

## 49-2 泳池式反应堆非能动虹吸破坏孔 方案设计及计算分析

岳芷廷, 宋云鹏, 刘兴民, 邹 耀, 吴园园

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

**摘要:** 基于安全考虑, 49-2 泳池式反应堆一回路冷却水系统将增设 1 个非能动虹吸破坏孔。在确定开孔位置的基础上, 利用 RELAP5/MOD3.3 程序分别对孔径为 1.5 cm 和 2.0 cm 时的虹吸破坏能力进行了计算分析。结果表明: 在堆停泵状态下, 一回路大破口失水事故时, 两种孔径的虹吸破坏孔均能破坏回路中的虹吸作用, 避免产生堆芯裸露的严重后果。为保守起见, 最终选择虹吸破坏孔的孔径为 2.0 cm。

**关键词:** 泳池式反应堆; 非能动; 虹吸破坏孔; RELAP5/MOD3.3

中图分类号: TL411

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)09-1601-04

doi: 10.7538/yzk.2014.48.09.1601

## Design and Computational Analysis of Passive Siphon Breaker for 49-2 Swimming Pool Reactor

YUE Zhi-ting, SONG Yun-peng, LIU Xing-min, ZOU Yao, WU Yuan-yuan

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Based on safety considerations, a passive siphon breaker will be added to the primary cooling system of 49-2 Swimming Pool Reactor (SPR). With the breaker location determined, the capability of siphon breakers with diameters of 1.5 cm and 2.0 cm was calculated and analyzed respectively by RELAP5/MOD3.3 code. The results show that in the condition of large break loss of coolant accident these two sizes of siphon breakers are able to break the siphon phenomena, and maintain the pool water level above the reactor core when the reactor and the pump are shutdown. In the end, to be conservative, the siphon breaker with diameter of 2.0 cm is adopted.

**Key words:** SPR; passive; siphon breaker; RELAP5/MOD3.3

49-2 泳池式反应堆(简称 49-2 泳池堆)是一个轻水慢化、冷却的研究型反应堆,是我国自行设计、建造、安装、调试和运行的,其设计额定功率为 3 500 kW,加强功率为 5 000 kW。1965 年 3 月开始大功率运行,至今已有 48 年<sup>[1]</sup>。

一般情况下,池式反应堆的出水管入口设置在堆水池底部,为防止一回路的出水管发生破口事故,产生虹吸作用,最终导致堆芯裸露,在出水管最高处设置虹吸破坏阀,来防止虹吸作用。与其他池式反应堆相同,49-2 泳池堆也

设置了虹吸破坏阀,但该阀门为手动阀,且处于堆水池盖板下方,盖板需要吊车才能提起,严重事故下很可能工作人员无法进入该区域提起盖板再手动开启阀门。自福岛核电站事故后,我国对现有核设施进行了全面的安全检查。为了提高49-2泳池堆应对地震灾害等极端事故的能力,提出对其一回路冷却剂管增设一个非能动的虹吸破坏孔。当发生一回路失流事故时,由于游泳池内水位的降低,该虹吸破坏孔便会自然露出水面,从而破坏虹吸作用,避免产生堆芯裸露的严重后果。

## 1 虹吸破坏孔设计

### 1.1 虹吸现象及虹吸破坏

虹吸是一种流体力学现象,可不借助泵而抽吸液体。如图1所示,49-2泳池堆的一回路出口管的结构为倒U形的管状结构(称为虹吸管),这种结构下,管子两端的液体压差能推动液体越过最高点,向另一端排放。当一回路出口段低于堆芯的位置发生破口时,在虹吸力的作用下,游泳池内的水位会不断降低,直至水位与破口处于同一水平线上。

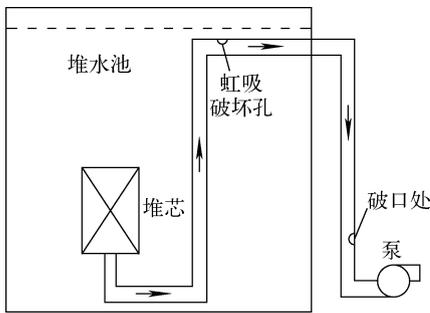


图1 虹吸原理图

Fig. 1 Schematic diagram of siphon break phenomena

虹吸破坏原理是在出水管最高处设置虹吸破坏孔,当发生一回路失流事故时,由于游泳池内水位的降低,该虹吸破坏孔便会自然露出水面,在压差的作用下,气体开始由该孔进入一回路系统,随着气体在回路中的不断积累,压力逐渐平衡,从而阻断了液体的流动,即实现了虹吸破坏。

### 1.2 开孔位置及尺寸选择

正常情况下,为了能及时起到破坏虹吸现

象的作用,虹吸破坏孔应设置在冷却剂出水管的制高点,但由于此次设计的虹吸破坏孔为非能动的,虹吸破坏孔始终处于开启状态,因此需考虑对反应堆正常运行的影响。

在设计中,由于反应堆冷却剂出水管的制高点距堆水池液面只有5 cm,正常运行时水位的波动也较大;并且管道转弯处有弯头,不适宜开孔,因此将开孔位置设置在弯头下方,此点距正常运行液面下方65 cm。

由于该虹吸破坏孔始终开启,反应堆正常运行时会使一回路的冷却剂发生旁通,为保证流经堆芯的冷却剂流量,开孔直径应在满足破坏虹吸的条件下尽量小。由于49-2泳池堆一回路中原有的手动开启虹吸破坏孔直径为1.8 cm,因此此次计算孔径分别选择1.5 cm和2.0 cm。

## 2 系统建模

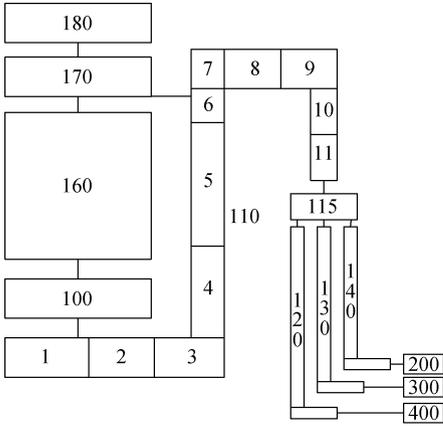
本工作中非能动虹吸破坏孔的计算采用RELAP5程序。该程序已成为核电厂热工水力及安全分析的基础,其适用范围几乎可覆盖核电厂所有热工水力瞬变和事故谱。在RELAP5/MOD3.3这个版本中,集中在了两相流理论研究、数值求解方法、计算机编程技巧以及各种规模实验等方面取得的研究成果。该程序已被应用于分析大量工程实例并与各国许多实验计划的实验数据进行了验证和比较,证实了其计算的准确性和可靠性。

运用RELAP5/MOD3.3程序的建模方法,针对49-2泳池堆一回路主要系统进行了建模<sup>[2]</sup>,主要包括堆水池和热管段,模型如图2所示。堆水池部分包括堆芯和堆芯上方水池。堆芯上方水池自下而上划分为160和170两部分。水池上方与大气相通。由于计算中只考虑堆芯的进出口压差,因此堆芯部分只模拟为水力部件。倒U形的堆芯出口热管段被划分为11段,以分析虹吸破坏孔起作用时各管段的密度变化。热管段110的第6段与堆芯上方水池170的水平连接处表示虹吸破坏孔的开孔位置。120、130、140分别为连接3台主泵的分管段。

## 3 计算结果分析

计算分析分为两部分:1) 由于该非能动虹吸破坏孔始终开启,反应堆正常运行时一回路

的冷却剂会发生旁通,即会有流体不流经堆芯而直接由堆水池流入一回路管段,为保证流经堆芯的冷却剂流量,对每个尺寸的虹吸破坏孔均要进行稳态计算,以验证开孔的旁通流量对堆芯冷却的影响程度;2) 计算在停堆工况下一回路发生大破口事故,当其他专设安全设施都失效时,在无需工作人员干预的情况下,虹吸破坏孔的设计是否满足设计要求。



100——堆芯;110——一回路冷却剂热管段;  
120、130、140——连接3台主泵的分管段;  
160、170——堆芯上方游泳池;110-6——虹吸破坏孔;  
180——游泳池上方大气空间

图2 49-2 泳池堆节点图

Fig. 2 System nodalization of 49-2 SPR

### 3.1 稳态工况下计算结果及分析

在反应堆正常运行状态下,堆芯进出口压差约为 8 950 Pa,流经堆芯的流量为 277. 76 kg/s。

当虹吸破坏孔孔径取 1. 5 cm 时,虹吸破坏孔处的压力约为 87 485 Pa,流经虹吸破坏孔的旁通流量约为 1. 60 kg/s,流经堆芯的冷却剂流量为 277. 51 kg/s,其对堆芯流量的影响只有 0. 09%。

当虹吸破坏孔孔径取 2. 0 cm 时,虹吸破坏孔处的压力约为 87 505 Pa,流经虹吸破坏孔的旁通流量约为 2. 84 kg/s,流经堆芯的冷却剂流量为 277. 31 kg/s,其对堆芯流量的影响只有 0. 16%。

由计算结果可知,虹吸破坏孔孔径为 1. 5 cm 和 2. 0 cm 时,对堆芯冷却剂的旁通作用非常小,即对堆芯的正常运行基本无影响。

### 3.2 停堆工况下大破口事故计算结果及分析

分析时作如下基本假设:1) 反应堆停堆期间一回路泵前发生大破口事故,破口直径为 265 mm 的管道双端断裂,此处标高为 0. 07 m; 2) 所有专设安全设施全部失效;3) 发生虹吸时,管道内无局部阻力。

虹吸破坏孔孔径为 1. 5 cm 时的大破口事故计算结果如图 3 所示。0 s 时发生大破口事故,破口处的流量接近 400 kg/s,堆水池内的水位由最初的距离堆芯上表面 5. 91 m 开始迅速下降,虹吸破坏孔的压力迅速下降;约 10 s 时,

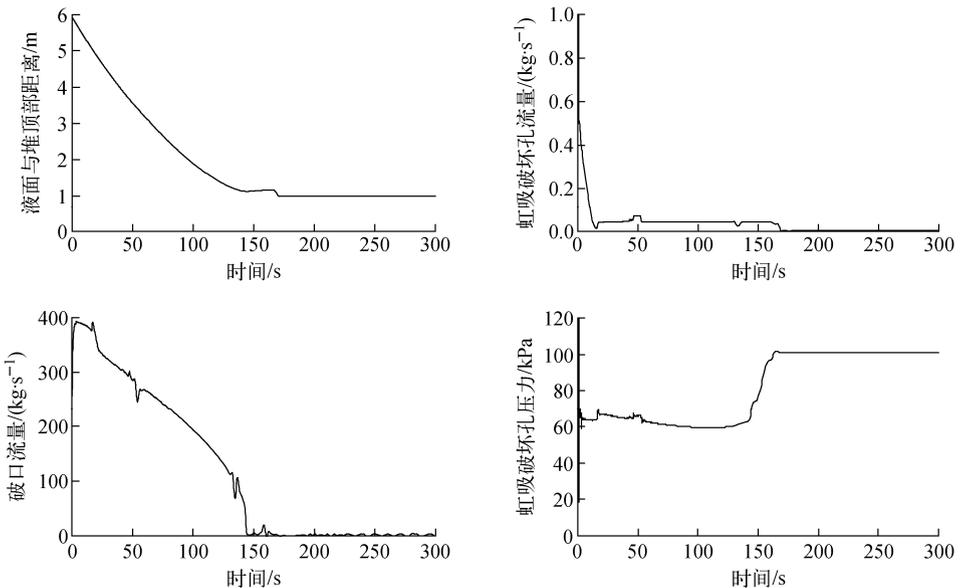


图3 虹吸破坏孔孔径为 1. 5 cm 时的大破口事故计算结果

Fig. 3 Calculation result of large break loss of coolant accident with siphon breaker diameter of 1. 5 cm

虹吸破坏孔露出水面,有气体开始进入回路,此时虹吸破坏孔处压力约为 6 500 Pa,随着虹吸破坏孔的作用和堆水池内水位的下降,破口处冷却剂的流量也随之下降;约 180 s 时,破口处的流量几乎为 0,虹吸破坏孔也不再有气体进入,虹吸破坏孔的压力约为大气压,此后堆水池水位基本稳定维持在距离堆芯上方 0.98 m 的位置,即实现了破坏虹吸作用,从而确保游泳池内的水位将堆芯淹没,满足设计要求。

虹吸破坏孔孔径为 2.0 cm 时的大破口事故计算结果如图 4 所示。与 1.5 cm 虹吸破坏孔结果相似,0 s 时发生事故,堆水池水位下降;约 10 s 时,虹吸破坏孔露出水面,此时虹吸破

坏孔处压力约为 7 000 Pa;约 130 s 时,破口处的流量几乎为 0,虹吸破坏孔几乎不再有气体进入,虹吸破坏孔的压力约为大气压,此后堆水池水位维持在距离堆芯约 1.83 m 的位置,即实现了破坏虹吸作用,满足设计要求。

以上计算结果表明,在停堆停泵状态下,一回路大破口事故时,1.5 cm 和 2.0 cm 的虹吸破坏孔均能满足设计要求,但 1.5 cm 的虹吸破坏孔在实现破坏虹吸作用时,水位距离堆芯上表面只有 0.98 m,而 2.0 cm 的虹吸破坏孔在实现破坏虹吸作用时,水位距离堆芯上表面有 1.83 m。出于保守考虑,最终将虹吸破坏孔孔径选择为 2.0 cm。

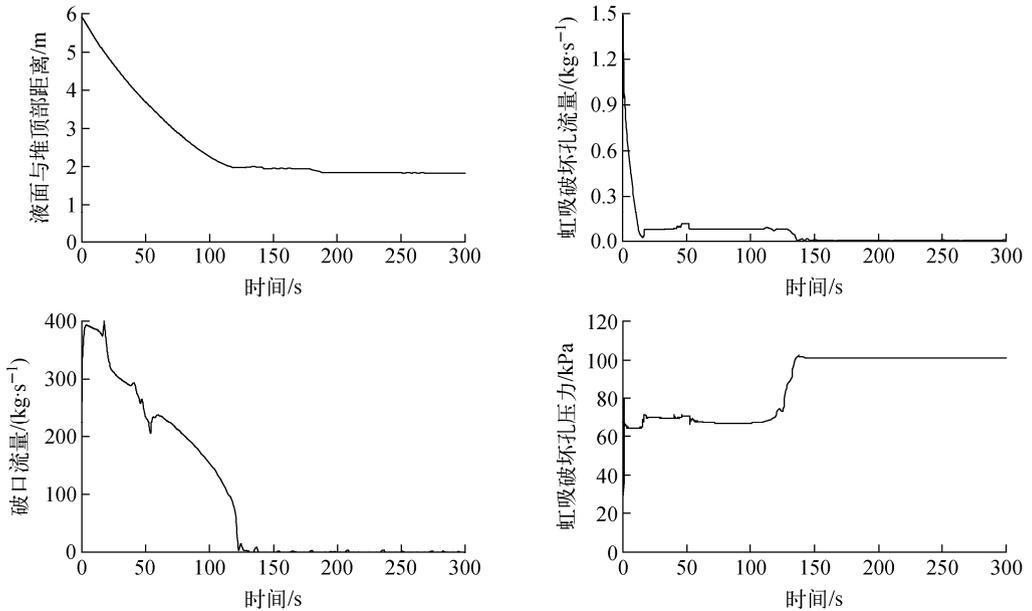


图 4 虹吸破坏孔孔径为 2.0 cm 时的大破口事故计算结果

Fig. 4 Calculation result of large break loss of coolant accident with siphon breaker diameter of 2.0 cm

## 4 结论

本文对增设的非能动一回路虹吸破坏孔进行了方案设计,根据堆的实际情况,确定了开孔位置;并在稳态运行及停堆的大破口事故工况下对两种不同孔径的虹吸破坏孔进行了计算分析,分析结果表明,两种孔径均能满足设计要求,但为了保守起见,最终选择开孔孔径为 2.0 cm。

本次计算分析,可为 49-2 泳池堆虹吸破坏

孔的改造提供理论依据,具有一定的实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] 储绍初. 49-2 游泳池反应堆(追溯性)安全分析报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,1990.
- [2] The RELAP5 Code Development Team. RELAP5/MOD3.3 code manual, volume II, Appendix A: Input requirements[M]. USA: Idaho National Engineering Laboratory, 2010.