

## -50 °C 低温环境结构用 S355NL $\Phi 406$ mm $\times$ 15 mm 无缝钢管的开发

安健波<sup>1</sup> 王振祥<sup>2</sup> 文玉成<sup>3</sup>

(天津钢管集团股份有限公司 1 制造部; 2 特钢公司; 3 技术中心, 天津 300301)

**摘 要** V-Nb-Ti 微合金化 S355NL 大口径低温结构用无缝管 ( $\% : 0.14 \sim 0.15\text{C}, 0.29 \sim 0.30\text{Si}, 1.35 \sim 1.37\text{Mn}, \leq 0.014\text{P}, \leq 0.005\text{S}, 0.02 \sim 0.03\text{Nb}, 0.06 \sim 0.07\text{V}, 0.010 \sim 0.020\text{Ti}, \text{Ceq} 0.39 \sim 0.41$ ) 的生产流程为 100 t EAF-LF-VD-喂 Ca 线- $\Phi 400$  mm 圆坯连铸-3 辊连轧机组-940 °C 30 min 空冷正火处理。16 炉批统计结果表明, 通过 EAF 出钢加硅锰、硅铝铁合金, LF 采用 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系, 全程吹氩, VD 处理 20 ~ 25 min, 连铸长水口和吹氩等工艺措施, 钢管的实物质量和性能稳定, 组织均匀, 晶粒细小, 各项性能达到或超过了标准和用户的技术要求; 屈服强度  $R_{\text{eH}}$  380 ~ 435 MPa, 抗拉强度  $R_m$  522 ~ 605 MPa, 伸长率  $A$  24% ~ 29%, -50 °C 冲击功 132 ~ 237 J。

**关键词** 100 t EAF-LF-VD-圆坯 CC 流程  $\Phi 406$  mm  $\times$  15 mm S355NL 钢管 -50 °C V-Nb-Ti 微合金化 正火处理

## Development of S355NL $\Phi 406$ mm $\times$ 15 mm Seamless Tube for -50 °C Low-Temperature Environment Structure

An Jianbo<sup>1</sup>, Wang Zhenxiang<sup>2</sup> and Wen Yucheng<sup>3</sup>

(1 Manufacturing Management Department, 2 Special Steel Co, 3 R&D Center, TPCO, Tianjin 300301)

**Abstract** The production flowsheet for V-Nb-Ti microalloying S355NL large size seamless tube for low-temperature structure ( $\% : 0.14 \sim 0.15\text{C}, 0.29 \sim 0.30\text{Si}, 1.35 \sim 1.37\text{Mn}, \leq 0.014\text{P}, \leq 0.005\text{S}, 0.02 \sim 0.03\text{Nb}, 0.06 \sim 0.07\text{V}, 0.010 \sim 0.020\text{Ti}, 0.39 \sim 0.41\text{Ceq}$ ) is 100 t EAF-LF-VD-feeding Ca wire-  $\Phi 400$  mm round bloom casting- 3-roll mill train-normalizing treatment at 940 °C for 30 min, air cooling. The statistic results of 16 heats and batches show that with the process measures including adding silicon-manganese and ferrosilico-aluminium alloy in tapping of EAF, using CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag series and whole process argon blowing in LF refining, VD treating for 20 ~ 25 min, using long nozzle and argon blowing in casting process, the object quality and properties of steel tube are constant with uniform structure and fine grains, and the each property index meets or exceeds the technical requirement of standard and the purchaser, i. e. yield strength  $R_{\text{eH}}$  380 ~ 435 MPa, tensile strength  $R_m$  522 ~ 605 MPA, elongation  $A$  24% ~ 29% and impact energy at -50 °C 132 ~ 237 J.

**Material Index** 100 t EAF-LF-VD-Round Bloom CC Flowsheet,  $\Phi 406$  mm  $\times$  15 mm S355NL Steel Tube, -50 °C, V-Nb-Ti Microalloying, Normalizing Treatment

近几年北欧、俄罗斯等寒冷地区建筑工程、海洋工程和机械结构等低温环境对高强度、高韧性用钢管的需求快速增长, 特别是具有优良焊接性能的高钢级低温用钢管的需求持续升温, 开发低成本低温用结构钢管成为钢铁材料研发的重点<sup>[1-2]</sup>。其中微合金化和组织细化技术已成为开发低成本、低温用高强度结构钢管的重要手段, 达到了节能、环保、降耗、缩短制造周期的良好效果。

按照欧盟标准 EN10210:2006<sup>[3]</sup> 规定, S355NL 牌号要求屈服强度  $R_{\text{eH}} \geq 355$  MPa, -50 °C 夏比冲击功  $\geq 27$  J (用户协议要求 -50 °C 夏比冲击功  $\geq 100$  J), 晶粒度 6 级及以上正火或正火加回火状态交货。如果采用 C-Mn (如 16MnR) 系低合金钢, 轧态可以满足力学性能要求, 由于钢管往往存在贝氏体组织, 不容易达到低温环境强韧性要求, 高温正火后强度性能又会下降, 达不到强度指标的要求。虽然国内

类似钢级的低温环境用无缝钢管允许采用调质处理, 但调质处理后的钢管在焊缝热影响区存在回火区, 可能发生不同程度的回火处理, 回火区钢的性能会显著降低, 从用户的使用和焊接质量考虑应尽量不采用<sup>[4]</sup>。

天津钢管集团股份有限公司 (天津钢管 TPCO) 通过对化学成分微合金化和热处理生产工艺的研发, 成功的开发了满足 EN10210:2006 标准要求  $\Phi 406.40$  mm  $\times$  15.00 mm 规格的正火状态交货的大口径厚壁低温环境用无缝钢管, 经检验各项指标均达到了客户采购标准的要求, 特别是反应韧性指标的冲击功值更是达到了 130 J, 很好地解决了结构用无缝钢管低温强韧性能的要求。

### 1 主要技术要求

#### 1.1 化学成分要求

表1 EN10210 标准, 内控, 实测 S355NL 钢的化学成分/%

Table 1 EN10210 standard requirements, inner control and analysis of chemical composition of steel S355NL /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Nb	V	Ti	N	Ceq <sup>(1)</sup>
标准	≤ 0.18	≤ 0.50	0.90 ~ 1.65	≤ 0.030	≤ 0.025	≤ 0.50	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.35	≥ 0.020	≤ 0.050	≤ 0.12	≤ 0.03	≤ 0.020	-
内控 <sup>(2)</sup>	≤ 0.17	≤ 0.35	1.35 ~ 1.50	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.20	≤ 0.15	≤ 0.08	≤ 0.20	0.020 ~ 0.060	0.02 ~ 0.04	0.06 ~ 0.09	0.008 ~ 0.020	-	-
实测 <sup>(3)</sup>	0.14 ~ 0.15	0.29 ~ 0.30	1.35 ~ 1.37	≤ 0.014	≤ 0.005	≤ 0.03	≤ 0.04	≤ 0.02	≤ 0.06	≤ 0.060	0.02 ~ 0.03	0.06 ~ 0.07	0.010 ~ 0.020	-	0.39 ~ 0.41

注:(1)碳当量  $C_{eq} \leq 0.43$ , 其中  $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ ; (2)内控气体含量及五害元素要求(/%):  $[N] \leq 0.015$ ,  $[H] \leq 0.0005$ ,  $[O] \leq 0.005$ ,  $As \leq 0.020$ ,  $Sn \leq 0.015$ ,  $Pb \leq 0.010$ ,  $Bi \leq 0.010$ ,  $Sb \leq 0.010$ ; (3)实际检测结果(/%):  $[N] \leq 0.0085$ ,  $[H] \leq 0.0003$ ,  $[O] \leq 0.003$ ,  $[As] \leq 0.0095$ ,  $[Sn] \leq 0.0066$ ,  $[Pb] \leq 0.0009$ ,  $[Bi] \leq 0.0010$ ,  $[Sb] \leq 0.0022$ 。

表2 EN10210 标准 S355NL 钢管的力学性能要求

Table 2 EN10210 standard requirements of mechanical properties of steel tube S355NL

抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	上屈服强度 ( $R_{eH}$ )/MPa	断后伸长率 ( $A$ )/%	冲击吸收能量 (-50 °C, $K_{V2}$ )/J
470 ~ 630	≥ 355	≥ 22	≥ 27 (用户协议 ≥ 100)

EN 10210:2006 标准中对于 S355NL 牌号的化学成分的要求见表 1。

## 1.2 力学性能要求

EN 10210:2006 标准中对于 S355NL 牌号的力学性能要求见表 2。

## 1.3 钢管的外径和壁厚要求

EN 10210:2006 标准中对于 S355NL 牌号的直径( $D$ )和壁厚( $S$ )允许偏差分别为  $\pm 1.0\% D$  和  $(-10\% \sim +12.50\%) S$ 。

## 2 研制和生产情况

### 2.1 化学成分设计

为了满足钢管综合力学性能和低温韧性要求,采用了中低碳含量的 C-Mn 系低合金钢为基础,复合加入适量的 V-Nb-Ti 微量合金元素,既提高了钢的强度又改善了钢的韧性,这是因为 V 固溶温度低,可以起沉淀强化作用,而 Nb 在较低的均热温度下大部分不溶解,可以起细化晶粒的作用,Ti 可细晶强化及析出沉淀强化,与 C、N、S 有较强的亲和力,降低硫的有害作用<sup>[5-7]</sup>。

严格控制五害元素含量,虽然其通常含量不高,但会降低钢材的韧性、强度、高温机械性能,甚至还会在钢管或铸坯表面造成裂纹缺陷。当钢中的  $[S]$  大于 0.025% 时,连铸坯产生裂纹的倾向性大为增加,钢中 P 过高,在凝固时会产生严重偏析而导致产品脆裂。研究发现钢中 P、Sn、Sb、As 等杂质元素会使钢的回火脆化敏感性增加,钢中 Si、Mn 含量过高也会对脆化起促进作用<sup>[8]</sup>。

综合以上要求,天津钢管公司通过研究设计了

内控化学成分的要求(表 1)。

## 2.2 炼钢工艺

### 2.2.1 生产工艺流程

为保证最终成品管的性能和表面、内部质量,采用了  $\Phi 400$  mm 连铸圆坯工艺:以铁水 + 优质废钢 + 生铁为原料,100 t EAF 超高功率电弧炉 + EBT 偏心炉底出钢 + LF 精炼 + VD 真空处理 + FW 喂 Ca 线 + CCW 五流弧形圆坯连铸。

### 2.2.2 电弧炉工艺

冶炼过程采用综合喷吹技术,通过炉门和炉壁的碳氧枪沿炉壁周向优化的吹氧和喷碳,达到均衡熔化,均匀反应和造良好泡沫渣的目的。采用热装铁水,控制钢水的配碳量,避免钢水过氧化和及时稀释五害元素。终点成分控制: $[C] 0.04\% \sim 0.07\%$ 、 $[P] \leq 0.010\%$ 。出钢采用 EBT 偏心炉底无渣出钢,防止氧化渣卷入钢液,改善钢液纯净度;采用留钢渣操作,炉内留钢液 20 t 左右。控制出钢温度  $1630 \sim 1690$  °C,出钢时间  $\leq 3$  min,出钢量达到 25 ~ 35 t 时,先弱后强的顺序加脱氧剂和合金,使用复合脱氧剂硅锰合金、硅铝铁合金,脱氧产物熔点低,易于聚集生成大颗粒夹杂而浮出钢液表面。

### 2.2.3 LF 精炼工艺

精炼炉(LF)完成对钢液进行精炼处理,完成脱硫、脱氧、去夹杂等任务,对提高钢水质量方面起着重要的作用。钢水就位后加入造渣材料(石灰、脱硫剂等),尽快造白渣,利用白渣和 LF 内的还原性气氛,以达到对钢水进行更好的脱氧、脱硫的目的。

精炼过程全程吹氩,加入造渣剂,微调铁合金和喂铝丝,调好成分后,氩气流量控制在 50 ~ 100 L/min,软吹效果不允许使钢水裸露。精炼结束温度控制在  $1613 \sim 1633$  °C。根据钢种特点及 S 含量的要求,本次采用 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系,经取样分析典型成分如表 3 所示。

### 2.2.4 VD 处理



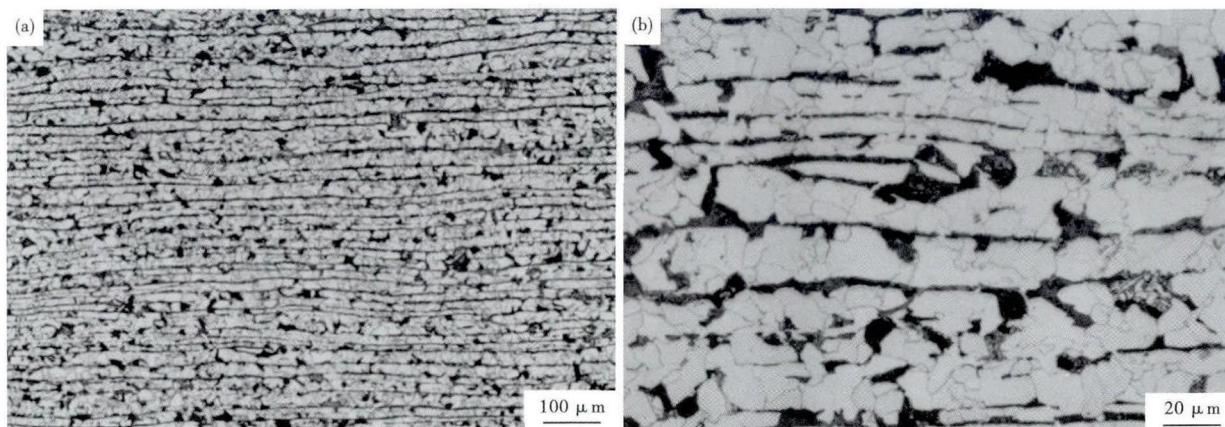
图1 S355NL 钢管的金相组织形貌:(a)  $\times$ 100;(b)  $\times$ 500Fig.1 Morphology of microstructure of S355NL steel tube: (a)  $\times$ 100; (b)  $\times$ 500

表6 天津钢管 S355NL 钢管的力学性能检验结果

Table 6 Examination results of mechanical properties of S355NL steel tube at TPCO

项目	抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	下屈服强度 ( $R_{eH}$ )/MPa	断后伸长率 ( $A$ )/%	冲击吸收能量 (-50 °C, $K_{V2}$ )/J
检验结果	522 ~ 605	380 ~ 435	24 ~ 29	132 ~ 237
EN10201 规定值	470 ~ 630	$\geq$ 355	$\geq$ 22	$\geq$ 27 (用户协议 $\geq$ 100)

韧性要求目的。检测结果见表6。

### 3.4 晶粒度及显微组织

检测16个批次钢管的晶粒度为8~8.5级,超过了EN10201:2006规定的6级要求,钢管的金相组织如图1所示,可以看出组织为带状铁素体+珠光体(F+P),细小的碳化物在铁素体上弥散分布(图1a),起到了强化铁素体基体作用,同时珠光体中渗碳体的细化提高了材料的韧性(图1b),从冲击试验的结果来看,效果是比较明显的<sup>[10-11]</sup>。

### 参考文献

- [1] 翁宇庆,杨才福,尚成嘉.低合金钢在中国的发展现状与趋势[J].钢铁,2011,46(11):1-9.
- [2] 张晓刚.近年来低合金高强度钢的进展[J].钢铁,2011,46(9):1-10.
- [3] EN10210-1:2006 Hot Finished Structural Hollow Section of Non-Alloy and Fine Grain Steels-Part 1: Technical Delivery Condition [S]. 2006.
- [4] 张文钺.焊接冶金学基本原理[M].北京:机械工业出版社,2003:185-190.
- [5] 蒋蓉.含V,Nb,Ti微合金钢的微观结构及力学性能[J].武汉理工大学学报,2009,31(9):3-15,24.
- [6] 李新生,王能为.钢的微合金化强化机理浅析[J].冶金丛刊,2007(6):41-44.
- [7] 齐俊杰,黄运华,张跃.微合金化钢[M].北京:冶金出版社,2006.
- [8] 任浩.微合金化高纯净钢及其性能[J].山东冶金,2000,22(5):40-43.
- [9] 汪洪峰,姜加和,江中块.包晶连铸板坯表面质量的控制[J].冶金丛刊,2004(2):1-2,5.
- [10] 侯志国,刘希琴,刘子利.正火处理对新型低温钢组织和力学性能的影响[J].钢管,2015,44(2):11-17.
- [11] 田青超,刘子利.执行欧洲标准S460NL高韧性结构管的开发[J].钢管,2016,45(2):15-18.

### 4 结论

(1)天津钢管公司开发的S355NL牌号的 $\Phi$ 406.40 mm  $\times$  15.00 mm大口径低温环境用结构管通过钢的微合金化及优化工艺过程控制保证了钢管性能的稳定,各项性能指标均达到了标准要求。

(2)S355NL牌号钢管的组织为带状铁素体+珠光体(F+P),细小的碳化物在铁素体上弥散分布,起到了强化铁素体基体作用,同时珠光体中渗碳体的细化提高了材料的韧性,从低温冲击试验的结果来看,效果是比较明显的。

(3)研究过程中解决了材料的化学成分的微合金化、高精度轧制、热处理工艺等关键技术问题,通过对上述生产检验数据的分析可以看出,韧性指标尚有潜力。同时为其他规格的低温环境结构用无缝钢管的开发提供了科学依据。

安健波(1966-),男,高级工程师,1988年太原科技大学(太原重型机械学院)本科毕业,钢管生产工艺、新产品开发和标准化研究。E-mail:anjb@tpco.cn

收稿日期:2016-10-05