

# 影响 20CrMnTiH (TS) 齿轮钢夹杂物控制因素的分析 and 工艺优化

高 菊<sup>1</sup> 丁志军<sup>2</sup> 李 辉<sup>2</sup>

(1 华北理工大学迁安学院, 迁安 064400; 2 河北钢铁石钢公司, 石家庄 050031)

**摘 要** 20CrMnTiH (TS) 钢冶金流程为 60 t 顶底复吹转炉-LF-VD-150 mm × 150 mm 方坯连铸。钢厂 20CrMnTiH (TS) 钢夹杂物一次检验不合格率达 2.0%, 主要为 B 类(复合钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石, 以及部分三氧化二铝)和 D 类夹杂(钙铝酸盐, 部分为复合钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石 + 氮化钛), 尺寸 > 20 μm。通过采用低磷铁水和优质废钢, 转炉终点 [C] ≥ 0.09%, 转炉出钢加 40 kg 硅钙和 40 kg 钢芯铝替代原只加 80 kg 钢芯铝预脱氧, LF 精炼采用 SiC70 替代 SiC45 进行扩散脱氧, VD 后喂 Ti 线, 保证精炼终渣碱度为 3.0, 控制连铸时钢包余钢量 > 2 t 等工艺措施使 T[O] 从 12 × 10<sup>-6</sup> 降至 8 × 10<sup>-6</sup>, 一次夹杂物检验不合格率下降至 0.5%。

**关键词** 20CrMnTiH (TS) 齿轮钢 T[O] B 类和 D 类夹杂物 工艺优化

## Analysis on Influence Factors of Control of Inclusions in Gear Steel 20CrMnTiH (TS) and Process Optimization

Gao Ju<sup>1</sup>, Ding Zhijun<sup>2</sup> and Li Hui<sup>2</sup>

(1 School of Qian'an, North China University of Science and Technology, Qian'an 064400;  
2 Shijiazhuang Steel Co, Hebei Iron and Steel Co, Shijiazhuang 050031)

**Abstract** The metallurgical flow sheet for steel 20CrMnTiH (TS) is 60 t top and bottom combined blowing converter-LF-VD-150 mm × 150 mm billet casting. The unqualified rate of inclusions in steel 20CrMnTiH (TS) at first examination at steelworks is up to 2%, main inclusions are B series (compound calcium aluminate + magnesia-alumina spinel, and partial alumina) and D series (calcium aluminate, and partial compound calcium aluminate + magnesia-alumina + titanium nitride), that size is more than 20 μm. With the process measures including using low phosphorus hot metal and high quality scrap, converter end [C] ≥ 0.09%, adding 40 kg silicon-calcium and 40 kg aluminium cladding steel to replace original only adding 80 kg aluminium cladding steel for pre-deoxidation in converter tapping, using SiC70 to replace SiC45 to diffusion-deoxidize in LF refining, feeding Ti wire after VD, insuring refining end slag basicity 3.0, and controlling heel liquid more than 2 t, the T[O] decreases from original 12 × 10<sup>-6</sup> to 8 × 10<sup>-6</sup> and the unqualified rate of inclusions in steel at first examination decreases to 0.5%.

**Material Index** Gear Steel 20CrMnTiH (TS), T[O], B Series and D series Inclusions, Process Optimization

齿轮作为机械工业的基础零件, 它在工作时长期受到变载荷的冲击力、接触应力、脉动弯曲应力及摩擦力等多种应力的作用, 还受到加工精度、装配精度、外来硬质点的研磨等多种因素的影响, 是各种零件中极易损坏的零件, 故对其基本性能和质量要求极高。即特定的淬透性及窄的淬透性带宽; 高的纯净度; 晶粒细小均匀; 良好的表面质量<sup>[1-6]</sup>。近年来, 随着汽车工业的迅速发展, 齿轮钢的需求量得到了显著的提高, 特别是汽车用齿轮钢更是逐年增加。河北钢铁公司生产的 20CrMnTiH (TS), 至开发以

来, 取得了良好的生产效果和经济效益。唯一不足之处就是钢材夹杂物一次检验不合率一直较高, 维持在 2.0% 左右, 严重影响钢材质量的稳定性和对客户的精准交货率。为此, 特针对 20CrMnTiH (TS) 钢中夹杂物的控制, 展开了系统的攻关研究。

### 1 研究钢种及生产条件

#### 1.1 研究钢种

研究钢种为 20CrMnTiH (TS), 化学成分标准及内控要求如表 1 所示。

表 1 20CrMnTiH (TS) 钢的化学成分标准及内控要求 / %

Table 1 Standard and internal requirement of chemical composition of steel 20CrMnTiH (TS) / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	O	N	H	B
标准	0.17 ~	0.17 ~	0.80 ~	<	0.015 ~	1.00 ~		0.03 ~	<	<	<	<
	0.23	0.37	1.15	0.025	0.030	1.35		0.08	0.001 5	0.007	0.000 3	0.000 6
内控	0.19 ~	0.23 ~	1.03 ~	<	0.015 ~	1.13 ~	0.010 ~	0.04 ~				<
	0.21	0.27	1.07	0.020	0.023	1.17	0.025	0.07				0.000 5

1.2 生产条件

(1) 工艺流程: 60 t 顶底复吹转炉 → LF 精炼 → VD 真空精炼 → 方坯 (150 mm × 150 mm) 连铸。

(2) 主要生产设备、工艺参数: 60 t 顶底复吹转炉, LF 钢包精炼炉, 钢包容量 60 t; 60 t 双工位 VD 炉, 采用五级蒸汽泵 (三级增压, 两级喷射), 预抽时间为 5 ~ 10 min, 保真空时间为 8 ~ 15 min, 可将钢中 [H] 降到  $2 \times 10^{-6}$  以下; 5 机 5 流渐进矫直弧形连铸机, 铸机半径 R 为 9 m, 铸坯断面尺寸为 150 mm × 150 mm, 拉坯速度为 1.4 ~ 1.8 m/min, 铸机具有结晶器电磁搅拌功能。

2 结果分析

2.1 各工序钢中 T[O] 的变化

通过对生产各个环节取样进行 T[O] 分析, 钢中 T[O] 变化规律如图 1 所示。

由图 1 可知, LF 精炼终点钢液 T[O] 为  $15 \times 10^{-6}$ , VD 破空后为  $18 \times 10^{-6}$ , 略有增长, 原因是 VD 处理过程有卷渣现象发生; VD 吊包时 T[O] 下降到  $14 \times 10^{-6}$ , 但效果不明显, 表明精炼渣吸附夹杂物效果较差; 中间包 T[O] 为  $15 \times 10^{-6}$ , 增长不明显, 表明保护浇注较好, 没有造成严重吸氧; 钢材中 T[O] 为  $12 \times 10^{-6}$ , 分析认为是浇注过程氧溶解度降低及浇注过程部分夹杂物上浮造成的。

2.2 夹杂物形貌、组成及粒径分析

通过扫描电镜和能谱仪分析, 20CrMnTiH (TS) 钢材中主要检测出两类夹杂, 分别为 B 类和 D 类夹杂物, 其中 B 类链条状的夹杂物主要为钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石复合夹杂物和部分三氧化二铝夹杂; D 类黑灰色球形夹杂物的化学组成主要是钙铝酸盐, 部

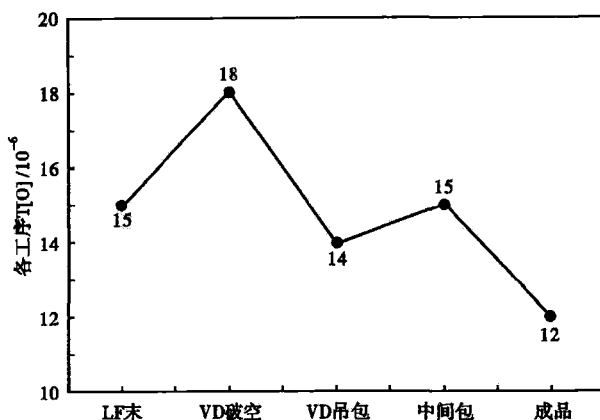


图 1 优化前各工序钢中 T[O] 的变化

Fig. 1 Change of T[O] at each procedure before process optimization

分钙铝酸盐 + 镁铝尖晶石 + 氧化钛的复合氧化物, 且尺寸相对较大 ( $> 20 \mu\text{m}$ ), 其夹杂物形貌及成分如图 2 所示。

2.3 工艺异常分析

工艺改进前, 生产 20CrMnTiH (TS) 主要工艺控制点如下。

2.3.1 转炉终点控制

表 2 是 433 炉 20CrMnTiH (TS) 转炉终点碳的控制情况。从表 2 结果看出, 转炉终点碳控制水平较差, 吹炼终点碳偏低,  $[C] \geq 0.09\%$  的炉次只占 28.17%, 由碳氧积  $[C] \cdot [O] = 0.0028$  表明, 钢水初始氧含量较高, 且不稳定。而转炉出钢过程加入的钢芯铝都为 80 kg, 直接导致精炼座包 [Al] 不稳定, 进而影响精炼过程控制的稳定性。

2.3.2 精炼过程脱氧方式的影响

20CrMnTiH (TS) 精炼过程的脱氧方式为: 碳化

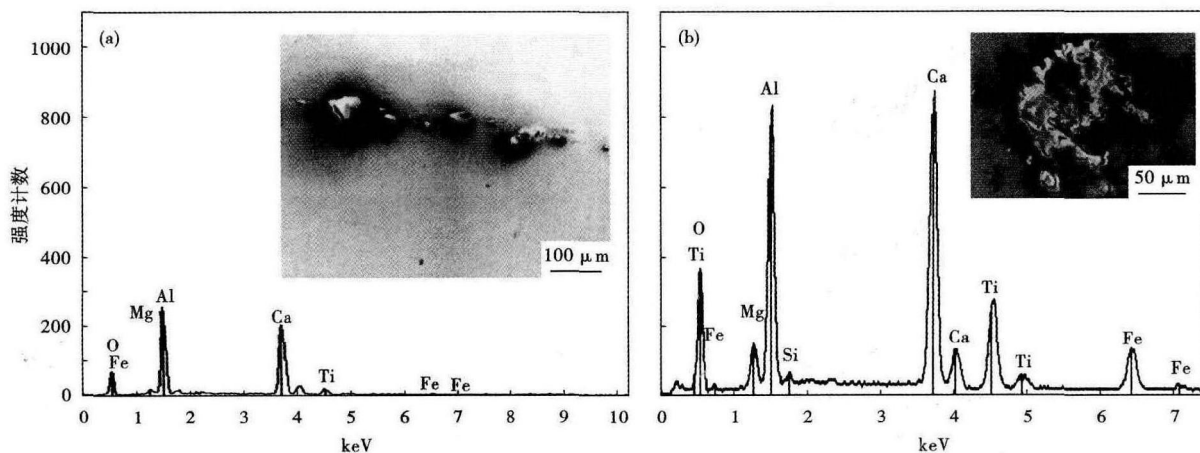


图 2 工艺优化前 20CrMnTiH (TS) 钢材中 B 类 (a) 和 D 类 (b) 夹杂形貌与能谱图

Fig. 2 Morphology and energy spectrum figure of B series (a) and D series (b) in before products optimization of steel 20CrMnTi H (TS)

表 2 2014 年 20CrMnTiH(TS) 钢 60 t 转炉终点碳的控制数据

Table 2 Data of 60t BOF end [C] control for steel 20CrMnTiH(TS) produced in 2014

终点[C]/%	炉数	比例/%	钢芯铝的加入量/kg
≤0.05	46	10.62	80
0.06~0.08	265	61.20	80
≥0.09	122	28.17	80

硅扩散脱氧 + 铝线沉淀脱氧。精炼过程钢液 [Al]<sub>s</sub> 变化如图 3 所示,可知 LF 处理过程,钢液 [Al]<sub>s</sub> 的增加主要有两种方式,一是精炼前期大量喂入铝线所致,二是精炼终点加入钛铁导致增铝量明显。整个生产过程钢中 [Al]<sub>s</sub> 较高,根据实践分析<sup>[7]</sup>,当 [Al]<sub>s</sub> 超过 0.03% 时,钢中的 Al 很容易与渣中的氧结合,也会还原渣中 SiO<sub>2</sub>、MnO 等化合物,使钢液中聚集的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 增加;还有浇注时过高的 [Al]<sub>s</sub> 会大幅增加钢液的二次氧化,产生停留在成品中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。[Al]<sub>s</sub> 控制过低时,会增加溶解氧的含量,不但会造成钢中氧化物的增加,还会影响钢的组织性能。

2.3.3 钛铁加入量及加入时机的影响

工艺改进前,20CrMnTiH(TS) 增钛的方式为精炼终点加钛铁,为避免 VD 过程 [Ti] 的损失太大,导致成品 [Ti] 不合格,通常加入钛铁量较大。冶炼过程测得 LF 末、VD 破空和成品钢液 [Ti] 分别为 0.11%、0.066% 和 0.063%,可见 VD 处理过程钢液钛的损失较大,易产生大量钛系(TiN)的夹杂物。氮化钛是形状呈尖角形的较硬质点,影响齿轮的接触疲劳寿命<sup>[8]</sup>。

2.3.4 精炼渣系的影响

精炼过程加入的渣量为 10 ~ 15 kg/t<sub>钢</sub>,20CrMnTiH(TS) 精炼终渣及 VD 破空后渣子平均分见表 3。

由于 20CrMnTiH(TS) 属于易切钢种,需要保持一定的硫含量,而精炼过程渣子碱度(R) ≥ 4.0,高碱度还原渣对提高硫收得率难度较大。

2.3.5 非稳态浇注的影响

稳态及非稳态浇注情况下,铸坯 T[O] 的分析得出,开浇、正常和浇铸末期铸坯 T[O] 分别为 13 × 10<sup>-6</sup>、11 × 10<sup>-6</sup> 和 16 × 10<sup>-6</sup>。

可见开浇过程铸坯的 T[O] 与正常浇注相比,虽有所增长,但不明显;说明开浇过程中间包液面高度充分,保证了夹杂物上浮时

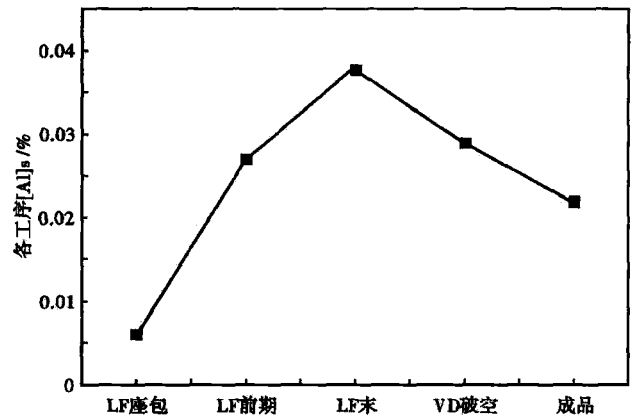


图 3 工艺优化前各工序钢中 [Al]<sub>s</sub> 的变化

Fig. 3 Change of [Al]<sub>s</sub> at each procedure before process optimization

间,钢水保护浇注执行较好,减少了开浇二次氧化,为开浇铸坯较低的 T[O] 水平奠定了基础;浇注末期铸坯 T[O] 较正常浇注期间增加明显,原因在于浇注末期钢包停浇后,中间包低液面状态下生产的铸坯,由于夹杂物没有充分的上浮时间,因此进入钢中造成 T[O] 升高。

3 改进措施

针对以上分析,做出了 6 个方面的工艺优化,分别为:

(1) 强化转炉终点控制,采用低磷铁水([P] < 0.1%) 和优质废钢,杜绝终点二次倒炉,保证 [C] · [O] = 0.0028 的前提下,转炉终点 [C] ≥ 0.09%。

(2) 优化转炉终点脱氧机制:采用 40 kg 硅钙钡复合脱氧剂 + 40 kg 钢芯铝代替工艺改进前转炉出钢过程只加入 80 kg 钢芯铝进行脱氧,稳定精炼炉座包铝。硅钙钡成分如表 4 所示。

(3) 强化精炼过程扩散脱氧强度,采用 SiC70 代替 SiC45,取消沉淀脱氧工艺,SiC70 脱氧剂的成分如表 5 所示。

(4) 改进精炼过程增钛方式,VD 破空后喂钛线代替工艺改进前 LF 终点加钛铁增钛的方式。

(5) 减少转炉出钢石灰的加入量,保证精炼终点渣碱度 R 在 3.0 左右,改进后的精炼渣系成分如表 6 所示。

表 3 原工艺 20CrMnTiH(TS) 钢精炼渣系成分和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of refining slag series of original process for steel 20CrMnTiH(TS)

工序	渣系成分/%											碱度 (R)
	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	CaF <sub>2</sub>	
LF 精炼	0.55	0.5	10.49	52.21	4.87	27.99	1.25	0.14	0.01	0.297	0	4.98
VD	0.23	0.3	11.37	51.08	5.22	26.63	2.22	0.18	0.006	0.313	0	4.49

表 4 硅钙钡合金脱氧剂的成分 / %

Table 4 Chemical composition of deoxidizer of silicon-calcium-barium alloy / %

Ca	Ba	Si	Al	Mn	C	P	S	H <sub>2</sub> O
≥10	≥10	≥45	≤3.0	≤1.50	≤1.00	≤0.05	≤0.10	≤0.50

表 5 SiC70 脱氧剂的成分 / %

Table 5 Analysis of deoxidizer SiC70 / %

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca	H <sub>2</sub> O	S	SiC	TC	Ti	游离碳
4.7	0.8	0.35	0.14	71	26	0.1	0

表 6 改进后的精炼渣系成分和碱度

Table 6 Ingredient and basicity of refining slag series after process optimization

工序	渣系成分 / %											碱度 (R)
	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	CaF <sub>2</sub>	
LF 精炼	0.35	0.45	14.75	46.44	5.13	27.07	0.42	0.67	0.003	0.265	0.23	3.15
VD	0.39	0.50	15.26	44.04	5.89	28.34	1.39	0.74	0.001	0.263	0.22	2.89

表 7 工艺优化前后夹杂物级别比较

Table 7 Comparison between inclusions rating before and after process optimization

工艺	A 类		B 类		D 类	
	细	粗	细	粗	细	粗
优化前	2.0	1.5	2.0	1.5	1.5	1.0
优化后	1.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5

(6) 强化连铸过程控制, 加装钢包下渣检测, 控制钢包余钢量大于 2 t。

## 4 实施效果

### 4.1 钢材 T[O]

工艺优化前 20CrMnTiH(TS) 钢材 T[O] 为  $12 \times 10^{-6}$ , 工艺优化后钢材 T[O] 为  $8 \times 10^{-6}$ , 表明优化工艺的效果非常明显。

### 4.2 夹杂物级别

工艺优化前后, 各种夹杂物级别比较见表 7。

从表 7 可以看出, 工艺优化后, A、B、D 三类夹杂物的级别得到了极大的改善。

### 4.3 夹杂物不合格率

工艺优化前, 夹杂物一次检验不合格率为 2.0% 左右, 而工艺优化后, 夹杂物一次检验不合格率为 0.5%, 表明所采用的优化工艺很好解决了 20CrMnTiH(TS) 钢材夹杂物超标的问题。

## 5 结论

(1) 各工序 T[O] 分析表明, VD 处理过程中有

卷渣现象, 这对钢材夹杂物含量偏高有一定影响。

(2) 转炉终点 C 控制水平较差,  $[C] \geq 0.09\%$  的炉次只占 28.17%, 导致钢液初始氧偏高, 且不稳定; 同时对精炼炉座包铝的影响也较大。

(3) LF 调铝量较大, 整个冶炼过程  $[Al]_s$  偏高,  $[Al]_s$  超过 0.03% 为 B 类夹杂物超标提供隐性条件。

(4) LF 终点加入钛铁调钛, 加入量大, 钛的损失严重, 易产生大量钛系 (TiCN) 夹杂物。

(5) 精炼过程渣子碱度 (R) 偏高, R 值接近 5, 对硫线的收得率影响较大。

(6) 钢包下渣量大, 导致浇铸终了铸坯的夹杂物含量偏高。

(7) 通过控制转炉终点  $[C] \geq 0.09\%$ , 转炉出钢用硅钙 + 钢芯铝替代只用钢芯铝预脱氧, LF 精炼用 SiC70 替代 SiC45 扩散脱氧, VD 后喂 Ti 线, 精炼终渣碱度 3.0, 控制钢包余钢量 > 2 t 等改进工艺措施, 钢材 T[O] 和各种夹杂物级别得到明显改善, 夹杂物一次检验不合格率从 2.0% 下降到 0.5%。

## 参考文献

- [1] 吴树源, 刘占江, 武云峰, 等. 我国齿轮钢的生产与应用[J]. 特殊钢, 2003, 24(5): 30-33.
- [2] 张悦, 霍松波, 黄一新. 齿轮钢的开发与生产[J]. 冶金标准化与质量, 2002, 41(1): 17-19.
- [3] 闫咏春, 杜丽娜. 齿轮钢生产现状及发展[J]. 山西机械, 2003, 32(增刊): 70-71.
- [4] 陈峰. 汽车齿轮钢带状组织与热处理[J]. 上海钢研, 2006, 33(2): 44-49.
- [5] 杜显彬, 周平, 翟正龙, 等. 汽车用高性能齿轮钢的研究与开发[J]. 山东冶金, 2004, 26(4): 66-68.
- [6] 王明林, 赵沛, 罗海文, 等. 20CrMnTi 齿轮钢热塑性的研究[J]. 钢铁, 2001, 36(4): 50-53.
- [7] 于泽乐, 孔晓眉. 车轮钢中夹杂和铝脱氧的关系[J]. 炼钢, 1988, 4(2): 1-7.
- [8] Gao Yang, Sorimachi Kenichi. Effect of Mn and Ti Precipitates on the Hot Ductility of Low Carbon and Ultra Low Carbon Steels[J]. ISIJ International, 1995, 35(7): 914-919.

高菊 (1980-), 女, 硕士 (2009 年河北理工大学), 讲师, 2003 年河北理工大学 (本科) 毕业, 凝固理论与钢质量控制研究. E-mail: robbg\_1018@163.com

收稿日期: 2015-05-18