

VVER堆芯捕集器换热特性数值模拟研究

朱光昱^{1,2} 郭超¹ 刘巧凤¹ 李春¹ 依岩¹

1(生态环境部核与辐射安全中心 北京 100082)

2(中国核电工程有限公司 核电安全研究中心 北京 100840)

摘要 核电厂发生堆芯熔毁严重事故后,堆芯熔融物可能熔穿反应堆压力容器壁面造成第二道屏障失效,此时可通过堆芯捕集器收集并冷却熔融物以防止事故进一步发展。为了探讨俄罗斯VVER(Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor)采用的坩埚式堆芯捕集器中熔融物的冷却过程,本文根据VVER堆芯捕集器设计资料推导参数,采用多物理场耦合软件COMSOL建立相应的计算模型,对堆芯捕集器中熔融池的流场、温度场和结壳情况进行了数值模拟研究。计算结果表明:在分层熔融池结构下,金属层会迅速凝固,含衰变热的氧化物层冷却十分缓慢。为了实现坩埚式堆芯捕集器设计功能,需要相关设备和支持辅助系统在很长时间内保持可运行性。

关键词 严重事故, 堆芯捕集器, VVER, 熔融物, 数值模拟

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070604

Numerical simulation on heat transfer of VVER core catcher

ZHU Guangyu^{1,2} GUO Chao¹ LIU Qiaofeng¹ LI Chun¹ YI Yan¹

1(Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

2(Center for Nuclear Power Safety, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract [Background] The core corium may melt through the reactor pressure vessel wall then lead to the failure of the second barrier during a serious accident. Core catcher can collect and cool the corium and prevent the development of severe accident. [Purpose] This study aims to establish a computational model to explore the cooling process of crucible core catcher adopted by VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor) designed by Russia. [Methods] According to the derived parameters based on VVER core catcher design data, non-isothermal flow calculation module of COMSOL was established to simulate the flow field, temperature field, and crust distribution of corium pool. The solidus temperature and liquidus temperature and the exponential form change of corium viscosity were referred to the research results of VULCANO item. [Results] For the double layered structure of the corium pool in core catcher, the metal layer solidifies quickly after a core meltdown accident. Constantly changing natural convection flows are formed in the upper and middle part of the oxide layer and the temperature distribution is relatively uniform. No strong convection exists in the lower part of the oxide layer lead to obvious thermal stratification. Most of the corium cooled in the upper part of the oxide layer will transfer to the lower part by gravity and natural convection before full solidification, resulting in a slow increase in the thickness of the upper crust and a

国家重点研发计划(No.2019YFB1900705)资助

第一作者: 朱光昱, 男, 1989年出生, 2015年于哈尔滨工程大学获硕士学位, 研究领域为反应堆严重事故

通信作者: 李春, E-mail: lichun@chinansc.cn

收稿日期: 2022-09-27, 修回日期: 2022-12-09

Supported by National Key R&D Program of China (No.2019YFB1900705)

First author: ZHU Guangyu, male, born in 1989, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2015, focusing on reactor severe accident

Corresponding author: LI Chun, E-mail: lichun@chinansc.cn

Received date: 2022-09-27, revised date: 2022-12-09

rapid increase in the bottom crust of the oxide layer. [Conclusions] The safety margin of crucible core catcher of VVER is sufficient, however the relevant equipment, support and auxiliary system are required to remain operational for a long time to realize the design function.

Key words Severe accident, Core catcher, VVER, Corium, Numerical simulation

堆芯捕集器是核电厂严重事故缓解手段之一, 该技术通过在反应堆压力容器(Reactor Pressure Vessel, RPV)外部设置的收集装置对熔融物进行冷却并最终实现滞留。目前, 国内外采用堆芯捕集器设计包括: 俄罗斯 OKB Gidropress 设计开发的 VVER^[1-2] (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor); 由法国和德国联合开发的改进型压水堆 EPR^[3-4] (Europe Pressurized Water Reactor); 由通用电气公司和东芝联合设计的新型沸水堆 ESBWR (The Economic Simplified Boiling Water Reactor)^[5]; 由韩国电力公司设计的 APR1400 及其欧洲版本 EU-APR1400 (Europe-Advanced Power Reactor)^[6]。

上述设计中, VVER 和 ESBWR 采用了坩埚式设计而 EPR 和 APR1400 采用了熔融物扩展冷却方式。其中, VVER 的堆芯捕集器^[1-2]主体布置在压力容器下方的堆坑中, 坩埚外壁面设置有冷却水通道。在事故发生后, 首先通过牺牲材料与堆芯熔融物发生反应, 降低熔融物整体的体积释热率并改善熔融池流动性。我国学者结合上述设计提出了一种双层坩埚形式的堆芯捕集器, 通过增设冷却管提升熔融物冷却速率^[7]。

EPR 堆芯捕集器^[3-4]设计采用熔融物扩展的方式增加换热面积, 从而使得堆芯熔融物快速冷却。事故发生后首先通过堆腔内的熔融物临时滞留装置, 将分批转移的熔融物进行收集, 再统一将熔融物铺展在面积约为 170 m² 的捕集器扩展室中, 随后通过捕集器底面、侧壁面, 以及熔融物顶部淹没的方式对熔融物进行冷却。EPR 堆芯捕集器预计可将熔融物的时间缩短至几天之内, 但系统运行流程较多, 熔融物扩展流动的不确定性对系统设计功能的可靠性影响较大, 而且堆芯捕集器扩展室占据了大量的空间不利于安全壳内的设备布置。

为了研究坩埚式堆芯捕集器中熔融物冷却过程, 本文采用多物理场耦合计算软件 COMSOL, 结合 VVER 堆芯捕集器设计资料搭建计算模型, 对熔融物冷却过程中的熔融池的温度、结壳分布等参数进行了数值模拟研究, 探讨了事故缓解进程, 为该系统的的功能评价提供了一定的依据。

2 计算模型设置

2.1 几何与边界条件

VVER 堆芯捕集器整体结构如图 1 所示, 主要由位于 RPV 下部的托盘和位于堆腔内的换热器组成。托盘内设置有肋片以协助收集 RPV 破口流出的熔融物, 并引导熔融物向下部的换热器迁移。换热器的内部设置有填料篮来装载牺牲材料, 其外部设置有冷却水通道。

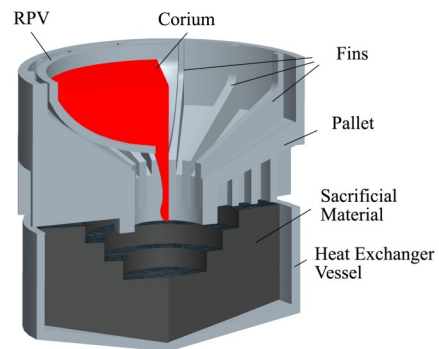


图 1 VVER 堆芯捕集器结构示意图
Fig.1 Structure diagram of VVER core catcher

图 2 为参考 VVER 堆芯捕集器的换热器部分建立的轴对称计算域模型。坩埚式换热器主体为圆柱体, 半径约 2.355 m, 底部为圆锥体, 锥段与水平方向的倾角为 12°。根据郑滨^[8]对 VVER 堆芯捕集器内熔融池的计算结果, 在分层阶段氧化物层和金属层体积分别为 26.1 m³ 和 4.6 m³, 由此得到模型中氧化物层高度为 1.61 m, 金属层在中轴处的高度为 0.5 m。熔融物的衰变热全部集中在氧化物层中, 事故发生后熔融池内的衰变热变化在文献^[8]中有详细介绍。

计算过程中, 考虑安全壳内压力维持在 0.12 MPa, 在系统长时间运行后认为冷却水过冷度很低, 因此将坩埚外壁面温度设置为接近饱和温度的 378 K。通过附加薄层的方式考虑不锈钢坩埚对导热的影响, 根据设计参数薄层厚度可设置为 60 mm。氧化物层顶部与冷却水直接接触可认为长期处于沸腾换热状态, 因此顶部设置为对流换热条件。由于缺乏实际参数, 换热系数根据大容积沸腾米海耶夫公式估算^[9]:

$$h = 0.1224 (T_{up} - T_{sat})^{2.33} P^{0.5} \quad (1)$$

式中: h 为沸腾换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; T_{up} 和 T_{sat} 分别表示顶部边界网格温度和饱和温度, K ; P 为绝对压力,

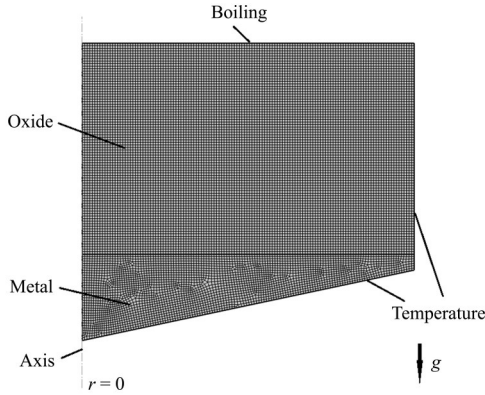


图2 VVER堆芯捕集器的换热器轴对称计算域模型示意图
Fig.2 Schematic of axisymmetric computational domain model for heat exchanger of VVER core catcher

表1 熔融物成分和固液相线温度

Table 1 Melt composition and solidus-liquidus temperature

项目 Item	熔融物成分 Melt composition / wt%	固液相线温度 Solidus-liquidus temperature / K
KATS ^[10]	45.7 O, 4.67 Fe, 43.94 Al, 3.97 Si, 1.67 others	1 850~2 200
ECOKATS ^[11]	38.58 O, 18.67 Fe, 21.71 Al, 7.47 Si, 13.57 Ca	1 373~1 822
VULCANO ^[12]	53.77 U, 22.2 Zr, 18.21 O, 3.33 Fe, 1.41 Si, 1.08 others	1 270~2 640
Comas ^[10]	25.56 U, 8.88 Zr, 11.19 O, 53 Fe, 1.37 Cr	1 598~2 223
VVER Oxide ^[8]	45.18 U, 14.24 Zr, 21.5 O, 10.75 Fe, 8.33 Al	—

通过对比,本文选择与VVER氧化物层主要成分接近的VULCANO实验参数设置氧化物层的相变潜热和固液相线温度。湍流场计算采用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型,固液相线间氧化物黏度 μ 的变化可根据悬浮液黏度公式(2)计算:

$$\mu = \mu_l e^{2.5C\theta_s} \quad (2)$$

式中: μ_l 为熔融物液相黏度, $Pa \cdot s$; θ_s 为固相体积分数,可直接在计算过程中调用;系数 C 取值范围为 3.5~8。

计算域内固相体积分数可以直接从相变模型中实时调用。Journeau等^[13]为了简化计算提出了将黏度与温度拟合的估算方式,同时推荐系数 C 取 6,据此可以将式(2)推导为式(3):

$$\mu = \mu_l e^{\frac{15(T_{liquidus} - T)}{(T_{liquidus} - T_{solidus})}} \quad (3)$$

式中: T 、 $T_{liquidus}$ 和 $T_{solidus}$ 分别为熔融物温度、液相线温度和固相线温度, K 。

文献[8]中给出了其他计算所需的参数,其中采用氧化物层膨胀系数为 $0.0001 K^{-1}$ 。在本文中,通

过

2.2 模型设置

通过COMSOL软件相变模型计算熔融物的熔化凝固过程,该模型考虑物质相变过程中固液相线温度之间为糊状区,通过插值方式计算糊状区的密度、比热容、导热系数。在VVER堆芯捕集器熔融池中,金属层中98%的质量为Fe,其他为少量的金属Al、U和Zr^[8],因此,层内物质的相变潜热和膨胀系数均设置为Fe的物性。金属层相变温度区间也参照Fe的熔点设置,同时考虑了混合物熔点会适当降低。氧化物层中熔融物的固液相线间温差较大,在凝固过程中黏度会逐渐变化,因此对流动过程影响较大。EPR堆芯捕集器设计过程中对熔融物扩展流动特性进行了大量实验研究^[10-13],实验中各元素质量分数和氧化物相的固液相线温度如表1所示,表中同时给出了VVER氧化物层各元素质量分数。

过 Boussinesq 假设计算熔融池中的自然流动过程,氧化层膨胀系数参考一般陶瓷类材料的膨胀系数设置,由此计算得到的氧化物层自然循环速度相对文献^[8]更加保守。综合以上内容,模拟过程中使用的物性参数具体如表2所示。

2.3 模型参数敏感性分析

COMSOL Multiphysics 默认采用自适应时间步长来求解瞬态问题,可以通过调整容差因子 (Tolerance Factor) 可以改变软件对于步长的限制,从而提升计算效率。模型敏感性分析过程中,采用事故后 2~5 h 的衰变热作为氧化物层加热功率。

图3所示为不同网格数和容差因子下的氧化物层中轴温度分布,网格数 18 276 和 14 472 的计算温度偏差已经缩小至 1% 以内,因此,后续长期冷却模拟采用的网格数为 14 472。通过在同一台计算机上对比研究发现,网格数 18 276、14 472 和 11 790 的模型中,将容差因子由 0.5 提高至 2 可分别将数值模拟时间缩短 10.86%、10.05% 和 25.15%,可见,在计算模型达到网格无关性的程度后,容差因子对数值模拟时间的影响接近一致。然而研究过程中也发现过

表2 物性参数
Table 2 Physical properties

物性 Physical property	氧化物层 Oxide	金属层 Metal
密度 Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	5 980	7 590
固相线温度 Solidus temperature / K	1 300	1 500
液相线温度 Liquidus temperature / K	2 640	1 600
导热系数 Heat conductivity coefficient / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3.3	40
相变潜热 Phase change latent thermal / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	420	270
比热容 Specific heat / $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	600	740
液相黏度 Viscosity / $\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.003 4	0.005 3
膨胀系数 Expansion coefficient / K^{-1}	0.000 04	0.000 017

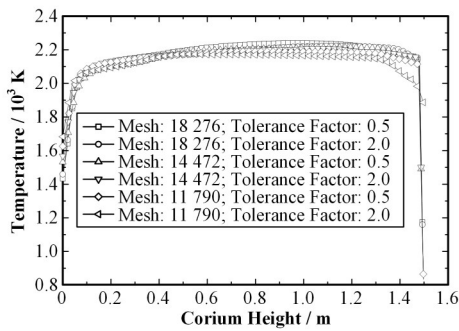


图3 不同网格数和容差因子数下的模型中轴温度分布
Fig.3 Temperature distribution on the axis of calculation domain under different mesh number and tolerance factor

高的容差因子不会缩短数值模拟时间,对于网格数为 14 472 的模型,容差因子增加至 4 反而增加了数值模拟时间,对于网格数为 18 276 的模型,容差因子设置为 4 会导致计算过程不收敛。综上所述,长期

冷却计算过程中采用的容差因子为 2。

3 计算结果分析

3.1 速度场和温度场

图 4 和图 5 分别为计算时长 24 h 和 96 h 时堆芯捕集器内的速度场和温度场,计算时氧化物层和金属层的初始温度分别设置为 2 400 K 和 2 200 K。由于金属层内没有衰变热,其温度迅速降低 900 K 以下,并在 3 h 左右就已经完全凝固。氧化物层中上部在衰变热和冷却边界作用下形成了不断变化的自然对流,虽然自然对流的强度不高,但在其搅拌作用下该区域未发生明显的热分层。由于熔融物黏度随着温度降低以指数形式增加,在氧化物层下部区域的熔融物温度较低,因此黏度很大流动缓慢,导致热分层现象十分明显。

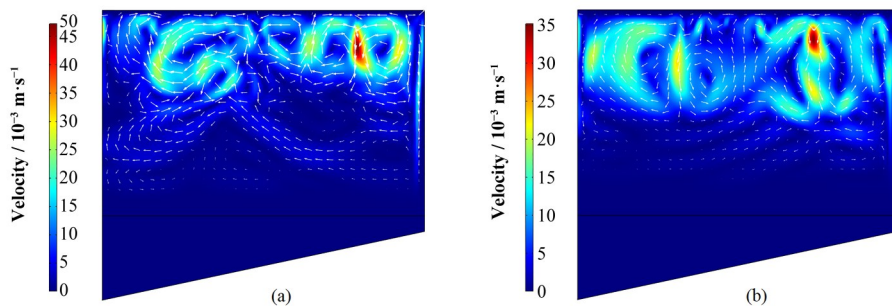


图4 熔融池内速度分布 (a) 24 h, (b) 96 h
Fig.4 Distribution of velocity field in corium pool (a) 24 h, (b) 96 h

图 6 为不同计算时长下与氧化物层接触的堆芯捕集器侧壁面导出的热流密度。侧壁面受熔融池冲刷的位置热流密度普遍在 $0.56 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下,随着侧壁面处熔融物凝固结壳热流密度降低至 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下,在计算时长 2 h 时,局部最大热流密度也仅达到约 $0.67 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。坍塌式堆芯捕集器的侧壁面的导出热流远低于大容积沸腾临界热流密

度,可以认为侧壁面不存在烧毁风险,堆芯捕集器的底部壁面与氧化物层之间由金属层隔离,因此,导热系数很小也不存在烧毁风险。

图 7 为在计算时长 12~96 h 的范围内,堆芯捕集器内熔融池的平均速度和平均温度的变化。随着计算时间增加,熔融池平均速度呈现波动降低的趋势,其中的波动过程可能是氧化物层内的自然对流不断

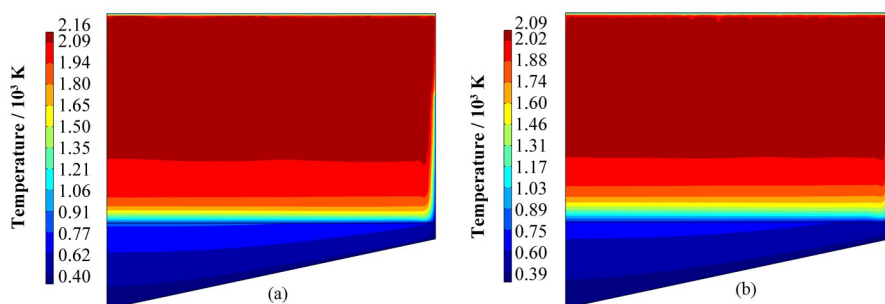


图5 熔融池内温度分布 (a) 24 h, (b) 96 h
Fig.5 Distribution of temperature field in corium pool (a) 24 h, (b) 96 h

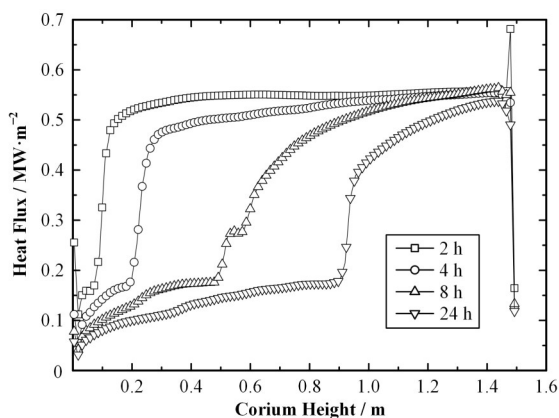


图6 不同计算时长下的熔融池平均速度和平均温度
Fig.6 Heat flux density of corium pool under different calculation durations

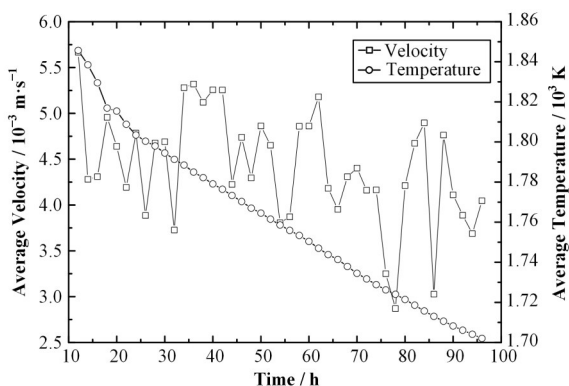


图7 熔融池平均速度和平均温度
Fig.7 Average velocity and average temperature of corium pool

变化导致的。在当前计算时间范围内,衰变热由约 13.3 MW 下降至约 7.8 MW,而捕集器内平均温度下降速率由 12 h 时约 $5 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ 迅速降低至 24 h 时的约 $2 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$,到 96 h 时已经降低至 $1.1 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右,可见当前事故缓解策略的降温过程十分缓慢。在事故末期氧化物层完全凝固后,系统的热量导出能力将更低,因此采用坍塌式堆芯捕集器作为严重事故缓解策略

时,需要相关设备和支持辅助系统在很长时间内保持可运行性。

3.2 熔融池结壳形式

图8为计算时长 4 h、12 h、24 h 和 96 h 时熔融池内的固相分布。在氧化物层冷却过程中,上部、侧壁和下部的结壳厚度均逐渐增加,同时熔融池内的最小固相分数也会逐渐增加。

值得注意的是,在氧化物层上部被冷却的大部分熔融物在完全凝固之前会受重力影响并随着自然对流向底部转移,这导致上部的结壳厚度的增加不大,而高固相份额的熔融物聚集在氧化物层下部导致该区域的结壳厚度显著增加。侧壁上凝固的熔融物也体现出向下迁移趋势,导致侧壁上形成了上薄下厚的结壳形式。氧化物层内硬壳呈现上述形态是因为当前熔融物固液相线间的相变温差很大,遇冷后不会迅速完全凝固,因此存在受重力和流动影响而迁移的现象。在当前结壳方式影响下,氧化物层向侧壁的导出热量占与总释热率的比值,由 12 h 时的约 60% 逐渐降低至 96 h 时的约 41%。考虑到顶部与水直接接触部分的换热效果更好,这种结壳方式对提升熔融池的冷却速率是有利的。

4 结语

采用多物理场耦合计算软件 COMSOL 搭建了 VVER 堆芯捕集器计算模型,对捕集器中熔融池的冷却过程进行了数值模拟研究,主要结论如下:

1) 在熔融池分层结构下,金属层会迅速凝固,氧化物层中上部会形成不断变化的自然对流流动且温度分布较为均匀,氧化物层下部流动缓慢并出现了明显的热分层。

2) 在氧化物层上部被冷却的大部分熔融物在完全凝固之前会受重力和自然对流影响向下部转移,导致上部结壳厚度增加缓慢,而底部结壳厚度增加迅速。

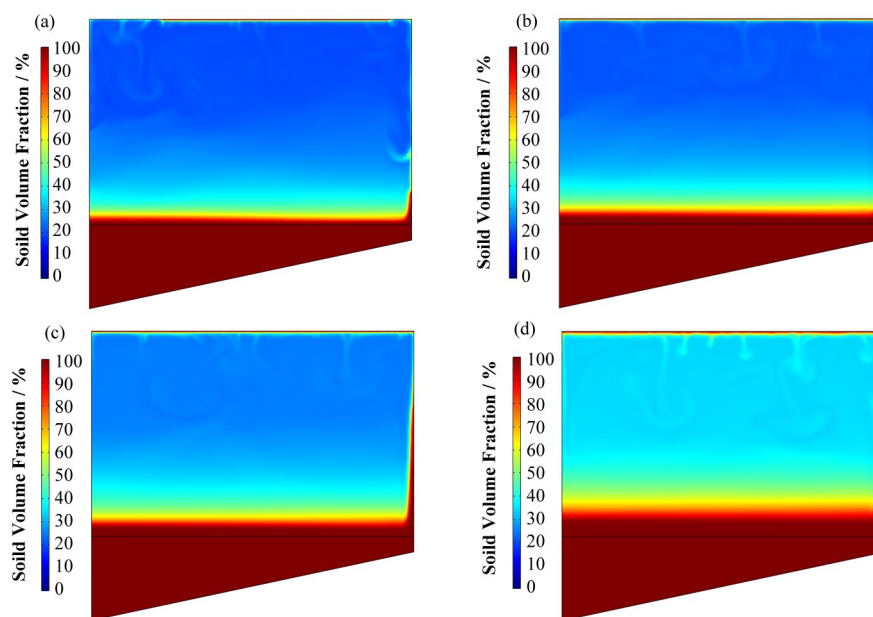


图8 熔融池内固相体积分数 (a) 4 h, (b) 12 h, (c) 24 h, (d) 96 h
Fig.8 Solid volume fraction of corium in corium pool (a) 4 h, (b) 12 h, (c) 24 h, (d) 96 h

3) 坍塌式堆芯捕集器的安全裕量较高, 冷却壁面不存在烧毁风险, 但其中的熔融物冷却过程十分缓慢, 需要相关设备和支持辅助系统在很长时间内保持可运行性。

作者贡献声明 朱光显负责数值模拟和文章撰写; 郭超、刘巧凤负责文章撰写; 李春、依岩负责工作支持。

参考文献

- Salari F, Rabiee A, Faghihi F. Investigation of ex-vessel core catcher for SBO accident in VVER-1000/V528 containment using MELCOR code[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(4): 43. DOI: 10.1007/s41365-021-00879-x.
- 崔方水. 田湾核电站堆芯捕集器的设计简介[J]. 核动力工程, 2008, 29(3): 52 - 55.
CUI Fangshui. Introduction of design of core catcher for tianwan nuclear power station[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(3): 52 - 55.
- Fischer M. The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1 - 3): 169 - 180. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.11.034.
- Bouteille F, Azarian G, Bittermann D, et al. The EPR overall approach for severe accident mitigation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(14 - 16): 1464 - 1470. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.04.013.
- Song K, Son H, Jeong U, et al. Thermal-hydraulic effects of stud shape and size on the safety margin of core catcher system[C]//Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. Gyeongju, Korea, 2015.
- Park R J, Ha K S, Rhee B W, et al. Detailed evaluation of two phase natural circulation flow in the cooling channel of the ex-vessel core catcher for EU-APR1400[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 298(3): 33 - 40. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.12.017.
- 元一单, 李炜, 张丽, 等. 一种多重防御和冷却的堆芯捕集器: CN112700892A[P]. 2021-04-23.
YUAN Yidan, LI Wei, ZHANG Li, et al. Reactor core catcher with multiple defenses and cooling functions: CN112700892A[P]. 2021-04-23.
- 郑滨. 田湾核电站堆芯捕集器内熔融物长期冷却过程的估算[C]//中国核学会全国反应堆热工流体会议. 上海, 2003.
ZHENG Bin. Estimation for corium long-term cooling process in core catcher of Tianwan Nuclear Power Plant [C]//Chinese Nuclear Society National Reactor Thermal Fluid Conference. Shanghai, 2003.
- 高智博. 釜式蒸发器传热传质特性数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
GAO Zhibo. Numerical simulation of heat and mass transfer characteristics of A kettle evaporator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- Farmer M T, Basu S. Melt spreading code assessment, modifications, and initial application to the EPR core catcher design[R]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2009. DOI: 10.2172/951260.
- Foitt J J. Large-scale ECOKATS experiments: spreading

- of oxide melt on ceramic and concrete surfaces[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**(24): 2567 - 2573. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2006.03.010](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.03.010).
- 12 Journeau C, Haquet J F, Spindler B, *et al.* The VULCANO VE-U7 corium spreading benchmark[J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, **48**(3): 215 - 234. DOI: [10.1016/j.pnucene.2005.09.009](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.09.009).
- 13 Journeau C, Boccaccio E, Brayer C, *et al.* Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests[J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, **223**(1): 75 - 102. DOI: [10.1016/S0029-5493\(02\)00397-7](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00397-7).