

高压气瓶用钢 4147 $\Phi 500$ mm 连铸圆坯的生产实践

李尚兵 张新文 薛伟江

(江苏永钢集团有限公司技术研发中心, 张家港 215628)

摘要 永钢高压气瓶钢 4147 ($\% : 0.46 \sim 0.50\text{C}, 0.15 \sim 0.35\text{Si}, 0.8 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.008\text{S}, 0.85 \sim 1.10\text{Cr}, 0.15 \sim 0.25\text{Mo}, 0.02 \sim 0.04\text{Al}$) 的冶炼工艺为 110 t EBT 电弧炉-LF-VD- $\Phi 500$ mm 圆坯连铸。通过使用炉料 80% 铁水 + 20% 废钢, 控制 $(\text{Pb} + \text{As} + \text{Sn} + \text{Sb} + \text{Bi}) \leq 150 \times 10^{-6}$, EAF 终点 $[\text{C}] \geq 0.08\%$, 终点 $[\text{P}] \leq 0.006\%$, 并在出钢过程加 1.0 kg/t Al; 以及采用 LF 精炼合成渣 ($\% : 40 \sim 55\text{CaO}, 20 \sim 30\text{Al}_2\text{O}_3, \leq 6\text{MgO}, \leq 4.0\text{SiO}_2, \leq 1.5\text{FeO}$), 成品硫含量 $\leq 0.002\%$, $[\text{T}][\text{O}] \leq 17 \times 10^{-6}$, $[\text{N}] \leq 32 \times 10^{-6}$, $[\text{H}] \leq 0.9 \times 10^{-6}$, $(\text{Pb} + \text{Sn} + \text{Sb} + \text{As} + \text{Bi}) \leq 0.0137\%$; 连铸圆坯中心疏松、缩孔 ≤ 1.5 级, 轧材各类夹杂物均 ≤ 0.5 级, 满足高压气瓶钢质量要求。

关键词 高压气瓶钢 4147 $\Phi 500$ mm 连铸圆坯 110 t EBT EAF-LF-VD-CC 流程 硫含量 气体含量

Production Practice of $\Phi 500$ mm Casting Round Bloom of Steel 4147 for High Pressure Cylinder

Li Shangbing, Zhang Xinwen and Xue Weijiang

(Technology Research and Development Center, Jiangsu Yonggang Group Co Ltd, Zhangjiagang 215628)

Abstract The steelmaking process of steel 4147 for high pressure cylinder ($\% : 0.46 \sim 0.50\text{C}, 0.15 \sim 0.35\text{Si}, 0.8 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.008\text{S}, 0.85 \sim 1.10\text{Cr}, 0.15 \sim 0.25\text{Mo}, 0.02 \sim 0.04\text{Al}$) at Yonggang is 110 t EBT EAF-LF-VD- $\Phi 500$ mm round bloom CC. With using charging 80% hot metal + 20% scrap to control $(\text{Pb} + \text{As} + \text{Sn} + \text{Sb} + \text{Bi}) \leq 150 \times 10^{-6}$, controlling EAF end $[\text{C}] \geq 0.08\%$ and end $[\text{P}] \leq 0.006\%$ and adding 1.0 kg/t Al during tapping; using LF synthetic refining slag ($\% : 40 \sim 55\text{CaO}, 20 \sim 30\text{Al}_2\text{O}_3, \leq 6\text{MgO}, \leq 4.0\text{SiO}_2, \leq 1.5\text{FeO}$), the sulphur content in finished liquid is $\leq 0.002\%$ with $[\text{T}][\text{O}] \leq 17 \times 10^{-6}$, $[\text{N}] \leq 32 \times 10^{-6}$, $[\text{H}] \leq 0.9 \times 10^{-6}$, and $(\text{Pb} + \text{Sn} + \text{Sb} + \text{As} + \text{Bi}) \leq 0.0137\%$; the rating of center porosity and shrinkage pipe of casting round bloom is ≤ 1.5 , and the rating of each inclusion in rolled products is ≤ 0.5 to meet the requirement of quality for high pressure cylinder.

Material Index Steel 4147 for High Pressure Cylinder, $\Phi 500$ mm Casting Round Bloom, 110 t EBT EAF-LF-VD-CC Flow Sheet, Sulphur Content, Gas Content

高压气瓶钢主要用于制造气瓶和蓄能器壳体, 高压气瓶属瓶式高压容器, 工作压力一般在 10 ~ 30 MPa, 充装气体可重复使用。高压气瓶用钢坯执行无缝气瓶用钢坯 GB13447-2008 标准, 主要钢种为优质碳锰钢、锰钒钢、铬钼钢等, 其中铬钼钢已经发展成为高压气瓶用钢主要钢种^[1-7]。

永钢集团公司开发的高压气瓶用钢 4147 连铸圆坯执行 ASTM A519-2006 标准及用户技术协议。下游无缝钢管厂家制造钢管流程为: 管坯加热→热定心→穿孔→热轧(扩)→脱管→延伸→定径→冷却→矫直→无损探伤→人工检验→成品入库。

1 生产工艺

高压气瓶用钢 4147 连铸圆坯生产工艺: 110 t 电弧炉→LF 精炼→VD 精炼→连铸圆坯。主要工艺装备: 超高功率电弧炉采用炉壁碳氧枪, 炉门水冷氧枪供气, 偏心炉底出钢, 冶炼周期 50 min; LF 平均升温速度 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; VD 三级真空泵, 高真空压力 ≤ 67

Pa; 连铸为 17 m 弧半径 4 机 4 流圆坯连铸, 断面 $\Phi 500$ mm, 拉速 0.35 m/min, 中间包采用内装水口, 塞棒自动控制、结晶器和凝固末端电磁搅拌、多点矫直。本次试生产了高压气瓶钢 4147 钢种 4 炉。

1.1 成品化学成分

高压气瓶永钢 4147 化学成分标准、冶炼的成品成分、钢中气体含量以及残余元素控制见表 1、表 2。

ASTM A519-2006 标准及用户技术协议对化学成分要求除主要元素外还包括气体含量、五害元素含量。电弧炉加 80% 高炉铁水以减少五害元素含量, LF 精炼造还原性白渣深脱氧、脱硫, VD 真空精炼, 连铸工艺参数的合理控制, 生产的 4147 钢种成品化学成分满足标准控制要求。

由表 1、表 2 可知, 永钢试生产的高压气瓶钢 4147, 成品气体含量为 $[\text{T}][\text{O}] \leq 17 \times 10^{-6}$ 、 $[\text{N}] \leq 32 \times 10^{-6}$ 、 $[\text{H}] \leq 0.9 \times 10^{-6}$ 。五害元素满足用户标准要求, 五害元素之和 $(\text{Pb} + \text{Sn} + \text{Sb} + \text{As} + \text{Bi})$ 含量平均 0.0115%, 钢中气体含量、五害元素均满足钢种成

表 1 4147 钢标准以及成品成分 / %

Table 1 Chemical composition of standard and finished metal of steel 4147 / %

熔炼号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
15E101986	0.476	0.27	0.94	0.006	0.000 6	0.988	0.200	0.029
15E101985	0.481	0.28	0.94	0.006	0.001 0	0.989	0.196	0.032
15E101984	0.478	0.285	0.96	0.006	0.000 4	1.003	0.198	0.032
15E101983	0.487	0.27	0.94	0.008	0.002 0	0.995	0.196	0.034
标准要求	0.46 ~ 0.50	0.15 ~ 0.35	0.80 ~ 1.00	≤ 0.015	≤ 0.008	0.85 ~ 1.10	0.15 ~ 0.25	0.02 ~ 0.04

表 2 4147 钢气体和残余元素标准以及成品含量 / %

Table 2 Requirement of standard and analysis of residual elements and gas content in steel 4147 / %

熔炼号	N	H	O	Pb	As	Sn	Sb	Bi
15E101986	0.003 2	0.000 08	0.001 3	0.000 6	0.006 0	0.000 5	0.001 0	0.000 5
15E101985	0.003 0	0.000 08	0.001 7	0.000 8	0.007 0	0.001 0	0.001 0	0.000 7
15E101984	0.003 2	0.000 09	0.000 5	0.000 9	0.008 0	0.002 0	0.002 0	0.000 8
15E101983	0.002 3	0.000 07	0.001 2	0.000 7	0.008 0	0.002 0	0.002 0	0.000 8
标准要求	≤ 0.008 0	≤ 0.000 2	≤ 0.003 0	≤ 0.010	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.010	≤ 0.010

分控制要求。

1.2 工序过程质量控制

1.2.1 电弧炉冶炼

为达到电弧炉(1)五害元素的控制;(2)终点保碳出钢;(3)终点低磷和无渣出钢的目标,主要采取的措施有:采用高炉铁水比,控制入炉原料中的五害元素,电弧炉铁水热装 80% 加 20% 废钢的装入模式可将五害元素含量控制在 150×10^{-6} 以内;通过电弧炉冶炼数据分析预报,可将终点出钢 $[C] \geq 0.08\%$ 、 $[P] \leq 0.006\%$ 、温度 $\geq 1620\text{ }^\circ\text{C}$ 命中率在 95% 以上,减少了初始钢水的氧含量;电弧炉采用偏心炉底留钢留渣出钢,可实现无渣出钢。出钢过程采用铝 1 kg/t 脱氧,同时随钢流加入石灰 6 kg/t 和精炼合成渣 2 kg/t,提前造顶渣便于 LF 尽快成渣。其中精炼合成渣化学成分见表 3。

1.2.2 LF 精炼控制

LF 精炼主要采用造高碱度白渣深脱氧、脱硫,利用还原性气氛全程吹氩强搅拌促进钢-渣界面的脱氧、脱硫化学反应,促进夹杂物上浮。精炼过程高碱度、良好流动性的炉渣,其中 LF、VD 精炼过程渣样平均成分见表 4。

钢水进站采用喂铝线深脱氧,根据炉渣情况适量补加石灰或萤石,过程采用复合碳化硅不少于

表 3 LF 精炼合成渣的组成 / %

Table 3 Ingredient of LF synthetic refining slag / %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	FeO	MgO
≤4.0	40.0 ~ 55.0	20.0 ~ 30.0	≤8.0	≤1.5	≤6.0

1.2 kg/t 渣面的扩散脱氧。通过造高碱度、流动性良好的白渣,达到了预期的脱氧、脱硫效果,LF 精炼 4 炉钢的平均脱硫率 65.1%,成品硫平均 0.001 1%,各工序(电弧炉出钢、LF 精炼前后、VD 精炼前后、成品)硫含量变化见图 1。

1.2.3 VD 精炼控制

VD 高真空状态下($\leq 67\text{ Pa}$)保真空时间 $\geq 15\text{ min}$,真空过程全程吹氩气,破空后定氢、取样,喂铝线调整成分,喂硅钙线钙处理,软吹时间 $\geq 20\text{ min}$,通过软吹促进小颗粒夹杂物充分上浮。该工序处理过程主要工艺参数见表 5。

由表 5 可知,该钢种在 VD 工序高真空保持时间在 20 ~ 25 min,最高

表 4 LF 和 VD 精炼过程渣样组分分析 / %

Table 4 Analysis of refining slag in LF and VD refining process / %

工序	CaO	SiO ₂	ΣFeO	Al ₂ O ₃	MnO	MgO
LF	50.66	5.84	0.95	29.52	0.09	8.41
VD	44.48	5.59	0.49	31.33	0.10	8.60

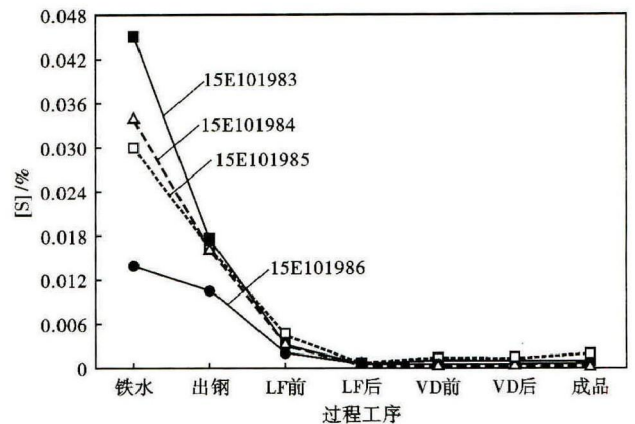


图 1 冶炼各工序硫含量变化趋势

Fig. 1 Change trend of sulphur content in steel in each steel-making procedure

表 5 VD 氢含量以及真空处理参数

Table 5 Hydrogen content in steel and parameters of vacuum treatment in VD process

熔炼号	H / 10^{-6}	抽真空时间 / min	最高真空度 / Pa	保真空时间 / min	软吹时间 / min
15E101986	0.8	33	53	20	27
15E101985	0.8	32	65	21	29
15E101984	0.9	33	49	25	49
15E101983	0.7	32	65	22	68
工艺规定	≤1.0	≥30	≤67	≥15	≥15

真空度为 49 ~ 65 Pa;VD 破空后在线定氢检测钢水中 H 含量平均值为 0.8×10^{-6} , 达到了高压气瓶钢对钢水 H 含量的要求。

1.2.4 连铸控制

连铸全程保护浇铸、恒拉速 (0.35 m/min)、过热度 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 、自动液面 (液面波动 ± 2 mm) 浇注, 减少生产过程非稳态浇注造成的质量波动。连铸过程主要控制: (1) 结晶器、末端电磁搅拌电流分别 150、450 A, 频率 2、6 Hz; (2) 二冷比水量 0.1 L/kg, 一、二、三区采用水冷和气雾冷却, 二冷区自动配水, 水量分配为 45%、40%、15%; (3) 连铸圆坯切割成定尺后全部进缓冷坑, 缓冷时间 ≥ 72 h, 出坑温度 ≤ 200 $^{\circ}\text{C}$ 。保护渣采用中碳钢保护渣成分见表 6。

结晶器的保护渣碱度 0.75 ~ 0.95, 熔点 1 100 ~ 1 160 $^{\circ}\text{C}$, 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 粘度 0.55 ~ 0.75 Pa \cdot s。出坑检验表面未发现目视可见的结疤、气孔、夹渣、凹陷、裂纹等缺陷, 铸坯表面质量良好。

2 实物质量情况

连铸圆坯低倍中心疏松, 中心疏松级别 ≤ 1.5

表 6 结晶器的保护渣组成 / %
Table 6 Ingredient of mold powder / %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	C _固
30 ~ 36	25 ~ 31	4.2 ~ 7.2	≤ 2.00	1.5 ~ 3.5	13 ~ 16

表 7 4147 钢 Φ 500 mm 连铸圆坯低倍组织 / 级

Table 7 Macrostructure of Φ 500 mm casting round bloom of steel 4147 / rating

项目	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下裂纹	皮下气泡
15E101986	1.5	0	0	0	0	0
15E101985	1.5	0.5	0	0	0	0
15E101984	1.5	0	0	0	0	0
15E101983	1.5	0	0	0	0	0
标准要求	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0

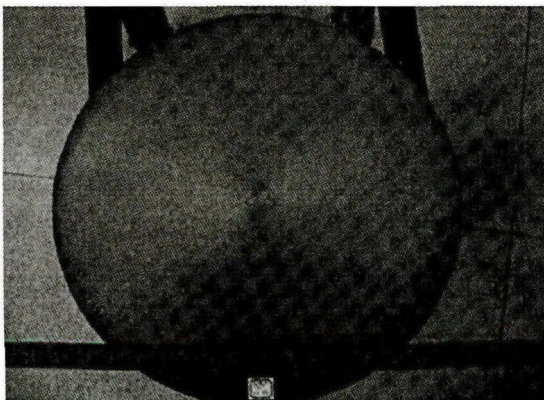


图 2 4147 钢 Φ 500 mm 连铸圆坯低倍形貌

Fig. 2 Morphology of macrostructure of Φ 500 mm casting round bloom of steel 4147

表 8 4147 钢轧管中的非金属夹杂物检测 / 级

Table 8 Examination results of nonmetallic inclusions in steel 4147 rolled tube / rating

项目	A		B		C		D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
15E101202	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0
15E101203	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0
15E101204	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0
标准要求	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 1.5

级, 达到了标准要求, 低倍未发现中心裂纹、中间裂纹、皮下裂纹、皮下气泡等缺陷 (表 7)。典型的低倍形貌见图 2。

连铸圆坯经过轧管后取样分析非金属夹杂物, 按 GB/T10561-2005 (A 法) 要求进行, 夹杂物检测结果见表 8, 评级各类夹杂物均达到标准要求。

3 结论

(1) 110 t 电弧炉 \rightarrow LF \rightarrow VD \rightarrow 连铸圆坯工艺路线生产的高压气瓶钢 4147 钢种, 钢中 T[O] $\leq 17 \times 10^{-6}$ 、N $\leq 32 \times 10^{-6}$ 、H $\leq 0.9 \times 10^{-6}$, 五害元素 (Pb + Sn + Sb + As + Bi) 之和平均含量为 0.011 5%。

(2) LF 工序平均脱硫率 65.1%; 成品硫平均含量 0.001 1%。VD 后 H 平均含量 0.8×10^{-6} 。

(3) 铸坯低倍中心疏松 ≤ 1.5 级, 连铸圆坯表面质量良好。轧后非金属夹杂物 A、B、C、D 各类均 ≤ 0.5 级, 达到高压气瓶钢质量要求。

参考文献

- [1] 罗先登. 高压容器用无缝钢管的生产现状及发展[J]. 钢管, 2004, 33(4): 1-6.
- [2] 郝国旺, 郝国胜. 提高高压气瓶钢质量的工艺改进探索[J]. 机械工程与自动化, 2006(6): 158-162.
- [3] 李红卫, 左 著, 龙云鑫. 高压气瓶钢用圆管坯的质量控制[J]. 炼钢, 2009, 25(3): 22-25.
- [4] 姜桂连, 李京社, 孙开明, 等. 30CrMo 气瓶钢中大型夹杂物的研究[J]. 炼钢, 2009, 25(4): 58-60.
- [5] 陈 容, 吴安术, 赵 骏, 等. 34CrMo4 气瓶钢表面裂纹原因分析[J]. 物理测试, 2013, 31(2): 53-55.
- [6] 杨树峰, 李京社, 张立峰, 等. LF 精炼过程脱氧剂对气瓶钢洁净度的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(7): 36-44.
- [7] 尹谢平, 陆明和, 徐淑芳, 等. 高压气瓶用 34CrMo-H 高强度钢的研究[J]. 压力容器, 2014, 31(10): 1-8.

李尚兵 (1978-), 男, 硕士 (2007 年重庆大学), 工程师, 特殊钢冶炼工艺与产品质量控制等。

E-mail: lishangbing2004@163.com

收稿日期: 2015-08-23