

# CPR1000 蒸汽发生器支承设计改进

任红兵, 谢洪虎, 周 鹏

深圳中广核工程设计有限公司, 广东, 深圳, 518124

摘要: 中国改进型压水堆 1000 MW 核电站 (CPR1000) 反应堆冷却剂系统的抗震设计基准为  $0.2g$ , 安全余量较小; 提出一种蒸汽发生器上水平支承的设计改进结构, 通过增设拉杆和连接支座, 消除支承间隙, 达到将反应堆冷却剂系统的抗震能力从  $0.2g$  提高到  $0.3g$  的目的, 全面满足 HAF102 的相关要求。

关键词: 蒸汽发生器; 水平支承; 摆动拉杆; 抗震性能

中图分类号: TL371 文献标志码: A

## 0 引言

中国改进型压水堆 1000 MW 核电站 (CPR1000) 机组是在引进 M310 堆型基础上, 通过消化吸收和再创新而形成的自主堆型, 其反应堆冷却剂系统的抗震设计基准为  $0.2g$ , 原设计中反应堆主系统的抗震设计余量较小。

通过对 CPR1000 反应堆冷却剂主系统力学计算, 发现蒸汽发生器 (SG) 一次侧进出口接管焊缝处是整个主系统设备中抗震性能最薄弱的位置, 其抗震性能仅为  $0.2g$ , 而其余主设备结构抗震性能均可满足  $0.3g$  的要求。另外, 在 CPR1000 原始设计中, SG 一次侧进口接管焊缝处的设计余量在一类工况下约为 2%, 而 SG 一次侧出口接管焊缝处的余量为“零”。

## 1 原始设计简述

SG 支承由垂直支承、下部水平支承及上部水平支承组成。SG 支承的功能为: 在正常工况下为 SG 提供支承, 承受各工况下的载荷; 在反应堆冷却系统正常运行时, 满足 SG 因系统、设备及支承热膨胀产生的自由热位移; 在地震和非大破口失水事故 (LOCA) 发生时, 限制 SG 的瞬间位移, 保证反应堆冷却剂系统、SG 设备及土建结构的稳定和安全。

为满足 SG 在系统冷态和热态工况下的位移要求以及现场安装调试要求, 下部水平支承与 SG 本体、上部水平支承与侧向预埋板间均设置有一

定的间隙。上述间隙的存在使得 SG 与其支承结构间为不连续连接, 地震或 LOCA 事故发生时产生的作用力不能直接由该方向上的支承构件承担并传递到混凝土墙上, 而是会引起 SG 在该方向上的振动, 从而影响 SG 的抗震性能。

通过力学计算发现, 过大的地震载荷主要由上部水平支承间隙引起。由于上部水平支承临近 SG 设备重心, 其间隙对地震载荷影响明显, 下部水平支承远离 SG 设备重心, 其间隙对地震载荷影响小, 可以忽略。

## 2 设计改进方案

SG 支承设计改进对象为 CPR1000 在役和在建机组, 在设计改进时需遵从如下原则:

(1) 实现 SG 与主管道热段轴向垂直方向 SG 隔间侧墙体间无间隙连接。

(2) 保持 SG 本体结构不变, 避免带来较大的实施难度和对工期的影响。

(3) 需满足 SG 现有布置要求, 尽量减少对 SG 隔间混凝土墙体结构影响。

(4) 在保证提高抗震性能的前提下, 需尽量减少对原有 SG 支承结构的改变。

按照上述 SG 支承设计改进指导原则, 设计改进后的 SG 上部水平支承在现有抱环结构基础上采取了摆动拉杆+阻尼器的无间隙支承方式来取代目前有间隙的支承结构形式。

SG 上部水平支承设计结构改进方案的具体

改进措施如下：

(1) 增加2组摆动拉杆组件，布置在与主管道热段轴向垂直方向上，限制SG在此方向上的瞬间移动。

(2) 在抱环筒体外侧增加2组连接支耳，用于连接摆动拉杆。

(3) 增加2组摆动拉杆连接支座，连接支座通过锚固拉杆与SG隔间混凝土侧墙连接。

(4) 摆动拉杆与抱环支耳和连接支座通过销轴、球铰轴承连接，具体结构见图1。

(5) 原阻尼器组件保持不变，泵反侧的2台阻尼器的布置方式由原来的同侧变更为180°对称布置。

(6) 在改进设计方案中，为了保证阻尼器和摆动拉杆的现场安装所需的操作空间，对SG隔间的混凝土墙体进行局部修改。

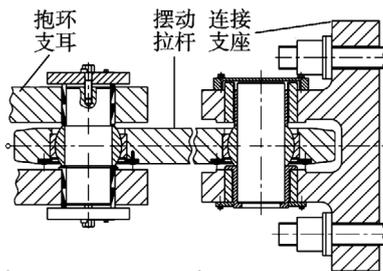


图1 摆动拉杆与抱环支耳、连接支座连接结构  
Fig. 1 Connecting Structure of Connection Rod, Lug and Clevis

### 3 改进结构分析

根据上水平支承的功能及安全要求，在冷态及热态工况时，上水平支承结构及布置尺寸需保证支承结构为自由状态，不允许对SG设备产生附加力。摆动拉杆组件结构布置尺寸设计时，需考虑如下结构的热膨胀：系统热膨胀引起的SG本体热位移；SG本体及垂直支承引起的上水平支承在SG轴线方向上的位移；上水平支承抱环组件、摆动拉杆的热膨胀。

#### 3.1 SG 本体位移

根据原 CPR1000 系统设计文件，从冷态工况到热态工况，SG 将沿主管道热段轴线方向移动 52 mm，沿着与主管道热段垂直方向上的热位移为 2 mm。

#### 3.2 SG 轴线方向位移

根据原 CPR1000-SG 设计文件，SG 本体及垂

直支承引起的上水平支承在 SG 轴线方向上的位移为 32 mm。

#### 3.3 上部水平支承组件膨胀量计算

从冷态工况到热态工况过程中，除了 SG 本身发生热膨胀以外，抱环和摆动拉杆也要发生热膨胀。

3.3.1 抱环膨胀量 抱环冷、热态工况下温度分别为 20 和 150 。抱环本体材料为 S275J0 板材。根据 RCC-M 附录表 ZI.7.0<sup>[1]</sup>，S275J0 板材在 150 时平均热膨胀系数为  $11.87 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。抱环由冷态运行至热态工况下的热膨胀系数  $\Delta_1$  为  $1.543 \times 10^{-3}$ 。该处径向热膨胀量为 3.35 mm。连接支耳所在圆半径（热态）为 2170.85 mm。

3.3.2 摆动拉杆轴向膨胀量计算 摆动拉杆的主体材料为 20NCD14-07。靠近 SG 端温度为 150 ，远离 SG 端温度为 70 ，取平均值为 110 。根据 RCC-M 附表，利用插值法可求得 110 对应的平均热膨胀系数为  $11.86 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>[1]</sup>；摆动拉杆轴向热膨胀量约为 0.96 mm。

#### 3.4 摆动拉杆布置尺寸确定

结合上述计算得到的支承件热膨胀量数值，分别以冷态和热态抱环组件与摆动拉杆连接轴心为中心，以冷态和热态摆动拉杆长度 900 mm 和 900.96 mm 为半径画圆，其交点即为摆动拉杆与拉杆连接支座连接轴心。

图 2 显示了从冷态到热态过程中摆动拉杆在立体视图中产生的热位移轨迹。

上述连接支座位置的确定和摆动拉杆热位移轨迹的分析有助于支承件的现场安装和调整，以及避免摆动拉杆可能出现的卡塞现象。

### 4 改进结果

CPR1000-SG 上部水平支承设计改进后，消除了原设计结构中 SG 与侧向锚固板间的间隙，按抗震设计基准 0.3 g 进行力学分析，结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出，相比 CPR1000 原始设计，按抗震设计基准 0.3 g，在第一类工况下，SG 一次侧进口接管焊缝处的设计余量由原来的 2% 提高到了 35%，而 SG 一次侧出口接管焊缝处的余量由原来的“零”提高到了 25%。

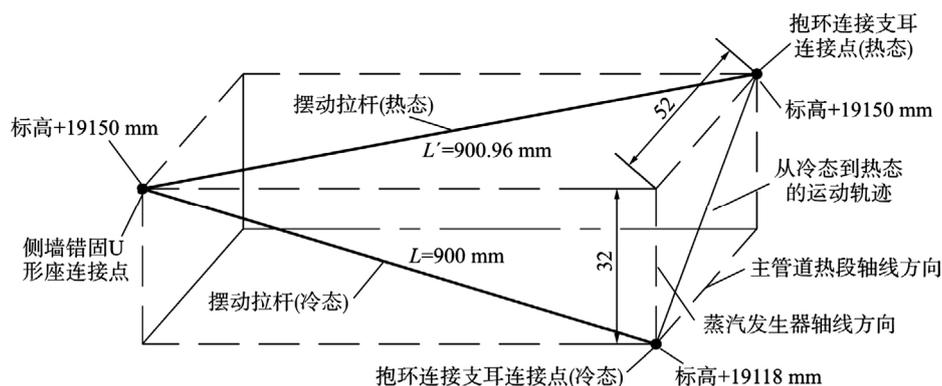


图2 摆动拉杆热位移轨迹

Fig. 2 the Thermal Displacement of the Connecting Rod

表1 设计改进后的CPR1000SG进出口接管焊缝处的应力计算结果

Table 1 Stress Calculation Results of Joint for SG Inlet and Outlet Pipe after Design Improvement

部 件	第一类工况		
	计算值/MPa	许用值/MPa	余量/%
SG 一次侧进口接管焊缝	102.56	157	35
SG 一次侧出口接管焊缝	118.82	157	25

## 5 结 论

通过对 SG 上部水平支承结构设计改进，消除 SG 上水平支承与侧向锚固板间结构间隙，提升 SG 一次侧进出口接管焊缝处的抗震性能，达到 CPR1000 反应堆冷却剂系统抗震能力从 0.2 g 提升至 0.3 g 的目的，满足 HAF102 规定。

本设计改进成果已在阳江核电站 5 号和 6 号机组中得到应用，后续可在 CPR1000 在建机组中应用，也可用于在役 CPR1000 电厂的改造。

参考文献：

- [1] 法国压水堆核岛机械设备设计和建造规则 (RCC-M) [S]. 1993.

# Design Improvement of CPR1000 Steam Generator Supports

Ren Hongbing, Xie Honghu, Zhou Peng

China Nuclear Power Design Company, Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518124, China

**Abstract:** The design basis of earthquake resistance for CPR1000 reactor coolant system is only 0.2g, and the design abundance is low. This paper described an improved steam generator support structure with adding sway struts and connecting clevis, and eliminating gaps among supports. The stress analysis indicates that this support structure can enhance the earthquake resistance of the system from 0.2g to 0.3g, and the requirements of HAF102 are completely met.

**Key words:** Steam generator, Horizontal supports, Sway strut, Earthquake resistance

作者简介：

任红兵 (1967—)，男，高级工程师。1990 年毕业于四川轻化工学院化工机械专业，获学士学位。现主要负责核岛主设备设计及其管理工作。

谢洪虎 (1983—)，男，工程师。2009 年毕业于华南理工大学过程装备与控制工程专业，获硕士学位。现主要从事核岛主设备支承及专用工具设计工作。

周 鹏 (1979—)，男，工程师。2005 年毕业于西北工业大学热能工程专业，获硕士学位。现主要从事核岛主设备支承及专用工具设计及其管理工作。

(责任编辑：杨洁蕾)