

熔盐堆应急排盐冷却系统换热管内层屏障 破损传热影响

孙亮洁^{1,2} 梁荣健¹ 蒋文涛^{1,2} 王超群^{1,2} 杨 群^{1,2} 何兆忠¹ 邹 杨^{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 液体燃料熔盐堆是第四代先进核能系统的候选堆型之一,应急排盐冷却系统是其可设置的特殊安全设计。本文以熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)应急排盐冷却系统为研究对象,探究换热元件内层屏障破损对其正常余热导出功能的影响。该研究基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟方法,通过构建传热和多相流动模型分析破损后的传热和流动现象,并对关键影响参数进行敏感性分析。结果表明,内层套管破损后,18.4%的冷却水从破损位置经气隙层流出,单根换热元件功率提升到29.434 kW,破损位置附近外层套管出现局部温度低点。敏感性分析结果表明,破损尺寸、破损位置和和气隙层压力变化均会对换热元件传热产生明显影响,其中传热对破损尺寸的敏感性最强。该分析结果可以为熔盐堆应急排盐冷却系统工程设计提供研究数据。

关键词 熔盐堆, 应急排盐冷却系统, 换热元件, 冷却介质泄漏, 计算流体动力学

中图分类号 TL364

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250003

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250003

Effects of bayonet tube leak on the heat transfer characteristics of fuel drain system in molten salt reactor

SUN Liangjie^{1,2} LIANG Rongjian¹ JIANG Wentao^{1,2} WANG Chaoqun^{1,2} YANG Qun^{1,2} HE Zhaozhong¹
ZOU Yang^{1,2}

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

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

Abstract [Background] The liquid-fueled molten salt reactor (MSR) is one of the candidates for the Generation IV reactor technologies, and the fuel drain system is a special safety design. [Purpose] This study aims to investigate the influence of inner barrier leak of one heat exchange element of MSR on heat transfer characteristics. [Methods] Firstly, the fuel drain system of Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) was taken as the research object, and computational fluid dynamics (CFD) simulation methods were employed to construct heat transfer and multiphase flow models to analyze the heat transfer and flow phenomena under normal operation and bayonet tube leak scenario.

中国科学院青年创新促进会项目(No.E3292901)、上海市“基础研究特区计划”(No.JCYJ-SHFY-2021-003)资助

第一作者: 孙亮洁, 男, 1999年出生, 2019年毕业于华中科技大学, 现为博士研究生, 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: 2025-01-06, 修回日期: 2025-04-29

Supported by the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.E3292901), Shanghai Pilot Program for Basic Research - Chinese Academy of Sciences, Shanghai Branch (No.JCYJ-SHFY-2021-003)

First author: SUN Liangjie, male, born in 1999, graduated from Huazhong University of Science and Technology in 2019, doctoral student, focusing on reactor safety

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

Received date: 2025-01-06, revised date: 2025-04-29

Then, the sensitivity analyses of key influencing parameters, such as the leak size (3~8 mm), leak location (10~1 500 mm above the lower end of the heat exchange element) and pressure in the annular gas space (ranging from -13 788 Pa to 13 788 Pa), were carried out. **[Results]** The analysis results show that 18.4% of cooling water flows out from the leak location through the annular gas space when bayonet tube leak occurs and the power of one single heat exchange element increases to 29.434 kW. In addition, the lowest abnormal temperature appears in the thimble near the leak location. The sensitivity analysis results present that the heat transfer varies with the leak size, leak location and pressure of annular gas space and is most sensitive to leak size. **[Conclusions]** These analysis results of this study are valuable to the engineering design of the fuel drain system for MSRs.

Key words Molten salt reactor, Fuel drain system, Heat exchange element, Coolant leak, Computational fluid dynamics

液态熔盐堆以钍和铀作为核燃料,以高温熔盐为主冷却剂^[1-2],是第四代核能系统之一。熔盐堆的研究始于20世纪50年代,1964年,熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)在美国橡树岭国家实验室建成并运行,随后在世界范围内几乎处于停滞状态。进入21世纪,熔盐堆因其在经济性、安全性、可持续性和防扩散性方面的优势,可实现高温常压运行,适用于钍铀燃料循环和高温综合应用等特点,再次成为国际先进反应堆技术研究的热点^[3-4]。如中国科学院上海应用物理研究所设计建造的2 MW液态燃料钍基熔盐实验堆、美国阿比林基督教大学熔盐研究堆(Molten Salt Research Reactor, MSRR)、加拿大一体式熔盐堆(Integral Molten Salt Reactor, IMSR)等^[5]。

非能动安全是新型反应堆发展趋势之一。非能动安全设计不依赖任何外部输入,具有较高的可靠性,因此,在核能领域得到了广泛的应用^[6],如高温气冷堆HTR-10的一回路舱室冷却系统^[7]、AP1000中的非能动余热排出系统^[8]、熔盐堆下舱室非能动冷却系统^[9]等。在熔盐堆研发中,因液态熔盐既用作冷却剂,也用作核燃料的载体,因此可采用不同于常规水堆的非能动安全设计——堆芯应急排盐冷却系统。该系统主要包括冷冻阀、排盐罐、冷却系统、阀门和管道系统等部件^[10-11]。应急排盐冷却系统能确保在异常工况下,迅速将堆芯内的熔盐通过冷冻阀排出实现紧急停堆,并通过排盐罐冷却系统提供冷却,防止燃料盐过热,避免潜在的安全隐患^[12-13]。同时,该系统的排盐罐冷却系统也可以在正常停堆余热排出系统故障时提供备选的余热排出方案^[14-16]。

MSRE采用的水冷应急排盐冷却系统,具有易形成非能动自然循环以及工程实现的特点^[17],并且在工程上得到了验证^[18],是当前关注焦点之一。因此,本文以MSRE应急排盐冷却系统为研究对象开展研究。MSRE应急排盐冷却系统的核心部件之一

是插入熔盐的换热元件。该换热元件采用双层套管设计,通过冷却水沸腾带走燃料盐的余热。目前已有部分以MSRE应急排盐冷却系统换热元件为基础的研究。孙露^[19-20]、Chen等^[21]通过实验和数值模拟相结合的方法对换热元件自然循环启动和换热元件内的流动传热现象进行了分析。Wu等^[22]、Yang等^[23]对换热元件出现的不稳定现象以及闪蒸现象进行了分析。黄婉珏等^[24]和渠鹏荣等^[25]基于该类型换热元件,对熔盐堆非能动余热排出设计进行了相应的研究。

上述相关研究主要基于换热元件结构完整这一前提,涉及换热元件破损泄漏的研究较少。破损发生后换热元件传热变化尚不明确,需要进行分析。内层套管是换热元件的水边界,其完整性失效会引起冷却剂水泄漏并对熔盐余热正常导出产生影响。本文以MSRE水冷应急排盐冷却系统为研究对象,开展换热元件内层屏障破损传热分析,以探究在极限工况下,可能出现的内层套管破损对换热元件传热的影响。同时,该分析也可以为熔盐堆工程设计、后果评价和应对等提供研究数据。

1 系统结构介绍

MSRE应急排盐冷却系统包含排盐罐、冷冻阀、换热元件、汽包、给水箱、冷凝器等多个核心部件。图1为MSRE排盐罐及其冷却系统示意图。堆芯燃料盐通过冷冻阀进入排盐罐后,通过该系统导出余热。在该系统正常工作时,熔盐余热传递给换热元件,导致换热元件内冷却水沸腾。沸腾后的饱和水蒸气和液态水混合物进入汽包后进行汽水分离,液态水重新流回换热元件,水蒸气流向冷凝器冷凝,冷凝后的液态水依靠重力流回换热元件。给水箱的作用为储存冷却水和控制汽包液位。

MSRE换热元件结构如图2所示^[13],换热元件采用双层套管设计,由下降管、内层套管、外层套管组成,下降管与内层套管之间形成上升环腔,内层套

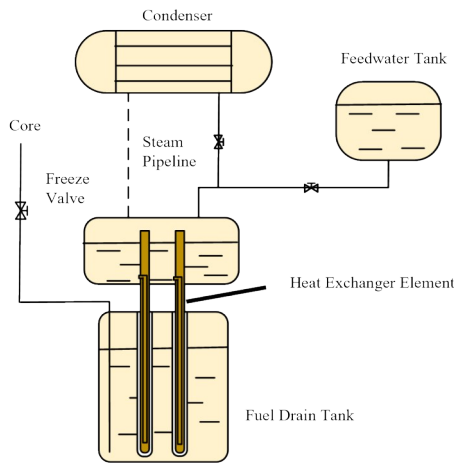


图1 MSRE排盐罐余热排出系统示意图

Fig.1 Diagram of the heat removal system of the MSRE drain tank

管与外层套管之间形成气隙层,其与放置排盐罐的空间连通,其内部填充氮气,氮气与熔盐在研究条件下保持相互稳定。双层套管的设计一方面可以有效防止熔盐在排盐罐内过冷凝结,另一方面还为熔盐与冷却水之间提供了双重屏障,从而确保了系统的安全性。在换热元件正常工作时,燃料盐余热通过热传导、热对流和热辐射由熔盐向换热元件内部传递。在换热元件内部,冷却水受水蒸气与液态水的密度差驱动进行自然循环。换热元件结构参数^[17]如表1所示,加热段为换热元件插入熔盐的长度。

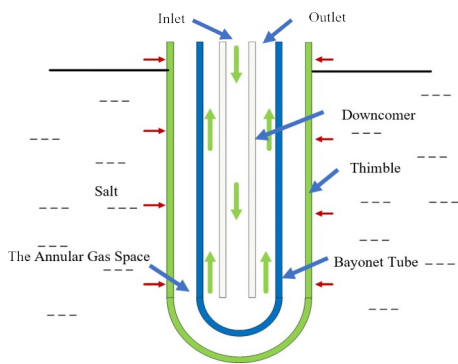


图2 MSRE换热元件结构示意图(彩图见网络版)

Fig.2 Schematic illustration of the heat exchanger element (color online)

表1 换热元件尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of the heat exchanger element

结构 Structures	尺寸 Dimensions
下降管 Downcomer	12.70 mm, 2.096 m in length
内层套管 Bayonet tube	25.40 mm, 2.149 m in length
外层套管 Thimble	38.10 mm, 1.968 m in length
加热段长度 Heating length	1.7 m

2 理论模型

换热元件中存在熔盐、冷却水、氮气多种流体,且冷却水在元件中存在相变现象,采用如下控制方程。

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_k \phi_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k) = S_k \quad (1)$$

式中: ρ_k 是第 k 相的密度; ϕ_k 是第 k 相的体积分数; $\mathbf{v}_k$ 是第 k 相的速度矢量; S_k 表示第 k 相的质量源项。由于包含相变过程,源项是液态水和水蒸气之间的质量转移,各源项之和为零,如式(2)所示:

$$\sum_k S_k = 0 \quad (2)$$

2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_k \mathbf{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{v}_k) = -\nabla \cdot \mathbf{p}_k + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_k + \rho_k \mathbf{g} + \sum_{j \neq k} F_{kj} + S_m \quad (3)$$

式中: $\mathbf{p}_k$ 为第 k 相的压力; $\boldsymbol{\tau}_k$ 为应力张量; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; F_{kj} 为相间作用力; S_m 为动量源项。

3) 能量方程:

$$\frac{\partial(\rho_k E_k)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho_k E_k + p_k) \mathbf{v}_k] = \nabla \cdot (q_k + \mathbf{v}_k \cdot \boldsymbol{\tau}_k) + \rho_k \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{g} + \sum_{j \neq k} \dot{q}_{kj} + S_h \quad (4)$$

式中: E_k 为第 k 相的比总能量; q_k 为热通量; $\dot{q}_{kj}$ 为相间传热速率; S_h 为热量源项,包含衰变热。

此外,本研究采用连续表面力(Continuum Surface Force, CSF)模型计算表面张力。CSF模型被广泛应用于计算液体-气体界面上的表面张力,该模型通过考虑表面力和液滴形状来计算表面张力,适用于多种液体和气体的相互作用^[26]。在研究中计算相变时采用Lee模型。Lee模型常用于描述气液相变过程,适用于多组分和多相流体体系中的相变分析,并且其预测结果在实验研究中得到了验证^[27]。饱和温度与压力的关系通过安托因方程计算得到。安托因方程是通过对实验结果进行拟合得到的经典经验公式,被广泛地应用于描述液体在蒸发过程中的饱和温度与压力之间的关系^[28]。该研究中相变介质为水,符合该公式使用条件。

$$\log_{10}(P) = A - \frac{B}{T + C} \quad (5)$$

式中: P 为水的饱和蒸汽压; T 为温度; A 、 B 和 C 为水的安托因方程的经验系数。

在研究中采用面对面辐射(Surface to Surface, S2S)模型计算换热元件内辐射换热。S2S模型为计算面到面之间的辐射换热,换热元件辐射换热主要集中在外层套管和内层套管之间,使用该模型能够

准确地模拟换热元件内部辐射换热现象。双层套管之间气隙层主要成分为氮气,其为分子结构对称的双原子气体,满足S2S模型计算要求。内外层套管材料为哈氏合金,壁面发射率为0.625^[29]。内外层套管之间辐射计算公式:

$$Q = F_{1,2}\varepsilon_1\sigma A_1(T_1^4 - T_2^4) + F_{2,1}\varepsilon_2\sigma A_2(T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

式中: $F_{1,2}$ 和 $F_{2,1}$ 是两个表面之间的角系数; ε_1 和 ε_2 是内外层套管的发射率; σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数; A_1 和 A_2 是内外层套管的辐射面积; T_1 和 T_2 是内外层套管的绝对温度。

采用Todreas & Kazimi模型^[30]计算了熔盐的衰变热,该模型能够较好地吻合MSRE实验数据^[17]。使用正常运行1 000 h后的衰变热进行计算,排盐时间为1 800 s^[16-17]。衰变热计算公式为:

$$\frac{P}{P_0} = 0.066 [\tau^{-0.2} - (\tau + \tau_0)^{-0.2}] \quad (7)$$

式中: τ 和 τ_0 分别代表反应堆停堆后时长和反应堆停堆前连续运行时长; P 和 P_0 分别代表停堆后 τ 时刻的衰变热功率和停堆前反应堆连续运行 τ_0 时刻的功率。在排盐完成前1 h衰变热功率如图3所示。

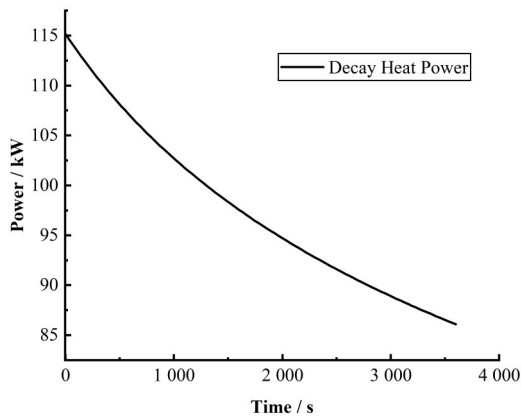


图3 排盐完成后前1 h排盐罐内熔盐衰变热功率
Fig.3 Decay heat power of molten salt within the 1 h after the completion of the fuel drain process

通过计算得到文中换热元件内冷却水自然对流瑞利数(Ra)数量级为 10^{11} ,且换热元件内冷却水雷诺数(Re)大于10 000,换热元件内冷却水属于充分发展的湍流。 k - ε 湍流模型因其简便性、计算效率高

且适用于中高雷诺数流动的特点,符合本研究中对湍流流动进行建模的需求,因此本研究中选择该湍流模型。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

式中: k 是湍动能; μ 是分子动力黏度; μ_t 是湍流黏度; σ_k 是湍动能的扩散系数; G_k 和 G_b 分别是湍动能和浮力引起的源项; ε 是湍流耗散率; Y_m 是与质量源项相关的项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 是模型常数。

3 数值计算

3.1 计算模型

采用商业计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件Fluent进行建模分析,所建立的几何模型为实际单根换热元件及周围熔盐的简化模型。模型下部加热段与MSRE原型一致,模型最上方省略了入口弯管。排盐罐内包含32根换热元件,模型熔盐体积为排盐罐内熔盐体积的1/32。换热元件结构具有对称性,选取1/2结构进行计算。单根换热元件及周围熔盐计算模型如图4所示。

3.2 边界条件和物性参数

依据参考文献,换热元件进出口压力为常压,出口饱和蒸汽温度为373 K,排盐罐内的覆盖气压力最高为34 470 Pa(5 Pound per square inch gauge (psig)),气隙出口压力为-13 788 Pa(-2 psig),熔盐初始温度为923 K^[16-17,25,31],进口过冷度为3 K^[22],水温设定为370 K。其他物性参数^[25]如表2所示。

3.3 网格无关性验证

因所研究的其他参数与质量流量和功率之间是相互影响的,当其他单一参数发生变化时,会影响质量流量和功率变化,因此以质量流量和换热元件换

表2 热物性参数
Table 2 Thermophysical parameters

物性参数 Physical parameters	冷却水 Water coolant	哈氏合金 INOR-8	熔盐 Salt
热导率 Thermal conductivity / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.6	20.3	1.4
密度 Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	998.2	8 860	2 757.9–0.464 <i>T</i>
比热容 Heat capacity / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	4 182	586	2 386
黏度 Viscosity / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.001 003		$1.43-4.310 \times 10^{-3}T + 4.358 \times 10^{-6}T^2 - 1.487 \times 10^{-9}T^3$

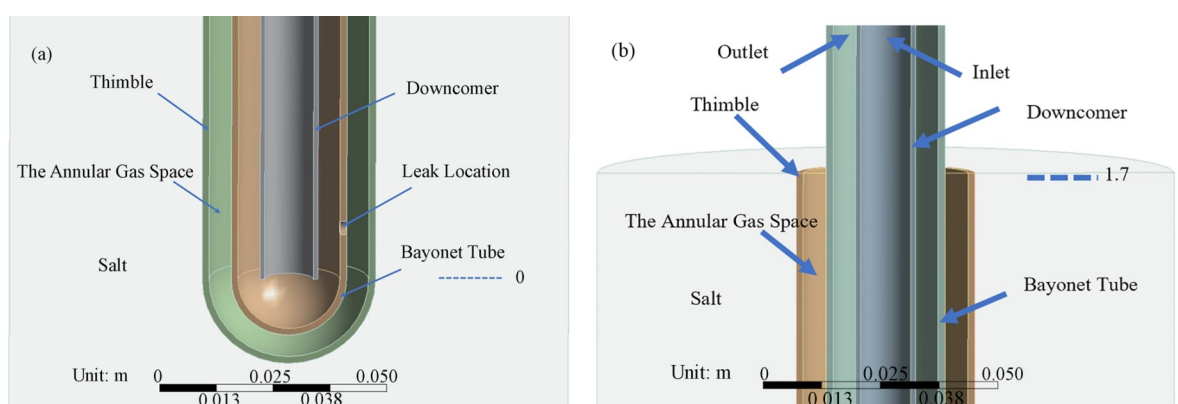


图4 换热元件模型示意图(彩图见网络版) (a) 下段, (b) 中段
Fig.4 Diagram of heat exchange element model (color online) (a) Lower section, (b) Middle section

表3 网格无关性分析
Table 3 Grid independence analysis

网格数量 Mesh number	进出口质量流量 Mass flow rate / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	换热元件功率 Heat exchange element power / kW
124 182	0.096	2.968
292 357	0.100	3.084
455 391	0.102	3.102
936 335	0.102	3.102

热功率为基准进行网格无关性验证。从表3中可以看出,当网格数量达到 4.55×10^5 量级时,进出口质量流量和换热功率不再改变,因此,本文选用该数量网格进行后续分析,并对泄漏位置附近网格进行1/4局部加密处理。

3.4 稳态仿真和模型验证

由于衰变热功率受时间影响,以及两相自然循环流动具有不稳定性,因此通过瞬态模拟获得换热元件达到基本稳态的工况参数。当换热元件进出口质量流量不发生波动时,自然循环达到了稳态。

换热元件从开始受熔盐加热到达到稳态,进口和出口质量流量如图5所示。可以观察到,A-B段的质量流量保持为零。其原因为换热元件受熔盐加热,冷却水的温度逐渐升高,但在A-B段冷却水未达到饱和温度,因此质量流量基本为零。B-C段中,出口质量流量开始增加,进口质量流量也随之增加。这是因为随着换热元件内冷却水受热升温,上升环腔内冷却水达到饱和温度开始发生汽化,受下降管与上升环腔密度差影响,换热元件内部开始流动,质量流量开始增加,换热元件出口质量流量大于进口质量流量。在C-D段,可以观察到出口质量流量减小。这是因为随着加热过程的进行,换热元件内冷却水循环速度加快,单位冷却水被壁面加热的时间减少,水蒸气汽化比例降低,使得出口质量流量降

低。当出口质量流量与进口质量流量达到平衡,即稳定在 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,换热元件达到了基本稳态。

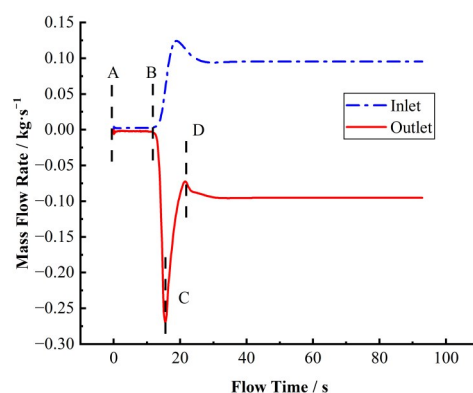


图5 进出口质量流量随时间的变化(彩图见网络版)
Fig.5 Variation of inlet and outlet mass flow rate with time (color online)

稳态换热元件和熔盐温度分布如图6所示,从图中可以清楚地看出明显的温度分区现象,高温区为熔盐和外层套管,低温区为冷却水和内层套管,过渡区为气隙层。整体热量传递过程为熔盐到外层套管,外层套管通过气隙层传递给内层套管,最后传递给冷却水,其中热阻主要集中在气隙层中,导致气隙层温差大,熔盐侧和换热元件内部温差相对较小。

本研究通过比较MSRE换热元件额定功率和未发生破损时换热元件的稳态功率来验证模型准确

性。MSRE 单根换热元件平均额定功率为 3.125 kW。稳态工况下计算得到单根换热元件换热功率为 3.102 kW,与前者相比误差为 0.74%,因此模型较为准确。

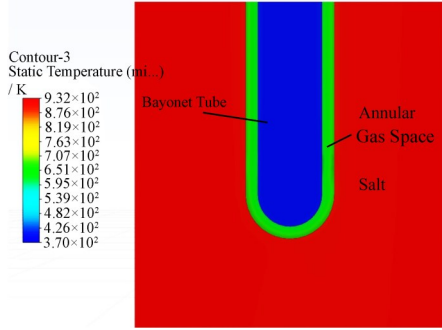


图6 换热元件稳态温度分布(彩图见网络版)
Fig.6 Steady-state temperature distribution of the heat exchanger element (color online)

3.5 内层破损分析

以稳态计算结果为破损的初始条件开展内层破损分析。内层套管底端两侧压力差最大,因此将破损泄漏位置选择在换热元件的底部。出于保守考虑,假定破损为贯穿裂纹,破损形状为圆形小孔,不考虑裂纹阻力。利用式(10)^[32]计算内层套管的破损直径,并将其取整为 3 mm。此外,假设内层屏障破

损不会对外层屏障结构完整性产生影响。

$$D = \frac{1}{2} RH \quad (10)$$

在内层套管破损后,受内层套管两侧压力差影响,冷却水从换热元件内流入气隙层。图7为换热元件内流动矢量图,从图中可以观察到,冷却水从破损处迅速流出,受破损位置两侧压力差影响,在该处冷却水流速为 $3.98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图8为发生破损泄漏后液态水的体积分数图。冷却水进入气隙层后,直接与外层套管接触,受热迅速大量汽化。汽化后的冷却水从气隙层出口流出。

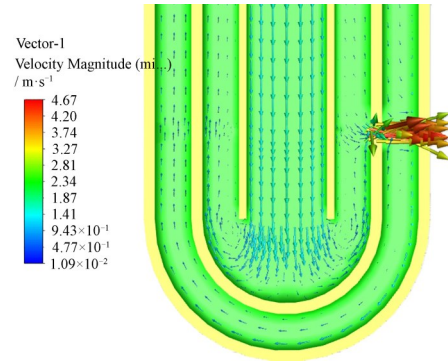


图7 换热元件内流动矢量图(彩图见网络版)
Fig.7 Flow vector diagram inside heat exchanger element (color online)

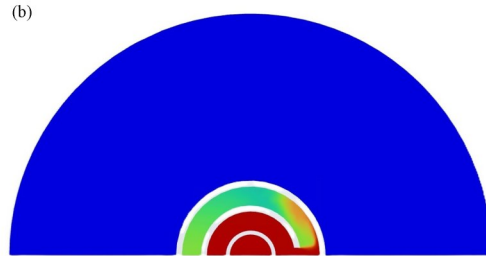
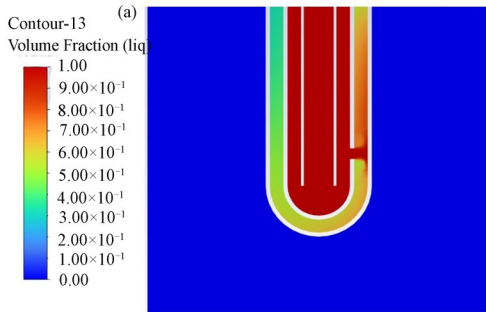


图8 换热元件内径向(a)和轴向(b)液态水体积分数示意图(彩图见网络版)
Fig.8 Diagram of liquid water volume fraction inside heat exchange element (color online)
(a) Radial, (b) Axial

进出口和气隙层出口的质量流量随时间的变化如图9所示。进口的质量流量从 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 变化到 $0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,与稳态相比增加了 22.5%。出口质量流量为 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,从气隙层流出的冷却水质量流量为 $0.023 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,18.4%的冷却水从破损位置泄漏。出口质量流量变化是破损位置压力降低和换热元件整体换热增加共同作用的结果。

冷却水在进入气隙层后,破损侧和非破损侧空泡份额分布如图10所示。从图中可以观察到,在破损侧,沿垂直方向从最底端到破损处,气隙层中液态

冷却水份额先迅速增加,在破损位置液态水体积分数增加到1,经过破损处后迅速下降到0.73。之后受外套套管加热影响,冷却水逐步汽化,汽化速率呈现逐步减小趋势。到气隙层出口处液态冷却水体积分数为0.03。

在非破损侧,液态水体积分数从0.56逐步降低到0.03,汽化速率也呈现逐步减小趋势。水蒸气空泡份额变化正好与液态水相反,在气隙层出口空泡份额为0.97。在气隙层中,液态水和水蒸气占据了全部份额,氮气被完全排出。此外,由于冷却水在破

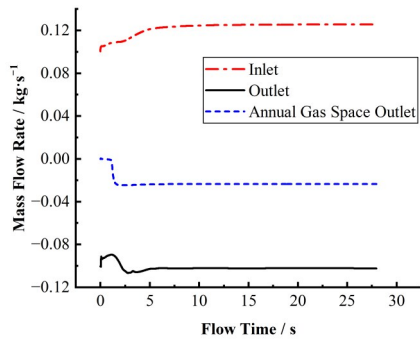


图9 进出口与气隙层出口质量流量随时间变化
(彩图见网络版)

Fig.9 Variations of inlet, outlet, and annular gas space outlet mass flow rates with time (color online)

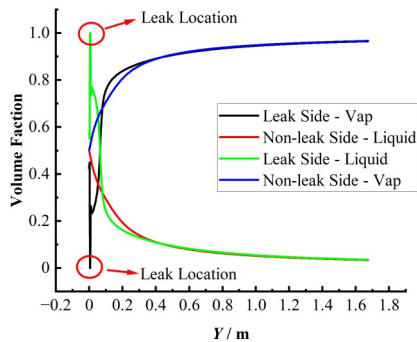


图10 气隙层中沿轴向方向冷却水和水蒸气体积分数
(彩图见网络版)

Fig.10 Volume fraction of liquid water and vapor along axial direction in the annular gas space (color online)

损位置与外层套管直接接触后汽化,从图中可以观察到在0.2 m高度处破损侧水蒸气空泡份额高于非破损侧。

冷却水进入气隙层后的流动矢量图如图11所示。图中(mi...)表示混合物(mixture)。从图11左图可以观察到,在气隙层中,冷却水速度从换热元件底端向上整体呈现递增趋势,在气隙层出口处速度

达到 $2.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图11右图可以观察到,在破损位置附近,冷却水与外层套管接触后大部分冷却水向下流动,在填充满换热元件底端后,从非破损侧沿气隙层向上流动。此外,可以观察到,在换热元件底端出现了一个涡流,其原因是气隙层破损处内外侧流速差异,向下流动的冷却水填充气隙层破损位置附近内侧空间。

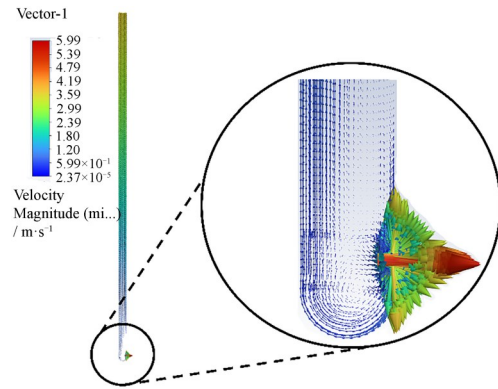


图11 气隙层中流动速度矢量图(彩图见网络版)

Fig.11 Flow velocity vector diagram in the annular gas space (color online)

在发生破损泄漏后,换热元件的传热将发生明显变化。发生泄漏的单根换热元件功率从3.102 kW增加到29.434 kW,与稳态相比增加了848.8%,其他31根换热元件为正常工作状态。排盐罐整体换热功率由99.264 kW升高到125.596 kW,与稳态相比增加26.5%,该功率提升在短时内不足以导致排盐罐内总体熔盐的凝固。

内层套管破损也会影响换热元件内温度分布。图12为内层套管破损发生后换热元件温度分布图。图13为破损前后在破损位置横向温度分布对比图。可以观察到内层套管内,受冷却水饱和温度限制,温度无变化。在气隙层中,整体温度受流入气隙层的冷却水影响而降低,破损侧温度低于非破损侧,气隙层中的温度梯度向外层套管迁移。在熔盐中,受换热元件换热能力增强影响,近壁面熔盐温度降低。

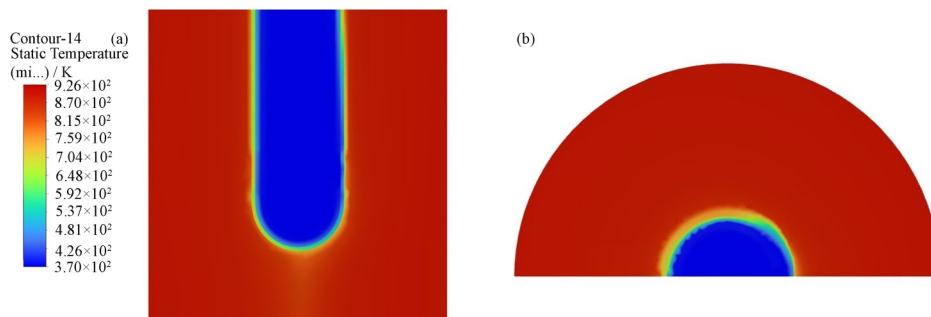


图12 内层套管破损发生后径向(a)和轴向(b)的换热元件温度分布(彩图见网络版)

Fig.12 The temperature distribution of heat exchange elements after a leak occurs (color online) (a) Radial, (b) Axial

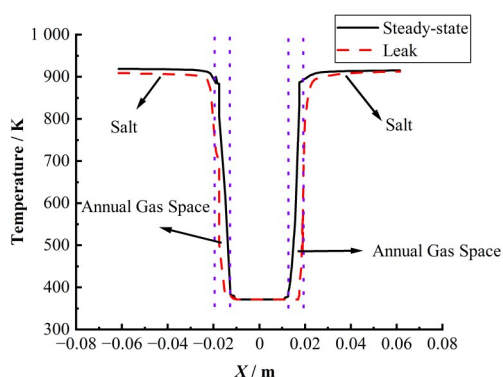


图13 破损前后在破损位置横向温度分布对比
(彩图见网络版)

Fig.13 Temperature comparison at the leak location before and after a leak occurs (color online)

图14为外层套管内壁在破损侧沿轴向的温度分布,可以观察到在破损位置出现温度低点,峰值为439.48 K。这是冷却水与外层套管接触迅速换热的结果。冷却水汽化膨胀,破损位置上方水蒸气空泡份额增大,且从图11中观察到该处冷却水流速慢,外层套管内壁在破损位置上方出现一个较高温点762.35 K。

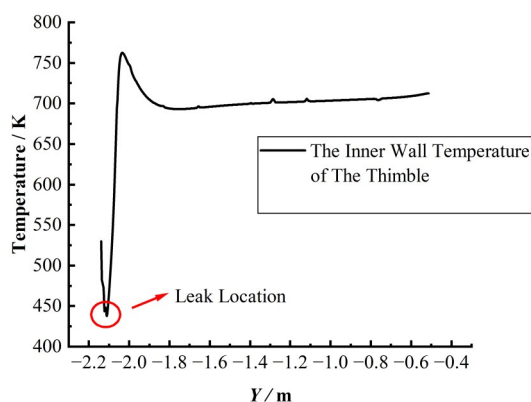


图14 外层套管内壁温度分布

Fig.14 Temperature distribution on the inner wall of the thimble after a leak occurs

图15为破损处外层套管温度随时间变化的曲线。从图中可以观察到,在破损位置受换热元件冷却水直接接触影响,外层套管破损处(0.01 m高度)温度在6 s内迅速下降449.32 K,后缓慢下降到444.35 K。

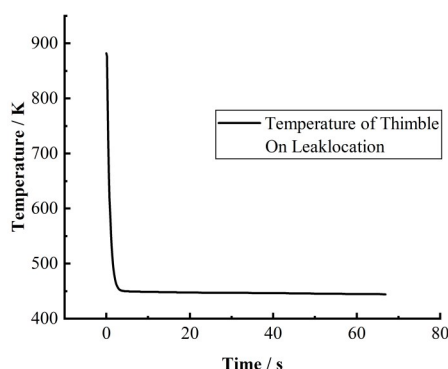


图15 破损侧外层套管温度随时间变化曲线

Fig.15 Variation of temperature of thimble at leak side with time after a leak occurs

4 关键参数敏感性分析

4.1 破损位置影响

图16(a)为换热元件各出入口质量流量随破损位置高度变化的关系,图16(b)为换热元件传热功率和破损处冷却水流速随破损位置高度变化的关系。计算工况为破损尺寸3 mm,气隙层出口压力为-13 788 Pa。从图16可以观察到,破损高度从0.01 m增加到1.5 m时,单根破损换热元件功率从29.434 kW减小到9.858 kW,进口质量流量从 $0.125 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.109 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,相对稳态变化幅度从22.5%减小到6.8%,从气隙层出口流出的质量流量从 $0.023 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.007 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,泄漏质量流量占比从18.4%减小到6.4%。当破损位置上升时,换热元件的换热功率和质量流量都呈现减小趋势。两者的原因在于破损位置越高,内层套管在破损处受重力影响的内外压差越小,使得从破损位置流出的质量流量和进口质量流量减小,换热功率减小。值得注意的是,在1.5 m高度处,破损位置速度与其他高度速度变化趋势不同,这是因为在1.5 m高度处,上升环腔中水蒸气体积分数高,水蒸气流动阻力小,流动速度快。

4.2 气隙层压力影响

图17(a)为换热元件各出入口质量流量随气隙层压力变化的关系图,图17(b)为换热元件传热功率和破损处冷却水流速随气隙层压力变化的关系图。计算工况为破损尺寸3 mm,破损位置高度为0.1 m。从图17可以观察到,气隙层压力从-2 psig增加到2 psig时,单根破损换热元件功率从29.434 kW减小到13.788 kW,进口质量流量从 $0.125 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.103 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,相对稳态变化幅度从22.5%减小到

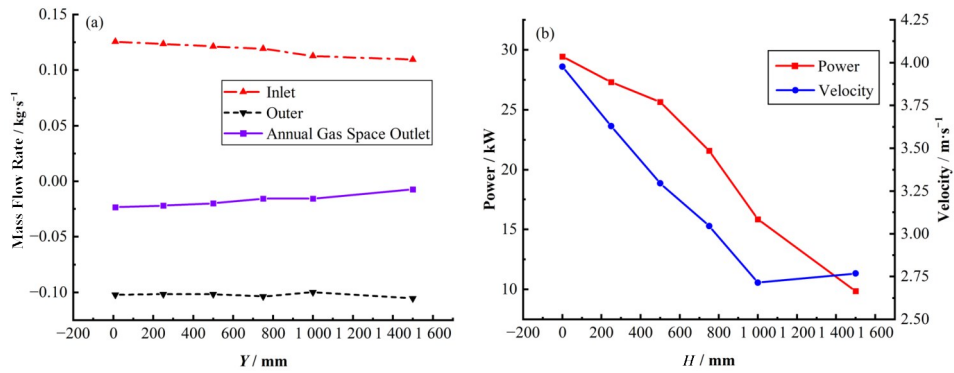


图 16 质量流量(a)、功率与破损处速度(b)随破损位置高度变化关系(彩图见网络版)
Fig.16 Variations of mass flow rate (a), power and velocity (b) with leak location (color online)

0.98%,从气隙层出口流出的质量流量从 $0.023 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.009 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,泄漏质量流量占比从18.4%减小到8.7%。当气隙层压力上升时,换热元件的换热

功率和质量流量都呈现减小趋势。两者原因为内层套管与气隙层压差越小,从破损位置流出的质量流量和进口质量流量减小,换热功率减小。

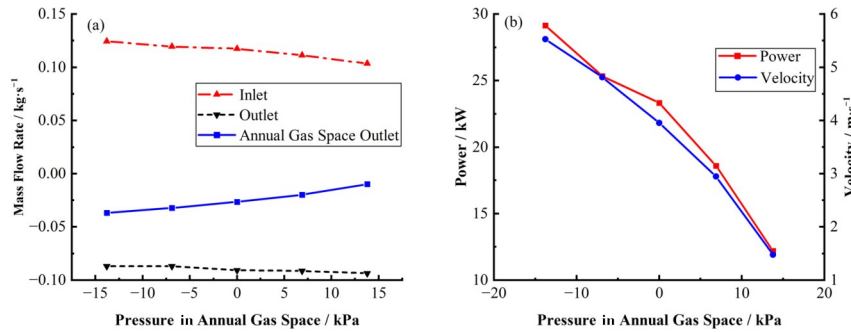


图 17 质量流量(a)、功率和破损处速度(b)随气隙层压力变化关系(彩图见网络版)
Fig.17 Variations of mass flow rate (a), power and velocity (b) with pressure in annular gas space (color online)

4.3 破损尺寸影响

图 18(a)为换热元件各出入口质量流量随气隙层压力变化的关系图,图 18(b)为换热元件传热功率和破损处冷却水流速随破损尺寸变化的关系图。

计算工况为气隙层出口压力为 -13788 Pa ,破损位置高度为 0.1 m 。从图 18 可以观察到,破损尺寸从 3 mm 增加到 8 mm 时,单根破损换热元件功率从 29.434 kW 增加到 98.420 kW ,进口质量流量增加到 $0.170 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,相对稳态变化幅度从22.5%增加到

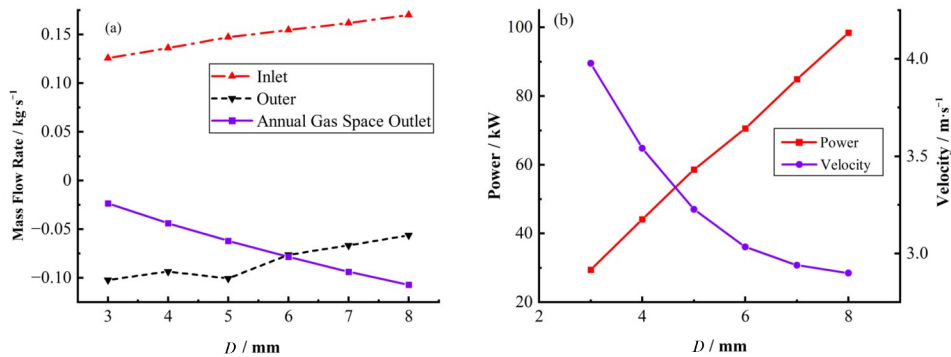


图 18 质量流量(a)、功率和破损处速度(b)随破损尺寸变化(彩图见网络版)
Fig.18 Variations of mass flow rate (a), power and velocity (b) with leak size (color online)

66.7%,从气隙层出口流出的质量流量从 $0.023 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.056 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,泄漏质量流量占比从18.4%增加到32.9%。当破损尺寸增大时,换热元件的换热功率和进口及气隙层出口质量流量都呈现增加趋势,破损位置处冷却水速度呈现减小趋势。

5 结语

本文以MSRE水冷应急排盐冷却系统换热元件为具体研究对象,针对换热元件内层套管破损开展了传热特性研究。基于保守考虑,假定破损为贯穿裂纹,破损形状设定为圆形小孔并且未考虑裂纹流动阻力影响。通过构建包含辐射、蒸发、衰变热等多种传热方式的多相流动模型,分析了破损发生后的传热特性以及关键现象,并对破损位置、破损尺寸、气隙层压力这些关键参数进行了敏感性分析。

1)在破损尺寸为3 mm且破损位置位于底端时,内层套管破损后 $0.023 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 冷却水从破损位置经气隙层流出,进口质量流量增加到 $0.125 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冷却水在气隙层中迅速汽化使得单根换热元件功率提升到29.434 kW,提升的换热元件功率会导致气隙层以及近壁面熔盐温度降低。在破损位置附近,外层套管出现局部温度低点439.48 K。外层套管在短时间内温度变化较大,因此设计上应考虑采用合适的材料,以防止可能出现的热应力影响。

2)换热元件破损位置越低、气隙层压力越小、破损尺寸越大,对换热元件功率和流动状态影响越大。且破损尺寸对换热元件功率的影响相对气隙层压力更大。在换热元件制造时,应采用先进制造工艺尽可能避免或减少换热元件焊缝数量,以降低泄漏风险。

致谢 感谢中国科学院上海应用物理研究所徐洪杰研究员离世前在论文研究中提供的宝贵指导和审阅意见。

作者贡献声明 孙亮洁负责建立破损模型并计算,撰写文章;梁荣健、蒋文涛负责提供文献支持和建议;王超群负责提供技术和数据支持;杨群、邹杨负责提供研究思路、技术路线、指导和审阅;何兆忠负责研究项目管理、审阅。

参考文献

- 江绵恒,徐洪杰,戴志敏. 未来先进核裂变能: TMSR核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366 - 374.
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3):

366 - 374.

- 蔡翔舟,戴志敏,徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578 - 590.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(9): 578 - 590.
- Abram T, Ion S. Generation-IV nuclear power: a review of the state of the science[J]. Energy Policy, 2008, **36**(12): 4323 - 4330. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.059.
- Li G C, Cong P, Yu C G, *et al.* Optimization of Th-U fuel breeding based on a single-fluid double-zone thorium molten salt reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, **108**: 144 - 151. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.04.017.
- 房勇汉,刘达,李林蔚,等. 第四代核能系统发展现状分析与对策建议[J]. 产业与科技论坛, 2022, **21**(23): 19 - 20.
FANG Yonghan, LIU Da, LI Linwei, *et al.* Analysis of the development status of the fourth generation nuclear energy system and countermeasures and suggestions[J]. Industrial & Science Tribune, 2022, **21**(23): 19 - 20.
- Jiao X, Shao S, Wang K, *et al.* Functional reliability analysis of a molten salt natural circulation system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, **332**: 127 - 136. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.03.024.
- 符晓铭,王捷. 高温气冷堆在我国的发展综述[J]. 现代电力, 2006, **23**(5): 70 - 75. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.011.
FU Xiaoming, WANG Jie. Summary of development of high temperature gas cooled reactor in China[J]. Modern Electric Power, 2006, **23**(5): 70 - 75. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.011.
- Liu Y B, Meng X Y, Wang X S, *et al.* Transient analysis and optimization of passive residual heat removal heat exchanger in advanced nuclear power plant[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(8): 106. DOI: 10.1007/s41365-022-01083-1.
- 梅牡丹,周翀,傅瑶,等. 熔盐堆下腔室非能动冷却系统的优化设计[J]. 核技术, 2024, **47**(8): 080602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080602.
MEI Mudan, ZHOU Chong, FU Yao, *et al.* Optimal design of passive cooling system for the reactor lower cavity of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(8): 080602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080602.
- Xu H X, Lin J, Zhong Y J, *et al.* Characterization of molten $2\text{LiF} - \text{BeF}_2$ salt impregnated into graphite matrix

- of fuel elements for thorium molten salt reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(5): 74. DOI: 10.1007/s41365-019-0600-8.
- 11 朱贵凤, 严睿, 邹杨, 等. 反应堆瞬时短周期与反应性引入速率约束问题研究[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030601.
ZHU Guifeng, YAN Rui, ZOU Yang, *et al.* Toward the instantaneous short reactor period and rate constraint of reactivity insertion[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030601.
 - 12 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**(2): 16. DOI: 10.1007/s41365-020-0729-5.
 - 13 Robertson R C. MSRE design and operations report. Part I. Description of reactor design[R]. Oak Ridge, TN, United States: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 1965.
 - 14 梁荣健, 孙亮洁, 焦小伟, 等. 熔盐堆堆芯应急排盐系统可靠性分析及优化[J]. 核技术, 2023, **46**(3): 030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030604.
LIANG Rongjian, SUN Liangjie, JIAO Xiaowei, *et al.* Reliability analysis and optimization of core fuel salt emergency drain system for the molten salt reactor experiment[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(3): 030604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030604.
 - 15 Guymon R. MSRE design and operations report. Part VIII. Operating procedures[R]. Oak Ridge, TN, United States: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 1966.
 - 16 Scott D, Grindell A G. Components and systems development for molten-salt breeder reactors[R]. Oak Ridge, TN, United States: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 1967.
 - 17 Beall S E, Haubenreich P N, Lindauer R B, *et al.* MSRE design and operations report. Part V. Reactor safety analysis report[R]. Oak Ridge, TN, United States: Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 1964.
 - 18 Ishiguro T, van Rooijen W F G, Shimazu Y, *et al.* Design of a passive residual heat removal system for the FUJI-²³³U molten salt reactor system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, **64**: 398 - 407. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.08.037.
 - 19 孙露, 孙立成, 阎昌琪, 等. 10 MW 熔盐堆非能动余热排出系统概念设计[J]. 核动力工程, 2013, **34**(6): 107 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013.06.025.
 - SUN Lu, SUN Licheng, YAN Changqi, *et al.* Conceptual design of passive residual heat removal system for 10 MW molten salt reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, **34**(6): 107 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013.06.025.
 - 20 孙露. 熔盐堆非能动余热排出系统设计及排盐罐换热特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
SUN Lu. Design of a passive residual heat removal system for msr and heat transfer characteristics of the fuel drain tank involved[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
 - 21 Chen K L, Meng Z M, Yan C Q, *et al.* Experimental study on start-up and steady state characteristics of passive residual heat removal system for 2 MW molten salt reactor[J]. Energy, 2018, **147**: 826 - 838. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.057.
 - 22 Wu X C, Yan C Q, Meng Z M, *et al.* Numerical analysis of the passive heat removal system for molten salt reactor at steady state[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **102**: 1337 - 1344. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.176.
 - 23 Yang Z H, Meng Z M, Yan C Q, *et al.* Heat transfer and flow characteristics of a cooling thimble in a molten salt reactor residual heat removal system[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2017, **49**(8): 1617 - 1628. DOI: 10.1016/j.net.2017.07.026.
 - 24 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.
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.
 - 25 渠鹏荣, 周翀, 王纳秀, 等. 液态燃料熔盐堆排盐罐非能动余热排出特性研究[J]. 核技术, 2023, **46**(5): 050602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050602.
QU Pengrong, ZHOU Chong, WANG Naxiu, *et al.* Passive residual heat removal characteristics of liquid fuel molten salt reactor salt drain tank[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(5): 050602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050602.
 - 26 Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, **100**(2): 335 - 354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.

- 27 Liu Z, Yu Z Y, Sun W H, *et al.* Evaluation of several liquid - vapor phase change models for numerical simulation of subcooled flow boiling[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, **47**: 103057. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103057.
- 28 Thomson G W. The antoine equation for vapor-pressure data[J]. Chemical Reviews, 1946, **38**(1): 1 - 39.
- 29 Gordon A J, Walton K L, Ghosh T K, *et al.* Hemispherical total emissivity of Hastelloy N with different surface conditions[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, **426**(1 - 3): 85 - 95. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2012.03.026.
- 30 Todreas N E, Kazimi M S. Nuclear systems Volume I: Thermal hydraulic fundamentals[M]. CRC Press, 2021.
- 31 何龙, 余呈刚, 郭威, 等. 外围熔盐层堵塞状态下熔盐堆内部温度分布分析[J]. 核技术, 2018, **41**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050601.
- HE Long, YU Chenggang, GUO Wei, *et al.* The temperature distribution of molten salt reactor under the outer salt layer blocked situation[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050601.
- 32 国家能源局. 轻水堆核电厂假想管道破损事故防护设计准则: NB/T 20516—2018[S]. 北京: 原子能出版社, 2018.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. Design basis for protection of light water nuclear power plants against the effects of postulated pipe rupture: NB/T 20516—2018[S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2018.