

事故下安全阀超压排放瞬态特性研究

骆新芃¹ 魏倩文² 李俊峰¹ 杨彬¹

1 中广核研究院有限公司 2 中广核工程有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i2.7193

[摘要] 本研究针对小型堆反应堆冷却系统(RCS)中的高温高压介质安全阀超压排放瞬态分析问题,基于系统分析程序LOCUST进行建模和计算。针对RCS系统稳压器安全阀管道和抑压池进行建模,在此基础上对丧失主给水事故进行模拟,得到事故工况下安全阀下游管道温度、压力、流量、空泡份额等热工参数随时间的变化曲线。结果显示在丧失主给水事故工况下,RCS系统中安全阀后管道发生临界流现象,产生汽水两相工质,抑压水池能够吸收事故工况排放的高温高压介质。

[关键词] 小型堆; 安全阀; 超压排放; 瞬态特性

中图分类号: U261.154 **文献标识码:** A

The Transient Characteristics Research of Overpressure Discharge of Safety Valves Under Accident

Xinpeng Luo¹ Qianwen Wei² Junfeng Li¹ Bin Yang¹

1 China Nuclear Power Technology Research Institute Limited 2 China Nuclear Power Engineering Limited

[Abstract] The transient analysis of overpressure discharge from high-temperature and high-pressure medium safety valves has been carried out in the cooling system (RCS) of small reactor reactors. Modeling and calculation are conducted based on the system analysis program LOCUST. Based on the modeling of the RCS system safety valve pipelines, the loss of main feed-water accident was simulated. The variation of thermal parameters in the downstream pipeline were obtained, such as temperature, pressure, and void fraction. The results show that under accident conditions, steam water two-phase conditions are generated in the pipeline behind the safety valves in the RCS, and the suppression pool can absorb the high-temperature and high-pressure medium discharged under accident conditions.

[Key words] Small Reactor; Safety valve; Overpressure Discharge; Transient characteristics

小型压水堆具有功率小、安全性高、用途广泛的优点,近年来成为了国内外核反应堆的研究热点^[1]。在研究过程中,涉及一些十分重要的两相流系统和设备,同时存在一些特殊的热工水力现象,如高温高压介质安全阀超压排放。针对该特殊热工水力现象,需进行瞬态载荷建模分析计算,保证安全阀及其管路设计安全。

RCS系统稳压器设置有两列卸压管线,每列卸压管线上设置一台弹簧式安全阀。卸压管线上游与稳压器上部汽空间相连,下游通向抑压池。在每列卸压管线末端连接有一个完全淹没在抑压池水中的喷雾器。高温高压介质安全阀超压排放示意图如图1所示:

针对反应堆超压排放过程,国内外学者做过大量研究工作。詹文辉等^[2]基于热工水力分析程序RELAP5研究了恰希玛核电厂2号机组反应堆冷却剂系统低温超压瞬态过程。毕树茂等^[3]提出模块化小堆冷却剂系统超压保护设计基准,并基于ACP00开展分

析论证,确定了稳压器安全阀的容量。本研究采用系统分析程序LOCUST,针对RCS系统中的高温高压介质安全阀超压排放瞬态进行了建模与计算分析。

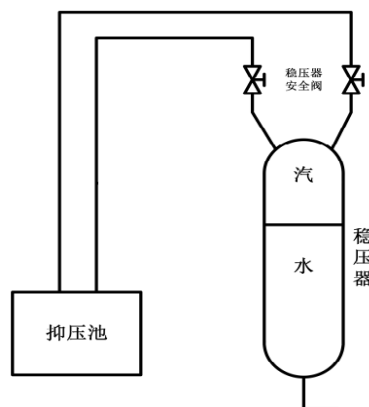


图1 高温高压介质安全阀超压排放示意图

1 RCS系统建模

RCS稳压器设置有两列卸压管线, 每列管线上装有一台弹簧式安全阀。卸压管线的上游经过安全阀后与稳压器上部汽空间相连, 下游通入抑压池中, 卸压管线末端还安装了一个喷洒器。当稳压器的压力超过安全阀的开启定值时, 安全阀打开, 将稳压器顶部的高温高压蒸汽卸放至抑压池内, 防止一回路超压。

初态下, 安全阀排放管线位于抑压水池自由液面以上的部分充满不可凝气体空气, 下部充满常温常压的水, 建模节点如图2所示。

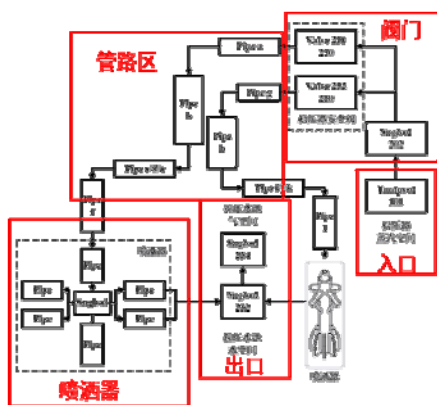


图2 RCS系统建模节点图

2 RCS系统计算

基于上述建模, 对RCS系统安全阀排放过程进行瞬态计算, 考虑了安全阀设计工况和丧失主给水事故两种事故工况, 得到事故工况下安全阀下游管道温度、压力、空泡份额等热工参数随时间的变化。

2.1 边界条件

根据LOCUST的输入要求和系统设计, RCS系统入口为稳压器的汽空间, 含气率为1.0, 压力随时间变化, 丧失主给水事故工况图像如图3所示。

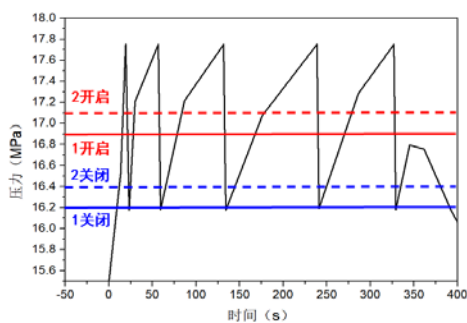


图3 丧失主给水事故入口压力

两列泄压管路具有不同的安全阀开启和关闭定值, 图中分别标注了随着压力变化两列安全阀开启和关闭的时间点。丧失主给水事故包含安全阀1和安全阀2各5次启闭过程。

2.2 事故工况计算

对RCS系统安全阀排放过程的丧失主给水工况进行瞬态计

算, 通过计算可以得到事故发生后300s内安全阀下游泄压管路内不同部件、位置处, 温度、压力、流量、含气率等参数随时间的变化情况。

图4为安全阀1管路安全阀出口处和管道末端压力随时间的变化图像, 可以看到安全阀开启后, 管道内压力由于阀门开启上游水蒸汽进入管道导致短时间压力升高, 在1s后压力趋于稳定, 出入口压差包含出入口高度差、管道壁面摩擦和弯管处的局部阻力。阀门关闭后管道内流体具有一定的初速度, 压力下降并由于长管道的因素, 引发一定的压力震荡。

上述过程共反复5次, 其过程具有一定的一致性, 由于运行过程中上游压力略有不同, 所以其运行过程的数值有少量区别, 但具有相同的变化过程。最后一次阀门关闭后50s压力稳定。

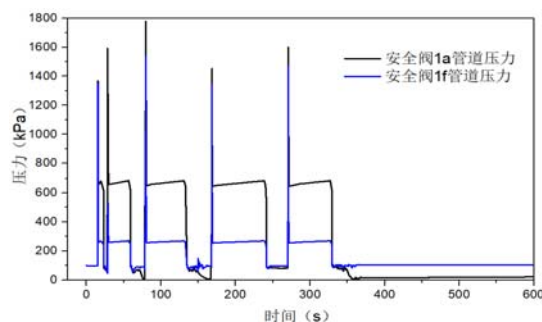


图4 安全阀后管道压力变化

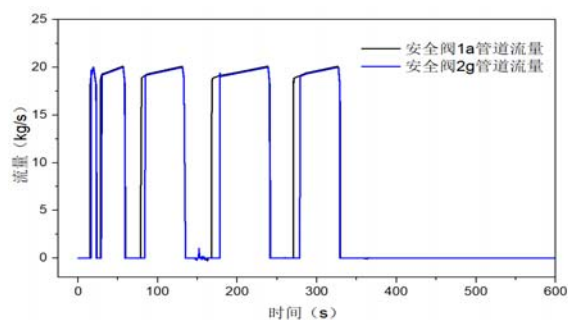


图5 安全阀后管道流量变化

图5为安全阀1、2管路流量随时间的变化图像, 其中a管道为安全阀1管道, g管道为安全阀2管道。可以看到安全阀开启后, 管道内流量由于阀门开启上游水蒸汽进入管道导致短时间流量升高, 稳定后流量随入口压力升高而升高, 阀门关闭后管道内流体具有一定的初速度, 压力下降并由于长管道的因素, 引发一定的压力震荡, 最后流量降为0。上述过程共反复5次。

图6为安全阀1、2管路空泡份额随时间的变化图像, 其中a管道为安全阀1管道入口, g管道为安全阀2管道入口。可以看到安全阀开启后, 管道内流量由于阀门开启上游水蒸汽进入初始充满空气的管道出现汽水两相状态, 导致短时间空泡份额降低, 稳定后流量随入口压力升高而降低, 阀门关闭后管道内流体具有一定的初速度, 压力下降并由于长管道的因素, 引发一定的压力震荡, 最后入口空泡份额稳定至1。上述过程共反复5次。

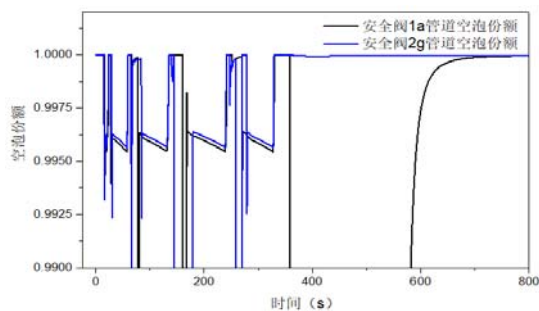


图6 安全阀后管道空泡份额变化

图7为安全阀1管安全阀出口处和管道末端流体温度随时间的变化图像,其中a管道为阀门出口处管道,f管道为管道与喷雾器连接处管道。可以看到阀门开启后,随着流体进入管道内,安全阀出口处管道内温度升高,管道出口处由于在初始工况充满空气,压力升高后空气温度升高。随着压力和流量的稳定,温度也趋于稳定。液相温度大于汽相温度,这是由于在安全阀出口出现临界流现象,流体出现两相状态,在使用的两流体模型中气液两相速度不同,汽相速度快,液相速度慢,液体出现一定的过热。阀门关闭后,管道内流体温度随着流体流出与震荡温度发生下降与震荡,根据空泡份额分布可知在一段时间后稳定,安全阀管道入口处稳定后为汽相,管道出口处稳定后为液相。

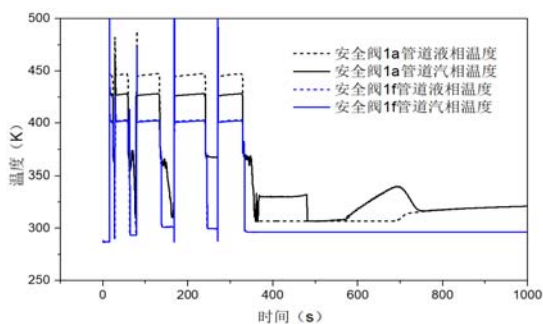


图7 安全阀后管道温度变化

图8为抑压水池气空间压力(背压)随时间的变化图,可以看到抑压水池压力随着阀门开启,水蒸汽经过安全阀管路进入抑压水池空间,随着注入压力逐渐升高,由于水蒸汽接触到抑压水池中的水而冷凝,引起的压力升高不大。阀门关闭后水蒸汽冷凝,

抑压水池中的水被压入管道中,逐渐平衡,压力略有下降。上述过程随着阀门开启与关闭反复5次,最终稳定。

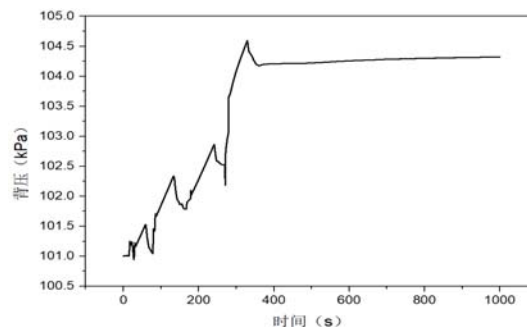


图8 抑压池气空间压力变化

3 结论

针对RCS系统中的高温高压介质安全阀超压排放瞬态进行分析,本研究采用系统分析程序LOCUST进行了建模与计算,针对RCS系统的稳压器安全阀管路进行建模,对主给水丧失工况进行了模拟,结论如下:

(1)在RCS系统安全阀超压排放过程中,安全阀开启后,管道内出现汽水两相工况空泡份额接近1,随着入口压力升高,管道内流量升高。

(2)安全阀超压排放后,流体经过安全阀管路通向抑压池,经过水空间冷凝,气空间压力上升较小,能够保证反应堆系统安全。

[参考文献]

- [1]张国旭,解衡,谢菲.小型模块式压水堆设计综述[J].原子能科学技术,2015,49(S1):40-47.
- [2]詹文辉,周全福.反应堆冷却剂系统低温超压分析[J].核科学与工程,2007,(02):167-172.
- [3]毕树茂,张丹,邱志方,等.模块式小堆稳压器安全阀容量设计方法研究[J].核安全,2020,19(03):65-69.

作者简介:

骆新芄(2000--),男,汉族,重庆人,本科,中广核研究院有限公司,工程师,从事核电厂工艺系统设计。