

熔盐堆堆芯应急排盐系统可靠性 分析及优化

梁荣健^{1,2} 孙亮洁^{1,2} 焦小伟¹ 王超群^{1,2} 杨群¹ 余笑寒^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 堆芯应急排盐系统作为熔盐堆特有的安全系统,具有排盐和余热排出功能,为熔盐堆提供了一种紧急停堆方式。为量化分析堆芯应急排盐系统的可靠性,以美国橡树岭实验室的熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)为研究对象,使用概率安全分析软件RiskSpectrum建立和计算MSRE堆芯应急排盐系统故障树,得到系统失效概率为 5.62×10^{-4} ,并进行最小割集分析和重要度分析,识别出影响系统失效的关键因素是外套管泄漏失效、控制冷冻阀冷却气的电磁阀共因失效和气动阀共因失效。通过套管换热元件中减少使用焊缝连接,以及采用不同类型部件控制冷冻阀冷却气,可明显降低系统失效概率。分析结果为液态熔盐堆应急排盐系统工程应用研究提供参考。

关键词 系统可靠性, 熔盐实验堆, 堆芯应急排盐系统, 故障树, 系统优化

中图分类号 TL364.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030604

Reliability analysis and optimization of core fuel salt emergency drain system for the molten salt reactor experiment

LIANG Rongjian^{1,2} SUN Liangjie^{1,2} JIAO Xiaowei¹ WANG Chaoqun^{1,2} YANG Qun¹ YU Xiaohan^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physisc, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Core fuel salt emergency drain system designed for fuel salt drain and afterheat removal, provides a safe shutdown mode for a molten salt reactor (MSR). It has important significance to evaluate reliability of the system for the safety of MSRs. [Purpose] This study aims to quantitatively analyze the failure probability of the system and identify the pivotal factors that affecting the system failures, and provide suggestions for optimization of the system in engineering application. [Methods] First of all, the fault tree analysis was employed to model the reliability of the core fuel salt drain system of MSRE through RiskSpectrum software. Then, the minimum cut sets and importance analysis was adopted to identify the most important basic event in fault tree of the system. Finally, two optimization methods, i.e., reduce the use of welds in bayonet cooling thimbles, and use different types of valves to isolate cooling gas flow of freeze valve, were proposed. [Results] The results show that failure probability of the system is 5.62×10^{-4} , and the identified pivotal factors affecting the system failures are welds leakage failures of

中国科学院青年创新促进会项目(No.Y929022031)资助

第一作者: 梁荣健, 男, 1997年出生, 2020年毕业于华北电力大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆安全

通信作者: 杨群, E-mail: yangqun@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-10-14, 修回日期: 2022-11-22

Supported by the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.Y929022031)

First author: LIANG Rongjian, male, born in 1997, graduated from North China Electric Power University in 2020, master student, focusing on the research of safety of molten salt reactor

Corresponding author: YANG Qun, E-mail: yangqun@sinap.ac.cn

Received date: 2022-10-14, revised date: 2022-11-22

thimbles and common cause failure of two groups valves of freeze valve. The optimization methods based on results of fault tree analysis can significantly reduce the system failure probability. **[Conclusions]** This study provides reference value for design and engineering application of the core fuel salt emergency drain system for MSRs.

Key words System reliability, Molten salt reactor experiment, Core fuel salt emergency drain system, Fault tree, System optimization

熔盐堆作为第四代核反应堆堆型之一,是当前核能领域研究的热点。以液态熔盐堆为例,它将燃料溶解于卤化盐中,熔盐作为核燃料的载体又充当冷却剂导出堆芯核热^[1-2]。当熔盐堆出现反应性失控、主循环回路泄漏、冷却系统不能带走堆芯热量等非正常运行工况时,均能够通过解冻堆芯底部的冷冻阀^[3]、排出堆芯熔盐的方式来控制反应性或停堆。如美国橡树岭实验室设计的熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE),采用含四氟化铀的氟化盐作为主循环回路熔盐,通过排盐改变堆芯活性区体积,使反应堆处于次临界状态或无盐状态,终止了堆芯自持性链式裂变反应^[4]。MSRE的堆芯应急排盐系统经过运行的检验并保留下完整的设计参数^[5],为当前熔盐堆堆芯应急排盐系统设计提供了参考价值。然而,与成熟的水堆运行经验相比,MSRE堆芯应急排盐系统的运行经验较为贫乏,系统的可靠性是否满足当前核安全监管要求以及系统是否存在设计短板还有待研究和解决。

可靠性是系统在规定的条件和指定的时间段内执行所需功能的概率。故障树是开展可靠性分析的有效方法,它将选定的系统失效状态定义为顶事件,并逐层分析造成系统这一失效状态的所有原因。故障树能够揭示引起系统失效的各种组合,还能计算系统失效概率和挖掘系统薄弱环节^[6-9]。借助故障树分析,Chisholm等^[10]量化分析MSRE冷冻阀未能按需解冻的概率,并对控制冷冻阀冷却气的气动阀进行敏感性分析,结果表明气动阀的冗余设计有利于冷冻阀按需解冻。Chisholm等^[11]建立并计算MSRE排盐罐余热排出系统故障树、熔盐在排盐罐间转移的故障树,初步分析了应急排盐系统余热排出过程中可能的失效机理。上述研究量化描述了MSRE堆芯应急排盐系统的部件或子系统的失效概率。此外,系统中还存在其他可能的失效原因,如管道、套管换热元件的破裂泄漏等,针对系统整体的可靠性评估还有待研究。通过识别导致系统失效的组合及关键因素,能够指引系统优化的方向。

为开展MSRE堆芯应急排盐系统可靠性分析,本文首先确定系统设备构成并进行设备的失效模式与影响分析,利用概率安全分析软件RiskSpectrum建立系统故障树。其次,确定设备的失效数据并分

析适用性,定量计算系统失效概率。通过故障树最小割集、重要度和敏感度等识别影响系统失效的关键因素。最后,在故障树分析结果的基础上提出合理的优化方案,为系统的设计与工程应用提供参考。

1 MSRE堆芯应急排盐系统简介

MSRE堆芯应急排盐系统可分为排盐和余热排出两个阶段。排盐阶段的主要设备如图1(a)所示,堆芯底部连接排盐管线103,103管道中的冷冻阀FV-103在熔盐堆正常运行时处于冻结模式,即阀内熔盐在包覆的冷却气作用下凝固。管道103的管壁设有电阻式加热器,强电流通过103管道的管壁并产生热量,用于加热管内熔盐。在103管道电阻式加热器的作用下,FV-103在隔断冷却气(关闭气动阀HCV-919A1或HCV-919B1)后能迅速解冻。当FV-103融通后,堆芯熔盐依靠重力排出。MSRE正常运行工况下,冷冻阀FV-105和FV-106处于解冻模式。因此,当MSRE堆芯进行应急排盐时,熔盐分别沿管道105和106排入排盐罐FDT-1和FDT-2。每个排盐罐均配备余热排出系统,若其中一个排盐罐余热排出系统失效,还可通过管道108、109转移罐内熔盐。排盐罐均设有氦气进出口,如排盐罐FDT-1通过气动阀HCV-572A1向罐内注入氦气,并关闭气动阀HCV-544A1和HCV-573A1,利用氦气压将罐内熔盐转移至另一排盐罐^[12-13]。

余热排出阶段系统的主要设备如图1(b)所示,系统依靠32根具有三层结构(内管、中间管和外套管)的套管换热元件导出熔盐余热。系统启动和冷却水循环过程如下:罐内熔盐的温度超过约704℃时,与罐内热电偶连接的温度开关自动将电磁阀ESV-806断电(开启),使给水箱的冷却水进入汽包;汽包中的水沿套管换热元件的内管向下流动,吸收热量后蒸发并沿套管换热元件的中间管返回汽包,高温蒸汽经过管道804运送至冷凝器,冷凝后经过管道878、802和806回流至汽包。其中,给水管线806中的气动阀LCV-806A用于调节流量,系统未启用时其为关闭状态。冷凝器采用水冷的管壳式设计,正常运行工况下使用塔冷却水冷却;当塔冷却水泵的排放压力低于限值,压力开关将电磁阀HCV-882C2断电,以气动的方式使三通阀HCV-882C1转

向,改为使用工艺用水冷却冷凝器^[14]。

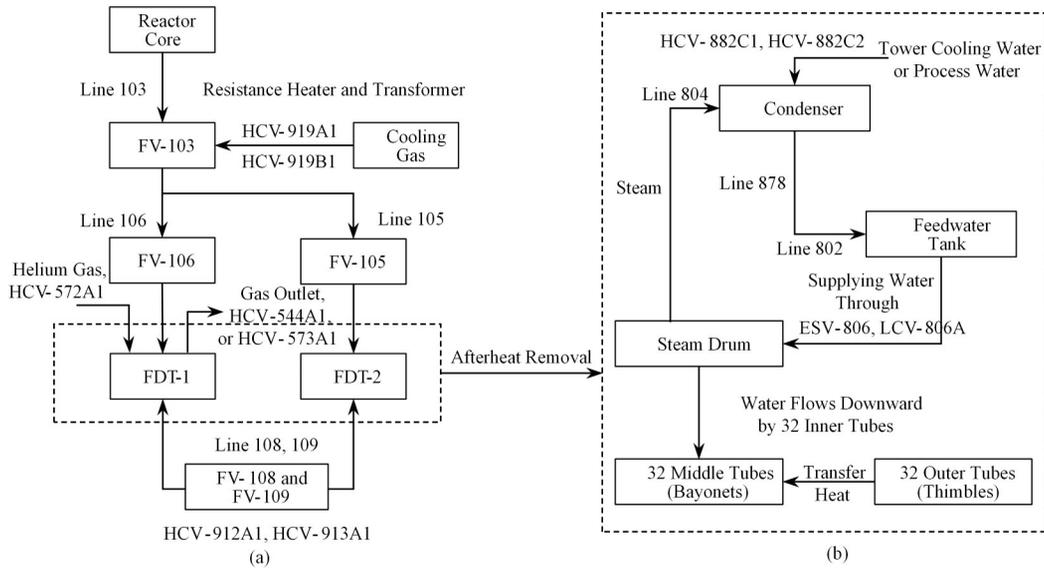


图1 MSRE堆芯应急排盐系统示意图(a)和余热排出系统示意图(b)
Fig.1 Schematic diagram of MSRE core fuel salt emergency drain system (a) and schematic diagram of afterheat removal system (b)

2 故障树模型

2.1 故障树顶事件

堆芯排盐和余热排出是MSRE堆芯应急排盐系统的主要功能,本文将系统故障树的顶事件定义为排盐失效或余热排出失效。排盐失效即堆芯熔盐不能及时地排出或排盐过程中熔盐发生泄漏,熔盐泄漏会引发其他事故后果,尽管熔盐已排出堆芯终止了裂变链式反应,但仍认为系统失效。余热排出失效即不能按照要求冷却熔盐,过高的熔盐温度将威胁排盐罐和套管换热元件的完整性,余热排出系统正常运行可避免熔盐温度持续升高^[11]。

2.2 失效模式与影响分析

根据系统故障树顶事件定义,逐层地分析系统中可能出现的故障。首先,排盐阶段中可能出现故障的部件及其失效模式有:1)排盐管段103、105和106泄漏失效;2)冷冻阀未能按需解冻,熔盐不能及时排出堆芯。其次,余热排出阶段可能出现故障的部件及其失效模式有:1)换热元件外套管破裂或泄漏;2)换热元件中间管破裂或泄漏;3)给水管线806中阀门打开失效;4)循环冷却水管道或冷凝器换热管破裂或泄漏;5)冷却水泵运行失效;6)冷凝器冷却水转向阀不能转向。当余热排出系统故障,进行熔盐转移过程中可能出现故障的部件及其失效模式有:1)排盐罐上方的冷冻阀或气体出口阀门未能保持关闭;2)熔盐转移管道108、109中的冷冻阀未能

解冻;3)换热元件外套管破裂或泄漏,外套管与排盐罐连接的焊缝泄漏;4)排盐罐气体进口阀门打开失效。针对以上部件失效模式进行影响分析,影响结果如表1所示。

2.3 故障树建立

为简化系统故障树分析,本文故障树不考虑人工控制和人因失效。基于RiskSpecrtum软件建立的系统故障树模型如图2所示,故障树分为三个模块:排盐故障、FDT-1故障和FDT-2故障。

排盐故障分为排盐管道破裂或泄漏、冷冻阀FV-103未能按需解冻。其中,冷冻阀未能按需解冻故障树如图3所示,管道103电阻式加热器运行失效归结为供电设备运行失效;隔断FV-103冷却气失效归结为气动阀HCV-919A1和HCV-919B1均关闭失效,这两个气动阀分别由电磁阀HCV-919A2和HCV-919B2控制,且气动阀组和电磁阀组均考虑为共因失效组。

排盐罐故障分为罐内熔盐泄漏或余热排出系统运行故障。一方面,换热元件外套管破裂或泄漏将导致熔盐进入气隙层,而气隙层与排盐罐所在单元环境相连通^[15],因此认为系统出现故障。另一方面,排盐罐余热排出系统运行失效的故障树(以FDT-1为例)如图4所示,故障因素分别有:向汽包供水失效、冷凝器运行失效和换热元件中间管破裂或泄漏,中间管破裂或泄漏将导致循环冷却水进入气隙层,冷却水泄漏可能导致余热排出系统运行故障。

若FDT-1余热排出系统发生故障而FDT-2余热

表1 部件失效模式与影响分析
Table 1 Component failure modes and effects analysis

设备名称 Component name	失效模式 Failure modes	影响分析 Effect analysis
管段 103, 105 或 106 Piping 103, 105 or 106	破裂或泄漏 Rupture or leak	堆芯熔盐泄漏, 排盐过程故障 Fuel salt leak from line 103, 105 or 106, failure of draining
冷冻阀 FV-103 Freeze valve 103	打开失效 Fail to thaw	堆芯熔盐无法依靠排出 Fuel salt can not be drained by gravity
换热元件外套管 Thimbles	破裂或泄漏 Rupture or leak	熔盐向气隙层泄漏, 排盐罐储存熔盐失效 Fuel salt leak from thimbles, the tank fails to storage salt
换热元件中间管 Bayonets	破裂或泄漏 Rupture or leak	汽包中的水向气隙层泄漏, 余热排出冷却水循环故障 Steam drum water leak from bayonets, circulating water fault
给水管道的 806 阀门 Valves of line 806	打开失效 Fail to open	向汽包给水失效 Failure to supply water to steam drum
冷却水泵 Cooling water pump	运行失效 Fail to run	向冷凝器供应塔冷却水失效 Failure to supply tower cooling water to condenser
转向阀 HCV-882C1 Diversion valve HCV-882C1	不能改变位置 Fail to change in position	向冷凝器供应备用的工艺用水失效 Failure to supply process water to condenser
管段 804, 878, 802 和冷凝器换热管 Piping 804, 878, 802 and heat exchanger tubes	破裂或泄漏 Rupture or leak	蒸汽或冷却水泄漏, 余热排出冷却水循环故障 Steam drum water leak from pipes, circulating water fault
气动阀 HCV-909A1, HCV-910A1 及排盐罐气体出口阀门 Pneumatic valve HCV-909A1, HCV-910A1 and outlet valves of FDT	不能保持位置 Fail to remain in position	排盐罐加压失效, 熔盐无法依靠氦气压转移 Failure to pressurize the fuel drain tank, fuel salt can not be transferred by Helium gas pressure
冷冻阀 FV-108, FV-109 Freeze valve 108 and 109	打开失效 Fail to thaw	熔盐从管段 108 和 109 转移失效 Fuel salt can not be transferred through line 108 and 109
排盐罐及外套管 Fuel drain tank and thimbles	破裂或泄漏 Rupture or leak	排盐罐完整性破坏, 排盐罐加压失效 The integrity of FDT fault, failure to pressurize the fuel drain tank
排盐罐进口阀门 Valves of inlet line in FDT	打开失效 Fail to open	氦气无法进入排盐罐, 排盐罐加压失效 Failure to pressurize the fuel drain tank by helium gas

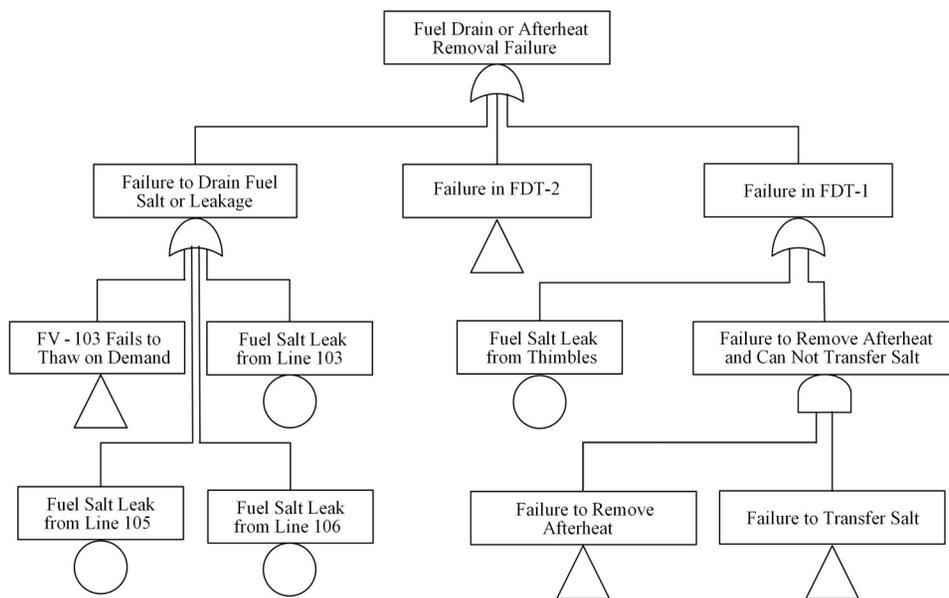


图2 堆芯应急排盐系统故障树
Fig.2 Fault tree for core fuel salt emergency drain system

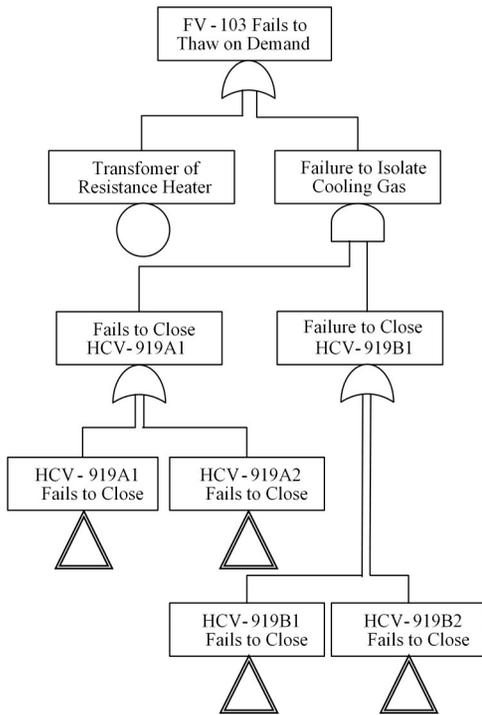


图3 冷冻阀FV-103按需解冻失效故障树

Fig.3 Fault tree for failure of freezing valve FV-103 to thaw on demand

排出系统运行正常,可将FDT-1的熔盐转移至FDT-2,熔盐转移故障树如图5所示。系统转移熔盐失效可归结为:罐内加压失效或转移管线冷冻阀未能按需解冻。气体进口阀门HCV-572A1打开失效、出口阀门HCV-544A1和HCV-573A1不能保持关闭、冷冻阀不能保持冻结状态、换热元件外套管焊缝及其

与排盐罐连接的焊缝泄漏等,均将导致排盐罐无法利用氦气压力转移熔盐。排盐管线中的冷冻阀FV-105和FV-106的冷却气分别由气动阀HCV-909A1和HCV-910A1控制,转移管线中的冷冻阀FV-108和FV-109的冷却气分别由气动阀HCV-912A1和HCV-913A1控制。

3 计算与结果分析

3.1 定量分析

设备失效数据是系统故障树定量分析的基础,确定系统各设备的失效数据必须明确界定设备的边界。系统故障树涉及气动阀、电磁阀、转向阀、变压器、塔冷却水泵、管道、冷凝器等相关设备。其中,气动阀HCV-919A1和HCV-919B1设备边界包括阀门本体和控制回路(电磁阀HCV-919A2和HCV-919B2),其余气动阀设备边界仅包括阀门本体。转向阀HCV-882C1设备边界包括阀门本体和控制回路(电磁阀HCV-882C2)。电磁阀设备边界仅包括阀门本体,未考虑电磁阀控制回路。变压器、塔冷却水泵等设备边界仅包括其本体,未考虑其他支持设备。系统管道设备边界包括管段和管段连接的焊缝,冷凝器设备边界仅包括换热管。目前,MSRE堆芯应急排盐系统各设备的失效数据较为缺乏,本文将选取文献[16-17]中核电厂设备通用失效数据进行研究。根据设备类型、边界划分和失效模式,选取的失效数据如表2所示,并假设数据均服从对数正

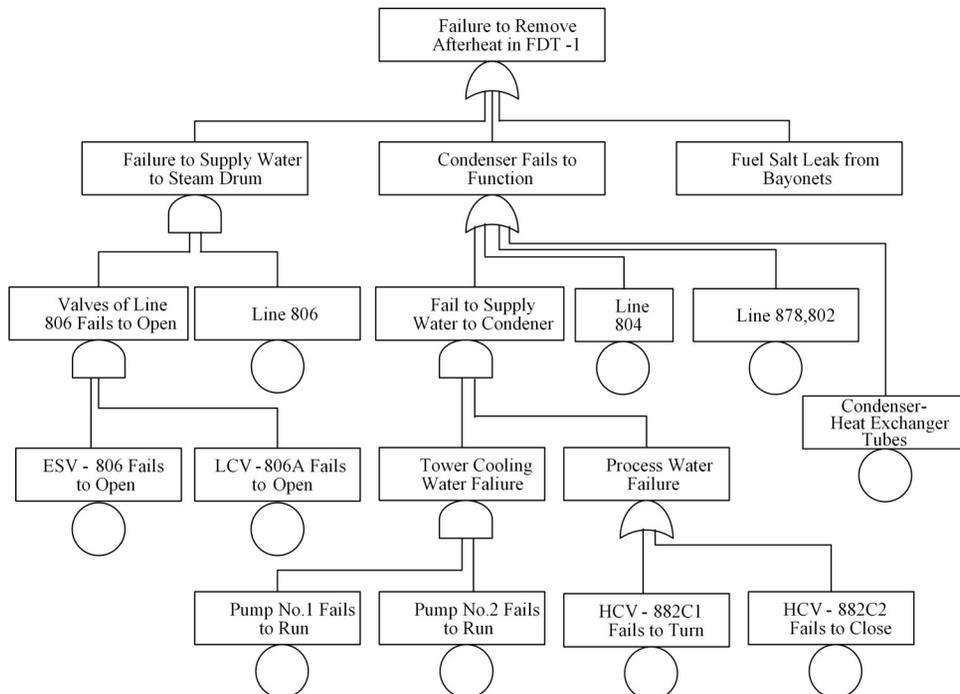


图4 一号排盐罐余热排出系统故障树

Fig.4 Fault tree for failure of afterheat removal system in fuel drain tank #1

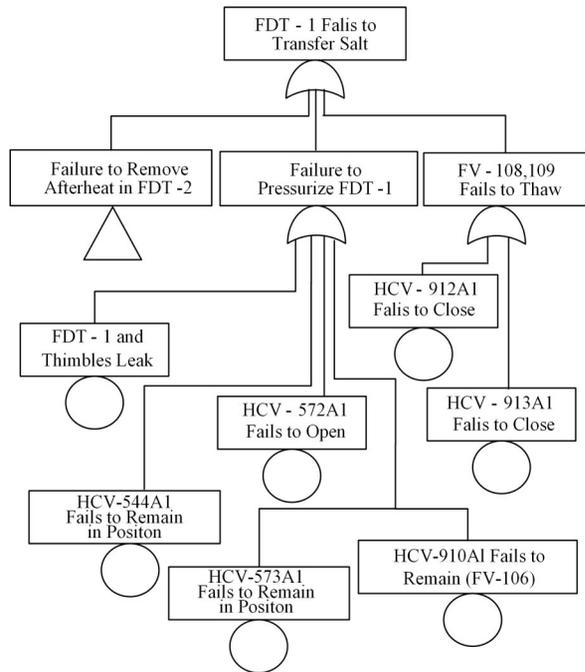


图5 一号罐至二号罐转移熔盐故障树

Fig.5 Fault tree for failure of transferring fuel salt from tank #1 to tank #2

态分布。设备的构造、工作原理和运行环境相同或相近,且边界划定、失效模式相符合时,设备的通用失效数据具有一定的参考价值。因此,本文基于核电厂设备通用失效数据开展MSRE堆芯应急排盐系统故障树的定量分析。

因故障树模型定量分析的需要,本文作以下计算假设:1)假设排盐过程任务时间为1 h,余热排出过程任务时间为500 h。2)共因失效组采用β模型,β因子取通用值^[8]:0.024。3)系统管道失效概率由管段、焊缝失效概率及其数量共同确定,并保守估计了系统各个管道的管段和焊缝数量。4)由于熔盐高温和辐射影响,与熔盐直接接触的管道失效概率需进行修正^[18],其中高温修正因子保守估计为1.5,辐照修正因子保守估计为2.0。系统管道的失效数据如表3所示。5)为定量描述32根套管换热元件外套管出现失效的概率,假设外套管之间满足相互独立性,则32根外套管出现失效的概率P为:

$$P = 1 - (1 - p)^{32} \quad (1)$$

式中:p为单根外套管的失效概率。32根中间管出现失效的概率与式(1)计算原理相同。

表2 部件可靠性数据
Table 2 Component reliability data

部件类型 Component types	失效代码 Failure code	失效率 Failure rate	单位 Units	误差因子 Error factor
气动阀 Pneumatic valve	FC	1.20×10^{-3}	/demand	1.62
	FO	8.40×10^{-4}	/demand	5.00
	PR	1.20×10^{-7}	/h	3.00
电磁阀 Solenoid valve	FC	1.70×10^{-3}	/demand	2.30
	FO	1.00×10^{-3}	/demand	2.66
转向阀 Diversion valve	CP	3.00×10^{-3}	/demand	2.28
变压器 Transformer	FR	1.00×10^{-6}	/h	3.00
塔冷却水泵 Tower cooling water pump	FR	2.95×10^{-5}	/h	3.70
管段 Piping section	RU	1.00×10^{-9}	/h	30.00
焊缝 Welds	RU	3.00×10^{-9}	/h	30.00
冷凝器换热管 Heat exchanger tubes	RU	5.00×10^{-9}	/h	10.00

表3 管段及焊缝数据
Table 3 Piping sections and welds number

管段 Piping section	管段数 Piping section number	焊缝数 Welds number	修正系数 Correction factor	总失效率 Total failure rate / h
103	5	3	3.0	4.20×10^{-8}
105, 106	3	2	3.0	2.70×10^{-8}
806	10	10	1.0	4.00×10^{-8}
878, 802	2	3	1.0	1.10×10^{-8}
单根外套管 Single thimble	2	1	3.0	1.50×10^{-8}
单根中间管 Single bayonet	5	6	1.0	2.30×10^{-8}

由以上失效数据计算得到MSRE堆芯应急排盐系统失效概率为 5.62×10^{-4} ,不确定性分析的均值为

5.61×10^{-4} ,90%置信水平的下限值(5%分位值)为 6.31×10^{-5} ,中位值为 1.50×10^{-4} ,上限值(95%分位值)

为 1.80×10^{-3} 。

3.2 最小割集分析

为找出影响系统失效的关键因素,对故障树进行最小割集分析。割集是故障树中一些事件的集合,集合中的事件同时发生,顶事件必定发生。若将集合中某个事件删去就不是割集,称该集合为最小割集(Minimum Cut Set, MCS)。堆芯应急排盐系统故障树贡献份额大于1%的MCS如表4所示。

最小割集1、2中的基本事件FDT1-TB-RU和FDT2-TB-RU分别为排盐罐FDT-1和FDT-2的外套管发生破裂。排盐罐及外套管是储存熔盐的第一道屏障,且FDT-1或FDT-2外套管失效对系统失效概率的贡献度为42.68%,因此外套管破裂或泄漏失效是最关键的基本事件。

最小割集3、4中的基本事件HCV-919A2B2-ALL是电磁阀HCV-919A2和HCV-919B2共因失效,HCV-919A1B1-ALL为气动阀HCV-919A1和HCV-919B1共因失效。两个电磁阀共因失效和两个气动阀共因失效对系统失效概率的贡献度分别为7.26%和5.12%,对系统失效产生一定影响。

3.3 重要度分析

故障树还可借助4种重要度概念进行分析:割集重要度(Fussel-Vessely Factor, FV)、贡献份额(Fractional Contribution, FC)、风险降低因子(Risk Decrease Factor, RDF)和风险增加因子(Risk Increase Factor, RIF)。FV和FC反映基本事件对顶事件发生相对贡献大小;RDF表示基本事件发生概

表4 堆芯应急排盐系统故障树最小割集结果
Table 4 Minimum cut sets of core fuel salt emergency drain system

序号 No.	概率 Probability	份额 Portion / %	基本事件 Basic event
1	2.40×10^{-4}	42.68	FDT1-TB-RU
2	2.40×10^{-4}	42.68	FDT2-TB-RU
3	4.08×10^{-5}	7.26	HCV-919A2B2-ALL
4	2.88×10^{-5}	5.12	HCV-919A1B1-ALL

率降为0引起顶事件发生概率减小的变化率;RIF表示基本事件发生概率为1引起顶事件发生概率增加的变化率。FV割集重要度大则表示该基本事件是风险重要的,RIF重要度衡量系统对此部件的需求程度,RIF越大则表明系统需要该部件保持可用^[19]。

本文选取堆芯应急排盐系统故障树中敏感度较高且贡献率大于1%的基本事件进行重要度分析,得到的基本事件与MCS分析中的一致,其重要度如表5所示。RIF重要度均为 1.78×10^3 ,表明系统对外套管保持可用、避免阀门共因失效的需求程度一致。

余热排出是系统的重要功能,选取FDT-1余热排出系统故障树中贡献率大于1%的基本事件进行重要度分析,如表6所示。从FV重要度来看,基本事件FDT1-BYN-RU(换热元件中间管发生破裂)对余热排出系统失效概率的贡献度高达91.70%。余热排出系统主要依靠换热元件中的循环冷却水导出熔盐余热,中间管是影响排盐罐余热排出系统失效的关键因素。从RIF重要度来看,余热排出系统需要中间管、给水管806和冷凝水回流管道878、802均保持可用。

表5 堆芯应急排盐系统故障树基本事件重要度
Table 5 Importance of partial basic events in core fuel salt emergency drain system

基本事件 Basic events	割集重要度 FV	风险降低因子 RDF	风险增加因子 RIF	敏感度 Sensitivity
FDT1-TB-RU	4.27×10^{-1}	1.74	1.78×10^3	7.86
FDT2-TB-RU	4.27×10^{-1}	1.74	1.78×10^3	7.86
HCV-919A2B2-ALL	7.26×10^{-2}	1.08	1.78×10^3	1.77
HCV-919A1B1-ALL	5.12×10^{-2}	1.05	1.78×10^3	1.53

表6 一号余热排出系统故障树基本事件重要度
Table 6 Importance of partial basic events in No.1 afterheat removal system

基本事件 Basic events	割集重要度 FV	风险降低因子 RDF	风险增加因子 RIF	敏感度 Sensitivity
FDT1-BYN-RU	9.17×10^{-1}	12.00	2.49×10^3	52.90
FDT1-806-RU	4.98×10^{-2}	1.05	2.49×10^3	1.52
FDT1-878-802-RU	1.37×10^{-2}	1.01	2.49×10^3	1.14

3.4 优化讨论

基于故障树最小割集和重要度分析,本文提出

两种方法对MSRE堆芯应急排盐系统进行优化,并计算优化后的系统失效概率:1)套管换热元件的外

套管与熔盐直接接触的部分不采用焊缝连接,使用一体化设计,并减少中间管的焊缝数量至3个;2)根据安全设计的多样性原则^[7],采用不同类型、不同工

作原理的两个串联阀门来控制FV-103冷却气体,以减小阀门的共因失效对系统的影响。对两种优化方法进行分析,其优点及合理性如表7所示。

表7 两种优化方法的合理性分析
Table 7 Rationality analysis of two optimization methods

优化方法 Optimization methods	合理性 Rationality
1	在制造工艺允许的条件下,套管换热元件可减少使用焊缝数量,降低管段的复杂程度 Under the conditions allowed by the manufacturing process, reduce use welds in thimbles and bayonets, complexity of pipe can be lowered
2	采用不同类型的部件,减小共因失效对冷冻阀解冻失效的影响,同时不影响反应堆运行时冷冻阀能保持冷冻模式 Use different types of components, lower effect by common cause failure on freeze valve thawing, meanwhile do not affect the freeze valve's freeze mode when reactor is operating

由以上优化方法对系统故障树进行计算分析得到系统的失效概率为 1.40×10^{-5} ,约降低为系统优化前的2.5%。优化方法可有效降低系统故障概率,且方法具有合理的可行性,为系统的工程应用和优化设计提供参考。

4 结语

本文针对MSRE堆芯应急排盐系统设计,确定了系统故障树顶事件并对系统设备进行故障模式与影响分析,准确地建立系统故障树。其次,利用IAEA核电厂同类型部件的通用可靠性数据和概率安全分析软件进行定性、定量的故障树分析。分析结果表明:

1)换热元件的外套管故障是最重要的基本事件,一个排盐罐的外套管出现破裂失效对系统失效的贡献度为42.70%。外套管破裂导致熔盐进入气隙层,气隙层与排盐罐所在单元联通。因此影响系统失效的关键因素是外套管破裂失效。此外,阀门的共因失效是系统中较为重要的基本事件,而换热元件中间管破裂是余热排出过程失效的关键因素。

2)根据故障树分析结果提出的优化方案是:减少套管换热元件焊缝连接数量、采用不同类型部件控制冷冻阀系统。优化前系统失效概率为 5.62×10^{-4} ,优化后系统失效概率为 1.40×10^{-5} ,约降低为系统优化前的2.5%,优化方法合理可行。

本工作是对MSRE堆芯应急排盐系统概率安全评价的初步研究,建立故障树的过程中作出了相关假设和简化,且计算数据来源于通用可靠性数据或经验数据,因此计算结果与实际仍存在一定偏差。但通过分析得到影响系统的关键因素,并提出合理的优化方法,仍可为认为当前熔盐堆应急排盐系统的工程应用与设计研究提供参考。

作者贡献声明 梁荣健:负责建立故障树并计算,提出优化方法,撰写文章;孙亮洁:负责提供文献支持和建议;焦小伟、王超群:负责贡献技术和数据支持;杨群:负责提供研究思路、技术路线、指导和审阅;余笑寒:负责研究项目管理、审阅。

参考文献

- 于世和,李晓晓,刘亚芬,等.熔盐实验堆堆芯物理参数研究[J].核技术,2019,42(3):030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030604.
YU Shihe, LI Xiaoxiao, LIU Yafen, *et al.* Study on core physical parameters for molten salt experimental reactor [J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(3): 030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030604.
- Yu S H, Liu Y F, Yang P, *et al.* Neutronics analysis for MSR cell with different fuel salt channel geometries[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(1): 9. DOI: 10.1007/s41365-020-00844-0.
- Jiang X Y, Lu H J, Chen Y S, *et al.* Numerical and experimental investigation of a new conceptual fluoride salt freeze valve for thorium-based molten salt reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31: 16. DOI: 10.1007/s41365-020-0729-5.
- 于世和,刘亚芬,杨璞,等.熔盐实验堆备用停堆方案及其可行性分析[J].核技术,2019,42(7):070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070603.
YU Shihe, LIU Yafen, YANG Pu, *et al.* Standby shutdown modes and feasibility analysis of molten salt experimental reactor[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(7): 070603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070603.
- Robertson R. MSRE design and operations report. Part I. description of reactor design[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1965.

- 6 Obaidurrahman K, Arul A J, Ramakrishnan M, *et al.* Nuclear reactor safety[M]. Physics of Nuclear Reactors. Amsterdam: Elsevier, 2021: 449 - 510. DOI: [10.1016/b978-0-12-822441-0.00015-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822441-0.00015-7).
- 7 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 182.
ZHU Jizhou. Nuclear reactor safety analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 182.
- 8 Chisholm B M. Development of a technology-inclusive methodology to analyze the environmental, safety, and health risks associated with advanced nuclear reactor designs as demonstrated on the molten salt reactor experiment[D]. Nashville, Tennessee: Vanderbilt University, 2020.
- 9 Tong L L, Cao X W. Methodology for reliability allocation based on fault tree analysis and dualistic contrast[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, **19**(4): 251 - 256. DOI: [10.1016/S1001-8042\(08\)60059-7](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(08)60059-7).
- 10 Chisholm B M, Krahn S L, Sowder A G. A unique molten salt reactor feature - the freeze valve system: design, operating experience, and reliability[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, **368**: 110803. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2020.110803](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110803).
- 11 Chisholm B M, Flanagan G F, Krahn S L. A new look at licensing basis events for the molten salt reactor experiment[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2018.
- 12 Tallackson J R. MSRE design and operations report. Part IIA. nuclear and process instrumentation[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1968.
- 13 Guymon R. MSRE design and operations report. Part VIII. operating procedures[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1966.
- 14 Moore R. MSRE design and operations report. Part IIB. nuclear and process instrumentation[R]. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1972.
- 15 黄婉珏, 徐博, 周翀, 等. 373 MW 熔盐堆非能动余热排出系统换热元件的优化设计[J]. 核技术, 2019, **42**(7): 070602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070602).
HUANG Wanjuan, XU Bo, ZHOU Chong, *et al.* Optimal design of the bayonet cooling tube in the passive decay heat removal system for the 373 MW molten salt reactor [J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(7): 070602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070602).
- 16 International Atomic Energy Agency (IAEA). Component reliability data for use in probabilistic safety assessment [R]. Vienna: Internatioanl Atomic Energy Agency, 1988.
- 17 US Nuclear Regulatory Commission. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plant[R]. USA: US Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- 18 聂淼. 聚变堆部件可靠性数据修正方法研究及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
NIE Miao. Research and application of fusion reactor component reliability data correction method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- 19 梅牡丹, 邵世威, 左嘉旭, 等. 熔盐堆丧失厂外电源事故的概率安全评价[J]. 核技术, 2013, **36**(12): 120604. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120604](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120604).
MEI Mudan, SHAO Shiwei, ZUO Jiaxu, *et al.* Probability safety assessment of LOOP accident to molten salt reactor [J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(12): 120604. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120604](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.120604).