

## 核电站用 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 14.2 \text{ mm}$ 15NiCuMoNb5-6-4 无缝钢管的组织性能

谷力功 王国亮 肖功业

(天津钢管集团股份有限公司,天津 300301)

**摘要** 15NiCuMoNb5-6-4 钢(%:0.14C、1.14Ni、0.62Cu、0.32Mo、0.020Nb)用 100 t EAF + LF + VD- 铸锭工艺冶炼,锻成  $\Phi 350 \text{ mm}$  管坯,然后用  $\Phi 460 \text{ mm}$  PQF 轧机轧成  $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 14.2 \text{ mm}$  的钢管。该钢管的冶金质量、力学性能、脆性转变温度、高温持久强度等均符合标准要求。

**关键词** 15NiCuMoNb5-6-4 钢 核电站用钢管 产品开发 性能

## Structure and Properties of $323.9 \text{ mm} \times 14.2 \text{ mm}$ 15NiCuMoNb5-6-4 Steel Seamless Tube for Nuclear Power Station

Gu Ligong, Wang Guoliang and Xiao Gongye

(Tianjin Pipe Group Co Ltd, Tianjin 300301)

**Abstract** The 15NiCuMoNb5-6-4 steel (%: 0.14C, 1.14Ni, 0.62Cu, 0.32Mo, 0.020Nb) is melted by 100 t EAF + LF + VD- Ingot casting process, forged to  $\Phi 350 \text{ mm}$  tube blank and hot-rolled to  $323.9 \text{ mm} \times 14.2 \text{ mm}$  steel tube by  $\Phi 460 \text{ mm}$  PQF steel mill. The metallurgical quality, mechanical properties, brittle transformation temperature and stress-fracture strength of the steel tube at high temperature and so on all meet the requirement of standard.

**Material Index** 15CrNiCuMoNb5-6-4 Steel, Steel Tube for Nuclear Power Station, Product Development, Properties

15NiCuMoNb5-6-4 (WB36) 钢主要用于核电机组和高参数火电机组的给水管道、启动汽水分离器、水冷管集箱等中温、高压部件。该钢屈服极限比 20G(控铬)钢高 40% 以上,使用温度  $465 \text{ }^\circ\text{C}$ ,是目前核机组和高参数发电机组的首选材料。

### 1 产品研制

#### 1.1 产品的特点

15NiCuMoNb5-6-4 钢的特点是高强度,屈服极限比较高,作为锅炉水冷壁集箱、蒸发器对流管等部位用管,使用温度  $465 \text{ }^\circ\text{C}$ ;使用压力  $31.2 \text{ MPa}$ 。也适用于管壁温度为  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  的高应力管道。

#### 1.2 冶炼工艺

15NiCuMoNb5-6-4 钢用 100 t EAF + LF + VD + 模铸工艺冶炼,电弧炉炉料为优质废钢(包括 DRI) + 铁水。要严格控制出钢时 C、P 的含量;精炼工艺要保证足够真空度和脱气时间,合理的吹氩、喂丝工艺,充分降低钢中气体含量。

模铸后红送钢锭至快锻加热炉。锻造圆管坯规格为  $\Phi 350 \text{ mm}$ ,长度 3 m,保证锻造圆坯质量,管坯低倍应符合 YB5137-2007 标准要求,中心疏松 1 级,中部裂纹、缩孔、皮下气泡等均为 0 级。

#### 1.3 轧管工艺

采用  $\Phi 460 \text{ mm}$  PQF 轧机组对 15NiCuMoNb5-6-4 钢进行轧制,选用直径  $\Phi 350 \text{ mm}$  锻造管坯,生产钢管规格为  $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 14.2 \text{ mm}$ ,轧管主要生产工艺流程为:管坯加热→穿孔→PQF 连轧→定径→漏磁探伤→称重、测长→入库。

$\Phi 460 \text{ mm}$  PQF 轧管机组具有先进的连轧工艺参数设定及在线工艺数据跟踪系统(PSS);连轧自动辊缝控制系统(HCCS);物料跟踪系统(MTS);在线检测系统等工艺控制技术。

在线检测质量保证系统能完成管坯称重,环形炉出口测温,穿孔后测径测长,芯棒润滑前测温;连轧入口测温,连轧后测壁厚、测长度、测温度;微张力定径前测温度,定径后测长度、测温度等。最后经在线漏磁探伤检验合格后入库。确保轧后钢管内外表面没有裂纹、结疤、折叠、凹坑、直道、划痕等不允许存在的缺陷,钢管低倍检验项目均合格,并符合 EN10216-2<sup>[1]</sup>对钢管表面质量的要求。

#### 1.4 热处理工艺

轧制后的钢管经探伤检查合格后进行正火 + 回火的热处理。热处理在保护气氛辊底式连续热处理炉中进行,具体工艺参照 EN10216-2 中的相关规定并根据天津钢管公司的实际工艺装备情况而制

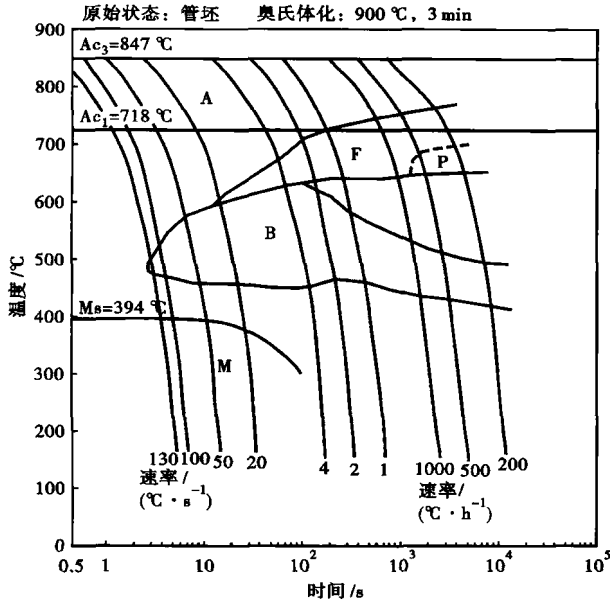


图 1 15NiCuMoNb5-6-4 钢过冷奥氏体转变曲线(表 1 化学成分)

Fig. 1 Transformation curves of overcooling austenite of 15NiCuMoNb5-6-4 steel (analysis at table 1)

定,所测定的该钢过冷奥氏体转变曲线见图 1。

热处理后的钢管矫直后,按 GB/T5777-2008 的规定在线逐支对钢管进行超声波探伤,探伤级别按 C5 级执行,使用同材质、规格样管校验探伤设备,保证在线检测准确。

超声波探伤合格后进行水压试验,按 GB/T241-2007 的规定在线逐支对钢管进行水压试验,试验压力为 20 MPa,稳压时间 ≥ 10 s,钢管不能出现漏水或出汗现象。

### 2 产品性能检验结果

#### 2.1 钢管的晶粒度、夹杂物、金相组织评级

从表 2 和图 2 可以看出,钢的非金属夹杂含量低,纯净度好,组织均匀,晶粒细小,组织为 P + F + B。

#### 2.2 拉伸检验

从表 3 可以看出,该批 15NiCuMoNb5-6-4 钢的室温拉伸性能、硬度、冲击功等检验完全符合 EN10216-2 标准要求,并且性能波动较小,硬度分布均匀,显示出良好的均匀性。短时高拉性能完全符合 EN10216-2 标准要求。

表 1 15NiCuMoNb5-6-4 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 15NiCuMoNb5-6-4 steel / %

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	N	Alt
熔炼	0.14	0.41	0.93	0.007	0.002	0.25	1.14	0.60	0.32	0.019	0.007 4	0.011
成品	0.14	0.43	0.96	0.005	0.003	0.26	1.14	0.62	0.32	0.020	0.007 8	0.011
EN10216-2 标准要求	≤ 0.17	0.25 ~ 0.50	0.80 ~ 1.20	≤ 0.025	≤ 0.020	≤ 0.30	1.00 ~ 1.30	0.50 ~ 0.80	0.25 ~ 0.50	0.015 ~ 0.045	≤ 0.020	≤ 0.050

注:成品有害元素含量/%; ≤ 0.001 0Pb, 0.008 4Sn, 0.007 6As, 0.001 2Sb, 0.001 0Bi, 0.002 60, 0.000 07H。

表 2 15NiCuMoNb5-6-4 钢管的晶粒度和夹杂物级别及组织

Table 2 Structure, rating of inclusions and grain size of 15NiCuMoNb5-6-4 steel tube

试样号	夹杂物/级								组织	晶粒度/级	
	A		B		C		D				DS
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗			
1#	1.0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	B+F	8.0
2#	1.0	0	1.0	0	0	0	1.0	0	0	B+F	8.0
GB5310-08 标准要求	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	B+F	4 ~ 10

#### 2.3 硬度、冲击韧性和压扁、弯曲试验

从表 3 可以看出,所有测量值均满足技术协议的要求,并且硬度差别很小,硬度均匀性好,其夏比冲击性能完全符合 EN10216-2 标准要求,并且性能波动较小,显示出良好的均匀性。内弯和外弯,弯曲试验结果均合格。

#### 2.4 脆性转变温度试验

对系列冲击值和断面剪切比进行分析,得出脆

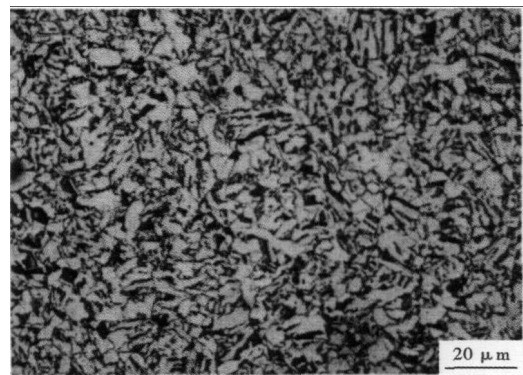


图 2 15NiCuMoNb5-6-4 钢管成品的组织形貌, P + F + B, × 400

Fig. 2 Morphology of structure of 15NiCuMoNb5-6-4 steel tube product, P + F + B, × 400

性转变温度 FATT50 为 -45 °C, 转变温度曲线见图 3。

#### 2.5 钢管高温持久强度试验

表 3 15NiCuMoNb5-6-4 钢管的力学性能  
Table 3 Mechanical properties of 15NiCuMoNb5-6-4 steel tube

项目	室温					200 °C			300 °C			400 °C		
	$R_{p0.2}$ / MPa	$R_m$ / MPa	$A$ / %	HB	冲击 功/J	$R_{p0.2}$ / MPa	$R_m$ / MPa	$A$ / %	$R_{p0.2}$ / MPa	$R_m$ / MPa	$A$ / %	$R_{p0.2}$ / MPa	$R_m$ / MPa	$A$ / %
检验值	510 ~ 515	630 ~ 645	20.5 ~ 22.5	190 ~ 191	212 ~ 215	467 ~ 476	575 ~ 576	68.5	441 ~ 442	587 ~ 591	62.5	405 ~ 434	571 ~ 576	67.0
EN10216-2 标准值	≥440	610 ~ 780	≥19	≤252	≥40	≥402	-	-	≥382	-	-	≥343	-	-

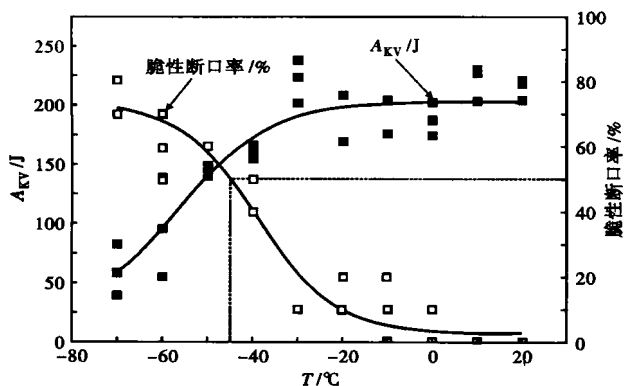


图 3 15NiCuMoNb5-6-4 钢管脆性转变温度曲线  
Fig. 3 Brittle transformation temperature curves of 15NiCuMoNb5-6-4 steel tube

按核电站要求,此次生产的 15NiCuMoNb5-6-4 无缝钢管产品,在 460 °C, 300 MPa 下,外推 10<sup>5</sup> h 的持久强度达到了 335 MPa;在 480 °C, 300 MPa 下,外推 10<sup>5</sup> h 的持久强度达到了 252.5 MPa;都满足 EN10216-2; GB5310-2008<sup>[2]</sup> 标准推荐值要求,持久强度外推曲线见图 4。

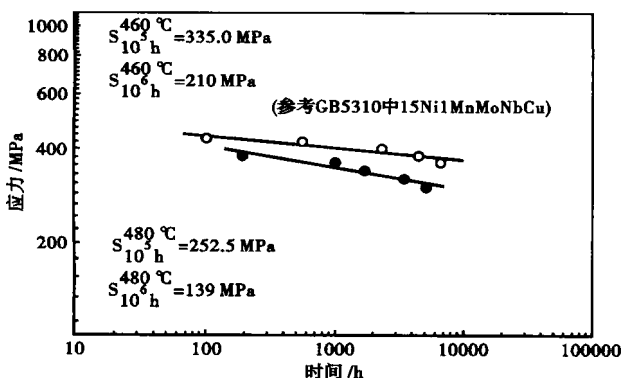


图 4 15NiCuMoNb5-6-4 钢管的持久强度曲线  
Fig. 4 Peridure strength curves of 15NiCuMoNb5-6-4 steel tube

### 3 结果分析

从钢管的常规检验和高温瞬时力学性能等结果分析,满足核电站对钢管的技术要求;同时钢水纯净

度高,五害元素和 P、S 含量非常低,这说明整体生产工艺流程设计可行,冶炼工艺、轧管工艺、热处理工艺设计合理。

15NiCuMoNb5-6-4 无缝钢管按照核电站采购标准进行了化学成分、有害元素及气体含量、锻坯低倍、钢管低倍、钢管几何尺寸、超声波探伤和水压试验、晶粒度、夹杂物、金相组织、室温拉伸性能、瞬时高温拉伸性能、硬度检验、压扁试验、弯曲试验、常温冲击检验、系列温度冲击试验、脆性转变温度试验等项目进行了测定和检验,各项性能指标均满足相关标准的技术要求,并且冷热加工性能、焊接性能良好。

以上检测和试验项目均为第三方结果,同时委托第三方对管材进行了 10<sup>5</sup> h 持久强度试验,也完全满足相关标准的(推荐值)要求。

### 4 结论

(1)从检测和试验项目结果分析,该产品试验和检测项目全面,所有检测、试验项目均满足或严于相关标准技术要求(或推荐值)。如:钢中有害元素含量低,钢质纯净度高;化学成分波动范围小,性能稳定;几何尺寸精度高,表面质量好;金相组织和晶粒度理想;常规力学性能和高温性能等结果也理想。

(2)材料主要用在核电(火电站)使用,经过相关部门的专家评审认为,从各项检测和试验项目的结果看,此管材完全可以在核电(火电站)上使用。

(3)评审后已批量生产几种规格,生产顺利,检验全部合格。在核电站和火电站使用以来没出现任何异议,用户反应良好。

### 参考文献

- 1 Seamless Steel Tubes for Pressure Purposes Technical Conditions. Part 2 BS EN10216-2;2002
- 2 高压锅炉用无缝钢管. GB5310-2008

谷力功(1958-),男,高级工程师,产品开发和技术管理。

收稿日期:2010-02-23