百万千瓦级核岛主设备蒸汽发生器焊接制造技术（上）

上海电气核电设备有限公司 （201306） 李双燕 张茂龙

【摘要】介绍了1000MW级核岛主设备蒸汽发生器的结构特征及主要设计参数，简述了压水堆核岛机械设备设计和建造规则（RCC—M）（2000版+2002补遗）的主要特点，详细介绍了蒸汽发生器的母材材质、焊接填充材料以及制造中的关键焊接技术与热处理技术。

1. 概述

目前我国在建的红沿河、宁德等核电站均采用“二代加”改进型三环路1000MW级核电技术，1000MW蒸汽发生器由我国自主设计、自主制造，采用RCC—M标准（2000版+2002补遗）规范设计，技术要求高，制造难度大。主要表现在零部件多，焊接部位多；材料特殊，涉及到低合金钢、不锈钢和镍基合金等同种和异种金属之间的焊接；焊接材料种类多、焊材试验多，包括焊材牌号的评定等；焊接工艺评定多，涉及对接、角接、堆焊、模拟补焊等；采用的焊接工艺方法多，除采用成熟的焊接工艺外还采用了多项自主创新技术；焊接文件多，包括焊接数据包、焊缝及相关检查清单等。

蒸汽发生器是核电站核岛的核心装置，1000MW蒸汽发生器型号为55/19B，每个机组由3个环路组成，每个环路有一台蒸汽发生器，其结构如图1所示示意。

表1为主要设计参数。其中，管板一次侧表面大面积堆焊至少8mm的Inconel 600镍基合金堆焊层，下封头表面堆焊至少5mm不锈钢堆焊层。管板上钻有8948个矩形排列的ϕ19.28mm管孔。二回路侧U型传热管直段上分别由1块流量分配板和9块支承板支承。套筒的上端装有16个一级汽水分离器和1个星形二级分离器。

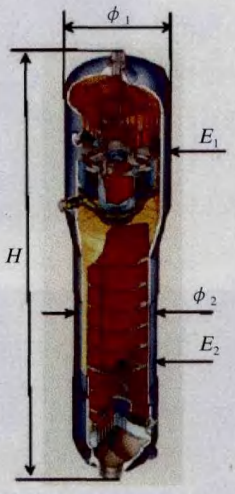

图1 1000MW蒸汽发生器结构示意

表1 蒸汽发生器设计参数

类型	立式U型
型号	55/19 B
一次侧设计压力/MPa	17.23
一次侧设计温度/℃	343
二次侧设计压力/MPa	8.6
二次侧设计温度/℃	316
U型管材料	Inconel 690
U型管数量	4474
U型管规格/mm	ϕ 19.05 × 1.09
U型管节距（正方形）/mm	27.43
上筒体外径ϕ_1/mm	4484
上筒体厚度E_1/mm	最小95
下筒体内径ϕ_2/mm	3286
下筒体厚度E_2/mm	最小77
产品总长度H/mm	21115
产品重量/t	345

2. RCC—M规范特点

RCC—M《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》是法国核岛设备设计和建造规则委员会（AFCEN）制定的核电设备的制造规范。RCC—M规则主要借鉴了ASME中的有关内容，同时吸收了法国在工业发展实践中所取得的成果，是法国核

电规范最重要、内容最完整并首先发行的压水堆核岛机械设备设计建造规范。RCC—M的制造与检测规则是法国核工业核电工程制造和检测实践经验的具体体现。

RCC—M（2000版+2002补遗）规范对焊接的要求具有以下3个特点：

（1）针对性强 RCC—M是针对压水反应堆核岛设备的专用标准，是一部针对性极强的制造标准。针对焊接材料均给出了焊接填充材料的卡片，还将强辐照区用焊材与非强辐照区用焊材区分开。

（2）限制性强 RCC—M对焊接材料的选择具有极强的限制性。焊接填充材料卡片给出了所用焊材的名称，但卡片中没有的材料不可以使用。另外，对于粉状焊剂（与给定化学成分的焊丝或焊带有关）、药芯焊丝、药皮焊条使用前需进行商标名称评定。评定包括两部分：一部分由焊材供货进行，一部分由设备制造厂进行。从这些规定可以看出，一种焊接材料必须进行大量试验包括焊材验收、焊材评定、焊接工艺评定后才可用于产品。

（3）具体性强 由于RCC—M是一部针对性极强的标准，因此对设备的焊接要求非常具体。设备制造开工前需准备焊接数据包，焊接数据包大致包括9部分内容：即焊缝标识图、主要制造流程、焊接工艺规程清单、焊接工艺评定清单、产品焊接见证件清单、热处理清单、焊缝及相关检查清单、焊接工艺规程、焊接工艺评定指导书。对于焊接工艺评定，RCC—M对每种焊接类型均给出了具体详细的要求，并且要求进行模拟补焊试验。RCC—M还给出了产品焊缝见证件的设置要求。

3. 主要材料

（1）母材材料 蒸汽发生器作为核电站核岛主设备之一，属核安全一/二级设备，运行工况十分苛刻，对材料的要求非常高，大量采用具有较高综合性能的优质锻件材料。1000MW蒸汽发生器壳体由八部分组成，其中上筒体上、上筒体下采用18MND5锰镍钼低合金钢板材卷制而成，上封头、锥形筒体、下筒体上、下筒体下、管板、下封头均采用18MND5锰镍钼低合金钢锻件。一次侧接管安全端材料为Z2CND18—12(N2)奥氏体不锈钢；U型管材料为NC30Fe镍基合金。蒸汽发生器的所有原材料包括本体材料均自主采购。

（2）焊接填充材料 焊接材料的选择是焊缝质量优劣的重要前提，根据1000MW蒸汽发生器的结构特征、原材料类别、设计要求及生产设备和工程经验确定焊接工艺方法，从而确定焊接材料类别及尺寸。焊接材料入厂后进行焊材验收和焊材牌号评定。

1000MW蒸汽发生器用焊接材料涉及到4大类、19种，包括低合金钢、碳钢、不锈钢和镍基合金。低合金钢类包括E9018—G焊条、F9A8—EG—F3N埋弧焊丝/烧结型焊剂。碳钢类包括E7018—1、J507焊条以及GTAW用ER70S—6焊丝，其中J507焊条属国产焊材，主要用于内部构件（包括干燥器、汽水分离器、套筒、排污管等组件），国产焊材的使用大大推动了核电国产化焊材的进程。不锈钢类包括E309L、E308L和E316L焊条，ER309L、ER308L和ER316L氩弧焊丝，ER308L埋弧焊丝/烧结型焊剂，EQ309L/ EQ308L埋弧堆焊焊带/烧结型焊剂。镍基合金类包括ENiCrFe—3、ENiCrFe—7焊条，ERNiCr—3、ERNiCrFe—7氩弧焊丝，EQNiCr—3电渣堆焊焊带/烧结型焊剂。焊接材料的种类、型号及规格如表2所示。这些焊接材料主要用于承载焊缝、非承载焊缝、堆焊层、隔离层、密封焊缝和补焊焊缝。其中焊剂（与给定

表2 蒸汽发生器用焊接材料种类、型号及规格

焊材种类		型号	规格/mm
低合金钢	焊 条	E9018—G	ϕ3.2、ϕ4.0、ϕ5.0
	埋弧焊丝/焊剂	F9A8—EG—F3N	ϕ4.0
			烧结型
碳钢	焊条	E7018—1	ϕ3.2、ϕ4.0、ϕ5.0
		J507	ϕ3.2、ϕ4.0、ϕ5.0
	氩弧焊丝	ER70S—6	ϕ1.2、ϕ2.0
不锈钢	焊带/焊剂	EQ309L、EQ308L	60×0.5、30×0.5
		焊剂	烧结型
	焊 条	E308L、E309L	ϕ3.2、ϕ4.0、ϕ5.0
		E316L	ϕ3.2、ϕ4.0
	氩弧焊丝	ER308L、ER309L、ER316L	ϕ1.2、ϕ2.0
	埋弧焊丝/焊剂	ER308L	ϕ3.0
		焊剂	烧结型
镍基合金	焊带/焊剂	EQNiCr—3	60×0.5
		焊剂	烧结型
	焊条	ENiCrFe—3	ϕ3.2、ϕ4.0
		ENiCrFe—7	ϕ2.5、ϕ3.2、ϕ4.0
	氩弧焊丝	ERNiCr—3	ϕ0.9、ϕ1.2、ϕ2.0
		ERNiCrFe—7	ϕ0.6、ϕ0.9、ϕ1.2

化学成分的焊丝或焊带有关）和焊条需按RCC—M S5000进行牌号评定，评定时需考虑焊丝或焊带、焊条的尺寸。

为分析管子-管板焊缝对管板堆焊层的热影响，对管板一回路侧堆焊用镍基合金焊接材料（包括焊带、焊条、焊丝）必须按RCC—M S3750进行模拟试验。模拟试验在焊材验收时进行或管板堆焊工艺评定时进行，模拟试验可用5根管子与堆焊层相焊，也可进行重熔试验（5条单道环焊缝和5条双层重叠焊道环焊缝）。

4. 关键焊接制造技术

1000MW蒸汽发生器中遵守RCC—M的部件，低合金钢18MND5焊前和堆焊前预热温度均≥150℃。焊接时道间温度为低合金钢≤250℃，不锈钢≤250℃，镍基合金≤225℃。后热处理温度为200~300℃，至少2h。焊后热处理温度为595~620℃，最大保温时间20h，350℃以上加热速度≤55℃/h，冷却速度≤55℃/h，降到350℃以下冷却，加热方式为炉内加热或电红外加热。

设备焊接制造过程中，除采用成熟的焊接工艺包括主环缝SMAW+SAW焊接、纵缝SAW焊接、人孔座与筒体SAW焊接以及给水接管与筒体SAW焊接等外，还采用了5项新技术，包括：管板大面积Inconel 600镍基合金带极电渣堆焊技术，下封头内壁大面积带极埋弧堆焊技术，下封头进出口接管内壁带极埋弧堆焊技术，下封头进出口接管安全端不锈钢TIG+SAW隔离层堆焊、SAW对接焊技术，Inconel 600堆焊层+ Inconel 690管子的不填丝TIG管子-管板焊接技术。这些技术在红沿河核电厂一期工程1号机组和宁德核电厂一期工程2号机组蒸汽发生器的制造过程中得到成功应用。

（1）管板镍基合金堆焊 蒸汽发生器管板一回路侧长期接触带有放射性和腐蚀性的载热剂介质，按产品技术要求须全部堆焊镍基合金Inconel 600材料，以保证一定的耐蚀性。管板直段堆焊至少8mm，*R*边缘区堆焊7~9mm。由于Inconel 600镍基合金材料热裂纹敏感性高，堆焊金属润湿性差，所以要获得质量较高的堆焊层，管板堆焊工艺的选择至关重要。产品堆焊如图2所示。

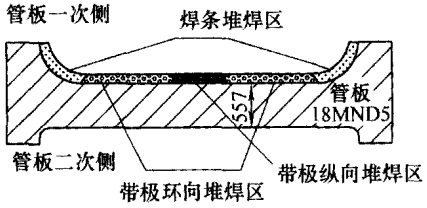

图2 管板堆焊示意

直段区域首次采用带极电渣堆焊技术，焊带采用EQNiCr—3类型，尺寸60mm×0.5mm，焊接参数如表3所示，产品堆焊如图3所示。首先在管板中心区域直焊道堆焊约ϕ800mm的范围，然后再采用环向堆焊方法。*R*边缘区采用ENiCrFe—3焊条进行堆焊，焊接时第二层所用焊条的尺寸不得大于第一层所用焊条尺寸。由于堆焊层质量的优劣将直接影响管子与管板间焊缝的综合性能，所以堆焊层堆焊时要进行清理、打磨，严格控制清洁度。堆焊后对所有堆焊层进行100%PT和100%UT检测。

表3 带极电渣堆焊参数

层数	堆焊电流/A	堆焊电压/V	堆焊速度/mm·min^{-1}	搭边量/mm	层间温度/℃
1~3	1050～1150	24～26	200～220	5～8	≤200

图3 管板带极电渣堆焊

（2）管子-管板焊接 管板材料为18MND5低合金钢锻件，总厚度557mm，Inconel 600镍基合金堆焊层至少8mm。管板上钻有8948个正方形排列的管孔，如图4所示，孔径为ϕ19.28mm，管子节距为27.43mm。与管板焊接的4474根U型传热管材料为NC30Fe（Inconel 690），规格为ϕ19.05mm×1.09mm。管子-管板焊缝的质量是确保核动力设备正常运行的关键，如何选择蒸发器管子-管板焊接接头形式，对于保证焊缝的焊接质量是非常重要的。1000MW蒸汽发生器传热管端面与管板堆焊层表面平齐。管子-管板焊接接头如图5所示。