

太钢超超临界电站锅炉用 TP310HCbN 无缝管的研制

方旭东^{1,2}, 韩培德¹

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030003; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 山西 太原 030003)

摘要: 针对超超临界火电机组关键不锈钢材料的使用环境特点, 阐述了太钢耐热钢 TP310HCbN 的设计原理、强化机制、生产工艺流程及主要工艺技术措施。采用 TEM、EDS 等分析测试方法, 对组织、焊缝、析出物进行了细致研究, 同时对常规力学性能、高温拉伸性能、持久性能等进行了测试。开发的 TP310HCbN 耐热无缝钢管组织均匀、综合性能良好, 产品已进入批量生产阶段。

关键词: 超超临界; 火电机组; 耐热; 无缝钢管

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2013)07-0058-07

Development of TP310HCbN Seamless Pipe of TISCO for Ultra-Supercritical Power Plant Boiler

FANG Xu-dong^{1,2}, HAN Pei-de¹

(1. Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030003, Shanxi, China; 2. Technology Center, Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China)

Abstract: According to the characteristics of the environment for the use of ultra-supercritical thermal power units key stainless steel, the principle of the TISCO heat-resistant steel TP310HCbN design, strengthening mechanisms, technical measures and the production process was set forth. The microstructure, weld and precipitates were re-researched by using TEM and EDS analysis test, and the conventional mechanical properties, high-temperature tensile properties and creep and rupture mechanical were investigated. The development of TP310HCbN heat-resistant seamless steel pipe has uniform organization and comprehensive performance, and the products has entered the stage of mass production.

Key words: ultra-supercritical; thermal power unit; heat-resistant; seamless pipe

在超超临界火电机组的主要受压部件中, 过热器和再热器工作温度最高 ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), 承受压力最大 (25~31 MPa), 面临着高温水蒸汽氧化、煤燃烧时生成熔融 Na-K-Fe 三元硫酸盐带给的高温烟气腐蚀, 以及由于机组的启停、变载荷、煤质波动而产生的热应力的波动^[1]。因此, 恶劣的工作环境要求制备过热器、再热器等高温段的材料具有: 1) 良好的组织稳定性; 2) 良好的高温性能, 即优异的抗高温蠕变性能、高的持久强度及良好的抗高温蒸汽腐蚀性; 3) 良好的抗晶间腐蚀性能; 4) 良好的焊接性能和成型性能等^[2]。

本文阐述了太钢研制的 TP310HCbN 耐热无缝钢管的生产工艺流程、主要设备参数, 以及生产过程中采取的主要工艺措施。同时, 介绍了以优质废钢做为原料, 采用“电炉+AOD精炼”两步法生产的 TP310HCbN 耐热无缝钢管的冶金质量、性能特点及

其应用情况。

1 生产工艺流程

太钢生产 TP310HCbN 耐热无缝钢管的工艺流程为: 原料→90 t 电炉→45 t AOD 精炼→45 t LF 炉深处理→模注→1800 t 径锻成管坯→管坯加热→6000 t 热挤压→冷轧→中间热处理→冷轧→成品热处理→矫直→酸洗→检验→入库→包装。

2 研制结果

2.1 冶金质量

2.1.1 化学成分控制范围及实物水平

化学成分控制范围及实物水平见表 1、表 2。检验结果表明: 太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管化学成分均符合 GB5310 和 ASME SA-213M 及相关锅炉厂采购规范的要求; 化学成分控制稳定, 尤其在

基金项目: 山西省基础研究资助项目 (2008012008-1)

作者简介: 方旭东 (1975—), 男, 硕士生, 高级工程师; E-mail: fangxd@tisco.com.cn; 收稿日期: 2012-09-18

表 1 太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管化学成分(质量分数)控制范围及实物控制水平

Table 1 Chemical composition and control level for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
标准要求	0.04~0.1	≤0.75	≤2.00	≤0.030	≤0.03	17.0~23	24~26	0.2~0.6	0.15~0.35
太钢成分最大值	0.073	0.58	1.35	0.023	0.003	19.78	25.13	0.49	0.27
太钢成分最小值	0.047	0.31	0.96	0.021	0.001	19.12	24.48	0.30	0.23
太钢成分众数	0.054	0.38	1.15	0.021	0.001	19.41	24.90	0.36	0.23

表 2 太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管有害元素及残余元素(质量分数)分析

Table 2 Compositions harmful element and residual elements for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

太钢无缝管规格/mm	有害元素/%					残余元素/%	
	Pb	Sn	As	Sb	Bi	V	Ti
φ57×8	<0.0010	0.0020	<0.0010	<0.0010	<0.0010		
φ60×5	0.0020	0.0020	<0.0010	<0.0010	<0.0010		
φ57×8	0.0020	0.0010	0.0040	0.0020	0.0010	0.03	0.02
φ44.5×8.5	0.0030	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010		
φ60×5	0.0018	0.0036	0.0025	0.0091	0.0023		

C、Cr、Ni、N、Nb 等主要元素方面具有控制波动范围窄,有害元素含量低的特点。

2.1.2 夹杂物分析

按照 GB/T 10561 标准,对太钢 TP310HCbN

耐热无缝钢管的夹杂物进行检查,检测结果见表 3。

检验结果表明:太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管中非金属夹杂物满足 GB5310 和 ASME SA-213M

表 3 太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管检测结果

Table 3 Measured inclusion for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

数据来源		A		B		C		D		DS
		硫化物类		氧化物类		硅酸盐类		环状氧化物		单颗粒
		细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	球状类
上海	φ57 mm×8 mm	0	0	1.5	0	0	0.5	1.5	0.5	0
成套院	φ60 mm×5 mm	0	0	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0
哈锅	φ57 mm	0	0	1.5	0	0	0	1.0	0	0
	φ44.5 mm×8.5 mm	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0
东锅	φ60 mm×5 mm	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0
GB5310		≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5

A、B、C、D 各类夹杂物细系级别总数小于等于 6.5, A、B、C、D 各类夹杂物粗系级别总数小于等于 6.5

及哈锅及东锅采购规范的要求。该 TP310HCbN 耐热无缝钢管钢质非常纯净。

2.2 微观组织及晶粒度

按照 GB/T 13298 和 GB/T 6394 标准,对太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管纵截面进行了金相检验,试制样管的组织均为奥氏体,晶粒度控制在 5~6 级别,均满足 GB5310 和 ASME SA-213M 及相关锅炉厂采购规范的要求(图 1)。

2.3 关键性能指标

2.3.1 常规力学性能及硬度

按照 GB/T 228 和 GB 231.1 标准,对太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管进行了常温力学性能及

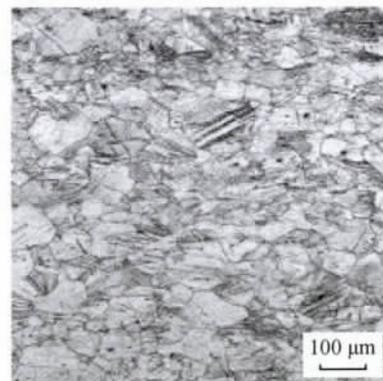


图 1 太钢 φ57 mm×8 mm TP310HCbN 耐热无缝钢管晶粒度
Fig. 1 Crystal grain size for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

硬度检测,检测结果见表 4。检测结果表明,太钢 TP310HCbN 无缝管常温力学性能满足 GB 5310、

ASTM A213/A213M 相关锅炉厂采购规范的标准要求。

表 4 太钢 TP310HCbN 耐热无缝钢管常温力学性能及硬度检测结果

Table 3 Mechanical behavior under room temperature and hardness tested for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

数据来源	$R_{p0.2}/MPa$	R_m/MPa	A/%	硬度
上海 $\phi 57\text{ mm}\times 8\text{ mm}$	380/370	745/750	45.5/45.5	172/172/174HBW
成套院 $\phi 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$	415/420	810/805	44.0/45.5	177/175/177HBW
上海 $\phi 57\text{ mm}\times 8\text{ mm}$	440/425	745/750	54/52	95/96HRB
哈锅 $\phi 44.5\text{ mm}\times 8.5\text{ mm}$	510/515	770/780	44.5/44.0	204HBW
东锅 $\phi 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$	515/505	810/810	47.0/39.0	187/187/180HBW
ASTM A213/A213M	≥ 295	≥ 655	≥ 30	$\leq 100\text{ HRB}, 256\text{ HBW}$
GB5310	≥ 295	≥ 655	≥ 30	$\leq 100\text{ HRB}, 256\text{ HBW}$

2.3.2 高温拉伸性能

按照 GB4338 标准要求,对太钢 TP310HCbN 无缝管进行了高温拉伸性能测试,试验数据见图 2。试验结果表明,太钢 TP310HCbN 无缝管高温拉伸性能满足 GB5310 及相关锅炉厂采购规范的标准要求。

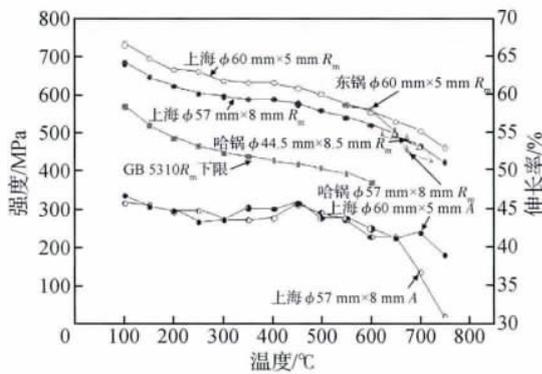


图 2 太钢 TP310HCbN 高温拉伸性能结果

Fig. 2 Tensile property under high temperature for for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

2.3.3 高温持久强度

对太钢的 TP310HCbN 无缝管进行了 700 °C 的高温持久试验,试验数据见表 5。

根据试验数据进行回归处理的持久结果:外推出样管 700 °C、10 万 h 的持久强度为大于等于 166.8 MPa,达到了 GB5310—2008 标准中 TP310HCbN 钢中的 700 °C、10 万 h 持久强度大于等于 62 MPa 的规定。

2.3.4 耐晶间腐蚀性

将太钢 TP310HCbN 无缝管按照 GB/T 4334—2008 或 ASTM A262-02a E 法进行了晶间腐蚀试验(图 3)。试验结果表明:该 TP310HCbN 无缝管耐晶间腐蚀性能满足 GB5310 及相关锅炉厂采购规范的标准要求。

表 5 太钢 TP310HCbN 无缝成品管 700 °C 高温持久试验数据

Table 5 Endurance life test for TP310HCbN seamless pipe of TISCO at 700 °C

试样序号	厚度/mm	宽度/mm	预置应力/MPa	载荷/N	断裂时间/h
501	2.56	5.03	240	3090	101
502	2.62	5.03	220	2899	116
503	2.60	5.04	200	2620	219
504	2.64	5.04	180	2395	490
505	2.64	5.04	160	2128	825
506	2.62	5.03	140	1845	2370
507	2.66	5.04	120	1608	3908
509	2.63	5.03	110	1455	6576
508	2.61	5.04	95	1249	11160

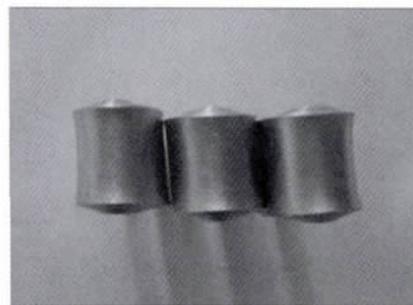


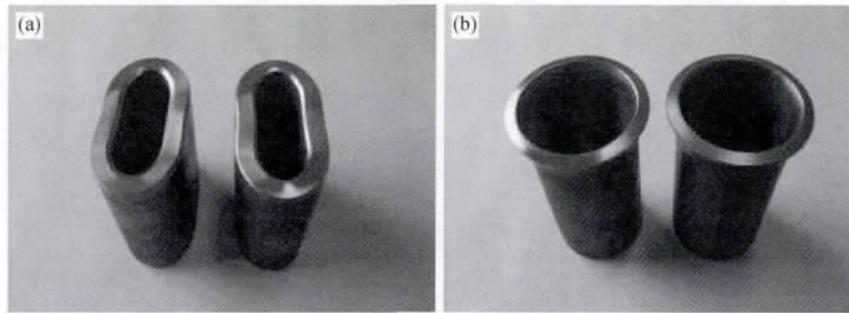
图 3 太钢 TP310HCbN 无缝成品管耐晶间腐蚀性

Fig. 3 Intercrystalline resistant corrosion for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

2.4 工艺性能

2.4.1 扩口和压扁试验

按照 ASME SA—450M 标准,对太钢 TP310HCbN 无缝管进行了扩口及压扁试验,试验结果见如图 4 所示。试验结果表明:该 TP310HCbN 无缝管扩口及压扁性能满足 GB5310 及相关锅炉厂采购规范的标准要求。



(a) 压扁; (b) 扩口。

图 4 太钢 TP310HCbN 无缝成品管扩口及压扁试验情况

Fig. 4 Pipe-expanding and flattening test for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

2.4.2 焊接性能

分别选用太钢 $\phi 57\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 和 $\phi 45\text{ mm} \times 8.5\text{ mm}$ TP310HCbN 无缝管作为焊接样管进行同钢种焊接。焊接方式采用钨极氩弧焊,直流正接,选用德国蒂森伯乐的镍基 THERMANT617 焊丝,焊接接头示意图见图 5,工艺参数见表 6。焊接接头组织见图 6,接头力学性能检测及弯曲试验结果见表 7。试验结果表明:太钢 TP310HCbN 不锈钢的焊接接头的微观组织及拉伸性

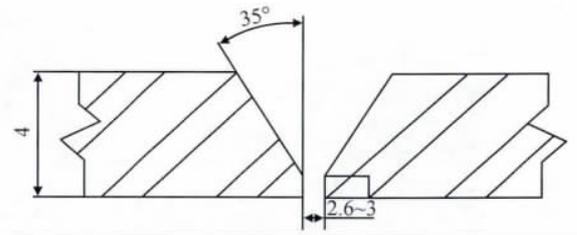


图 5 焊接接头示意图

Fig. 5 Diagrammatic sketch of welding joint

表 6 焊接工艺参数

Table 6 Parameters of welding process

焊接方法	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/ (mm · min ⁻¹)	焊道厚度/mm	氩气流量/ (L · min ⁻¹)	背保氩气/ (L · min ⁻¹)	层间温度/°C
TIG	65~85	10~12	50~70	2.5	8~10	6~8	≤100

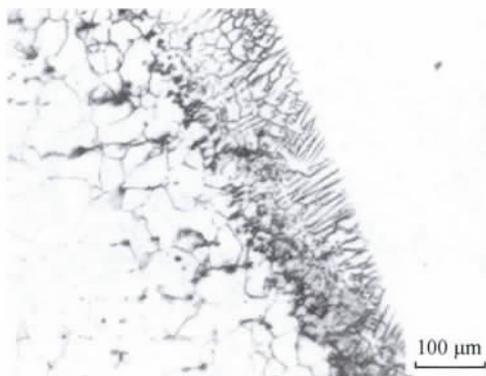


图 6 焊接接头金相组织

Fig. 6 Metallurgical structure of welding joint

能满足 JB 4708-2000 及 GB5310 标准要求。

2.5 表面质量与尺寸精度

太钢 TP310HCbN 无缝管表面为固溶酸洗状态,其表面质量与尺寸精度均满足 GB5310 及相关锅炉厂采购规范的标准要求。

表 7 焊接接头拉伸及弯曲性能检测结果

Table 7 Results of tensile test of welding joint and bending test

规格/mm	拉伸试验		弯曲 (d=3a, 180°)	
	R _m /MPa	断裂位置	面弯	背弯
$\phi 57 \times 8$	685/675	母材上	无裂纹	无裂纹
$\phi 45 \times 8.5$	690/675	母材上	无裂纹	无裂纹

3 分析与讨论

3.1 合金设计与成分控制

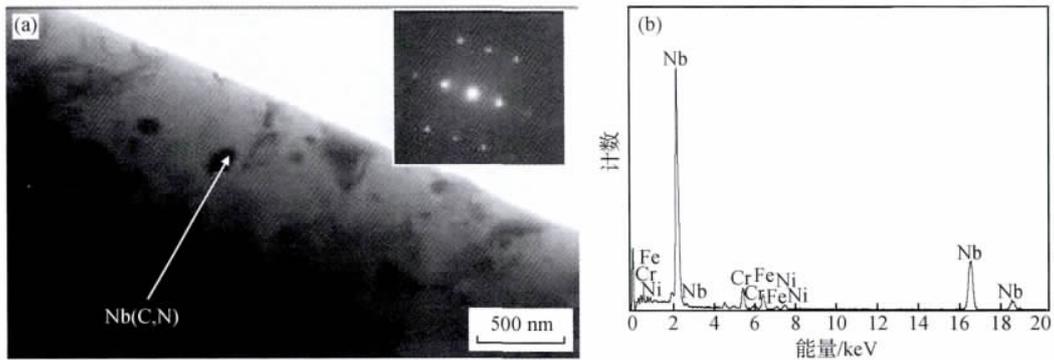
TP310HCbN 是日本住友在 TP310 基础上通过复合添加 Nb、N 合金元素研制出的一种新型耐热钢,与 S30432 相比,更适用于制作超超临界锅炉中的蒸汽条件极其恶劣、抗腐蚀性要求更高的过热器或再热器钢管。与传统 TP310 相比,具有更高的奥氏体组织稳定性、防止和抑制 σ 析出的特点。按照过热器和再热器在实际使用过程中钢管温度通常

高于蒸汽温度的 30~50℃ 考虑,并承受 25.4~30.0MPa 左右的压力,结合电站锅炉自身对安全性、长寿命、长维护周期以及经济性等方面因素影响,对1000 MW 超超临界电站锅炉过热器和再热器用不锈钢管进行了强化机制研究和合金成分设计。

3.1.1 强化机制研究

通过对 TP310HCbN 钢管电镜观察和分析,结果表明:其强化机制主要是依靠稳定奥氏体基体上分布着晶内析出的 NbCrN、Nb(C,N)、M₂₃C₆ 进行强化。与 10Cr18Ni9NbCu3BN (UNS S30432) 相同,当蠕变发生时,析出的纳米级 Nb(C,N)、NbCrN 和 M₂₃C₆ 由于和基体热膨胀的差异,使纳米

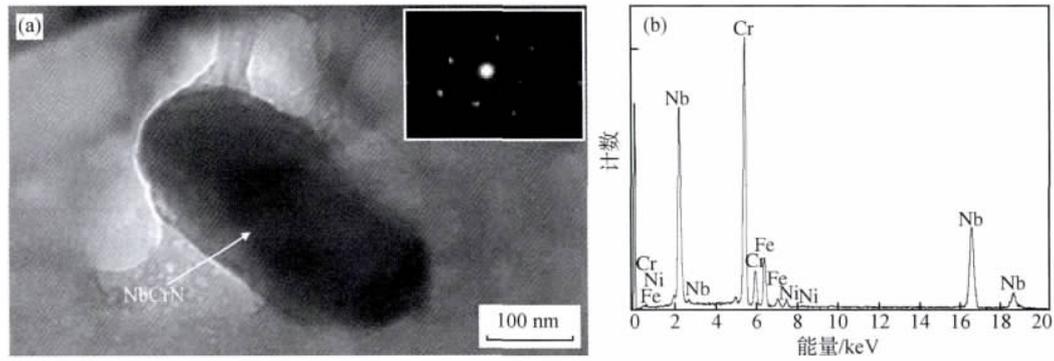
级析出相的周围萌生位错,这些位错又为随后沉淀析出相提供格点钉扎新的位错,以阻止蠕变滑动。因此,材料服役中在晶内、层错、位错、晶界上不断沉淀析出的多种纳米级析出相对材料抗蠕变性能起到了较好的析出强化作用,从而提高了材料的蠕变破断寿命。纳米级析出相数量越多、尺寸越小、稳定性越强,则材料的抗高温蠕变性能越好、高温持久强度也越高^[3-6]。图 7 和图 8 为太钢生产的 TP310HCbN 成品管晶内 Nb(C,N) 和 NbCrN 析出相的明场相、衍射花样和能谱分析。图 9 为太钢生产的 TP310HCbN 材料在 120MPa、700℃ 条件下时效 1239.5 h 后析出的 Cr₂₃C₆ 透射电镜照片。



(a) 明场相和衍射花样; (b) 能谱图。

图 7 太钢 TP310HCbN 成品管晶内 Nb(C,N) 析出相的明场相、衍射花样和能谱分析

Fig. 7 TEM and EDS analysis on precipitated phase of Nb(C,N) for TP310HCbN seamless pipe of TISCO



(a) 明场相和衍射花样; (b) 能谱图。

图 8 太钢 TP310HCbN 成品管晶内 NbCrN 析出相的明场相、衍射花样和能谱分析

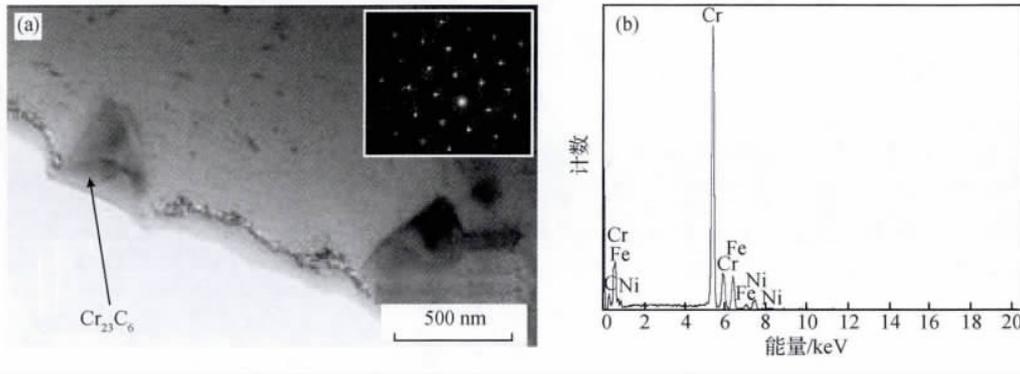
Fig. 8 TEM and EDS analysis on precipitated phase of NbCrN for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

3.1.2 合金成分设计

在上述 TP310HCbN 不锈钢强化机制研究的基础上,围绕如何产生数量多、尺寸小、分布广、稳定性强的纳米级析出物,进行相应的成分设计,以改善高温蠕变性能,提高高温持久强度(图 10)。

综合考虑上述因素初步确定该品种应采用

“低 C、高 N,中上限控 Nb、Cu,合理的 Cr、Ni 含量”的合金化设计体系,结合以往生产经验,最终成分(质量分数,%)控制范围为:C 0.05~0.08, Si≤0.65, Mn≤1.5, P≤0.025, S≤0.002, Cr 24.0~26.0, Ni 19.0~20.0, Nb 0.35~0.55, N 0.20~0.30。



(a) 明场相和衍射花样; (b) 能谱图。

图 9 太钢 TP310HCbN 时效管晶内 Cr₂₃C₆ 析出相的明场相、衍射花样和能谱分析

Fig. 9 TEM and EDS analysis on precipitated phase of Cr₂₃C₆ for TP310HCbN seamless pipe of TISCO

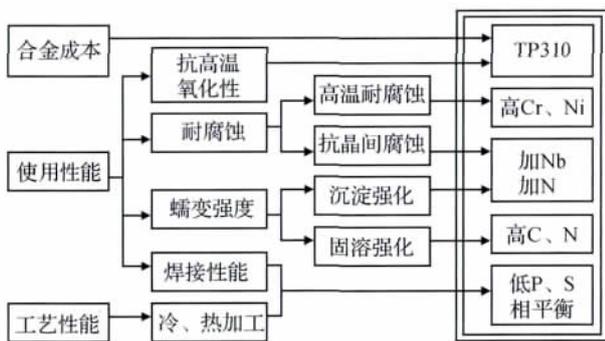


图 10 TP310HCbN 不锈钢合金成分设计思路

Fig. 10 Composition design of alloy element for TP310HCbN of TISCO

3.2 有害元素及残余元素的控制

采用传统的废钢原料,冶炼不锈钢时会导致钢中含有不必要的有害杂质元素(P、S及五害等)在钢中的某些部位的富集而存在,不仅会影响到钢的耐腐蚀性能,更重要的是影响到钢的热加工性能,而选择太钢内部优选的废钢原料,使有害元素(质量分数,%)的控制到了最低限度($P \leq 0.025, S \leq 0.002, Pb, Sn, Sb, As, Bi$ 各小于等于 40×10^{-6} , 总量不大于 150×10^{-6})。

3.3 夹杂物控制

钢中夹杂物的存在不仅危害钢管的使用性能,更恶化钢材的冷、热加工性能,因此要对钢中夹杂物数量、大小以及形貌进行控制。在精炼过程通过采用 Si-Al 复合脱氧,LF 深脱氧、深脱硫技术和钙处理技术,可以对夹杂物变性,使其数量大幅度减少,尺寸控制为小于等于 $5 \mu m$ 以内。

3.4 N 含量的控制

针对太钢 AOD 炉冶炼过程中的供气制度,分

析计算出氮在 AOD 炉中溶解、脱除规律,开发出在 AOD 精炼工艺上对氮含量的精确控制模型。采用该模型,开发了 TP310HCbN 耐热钢 AOD 冶炼高氮钢完全氮气合金化工艺,使 TP310HCbN 成品实测氮范围在 $(2300 \sim 2700) \times 10^{-6}$ 之间,按目标氮范围要求则命中率达 100%,见表 8。

表 8 TP310HCbN 冶炼中 N 质量分数的控制

Table 8 Control level of N during smelting of TP310HCbN

炉数	标准要求 / %	目标范围 / %	实测范围 / %	实际精度
3	0.15~0.35	0.22~0.28	0.23~0.27	±0.02

3.5 热加工温度的控制

为了使铸态粗大的奥氏体组织尽可能发生动态再结晶,防止热加工裂纹的产生,在钢锭径锻开坯过程中,加热制度均热温度限定在 $1220 \sim 1250^\circ C$,保证了直接由熔体大量生成 NbN 和再结晶过程中形成的 Nb(CN) 充分溶解;热挤压时,温度控制在 $1180 \sim 1200^\circ C$,有力地防止了挤压后期材料升温过快,工件进入高温低塑性区而开裂。

3.6 热处理

成品热处理温度在 $1200 \sim 1220^\circ C$ 之间,保温恰当的时间,出炉快冷,以保证成品钢管平行于轧制方向的晶粒度控制在 5~6 级的同时,敏化态的晶间腐蚀合格。

从钢管的冶金质量、组织、常规检验和高温性能、耐腐蚀性能及相关工艺性能检测结果分析,太钢产 TP310HCbN 各项性能指标全部满足满足 GB5310 和 ASME SA-213M 及相关锅炉采购规范的要求,太钢生产 TP310HCbN 锅炉管成分、性能

稳定、工艺成熟。

4 认证及应用情况

太钢开发的 TP310HCbN 耐热不锈钢无缝钢相继通过了哈锅、东锅、上锅、北京巴威的技术评定,上海发电设备成套设计研究院的性能复评,中国机械工业联合会组织的行业新产品成果鉴定及国家锅容标委组织的技术评审,并获得了锅炉法规及国家法定生产资质《锅炉压力容器用材料技术评审证书》,太钢生产 TP310HCbN 奥氏体耐热钢管,满足中国锅炉法规和相关技术标准的要求,可用于超(超)临界锅炉的过热器和再热器等部件,以及类似工况的受压元件。

目前已生产了 400 t 的 TP310HCbN 管坯,应用在哈锅、东锅的江苏吕次港、江西井冈山项目。钢管具备了批量生产阶段。

5 结论

1) 根据超超临界电站锅炉中使用环境的特点,太钢通过合理的成分设计,选择并优化了冶炼工艺、模注工艺、轧制工艺、热处理工艺,开发出了 TP310HCbN 耐热无缝钢管不锈钢无缝钢管,其表面质量、几何尺寸、化学成分、组织、晶粒度、夹

杂物、室温力学性能、高温性能、耐腐蚀性能以及压扁、扩口、焊接等各项指标均满足 GB5310 和 ASME SA—213M 及相关锅炉厂采购规范的要求,实物质量达到国外同类产品水平,具备批量生产条件。

2) 太钢开发的 TP310HCbN 耐热无缝钢管满足了中国锅炉法规和相关技术标准的要求,可用于超(超)临界锅炉的过热器和再热器等部件,以及类似工况的受压元件。

参考文献:

- [1] Koe Nakajima. Recent Trends of Steel Science and Technology for Environmental Strategy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59(3): 221.
- [2] 刘正东,程世长,王起江,等. 中国 600℃ 火电机组锅炉钢进展 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [3] 郭岩,林琳,侯淑芳,等. 国产 TP310HCbN 钢在高温应力下的组织结构[J]. 中国电力,2012, 4(10):42.
- [4] Li P H, Ibraheem A K, Priestner R. Eutectic Precipitation of (TiNbV) (CN) in Cast, Microalloyed low-C Austenite and Effects of Reheating [J]. Materials Science Forum, 1998, 284-286: 517.
- [5] 李太江,刘福广,范长信,等. 超超临界锅炉用新型奥氏体耐热钢 HR3C 的高温时效脆化研究[J]. 热加工工艺,2010,39(14) 43.
- [6] 刘俊建,陈国宏,王家庆. 时效热处理对 HR3C 钢组织结构及力学性能的影响[J]. 合肥工业大学学报,2011,34(1):47.



微信公众号



常州仁成金属制品有限公司

15年专注 **无缝钢管** 定制生产

用心打造每一根钢管,做无缝钢管定制技术的赢领者
研发技术团队11人,为您的个性化需求提供整体解决方案



常州精密钢管博客网

官网: www.rcmetal.cn

官博: www.josen.net



访问我们的官方网站了解更多内容

扫描二维码关注