

# 压水堆一回路卸压措施影响因素研究

纪 段, 曹学武

(上海交通大学 核科学与系统工程系, 上海 200030)

**摘要:** 研究压水堆一回路管道小小破口失水事故叠加辅助给水失效导致的高压堆芯熔化严重事故进程, 对比验证不同严重事故缓解措施入口温度条件下一回路卸压缓解途径的充分性和有效性, 并确认较佳的一回路冷却系统(RCS)降压途径。结果显示, 以低于 650 °C 的温度作为降压缓解措施入口条件, 可及时恢复可能的堆芯冷却能力。一、二回路卸压效果分析表明, 考虑了长期衰变热移出注水流量和堆芯过冷度要求, 较佳的卸压配置为初期打开一列稳压器卸压阀, 同时迅速恢复辅助给水并开启蒸汽发生器卸压阀。

**关键词:** 压水堆; 小小破口冷却剂丧失事故; 严重事故; 一回路卸压; 入口温度

**中图分类号:** TL364.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2006)04-0385-06

## Study on Primary Coolant System Depressurization Effect Factor in Pressurized Water Reactor

JI Duan, CAO Xue-wu

(Department of Nuclear Science and System Engineering, School of Mechanics and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The progression of high-pressure core melting severe accident induced by very small break loss of coolant accident plus the loss of main feed water and auxiliary feed water failure is studied, and the entry condition and modes of primary cooling system depressurization during the severe accident are also estimated. The results show that the temperature below 650 °C is preferable depressurization input temperature allowing recovery of core cooling, and the available and effective way to depressurize reactor cooling system and to arrest very small break loss of coolant accident sequences is activating pressurizer relief valves initially, then restoring the auxiliary feedwater and opening the steam generator relief valves. It can adequately reduce the primary pressure and keep the capacity loop of long-term core cooling.

**Key words:** pressurized water reactor; very small break loss of coolant accident; severe accident management; primary loop depressurization; entry temperature

堆芯严重损伤事故发生的概率虽然很低,但一旦事故发生,尤其在高压情况下,可能造成堆芯熔融物大范围喷射,导致安全壳大气的直接加热,具有较大的放射物大量外泄的潜在风险。为降低高压熔堆风险,最重要的措施之一是对反应堆冷却剂系统(RCS)进行卸压,使应急冷却系统设备如高低压安注、安注箱和余热移出泵等投入,排除可能的蒸汽发生器干涸破管等严重事故初期严重后果,重新恢复堆芯冷却能力。

对主要严重事故进程和严重事故缓解措施进行分析,以及对缓解措施有效性进行验证,是提高严重事故管理水平和制定严重事故管理导则的前提条件。参考 NUREG-1150<sup>[1]</sup>,导致高压熔堆严重事故的几大重要初因序列是:冷却剂丧失事故(LOCA),未紧急停堆的预期瞬变(ATWS)和全厂断电(SBO)。

WASH-1400 和 NUREG-1150 评估分析显示,小于 12.7 mm 的小破口冷却剂丧失事故(SSBLOCA)发生概率大于  $2 \times 10^{-4}$ ,发生频率介于 SBO 和 ATWS 之间,且发生时极可能安注不启动,有较大的高压熔堆潜在威胁<sup>[2]</sup>。

在 SSBLOCA 引发的严重事故进程中,主系统补泄措施投入条件和手段对事故缓解结果起重要作用。本文主要基于 SCDAP/RELAP5/MOD3.1,选择研究主系统管道小小破口失水事故叠加主/辅助给水失效下不同一回路卸压缓解措施入口条件时的堆芯的冷却状态,并讨论分析一、二次侧较佳卸压缓解途径。

## 1 计算模型与初始条件

使用的核反应堆严重事故分析平台主要由后台分析程序、数据处理以及交互界面组成。后台分析程序采用目前国际上模拟严重事故瞬态过程最详细的机理性程序 SCDAP/RELAP5/MOD3.1,该程序具有模拟堆内严重事故热工水力进程及堆芯损伤的能力。

一回路示意图示于图 1。一回路主要包含稳压器(PRZ)、蒸汽发生器(SG)、反应堆压力容器(RPV)、安注箱、主泵以及连接管道。安注系统包括高压安注系统(HPSI)、安注箱以及低压安注系统(LPSI)。由图 1 可知,堆芯控制容积划分为径向 4 个控制体,每个控制体沿轴向划分为 8 个控制容积,共有 32 个控制容积。

二次侧主要描述主给水和辅助给水入口、蒸汽发生器卸压系统和汽轮机。稳压器(图 1 中 280)用 8 个控制体表征,顶端连接 1 组卸压阀、1 组安全阀和喷淋管。二回路冲排水由随时间变化控制容积和蒸汽发生器单元实现。

## 2 计算假设与结果分析

一回路管道小小破口失水事故的计算假设为:1) 初始正常 100% 运行功率(寿期末);2) 0 时刻开始计算;3) 破口面积为  $5.08 \text{ mm} \times 5.08 \text{ mm}$ ;4) 基准事故下辅助给水瞬态开始失效;5) 主给水和蒸汽排放失效;6) 蒸汽发生器破管无发生。

计算的初始运行工况<sup>[3]</sup>为:

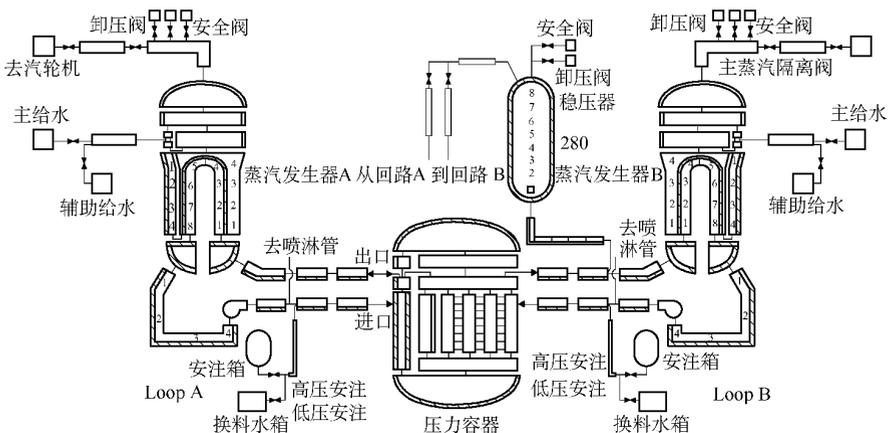


图 1 一回路示意图

Fig. 1 Scheme of primary loop

- 1) 反应堆核功率 998.6 MW,冷却剂平均温度 575.16 K,单环路流量 3 333.3 kg/s;
- 2) 稳压器压力 15.30 MPa,水位 5.4 m;
- 3) 蒸汽发生器压力 5.74 MPa,水位 10.47 m,入口流量 271.53 kg/s。

2.1 基准事故分析

由于失水事故破口较小,主系统压力将一直维持在相应于二次侧温度的饱和压力以上。稳压器和二次侧蒸汽发生器卸压阀虽不断开启以及安全阀动作,主系统压力在 3 000~4 000 s 间有所下降,并维持在 15 MPa,但由于二次侧辅助给水启动失效,蒸汽发生器很快烧干,紧急冷却的高压安注系统以及非能动安注箱不能投入,压力容器水位不断下降,主系统汽水混合物的持续流失到压力容器下封头失效为止,此后,主系统压力迅速下降(图 2)。事故进程详情列于表 1。

在小小破口失水事故序列下封头失效时,主系统压力虽明显低于全厂断电序列,但仍然高到足以要求考虑熔融物喷射问题<sup>[4]</sup>的程度。

2.2 降压措施入口温度

据文献[5]表述,在堆芯冷却不足情况下,以 650 °C 作为入口条件需要再评估。因为在 650 °C 下,大部分堆芯已出现传热恶化,燃料元件包壳进一步氧化速度极快,故选取 650、620 (中间温度)和 605 °C (较低温度)作为降压缓解措施入口温度,分析讨论打开稳压器卸压阀、蒸汽发生器卸压阀联合辅助给水投入的卸压效果。

表 1 主系统管道小小破口失水事故进程

Table 1 SSBLOCA base case sequence

t/s	事件
0.02	主系统管道小小破口,失去主给水
32	汽轮机停机
60	稳压器喷淋阀和卸压阀开启
260	堆芯功率降至 3.44%
315	主泵开始惰转
445	压力容器水位开始下降
1 220	蒸汽发生器卸压阀打开
2 825	破损回路蒸汽发生器烧干
3 725	堆芯开始裸露
20 152	堆芯熔融至下封头
24 000	计算结束

1) 以 650 °C 开始开启稳压器卸压阀,主回路压力只是在 2 000 到 3 000 s 间借助蒸汽发生器热阱降低到 15 MPa 左右,后因蒸汽发生器烧干,一、二次侧无持续冷却剂补充,汽水混合物持续丧失,堆芯水位很快下降至燃料底部,导致堆芯高压熔化(图 3)。

2) 以 620 °C 中间温度或 605 °C 左右的较低温度作为降压缓解措施入口条件,可及时把主回路压力降至 2 MPa 左右。但因较低温度(如 605 °C)下卸压阀开启时间早,初期压力下降迅速,安注系统初始流量过大,通过卸压阀丧失过多冷却剂,难以维持长期衰变热移除的注水流量,因此,中间温度值(如 620 °C)为较佳的降压缓解措施入口条件。

3) 蒸汽发生器卸压阀开启且辅助给水恢复卸压结果亦表明,中间温度值下卸压效果及堆芯淹没状态较佳。

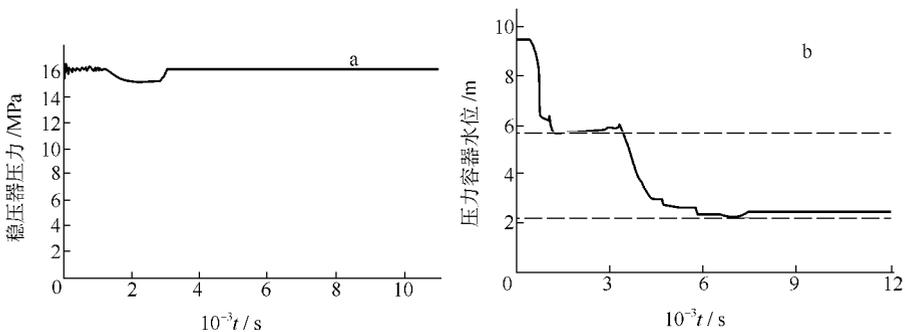


图 2 小小破口失水基准事故压力(a)及水位 (b)

Fig. 2 SSBLOCA base case pressure(a) and level(b)

图 2b 中的上下虚线分别表示堆芯顶部和底部

### 2.3 不同卸压途径分析

降低 RCS 压力可选择的卸压途径有: 1) 一次侧卸压, 如稳压器卸压阀 (PRZ PORV) 打开, 辅助喷淋启动; 2) 二次侧卸压, 如蒸汽发生器卸压阀 (SG PORV) 开启和辅助给水恢复。

假设除蒸汽排放外, 其他卸压方法均可选择, 驱动控制电源均有效, 将  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为降压措施入口条件。

#### 1) 一、二次侧卸压分别投入

分别对开启稳压器卸压阀、启动辅助喷淋和开启蒸汽发生器 (SG) 卸压阀 (且辅助给水尚未恢复) 进行卸压效果比较 (图 4)。计算结果显示, 在小失水事故早期  $0\sim 2\ 000\text{ s}$ , 能够快速起降压作用的有稳压器卸压阀和辅助喷淋, 其中, 稳压器卸压阀开启的效果最为明显; 在事故中期  $2\ 000\sim 4\ 000\text{ s}$ , 稳压器和蒸汽发生器卸压阀可发挥卸压作用, 且稳压器卸压可持续到  $4\ 000\text{ s}$  后, 稳压器卸压贡献较大。

开启稳压器卸压阀可充分降低主回路压力至  $2\text{ MPa}$  左右。考虑到主系统失水具有一定危险性, 故建议在有充足后备水源情况下, 可选择单独开启一列卸压阀。单独选取辅助喷淋和蒸汽发生器 (SG) 作为卸压方式不足以把一回路压力降低到安注投入压力。

#### 2) 一、二次侧卸压联合投入

为了电厂长期严重事故管理, 卸压方式分别投入不利于堆芯保持长期充足冷却状态和维持管道传热及减少内外压差。因此, 需要配合一、二次侧卸压措施。

若辅助给水未及时恢复, 此时, 开启一次侧稳压器卸压阀, 二次侧完整回路蒸汽发生器卸压阀进行卸压, 一回路压力虽然快速下降  $6\text{ MPa}$ , 但由于一回路排泄率过大, 高压安注不足以重新淹没堆芯, 二次侧亦没有冷却剂补充, 导致堆芯裸露; 若  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  初始增加辅助喷淋投入, 压力可降至  $2\text{ MPa}$  以下, 堆芯重新恢复冷

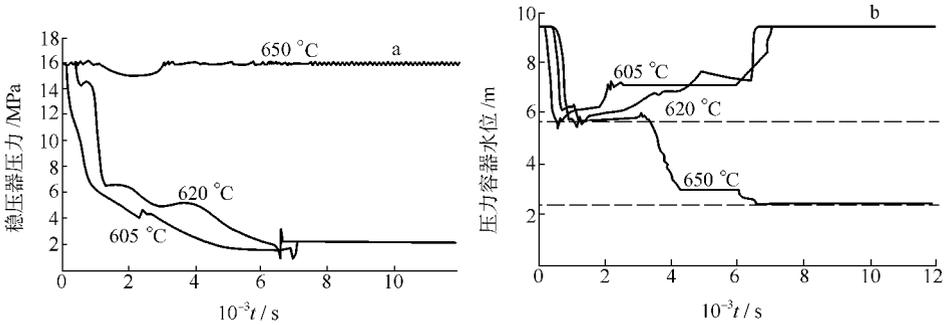


图 3 不同入口温度下稳压器卸压阀开启一回路卸压压力(a)及水位(b)比较

Fig. 3 RPV pressure(a) and water level(b) at different depressurization entry temperatures

图 3b 中的上下两条虚线分别表示堆芯顶部和底部

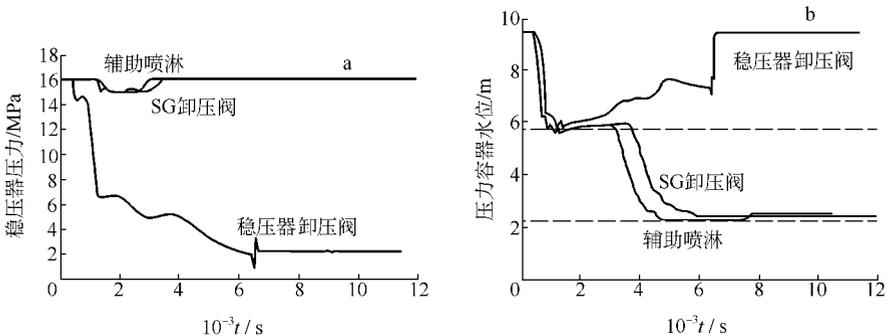


图 4 一、二次侧卸压方式 RCS 降压效果的压力(a)和水位(b)比较

Fig. 4 Pressure(a) and water level(b) of primary or secondary depressurization modes

图 4b 中的上下两条虚线分别表示堆芯顶部和底部

却,但此时的蒸汽发生器已蒸干,传热恶化,将导致蒸汽发生器热变形失效(图5)。

若辅助给水及时恢复,此时,一次侧辅助喷淋或二次侧卸压阀打开,可以保持堆芯淹没状态,但主回路压力只能降至10 MPa左右,高压安注无法投入,若辅助给水无法长期维持,则存在高压熔堆风险。采取一次侧卸压阀开启,主回路压力可在1 500 s内迅速下降到5 MPa以下,但冷却剂流失过快,1 000 s堆芯顶部出现近50 s的裸露,且不利于换料箱水量的维持。

通过结果分析比较得出,较佳的一、二次联合卸压方案为:在事故初期短时间(如几百秒)内开启稳压器卸压阀卸压,配合后期辅助给水恢复、蒸汽发生器卸压阀开启,堆芯可重新恢复冷却能力,冷却剂流失不大,可维持长期衰变热移除所需的注水流量。

### 3 结论

1) 以稳压器卸压阀和蒸汽发生器卸压阀及辅助给水投入进行主回路(RCS)卸压效果的比较显示,650 °C作为入口条件不足以缓解堆芯冷却不足和压力过高的状态;以中间温度值(如620 °C)作为降压缓解措施入口条件,可及时恢复可能的堆芯冷却能力,减轻包壳氧化程度;入口温度过低(如605 °C)不利于维持堆芯长期热移除。

2) 对应于中间温度620 °C,对稳压器卸压阀、辅助喷淋和蒸汽发生器(SG)卸压阀分别有效情况进行比较。计算结果显示,单独选取辅助喷淋或蒸汽发生器(SG)作为卸压方式不足以把一回路压力降低到安注投入压力。开启稳压器卸压阀可充分降低主回路压力到2 MPa左右,但考虑到主系统失水具有一定危险性,故建议在有充足后备水源情况下,可选择单独开启一列卸压阀。

3) 在620 °C降压措施入口条件下,考虑长期衰变热移出所需的注水流量和堆芯过冷度要求,一、二次侧联合卸压结果分析显示:采取完整回路蒸汽发生器卸压阀卸压加上辅助给水恢复,可保持堆芯淹没状态,但主回路压力只能降至10 MPa左右,高压安注无法投入,若辅助给水无法长期维持,则存在高压熔堆风险;采取稳压器卸压阀打开、加上辅助喷淋和辅助给水的投入,主回路压力可在1 500 s内迅速下降到5 MPa以下,但冷却剂流失过快,1 000 s堆芯顶部出现近50 s的裸露,且不利于换料箱流量的维持。卸压阀或辅助喷淋加上辅助给水的结果相似。

4) 较佳的主回路降压途径为在事故初期短时间(如几百秒)内开启稳压器卸压阀卸压、配合后期辅助给水恢复、蒸汽发生器卸压阀开启,堆芯可重新恢复冷却能力,冷却剂流失不

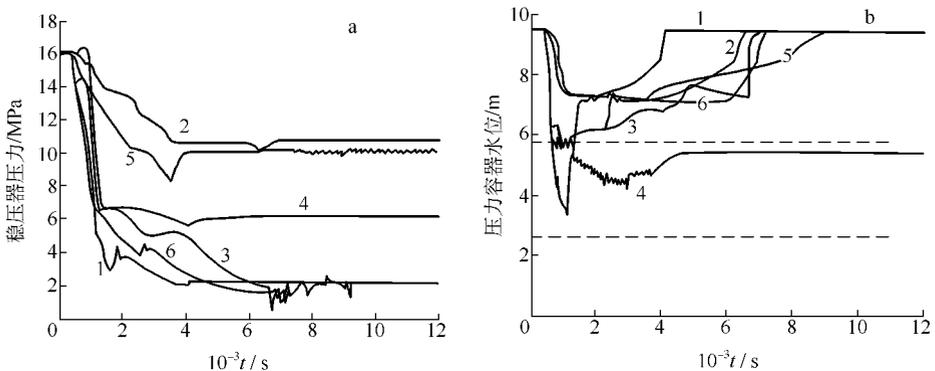


图5 一、二次侧卸压方式配合动作 RCS 降压效果的压力(a)和水位(b)比较

Fig.5 Pressure(a) and water level(b) of primary and secondary depressurization modes

- 1——开启稳压器卸压阀、蒸汽发生器卸压阀,且恢复辅助给水; 2——开启蒸汽发生器卸压阀,恢复辅助给水;
- 3——启动稳压器卸压阀、蒸汽发生器卸压阀、辅助喷淋; 4——开启稳压器卸压阀,蒸汽发生器卸压阀;
- 5——启动辅助喷淋和恢复辅助给水; 6——开启稳压器卸压阀,恢复辅助给水

图5b中的上下两条虚线分别表示堆芯顶部和底部

大,可维持长期衰变热移除所需的注水流量。

#### 5) 事故卸压缓解措施建议如下:

(1) 在如 SSBLOCA 的一次侧小破口所引发的严重事故中,若二次侧补泄措施未能及时恢复,一次侧补泄(如开启稳压器 PORV 排气卸压,同时上充,高压安注投入)能有效提供短时间堆芯冷却,但不足以维持堆芯长期热移除;

(2) 严重事故早期开启蒸汽发生器卸压阀进行二次侧排气可在蒸汽发生器蒸干前维持热阱作用,但不足以有效降低主回路压力,欲实现一回路卸压和堆芯淹没,须开启稳压器卸压阀,同时迅速恢复辅助给水,进行二次侧补泄。

#### 参考文献:

[1] US Nuclear Regulatory Commission. Severe accident risks: An assessment for five US nuclear power plants; NUREG-1150[R]. America;

USNRC, 1990.

[2] US Nuclear Regulatory Commission. Rates of initiating events at US nuclear power plants; 1987—1995 NUREG/CR-5750 [R]. America; USNRC, 1999.

[3] 许以全,车济尧,苏云,等. 秦山一期核电站 SBLOCA初因严重事故以及缓解措施的研究[J]. 核动力工程,2004,25(6):546-549.

XU Yiquan, CHE Jiyao, SUN Yun, et al. Study on severe accident progression induced by SBLOCA and mitigation measures for QINSHAN NPP unit 1 [J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(6): 546-549(in Chinese).

[4] 濮继龙. 压水堆核电厂安全与事故对策[M]. 北京:原子能出版社,1995:150-189.

[5] IAEA. Implementation of accident management programmes in nuclear power plants[R]. Vienna: IAEA, 1999.



## 用于正电子湮没寿命谱仪的探测器

【公开日】2006.02.22

【分类号】G01N23/22I

【公开号】CN1737550

【申请号】CN200510099897.9

【申请日】2005.09.09

【申请人】中国科学院高能物理研究所

【文摘】一种用于正电子湮没寿命谱仪的探测器,该正电子湮没寿命谱仪包括起始道探测器和停止道探测器,与常规的正电子寿命谱仪起始道与停止道采用相同的探测器不同,本探测器采用了与起始道探测器不同的停止道探测器,在停止道探测器的闪烁体中央,有一圆形井,放置测量样品与 $^{22}\text{Na}$ 正电子放射源。本仪器为湮没光子能量全吸收型正电子湮没寿命谱仪,可以获得优于常规正电子湮没寿命谱仪的时间分辨率和高的计数效率。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》