

## 石油套管钢 $\Phi 150 \sim \Phi 200$ mm 连铸圆坯的质量控制

张玉海 王永然

(天津钢铁集团有限公司炼钢厂, 天津 300301)

**摘 要** 采用 120 t 顶底复吹转炉-LF-VD- $\Phi 150 \sim \Phi 200$  mm 圆坯连铸流程, 通过控制铁水有害残余元素含量, 强化转炉前期脱磷, 控制终点  $[C] \geq 0.10\%$ , 出钢钢包渣厚  $\leq 50$  mm, 控制精炼终渣  $(FeO + MnO) \leq 1.0\%$ , 提高 VD 过程底吹氩流量至 200 ~ 300 L/min, 连铸全程保护浇注等措施, 天钢完成 J55 (37Mn5), L80 (TC80, 0.24% ~ 0.28% C, 1.40% ~ 1.55Mn), N80 (36Mn2V) 和 P110 (26CrMo4) 级石油套管钢连铸圆坯的开发生产。生产结果表明, J55 钢级的全氧含量  $\leq 25 \times 10^{-6}$ ,  $P \leq 0.020\%$ ; N80、L80 和 P110 级别的全氧含量  $\leq 20 \times 10^{-6}$ ,  $P \leq 0.015\%$ ; 残余有害元素  $(Pb + Sn + As + Sb + Bi) \leq 140 \times 10^{-6}$ , 夹杂物总量  $\leq 2.5$  级, 圆管坯的中心疏松和缩孔等分别  $\leq 1.0$  级。

**关键词** 石油套管钢 120 t 转炉-LF-VD-圆坯连铸流程 质量控制

## Quality Control of $\Phi 150 \sim \Phi 200$ mm Casting Round Billet of Oil Case Steel

Zhang Yuhai and Wang Yongran

(Steelmaking Plant, Tianjin Iron and Steel Group Co Ltd, Tianjin 300301)

**Abstract** With using 120 t top and bottom combined blown converter-LF refining-VD- $\Phi 150 \sim \Phi 200$  mm round billet casting flow sheet, the development and production for casting round billet of J55 (37Mn5), L80 (TC80, 0.24% ~ 0.28% C, 1.40% ~ 1.55Mn), N80 (36Mn2V) and P110 (26CrMo4) grade oil case steel have been completed at Tiansteel by the measures including controlling residual deleterious elements content in metal; intensifying converter dephosphorizing in early phase, controlling end  $[C] \geq 0.10\%$  and after tapping slag layer thickness in ladle  $\leq 50$  mm; controlling ingredient of refining slag and end slag  $(FeO + MnO) \leq 1.0\%$ ; increasing bottom argon flow rate to 200 ~ 300 L/min in VD process; and shielding casting in whole casting process. Production results show that for J55 grade steel the total oxygen content is  $\leq 25 \times 10^{-6}$  and  $P \leq 0.020\%$ ; for L80, N80 and P110 grade steels the total oxygen content  $\leq 20 \times 10^{-6}$  and  $P \leq 0.015\%$ ; the residual deleterious elements  $(Pb + Sn + As + Sb + Bi) \leq 140 \times 10^{-6}$ ; the rating of total inclusions in steel  $\leq 2.5$  and the ratings of central porosity and shrinkage cavity are respectively  $\leq 1.0$ .

**Material Index** Oil Case Steel, 120 t Converter-LF-VD-Round Billet Casting Flow Sheet, Quality Control

天津钢铁集团有限公司(简称天钢)自 2004 年以来,相继完成了 API 5CT 标准中 J55、L80、N80、P110 级石油套管钢连铸圆坯的开发生产,顺利实现批量供货。

### 1 生产工艺流程及产品技术要求

天钢的主要工艺装备为:1 座 2 000 m<sup>3</sup> 高炉,1 座 3 200 m<sup>3</sup> 高炉;3 座 120 t 顶底复吹转炉;3 台 120 t LF 钢包精炼炉,1 台 120 t 单盖双坑 VD 真空脱气装置;1 台 CONCAST 全弧形 6 机 6 流方圆坯连铸机;弧形半径 9/16 m,连续矫直;铸坯断面 150 mm × 150 mm 方坯,  $\Phi 150$  mm、 $\Phi 160$  mm、 $\Phi 200$  mm 圆坯;首末端电磁搅拌和结晶器液面自动控制。

J55、L80 级别的钢种,采用以下工艺进行生产:120 t 顶底复吹转炉→120 t LF 精炼→圆坯连铸。

N80、P110 级套管钢的工艺流程为:120 t 顶底复吹转炉→120 t LF→VD→圆坯连铸。

在 API 5CT 标准中,没有关于 J55、L80、N80 和

P110 级别的石油套管用钢钢号和合金成分的具体要求,只是规定了钢中磷、硫含量的上限,表 1 给出了天钢生产石油套管钢的典型钢号和成分以及对部分残余元素的要求。

### 2 关键工序的控制

#### 2.1 转炉炼钢工序

##### 2.1.1 有害残余元素

客户对石油套管钢中五害元素含量都提出了明确要求。另外残余元素 Cu 等会造成钢的红脆现象,也必须加以控制。首先天钢从配矿开始密切注意有害残余元素的情况。再者,社会废钢是残余元素的主要来源<sup>[1-2]</sup>,因此天钢在生产石油套管钢时规定入炉废钢全部使用自产的优质废钢,不用外采的社会废钢。

##### 2.1.2 磷

生产石油套管钢时,在转炉吹炼初期,合理调整枪位,做到前期早化渣,化好渣;采用铁质成渣路线,

表1 典型石油套管钢的化学成分和残余元素含量的要求/%

Table 1 Requirements for chemical composition and residual elements content of typical oil case steels /%

| 钢级   | 钢号      | C           | Si          | Mn          | Cr          | Mo          | V           | Alt           | P            | S            | $\Sigma$ ( Pb + Sn + As + Sb + Bi ) | Cu          |
|------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-------------|
| J55  | 37Mn5   | 0.35 ~ 0.40 | 0.17 ~ 0.35 | 1.15 ~ 1.35 | -           | -           | -           | -             | $\leq 0.025$ | $\leq 0.015$ |                                     | $\leq 0.20$ |
| L80  | TC80    | 0.24 ~ 0.28 | 0.20 ~ 0.35 | 1.40 ~ 1.55 | -           | -           | -           | 0.015 ~ 0.040 | $\leq 0.020$ | $\leq 0.010$ | $\leq 0.045$                        | $\leq 0.20$ |
| N80  | 36Mn2V  | 0.31 ~ 0.39 | 0.17 ~ 0.35 | 1.40 ~ 1.65 | -           | -           | 0.08 ~ 0.14 | -             | $\leq 0.020$ | $\leq 0.010$ | $\leq 0.025$                        | $\leq 0.20$ |
| P110 | 26CrMo4 | 0.24 ~ 0.28 | 0.20 ~ 0.35 | 0.85 ~ 1.05 | 0.80 ~ 1.00 | 0.15 ~ 0.25 | -           | -             | $\leq 0.020$ | $\leq 0.010$ | $\leq 0.025$                        | $\leq 0.20$ |

在熔池碳剧烈氧化之前,尽快形成高碱度、高 FeO 且流动性良好的初期渣,加强底吹搅拌,实现前期的强化脱磷。当铁水 [P]  $\geq 0.090\%$  时可采用双渣操作,保证转炉的脱 P 效果。倒前期渣时要求熔池温度  $\leq 1450$   $^{\circ}\text{C}$ ,炉渣碱度  $\geq 2.0$ ,渣中 FeO  $\geq 20\%$ 。

转炉冶炼中后期,严格控制脱碳速度,避免出现炉渣返干和升温过快、温度过高现象,要求转炉终渣碱度  $\geq 3.0$ ,有效防止钢液的回磷。

### 2.1.3 转炉终点

终点碳的高低直接关系到钢水中溶解氧的高低,通过理论计算和实际测量,得出天钢转炉终点钢水碳氧积水平对比情况,见图 1<sup>[3]</sup>。试验炉次平均终点温度为  $1651$   $^{\circ}\text{C}$ ,根据热力学平衡计算得出转炉冶炼终点碳氧积为  $0.00254$ ,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>转炉终点碳氧积平均值为  $0.00305$ ,1<sup>#</sup>转炉终点碳氧积平均值为  $0.00335$ 。可以看出,实际测量值普遍高于理论计算值,说明实际生产过程中炉内的冶金反应未达到平衡状态;顶底复吹转炉的冶金效果好于纯顶吹转炉。

通过图 1 可见,当转炉终点 [C]  $\leq 0.05\%$  时,钢中溶解氧含量高于  $500 \times 10^{-6}$ ,且随着钢中碳含量的降低,钢中的溶解氧含量急剧增加,钢水处于过氧化状态。而当转炉终点 [C]  $\geq 0.10\%$  以后,则钢中溶解氧含量低于  $300 \times 10^{-6}$ ,且溶解氧随碳含量的增加而减少的幅度也比较小。因此结合钢种的碳含量,在生产石油套管钢时工艺要求转炉终点 C  $\geq 0.10\%$ ,严禁终点过吹。生产石油套管钢时工艺规定终点温度  $1620 \sim 1670$   $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.1.4 转炉下渣和脱氧

天钢转炉采用挡渣塞和挡渣锥联合的挡渣技术。控制钢包内下渣厚度  $\leq 50$  mm。

不含铝钢种采用硅铝钡复合脱氧剂脱氧,

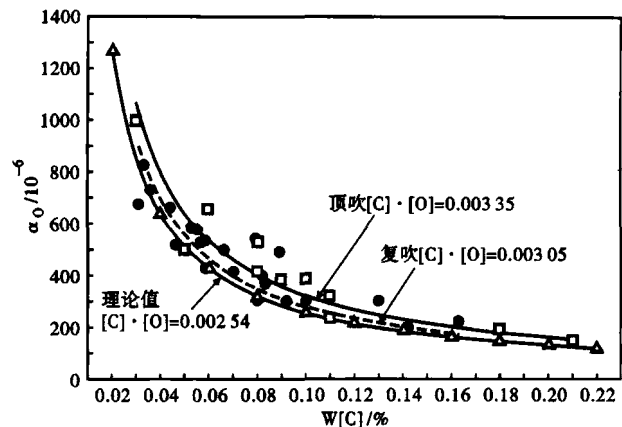


图1 转炉终点碳氧积实测值与理论值比较

Fig. 1 Comparison between measured value and theoretical value of converter end carbon-oxygen product

对于含铝钢则直接使用钢心铝脱氧。

## 2.2 精炼工序

### 2.2.1 精炼渣

要想获得低的总氧含量,必须降低炉渣的氧化性,故要求精炼终渣 (FeO + MnO)  $< 1.0\%$ 。随炉渣碱度的提高,炉渣的脱氧能力增强,钢中的总氧含量降低,因此降低精炼渣中  $\text{SiO}_2$  含量可降低钢的总氧含量;同时若渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量过低,造成精炼渣的  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  升高,导致炉渣的四元碱度上升,炉渣熔点升高,流动性变差,影响对非金属夹杂物的吸附,使得钢中的总氧含量增加<sup>[4]</sup>。因此设计精炼渣系及组成如表 2。并保证白渣下精炼时间  $\geq 20$  min。

### 2.2.2 钢中铝

对于含铝的石油套管钢,除了转炉炉后使用钢心铝脱氧外,还要求在精炼过程中采用全程控铝工

表2 含铝和不含铝钢精炼渣系主要成分

Table 2 Main ingredient of refining slag series for containing and non-containing aluminum steel

| 钢种   | 渣系  | 成分组成/%  |                  |                                |        |                  |           | CaO/SiO <sub>2</sub> |
|------|---|---------|------------------|--------------------------------|--------|------------------|-----------|----------------------|
|      |   | CaO     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO    | CaF <sub>2</sub> | FeO + MnO |                      |
| 含铝钢  | CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -MgO | 45 ~ 55 | 8 ~ 15           | 20 ~ 25                        | 8 ~ 10 | -                | < 1.0     | $\geq 3.5$           |
| 不含铝钢 | CaO-SiO <sub>2</sub> -MgO-CaF <sub>2</sub>                | 45 ~ 55 | 15 ~ 20          | -                              | 8 ~ 10 | 5 ~ 8            | < 1.0     | $\geq 2.5$           |

艺。钢水进精炼工位首先喂铝线强化脱氧,精炼过程通过铝粒扩散脱氧和补喂铝线保证钢水的酸溶铝含量,实现精炼出站时不再补喂铝线,增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂上浮去除的几率。真空处理的钢种,LF 精炼结束钢水铝含量的控制应考虑 VD 过程铝的衰减量。

### 2.2.3 钢中硫

天钢现行工艺路线下,脱硫主要由 LF 精炼来完成。首先保证终渣中  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ 。再者,在保证炉渣碱度的前提下,注意炉渣流动性的调整。同时保证底吹氩气的搅拌效果,促进渣钢间的反应。

### 2.2.4 非金属夹杂物

在转炉终点实行高拉碳操作,降低钢中的原始氧含量,同时转炉出钢过程做好挡渣操作。

精炼过程强化扩散脱氧和精炼渣成分控制,并进行钙处理。钙的脱氧产物  $\text{CaO}$  和脱硫产物  $\text{CaS}$  又易与钢中残留的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应化合,生成低熔点的钙铝酸盐(如  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ )复合夹杂,这种夹杂容易上浮、排出钢液进入顶渣,从而起到进一步脱氧、脱硫的作用<sup>[5]</sup>。形成的  $\text{CaS}$ ,则部分是对钢中的  $\text{MnS}$  夹杂变性的结果,减少了钢中  $\text{MnS}$  夹杂的数量,提高了钢的耐  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀的能力。然而,钢水中加入  $\text{Ca}$  后,若  $[\text{S}]$  较高,则  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物的变性过

程将会转变为  $[\text{O}]$  和  $[\text{S}]$  争夺  $[\text{Ca}]$  的过程,而且  $[\text{S}]$  越高,可能生成低熔点  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  的范围越窄,为了实现较好的  $\text{Ca}$  处理效果,首先应降低  $[\text{S}]$ <sup>[3]</sup>。工艺规定, J55 级套管钢成品  $[\text{S}] \leq 0.015\%$ , L80、N80 和 P110 级套管钢成品  $[\text{S}] \leq 0.010\%$ ,钙处理后对钢水进行  $\geq 8$  min 软吹氩搅拌。

### 2.2.5 VD 真空脱气

N80 和 P110 级等真空处理钢种,要求 67 Pa 高真空下处理时间  $\geq 10$  min。在预抽真空阶段和破空阶段,控制底吹氩气流量  $\leq 100$  L/min;在高真空脱气阶段,底吹氩气流量调高至 200 ~ 300 L/min。

### 2.3 连铸工序

连铸全程保护浇注,采用电磁搅拌工艺,优化二冷配水,要求钢水过热度范围 15 ~ 25 °C,并保证钢水温度和拉速的稳定。使用碱性中间包覆盖剂和结晶器保护渣,对裂纹敏感性强的钢种,铸坯缓冷。

## 3 实物质量控制水平

天钢石油套管钢用圆坯化学成分及残余元素实物控制情况见表 3。J55 级钢种的全氧含量可稳定控制在  $25 \times 10^{-6}$  以下;L80、N80 和 P110 级套管钢的全氧含量可稳定控制在  $20 \times 10^{-6}$  以下。成品钢管的夹杂物总量  $\leq 2.5$  级。圆管坯的中心疏松和缩

表 3 套管钢实物化学成分和残余元素含量/%

Table 3 Analysis of chemical composition and residual elements content of typical oil case steel products /%

| 钢级   | 钢号      | C           | Si          | Mn          | Cr          | Mo          | V             | Al            | P             | S             | Pb + Sn + As + Sb + Bi | Cu           | O            |
|------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|--------------|--------------|
| J55  | 37Mn5   | 0.35 ~ 0.38 | 0.20 ~ 0.25 | 1.17 ~ 1.22 | -           | -           | -             | -             | 0.013 ~ 0.020 | 0.008 ~ 0.014 | -                      | $\leq 0.025$ | $\leq 0.002$ |
| L80  | TC80    | 0.25 ~ 0.27 | 0.24 ~ 0.30 | 1.42 ~ 1.48 | -           | -           | -             | 0.018 ~ 0.032 | 0.008 ~ 0.015 | 0.005 ~ 0.009 | $\leq 0.013$           | $\leq 0.018$ | $\leq 0.002$ |
| N80  | 36Mn2V  | 0.32 ~ 0.35 | 0.19 ~ 0.24 | 1.45 ~ 1.52 | -           | -           | 0.085 ~ 0.110 | -             | 0.008 ~ 0.015 | 0.004 ~ 0.008 | $\leq 0.012$           | $\leq 0.016$ | $\leq 0.002$ |
| P110 | 26CrMo4 | 0.25 ~ 0.27 | 0.24 ~ 0.28 | 0.90 ~ 0.95 | 0.86 ~ 0.91 | 0.16 ~ 0.18 | -             | -             | 0.008 ~ 0.014 | 0.003 ~ 0.008 | $\leq 0.010$           | $\leq 0.014$ | $\leq 0.002$ |

孔等缺陷  $\leq 1.0$  级。

## 4 结束语

客户认为天钢的产品残余元素含量低,钢的洁净度较高,铸坯表面及内部质量较好,完全满足客户的要求。在进一步完善优化工艺提高产品质量的基础上,将开展高抗挤毁、耐  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀等更高级别石油套管钢种的研制开发工作。

### 参考文献

[1] 赵秉军,王继尧,杨树桂,等. 钢中残余有害元素的影响与控制[J]. 特殊钢,1994,15(3):17-20.

[2] 李素芹,李士琦,熊国宏,等. 钢中残余有害元素对油井管质量的影响[J]. 特殊钢,2003,24(4):31-33.  
 [3] 姚同路. 天钢转炉流程生产石油套管钢精炼工艺控制技术研究[D]. 北京:北京钢铁研究总院,2009:29-30,67-69.  
 [4] 阮小江,姜周华,龚伟,等. 精炼渣对轴承钢中氧含量和夹杂物的影响[J]. 特殊钢,2008,29(5):1-3.  
 [5] 宁玫,付继成,郑建华. 喂  $\text{CaSi}$  线(钙处理)对钢中夹杂物变性的分析研究[C]. 2005 年中国钢铁年会论文集(第 3 卷),2005:246-251.

张玉海(1969-),男,北京科技大学毕业,工程师,炼钢工艺研究。

收稿日期:2012-12-23