

文章编号：0258-0926(2015)01-0090-04; doi:10.13832/j.jnpe.2015.01.0090

# 大亚湾核电站意外硼稀释事故预防措施研究

董超群<sup>1</sup>, 谢波<sup>2</sup>

1. 中科华核电技术研究院有限公司, 广东深圳, 518124; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610041

**摘要：**核电站存在着因设计预想外硼稀释导致堆芯裸露损伤的风险。对意外硼稀释导致的临界事故的机理进行分析；介绍了潜在薄弱环节的改进措施，并对这些措施的有效性进行分析。结果表明，这些改进措施的实施显著提高了大亚湾核电站的安全水平，提高反应堆停堆工况下的安全水平。

**关键词：**意外硼稀释；快稀释；慢稀释

**中图分类号：**TM623.1 **文献标志码：**A

## Research of Preventive Measures for Heterogeneous Boron Dilution Accident in DayaBay NPP

Dong Chaoqun<sup>1</sup>, Xie Bo<sup>2</sup>

1. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518124, China;  
2. Nuclear Power Institute China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** The nuclear power plants are possible to suffer the core uncovering damage due to the heterogeneous boron dilution which is out of the design basis. This paper analyzes the mechanism of criticality accident caused by the heterogeneous boron dilution, and study the measures to prevent the erroneous dilution. The implementation of the improvement measures greatly improves the safety level of the Daya Bay NPP, especially effectively improves the safety level under the reactor shutdown conditions.

**Key words:** Heterogeneous boron dilution, Rapid boron dilution, Slow boron dilution

### 0 前言

研究表明<sup>[1]</sup>，由于操纵员误操作，没有遵守规程，或规程缺陷等方面的设计和运行上的不当造成的意外硼稀释事件的潜在风险不容忽视。该类事故在原先的安全设计中没有被考虑或重视程度不够，缺乏必要的软硬件上的安全防范措施。

统计显示，停堆期间发生的意外硼稀释事件所占的比例较大。在大部分停堆工况下，控制棒已插入堆芯，若此时又发生快速硼稀释事故导致引入较大反应性，其后果将会比较严重。可见，停堆工况不仅是硼稀释事件发生频率较高的运行

状态，而且其后果也较功率运行中严重。

本文对意外硼稀释导致的临界事故的机理进行了分析，并对预防误稀释的措施进行了分析。这些改进措施的实施于大亚湾核电站，提高了其安全水平，可有效地防止在停堆工时的误稀释事故，改善反应堆停堆工况下的安全水平。

### 1 意外硼稀释事故的分类及其物理机制

目前多数在运压水堆核电厂一回路冷却剂中都含有一定浓度的硼酸，在反应堆正常运行时通过逐渐稀释硼深度补偿燃耗后的反应性改变。

意外硼稀释事故是指在正常运行时，一回路

冷却剂本来不需要稀释硼，但错误地引入了比一回路硼浓度低的液体而引起的意外硼稀释，且反应堆由于硼浓度降低引入了正反应性，导致反应堆功率上升或重返临界。

### 1.1 硼稀释事故分类

根据稀释速率分为快稀释和慢稀释。快稀释事故又分为余热排出系统 (RRA) 接入和未接入。

快稀释也称非均匀硼稀释，其特点是低硼浓度的水或冷水未经充分混合，直接流过堆芯而造成的反应性迅速重返临界。在快稀释事故中，会有大量的低硼浓度水快速进入堆芯，属于超设计基准事故 (BDBA)。

慢稀释也称均匀硼稀释，表现为低硼浓度的水或冷水进入堆芯前已与一回路较高硼浓度的水进行了充分混合。这将导致一回路硼浓度缓慢降低，从而逐渐增加堆芯反应性。在慢稀释事故中，硼浓度变化很慢，属于 II 类工况事故 (中等频繁事故)，必须满足 II 类工况的验收准则。即：当达到规定的保护系统整定值时，保护系统能够关闭反应堆，但在进行必要纠正动作后反应堆可重新投入运行。II 类工况事件不得引发后果更严重的事件。

### 1.2 硼稀释事故物理机制

1.2.1 热力学机制 一回路中水团的形成依赖于注入点的混合情况，而混合情况主要由注入流体与一回路流体温度差异以及一回路循环流量决定。在低循环流量时，基于温度差的流体分层将导致水团聚集而不混合。

冷水的分层现象主要由弗劳德数 ( $Fr$ ) 决定：当  $Fr > 1$  时，重力影响可忽略；当  $Fr < 1$  时，重力能引起分层而导致水团的形成。根据在美国 Surry 核电站进行的试验，当反应堆冷却剂系统 (RCP) 硼浓度为 1500 mg/L 时，可在一回路形成一个 200~300 mg/L 的低硼浓度的水团。

### 1.2.2 硼稀释事故进程

(1) 慢稀释：对于稀释流量为  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  的慢稀释 (没有停堆和运行干预)，在热停堆工况下堆芯将在 25 min 后重返临界，几小时后就会导致堆芯裸露；在正常冷停堆情况下，堆芯将在 20 min 后重返临界，一回路超压将通过 RRA 安全阀释放并导致失水，但失水比前一种情况缓慢；在维修冷停堆工况下 (反应堆冷却剂系统 RCP 已部分排

空)，此时 RCP 水装量比前 2 种情况小，但停堆裕量大 (高硼浓度和控制棒插入)，堆芯将在 1 小时 20 分钟后重返临界<sup>[2]</sup>。

(2) 快稀释：对于快稀释，若在一回路内部已形成一个低硼浓度或冷水团，主泵启动或热虹吸流量突然建立后，这股水团将注入堆芯。若超出与温度和硼浓度差相关的临界体积，堆芯将重返临界。

## 2 大亚湾核电站稀释源分析

在分析和研究硼稀释事故时，首先分析硼稀释事故的起因及稀释途径，针对潜在的薄弱环节采取措施减轻事故发生的可能性或减轻事故后果。基于一回路及其辅助系统的结构分析，大亚湾核电站潜在的稀释源及稀释途径有以下方面。

### 2.1 通过化学和容积控制系统 (RCV) 的意外硼稀释

通过 RCV 浓度的低硼水或冷水意外注入一回路是压水堆临界事故的主要风险之一，具体包括以下几个途径。

#### 2.1.1 通过 RCV 浓度的低硼水注入

(1) 通过正常管线的意外注入：主泵停运后，容积控制箱内的低硼浓度水可通过 RCV 上充管线或密封注入管线在 RCP 中形成低硼浓度的水团；RCV 辅助喷淋管线也可在稳压器中形成低硼浓度的水团，主泵再启动后可使该水团注入堆芯。如果反应堆硼和水补给系统 (REA) 补给硼浓度低于一回路的硼浓度，或在应该硼化时而稀释都可能导致一回路的稀释。

(2) 通过 REA 应急稀释管线的意外注入：REA 应急稀释管线作为正常稀释管线的备用，平时处于行政隔离状态，该管线的误开启可导致一回路的误稀释。

(3) 设备冷却水系统 (RRI) 通过 RCV 热交换器的泄漏：当 RCV 压力低于 RRI 系统压力时，RCV 密封回流热交换器 (RCV003RF) 或 RCV 非再生热交换器 (如 RCV002RF) 或过剩下泄热交换器 (RCV021RF) 的传热管的破裂，都将产生 RRI 系统清水向 RCV 的泄漏，可能导致一回路误稀释。

(4) 联氨或氢氧化锂注入时导致的意外硼稀释：联氨的注入是为了减少一回路的氧含量，氢

氧化锂的注入是为了控制一回路的 pH 值。尽管注入频率比较低而且注入量少,但所带来的风险也必须考虑。

2.1.2 通过 RCV 冷水的注入 当 RCV 下泄管线隔离后,上充流体温度将降低,在上充管嘴附近可形成一股冷水团,特别是在主泵停运后且热虹吸流量低时,这种水团更容易形成。当主泵停运时,密封注入流量将在主泵泵壳形成一股冷水水团。

## 2.2 一回路意外去硼

2.2.1 除盐床在线错误 在一个燃料循环末期,稀释操作无效时,除盐床投入运行以降低一回路硼浓度。除盐床的在线错误将导致一回路的稀释,稀释速率取决于树脂效率和一回路的硼浓度。

2.2.2 冷水进入混床树脂导致的误稀释 如果 RRI 冷却水温控制失效或操作失误可导致 RCV 下泄温度过低,除盐床树脂将吸收更多的硼,而回到 RCV 的水其硼浓度将降低,注入一回路可能引起稀释。

2.2.3 混床树脂没有硼饱和 在除盐床接入一回路前必须进行硼饱和,若该项操作没有做或硼饱和不到位,低硼水将通过 RCV 注入到一回路。

## 2.3 低硼浓度的辅助系统接入引起的稀释

2.3.1 RRA 接入时引起的误稀释 在反应堆功率运行期间,RRA 通过 RCV 维持其水装量,以补充其可能出现的泄漏,在一个燃料循环末期 RRA 硼浓度可能低于一回路。正常情况下,在 RRA 接入一回路前必须先使 RRA 内流体充分与一回路混合,在 RRA 系统的温度和硼浓度与一回路冷剂接近时才接入一回路;但在异常或事故情况下 RRA 必须无条件立即接入一回路,否则将导致一回路的稀释。

2.3.2 安全注入系统(RIS)系统引起的误稀释 当对 RIS 的中压安全注入箱进行水压试验后,箱内的清水没有完全排空可能导致误稀释。

## 2.4 系统渗透导致的稀释

2.4.1 主泵热屏 当 RCP 压力低于 RRI 压力时,主泵热屏传热管的破裂会导致 RRI 除盐水注入一回路,但概率很低。

2.4.2 蒸汽发生器管道破裂事故 在 RCP 压力低于二回路压力时,蒸汽发生器管道破裂将导致二回路无硼水进入一回路而引起稀释。

2.4.3 蒸汽发生器传热管维修 在对蒸汽发生器传热管检查或堵管时(比如将传热管抽走而没有堵管),二回路的意外充水将导致无硼水进入一回路而引起稀释。

## 2.5 一回路充水或清洗操作导致的稀释

一回路充水期间,由于 REA 的硼浓度设定错误,当反应堆的水存储箱中硼浓度低时,堆坑充水以及用除盐水清洗堆坑等操作都可能引起稀释。

## 3 防误稀释改进方案概述

本文第 2 节系统地分析和研究了硼稀释事故、稀释途径及潜在的稀释起因,本节主要针对这些潜在的薄弱环节采取改进措施,以减轻事故发生的可能性或减轻事故的后果。

### 3.1 预防快稀释的改进措施

3.1.1 通过乏燃料水池维持 RRA 水装量 本项改进针对 2.3.1 节所述的问题。改进方案是将控制阀门由手动改为电动,当 RRA 未接入时,由乏燃料水池中硼水补偿 RRA 系统的泄漏,并维持 RRA 系统压力,改进后可以避免 RRA 接入时使堆芯出现意外的硼稀释。

3.1.2 取消应急稀释管线 针对 REA 应急稀释管线的意外注入的问题,改进方案是取消用于直接稀释的管线。

3.1.3 冷水和稀释源的自动隔离 本项改进针对本文第 2 节中所述的多个稀释源:通过 REA 正常稀释通道的水注入;通过硼回收系统(TEP)除气器向 RCV 返回管线泄漏的稀释;主泵停运时轴封冷却水注入;主泵热屏的泄漏。

针对以上的潜在的稀释源,改进方案分为:

通过增加自动闭锁、保护信号避免低硼浓度的水进入一回路;通过优化运行程序避免人为失误。

3.1.4 一回路流量丧失时将 RCV 泵吸入口切换到 PTR 水箱 目前,在大亚湾核电站的设计中,当执行 I 规程(运行故障处理程序)时,要求操纵员手动将 RCV 上充泵吸入口转换到反应堆水池和乏燃料水池冷却和处理系统(PTR),部分规程操纵员必须根据主泵 1 号密封注入水和容积控制箱中的低硼浓度水在一回路中聚集的情况,手动恢复 RCP002PO 泵的运行,使 RCV 上充泵

入口从容控箱向 PTR 水箱的切换滞后,存在潜在的冷水团或低硼浓度水团进入堆芯的风险。

改进方案是建立一个防误稀释保护 (ADP) 信号,当该信号出现时,自动转换 RCV 泵吸入口到 PTR 系统。

3.1.5 REA 硼浓度的自动补给改进 针对正常管线的意外注入 REA,导致补给水浓度低的问题。改进方案是增加一个报警信号,在要求的补给硼浓度与实际测量的硼浓度的差值达到设定值时给出报警,自动停止并禁止 REA 补给。

3.1.6 倍增时间 $<18$  s 时报警和控制棒棒束闭锁在反应堆进入临界由操纵员执行 F COR 001 程序 (堆芯操作相关的系统运行程序) 提出控制棒期间,如果发生意外稀释,可能导致不可控的反应性引入。

改进方案是在 RPN 盘上增加阈值继电器,当达到设定值时发出报警和控制棒棒束闭锁信号 C1,限制控制棒的提升。

### 3.2 防止慢稀释后果的改进

防止慢稀释后果改进的原则是防止“源量程通量高”信号发出时切换 RCV 吸入口到 PTR 水箱。在大亚湾核电站现有的设计中,当意外硼稀释发生后,源量程通量高信号发出报警并触发反应堆紧急停堆,然后进入 A7 规程 (故障和事故程序),由操纵员手动将 RCV 泵入口转到 PTR 水箱。切换操作要求在 20 min 内完成。

改进方案为将手动动作变为自动动作,缩小响应时间。

## 4 防误稀释改进概率风险分析

对防误稀释进行概率安全分析和评价,改进前由非均匀硼稀释事故引起的堆芯损伤频率 (CDF) 是  $6.33 \times 10^{-7}$ /堆·年,改进后是  $2.58 \times 10^{-8}$ /堆·年,仅仅为改进前 CDF 的 4%,CDF 降低达

96%。其中,预防快稀释的改进,其初因发生的概率为  $4.67 \times 10^{-5}$ ,这些改进可以使 CDF 值减小  $2.87 \times 10^{-7}$ 。关于防止慢稀释的改进,初因事件概率为  $1.5 \times 10^{-2}$ ,实施本项改进可以使 CDF 值减小  $3.20 \times 10^{-7}$ 。

## 5 结论

对意外硼稀释导致的临界事故的机理进行了分析,对大亚湾核电站硼稀释事故稀释途径及潜在的稀释起因进行了系统地分析和研究,介绍了针对这些潜在薄弱环节的改进措施,包括了设计、人因、设备和运行等方面。

(1) 设计方面:主要是针对补给操作的连锁控制,即在补给时,需进行一系列的操作和确认,并且补给操作可有信号自动终止或运行人员手动停止等,以及建立相应的监测手段和保护措施。

(2) 人因方面:主要是加强人员培训,提高人员素质,提高操纵员的操作熟练程度。

(3) 设备方面:主要是提高设备的材料和制造质量,以及运行过程中的预防性维修,减少设备的故障率,使设备安全可靠运行。

(4) 运行方面:通过行政隔离措施和相应的运行程序的优化。

(5) 通过上述改进措施的实施,有效地减轻了事故发生的可能性或减轻事故的后果,较大地提高了大亚湾核电站的核安全水平,尤其是有效地防止在停堆工时的误稀释事故,改善反应堆停堆工况下的安全水平。

参考文献:

[1] 柯国土,许汉铭.压水堆核电站停堆工况硼失控稀释事故风险研究 [R].中国核科技报告.2000.

(责任编辑:杨洁蕾)