

· 工艺材料进展 ·

超临界超超临界锅炉管品种的开发现状

邢娜 黄宝 何立波

(鞍钢股份有限公司技术中心, 鞍山 114009)

摘要 本文介绍了超临界、超超临界锅炉管的开发背景和品种发展现状, 其中包括铁素体锅炉管、新型奥氏体不锈钢锅炉管、镍基合金锅炉管、加 W 的 2.25% Cr (T/P23) 钢管、改进型 9% Cr-1% Mo (T/P91) 钢管、加 W 的 9% Cr (T/P92) 钢管、双金属复合管等锅炉用管的主要化学成分、力学性能和耐蚀性能。

关键词 超临界 超超临界 锅炉管 开发现状

Present Status of Development of Supercritical and Ultra-Supercritical Boiler Tubes

Xing Na, Huang Bao and He Libo

(Technology Center, Angang Iron and Steel Co Ltd, Anshan 114009)

Abstract The exploiting background and present stature of grade development for supercritical and ultra-supercritical boiler tubes are introduced in this article including the main chemical composition, mechanical properties and corrosion resistance of ferrite boiler tubes, new austenite stainless steel boiler tubes, nickel base alloy boiler tubes, adding W 2.25% Cr (T/P23) steel tubes, modified 9% Cr-1% Mo (T/P91) steel tubes, adding W 9% Cr (T/P92) steel tubes and bimetallic compound tubes.

Material Index Supercritical, Ultra-Supercritical, Boiler Tubes, Development Status

发电锅炉的效率取决于蒸汽的温度和压力, 人们一直为实现蒸汽的高温高压化进行着不懈的努力。近年来, 对 CO₂ 排放量的限制是促进发电效率提高的又一重要原因^[1]。30 年前 538 ~ 566 °C、19 ~ 24 MPa 蒸汽的亚临界-超临界锅炉是日本发电锅炉的主流型号, 到 20 世纪 90 年代, 596 ~ 610 °C、24 ~ 27 MPa 蒸汽的超超临界锅炉在日本实用化。目前, 超超临界燃煤发电技术室国际上较为成熟和广泛适用的一种清洁燃煤技术。预计在今后的二、三十年, 燃煤电站的蒸汽温度将再提高 50 ~ 100 °C。因此, 目前超超临界机组的发展备受各国重视^[2-4]。

1 超临界、超超临界锅炉管开发背景

火电机组的效率主要取决于蒸汽的压力和温度参数, 参数越高, 效率越高^[5]。火电装置蒸汽参数(温度、压力)和热效率不断提高, 对火电锅炉钢管的要求也越来越高^[6]。高强度、高耐蚀性耐热钢管

的开发在实现超临界、超超临界锅炉蒸汽高温高压化中起了非常重要的作用, 为高参数火电机组的发展提供了保障。因此, 开发和生产超临界、超超临界锅炉管是一项战略和紧迫的任务。

2 超临界、超超临界锅炉管品种发展现状

超临界、超超临界锅炉的主要结构部件是钢管, 所用材料是各种耐热钢, 主要有含 2% Cr 的 T/P22、T/P23 低合金铁素体钢、含 9% Cr 的 T/P91 和 T/P92 高 Cr 铁素体钢、含 12% Cr 的 HCM12 和 HCM12A 高 Cr 铁素体钢、以 TP347H 为代表的奥氏体不锈钢等。欧洲蠕变合作委员会 (ECCC) 建议 T/P91 只能使用在 25 MPa/593 °C 或者 30 MPa/580 °C 以下的蒸汽参数; 金属壁温在 620 °C 以上时, 由于 9% Cr 钢的抗氧化性能有限, 需采用 12% Cr 钢。超临界、超超临界锅炉建造中不同温度的选材品种和承压部件用锅炉管见表 1 和表 2^[7]。

表 1 不同温度超临界、超超临界锅炉构件的选材品种

Table 1 Grade selection for components of supercritical and ultra-supercritical boilers with different service temperature

项目	超临界 620 °C		超超临界 650 °C			
	铁素体型		铁素体型	奥氏体型		双金属复合型
类型	2Cr 系列	9Cr 系列	12Cr 系列	18Cr 系列		20-25Cr 系列
牌号	T/P23、T24	T/P91、T/P92	T/P122	TP304H、TP347H、TP347HFG、SUPER304H	TP310NbN、HR3C	Sanicro28

表 2 超临界、超超临界锅炉承压部件用锅炉管
Table 2 Boiler tubes for pressure parts of supercritical and ultra-supercritical boilers

承压部件	超临界	超超临界
水冷壁	T1、T2、T11	T1、T2、T11、T23/T24
过热器 再热器	T12、T22、T23、T91、 TP304H、TP347H	T12、T22、T23、T91、T92、 TP310HNbN (HR3C)、 S30432(SUPER304H)
主汽	P91	P92/P122/E911
再热冷段	A1672B70CL32	A691Cr1-1/4CL22
再热热段	P91	P91/P92
给水管道	WB36	WB36

2.1 新日铁住金超临界、超超临界锅炉管品种开发现状

2.1.1 铁素体锅炉管

HCM2S (T23) 吸取了中国 R102 钢 (12Cr2MoWVTiB)Mo、W 复合固溶强化和微量元素析出强化的优点。HCM2S(T23)强度是传统锅炉管 T22 的 2 倍,具有高冲击韧性和良好焊接性能,焊接时不需预热,焊后不必进行热处理。它可代替 T22、R102 钢,制造大型电站锅炉的过热器和再热器^[8]。HCM12A(T/P122)的强度与 T/P91 相同,耐蚀性优于 T91。铁素体锅炉管使用标准为 ASTM(美国材料实验协会)A213/A213M-2010。铁素体锅炉管的性能对比见表 3。

2.1.2 新型奥氏体不锈钢锅炉管

奥氏体不锈钢以其较高蠕变强度、良好组织稳定性、优良抗烟气腐蚀和蒸汽氧化性在电站锅炉中得到了大量的应用。新日铁住金开发了 TP347HFG、T/P92、SUPER304H 和 HR3C 等超临界

超超临界锅炉用管。这些锅炉管基本上都是在 T91、TP304H、TP347H 以及 25-20 型奥氏体不锈钢基础上添加 Cu、Nb、N 等强化元素,其综合性能较以前的钢种性能更为优越。新日铁住金奥氏体不锈钢锅炉管的性能对比见表 4^[9]。SUPER304 和 HR3C 的使用标准是 ASTM A213/A213M-2010。

(1) SUPER304H 奥氏体不锈钢锅炉管。SUPER304H 是在 TP304H 的基础上通过降低 Mn 含量上限,加入约 3% Cu、0.45% Nb 和微量 N 开发而成^[10],具有高温强度、高温塑性及抗高温氧化的最佳组合。Cu 元素不仅能够形成共格的偏聚相而起到强化作用,还可降低其冷加工硬化率,改善其塑性成形性能和提高持久强度^[11-13]。该钢在服役时产生弥散沉淀于奥氏体基体内,并产生与其共格的富铜相;该富铜相与 NbC(N)、NbCrN 和 $M_{23}C_6$ 一起产生沉淀强化效果,显著地提高了服役温度下的许用应力,而且使一般不含 Nb 的高铜 18-8 型钢持久塑性降低的温度得到解决。该钢经在超(超)临界锅炉上使用,已取得了减薄钢管壁厚降低锅炉重量并相对降低锅炉制造成本的良好效果,成为超(超)临界锅炉过热器和再热器的首选材料^[14]。

SUPER304H 奥氏体不锈钢锅炉管在高温下的 ASME(美国机械工程师协会)许用拉伸应力和强度均高于 TP304H 和 TP347H,在 18Cr 钢中其强度最高。在锅炉上应用允许减薄壁厚,相对的降低锅炉制造成本。服役 9 年的 SUPER304H 奥氏体不锈钢锅炉管蒸汽氧化层厚度在 60 μm 以下。SUPER304H

表 3 铁素体钢锅炉管的化学成分和性能
Table 3 Chemical composition and properties of ferrite steel boiler tubes

钢种	化学成分 / %	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	蒸汽氧化量 (650 $^{\circ}\text{C} \times 1000 \text{ h}$) / μm	煤灰腐蚀量 (650 $^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ h}$) / (mg $\cdot\text{cm}^{-2}$)
2% Cr 钢	HCM2S (T/P23) 0.06C-2.25Cr-1.6W-0.1Mo-0.05Nb-0.25V-B	≥ 400	≥ 510		
9% Cr ~	T/P91 9Cr-1Mo-Nb-V	≥ 415	≥ 585	90	119
12% Cr 钢	T/P92 9Cr-2W	≥ 440	≥ 620	90	119
	HCM12 12Cr-1Mo-1W-V-Nb	≥ 390	≥ 590	50	85
	HCM12A (T/P122) 11Cr-0.4Mo-2W-Nb-V-Cu	≥ 400	≥ 620	50	85

表 4 奥氏体不锈钢锅炉管的化学成分和性能
Table 4 Chemical composition and properties of austenite stainless steel boiler tubes

牌号	化学成分 / %	许用拉伸应力 / MPa			屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	蒸汽氧化腐蚀厚度 (650 $^{\circ}\text{C} \times 1000 \text{ h}$) / μm	煤灰腐蚀量 (650 $^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ h}$) / (mg $\cdot\text{cm}^{-2}$)
		550 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	650 $^{\circ}\text{C}$				
TP304H	18Cr-8Ni	92	64	42	≥ 205	≥ 515	35	45
TP347H	18Cr-11Ni-0.9Nb	112	91	54	≥ 205	≥ 515	27	28
TP247HFG	18Cr-11Ni-0.9Nb	121	108	66	≥ 205	≥ 550	17	28
SUPER304H	18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N	134	124	76	≥ 235	≥ 590	18	35
HR3C	25Cr-20Ni-0.4Nb-0.2N	128	121	78	≥ 295	≥ 655	< 2.5	12

奥氏体不锈钢锅炉管在温度为 650 ℃ 时的抗蒸汽氧化性优于目前常用的 TP304H 和 TP347H, 相同条件下的蒸汽氧化腐蚀厚度约为 TP304H 的 50% 和 TP347H 的 67%。

(2) HR3C 奥氏体不锈钢锅炉管。HR3C 是在 25-20 型奥氏体不锈钢耐热钢 TP310 基础上开发而成。由于 HR3C 钢具有良好的高温性能及耐腐蚀性能, 现阶段已在日本、美国、英国等国家大量使用^[15]。与 SUPER304H 锅炉管相比, HR3C 具有更优良的抗蒸汽和烟气的氧化性能, 但高温蠕变断裂强度略低于 SUPER304H^[16]。

25% Cr 和 20% Ni 使 TP310 的抗蒸汽和烟气氧化性明显提高, 并有稳定的奥氏体组织。此外, 限制了 C 含量, 并复合添加了 0.20% ~ 0.60% Nb 和 0.15% ~ 0.35% N, 利用析出弥散分布、细小的 Nb-CrN 相和富 Nb 的碳、氮化物以及 $M_{23}C_6$ 来进行强化, 其蠕变断裂强度提高到 181 MPa。NbCrN 相细小、弥散分布, 使得材料具有良好的高温蠕变断裂强度。但是国内有不同观点, 认为 NbCrN 相为在 Cr 质量分数为 9% ~ 12% 钢中所出现的 Z 相^[17-21]。

2.1.3 镍基合金锅炉管

为了适应火电锅炉装置蒸汽参数发展的要求, 满足 700 ℃ 先进超超临界锅炉用管, 新日铁住金开发了高耐蚀 HR11N 和 Super 625 锅炉管用于垃圾焚烧锅炉。表 5 为 HR11N、Super 625 和合金 825、合金 625 的化学成分和性能。与合金 825 相比, HR11N 提高了 Cr 含量, 从而提高了高温耐蚀性; Mo、N 的添加用于提高耐局部腐蚀性。为了提高热稳定性和加工性, Super 625 优化了 Nb 含量。Super

625 的 Fe 含量高于 Alloy 625, 但 3% ~ 20% Fe 含量并不影响含氯环境下的高温耐蚀性。HR11N 锅炉管使用标准为 ASTM B407-2008, Super 625 使用标准为 ASTM B444-2006^[22]。

2.2 JFE 公司超临界、超超临界锅炉管品种开发现状

JFE 着眼于铁素体合金钢管优良的高温强度、耐氧化性、焊接性, 进行了多种钢管的开发和生产, 为了提高火力发电锅炉的效率而进行了蒸汽条件的高温高压化; 为了适应锅炉用钢管的需求, 大力进行了新材料的开发和性能的提高。JFE 公司锅炉管标准为 ASTM/ASME 管线用钢管 (2003) 和 ASTM/ASME 传热用钢管 (2003)^[23]。

(1) 加 W 的 2.25% Cr 钢管 (T/P23 钢管)。从 20 世纪 80 年代开始进行研发, T/P23 钢管性能优良, 因加入了 W 而有更高的高温强度; 因低 C、低 Al、低 N 而具有良好的焊接性和耐 HAZ (焊接热影响区) 裂纹性能。此钢管被用于日本国内外的废热回收锅炉的过热器和再热器, 正在对锅炉容器的轻量化做出贡献。JFE T/P23 的化学成分和力学性能见表 6。

(2) 改进型 9% Cr-1% Mo 钢管 (T/P91) 钢管。从 20 世纪 80 年代后, JFE 按 ASME (美国机械工程师协会) SA213 和 SA335 的规定, 用曼内斯曼机组轧制生产出改进型 9% Cr-1% Mo (T91/P91) 钢管以来, 向世界范围的用户稳定提供产品, 如具有高精度外径与壁厚的超级耐高温钢管, 多用于余热锅炉的长约 22 m 的超长管材, 用于主蒸汽的壁厚 50 mm 的中等直径钢管等。JFE T/P91 的化学成分和力学性能见表 6。

表 5 HR11N、Super 625 和合金 825、合金 625 的化学成分/%

Table 5 Chemical composition and properties of HR11N, Super 625, alloy 825 and 625 / %

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu(或 Nb)	Al	Ti	N(或 Fe)	使用蒸汽温度/℃
HR11N	0.03	0.60	2.00	0.030	0.010	38~42	27~30	0.50~1.50	-	-	-	0.1~0.2N	450
合金 825	0.05	0.50	1.00	0.030	0.030	38~46	19.5~23.5	2.5~3.5	1.5~3.0Cu	0.02	0.6~1.2	-	-
Super 625	0.03	0.50	0.50	0.015	0.003	50	20~23	8~10	0.51~1.00Nb	0.40	-	15.0~20.0Fe	500
合金 625	0.10	0.50	0.50	0.015	0.015	58	20~23	8~10	3.15~4.15Nb	0.40	0.40	5.0	-

表 6 T/P23、T/P91 和 T/P92 管的化学成分和力学性能

Table 6 Chemical composition and mechanical properties of T/P23, T/P91 and T/P92 tubes

牌号	化学成分/%														屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	W	Nb	B	N	Al			
T/P23	0.04~0.10~0.10	0.60	≤0.030	≤0.010	≤0.50	1.9~2.6	0.05~0.30	0.20~0.30	1.45~1.75	0.02~0.08	0.0005~0.006	≤0.030	≤0.030	≤400	≤510	≤20	
T/P91	0.08~0.30~0.12	0.60	0.020	0.010	0.20~0.50	≤0.40	8.00~9.50	0.85~1.05	0.18~0.25	0.06~0.10	-	≤0.030	≤0.040	≤415	≤585	≤20	
T/P92	0.07~0.30~0.13	0.60	0.020	0.010	≤0.50	≤0.40	8.50~9.50	0.30~0.60	0.15~0.25	1.5~2.0	0.04~0.09	0.001~0.006	0.03~0.07	≤0.040	≤440	≤620	≤20

表 7 Sanicro28 钢的化学成分和力学性能
Table 7 Chemical composition and mechanical properties of steel Sanicro 28

化学成分/%									力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	硬度 (HB)
≤0.020	≤0.60	≤2.0	≤0.025	≤0.015	27	31	3.5	1.0	≥220	≥550	≤40	≤90

表 8 内层管材的化学成分 / %
Table 8 Chemical composition of inner tubes / %

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	其它
Sandvik 4L7	0.21	0.30	0.70	≤0.030	≤0.015				
Sandvik HT8	0.10	0.30	0.50	0.020	0.020	2.3		1.0	
Sandvik HT7	0.10	0.40	0.50	0.020	0.010	8.5	0.40	1.0	V、Nb、N

(3) 加 W 的 9% Cr 钢管 (T/P92 钢管)。T/P92 钢管比 T91/P91 钢管具有更优良高温强度和蠕变强度。9% Cr-Nb-N 钢因含有多量的 W, 被用于超苛刻蒸汽条件的主蒸汽管、过热器和再热器; 在部分锅炉上, 有时被用作不锈钢管的代用材料。其特点为低 C、低 Si、高 W、高 Nb、低 Al, 是为了使材料具有足够的高温强度和高温蠕变性而进行的特殊成分设计。JFE T/P92 的化学成分和力学性能见表 6。T/P92 钢管的导热系数等物理性能值与原来的 T/P91 钢管相同, 而高温强度却显著提高了, 因此, 由于钢管的薄壁化、轻量化, 完全可减轻焊接施工负荷, 既提高效率又能降低成本^[24]。

2.3 瑞典山德维克锅炉管开发现状

2.3.1 双金属复合锅炉管

超超临界锅炉产生高温高压蒸汽, 过热器用钢管应具有耐 650 °C、35 MPa 蒸汽条件下的高温强度, 优良的外表面耐高温腐蚀能力和内表面耐水蒸汽氧化性能等特性。为了降低整体耐蚀合金管的材料成本、保持其耐蚀可靠性, 山德维克公司开发了由碳钢作基层管, 耐蚀性好的奥氏体超低碳不锈钢 Sanicro28 作为复层管的双金属复合锅炉管, 此管是替代纯高合金管的替代产品, 能有效降低成本。

Sandvik Sanicro28 钢具有优异的耐高温腐蚀性、耐强酸腐蚀性、耐应力腐蚀开裂 (SCC)、耐点蚀性和耐缝隙腐蚀性。27% Cr 的合金设计使其具有耐气体腐蚀性。Sandvik Sanicro28 钢和内层管材的化学成分及力学性能分别见表 7 和表 8。Sandvik Sanicro28 双金属复合管的标准为欧洲标准 EN 10216-2-2004、EN10216-5-2004、EN12952-2 附录 C-2001^[26]。

双金属复合管通过冶金结合制成, 在锅炉结构设计上无需任何变更, 就可直接使用^[27]。冶金结合

表 9 Sanicro25 奥氏体不锈钢的力学性能
Table 9 Mechanical properties of austenite stainless steel Sanicro25

室温力学性能(20 °C)						高温力学性能			
屈服强度/ MPa		抗拉强度/ MPa	延伸率/ %		硬度 (HV)	温度/ °C	屈服强度/ MPa		抗拉强度/ MPa
$R_{p0.2}$	$R_{pl.0}$		A	A2"			$R_{p0.2}$	$R_{pl.0}$	
≥310	≥355	680	40	40	185	600	180	205	500
						700	180	195	455
						800	180	195	355

成型方法为喷射成型法, 特点是近终形和半固态加工技术^[28]。Sandvik Sanicro28 双金属复合管其中一种规格为 63.5 mm × 6.53 mm (最小壁厚), 其中外层耐蚀基管 Sandvik Sanicro28 平均壁厚为 1.65 mm, 碳钢基层管最小壁厚为 4.88 mm。

Sandvik Sanicro28 复合管具有以下优点: 较低的热膨胀率, 减少系统压力; 较高的热传导率, 降低操作温度, 减少腐蚀; 消除水/蒸汽侧的应力腐蚀开裂、点蚀和缝隙腐蚀; 容易弯曲。目前, 超过 200 万 m 的复合管已应用在全世界 300 多个多锅炉上^[25]。

2.3.2 700 °C 超超临界锅炉管

山德维克公司对 700 °C 使用的超超临界锅炉合金开展研究, 开展了 Sanicro25 奥氏体不锈钢的研制, 已经试制成功 $\Phi 41.4$ mm × 8 mm 的合金管, 应用于燃煤蒸汽锅炉再热器和过热器。Sanicro25 奥氏体不锈钢是 Fe-Ni 基合金 (/%: ≤0.1C, 0.2Si, 0.5Mn, ≤0.025P, ≤0.015S, 22.5Cr, 25Ni, 3.6W, 1.5Co, 3.0Cu, 0.5Nb, 0.23N), 具有较好的韧性、蠕变强度、抗氧化性和高温组织稳定性。析出相强化是该钢的主要强化方式之一, 主要析出相有 $M_{23}C_6$ 、NbCrN、Nb(C、N)、富 Cu 相。同时, 添加 W 和 N 进行固溶强化, Cr 元素可用来增加抗高温氧化性能, 同时 W、Cr 元素的增加可促进 σ 相的析出, 富 Nb 的 MX 相显著提高了钢的蠕变断裂强度^[29]。由计算得

到 Mo、Cr、C、N 等元素是 MX 相的重要合金组成元素, Sanicro25 钢中的 MX 相可能为 Nb(C, N)^[30]。

Sanicro25 不锈钢管具有优异的蠕变强度, 在 700 °C 下服役 10 万小时后, 蠕变强度为 100 MPa。Sanicro25 可采用焊接方法是非熔化极气体保护焊。Sanicro25 奥氏体不锈钢管在使用过程中, 高效率导致蒸汽温度更高, 并大量减少了 CO₂ 排放量, 燃煤消耗更少。Sanicro25 的力学性能见表 9。产品标准为 ASTM A213-2010 和 ASTM A312-2013^[31]。

参考文献

- [1] Viswanathan R, Bakker W T. 超超临界火电厂锅炉用材的开发[J]. 世界钢铁, 2007, 7(2): 34-46.
- [2] Lu Yansun. Development of China Electricity Industry and Power Plant Equipment Materials [C] // 2009 Symposium on Advanced Power Plant Heat Resistant Steels and Alloys, 2009.
- [3] 唐利萍. 超超临界锅炉用钢的发展[J]. 应用能源技术, 2007(10): 20-21.
- [4] Chen Qirong, Helmrich A, Weissinger G. Experiences With Boiler Materials for 600 °C Power Plants and New Development Activities for Highest Steam Parameters [C] // 2009 Symposium on Advanced Power Plant Heat Resistant Steels and Alloys, 2009.
- [5] 艾国安, 谷力功, 曹俊. 高压锅炉管生产现状[J]. 天津冶金, 2006(1): 18-22.
- [6] 钟倩霞, 张艳红, 严圣祥. 加快开发和生产火电锅炉耐热钢管[N]. 中国冶金报, 2011-11-22(C04).
- [7] 杨富. 我国超超临界机组金属与焊接的现状与展望[C]. 超超临界机组技术交流年会, 天津, 2013, 1, 11.
- [8] 王起江, 邹凤鸣, 赵群义. 宝钢 T23 高压锅炉管的研制[J]. 宝钢技术, 2006(1): 59-62.
- [9] Nippon Steel & Sumitomo Metal; Detailed Information by Product [OL]. 新日铁住金产品手册, http://www.nssmc.com/product/catalog_download/pdf/P008en.pdf
- [10] 何晓梅, 罗昌福, 刘漫博. 超超临界火电机组的选材及国产化进程[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(22): 116-124.
- [11] 杨岩, 程世长, 杨钢. 铜含量对 Super304H 钢持久性能的影响[J]. 机械工程材料, 2002, 26(10): 23-25.
- [12] 王剑志, 罗仕清, 黄晓斌. 超(超)临界锅炉用 Super304H 钢管研究试制[J]. 钢铁, 2006, 41(1): 43-46.
- [13] 彭芳芳, 朱国良, 宋建新. 超超临界机组用 SUPER304H 钢管国产化关键制造工艺的分析[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 803-806.
- [14] 王剑志, 罗仕清, 黄晓斌. 超(超)临界锅炉用 SUPER304H 钢管试制研究[J]. 特钢技术, 2005(1): 1-6.
- [15] Masuyam A F. Lessons on Material Issues from Eddy Stone USC Power Plant [C] // 2009 Symposium on Advanced Power Plant Heat Resistant Steels and Alloys, 2009.
- [16] 于鸿垚, 董建新, 谢锡善. 新型奥氏体耐热钢 HR3C 的研究进展[J]. 世界钢铁, 2010, 10(2): 42-49.
- [17] 王敬忠, 程世长, 刘正东. HR3C 钢高温拉伸塑性偏低的影响因素研究 [C] // 先进电站用耐热钢与合金研讨会. 上海: 2009.
- [18] Danielsen H K, Hald J. Tantalum-Containing Z-Phase in 12% Cr Martensitic Steels [J]. Scripta Materialia, 2009, 60(9): 811-813.
- [19] Danielsen H K, Hald J. A Thermodynamic Model of the Z Phase Cr(V, Nb)N [J]. Calphad December 2007, 31(4): 505-514.
- [20] Cipolla L, Danielsen H, Venditti D, et al. Conversion of MX Nitrides to Z-Phase in a Martensitic 12% Cr Steel [J]. Acta Materialia, 2010(58): 669-679.
- [21] Danielsen H K, Hald J. On the Nucleation and Dissolution Process of Z-Phase Cr(V, Nb)N in Martensitic 12% Cr Steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 505(1): 169-177.
- [22] Nippon Steel & Sumitomo Metal; Detailed Information by Product [OL]. 新日铁住金产品介绍, <http://www.tubular.nssmc.com/product-services/specialty-tube/tube-application/fossil-fuel-power>.
- [23] JFE; Detailed Information by Product [OL]. JFE 产品介绍, <http://www.jfe-steel.co.jp/ch/products/>
- [24] 慧子. JFE 钢铁公司能源工业用钢 [N]. 世界金属导报, 2013-4-9(14)
- [25] JFE; Detailed Information by Product [OL]. JFE 技术报告, <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/list.html#Pipes-&-Tubes>
- [26] Sandvik; Detailed Information by Product [OL]. Sandvik 产品手册, http://www.smt.sandvik.com/Global/Downloads/Products_downloads/tubular-products/S-12111-ENG-050822.pdf
- [27] 顾建忠. 国外双层金属复合钢管的用途及生产方法 [J]. 上海金属, 2000, 22(4): 16-24.
- [28] 孙育禄, 白真板, 张国超. 油气田防腐用双金属复合管研究现状 [J]. TOTAL CORROSION CONTROL, 2011, 25(5): 10-16.
- [29] Kimb Y U, Kwunb S I, Shima J H, et al. The Effect of Cooling Conditions after Solution Treatment on the Creep Rupture Strength of Sanicro25; A Materials Science and Technology Research Division [OB/OL]. Korea Institute of Science and Technology (KIST). Seoul, 2009: 136.
- [30] Shim Jae-Hyeok, Kozeschnik Ernst, Jung Woo-Sang, et al. Numerical Simulation of Long-Term Precipitate Evolution in Austenitic Heat-Resistant Steels [J]. Calphad, 2010, 34(1): 105-112.
- [31] Sandvik; Detailed Information by Product [OL]. Sandvik 产品手册, <http://www.smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sanicro-25/>

邢 娜(1984-), 女, 硕士(2009 年东北大学), 工程师, 2007 年辽宁工业大学(本科)毕业, 无缝管领域产品工艺信息。E-mail: xingna626@126.com

收稿日期: 2015-08-06