

## 洁净石油管坯钢 27CrMoNbV 的生产实践

喻 林

(攀钢集团西昌钢铁有限公司, 西昌 615032)

**摘 要** 攀钢 27CrMoNbV 钢的流程为采用铁水预处理-120 t 顶底复吹转炉-LF-RH-360 mm × 450 mm 坯连铸工艺, 通过铁水预处理深脱硫, 转炉双渣法冶炼脱磷, 转炉出钢及 LF 精炼深脱硫, 采用 (1.6 ~ 2.2) CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 精炼渣系、RH 处理喂 Ca-Si 线处理、保护浇注等工艺优化, 生产的 27CrMoNbV 钢化学成分稳定, P ≤ 0.010%, S ≤ 0.004%, [H] ≤ 1.5 × 10<sup>-6</sup>, T[O] ≤ 0.001 1%, 非金属夹杂 A、B、C、D、Ds 均 ≤ 1.0 级, 完全满足技术要求。

**关键词** 27CrMoNbV 钢 磷 硫 氧 夹杂物

## Production Practice of Clean Steel 27CrMoNbV for Petroleum Tube Blank

Yu Lin

(Xichang Steel Vanadium Co Ltd, Pangang Group, Xichang 615032)

**Abstract** The flowsheet of steel 27CrMoNbV at Pansteel is hot metal pretreatment-120 t top bottom combined blown BOF-LF-RH-360 mm × 450 mm bloom CC process. With the process optimization including hot metal deep desulfurization pretreatment, BOF double slag dephosphorization process, deep desulfurization in the process of BOF tapping and LF refining with (1.6 ~ 2.2) CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> refining slag system, RH refining treatment by feeding Ca-Si wire and protective casting, the chemical composition stability of steel 27CrMoNbV is produced with P ≤ 0.010%, S ≤ 0.004%, [H] ≤ 1.5 × 10<sup>-6</sup>, T[O] ≤ 0.001 1%. The rating of non-metallic inclusion of A, B, C, D and D<sub>s</sub> are all ≤ 1.0 rating, which fully meet technical requirements.

**Material Index** Steel 27CrMoNbV, Phosphorus, Sulfur, Oxygen, Inclusion

洁净钢生产于 20 世纪 60 年代出现在欧洲、20 世纪 90 年代我国开始研发<sup>[1]</sup>, 洁净钢对钢中杂质元素的含量要求非常严格, 如抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀的管线钢要求 [S] ≤ 0.000 5%; 轴承钢要求 T[O] ≤ 0.000 6%、抗应力腐蚀和氢致裂纹的高强钢要求 [P] ≤ 0.003 0% 等<sup>[2-3]</sup>。目前通过新工艺降低钢中杂质元素的含量、通过新技术控制夹杂物的形态和数量, 成为洁净钢研究的主要任务, 也成为钢铁企业竞争力的重要标志<sup>[4-6]</sup>。

洁净钢生产不是一个独立工序可以完成的, 通常需要铁水预处理、转炉炼钢、二次精炼、连续铸钢多个工序共同配合完成<sup>[7-8]</sup>。为了满足洁净钢生产各大钢铁企业先后开发出脱硫、脱磷、夹杂物去除和形态控制等技术<sup>[9]</sup>, 如水钢生产的 82B 盘条钢 [S] ≤ 0.000 5%、[N] ≤ 0.004%; 27CrMoNbV 钢是抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀的石油管坯钢, 因工作环境恶劣, 对钢中 S、P、O、H 的要求很高<sup>[10-12]</sup>, 属低硫、低磷、低氧钢种, 冶炼难度远远高于 J55、X65、N80 等管坯、管线用钢<sup>[13-15]</sup>。由于攀钢铁水硫、磷含量高, 铁水预处理不具备脱磷功能, 磷的去除只能依靠转炉来完

成, 同时为了满足钢水深脱硫的需要, 必须降低钢包渣氧化性, 这样势必会进一步增加回磷量。除钢中的 P、S 的控制存在较大难度外, 该钢种对 O、N 和夹杂物的要求也非常高。

以攀钢抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀的石油管坯钢 27CrMoNbV 为试验钢种, 利用铁水预处理、转炉炼钢、二次精炼、连铸等多个工序技术改进, 实现 27CrMoNbV 钢中 [S]、[P]、T[O]、[H]、[N] 及夹杂物的有效控制, 为攀钢洁净钢生产提供了技术保障。

### 1 技术路线及主要技术措施

#### 1.1 技术路线

27CrMoNbV 管坯钢生产的工艺技术路线: 铁水预处理 → 120 t 顶底复吹转炉 → 出钢渣洗 → LF 精炼 → 软吹氩 → RH 处理 → 喂线钙处理 → 软吹氩 → 连铸 (360 mm × 450 mm) → 清理 → 轨梁轧制成 Φ200 mm ~ Φ350 mm。钢种成分及实验化学成分要求见表 1。

#### 1.2 主要技术措施

为确保 27CrMoNbV 钢的稳定生产, 提出了各工序采取的主要技术措施, 见表 2。

## 2 试验结果

### 2.1 试验钢成分

试验共进行了 8 炉, 管坯钢的成品化学成分见表 1。对比表 1 可以看出, 8 炉试验钢的成分均在 27CrMoV 管坯钢成分要求范围内, 说明试验技术路线和技术措施是可行的。

### 2.2 铸坯及圆钢低倍组织

连铸过程采用电磁搅拌和轻压下并严格控制中间包浇铸温度和稳定拉速, 铸坯的内部质量得到很好的保障。360 mm × 450 mm 铸坯的低倍组织见图 1(a), Φ300 mm 圆钢的低倍组织和低倍缺陷评级见图 1(b) 和表 3。

铸坯的低倍组织除中心有轻微的缩孔和疏松外, 未发现其它缺陷。由图 1(b) 和表 3 可见, 圆钢无裂纹缺陷, 疏松均 ≤ 1.0 级, 圆钢质量良好。

## 3 分析与讨论

### 3.1 磷的控制

根据钢种磷含量要求以及转炉脱磷过程的分析, 采用了转炉双渣法深脱磷技术: 活性白灰加入总量 2 ~ 3.5 t/炉, 高镁石灰加入总量 1.8 ~ 3 t/炉, 复合造渣剂加入总量 1.5 ~ 2 t/炉。造渣材料分多批次少量加入, 其中转炉留渣后向炉内定量加入活性石灰 1t, 高镁石灰 0.5 t。开吹后加入复合造渣剂, 第一批加入量前期碱度按 2.0 ~ 2.5 控制, 余下的造渣材料按 200 ~ 400 kg 每批次, 分批多次加入, 并在开吹后前 5 min 内完成 50% ~ 60% 的加料, 倒炉前完成 80% 的造渣材料加入。枪位前期先低后高, 促化渣, 中期滑枪, 后期低枪位加强搅拌, 典型脱磷终渣成分见表 4。

对 8 炉试验钢的转炉炼钢工序的入炉磷含量和终点磷含量进行了对比, 并对各工序的磷含量进行了测定, 结果见表 5、表 6。

从表 5 可以看出, 转炉脱磷效果非常明显, 试验钢的终点磷都控制在 0.007% 以内, 最低达到 0.003%, 脱磷率达到 89.39% ~ 95.65%, 平均

表 1 27CrMoNbV 管坯钢的化学成分/%

炉号	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Cr	Mo
要求	0.25 ~ 0.29	0.20 ~ 0.35	0.35 ~ 0.50	≤ 0.010	≤ 0.005	0.08 ~ 0.12	0.03 ~ 0.05	0.40 ~ 0.55	0.70 ~ 0.80
706674	0.26	0.32	0.39	0.010	0.003	0.12	0.04	0.52	0.71
706675	0.29	0.33	0.39	0.009	0.003	0.11	0.05	0.51	0.74
706676	0.26	0.30	0.41	0.006	0.002	0.10	0.04	0.50	0.72
706677	0.27	0.31	0.41	0.006	0.004	0.09	0.04	0.49	0.72
706678	0.26	0.30	0.38	0.004	0.003	0.09	0.04	0.51	0.71
706679	0.26	0.30	0.40	0.005	0.003	0.09	0.04	0.48	0.72
706680	0.26	0.31	0.40	0.005	0.002	0.09	0.05	0.49	0.72
706681	0.27	0.32	0.39	0.003	0.003	0.09	0.04	0.48	0.73

表 2 各工序采取的主要技术措施

工序	主要技术措施	控制目标
铁水预处理	深脱硫、扒净脱硫渣。	入炉[S] ≤ 0.005%。
转炉冶炼	双渣脱磷、控制终点碳和温度, 减少炉内增、回硫, 降低终点钢水和炉渣氧化性, 减少下渣量, 出钢加入高碱度精炼渣, 出钢毕向包内加入专用脱氧剂。	终点[P] ≤ 0.007%、[S] ≤ 0.010%, 下渣层厚度 ≤ 50 mm。
LF 精炼	补加脱硫精炼渣和铝丸, 控制精炼终渣成分以及加热精炼时间, 精炼后软吹氩出站。	出站[S] ≤ 0.003%。
RH 精炼	严格保证足够的纯处理时间, 成分微调, 处理后喂线钙处理, 喂线后软吹氩出站。	成分合格
连铸	保护浇铸, 稳定拉速。	过热度(ΔT) 20 ~ 40 °C

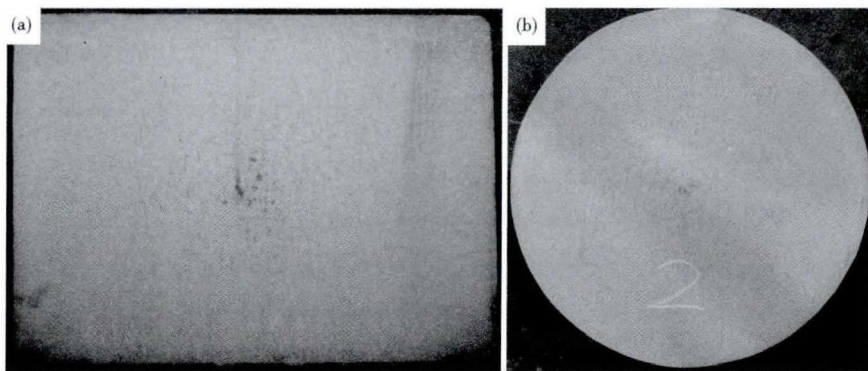


图 1 27CrMoNbV 钢(a)360 mm × 450 mm 铸坯和(b)Φ300 mm 管坯低倍组织  
Fig.1 Macro-structure of 360 mm × 450 mm cast bloom (a) and Φ300 mm tube blank of steel 27CrMoNbV

92.23%。

针对后续工序还原精炼的工艺特点, 通过采用严格控制转炉下渣量, 以及低温出钢等措施, 很好地控制了钢中回磷现象, 但部分炉次仍有增 P 现象。从表 6 可以看出, 增 P 主要发生在转炉出钢至 LF 工序, 主要受转炉出钢下渣以及所加辅料和 LF 还原

表 3 27CrMoNbV 钢低倍 / 级

Table 3 Macro-structure of steel 27CrMoNbV / rating

炉号	一般疏松	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	近表面裂纹	其它缺陷
706674	1.0	1.0	0	0	0	0	无
706675	1.0	1.0	0	0	0	0	无
706676	1.0	1.0	0	0	0	0	无
706677	1.0	0.5	0	0	0	0	无
706678	1.0	1.0	0	0	0	0	无
706679	0.5	0.5	0	0	0	0	无
706680	1.0	0.5	0	0	0	0	无
706681	1.0	1.0	0	0	0	0	无

表 4 转炉终点炉渣成分及碱度

Table 4 Ingredient and basicity of BOF terminal slag

炉渣成分 / %					碱度 (R)
P	CaO	TFe	SiO <sub>2</sub>	fCaO	
0.84 ~ 0.92	39.16 ~ 43.02	19.68 ~ 23.16	10.08 ~ 11.06	6.87 ~ 7.15	3.6 ~ 4.4

表 5 转炉入炉磷与终点磷对比

Table 5 Comparison of Phosphorus between BOF charging and end point

项目	炉号							
	706674	706675	706676	706677	706678	706679	706680	706681
入炉磷 / %	0.070	0.069	0.066	0.063	0.066	0.067	0.059	0.069
终点磷 / %	0.006	0.006	0.007	0.005	0.004	0.005	0.004	0.003
脱磷率 / %	91.43	91.30	89.39	92.06	93.94	92.54	93.22	95.65

表 6 各工序钢中磷含量变化

Table 6 Changes in P content in steel at each processe

工序	不同炉号各工序钢中磷含量 / %							
	706674	706675	706676	706677	706678	706679	706680	706681
转炉出钢	0.007 0	0.005 0	0.005 0	0.005 0	0.004 0	0.003 0	0.004 0	0.003 0
LF 进站	0.008 1	0.006 8	0.006 0	0.006 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.003 0
LF 出站	0.010 0	0.007 0	0.007 0	0.006 0	0.004 0	0.005 0	0.004 0	0.003 0
RH 进站	0.010 0	0.007 2	0.007 0	0.006 0	0.004 0	0.005 0	0.005 0	0.003 0
RH 出站	0.010 0	0.007 2	0.007 0	0.006 0	0.004 0	0.005 0	0.005 0	0.003 0
成品	0.010 0	0.008 3	0.007 0	0.006 0	0.004 0	0.005 0	0.005 0	0.003 0

表 7 27CrMoNbV 钢精炼脱硫工艺参数

Table 7 Parameter of refining desulfurization process of steel 27CrMoNbV

活性石灰 / kg	萤石 / kg	高铝调渣剂 / kg	铝丸 / kg	LF 加热时间 / min	LF 精炼时间 / min	吨钢辅料消耗 / kg
800 ~ 1 000	50 ~ 80	300	80 ~ 120	30 ~ 40	50 ~ 65	9 ~ 12

精炼等影响,钢中 P 有所回升,但幅度都不大,增、回磷均在 0.001% ~ 0.003%。

### 3.2 硫的控制

通过铁水预处理脱硫以严格控制入炉铁水硫,并采用 LF 精炼深脱硫。精炼脱硫工艺参数见表 7,其精炼终渣组成及理化指标见表 8。

冶炼过程中硫含量变化见表 9。由表 9 可以看出,在转炉工序硫含量都有一定的升高,但到了 LF

工序硫含量基本上都有较为明显的降低,说明 LF 精炼脱硫效果明显,受后期合金调整影响,成品 S 略有回升,但都在 0.004% 以内,满足钢种 [S] ≤ 0.005% 的控制要求。

### 3.3 氮的控制

基于攀钢的现状,确立了氮含量控制要点:转炉深脱氮 + 合金选择 + RH 脱氮 + 过程增氮控制。对此,采用以下措施以达到转炉控氮的目的:(1) 试验炉次采用低氮钢冶炼专用底吹供气模式,保证单砖供气流量达到 50 m<sup>3</sup>/h,冶炼后期吹氩流量提高到 80 m<sup>3</sup>/h。(2) 加强转终点控制,吹炼后期采用低枪位操作,提高一次拉碳命中率,减少补吹,避免深吹。(3) 转炉冶炼后期视炉内温度情况加入吨钢 1.5 ~ 3 kg 炉渣发泡剂促进后期脱氮。

通过采用相关的措施,成品氮含量都控制在 60 × 10<sup>-6</sup> 以内(见表 10)。

### 3.4 氧及夹杂控制

根据生产经验,当钢中碳含量在 0.03% 以内时,钢液氧活度严重偏高,基本在 800 × 10<sup>-6</sup> 以上,对于后期洁净度控制极为不利,为此,在 27CrMoNbV 的吹炼过程中,保证磷含量的前提下,钢中碳含量应控制在 0.03% 以上。试验炉次终点碳 0.025% ~ 0.053%,终点氧 (564 ~ 828) × 10<sup>-6</sup>,基本达到了控制目标。

精炼造渣是夹杂物的吸附去除的重要环节,通过对攀钢含钒钛铁水钢包渣特性的研究表明,终渣控制范围应为:(1) 渣中 (FeO + MnO) 尽可能低,最好 < 2.0%; (2) 渣中 SiO<sub>2</sub> ≤ 10.0%; (3) 渣中 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 控制在 1.5 ~ 2.0。

在精炼结束后,采用钙处理工艺对其夹杂物进行变性处理,钙处理前提要求钢中硫含量在 0.008% 以内,[Ca]/[Al] ≥ 0.1。为了保证钙的有效收得率,硅钙线喂入前钢包吹氩吹破渣面使钙线顺利喂入即可;后期吹氩应严格控制流量,避免钢液大翻;其次喂线速度不能太快,3 ~ 5 m/s 较为适合。在钙处理后,为保证夹杂物的充分上浮去除,钢水必须软吹氩 8 min 以上方能离站。

成品圆钢中 T[O]、夹杂物控制情况见表 10。从表 10 可以看出,成品圆钢 T[O] 最大 10.2 ×

表8 精炼终渣组成及理化指标

Table 8 Composition and physical-chemical indexes of refining final slag

CaO/ %	SiO <sub>2</sub> / %	(FeO + MnO)/ %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	MgO/ %	Cs	MI	Ls	CaO/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
46 ~ 55	5 ~ 8	0.9 ~ 1.5	24 ~ 29	4.1 ~ 7.3	0.76 ~ 0.82	0.21 ~ 0.32	80 ~ 160	1.6 ~ 2.2

表9 各工序钢中硫含量变化

Table 9 Changes in S content in steel at each processes

工序	不同炉号各工序钢中硫含量 / %							
	706674	706675	706676	706677	706678	706679	706680	706681
入炉	0.007 0	0.002 0	0.001 0	0.002 0	0.002 0	0.003 0	0.003 0	0.003 0
转炉出钢	0.004 0	0.004 0	0.003 0	0.003 0	0.004 0	0.005 0	0.005 0	0.006 0
LF 进站	0.004 0	0.003 0	0.001 0	0.002 0	0.003 0	0.005 0	0.003 0	0.004 0
LF 出站	0.002 0	0.001 0	0.002 0	0.003 0	0.002 0	0.004 0	0.002 0	0.003 0
RH 进站	0.001 0	0.001 0	0.002 0	0.002 0	0.002 0	0.0020	0.002 0	0.002 0
RH 出站	0.001 0	0.003 0	0.003 0	0.004 0	0.003 0	0.004 0	0.002 0	0.003 0
成品	0.002 5	0.002 7	0.002 4	0.003 8	0.003 6	0.002 8	0.002 0	0.002 8

表10 27CrMoNbV 钢管坯非金属夹杂评级和T[O]、[N]

Table 10 Non metallic inclusion rating and T[O]、[N] of steel 27CrMoNbV tube blank

炉号	类别	非金属夹杂					T[O]/ 10 <sup>-6</sup>	[N]/ 10 <sup>-6</sup>
		A	B	C	D	Ds		
706677	粗系	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	10.2	54
	细系	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5		
706680	粗系	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	6.3	56
	细系	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5		
706681	粗系	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	9.9	53
	细系	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5		
706679	粗系	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	9.3	46
	细系	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5		
706674	粗系	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	7.8	31
	细系	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5		
706675	粗系	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	8.8	30
	细系	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5		
706676	粗系	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	10.2	55
	细系	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5		
706678	粗系	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	6.9	45
	细系	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5		

10<sup>-6</sup>, 最小6.3 × 10<sup>-6</sup>, 所有试验钢种T[O]均在 11 × 10<sup>-6</sup>以内。非金属夹杂的控制效果很好, A、B、C、D、Ds 夹杂评级均 ≤ 1.0 级。

#### 4 结论

(1) 采用脱硫铁水、转炉双渣脱磷、Fe-Al + 喂 Al 线脱氧、出钢及 LF 造渣深脱硫、RH 精炼、喂 Ca-Si 线处理、保护浇铸等技术措施, 生产的 27CrMoNbV 钢化学成分均在技术要求范围内。

(2) 转炉双渣法深脱磷时, 活性白灰加入总量 2 ~ 3.5 t/炉, 高镁石灰加入总量 1.8 ~ 3 t/炉, 复合造渣剂加入总量 1.5 ~ 2 t/炉; 喂硅钙线速度控制在

3 ~ 5 m/s 较为适合。

(3) 27CrMoNbV 圆钢表面质量优良, 一般疏松和中心疏松 ≤ 1.0 级, 无皮下气泡、裂纹等其它缺陷。

(4) 工艺措施实施后, 终点磷都控制在 0.007% 以内, 最低达到 0.003%, 平均脱磷率达到 92.23%; S ≤ 0.004%, [H] ≤ 1.5 × 10<sup>-6</sup>, T[O] ≤ 11 × 10<sup>-6</sup>, 非金属夹杂 A 类、B 类、D 类 ≤ 1.0 级, C 类和 Ds ≤ 0.5 级, 全部满足要求。

#### 参考文献

- [1] 刘浏. 洁净钢生产技术的发展与创新[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 18-28.
- [2] 黄华. LF 炉精炼渣系冶炼洁净钢工艺实践[J]. 特钢技术, 2017, 23(3): 38-41.
- [3] 徐匡迪, 肖丽俊. 特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 1-13.
- [4] 王琳松. 水钢高效率低成本洁净钢生产[J]. 钢铁, 2014, 49(6): 18-29.
- [5] 冯远超, 陈天明, 孙彦辉, 等. 高品质管坯钢夹杂物控制技术[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 54-58.
- [6] 张立峰. 关于钢洁净度指数的讨论[J]. 炼钢, 2019, 35(3): 1-12.
- [7] SUGIMOTO S and OI S. Development of High Productivity Process of Ultra-High-Cleanliness Bearing Steel[J]. Sanyo Technical Report, 2018, 25(1): 50-54.
- [8] Zhang X B, Ren Y and Zhang L F. Influence of Casting Parameters on Hooks and Entrapped Inclusions at the Subsurface of Continuous Casting Slabs[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(11): 5469-5477.
- [9] 李红光. 管坯钢纯净度控制研究[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(4): 88-93.
- [10] 陈明昕, 杨晓江, 孟庆勇. 抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀 X70MS 管线钢的开发[J]. 轧钢, 2020, 37(1): 33-37.
- [11] 赵波, 王长顺, 解德刚, 等. 抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀无缝管线的研制[J]. 金属热处理, 2018, 43(3): 25-29.
- [12] 叶晓瑜, 孙新军, 张开华, 等. 控轧控冷工艺对抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀 X70 管线钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2019, 40(6): 55-59.
- [13] 姜周华, 李阳, 龚伟, 等. 特殊钢棒线材洁净冶炼技术[J]. 河北冶金, 2018, (6): 1-9.
- [14] 黄华. LF 炉精炼渣系冶炼洁净钢工艺实践[J]. 特钢技术, 2017, 23(3): 38-41.
- [15] 廖亚莉, 姚宇峰. 鞍钢纯净钢的生产与质量控制[J]. 铸造技术, 2017, 38(12): 3040-3041.

喻林(1979-), 男, 高级工程师, 2002 年包头钢铁学院(本科)毕业, 冶金新技术研究。E-mail: 46217133@qq.com

收稿日期: 2020-06-14