

第十届中国核电技术发展高峰论坛报告

# 第三代核电核岛主设备关键 制造技术及发展

■ 上海电气核电设备有限公司副总工程师

张茂龙



## 1 第三代核电机组堆型概述

美国电力研究院于 90 年代出台了“先进轻水堆用户要求”文件，即 URD 文件( Utility Requirements Document)，用一系列定量指标来规范核电站的安全性和经济性。欧洲出台的“欧洲用户对轻水堆核电站的要求”，即 EUR (European Utility Requirements)文件，也表达了与 URD 文件相同或相似的看法。国际上通常把满足 URD 文件或 EUR 文件的核电机组称为第三代核电机组。典型的第三代核电堆型以及技术拥有者如下：(1) ABWR：GE + 日立；(2) APWR，APWR +：日本三菱 + 西屋；(3) ACR：加拿大 AECL；(4) AP1000：美国西屋；(5) EPR：法国 AREVA；(6) CAP1000，CAP1400：国核；(7) 华龙 1 号：中核/广核。

### 1.1 主要特点

(1) 单堆功率大，寿命长：AP1000 的功率为 125 万千瓦，设计寿命 60 年；EPR 的功率达到 175 万千瓦，设计寿命同样为 60 年；(2) 安全性高：AP1000：非能动技术；EPR：增加安全系统冗余度和系统配置；(3) 建设周期短；(4) 经济性更高。

### 1.2 核岛主设备结构特点和制造要求

核岛主设备主要包括反应堆压力容器(RPV)、堆内构件(RVI)、驱动机构(CRDM)、蒸汽发生器(SG)、稳压器(PZ)、主泵(MP)、主管道等(PP)，首先具有受压容器的结构特点，还具有：(1) 设备核安全要求；(2) 大型、精密和高性能要求；(3) 材料种类多、焊缝数量和类别多、检查要求高。

核岛主设备的制造技术主要包括如下四类：(1) 焊接/热处理技术；(2) 机械加工技术；(3) 装

配技术；(4) 检测技术。

因此，采用可靠稳定、精密高效、应用成熟和机械化自动化技术成为对核电设备加工技术总体的要求。

## 2 第三代核电核岛主设备关键制造技术

### 2.1 装配制造技术

核岛主设备制造过程中，使用了一系列关键、专业和可靠的装配技术，如：(1) SG 支撑板装配技术；(2) SG 管束及抗振条装配技术；(3) SG 水室隔板装配技术；(4) SG 一级分离器和给水环组件安装技术；(5) SG 泵壳装配技术；(6) CRDM 管座冷装技术；(7) RPV 大接管装配技术。

### 2.2 机加工制造技术

机加工是核电设备制造中的关键技术之一，主要技术有：(1) SG 支撑板梅花孔加工技术；(2) SG 管板深孔加工技术；(3) SG 排污孔加工技术；(4) SG 水室封头最终加工技术；(5) RPV 容器组件最终立式机加工技术；(6) RPV 出口接管内凸台最终机加工技术；(7) RPV 主螺栓加工技术；(8) RPV 容器法兰 M155 × 4 螺孔的加工技术。

### 2.3 焊接和热处理制造技术

核岛主设备是由大量零部件组焊而成，鉴于焊接工艺的不平衡热过程，焊接接头是性能和组织的不连续区域，焊缝是压力边界的薄弱环节，焊后热处理是改善接头性能的有效手段，因此，可以说焊接和热处理是核岛设备制造中最关键的工序，是保证设备质量的重要技术手段。主要技术有：(1) 主环缝窄间隙埋弧自动焊技术；(2) 大面积不锈钢耐蚀层堆焊技术；(3) 接管筒体马鞍形接头窄坡口焊

接技术; (4) SG 管板镍基合金堆焊技术; (5) SG 管子-管板密封焊技术; (6) 接管安全端异种金属镍基合金焊接技术; (7) CRDM 管座与顶盖 J 型接头焊接技术; (8) RPV QUICKLOC 接管异种金属接头镍基合金焊接技术; (9) RPV CANOPY 接头焊接技术; (10) 堆内构件堆芯围筒激光焊; (11) 堆内构件真空电子束焊; (12) 最终环缝局部热处理; (13) SG 筒体环缝局部热处理及防止 TUBE DING 技术; (14) SG 管板和水室封头环缝局部热处理及防止 TUBE DING 技术; (15) PZ 电加热套管焊接技术; (16) RVI 堆型围筒激光焊技术; (17) RVI 导向筒电子束焊接技术; (18) RVI 筒体不锈钢焊接技术。

## 2.4 试验和检验技术

试验和检验是验证或证明核岛主设备制造质量的手段, 因此可靠先进的试验和检验技术在一定程度上是确保核电设备制造质量的条件, 使用的关键试验和检验技术包括: (1) 环缝无损检测技术; (2) 对焊层无损检测技术; (3) SG 换热管涡流检测技术; (4) 大接管筒体马鞍形焊缝射线检测技术; (5) 接管安全端异种金属接头的超声检测和射线检测技术; (6) J 型接头等特殊接头无损检测技术; (7) 水压试验及干燥技术; (8) 精密光学/激光空间尺寸测量技术; (9) 特殊理化性能试验技术; (10) 控制棒导向筒组件摩擦力检测。

## 3 关键制造技术发展方向

### 3.1 制造技术水平已得到了有效提升

(1) AP1000 核岛主设备制造技术引进为国内企业技术升级和技术进步打下了良好的基础; (2) 国家通过重大专项为三代核岛主设备关键制造技术的开发提供了有力的经费支持; (3) 上海市通过重点科研项目经费支持单项技术研究和开发; (4) 企业在装备能力上巨大投入为新技术应用打下基础; (5) 企业自身重视, 开展试验研究和工艺开发; (6) 质量管理能力的提升促进工艺优化和技术进步。

### 3.2 存在的问题

(1) 技术稳定性和可靠性尚有欠缺: 焊接缺陷较多、加工精度偏差大、检测灵敏度低等; (2) 手工操作方法占了较大比例: 手工焊接、手工装配、手工检测等; (3) 自动化、智能化程度不高, 主要是机械化加工技术等; (4) 加工效率较低, 工位/工序排布不合理、NCR 处理时间长、管理手段落后

等; (5) 基础研究缺乏, 创新环境、创新动力、创新深度有待提高。

### 3.3 技术发展方向

1) 总体发展: 高效、可靠、低成本, 智能化和自动化, 实时检测。

2) 焊接和热处理技术: (1) 高效可靠机械化和自动化先进焊接技术; (2) 智能焊接技术; (3) 高效节能低碳加热技术。

3) 机械加工和装配技术, 高效精密自动化加工。

4) 检测技术: (1) 自动化和数字化超声波检测和射线检测; (2) 激光自动测量; (3) 质量实时检测技术。

## 4 结语

中国核电发展面临难得的历史机遇, 第三代和第四代核电核岛主设备制造技术应用和发展的重点体现在高可靠性、高效性等方面。以焊接和热处理技术为例, 考虑的发展方向 and 关键技术内容如表 1 所示。

表 1 第三代和第四代核电核岛主设备焊接技术发展方向

| 发展方向                    | 关键技术内容(举例)                |
|-------------------------|---------------------------|
| 高效可靠先进焊接技术(机械化和自动化焊接技术) | J 型接头自动氩弧焊                |
|                         | 镍基合金双热丝等离子堆焊焊             |
|                         | 窄间隙双丝埋弧自动焊                |
|                         | 超窄间隙激光焊接技术                |
|                         | 马鞍面热丝 TIG/双钨极堆焊技术         |
| 接头性能研究                  | 马鞍形接头低变形窄间隙焊接技术           |
|                         | 筒体环缝内壁打底全位置自动焊接技术         |
| 工艺稳定化研究                 | 服役性能(腐蚀、疲劳和断裂韧性等)         |
| 智能焊接技术                  | 焊接工艺高可靠性(低缺陷率、无缺陷)        |
|                         | 管子管板机器人焊接技术               |
|                         | 水室隔板机器人焊接技术               |
| 焊接质量在线实时检测技术            | 蒸汽发生器小空间机器人焊接/堆焊技术        |
|                         | 窄间隙焊接缺陷实时监测跟踪处理技术         |
|                         | 堆焊焊接缺陷实时监测跟踪处理技术          |
| 高效节能低碳加热技术              | 管座焊接变形跟踪控制技术              |
|                         | 感应加热技术(预热、后热、热处理)         |
| 第四代核电新材料焊接工艺开发          | 气体加热炉流场智能控制技术             |
|                         | 钎基熔盐堆关键设备新型材料和新结构焊接工艺     |
|                         | 高温堆关键设备新型材料和新结构焊接技术       |
|                         | 其它堆(如聚变堆)关键设备新型材料和新结构焊接技术 |