

液态燃料熔盐堆排盐罐非能动余热排出特性研究

渠鹏荣^{1,2} 周翀^{1,2} 王纳秀^{1,2} 邹杨^{1,2} 王善武^{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 液态燃料熔盐堆具有较高的经济性、安全性及燃料在线处理等多种特点。紧急排盐非能动余热排出系统(Emergency Draining Salt Passive Residual Heat Removal System, EDS-PRHRS)是液态燃料熔盐堆独有的余热排出系统设计,其中排盐罐中熔盐能否安全导出余热是EDS-PRHRS设计的基础。为了研究EDS-PRHRS排盐罐运行过程中的瞬态特性,本文以30 MW熔盐堆紧急排盐罐为研究对象,通过计算流体力学分析软件Fluent对EDS-PRHRS排盐罐进行熔盐耦合换热元件的余热排出瞬态数值模拟,并针对排盐罐相关参数进行敏感性分析。分析结果表明:余热排出过程中换热元件外壁面和熔盐热点温度随时间变化存在峰值,且通过提高换热元件轴向高度、增强气隙层壁面发射率可以显著降低温度峰值,延后排盐时间可以略微降低峰值,此外采用三角形排布可以延缓局部凝固时间。研究结果可为EDS-PRHRS提供设计参考。

关键词 熔盐反应堆, 余热排出系统, 数值模拟, 瞬态, 敏感性分析

中图分类号 TL426, TL333

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050602

Passive residual heat removal characteristics of liquid fuel molten salt reactor salt drain tank

QU Pengrong^{1,2} ZHOU Chong^{1,2} WANG Naxiu^{1,2} ZOU Yang^{1,2} WANG Shanwu^{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] Liquid molten salt reactor has many features such as high economy, safety and on-line fuel processing. The emergency draining salt passive residual heat removal system (EDS-PRHRS) is a unique residual heat removal system design for liquid fuel molten salt reactor, in which safely export residual heat of the molten salt in the salt draining tank is the first requirement for EDS-PRHRS design. [Purpose] This study aims to analyze the transient characteristics of EDS-PRHRS salt discharge tank during operation by simulation. [Methods] Firstly, the accident analysis of the passive residual heat removal system was carried out. The peak temperature of the molten salt was mainly found in the full heat discharge phase of the salt discharge tank. Then, a computational model of the molten salt coupled to the heat exchanger element was established for this stage of the discharge tank and

国家重点研发计划(No.2020YFB1902000)、上海市“基础研究特区计划”(No.JCYJ-SHFY-2021-003)资助

第一作者: 渠鹏荣, 男, 1996年出生, 2020年毕业于辽宁工程技术大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 周翀, E-mail: zhouchong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-11-11, 修回日期: 2023-02-11

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1902000), Shanghai Pilot Program for Basic Research - Chinese Academy of Sciences, Shanghai Branch (No.JCYJ-SHFY-2021-003)

First author: QU Pengrong, male, born in 1996, graduated from Liaoning Technical University in 2020, master student, focusing on nuclear reactor thermal hydraulics

Corresponding author: ZHOU Chong, E-mail: zhouchong@sinap.ac.cn

Received date: 2022-11-11, revised date: 2023-02-11

numerical simulations were carried out by using computational fluid dynamics (CFD) analysis software Fluent. The Mixture model was used to simulate the boiling heat exchange of water in the heat exchanger element. Finally, different parameter sensitivity analysis scenarios were designed to investigate the effect on the transient. **[Results]** The analysis results show that the heat exchange power of the heat exchange element gradually decreases with time, and the temperatures of the outer wall and the hot spot of molten salt have a peak with time. **[Conclusions]** By increasing the axial height of the thimble and enhancing the emissivity of the air gap layer, the temperature peak can be significantly reduced, and the peak value can be slightly reduced by delaying the salt discharge time. In addition, the triangular arrangement of can delay the local solidification time. The study results can provide some reference for EDS-PRHRS design.

Key words Molten salt reactor, Residual heat removal system, Numerical simulation, Transient state, Sensitivity analysis

在美国三里岛事件以及日本福岛事件发生后,核反应堆的安全问题越发重要,成为其发展的重要障碍。大多数反应堆事故都是由于反应堆失效后,衰变热无法及时排出使得堆芯受到结构性破坏导致的,因此反应堆的余热排出是重要课题之一。随着非能动概念和技术^[1]在核反应堆上的应用的不断推广,以AP1000为典型的第三代反应堆在非能动余热排出技术的加持下,不依赖外部输入(力、功率或者信号、人工操作),通过自然规律和固有特性,自发地将堆芯衰变热排出,维持失效安全状态,从而使得反应堆安全性得到了极大提升。

作为第四代反应堆之一的液态熔盐堆^[2],相较于其他堆型有所不同,熔融的氟盐既是燃料盐,又要充当一回路工质^[3]。基于其液态燃料的特性,美国国家橡树岭实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)在建造熔盐实验堆(Molten Salt Reactor Experiment, MSRE)时设计了能动的排盐系统^[4],该系统主要通过循环泵将排盐罐中的热量导出,在紧急事故下,带有衰变热的熔盐将从堆芯排出进入排盐罐,并由循环泵驱动冷却回路将排盐罐内的衰变热带出,从而保证堆芯安全,该设计相较于固态堆,无须在堆芯设计复杂的辅助换热设备,结构简单,具有更好的本征安全性(图1)。

孙露等^[5]在MSRE原有的余热排出系统上取消循环泵回路,设计了10 MW熔盐堆非能动余热排出系统,并通过一维传热模型建立余热排出瞬态分析程序^[6],论证了通过非能动的自然循环实现排盐罐余热导出的可行性,该程序着重于系统整体分析而简化了换热元件与熔盐的传热过程。而液态熔盐堆排盐罐中熔盐温度在900 K以上,对于结构安全性影响很大。为了更好地分析排盐罐内的换热特性,陈凯伦^[7]、黄婉珏^[8]等结合实验数据对排盐罐内的余热导出进行了数值模拟研究,其中陈凯伦着重于熔盐热分层现象的研究,黄婉珏则通过数值模拟对换

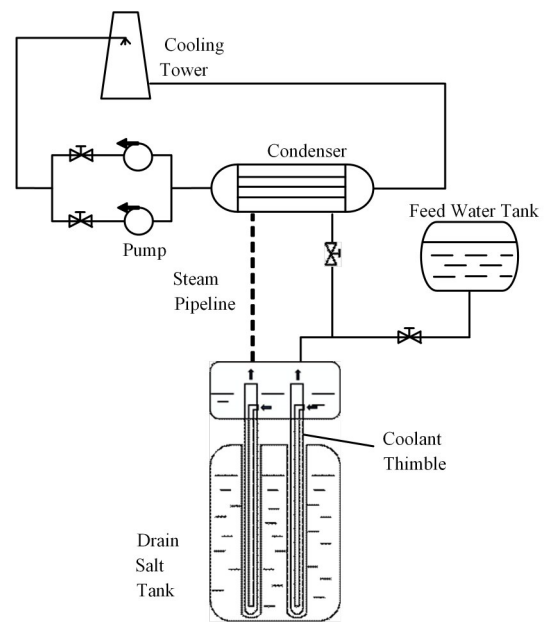


图1 MSRE余热排出系统示意图
Fig.1 Diagram of MSRE residual heat removal system

热元件排布参数进行敏感性分析。

在以上数值模拟研究中,陈凯伦仅考虑排盐罐的熔盐区域,换热元件壁面的给定热流密度;黄婉珏则将换热元件内的水的沸腾换热简化为第三类边界条件。但换热元件的壁面换热功率与相邻的熔盐温度相互耦合,单侧假设的数值模拟无法准确体现排盐罐内的余热导出过程,同时由于简化换热元件模型,开展的相关参数敏感性分析有限,因此本文以液态熔盐堆紧急排盐非能动余热排出系统(Emergency Draining Salt Passive Residual Heat Removal System, EDS-PRHRS)为研究对象,针对熔盐满载情况下,建立换热元件耦合熔盐侧的余热导出瞬态计算模型,对换热元件尺寸参数、运行参数、材料物性和排布方式进行了敏感性分析,这些研究结果可以为非能动余热排出系统设计提供一定的参考价值。

1 液态熔盐堆 EDS-PRHRS 分析及研究内容

1.1 液态熔盐堆 EDS-PRHRS 介绍

EDS-PRHRS 需要在反应堆发生突发事故导致

应急设备失效的情况下,在无须额外动力的输入时仍然能够依靠自发的物理现象如自然循环将反应堆内的衰变热导出,从而防止事故的进一步扩大。图 2 为 EDS-PRHRS 图,该系统主要包括两个子系统。

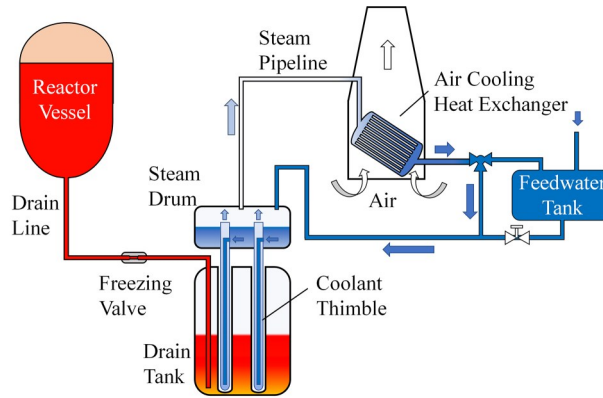


图 2 液态熔盐堆紧急排盐余热排出系统示意图
Fig.2 Diagram of liquid fuel molten salt reactor EDS-PRHRS

一个是堆芯、冷冻阀和排盐罐所构成的紧急排盐系统。其非能动性主要体现在冷冻阀,正常工况下冷冻阀周围有冷却气体使阀体内的熔盐维持在冻堵状态,冷却气体由电驱动的风机供给,一旦意外事故发生,冷却气体停止供给,熔盐依靠堆芯或自身衰变热功率加热阀体内的熔盐,从而使冷冻阀融通,堆芯熔盐进入排盐罐。

另一个是由换热元件、汽包、空冷塔、给水箱等部件组成的非能动余热排出系统。其中换热元件的结构如图 3 所示,主要由进水管、中间套管和外层套管组成,进水管入口端位于汽包液位之下,水从进水管入口段流入,底部折返进入水环间隙,在上升过程中吸收熔盐的热量汽化并从中间套管出口段流出,进入汽包蒸汽区,汽包外接冷凝回路,蒸汽冷凝并流回汽包中。在这一过程中由于相变产生的压差使得自然循环建立,达到非能动的效果,外层套管的作用则是避免中间套管与熔盐直接接触,两层套管之间形成一层气隙层充当隔热材料,降低中间套管壁面温度,防止水环间隙压力过大,同时避免破口事故中水与熔盐直接接触。

EDS-PRHRS 可以运用于多种事故场景,如以自然灾害等引起的全厂断电事故(Station Blackout, SBO)为例,表 1 为事故序列,图 4 为该事故下的熔盐液位变化和余热排出功率情况。

I 阶段为停堆响应阶段,控制棒落入前堆芯处于高功率状态;II 阶段为熔盐待排阶段,堆芯功率急剧下降,燃料盐和冷却盐的强迫循环丧失,进而导致熔盐温度上升,与此同时冷冻阀外部缺乏冷却气体,阀

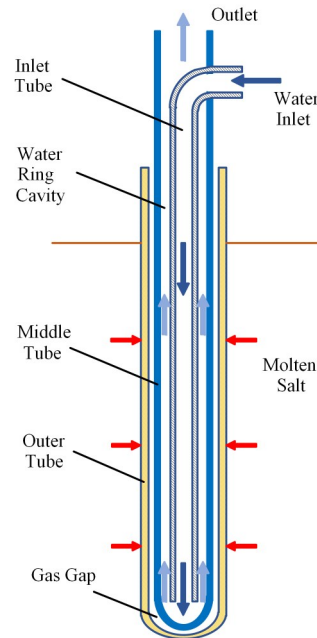


图 3 换热元件结构示意图
Fig.3 Structure diagram of coolant thimble

表 1 SBO 事故序列

Table 1 Accident sequence after SBO accident

时间 Time	事件序列 Sequence of events
t'_0	全厂断电事故发生 SBO occurrence
t_0	控制棒落入 Control rod falling
t_1	冷冻阀融通,进入排盐管线 Open the freezing valve, salt into pipeline
t_2	排盐结束 Salt discharge end
t_3	余热排出系统维持低功率状态 Low power state

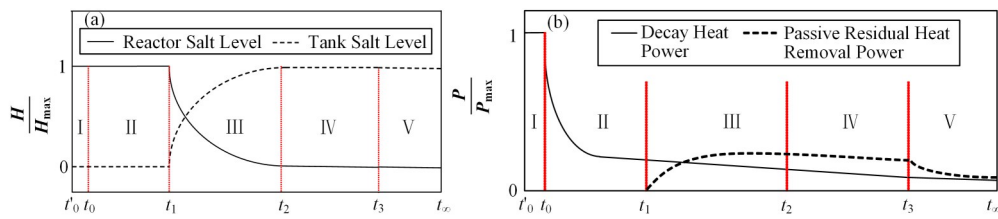


图4 紧急排盐非能动余热排出系统熔盐液位(a)和功率(b)随时间的变化
Fig.4 Change of molten salt level (a) and power (b) with time in EDS-PRHS

体内的熔盐开始逐步熔化;III阶段为排盐阶段,冷冻阀融通后,熔盐随着排盐管线排入排盐罐,排盐罐事先进行预热,保证换热元件快速启动和防止初始排盐导致热应力过大,该过程中换热元件的功率随着熔盐液位的增加而升高;IV阶段为排盐罐满载排热阶段,该阶段占据了整个余热排除过程的大部分时间,也是本文研究的主要过程;V阶段为排盐罐低功率排热阶段,采用排盐罐自带的伴热系统进行保温,或者通过调节汽包液位,减少换热元件运行根数,从而使非能动余热排出系统维持在低功率状态。

1.2 排盐罐满载排热阶段的瞬态特性研究内容

为了安全起见,液态熔盐堆设置有两套余热排出系统:一套是针对堆芯的堆舱余热排出系统;另一套即为紧急排盐余热排出系统。保守假设的情况下,忽略堆舱余热排出系统功率,以及排盐阶段换热元件启动过程的换热功率,则在I~III阶段中,熔盐的

峰值温度和平均温度在逐渐上升,如图5所示,到 t_2 时刻排盐结束,在IV阶段排盐罐满载排热工况下,熔盐平均温度逐渐降低,但由于液态燃料盐自带衰变热功率特性可能会出现局部升温的现象,因此熔盐热点温度会有峰值。

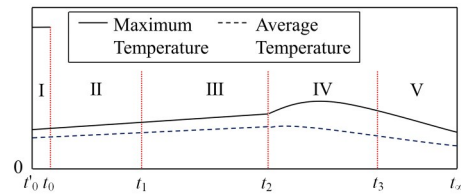


图5 紧急排盐非能动余热排出系统熔盐温度变化
Fig.5 Change of temperature in EDS-PRHS

而排盐罐设计中两个重要的安全评价准则^[9],如表2所示。只有满足温度允许范围之内,才能保证其安全运行。此外防止过冷凝固导致局部临界,熔盐的冷却速度不宜过快且必须高于冷凝温度743 K。

表2 排盐罐安全评价准则
Table 2 Safety evaluation guidelines

参数 Parameters	限值 Limit value
熔盐最高温度 Molten salt maximum temperature / K	1 473
换热元件壁面峰值温度 The peak temperature of outer tube / K	977

为得到合理的排盐罐设计,研究排盐罐满载排热阶段的瞬态特性研究十分重要。该阶段以 t_2 时刻作为计算的初始时刻。部分文献对于冷冻阀的非能动开启过程进行研究^[10],冷冻阀的非能动开启过程为15~20 min,排盐时间与堆本体管道设计密切相关,§2计算假设排盐结束时刻 t_2 为停堆后30 min并在§3进行排盐时间的敏感性分析。

停堆时堆芯平均温度约为923 K^[11], $t_0 \sim t_2$ 时刻,不考虑堆舱余热排出和石墨热容的影响下,对熔盐比热容吸收衰变热产生的温升可以通过以下公式进行保守估算。

$$\Delta T = \frac{\int_{t_0}^{t_2} P(t) dt}{cm} \quad (1)$$

式中: ΔT 为衰变热导致的温度变化量; $P(t)$ 为衰变功率随时间变化情况,本文采用Todreas&Kazimi衰

变热公式; c 为熔盐比热容; m 为熔盐质量,计算可得满载排热阶段的熔盐平均温度为953 K。

换热元件自然循环的建立主要发生在 t_2 时刻之前,且由于排盐罐事先预热,自然循环建立时间相较排盐时间较短,因此,可认为 t_2 时刻下已建立稳定的自然循环。

本文针对排盐罐满载排热阶段余热导出过程进行数值模拟,相较以往研究考虑了换热元件多相流对换热功率的影响,并选取相关参数做敏感性分析:

1)在相同换热元件数量情况下,换热元件长度(排盐罐高度)对瞬态特性的影响;2)换热元件的自然循环流量、排盐时间对瞬态特性的影响;3)气隙层材料、气隙层管壁面发射率对瞬态特性的影响;4)在相同换热元件数量情况下,换热元件不同排布方式对瞬态特性的影响。

2 排盐罐满载排热阶段余热导出数值计算

2.1 计算对象

图6(a)为满载排热阶段排盐罐示意图。在此阶段,排盐罐中熔盐液位达到最高,排盐罐中的换热元件可以按照正方形或三角形排布完全插入熔盐中。图6(b)中,高温熔盐与外层套管接触,通过气隙层导热以及气隙层相邻壁面的辐射换热将热量传入中间套管,加热水环间隙并通过水蒸气将热量带出排盐罐。本文计算所采用的30 MW EDS-PRHRS排盐罐设计参数如表3所示。换热元件结构如图3所示,

换热元件设计参数如表4所示。

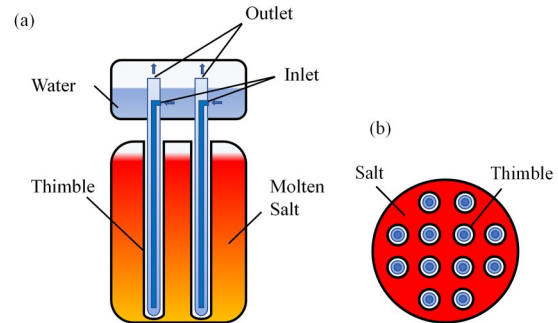


图6 排盐罐满载排热阶段示意图(a)和换热元件正方形排布示意图(b)

Fig.6 Schematic of the drain tank (a) and the square arrangement of thimble (b)

表3 排盐罐结构参数
Table 3 Drain tank parameters

参数 Parameters	数值 Value
熔盐总体积 Total volume of fuel salt / m ³	5
换热元件排布方式 Thimbles arrangement	正方形排布 Square
换热元件数 Number of thimbles	196
单根换热元件对应的熔盐体积 Single thimble molten salt volume / m ³	0.027 4
换热元件间距 Pitch / mm	138

表4 换热元件参数
Table 4 Thimble parameters

参数 Parameters	数值 Value
换热元件换热段长度 Thimble heat exchange section length / mm	1 500
换热元件进水管外径 Diameter of the inlet tube / mm	12.7
进水管壁厚 Wall thickness of the inlet tube / mm	1.25
中间套管外径 Diameter of the middle tube / mm	25.4
中间套管壁厚 Wall thickness of the middle tube / mm	1.5
外层套管外径 Diameter of the outer tube / mm	38
外层套管壁厚 Wall thickness of the outer tube / mm	2

为了满足设计需求,排盐罐中换热元件根数可以达到几百甚至上千根,且分布到每根换热元件周围的熔盐体积份额近似相等,可以将单根换热元件及分配的熔盐体积看成一个单元并计算,可以有利于简化计算和研究分析。采用商业软件ANSYS自带的Design Modeler进行单元建模,如图7所示,划分网格并导入Fluent进行数值模拟。

2.2 模型选择

在排盐罐换热元件的沸腾传热过程中,采用Mixture模型进行换热元件内水的沸腾传热计算,并开启水—蒸汽传热传质模块,Mixture模型是一种简化的欧拉模型,且相较于一般的多相流计算,换热元件内并不需要追踪气液相界面的变化,而更多地关注于换热元件内水沸腾传热所造成的换热量变化,因此可以在体现换热元件内沸腾传热的现象的情况

下,节约计算资源。辐射模型则采用应用广泛的DO (Discrete Ordinates)模型进行计算。湍流模型选择SST $k - \omega$ 模型进行计算。

2.3 条件及假设

进水管入口边界条件为质量流量边界条件。水环间隙出口则设置为压力出口,且进口水温以及出口回流温度为汽包水温。不考虑熔盐顶端与底端的传热,可设为绝热边界条件。计算模型侧面则设置为对称边界条件。

满载排热阶段从图4(b)中的 t_2 时刻开始,是从停堆时刻算起的1 800 s,在以下的计算中,以 t_2 时刻为0时刻进行计算,排盐罐内熔盐的平均温度为953 K,换热元件内水已经处于沸腾换热状态。在初始条件设置时,应该先对模型进行稳态计算,得出初始排盐温度下换热元件的沸腾换热状态,确保正常

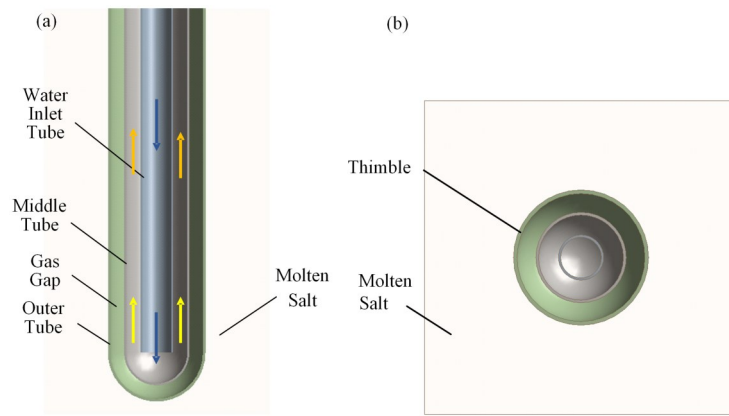


图7 换热单元计算模型 (a) 侧视图, (b) 俯视图
Fig.7 Calculation model for heat exchange element (a) Side view, (b) Vertical view

启动, 然后以此作为瞬态计算的初始态。

孙露等^[12]将MSRE实验堆的衰变热功率与现有的相关衰变热公式进行对比, 发现Todreas&Kazimi公式与实验误差较小。

$$\frac{P}{P_0} = 0.066 \left[\tau^{-0.2} - (\tau + \tau_0)^{-0.2} \right] \quad (2)$$

式中: P 和 P_0 分别为停堆 τ 时衰变热功率以及反应堆停堆前连续运行 τ_0 时间的功率; τ 和 τ_0 分别为反应堆停堆后的持续时间和停堆前的连续运行时间。本文所研究的熔盐堆为30 MW功率连续运行1 000 h后

的衰变热进行计算。利用Fluent自带的UDF(User Defined Functions)功能将该公式作为热源项并从停堆后1 800 s开始取值, 代入熔盐对应的计算域中。

2.4 相关输入参数

30 MW熔盐堆所使用的LiF-BeF₂-UF₄-ThF₄盐^[13], 换热元件所用的金属材料为抗腐蚀性良好的UNS-N10003合金, 热物性参数分别如表5所示, 导入Fluent材料库中。哈尔滨工程大学在换热元件的自然循环方面做了大量实验, 本文主要参考其实验中的运行参数^[14], 如表6所示。

表5 热物性参数
Table 5 Thermophysical parameters

参数 Parameters	LiF-BeF ₂ -UF ₄ -ThF ₄ (823~1 023 K)	UNS-N10003
密度 Density / kg·m ⁻³	2 757.9-0.4647T+1.197×10 ⁻⁴ T ² -5.88×10 ⁻⁸ T ³	8 860
比热 Specific heat capacity / J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	2 386	586
热导率 Thermal conductivity / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	1.4	20.3
黏度 Viscosity / Pa·s	1.43-0.004 3T+4.358×10 ⁻⁶ T ² -1.487×10 ⁻⁹ T ³	—

表6 运行参数
Table 6 Operating parameters

参数 Parameters	数值 Value
换热元件进口水温 Inlet water temperature / K	390
换热元件工作压力 Work pressure / MPa	0.19
单根管进口水流量 Single thimble mass flow / kg·s ⁻¹	0.1

2.5 网格无关性验证及步长独立性验证

对几何模型进行网格划分, 为了验证瞬态情况下的网格敏感性, 分别对不同网格进行计算, 并监测0~100 s内的换热元件外层套管外壁面的换热功率, 结果如图8所示。

从图8可以看到, 当网格数达到150万时, 计算结果趋于收敛, 因此在计算精度与计算资源的考虑下选择该数量下的网格进行计算, 可以得到比较精

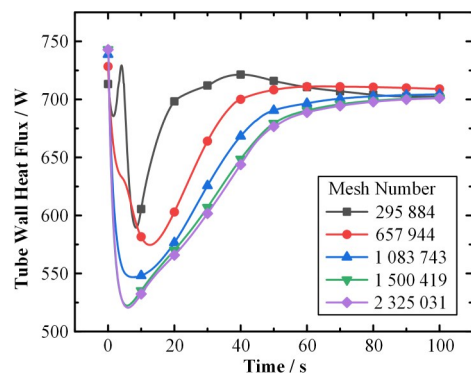


图8 网格无关性验证结果
Fig.8 Verification results of mesh independence

确的结果。

在150万网格下对瞬态下不同时间步长进行计算, 如图9所示, 当时间步长小于0.01 s时趋于收敛, 综合考虑计算时间与精度, 采用0.01 s时间步长进

行后续计算。

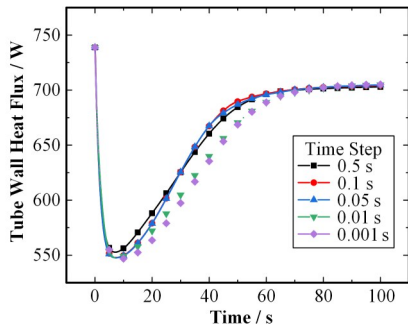


图9 时间步长独立性验证结果
Fig.9 Verification results of time step independence

2.6 计算结果分析

图10中给出了1/4换热元件管壁面换热功率随时间变化情况,初始0时刻为排盐结束时刻 t_2 。由于初始时刻将熔盐区域设为均匀温度场,因此在计算开始会有一个建立过程,但整个时间域内,由于熔盐温度逐渐降低,受温度影响较大的辐射换热热量减小,从而换热元件的换热量也随之降低。图11为模型下半部分的温度分布云图,可以看到附着于换热元件的熔盐下沉,并逐渐发展为较明显的热分层现象。

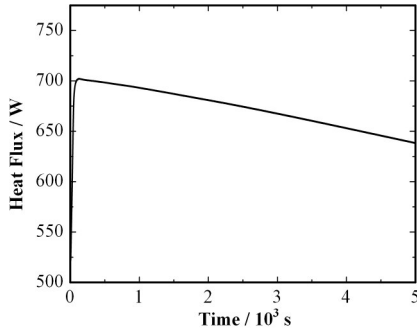


图10 外层套管壁面换热功率随时间变化情况
Fig.10 Change of heat transfer power of outer wall with time

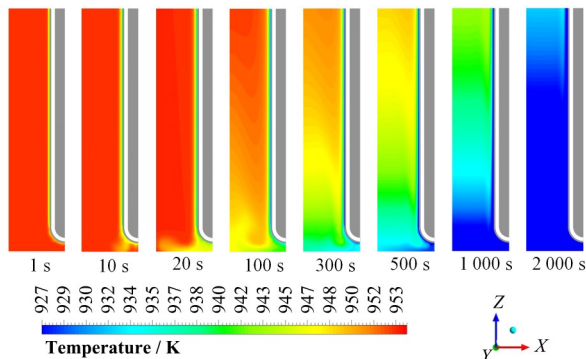


图11 熔盐底部区域温度等值线随时间变化情况
Fig.11 Change of temperature contours at bottom region of salt zoon with time

图12为换热元件水环间隙出口含气率随时间变化情况,熔盐在逐渐冷却的过程中,水环间隙的沸腾换热受到熔盐温度的影响,导致出口含气率逐渐降低,从而使得换热元件的功率也随之降低。

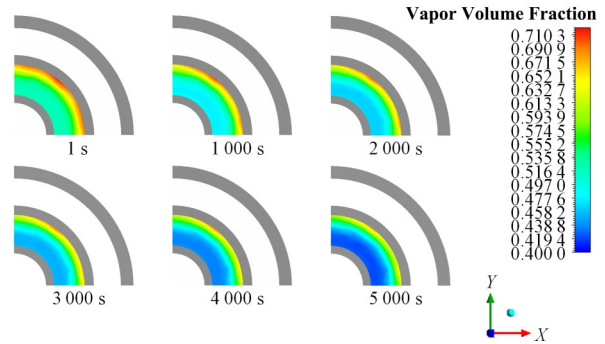


图12 水环间隙出口含气率随时间变化情况
Fig.12 Change of water ring cavity vapor volume fraction with time

图13为单根换热元件换热功率与对应周围熔盐产生的衰变热功率的比较,0时刻为停堆后的 t_0 ,排盐罐满载排热阶段,单根换热元件的冷却功率持续高于对应的熔盐的衰变热功率。

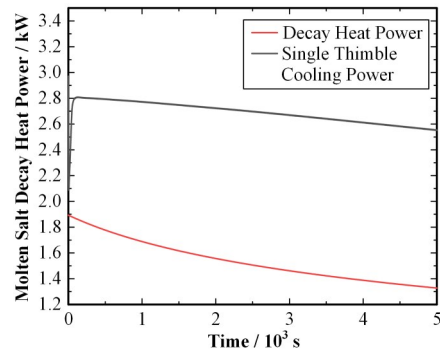


图13 单根换热元件换热功率与对应熔盐产生的衰变热功率
Fig.13 Single thimble heat exchange power and decay heat power

图14为壁面最高温度和熔盐最高温度随时间变化情况,初始0时刻为排盐结束时刻 t_2 (§3均以此为0时刻)。和前文分析的一样,图中管壁面温度和熔盐最高温度存在峰值,其原因是熔盐自带衰变热功率的特性以及受熔盐热导率的影响,导致一定时间内局部温度升高。

从图14可以看出,该设计下的热点温度峰值远低于安全评价准则所要求的温度值,但仍然有一定的优化空间,在热点温度峰值不超过安全评价准则要求的情况下,适度增加元件排布间距或减少换热元件数量能提高排盐罐的经济性。

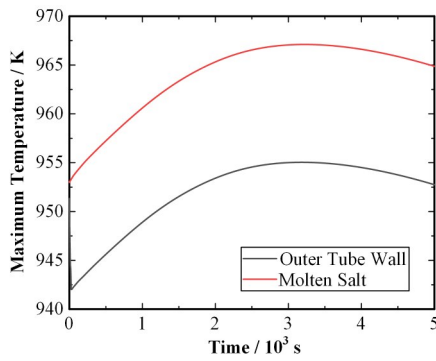


图14 熔盐和换热元件外套管壁面最高温度随时间变化情况

Fig.14 Changes of maximum temperature in outer wall and molten salt with time

3 EDS-PRHS 排盐罐参数敏感性分析

3.1 轴向尺寸参数敏感性分析

在紧急排盐余热排出系统中的排盐罐虽然没有石墨结构来维持反应性,但换热元件中的水的存在仍然有达到临界的可能,对于整个排盐罐来说,细长型的罐体相比于粗短型的罐体拥有更小的临界风险,通过数值模拟分析轴向尺寸参数对熔盐余热导出瞬态特性的影响。轴向尺寸主要是指换热元件的换热段长度,上文已经提到由于熔盐自带体积衰变热功率的特殊性,必须保持模型冷却熔盐体积是一定的,因此通过相关的计算,得出不同换热段长度对应的间距,并进行数值模拟。

图15是不同换热段长度瞬态特性随时间变化情况,随着换热元件换热段轴向高度每增加0.3 m,壁面最高温度峰值降低约5 K,由表7可以看出,峰值出现的时间点也随着轴向高度的增加而不断提前,可见,在换热元件不变的情况下,换热元件轴向高度的增加有利于熔盐侧自然对流的形成,显著改善余热排出过程。随之而来,轴向高度增加的同时会导致熔盐冷却过快,从而使得发生凝固的时间点提前。该数值模拟具有一定的局限性,换热元件轴向高度的增加也会使得自然循环的阻力增加,需要做进一步的实验研究得出换热元件高度对自然循环的影响。

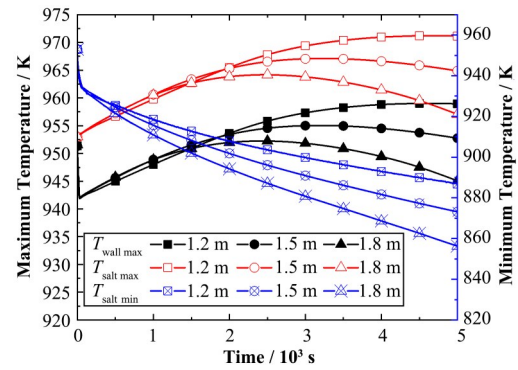


图15 不同换热长度外管壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度变化情况

Fig.15 Variations of maximum temperatures of the outer tube wall, molten salt and the minimum temperature of molten salt under different heat exchange length

3.2 运行参数敏感性分析

在排盐罐满载排热阶段,极易因为落棒速度、冷冻阀融通时间、排盐罐排盐时间的改变而导致排盐结束时刻提前或滞后,熔盐自身的衰变热功率本身是时间的函数,如图16所示,排盐时间提前会使得熔盐和换热元件的壁面最高温度的峰值增加,但衰变热功率曲线只在最初的时刻变化比较剧烈,到排盐阶段衰变热的变化已趋于平缓,因此排盐时间的变化对峰值温度的影响较小。

换热元件自然循环流量的大小影响水环间隙的

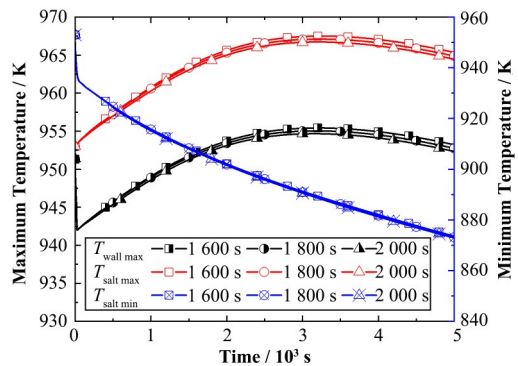


图16 不同排盐时间壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度变化情况

Fig.16 Variations of maximum temperatures of outer tube wall, molten salt, and minimum temperature of molten salt at different drain time

表7 峰值温度对应的时间

Table 7 Time corresponding to peak temperature

参数 Parameters	1.2 m		1.5 m		1.8 m	
	值 Value / K	时间 Time / s	值 Value / K	时间 Time / s	值 Value / K	时间 Time / s
外层套管壁面最高温 Maximum temperature of the outer tube wall	959.02	4 619.7	955.04	3 186.7	952.3	2 430
熔盐最高温 Maximum temperature of molten salt	971.21	4 666.1	967.11	3 223.6	964.2	2 463.2

流速,从而对对流换热以及饱和和沸腾传热造成一定的影响。如图17所示,在不同的自然循环流量下,换热元件外壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度变化很小,通过图18可知,换热元件的换热性能并未随流量的变化而改变,但影响了出口的蒸汽流量,循环流量越小则出口蒸汽份额越大。

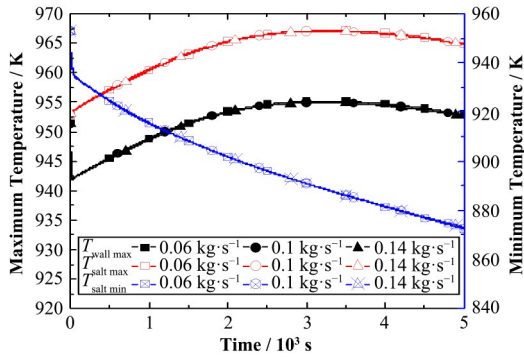


图17 不同循环流量下壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度变化情况

Fig.17 Variations of maximum temperatures of outer tube wall, molten salt, and minimum temperature of molten salt in different circulating mass flow

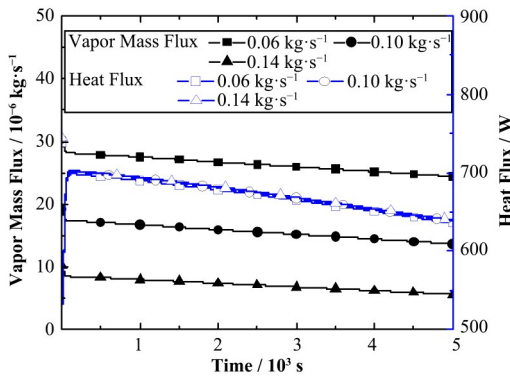


图18 不同循环流量下出口蒸汽流量和管壁面换热功率随时间变化情况

Fig.18 Variations of outlet vapor mass flux and outer tube wall heat flux in different circulating mass flow with time

3.3 材料物性敏感性分析

MSRE的换热元件气隙层为氮气,哈尔滨工业大学的相关研究中则气隙层与大气环境相连,图19为气隙层采用不同气体下的数值模拟情况。可以看到,两种材料的物性不同对于瞬态特性的影响不大,其原因是两种气体对于气隙层辐射换热的影响较小,而空气的热导率与氮气的热导率相差不多,既验证了哈工程实验的合理性,也从热工的角度证明采用成本更低的空气并不会影响换热元件的换热能力。

换热元件中间套管和外层套管之间通过气隙层进行热量的传递,气隙层主要传热方式是辐射换热

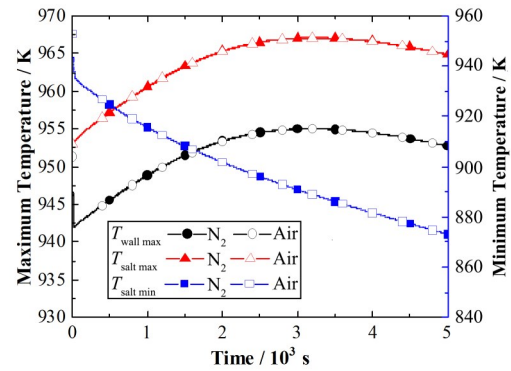


图19 不同气隙层材料下壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度随时间变化情况

Fig.19 Variations of maximum temperatures of outer tube wall, molten salt, and minimum temperature of molten salt in different gap materials with time

和热传导,由于气体的导热性较差,因此,大部分是通过热辐射来进行换热的,ORNL曾对换热元件材料的发射率进行了实验测量^[15],在高温下(800 °C)测得其发射率值在0.5~0.75分布,§2文中采用平均发射率为0.625,现采用不同的发射率对换热元件进行数值计算,如图20所示,不同发射率下对于瞬态特性的影响较大,气隙层壁面发射率每增加0.125使得换热元件壁面峰值温度提高了约4.3 K。

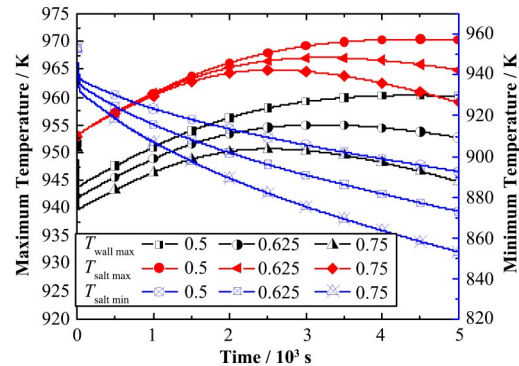


图20 气隙层不同壁面发射率下壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度随时间变化情况

Fig.20 Variations of maximum temperatures of outer tube wall, molten salt, and minimum temperature of molten salt in different gap emissivity with time

3.4 排布方式敏感性分析

早期的MSRE采用同心圆的32根管的排布方式,而随着熔盐堆设计功率的增加,排盐罐设计功率也随着增加,为了更好地设计计算,初步采用正方形和三角形两种基本排布形式,如图21所示,在相同换热元件数的情况下,保证单根换热元件对应的熔盐体积不变,对这两种形式进行数值模拟,结果如图22所示。

通过数值模拟发现,在换热元件数相同的情况下,正方形排布的换热元件外壁面温度峰值以及熔

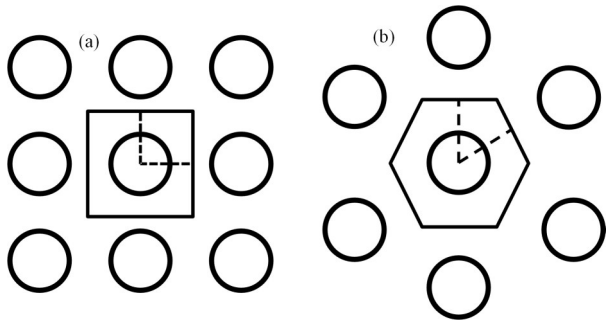


图21 换热元件排布方式 (a) 正方形排布, (b) 三角形排布
Fig.21 Arrangement of heat exchange element
(a) Square, (b) Triangular

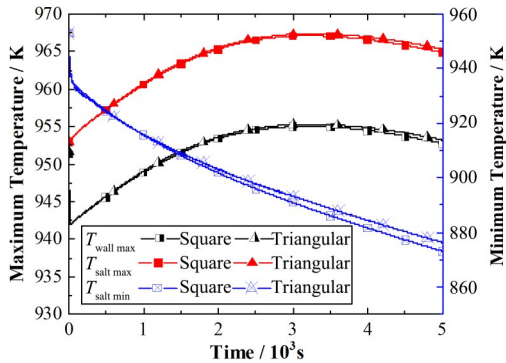


图22 不同排布方式下的换热元件外管壁面最高温度、熔盐最高温度和熔盐最低温度随时间变化情况
Fig.22 Variations of maximum temperatures of outer tube wall, molten salt, and minimum temperature of molten salt in different arrangements with time

盐最高温度峰值要略低于三角形排布, 而熔盐最低温度三角形排布要高于正方形排布, 从计算结果来看, 三角形排布的熔盐和换热元件外层套管壁面热点温度比正方形排布高不到 1 K, 但二者熔盐最低温度达到 876.35 K 所用的时间, 三角形排布要比正方形排布多 388 s, 故采用三角形排布可以在略微提高换热元件外壁面最高温度和熔盐最高温度的情况下显著延长熔盐凝固点时间。

造成这种现象的主要原因是, 在冷却相同体积的熔盐情况下, 三角形排布间距为 148.3 mm, 正方形排布间距为 138 mm, 变相增加了熔盐径向传热厚度以及削弱了熔盐内部的自然对流, 因此, 三角形排布的温度要高于正方形排布。而熔盐的热点温度主要位于熔盐顶端且远离换热元件的区域, 其径向位置位于图 23 中的 A 和 B 点, A 点中心距为 97.58 mm, B 点中心距为 85.61 mm, C 点和 D 点为近管壁面位置, 图 24 为 5 000 s 时刻下 4 个点的轴向温度分布情况。显然由于三角形排布下热点温度距离管壁面更近, 削弱了因间距增大带来的不利影响, 因此三角形排布下熔盐最低温明显高于正方形排布, 熔盐和换热元件壁面的最高温却相差不大。

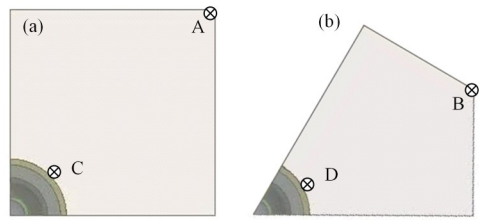


图23 换热元件排布方式 (a) 正方形排布, (b) 三角形排布
Fig.23 Arrangement of heat exchange element
(a) Square, (b) Triangular

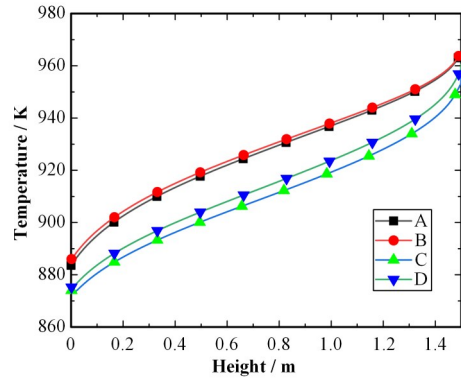


图24 轴向温度分布(5 000 s)
Fig.24 Temperature distribution (5 000 s) along axial direction

4 结语

针对排盐罐中的满载排热阶段利用 Ansys Fluent 建立耦合多相流的熔盐余热导出模型并进行数值模拟, 研究了相关参数对该过程的瞬态特性的影响, 并得出以下结论:

1) 由于熔盐衰变热功率的影响, 熔盐区域和换热元件外层管壁面的热点温度随时间变化过程中存在峰值, 熔盐区域温度峰值出现在 t_2 后的 3 223.6 s, 外层套管壁面温度峰值出现在 t_2 后的 3 186.7 s。

2) 排盐罐相同换热元件数的情况下, 增加换热元件的长度可以使得熔盐区域和换热元件外层管壁面的热点温度峰值降低, 同时也会使得熔盐区最低温度下降过快。

3) 排盐时间结束的时间点提前或者延后对于瞬态特性会有一定影响, 但影响的效果有限。自然循环流量对于余热导出瞬态特性几乎没有影响, 但对于水环间隙的沸腾状态有影响, 循环流量的减少会导致蒸汽量的增加。

4) 采用氮气和空气两种气隙层材料进行模拟, 二者模拟结果近似等同, 在实验阶段采用空气作为气隙层的隔热材料可以在保证准确性的情况下降低成本。气隙层间的传热中辐射传热约占 80%, 气隙层间壁面发射率对余热排出的影响较大, 通过碳化等方式提高管壁面的发射率可以有效提高余热排出

的效果,并降低热点温度峰值来提高设备的安全性。

5)采用正方形排布和三角形排布进行模拟发现,正方形排布下的熔盐和换热元件外管壁面热点温度小于三角形排布,三角形排布下的熔盐最低温度要高于正方形排布,且通过比较发现采用三角形排布在略微增加熔盐和换热元件外管壁面峰值温度的情况下,明显延长熔盐局部凝固发生的时间,降低局部凝固的风险,提高设备安全性,可见三角形排布优于正方形排布。

作者贡献声明 渠鹏荣负责仿真模拟及结果分析,起草论文并完成后续修订;周翀负责指导研究思路和提供研究意见并协助论文修改;王纳秀负责专业指导和疑问解答;邹杨负责研究方向指导以及研究进度监督;王善武负责协助仿真模拟。

参考文献

- 周涛,李精精,汝小龙,等. 核电机组非能动技术的应用及其发展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(8): 81 - 89, 14. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.08.014.
ZHOU Tao, LI Jingjing, RU Xiaolong, *et al.* Application and development of passive technology in nuclear power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(8): 81 - 89, 14. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.08.014.
- 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.
- 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. DOI: 10.7693/wl20160904.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, 45(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- Robertson R. MSRE design and operations report. Part I. description of reactor design[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1965. DOI: 10.2172/4654707.
- Sun L, Sun L C, Yan C Q, *et al.* Conceptual design and analysis of a passive residual heat removal system for a 10 MW molten salt reactor experiment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 70: 149 - 158. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.09.013.
- 法丹. 熔盐堆非能动余热排出系统设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
FA Dan. Design and analysis of passive residual heat removal system for molten salt reactor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- 陈凯伦. 熔盐堆非能动余热排出系统特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
CHEN Kailun. Study on the characteristics of passive residual heat removal system for molten salt reactor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- 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.
- 王凯,焦小伟,杨群,等. 紧急停堆棒落棒时间对熔盐堆反应性引入瞬态的影响[J]. 核技术, 2020, 43(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
WANG Kai, JIAO Xiaowei, YANG Qun, *et al.* The effect of scram rod drop time on the consequences of molten salt reactor reactivity insertion transient[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
- 蒋鑫越,王纳秀,苏博,等. 一种常闭翅片式冷冻阀的结构设计与有限元分析[J]. 核动力工程, 2019, 40(6): 149 - 154. DOI: 10.13832/j.jnpe.2019.06.0149.
JIANG Xinyue, WANG Naxiu, SU Bo, *et al.* Structural design and finite element analysis of a normally-closed finned freeze valve[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(6): 149 - 154. DOI: 10.13832/j.jnpe.2019.06.0149.
- 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.
- 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.
- 金愿,程进辉,王坤,等. 几种典型熔盐冷却剂的热物性研究[J]. 核技术, 2016, 39(5): 050604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050604.
JIN Yuan, CHENG Jinhui, WANG Kun, *et al.* Research on thermo-physical properties of several typical molten salt coolants[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(5): 050604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050604.

050604. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050604](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050604).
- 14 杨宗昊. 熔盐堆非能动余热排出系统换热元件传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
YANG Zonghao. Heat transfer characteristics of cooling thimbles in a molten salt reactor passive residual heat removal system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- 15 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](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.03.026).