

基于 GOTHIC 3D 的内置冷却管双坩埚 堆芯捕集器瞬态模拟研究

刘 卓^{1,2}, 元一单^{1,2}, 贾凝晰^{1,2}, 斯 愚^{1,2}

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 中核核电安全严重事故研究重点实验室, 北京 100840)

摘要: 为进一步探究内置冷却管的双坩埚式堆芯捕集器在给定冷却壁面热流密度瞬态分布的边界条件下, 自冷却水灌注冷却流道起始, 至形成稳定两相流自然循环并达到热平衡阶段的瞬态三维冷却性能, 开发了基于安全壳热工水力学信息生成(GOTHIC)的三维分布参数热工水力模型。通过使用不同形状封堵及开孔模块的搭建和分布参数热构件依异形表面的贴覆, 实现了双坩埚捕集器异形流道三维流动换热过程的瞬态模拟。通过模拟分析、计算结果的后处理及相关模型分析, 证实了该双坩埚捕集器在两相流自然循环启动后, 形成了良好的带热能力, 在假定条件下, 其带热能力提升至 13.4 MW; 三维计算结果亦可为该捕集器的优化设计提供有价值的参考, 同时亦证实了 GOTHIC 3D 程序对于三维两相流热工水力问题的模拟分析能力。

关键词: 堆芯捕集器; GOTHIC; 两相流自然循环; 可冷却性; 膜态沸腾

中图分类号: TL333 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2024)09-1970-12

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0065](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0065)

Transient Investigation of Conceptual Twin Crucible Type Core Catcher Design with Embedded Cooling Tube Using GOTHIC 3D Model

LIU Zhuo^{1,2}, YUAN Yidan^{1,2}, JIA Ningxi^{1,2}, JIN Yu^{1,2}

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. CNNC Key Laboratory for Severe Accident Research in Nuclear Power Safety, Beijing 100840, China)

Abstract: In case of a severe accident, the lower head of the reactor pressure vessel will be melted when the corium cannot be effectively cooled after melting. Under the EVR (ex-vessel corium retention) strategy, the molten corium will be released into the core catcher, where it can be sufficiently cooled, so that a large release of radioactive materials to the environment, after the molten materials melting through the basement of the containment, can be avoided. A twin crucible type core catcher with cooling tubes embedded in the molten pool to enhance cooling efficiency was conceived for a pressurized water reactor. As an EVR strategy, the core catcher first cools the molten pool through both the side walls of the inner crucible and the embedded cooling tubes under natural circulation of cooling water supplemented from a lower tank in IRWST (internal refueling water storage tank), before the top flooding triggered, so that all the melt is surrounded by water and thus can be retained and cooled for a long time. It is evident that the coolability of the core catcher before the top flooding might be the

predominant challenge for this conceptual design. In order to study the 3D transient coolability of the conceptual twin crucible type core catcher design, from the initiation of the water injection into the cooling channels to the establishments of first a two-phase natural circulation and then a thermal equilibrium, under given heat flux distributions from the wall, a 3D full scale distributed parameter model was built and analyzed with GOTHIC (generation of thermal-hydraulic information for containments) 8.3 (QA) code. By means of multiple blockages built inside a subdivided volume, the irregular shape flow channels of the twin crucible, can be modeled. With the mapped cell spanning method and the built-in heat transfer correlation package, covering the portion of the boiling curve spans single phase to pre-CHF (critical heat flux), of GOTHIC8.3 (QA), the transient investigation of a 3D flow and two phase heat transfer can be realized. Through the simulation and analysis, post processing of the calculation results and discussions of related models, a sound heat removal capability of the conceptual core catcher design was proved. Under postulated conditions, the heat removal power can be improved to 13.4 MW. The results also show meaningful suggestions for the design and optimization on the transient two-phase natural circulation characteristics of the conceptual core catcher, and the capability of GOTHIC 3D model for three-dimensional thermal-hydraulic phenomena.

Key words: core catcher; GOTHIC; two-phase natural circulation; coolability; film boiling

核反应堆发生严重事故时,堆芯熔化后若不能得到有效冷却,会进一步将压力容器下封头熔穿。在堆外熔融物滞留(EVR)策略下,熔融物会释放到堆芯捕集器中,由堆芯捕集器的冷却系统提供充分的冷却,从而避免熔融物熔穿安全壳底板后放射性物质向环境释放。

内置冷却管的双坩埚式堆芯捕集器是近期提出的一种可选的压水堆 EVR 方案。该捕集器的设计原理为:当系统监测到严重事故信号(如堆芯大面积熔化)后,内置换料水箱(IRWST)的低位水箱注入管线阀门开启,向捕集器的冷却流道及内部冷却管注水;当压力容器(RPV)失效后,熔融物进入捕集器内坩埚中,与内坩埚内部的牺牲材料发生反应、相融,捕集器通过内坩埚侧壁以及内置冷却管管壁对熔融物进行冷却,此阶段,在自然循环的驱动下,IRWST 会持续向捕集器冷却流道补水;当内坩埚内熔池液位达到一定高度,高位水箱注入阀门开启,实现整个熔池的淹没。蒸汽通过侧壁的蒸汽排放口进入安全壳,经安全壳冷凝后,回流至 IRWST, 实现对熔池的长期冷却。Zhang 等^[1]已通过计算流体力学(CFD)数值模拟方法论证了熔池被淹没后稳态下内置冷却管对熔融物的强化冷却效果。但在顶部注水启动前,仅由低位水箱提供冷却水源阶段,两相自然循环建立过程的瞬态阶段的冷却能力是本捕集器概念设

计的主要挑战。

近年来,相关领域学者对堆芯捕集器水侧两相自然循环冷却能力的模拟开展了一定研究,主要通过 CFD 工具以及反应堆安全壳相关的系统分析程序开展。Kim 等^[2]使用 OpenFOAM 软件对为 EU-APR1400(欧盟-先进压水堆)设计的冷却实验台架 CE-PECS (cooling experiment-passive ex-vessel corium retaining and cooling system) 进行了模拟,通过将冷却水的比热容、动力黏度、密度等物性修改为随温度变化的函数来改进求解器,使修改后的模型对实验冷却水质量流量、温升较常物性的模拟结果更准确。Addad 等^[3]使用 OpenFOAM 软件开发了能模拟弹状流沸腾换热过程的多相流模型,与 DEBORA 实验数据对比表明,可以更好地捕捉壁面的过热度及气泡形态。Spengler 等^[4]使用安全壳系统分析程序 COCOSYS 对水冷底板实验 WCB-1(water-cooled basemat test-1) 进行了模拟,重点探究其捕集器模型对熔融物行为及安全壳长期冷却过程的模拟能力,其中,对水侧换热的模型采用保守的用户给定准稳态的对流换热系数简化,因此模拟结果显示并未能模拟出 WCB-1 中的高底板表面温度。

GOTHIC 程序是用于核电厂安全壳、厂房及系统构件的设计、许可证申请及运行分析的通用热工水力计算软件^[5]。由于对严重事故下安

全壳内三维热工水力现象方面的模拟需求的增长,美国电力研究院(EPRI)开发了基于分布参数模型的 GOTHIC 3D 功能:分布参数模型采用有限体积法,并结合对计算栅元有效体积、界面孔隙率的定义可实现对复杂几何形状多组分、多相流体质量、动量、能量疏运过程的三维模拟。GOTHIC 3D 经历了 AP1000 等先进压水堆安全壳热工分析以及众多国际知名试验的充分验证^[6-11],随着技术的发展,GOHTIC 3D 所模拟对象不再局限于安全壳内大空间热工水力现象^[12-14],其对两相流现象也表现出较好的模拟能力,如 Wang 等^[15]使用 GOTHIC8.0 3D 对 AP1000 的 IRWST 水池在非能动余热排出系统换热瞬态的温度响应过程进行了三维模拟,获得了较好的计算结果。特别地,GOHTIC8.3 内置的换热关系模型包括了沸腾曲线中由单相传热到 pre-CHF (critical heat flux, 临界热流密度) 传热之前的阶段^[5],恰好可满足堆芯捕集器冷却流道内的换热计算需求。

基于双坩埚捕集器异形流动换热现象的模拟需求,以及瞬态两相流过程模拟对计算时间和精度的要求,本研究选取 GOTHIC8.3 (QA) 3D 程序作为分析工具对双坩埚堆芯捕集器的瞬态冷却过程进行研究,以获得其在给定冷却壁面

热流密度瞬态分布的边界条件下,自冷却水灌注冷却流道起始,至形成稳定两相流自然循环并达到热平衡阶段的瞬态过程三维冷却性能。

1 热工水力分析模型

双坩埚堆芯捕集器(图 1)的 GOTHIC 模型对双坩埚捕集器(1s 控制体)及 IRWST 低位水箱(3s 控制体)使用分布参数控制体进行建模,并使用管网构件模拟二者之间的流道,如图 2 所示。由熔融物施加给内坩埚侧壁的热流密度通过 5 个分布参数热构件(1s~5s 控制体)进行模拟;由熔融物施加给 60 个内置冷却管的热流密度通过 120 个分布参数热构件(6s~125s 控制体)进行模

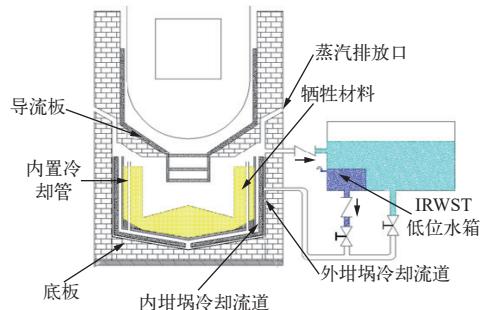


图 1 内置冷却管的双坩埚捕集器方案

Fig. 1 Sketch of twin crucible type core catcher with embedded cooling tube design

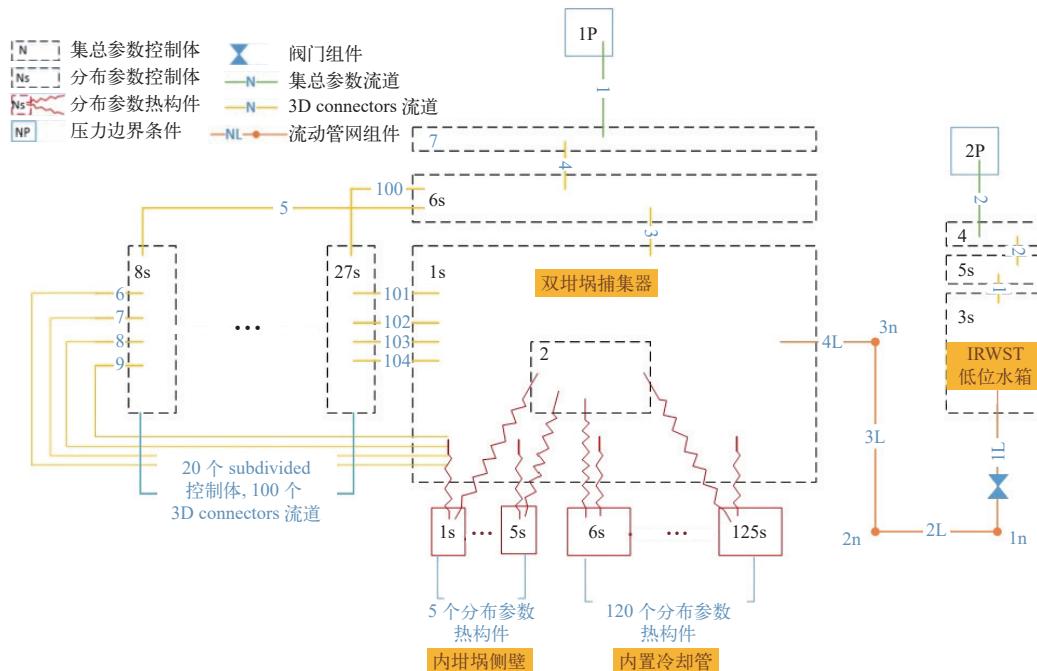


图 2 双坩埚堆芯捕集器计算模型的 GOTHIC 节点划分

Fig. 2 GOTHIC nodding for twin crucible core catcher model

拟。堆芯捕集器以及IRWST低位水箱上方的气空间通过给定相同的严重事故下安全壳内代表性压力边界条件(1P、2P)实现联通。模型共建立3个集总参数控制体和24个分布参数控制体(共13 315个计算栅元)。压力求解方法设置为大模型压力矩阵求解推荐方法——双共轭梯度求解法(Conjugate)方法。

建立1s分布参数控制体模拟双堆埚捕集器的冷却流道,通过使用圆柱体、圆锥体、立方体等封堵(blockage)及开孔(opening)模块的搭建,实现对内堆埚外侧底部锥状及中上部柱状环形流道、外堆埚外侧底部锥状及中上部柱状环形流道,以及内置60根冷却管流道的模拟,如图3所示。双堆埚的相关几何尺寸如表1所列。

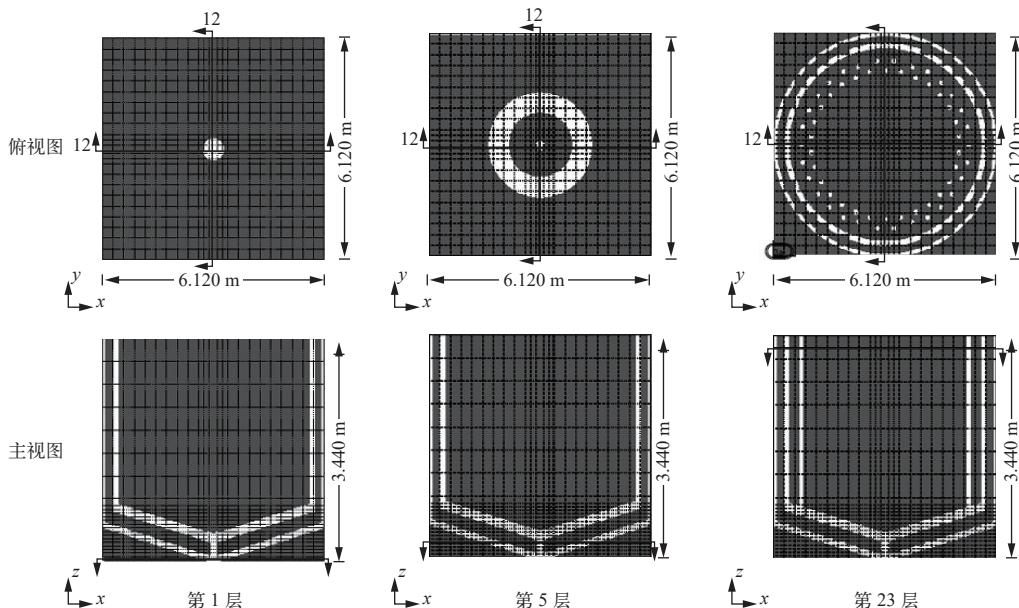


图3 1s控制体的封堵及开孔设置和网格划分

Fig. 3 Blockage and grid setting of subdivided volume 1s

表1 双堆埚堆芯捕集器冷却系统主要几何参数

Table 1 Main geometry parameters of core catcher cooling system

参数	数值
内堆埚内径, mm	5 100
直段有效高度, mm	2 700
锥段倾角, (°)	10
内冷却环腔流道宽度, mm	150
外冷却环腔流道宽度, mm	100
底部孔洞直径, mm	220
内层柱状堆埚厚度, mm	60
内层锥状堆埚厚度, mm	100
外层堆埚厚度, mm	200
冷却管内径, mm	80
冷却管厚度, mm	10
冷却管数量, 根	60

需要说明的是,GOTHIC的分布参数控制体(subdivided控制体)采用矩形网格划分,而根据双堆埚捕集器的实际形状,1s控制体内采用多层次圆柱状blockage模块模拟流道外形,在平衡网格数量(影响瞬态计算耗时)和流道真实形状模拟的基础上,会产生如图4a所示的部分栅元内同时存在内外堆埚流道的现象。由于GOTHIC分布参数控制体模型对控制体内每个栅元求解质量、动量、能量的输运过程,会导致因网格的划分而出现内外堆埚的流体“混合”,这与实际不符。故在1s控制体内,将出现混合的栅元用blockage封堵,新增了20个分布参数控制体(8s~27s控制体),与1s控制体在对应位置使用3D-connector相连接,实现局部网格加密,同时有效隔离内外堆埚流道,如图4b、c所示。同理,60个冷却管的开孔位置也进行了微调,以确保每个冷却管内流体不与其他冷却管内的流体混合,如图5所示。

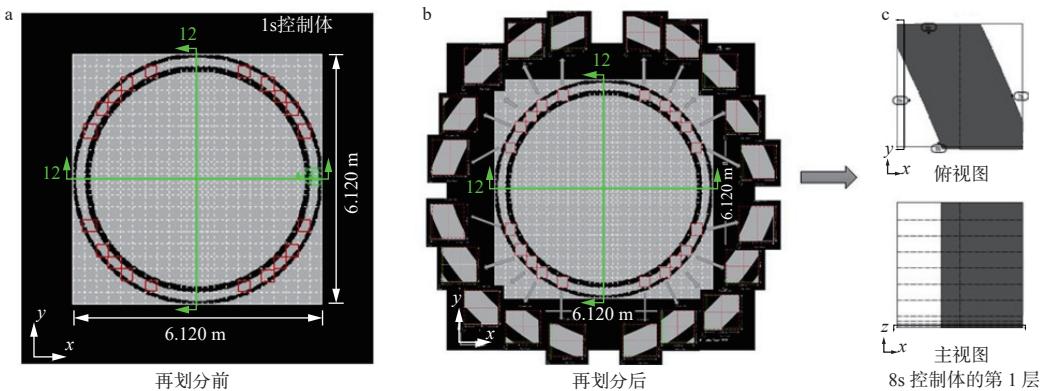


图 4 1s 控制体对同时包含内、外坩埚流道栅元的控制体的网格再划分示意图

Fig. 4 Remeshing of subdivided volume 1s

在捕集器内坩埚内壁面垂直段以及冷却管外壁面竖直方向,通过采用向 subdivided volume 内不同高度位置的 blockage 表面贴覆热构件的方式,给定热构件换热表面热流密度变化函数的边界条件,实现对分层熔池给定热流密度变化下分布参数模型的流固传热计算,如图 6 所示。计算中热构件未开启二维导热功能,即忽略热构件竖直方向的导热。

2 分析方法

2.1 热流密度边界条件假设

同为一种坩埚式堆芯捕集器,熔融物向捕集

器内壁施加的热流密度分布条件与 VVER 具有相似性。Khabensky 等^[16]使用 CORCAT 程序对 VVER-1000 在典型严重事故下堆芯捕集器内熔池的形成以及熔融物施加给捕集器壁面的热载荷进行了模拟。计算结果显示,在第一批金属熔融物(钢)开始与捕集器壁面接触后,捕集器外壁面出现最大热流密度,约为 0.65 MW/m^2 ,随着钢壳层的凝固及变厚,金属熔融物层的热流密度很快降低;在氧化物层区域,最高热流密度不超过 0.45 MW/m^2 ,这是由于氧化物壳层相对于钢壳层的热导率更低。

同时,VVER-1000 的分析表明,在未开始顶部淹没的阶段,自捕集器侧壁换热器带走的热量约为总衰变热的 52%($12 \text{ MW}/23 \text{ MW}$),其余衰变热的去向包括顶部向外的热辐射及熔池本身的升温(显热)^[16]。与之类似,在严重事故堆内熔融物滞留策略中,堆内熔池自然对流情况下,沿熔池边界的热流密度分布如下:约 50% 的能量向上传递,其余向熔池侧壁及底部传递^[17]。

基于以上分析,可得到计算所需熔池向捕集器内坩埚内壁面及冷却管外壁面的热流密度分布,如图 7 所示。其中,考虑熔融物进入捕集器后,由捕集器中部向四周的扩展路径,经过冷却管后会得到一定冷却再与内坩埚侧壁接触,假定坩埚内壁热流密度为内置冷却管热流密度的 90%。位于下层的分布参数热构件(TC)1#~3#模拟氧化物层熔融物施加给内坩埚侧壁面的热流密度,在 1601 s 时刻达到最高值,为 0.41 MW/m^2 。对应时刻,氧化物层熔融物施加给冷却管壁面的热流密度峰值为 0.46 MW/m^2 ;位于“上层”的分布参数热构件 TC4#~TC5#模拟金属层熔融物施加给

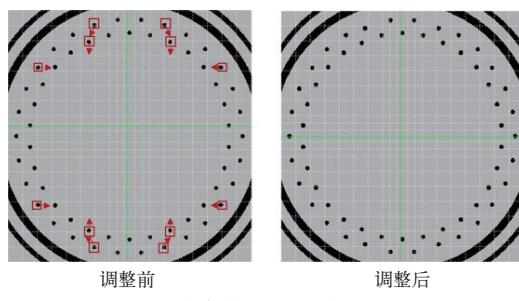


图 5 冷却管开孔的位置微调

Fig. 5 Slight adjusting for embedded cooling cube openings

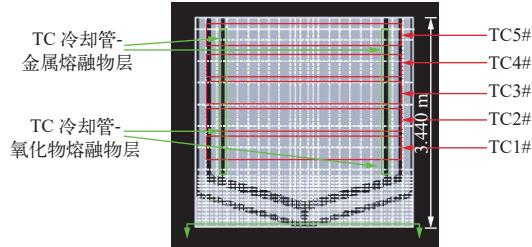


图 6 1s 控制体内分布参数热构件对应高度位置示意图

Fig. 6 Spanned thermal conductors corresponding height position in volume 1s

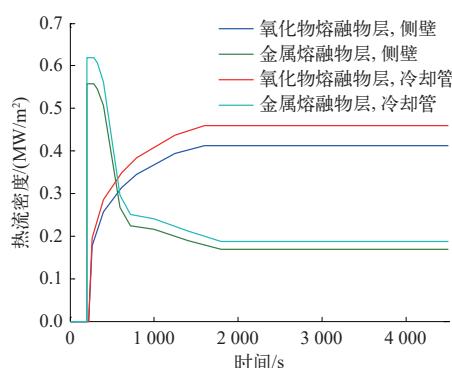


图 7 熔融物侧每种 TC 类型的热流密度条件假设

Fig. 7 Hypothetical heat flux condition on melt side of each kind of TC

内坩埚侧壁面的热流密度,在 200 s 以后迅速达到 0.56 MW/m^2 , 对应时刻金属层熔融物施加给冷却管壁面的热流密度为 0.62 MW/m^2 , 随后在 1 800 s 分别迅速衰减至 0.17 MW/m^2 及 0.19 MW/m^2 。熔融物施加给捕集器的总热流变化如图 8 所示, 峰值热流为 15.9 MW , 稳态热流为 13.4 MW , 内坩埚内壁施加总热流约占 88%, 冷却管外壁总热流约占 12%。

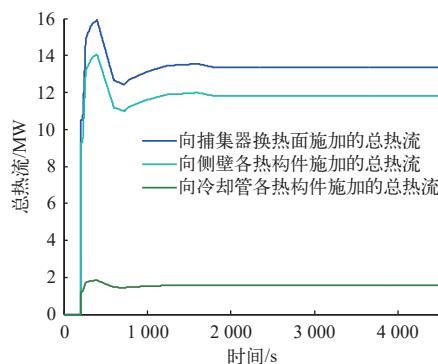


图 8 熔融物施加给捕集器壁面及冷却管壁面的总热流假设

Fig. 8 Hypothetical total heat load from melt side towards core catcher

2.2 初始条件及材料物性设置

根据严重事故后安全壳内的典型热工环境条件, 对本文计算模型的初始条件及时间控制条件进行假设, 如表 2、3 所列。捕集器内壁及冷却管热构件的热物性参考普通碳钢, 如表 4 所列。

3 后处理与结果分析

3.1 流动与自然循环结果分析

计算得到的双坩埚捕集器坩埚流道内的坩埚

表 2 计算模型的初始条件

Table 2 Initial conditions of computational model

区域/构件	压力/kPa	温度/℃	相对湿度/%
安全壳大空间	200	121	39
IRWST 内水	200	80	
捕集器换热壁面构件		100	

表 3 计算模型的时间控制条件

Table 3 Time control conditions of computational model

时间/s	进程事件
0	计算开始
5	IRWST 逆止阀开启
200	向捕集器注水基本结束, 给定捕集器内表面传热条件开启
4 500	计算结束

表 4 TC 的热物理性质

Table 4 Material thermophysical properties

温度/℃	密度/(kg/m³)	热导率/(J/(s·m·℃))	比热容/(kJ/(kg·℃))
20	7 870	60.00	0.46
900	7 870	31.56	0.66
1 200	7 870	24.28	0.70

液位和 IRWST 低位水箱内液位的变化如图 9 所示, 捕集器出入口及内外坩埚联通流道的流量变化如图 10 所示。从图 9 可看出, 注水约 230 s 后, 捕集器内液位与 IRWST 液位基本相当, IRWST 通过连通器形式向捕集器内的注水过程基本结束。随着向内坩埚内壁面及冷却管外壁面施加热流, 热量在固壁内传导到内坩埚外侧壁面及冷却管内壁面, 并开始加热冷却流道内的水, 内坩埚冷却流道内水温上升, 密度降低, 从而导致连通器下捕集器内的液位高于 IRWST 低位水箱液位。随着对捕集器内水的进一步加热, 冷却管内较高位置先出现气液两相流动, 但冷却流道内大部分液体还处于过冷加热阶段($80\sim120\text{ }^{\circ}\text{C}$), 因此捕集器冷却流道的坍塌液位在高于 IRWST 低位水箱液位以上波动, 至约 800 s 时, 捕集器冷却流道整体水温已达饱和水平, 开始出现两相流, 捕集器坍塌液位开始下降, 随着两相自然循环的建立, 捕集器坍塌液位迅速下降, 最终稳定在 2.89 m 标高处, 与 IRWST 低位水箱液位差为 $3.09\text{ m}-2.89\text{ m}=0.2\text{ m}$ 。

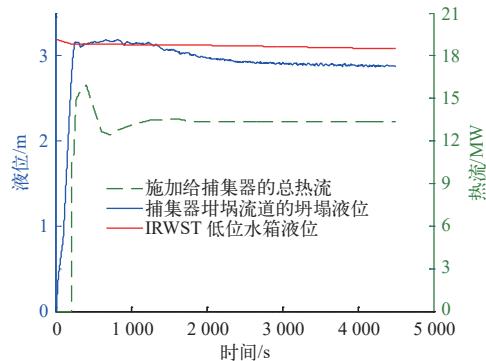


图 9 捕集器流道及 IRWST 低位水箱液位变化
Fig. 9 Liquid level variations for both core catcher and IRWST lower tank

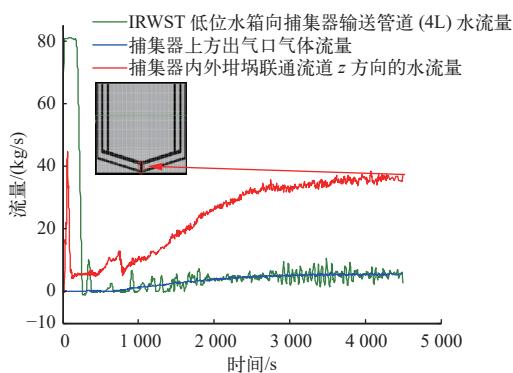


图 10 捕集器出入口及内外坩埚联通流道的流量变化
Fig. 10 Water flow and gas flow variations of inlet, outlet and connecting channel of core catcher

从捕集器内外坩埚联通流道的 z 方向的水流量(图 10)亦可看出,在连通器注水阶段结束后,捕集器内外坩埚形成低流量的单相自然循环,流量约 5.63 kg/s ;自约 460 s 起,流量开始升高至 12.86 kg/s (750 s),伴随着捕集器上方有少量的气体流量(约 0.614 kg/s),在第 1 次 IRWST 低位水箱向捕集器冷却流道补水后,冷却流道内水温有所下降,并未建立起两相自然循环;至约 790 s 时,捕集器上方开始产生明显气流,伴随着捕集器冷却流道内气相的产生,开始形成捕集器内的两相自然循环流量,至约 2700 s 时,自然循环流量上升至 34 kg/s 以上,此后在 $34\sim39 \text{ kg/s}$ 之间波动。捕集器上方的出气口流量最终稳定在 5.5 kg/s 。捕集器上方的出气口流量可以反映其自然循环带热能力。两相自然循环建立后,在止回阀作用下,IRWST 向捕集器输送管道以 $0\sim10.75 \text{ kg/s}$ 的流量间歇补水。

将 $1\text{s}\sim8\text{s}\sim29\text{s}$ 控制体内所有栅元的计算结果输出至 Tecplot 360 EX 2020 R1 进行后处理,2 个

z 向剖面(捕集器底部及顶部)、1 个 y 向剖面(IRWST 低位水箱注入管线位置的纵向切面,与 2 根外圈冷却管流道相切),以及 1 个 x 向剖面(与 2 根内圈冷却管流道相切)在 $0\sim230 \text{ s}$ 之间的 4 个时刻的气体份额(AV)及液相流速如图 11 所示。图 11 可以反映 IRWST 低位水箱向捕集器冷却流道的注水过程。此处需要说明的是,由于 GOTHIC 通过在再划分控制体内搭建 blockage 的方式实现对真实流道形状的模拟(图 3),在后处理时,输出的计算结果仅包含每个计算栅元的位置坐标及所选参数的计算结果,而不含封堵部分所占据空间的信息。因此,图 11 中内外坩埚冷却流道以及部分内坩埚流道和冷却管流道相邻栅元实际上并未接触,仅是由于后处理未将 blockage 绘出。

加热过程中捕集器流道中的气体份额分布如图 12 所示。由图 12 可见,冷却管流道较捕集器侧壁流道更早出现两相流动,随着两相自然循环的建立,内外坩埚连接通道的液相流速增加。在内坩埚流道中,液体相对稳定地上行流动;在外坩埚流道中,液体相对稳定地下行流动。同时,在内坩埚垂直冷却通道的加热部分存在约 $0.1\sim0.8$ 的气体含量梯度,气体比例从底部到顶部逐渐增加,即随着内坩埚流道中两相的向上流动,气体比例逐渐增加。

两相自然循环建立后捕集器冷却通道内 $x\text{-}z$ 截面(即 IRWST 补水管路截面)的液相温度及流速,以及最高温度层 6 个典型位置($T_1\sim T_6$ 对应内外坩埚及冷却管各 2 个计算栅元)的液相温度变化如图 13 所示。需要说明的是,在 GOTHIC 的输出文件中,孔隙率为 0 的栅元液相温度为初始给定压力 0.2 MPa 下的饱和温度 $120.23 \text{ }^\circ\text{C}$,并保持恒定,不参与计算,因此,在计算结果的后处理温度图像中,非冷却流道的 block 区域呈现 $120.23 \text{ }^\circ\text{C}$ 云图图像。

随着对冷却管外壁面及内坩埚内壁面侧壁的加热,冷却管、内外坩埚冷却流道的温差逐渐升高,且冷却管先于内坩埚侧壁升温。至基本稳定时($2000\sim4500 \text{ s}$),在非冷却水补充位置,冷却管与外坩埚流道内水温最大温差为 $121.6 \text{ }^\circ\text{C}-120.4 \text{ }^\circ\text{C}=1.2 \text{ }^\circ\text{C}$,内坩埚流道与外坩埚流道水温最大温差为 $121.54 \text{ }^\circ\text{C}-120.38 \text{ }^\circ\text{C}=1.1 \text{ }^\circ\text{C}$;在冷却水补充位置,最高温差可达 $121.3 \text{ }^\circ\text{C}-103.0 \text{ }^\circ\text{C}=18.3 \text{ }^\circ\text{C}$,平均温差可

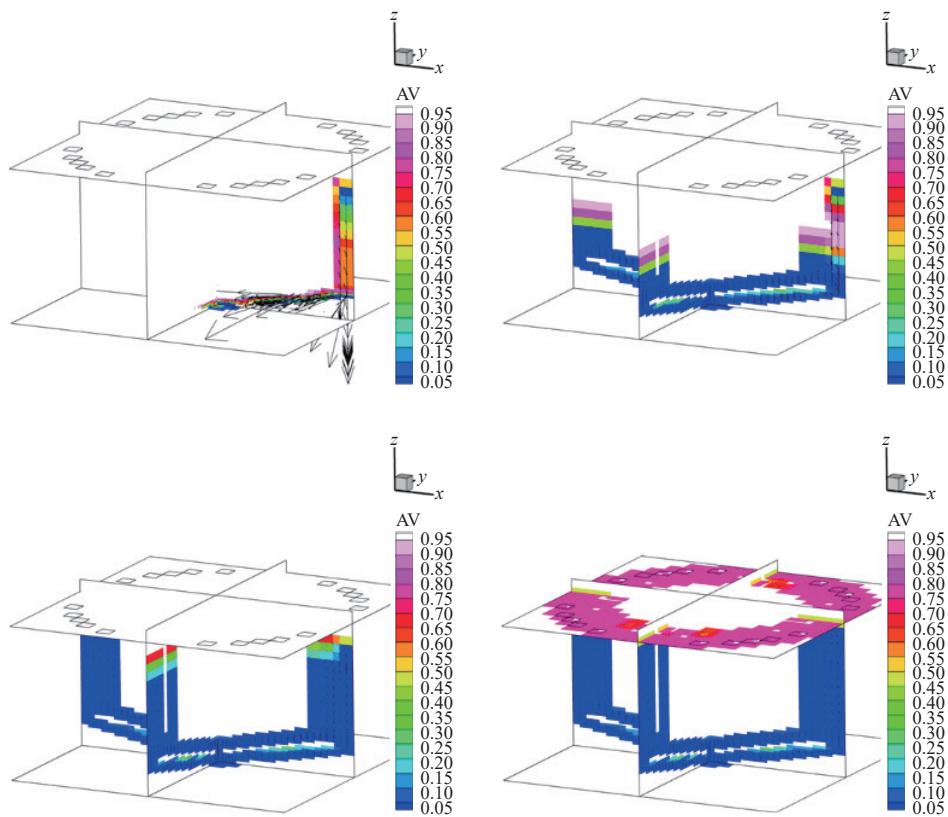


图 11 0~230 s 捕集器冷却流道内的气体份额及液相流速

Fig. 11 0-230 s gas volume fraction and liquid phase velocity in core catcher cooling channels

达 8.44 °C。T6 位置温度的强烈震荡系 IRWST 低位水箱的持续冷水补充导致。可见本文分布参数模型良好地模拟出了驱动力三维不对称的两相自然循环换热和流动。值得注意的是, 在内堆埚冷却流道中, 随着冷却水的向上流动, 水温逐渐升高, 但由于不同高度饱和压力的差异, 最高液相温度(TL)位置并非出现在流道出口处, 而是出现在垂直段中部, 约 2.02 m 标高处, 即在内堆埚流道中程序模拟出了闪蒸现象。

3.2 换热相关的分析与讨论

60 根冷却管在氧化物熔融物层及金属熔融物层的内外表面的总热流变化如图 14 所示。结合图 10 的流量变化可以发现, 自然循环启动前, 冷却能力明显不足; 自然循环的建立, 可以显著提升冷却管的带热能力, 从而使其达到需要满足的带热功率水平。捕集器吸收及带出总热流的变化如图 15 所示。从图 15 可以明显看出, 在双堆埚捕集器两相自然循环建立后, 冷却流道的带热能力得到了显著提升, 最终在约 4 500 s 时, 总带热量基本可达到输入给定的 13.4 MW 水平。

当固壁与液体换热进入到沸腾阶段后, GOTHIC8.3^[5]会根据固体换热表面温度对沸腾换热模式进行判定。根据式(1)^[18]定义喷溅温度(T_{sp} , °C):

$$T_{sp} = 374.1 - 260\exp(-p/1.6) \quad (1)$$

其中, p 为流体压力, MPa。

当壁温高于喷溅温度时, 认为沸腾进入膜态沸腾模式, 进而采用如下的一种非常保守的计算模型来计算壁面与液相之间的换热量。固壁与液相和气相的换热系数($H_{fb,l}$ 和 $H_{fb,v}$)分别通过式(2)、(3)计算:

$$H_{fb,l} = H_l \lambda_{wet} \frac{T_{sp} - T_{sat}}{T_w - T_{sat}} \quad (2)$$

$$H_{fb,v} = H_v (1 - \lambda_{wet}) \quad (3)$$

其中: T_{sat} 为液相的沸腾温度; T_w 为固壁温度; H_l 和 H_v 分别为仅有液相或气相存在时与固壁的换热系数, H_l 中考虑了核态沸腾及池式沸腾模型; λ_{wet} 为固壁的可润湿份额, 通过式(4)计算。式(2)中的温差比保守地将液固换热温差缩减为液相与喷溅温度之差。

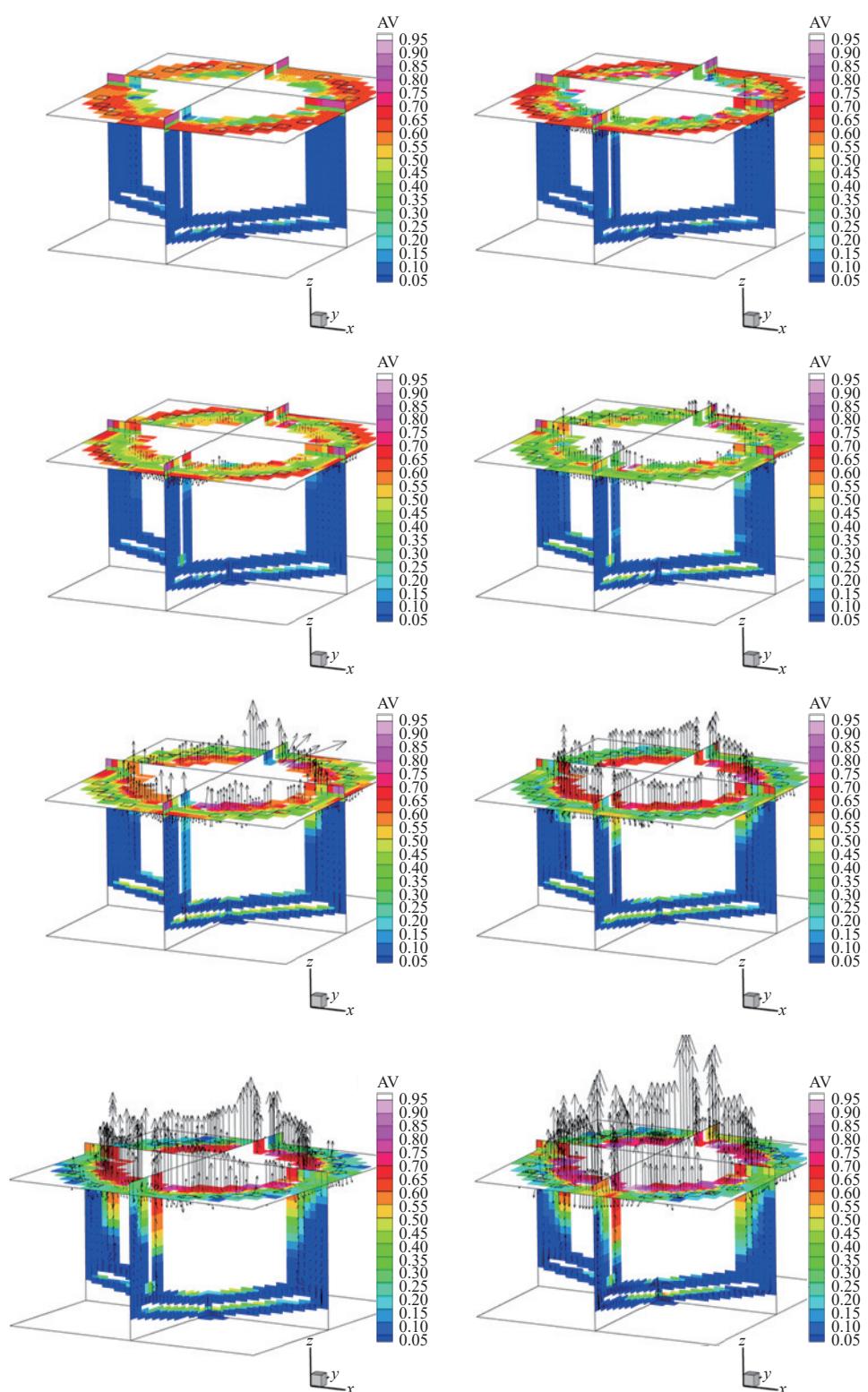


图 12 270~2 770 s 捕集器冷却流道内的气体份额及液相流速

Fig. 12 270~2 770 s gas volume fraction and liquid phase velocity of core catcher cooling channels

$$\lambda_{\text{wet}} = \min(1 - \lambda_{\text{fb}}, \delta/\delta_{\min}, 1) \quad (4)$$

其中: δ 为栅元液膜厚度; δ_{\min} 为栅元最小可润湿液膜厚度, 缺省值为 0.003 05 cm; λ_{fb} 为膜态沸腾份

额, 通过式(5)计算:

$$\lambda_{\text{fb}} = \min \left(\max \left(\frac{T_w - T_{\text{sp}}}{10 \text{ }^{\circ}\text{F}}, 0.0 \right), 1.0 \right) \quad (5)$$

联合式(1)~(5)可以发现,当固壁温度高于喷溅温度 10°F (5.56°C)以上时,膜态沸腾 $\lambda_{\text{fb}}=1$,则式(2)中的液相换热系数 $H_{\text{fb},l}=0$,即认为液相无法润湿固壁。

但与此同时,在进入膜态沸腾模式后,程序会计算液相与固壁之间的辐射换热,并加入至液相与固壁的总换热量中:

$$H'_{\text{fb},l} = H_{\text{fb},l} + (1 - \lambda_{\text{wet}}) \frac{\sigma_{\text{SB}}(T_w^4 - T_l^4)}{T_w - T_l} \quad (6)$$

其中, σ_{SB} 为 Stephan-Boltzmann 常数。可见,当程序判定液相无法润湿固壁后,固壁与液相的辐射换热是固液换热的主要贡献。通过以上分析可以发现, GOTHIC8.3 内置膜态沸腾模型具有很高的保守性。

4 000 s 时刻栅元不同高度处内坩埚外壁侧面及其同一层位置代表性冷却管内壁的热流密度及所在栅元的液相份额如表 5 所列。可见,在假定金属层、氧化物层分层熔融物热流密度边界条件下,随着高度的增加,壁面温度有所降低,捕集器内坩埚流道及内置冷却管流道的液相份额自下而上逐渐降低,且冷却管流道内的沸腾更剧烈,换热较内坩埚流道更强。在本模拟中,在稳态阶段,所有换热壁面均已进入膜态沸腾模式。

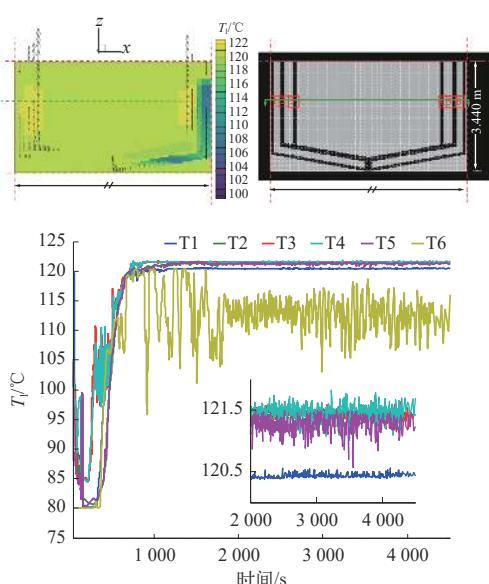


图 13 捕集器冷却流道最高温度层 6 个典型位置的液相温度变化

Fig. 13 Liquid phase temperature at six typical locations of highest liquid temperature layer of core catcher cooling channels

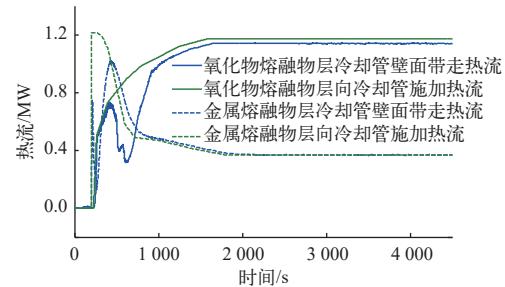


图 14 氧化物熔融物层及金属熔融物层冷却管的热流变化

Fig. 14 Heat flow variations of both cooling tubes at oxide melt and metal melt layers

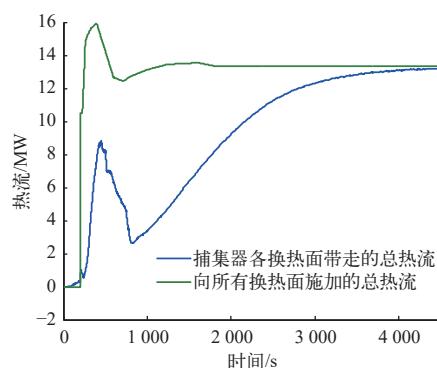


图 15 捕集器吸收及带出总热流变化

Fig. 15 Total heat flow variations of heat absorbed and removed by core catcher

4 结论

本文通过搭建分布参数模型,实现了给定内壁面热流密度瞬态分布的边界条件下,对双坩埚捕集器设计的,自冷却水灌注冷却流道起始,至形成稳定两相流自然循环并达到热平衡阶段的水侧模拟分析,发现在 GOTHIC8.3 非常保守的膜态沸腾模型计算下,双坩埚捕集器在两相流自然循环启动后,形成了良好的带热能力,在假定条件下,约 4 500 s 后基本可达到热平衡,带热能力可提升至 13.4 MW 左右。

通过进行三维瞬态模拟,发现了一些现象,有助于为捕集器的优化设计提供有用的信息:1) 内层冷却流道液相温度在竖直方向的分布并非完全线性,由于水的静力学压差,导致两相循环建立后最高液相温度位于出口前,在实际瞬态过程中,若该位置对应氧化物的热流密度释放,则后期会有较大传热挑战,应予以关注;2) 在本算例下,捕集器自完成 U 形管注水(230 s)至开始形成两相循环流量(790 s),约耗时 560 s,如若能优化流道设计,

表 5 4 000 s 时刻不同高度处坩埚侧壁及代表性冷却管侧壁热流密度与所在栅元的液相份额

Table 5 Heat flux of both side walls of inner crucible and representative cooling tubes and their corresponding liquid volume fractions in local surrounding cells at 4 000 s

栅元竖直 方向位置 ¹⁾	内坩埚侧壁 TC				代表性冷却管 TC			
	编号	表面温度/℃	所在栅元液相份额	热流密度/(MW/m ²)	编号	表面温度/℃	所在栅元液相份额	热流密度/(MW/m ²)
Level 1	1#	1 309	1.00	0.406	96#	1 427	0.92	0.576
Level 2	1~2#	1 287	0.93	0.407	96#	1 412	0.72	0.577
Level 3	2~3#	1 260	0.85	0.406	96#	1 410	0.43	0.573
Level 4	3#	1 265	0.68	0.405	96#	1 406	0.36	0.576
Level 5	4#	911.2	0.54	0.164	97#	1 040	0.33	0.240
Level 6	4~5#	915	0.48	0.164	97#	1 027	0.32	0.235
Level 7	5#	918	0.56	0.164	97#	1 021	0.28	0.235

注: 1) Level 1 为捕集器垂直段壁面最底层栅元高度位置, Level 7 为最顶层栅元高度位置

进一步缩短两相自然循环启动时间, 则会大幅提升捕集器的带热效率, 同时进一步降低捕集器结构材料的最高温度; 3) 虽然 GOTHIC8.3 的内置换热模型对膜态沸腾采取了非常保守的换热量估计, 使得计算的换热量很可能远低于实际, 但对于 1 000 ℃ 左右的高固壁温度, 自然循环下, 在捕集器相对高位、低液体份额的冷却流道处, 冷却水对于换热壁面的可润湿性具有不确定性, 应在实验和设计中予以重点关注; 4) 换热壁面的结构金属壁厚较薄, 热导率较高, 因此热阻较低, 有必要采取一定方式在相对壁温较高处增加隔热材料予以保护, 避免温度超过材料熔点。此外在实际情况下, 换热壁面处熔融物凝固后形成的壳层亦可发挥提高换热壁面热阻、降低金属壁温度的作用。

参考文献:

- [1] ZHANG L, GUO P, YUAN Y, et al. Numerical simulation of natural convection and heat transfer in a molten pool with embedded cooling tubes[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 892592.
- [2] KIM S, CHOI K, JUNG J. Improvement of CFD code for two-phase flow with boiling and natural convection for evaluation of core-catcher cooling performance in Open-FOAM[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 408: 112316.
- [3] ADDAD Y, AMIDU M A. Numerical prediction of slug flow boiling heat transfer in the core-catcher cooling channel for severe accident mitigation in nuclear power plant[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2022, 393: 111796.
- [4] SPENGLER C, BAKALOV I. A simplified core catcher model for the containment code AC2/COCOSYS[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 188: 109800.
- [5] KINDRED T. GOTHIC thermal hydraulic analysis package user manual version 8.3(QA)[M]. USA: EPRI, 2018.
- [6] KINDRED T. GOTHIC thermal hydraulic analysis package technical manual version8.3(QA)[M]. USA: EPRI, 2018.
- [7] WANG G D, WEI S J, NI C X, et al. Application of GOTHIC8.0 3D model to simulate heat removal process in containment safety verification via integral test (CERT) [C]//Proceedings of 2017 25th International Conference on Nuclear Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [8] ESTEVEZ-ALBUJA S, JIMENEZ G, FERNÁNDEZ-COSIALS K, et al. AP1000® passive cooling containment analysis of a double-ended LBLOCA with a 3D Gothic model[C]//Proceedings of 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2018.
- [9] BOCANEGRAS R, JIMENEZ G, FERNÁNDEZ-COSIALS M K. Development of a PWR-W GOTHIC 3D model for containment accident analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 87: 547-560.
- [10] 王国栋. 应用 GOTHIC8.0 程序分析 AP1000 核电厂 PCS 传热传质过程[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(1): 83-88.
- WANG Guodong. Analysis of heat and mass transfer process for AP1000 NPP PCS using GOTHIC8.0 code[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(1): 83-88(in Chinese).
- [11] 王国栋, 廉本学. 应用 GOTHIC8.0 程序模拟非能动安全壳冷却系统冷凝和蒸发现象的适用性研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(8): 1416-1421.
- WANG Guodong, HU Benxue. Study of GOTHIC8.0 application to condensation and evaporation phenomena in

- passive containment cooling system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(8): 1416-1421(in Chinese).
- [12] 黄高峰, 宫宇, 付廷造, 等. GOTHIC 局部氢气风险三维分析研究[J]. *核动力工程*, 2020, 41(6): 19-23.
HUANG Gaofeng, GONG Yu, FU Tingzao, et al. Study on local three dimension hydrogen risk using GOTHIC[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(6): 19-23(in Chinese).
- [13] 王国栋, 杨建峰, 韦胜杰, 等. 应用 GOTHIC 程序三维模型模拟综合性能试验热工响应过程[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(11): 1960-1967.
WANG Guodong, YANG Jianfeng, WEI Shengjie, et al. Application of GOTHIC 3D model to simulate thermal-hydraulic response of containment safety verification via integral test[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(11): 1960-1967(in Chinese).
- [14] 孙婧, 王辉. 基于 DLL 的 GOTHIC8.0 程序氢气复合器模拟方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(3): 467-473.
- SUN Jing, WANG Hui. Research on GOTHIC8.0 code simulation method of hydrogen recombiner based on DLL[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(3): 467-473(in Chinese).
- [15] WANG G, WANG Z, ZHANG D. A study of GOTHIC code application to IRWST temperature response during PRHR HX heating transient[C]//Proceedings of WORTH-8. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [16] KHABENSKY V B, GRANOVSKY V S, BECHTA S V, et al. Severe accident management concept of the VVER-1000 and the justification of corium retention in a crucible-type core catcher[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2009, 41(5): 561-574.
- [17] SEHGAL B R. Nuclear safety in light water reactors severe accident phenomenology[M]. Oxford: Academic Press, 2012.
- [18] CARBAJO J J. A study on the rewetting temperature[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1985, 84(1): 21-52.