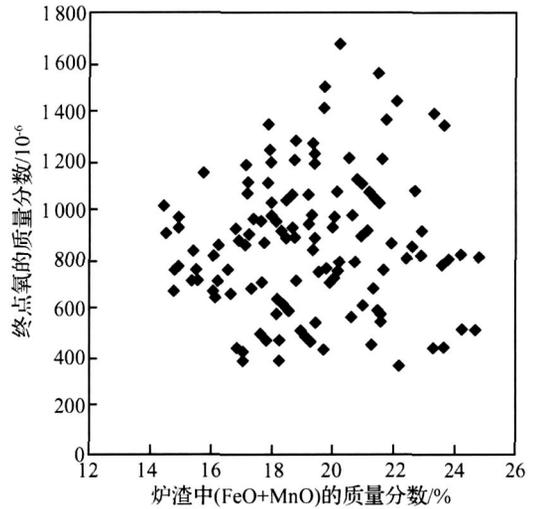


图 3 渣中 (FeO+MnO) 对 [O]<sub>r</sub> 的影响

Fig. 3 Influence of (FeO+MnO) contents in slag on dissolved oxygen

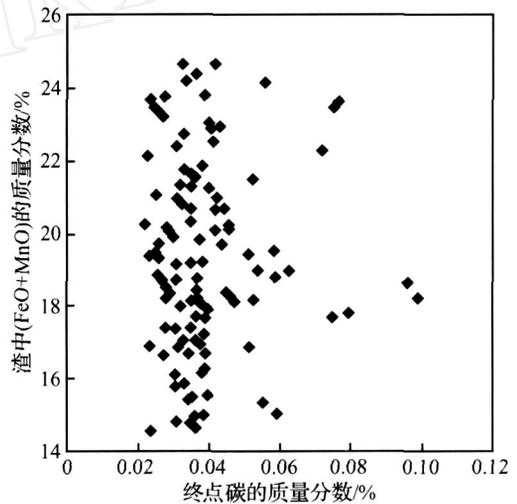


图 4 渣中 (FeO+MnO) 与 [C] 关系

Fig. 4 Relationship between (FeO+MnO) and [C] contents in slag

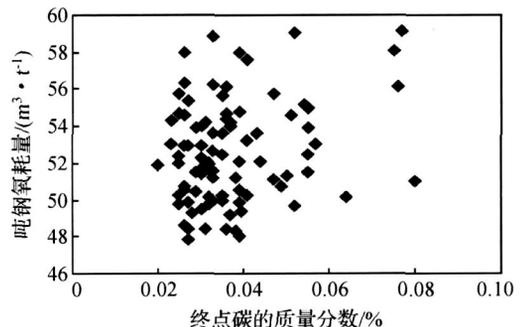


图 5 氧耗量与终点 [C] 关系图

Fig. 5 Relationship between oxygen consumption and [C]

min, 补充氧 800 ~ 1000 m<sup>3</sup>, 渣中 w((FeO)) 升高 5% ~ 15%。

生产实践证明, 如表 1 所示, 采用良好的底吹气搅拌操作, 可明显降低渣中 FeO 和钢水 [O]<sub>r</sub>。

表 1 转炉出钢渣中 (FeO)、钢水 [O] 和 [C] 的关系 (质量分数)

出钢 w([C]) / %	渣中 w((FeO)) / %	w([O]) / 10 <sup>-6</sup>
0.02	22/24	550/600
0.03	20/22	400/500
0.04	18/20	300/400

在铁水成分和吹炼制度一定的条件下, 要降低转炉终点 [O]<sub>r</sub>, 必须准确控制终点钢水碳和温度:

- (1) 控制 w([C]<sub>z</sub>) 不要 < 0.035 %;
- (2) 控制终点温度在 1640 ~ 1680 ;
- (3) 渣中 w((FeO + MnO)) 在 14% ~ 18 %;
- (4) 提高转炉终点碳和温度的命中率, 杜绝后吹;
- (5) 强化复吹效果 (尤其是对低碳钢)。

w([C]<sub>z</sub>) = 0.02 % ~ 0.05 %

顶吹终点 w([O]<sub>r</sub>) = (700 ~ 900) × 10<sup>-6</sup>

w([C]<sub>z</sub>) = 0.02 % ~ 0.05 %

复吹终点 w([O]<sub>r</sub>) = (250 ~ 600) × 10<sup>-6</sup>

采用动态控制, 提高转炉 [C] 和温度的双命中率 (90% ~ 93%), 减少后吹, 加强溅渣护炉后高炉龄的复吹效果是降低转炉终点 [O]<sub>r</sub> 含量的有效措施。既可节约铁合金消耗, 更重要的是从源头上减少钢中夹杂物生成, 提高钢的洁净度, 这对生产低碳钢或超低碳钢的冷轧薄板是非常重要的。

因此, 对生产低碳、超低碳钢用于深冲用途的薄板, 应强调复吹效果降低终点 [O], 保证产品质量。而不是强调溅渣护炉, 提高炉龄。

## 2 转炉终点氧对 RH 脱碳结束钢中氧影响

生产超低碳钢时, 转炉终点 w([C]) = 0.02% ~ 0.04%, 经 RH 脱碳达到目标 w([C]) = (30 ~ 20) × 10<sup>-6</sup>, 作者统计的 RH 脱碳前后钢水中氧的关系如图 6<sup>[1,21]</sup> 所示。

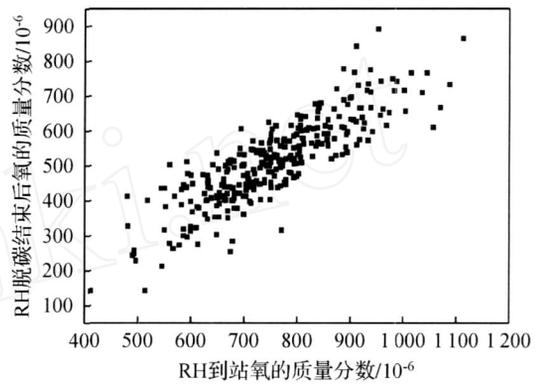


图 6 RH 脱 C 前后氧含量变化

Fig. 6 Change of oxygen content before and after RH decarburization

由图 6 可知, 转炉吹炼终点 [O] 高, RH 脱 C 结束后钢水 [O] 也高。

RH 脱碳前后钢水中 [C]、[O] 含量变化如表 2 所示。

表 2 RH 脱碳前后的 C、O 含量变化 (质量分数)

[C] 范围	初始 [C] <sub>p</sub> / %	初始 [O] <sub>p</sub> / 10 <sup>-6</sup>	脱碳后 [C] <sub>p</sub> / %	脱碳后 [O] <sub>p</sub> / 10 <sup>-6</sup>	[O] <sub>t</sub> / 10 <sup>-6</sup>
< 0.02	0.018	843	0.0022	613	235
0.02 ~ 0.03	0.026	785	0.0024	545	248
0.03 ~ 0.04	0.033	697	0.0028	443	307
0.04 ~ 0.05	0.042	604	0.0027	356	277
> 0.05	0.053	474	0.0033	240	324

注: 下角 p 代表实测平均值, 下角 t 代表计算值。

由表 2 可知:

初始 w([C]) = 0.02% ~ 0.05% 经 RH 脱 C 后, 目标 w([C]) 平均为 (30 ~ 20) × 10<sup>-6</sup>。理论计算所消耗的 w([O]) 为 (235 ~ 324) × 10<sup>-6</sup>。也就是说, 转炉终点钢水 [O] 越高, 则 RH 脱碳结束后钢水 [O] 也越高, 这样脱氧合金消耗多, 生成夹杂物也越

多, 深冲薄板表面缺陷也越严重。

以 IF 钢为例, 生产统计得到 RH 脱 C 结束后钢水 [O] 与 Al 收得率关系如图 7 所示。

由图 7 可知, RH 脱 C 结束后钢水 [O] 越高, Al 回收率越低, 生成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂也越多, 降低了钢的洁净度, 也增加了成本 (脱除 w([O]) = 1 × 10<sup>-6</sup> 需消

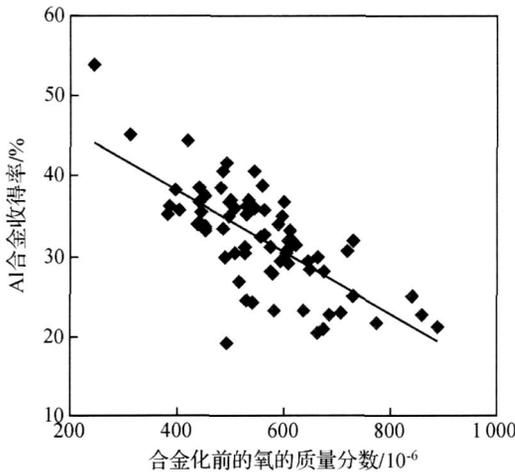


图 7 Al 收得率随氧含量的变化 (IF)

Fig. 7 Recycling rate of Al change with oxygen content(IF)

耗  $w(\text{Al}) = 1.125 \times 10^{-6}$ , 如终点降低  $w([\text{O}]) = 100 \times 10^{-6}$  相当于少加  $0.1125 \text{ kg/t}$  (钢) 的铝, 少生成  $0.2125 \text{ kg/t}$  (钢)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂。

生产超低碳钢转炉终点  $[\text{O}]$  和 RH 脱碳结束  $[\text{O}]$  比较如表 3 所示。

表 3 生产超低碳钢转炉终点  $[\text{O}]$  和 RH 脱碳结束  $[\text{O}]$  比较 (质量分数)

Table 3 Comparison of  $[\text{O}]$  at end-point of BOF and RH decarburization when product ultra-low carbon steel

	$[\text{C}]_c/\%$	$[\text{O}]_c/10^{-6}$	$[\text{C}]_m/10^{-6}$	$[\text{O}]_m/10^{-6}$
国外某厂 <sup>[41]</sup>	0.02 ~ 0.04	400 ~ 500	20 ~ 15	150 ~ 250
国内某厂	0.02 ~ 0.04	700 ~ 900	30 ~ 10	400 ~ 600

由此可知, 相同  $[\text{C}]$  水平, 国内某厂转炉终点  $w([\text{O}])$  要高  $(300 \sim 400) \times 10^{-6}$ , RH 处理达到目标  $[\text{C}]$  时, 钢水  $w([\text{O}])$  高  $(250 \sim 350) \times 10^{-6}$ , 这样加入铝多,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物也多, 对深冲板表面质量带来极大的危害, 因此要提高深冲薄板的表面质量要从产生夹杂物源头抓起, 也就是生产超低碳钢降低转炉终点  $[\text{O}]$  含量是非常重要的。

### 3 降低转炉终点氧含量的措施

(1) 搞好复吹。由图 8<sup>[3]</sup> 可知:  $w([\text{C}]) = 0.02\% \sim 0.05\%$ , 顶吹终点  $w([\text{O}]) = (700 \sim 900) \times 10^{-6}$ , 采用复吹后钢水  $w([\text{O}])$  可降低到  $(250 \sim 600) \times 10^{-6}$ 。可见, 复吹对降低终点  $[\text{O}]$  有十分重要的作用。

(2) 采用动态控制, 提高终点  $[\text{C}]$ 、温度的命中率, 杜绝后吹。后吹 ( $< 1 \text{ min}$ ) 对转炉终点  $[\text{O}]$  影响如表 4 所示<sup>[41]</sup>。

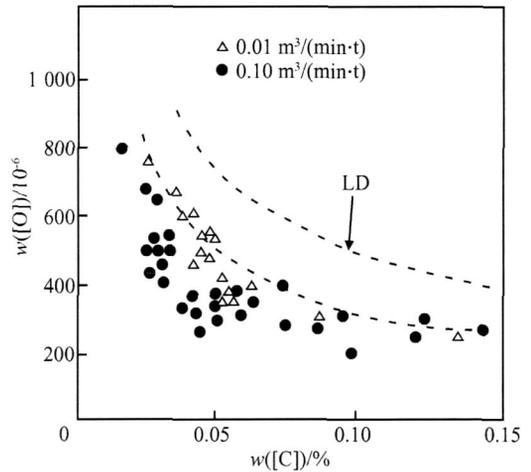


图 8 复吹对转炉终点成分的控制

Fig. 8 Influence of combined blowing on  $[\text{C}]$  and  $[\text{O}]$  at end-point of BOF

表 4 后吹 ( $< 1 \text{ min}$ ) 对终点  $[\text{O}]$  影响 (质量分数)

Table 4 Influence of reblowing ( $< 1 \text{ min}$ ) on  $[\text{O}]$  at end-point of BOF

$[\text{C}]_{\text{ch}}/\%$	$[\text{O}]_{\text{nh}}/10^{-6}$	$[\text{O}]_{\text{h}}/10^{-6}$
0.048 ~ 0.050	950	1000
0.043 ~ 0.047	950	1050
0.038 ~ 0.042	1000	1100
0.033 ~ 0.037	1075	1150
0.028 ~ 0.032	1100	1175
0.025 ~ 0.027	1125	1225
$< 0.025$	1150	1250

注: 下角标 ch 表示出钢, nh 表示不后吹, h 表示后吹。

由表 4 可知, 后吹使钢水中增氧  $100 \times 10^{-6}$ , 钢水过氧化严重。

(3) 处理好溅渣护炉提高炉龄与复吹效果矛盾。作者与合作者在某厂生产统计炉龄与  $[\text{C}][\text{O}]$  积关系如表 5 所示。

表 5 炉龄与  $[\text{C}][\text{O}]$  关系 (质量分数)

Table 5 Relationship between furnace campaign and  $[\text{C}][\text{O}]$

炉龄	平均 $[\text{O}]/10^{-6}$	$[\text{C}] \cdot [\text{O}]$
$< 2500$	792	0.0028
2500 ~ 5000	1101	0.0034
5000 ~ 7500	880	0.0035
$> 7500$	963	0.0035

由表 5 可知, 溅渣炉龄越高, 复吹效果越差, 转炉终点  $[\text{O}]$  就越高。中国采用长寿复吹转炉  $[\text{C}][\text{O}]$  关系如图 9 所示。

根据  $[\text{C}][\text{O}]$  乘积, 如转炉终点  $w([\text{C}]) = 0.03\%$ , 则终点  $[\text{O}]$  含量如表 6 所示。

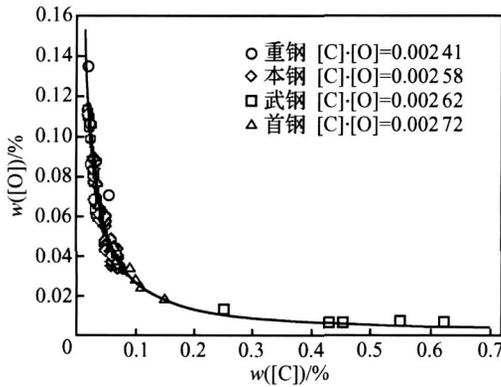


图 9 长寿复吹转炉终点 C-O 平衡

Fig. 9 C-O equilibrium at end-point of long-campaign combined-blowing BOF

表 6 我国长寿复吹转炉终点氧含量(质量分数)

Table 6 [O] content at end-point of long-campaign combined blowing BOF

钢厂	[C] · [O]	[O] / 10 <sup>-6</sup>
重钢	0.00241	803
本钢	0.00258	860
武钢	0.00282	940
首钢	0.00272	907

由表 6 可知,中国长寿转炉终点氧含量与顶吹转炉是同一水平。而复吹转炉降低终点 [O] 效果没有充分发挥。因此应根据产品品质的要求,尤其是对深冲用高级的冷轧板,为提高洁净度首先强调的

是保证复吹效果。

### 4 结论

(1) 转炉终点氧含量是产生夹杂物的源头,提高钢的洁净度应从源头抓起。

(2) 优化转炉工艺操作,强化复吹的冶金效果是降低转炉终点氧的有效措施。

(3) 转炉终点氧对 RH 脱碳结束后的钢水氧有重要影响,应使达到目标碳的质量分数 (30 ~ 10) × 10<sup>-6</sup> 的钢水 w([O]) 为 (150 ~ 300) × 10<sup>-6</sup>。既可节约合金又可减少夹杂物。

(4) 应根据产品品质对夹杂物敏感性的要求,解决好利用溅渣护炉后高炉龄与复吹效果之间的矛盾,尤其是对深冲高级冷轧板,为提高表面质量首先应保证复吹效果,而不是高炉龄。

### 参考文献:

[ 1 ] 杨安娜. 转炉冶炼终点氧含量控制[D]. 北京:北京科技大学, 2004.

[ 2 ] 王琳. IF 钢净化生产与 RH 处理工艺优化[D]. 北京:北京科技大学, 2000.

[ 3 ] Sid Hilderley, Lorenzo Greco, Egan Wang, et al. Improvements in the BOF Process at Algoma Steel Inc. [J]. Iron and Steel Technology, 2006, (11) :31.

[ 4 ] Stone R P. Productivity Improvements in Steelmaking via Sensor-Based Steelmaking Process Control [J]. Iron & Steel Technology, 2006, (1) :31.

### (上接第 15 页)

南冶金, 2004, 33 (1) : 18. (DING Yue-hua, CHEN Xing-rong, WANG Xu. Sintering Process Experiment in Yunnan Jianshui Manganese Mine[J]. Yunnan Metallurgy, 2004, 33 (1) :18.)

[ 6 ] 余逊贤. 锰[M]. 长沙:冶金工业部长沙黑色冶金矿山设计研究院, 1974.

[ 7 ] 向峰, 高德云, 张玉林, 等. 锰粉矿冷压球团研究[J]. 中国锰业. 2007, 25(3) :24. (XIANG Feng, GAO De-yun, ZHANG Yu-lin, et al. The Research on Cold Bonding Briquette of Manganese Fines[J]. China's Manganese Industry, 2007, 25

(3) :24.)

[ 8 ] 袁明亮, 梅贤功, 庄剑鸣, 等. 菱锰矿球团工艺研究[J]. 烧结球团, 1996, 21 (5) :9. (YUAN Ming-liang, MEI Xian-gong, ZHUANG Jian-ming, et al. Research on Rhodochrosite Pelletizing[J]. Sintering and Pelletizing, 1996, 21(5) :9.)

[ 9 ] ZHU De-qing, PAN Jian, QIU Guanzhou, et al. Mechanochemical Activation of Magnetite Concentrate for Improving Its Pelletability by High Pressure Roll Grinding[J]. ISIJ International, 2004, 44(2) :310.