

文章编号：0258-0926(2016)S1-0001-05；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0001

# 模块式小型堆汽轮机事故停机工况下 RCS 超压分析研究

陈宏霞，田皓文，喻娜，邱志方，方红宇，关仲华

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610213

**摘要：**采用 RELAP5 程序对模块式小型堆汽轮机事故停机工况下的反应堆冷却剂系统（RCS）超压进行了研究。为防止汽轮机事故工况下 RCS 超压，从减少堆芯能量的产生、一回路超压保护 2 方面进行了设计改进。分析结果表明，选择合理的波动管流通面积，能够有效缓解 RCS 超压。

**关键词：**模块式小型堆；汽轮机事故停机；超压分析；反应堆冷却剂系统（RCS）

**中图分类号：**TL364+4 **文献标志码：**A

## Study on Overpressure Condition of Reactor Coolant System for Small Modular Reactor under Turbine Trip Accident

Chen Hongxia, Tian Haowen, Yu Na, Qiu Zhifang, Fang Hongyu, Guan Zhonghua

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** The overpressure risk of small modular reactor under turbine trip accident is analyzed by RELAP5. To prevent RCS overpressure, the paper studies on the decreasing of the transient core power and primary overpressure protection. The results indicate that the RCS overpressure of the small modular reactor can be mitigated effectively with appropriate surge line flow area.

**Key words:** Small modular reactor, Turbine trip accident, Analysis of overpressure, Reactor coolant system (RCS)

### 0 引言

中国核工业集团公司开展模块式小型堆的研究，采用安全性能达到第三代核能技术水平的一体化小型压水堆。模块式小型堆采用一体化布置的直流蒸汽发生器（OTSG），具有传热面积大、设备体积小，蒸汽品质高的优点。与商用核电厂的饱和蒸汽发生器（SG）相比，它的缺点是 SG 二次侧水装量小，热惯性差，发生二次侧排热减少事故时，反应堆冷却剂系统（RCS）存在超压的风险，从而破坏反应堆第二道安全屏障，导致大量放射性物质向周围环境释放。因此，有必要对模块式小型堆 RCS 超压进行分析和研究。

本文对模块式小型堆 RCS 超压风险进行研究，论证模块式小型堆应对超压风险的能力及超压情况下的缓解措施。

### 1 RCS 超压工况的确定

SG 二次侧排热减少事故包括以下 4 类事故：汽轮机事故停机；电厂辅助设施非应急交流电源丧失；正常给水流量丧失；主给水系统管道破裂。

核电厂辅助设施非应急交流电源丧失事故由主泵转速低信号触发紧急停堆，停堆时间较早，因此该事故对 RCS 的超压问题不予考虑。汽轮机

事故停机、正常给水流量丧失和主给水系统管道破裂事故这 3 类事故的初因均会导致主给水的丧失；正常给水流量丧失和主给水系统管道破裂事故这 2 类事故，紧急停堆后触发汽轮机事故停机，汽轮机有一定的带热能力。因此，在进行模块式小型堆设计阶段，以汽轮机事故停机工况作为首要的分析对象，以评价 RCS 的完整性。

## 2 RCS 超压验收准则的确定

模块式小型堆属于新设计的反应堆堆型，目前对应的法规和标准尚未正式发布，在设计阶段借鉴国外成熟的经验，将汽轮机事故停机工况划分为 II 类工况。

法国核电界在法国压水堆核电站系统设计和建造规则 (RCC-P) [1]4.4 节中提到关于 RCS 边界所规定的验收准则为：对于 II 类工况，一回路压力不会导致丧失第二道屏障 (RCS 压力边界的完整性)，规则中没有给出具体的限制准则。

美国核管理委员会发布的标准审查大纲 (Standard Review Plan, NUREG-0800) [2] 中给出了汽轮机事故停机工况 RCS 验收准则是系统压力不超过设计压力的 110%。

美国机械工程师协会 (ASME) 在《锅炉及压力容器规范》[3] 第三卷核电厂部件 NB 分册中给出了安全 1 级设备的设计标准，文中指出在预期的系统压力瞬态工况下 (包括与正常系统瞬态相关的工况，如丧失给水或丧失负荷)，能防止被保护系统承压边界内任何部件的压力高于设计压力的 110%。

因此，模块式小型堆汽轮机事故停机工况 RCS 超压的验收准则为设计压力的 110% (模块式小型堆的设计压力为 17.2 MPa，设计压力的 110% 即为 18.92 MPa)。

## 3 汽轮机事故停机超压分析

### 3.1 汽轮机事故停机瞬态描述

汽轮机事故停机将导致汽轮机主汽门快速关闭，通往汽轮机的蒸汽流量快速终止，汽轮机旁路排放开启。蒸汽流量丧失将导致 SG 二次侧的压力和温度快速上升，进而引起 RCS 的瞬态。

如果汽轮机旁路排放系统和稳压器压力控制系统能投入运行，则反应堆冷却剂温度和压力不会明显增加。如果冷凝器失效，则产生的过剩蒸

汽将通过主蒸汽安全阀排入大气，若此时主给水不可用，则给水流量由启动给水系统维持以排出堆芯余热。

### 3.2 分析程序

采用 RELAP5/MOD3 [4] 程序对事故的热工水力进行瞬态分析。该程序是用于分析轻水堆在假想事故中热工水力响应的最佳估算程序，RCS 系统包括反应堆堆芯、主冷却剂泵、稳压器、SG、管道等设备。程序还能模拟反应堆保护功能和专设安全系统；可求解含不可凝气体非均衡热力状态汽-液两相流传热问题，对于水平通道和直立通道中的两相传热传质状况和倒流现象进行机理性描述。

### 3.3 主要参数

本节分析的工况定义为基本工况，其主要参数见表 1。

表 1 汽轮机事故停机超压分析主要参数  
Table 1 Value Used in RCS Overpressure Analysis under Turbine Trip Accident

参数		参数值
初始反应堆功率/%		100+3=103
初始反应堆冷却剂平均温度/		310+2=312
初始稳压器压力/MPa		15.0+0.2=15.2
稳压器安全阀 (开启/关闭) 压力/MPa	第一组	16.9/16.3
	第二组	17.2/16.6
稳压器安全阀额定排量/ $t \cdot h^{-1}$		75
稳压器压力高停堆整定值/MPa		16.4
稳压器压力高停堆时间延迟/s		2.0

反应堆初始条件考虑最大偏差，使得 RCS 压力最大化，具体的选取原则如下：

(1) 反应堆初始功率为满功率加上最大热工测量误差。

(2) 反应堆冷却剂初始平均温度为名义值加上最大稳态控制误差和测量误差。

(3) 稳压器初始压力为名义值加上最大稳态波动值和测量误差。

另外，安全分析的原则是不考虑非安全级设备对事故的缓解作用，因此从事故分析角度来说，不考虑汽轮机旁排系统和大气释放阀的作用。

### 3.4 初步评价结果

表 2 给出了主要事件序列。图 1 给出了 RCS 压力随时间变化曲线。

从表 2 可知，瞬态开始汽轮机事故停机同时

表 2 汽轮机事故停机超压分析事件序列

Table 2 Time Sequence of RCS Overpressure Analysis under Turbine Trip Accident

事件	时间/s
汽轮机停机, 失去主给水	0
SG 安全阀打开	1.0
稳压器压力高停堆整定值到达	5.6
稳压器安全阀打开	6.9
控制棒开始下落	7.6
RCS 压力峰值 (19.13 MPa)	9.8

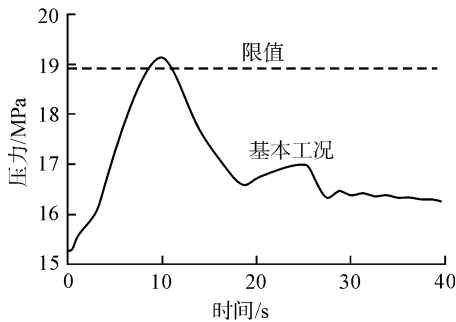


图 1 RCS 压力随时间变化

Fig. 1 RCS Pressure vs Time

失去主给水, 二次侧丧失热阱, 一、二回路升温升压。在 5.6 s 时稳压器压力高信号整定值到达, 触发反应堆紧急停堆。9.8 s 时 RCS 压力出现峰值, 其值为 19.13 MPa > 设计压力的 110% (18.92 MPa), 超过压力限值, RCS 压力边界的完整性受到威胁。

#### 4 汽轮机事故停机工况下防止 RCS 超压的措施

RCS 超压的本质是一回路升温升压太快, 一回路能量不能及时导出。由于汽轮机事故停机工况下 RCS 峰值压力出现在瞬态初期, 为防止 RCS 超压, 从堆芯能量产生和超压保护考虑, 对减少堆芯能量的产生和一回路超压保护进行研究。

##### 4.1 减少堆芯能量的产生

4.1.1 加快稳压器压力高信号停堆延迟时间 文中第 3 节基本工况分析采用的稳压器压力高信号触发紧急停堆的延迟时间为 2 s, 而目前我国商用核电厂该信号延迟时间为 1 s。现以 1 s 的停堆延迟时间进行敏感性分析, 定义为工况 2, 具体的事件序列见表 3。

与基本工况相比, 工况 2 停堆延迟时间由 2 s 变为 1 s 后, 控制棒提前 1 s 下落, 瞬态过程中堆

表 3 停堆延迟时间敏感性分析事件序列比较

Table 3 Time Sequence Compared with Reactor Trip Time Sensitivity

事件	时间/s	
	基本工况 (停堆延迟时间为 2 s)	工况 2 (停堆延迟时间为 1 s)
汽机停机, 失去主给水	0	0
SG 安全阀打开	1.0	1.0
稳压器压力高停堆整定值到达	5.6	5.6
稳压器安全阀打开	6.9	6.9
控制棒开始下落	7.6	6.6
RCS 压力峰值	9.8 (19.13 MPa)	9.2 (18.915 MPa)

芯能量产生减少, 因此 RCS 压力峰值出现的时间提前并且压力峰值下降, 其值为 18.915 MPa, 低于设计压力的 110% (18.92 MPa), 满足了限值的要求。但是 RCS 压力峰值的降低相对较小, 很容易出现超压的风险, 因此不建议采取这种措施。

4.1.2 考虑其他可能的停堆保护 汽轮机事故停机工况由于汽轮机主汽门的关闭和主给水的丧失, 将会触发给水流量低停堆信号, 将该工况定义为工况 3, 并对其进行敏感性分析, 具体事件序列见表 4。

表 4 停堆保护信号敏感性分析事件序列比较

Table 4 Time Sequence Compared with Reactor Trip Signal Sensitivity

事件	时间/s	
	基本工况 (稳压器压力高)	工况 3 (给水流量低)
汽轮机停机, 失去主给水	0	0
SG 安全阀打开	1.0	1.0
停堆整定值到达	5.6	0.1
稳压器安全阀打开	6.9	9.7
控制棒开始下落	7.6	1.1
达到 RCS 压力峰值	9.8 (19.13 MPa)	10.0 (17.1 MPa)

与基本工况相比, 工况 3 停堆整定值到达时间为 0.1 s, 控制棒下落时间提前 6.5 s, 实现了较早停堆, 堆芯产生的能量更少, RCS 的降压效果明显。RCS 的压力峰值为 17.1 MPa, 低于设计压力的 110%, 并满足验收准则的要求。

但是根据安全分析的单一故障要求, 考虑第一个停堆保护信号失效, 则主给水流量低将不会被触发, 因此汽轮机事故停机工况超压分析中不推荐使用主给水流量低信号作为该事故的停堆信

号, 选取稳压器压力高停堆信号更为合理。

### 4.2 一回路超压保护

RCS 出现超压问题, 最直接有效的降压方式是排出一回路工质, 实现一回路的降压。限制一回路工质排放的因素主要是稳压器安全阀阀门排量和波动管的流通面积。本文从增加稳压器安全阀阀门排量和增加波动管的流通面积进行超压分析的研究。

4.2.1 增加稳压器安全阀阀门排量 在反应堆运行压力下, 水的密度是蒸汽密度的 6 倍, 增加稳压器安全阀的排放能力, 通过稳压器液相和汽相的平衡, 实现一回路降压。为评价阀门排量的变化带来的影响, 对稳压器安全阀的阀门排量进行敏感性分析, 研究工况如下:

工况 4: 稳压器安全阀阀门排量增加到基本工况的 140%。

工况 5: 稳压器安全阀阀门排量增加到基本工况的 200%。

相应的稳压器压力和 RCS 压力随时间变化见图 2 和图 3。

图 2 中工况 4 和工况 5, 仅稳压器第一组安

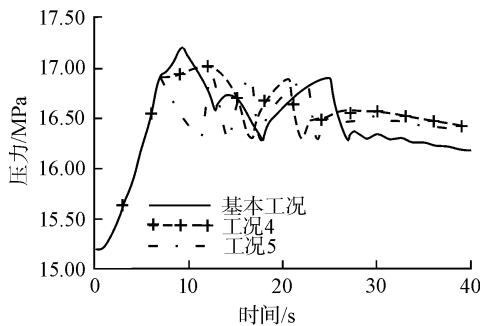


图 2 稳压器压力随时间变化-安全阀排量影响  
Fig. 2 Pressure of Pressurizer vs Time -Influence of Relieving Capacity of Safety Valve

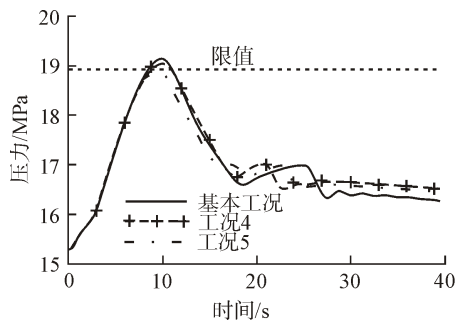


图 3 RCS 压力随时间变化-安全阀排量影响  
Fig. 3 RCS Pressure vs Time - Influence of Relieving Capacity of Safety Valve

全阀打开, 基本工况稳压器第一组、第二组安全阀均打开。稳压器安全阀排量越大, 稳压器压力下降越明显。稳压器压力的下降, 并没有对 RCS 的压力产生明显的影响。

图 3 中, 对于工况 5, 稳压器安全阀排量增加 1 倍, RCS 压力峰值仅比基本工况降低 1.4%, 其值为 18.86 MPa。阀门排量的增加对 RCS 的压力峰值降压效果有限。

增加稳压器安全阀排量的措施, 将使设备成本增加, 并且该措施对 RCS 的压力峰值降压效果有限, 因此不建议增加阀门排量来降低 RCS 的压力。

4.2.2 增加波动管流通面积 波动管流通面积的大小直接影响瞬态升温升压过程中一回路冷却剂进入到稳压器中的流速。对波动管的流通面积进行敏感性分析, 研究工况为:

工况 6: 波动管流通面积增加到基本工况的 117%。

工况 7: 波动管流通面积增加到基本工况的 157%, 稳压器压力和 RCS 压力随时间变化见图 4 和图 5。

由图 4 可见, 波动管流通面积的增加, 瞬态

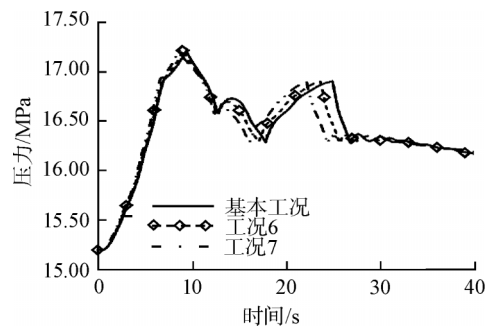


图 4 稳压器压力随时间变化-波动管流通面积影响  
Fig. 4 Pressure of Pressurizer vs Time- Influence of Surge Line Flow Area

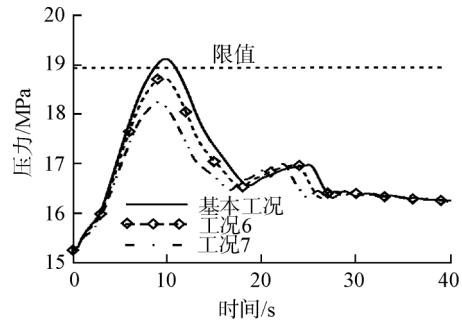


图 5 RCS 压力随时间变化-波动管流通面积影响  
Fig. 5 RCS Pressure vs Time- Influence of Surge Line Flow Area

初期反应堆冷却剂进入到稳压器内的流体增加，稳压器压力上升加快，因此稳压器安全阀的开启时间提前。

由图 5 可见，波动管流通面积的增加，反应堆冷却剂进入到稳压器内的瞬时流量增加，即瞬态开始工况 6 和工况 7 的 RCS 压力相对于基本工况低，并且在反应堆停堆后，RCS 压力降低更为明显。工况 6 相对于基本工况，波动管面积增加 17%，波动管峰值流量增加 3.4%，RCS 压力峰值降低为 18.77 MPa，低于设计压力的 110%（18.92 MPa），满足限值的要求。波动管流通面积的增加，使 RCS 压力峰值下降明显，因此建议采用增加波动管流通面积的措施降低 RCS 压力。

## 5 结论与建议

本文针对模块式小堆汽轮机事故停机工况下的 RCS 超压风险进行了分析研究，分析结论和建议如下：

（1）模块式小堆汽轮机事故停机工况下存在

RCS 超压的现象。

（2）减少堆芯能量的产生、增加稳压器安全阀排量、增加波动管流量面积 3 种措施均能防止 RCS 的压力超过限制准则。

（3）从经济性、可操作性、容易实现方面考虑，建议采取增加稳压器波动管流通面积的措施来避免汽轮机事故停机工况下的 RCS 超压风险。

参考文献：

- [1] EDF and Framatone, RCCP, Design and Construction Rules for System Design of 900MWe PWR Nuclear Power Plant[S]. France: Rev4, modified 1995: 4. 4-2, 4. 4-3.
- [2] U.S. Nuclear regulatory commission, NUREG-0800, Standard Review Plan 15.1.1-15.1.4[S]. USA: Rev 2, 2007.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section III Division 1-Subsection NB[S]. USA: 2007: 206
- [4] Idaho national laboratory, REALP5/MOD3 code manual [R]. USA: 1995.

（责任编辑：张明军）