

相变材料对非能动系统换热管性能影响研究

黄予凡,王 涵,马云飞,陈伟雄

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:在事故初期海洋核平台的等高差非能动安全壳冷却系统容易发生换热不足以及流动不稳定的问题,为了提升非能动系统性能,选用具有大潜热和等温吸热特性的相变材料用于冷却系统。建立了非能动系统耦合相变材料的等高差非能动安全壳冷却系统的 Apros 仿真模型,通过计算对比分析了耦合相变材料对自然循环换热管的运行特性和换热特性的影响规律。结果显示:非能动系统耦合相变材料后换热管顶部的自然循环阻力峰值从 1 510 Pa 降低至 1 310 Pa,下降幅度超过 13%,有效降低自然循环阻力;自然循环换热管出口冷却水从气相降至气液两相的时刻,从 80 s 提前至 60 s 附近;相变材料可以使管内对流传热系数更快到达峰值,加快自然循环的建立和稳定,缓解了事故初期自然循环换热不足的问题。

关键词:非能动系统;相变材料;自然循环;冷凝传热

中图分类号:TQ021.3

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.006

[引用本文格式]黄予凡,王 涵,马云飞,等.相变材料对非能动系统换热管性能影响研究[J].热能动力工程,2025,40(6):57-64. HUANG Yufan, WANG Han, MA Yunfei, et al. Study on the effect of phase change materials on the performance of heat transfer tubes in passive system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 57-64.

Study on the Effect of Phase Change Materials on the Performance of Heat Transfer Tubes in Passive System

HUANG Yufan, WANG Han, MA Yunfei, CHEN Weixiong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: The equal height difference passive containment cooling system (PCCS) of marine nuclear platforms is prone to insufficient heat transfer and flow instability during the initial phase of accidents. To improve the passive system performance, phase change materials (PCMs) with high latent heat and isothermal heat absorption characteristics have been employed for the cooling system. An Apros simulation model for the PCCS integrated with PCMs was established, and the influence law of the PCM coupling on the operational characteristics and heat transfer performance of natural circulation heat exchange tubes was comparatively analyzed through calculation. Results demonstrate that after PCM coupling, the natural circulation resistance can be reduced effectively, with the peak resistance at the top of heat exchange tubes decreasing from 1 510 Pa to 1 310 Pa, representing a reduction exceeding 13%. The transition moment from gaseous phase to gas-liquid two-phase state of cooling water at the outlet of natural circulation heat exchange tube is advanced from 80 s to approximately 60 s. The PCM enables faster attainment of peak convective heat transfer coefficients in the tubes, accelerates the establishment and stabilization of natural circulation, and effectively mitigates the insufficient heat transfer issue of natural circulation dur-

收稿日期:2024-12-24; 修订日期:2025-03-19

基金项目:国家自然科学基金(U24B2011)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (U24B2011)

作者简介:黄予凡(2000-),男,西安交通大学硕士研究生。

通信作者:陈伟雄(1985-),男,西安交通大学教授。

ing the initial accident phase.

Key words: passive systems, phase change materials (PCM), natural circulation, condensation heat transfer

引 言

核电厂发生事故后,大量高温高压的蒸汽和其他不凝结性气体(空气、氢气等)从破裂处释放进入安全壳中,严重威胁安全壳结构和功能的完整性,需要采取措施排出热量以维持安全壳内压力和温度在限定范围内^[1]。依靠电力驱动的主动式安全壳冷却系统,如喷雾喷淋装置和风扇冷却器,很有可能因为事故造成的全场停电等故障而无法启动。非能动安全壳冷却系统依靠自然循环、重力、密度差等自然力进行驱动,通过自然循环换热器壁面上蒸汽冷凝,在事故发生后迅速排出余热,无需人工干预和电力供应。非能动技术逐渐成为新一代核反应堆安全技术的重要组成部分^[2]。

目前,我国的核电事业发展迅速,其应用领域也从陆地走向海洋。由于远洋工作缺乏及时的救援力量,海洋核平台相比于陆基核电站更依赖非能动技术。但船上极其有限的空间限制了安全壳的容积,一旦发生事故,狭小的壳内空间快速升压,安全壳的完整性受到严重威胁,同时因空间受限,非能动系统取消立管,直接以海洋为热阱,系统呈现出等高差的特点。等高差非能动循环换热系统的自然循环驱动力不足,在海洋条件作用下更易发生流动不稳定现象,严重影响了非能动系统的换热性能和运行性能。为此急需开展等高差非能动系统的换热特性研究。

Sun 等人^[3]通过实验研究了等高差自然循环系统的瞬态特性以及冷凝诱发水锤(CIWH)现象,确定了 CIWH 的形成机理及其发生概率。Wang 等人^[4]通过实验研究了 3 种典型的自然循环流动模式,发现自然循环流动不稳定的主要原因是过冷水逆流引起的 CIWH 现象。

除了自然循环流动不稳定现象外,另一个值得注意的是事故后安全壳内过高的压力峰值。为了尽可能降低安全壳内的压力峰值,可以采取布置相变材料的措施。相变材料具有较高的热能储存密度,

能够在熔化温度附近吸收和释放大热量^[5]。谭美等人^[6]发现冷却剂损失事故后安全壳第一个压力峰值通常在 8 s 内出现,而事故发生后,自然循环系统稳定运行需要一定时间。所以能够快速吸收大量热量的相变材料,可以弥补事故初期自然循环换热不足的缺点。

Cho 等人^[7]在相变材料冷凝器中选择了有机相变材料并分析了冷凝性能。Shin 等人^[8]通过实验模拟反应堆事故条件下相变材料熔化过程,验证了模拟该过程的有效热容的方法。结果表明,与主动安全壳喷雾冷却系统比较,在事故发生后的初始阶段,相变材料冷凝器显著加速了安全壳内的压力稳定过程。

目前已有研究多为相变材料对非能动系统整体性能的影响,少有在安全壳内布置相变材料后,对原有的自然循环换热管性能影响的研究。本研究通过 Apros 仿真软件建立了耦合相变材料的等高差非能动安全壳冷却系统的模型,并对比了相变材料应用与否对系统性能的影响。从相变材料对自然循环换热管的运行特性和换热特性的影响角度出发进行分析,旨在为工程应用提供基础以及实际参考。

1 非能动安全壳冷却系统仿真模型

1.1 实验系统

图 1 是等高差非能动安全壳冷却实验系统示意图^[9]。

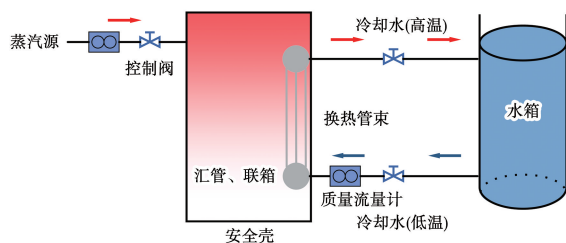


图 1 非能动安全壳冷却实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passive containment cooling experimental system

该装置包括一个耐压模拟体结构以及自然循环换热系统。自然循环换热系统主要结构是 304 不锈钢换热管束,管束沿着耐压模拟体壁面弯曲布置,上下两端通过汇管和联箱与水平的自然循环回路相连接,回路两端连接冷却水箱。自然循环回路设置有流量计和循环控制阀,其中不锈钢管束采用交叉排列方式以增强换热,冷却水箱上端和空气直接接触。表 1 为实验装置的详细参数。

表 1 非能动安全壳冷却系统的参数

Tab. 1 Parameters of passive containment cooling system	
参 数	数 值
换热管外径/mm	17
换热管内径/mm	14
换热管长度/mm	1 300
换热管两端高度/mm	1 200
换热管数量	140
安全壳直径/mm	2 000
安全壳长度/mm	3 000
自然循环换热管直径/mm	150
自然循环换热管长度/mm	5 600
冷却水箱直径/mm	1 300
冷却水箱高度/mm	3 000
高温蒸汽入口内径/mm	50

1.2 仿真模型

通过动态仿真软件 Apros 建立了耦合相变材料的等高差安全壳冷却系统的仿真模型,如图 2 所示。

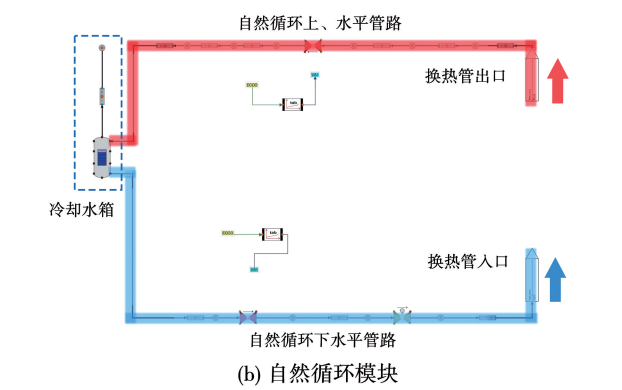
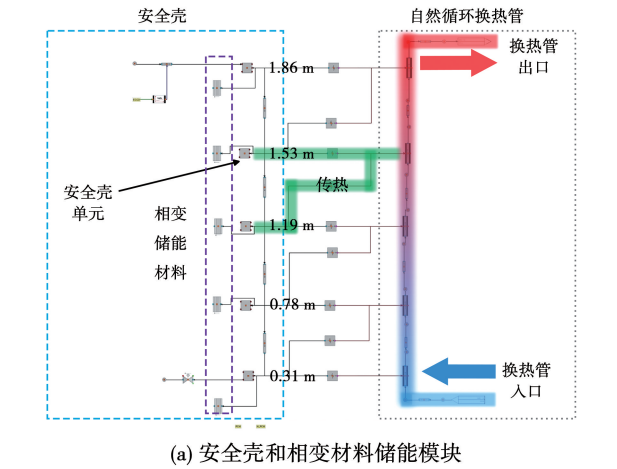


图 2 Apros 仿真模型

Fig. 2 Apros simulation model

将安全壳在垂直方向上分为 5 个部分进行建模,各个部分中心高度分别为 0.31、0.78、1.19、1.53 和 1.86 m。对换热管束和相变材料在安全壳对应高度上进行相应的划分。以观察事故发生后安全壳内混合气体在不同高度的温度以及热分层现象。

仿真模型包括 3 个主要部分:安全壳、自然循环部分和相变材料部分。Apros 基于 3 个基本的守恒方程:质量守恒、能量守恒和动量守恒来模拟流动传热过程。本研究选择 $k-\varepsilon$ 方程模型计算蒸汽/水与空气的流动和换热,该方程通过求解湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ε 来模拟湍流流动,公式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: ρ —密度, kg/m^3 ; ε —湍流动能耗散率, W/m^3 ; k —湍流动能, W ; u_i —流速, m/s ; μ —动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; μ_t —湍流动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; P_k —湍流动能生成项, W/m^3 ; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ —模型常数; σ —普朗特数。

1.3 相变材料选择和入口条件

布置相变材料储热换热器可进一步增加非能动系统的换热性能。相变材料模块沿着耐压模拟体壁面周向布置,高温蒸汽在相变材料表面冷凝实现热量传递。安全壳内部最高正常工作温度为 $48.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。

对相变材料熔化温度的选择,需要保证在反应堆正常工作情况下保持固态,并且在事故发生后能够迅速熔化。有机相变材料的热导率较低,吸收热量的速度较慢。无机相变材料,例如水合盐,虽然有着更高的热导率以及更大的潜热热量,但由于热稳定性较差、容易腐蚀和相分离的缺点,不适合作为安全壳内相变材料的候选。相变合金的热导率高于有机相变材料多个数量级,并且潜热热量较大,能够在事故发生后迅速吸收蒸汽中大量的热量^[11]。

Huang 等人^[12]研究发现更低熔点的相变材料

对压力峰值有着更好的抑制作用。合金的熔点因 3 种纯金属的成分比例变化而有所不同,其中成分比例位于共晶点处的合金熔点最低。本次模拟使用的 E-BiInSn 合金由 3 种纯金属铋、钢和锡按一定比例组成,共晶点处熔点为 60.2 ℃,使用不锈钢容器对相变合金进行密封以重复使用。表 2 为该相变合金的热物性参数,并将该合金的导热系数、比热容、熔点等参数导入到自定义材料的热物性参数中。对于相变过程中的潜热部分,采用有效热容法进行处理。

表 2 E-BiInSn 合金的热物性参数

Tab. 2 Thermophysical property parameters of E-BiInSn alloy

密度/ kg·m ⁻³	熔化温度/ ℃	质量潜热/ kJ·kg ⁻¹	体积潜热/ MJ·m ⁻³	比热/kJ·(kg·K) ⁻¹		热导率/W·(m·K) ⁻¹	
				固态	液态	固态	液态
8 043	60.2	27.9	224.4	0.270	0.297	19.2	14.5

参考文献[13]中模拟事故条件下高温蒸汽的进入过程,通过 RELAP5 计算得出的模拟蒸汽喷放源项,结合仿真模型进行一定的缩比处理,将得到的质量流量边界条件作为入口条件。图 3 为 17.5 s 内蒸汽的质量流量数据。

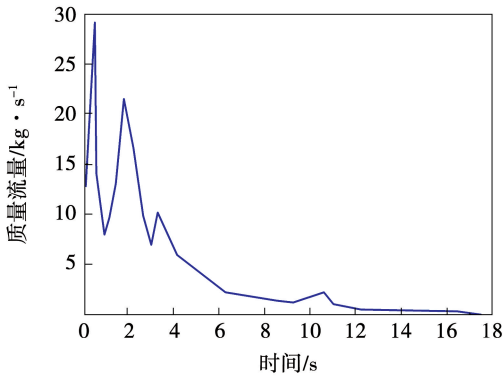


图 3 模拟蒸汽喷放源项

Fig. 3 Simulation of steam blowdown
source condition

1.4 数据处理

Apros 软件可以直接读取对应高度的换热管模块的阻力以及各个部分节点的冷却水平均密度,通过各个部分节点之间的冷却水平均密度、重力加速度以及高度差的乘积,可以计算自然循环驱动力,如式(3)所示:

$$\Delta p_{dr} = \rho_{ave} g \Delta H$$
 (3)

式中: Δp_{dr} —自然循环驱动力,Pa; ρ_{ave} —冷却水平均密度,kg/m³;g—重力加速度,kg/(m·s²); ΔH —各个部分节点之间高度差,m。

对于换热管功率,其计算公式为自然循环冷却水流量与自然循环冷却水换热器进出口焓差的乘积。表示为:

$$q = G_c (h_{e,out} - h_{e,in})$$
 (4)

式中:q—蒸汽凝结换热量,kW; G_c —自然循环回路中冷却水质量流率,kg/s; $h_{e,out}$ —自然循环回路出口冷却水温度对应的焓值,kJ/kg; $h_{e,in}$ —自然循环回路入口冷却水温度对应的焓值,kJ/kg。

1.5 模型有效性验证

为了确保仿真模型的准确性,对相关热工水力参数进行了验证,并采用文献[14]的实验结果进行验证,如图 4 所示,在安全壳内混合气体压力为 0.6 MPa、冷却水温度为 30 ℃、空气质量分数为 25% 条件下,仿真所得数据的最大压力偏差不超过 9.84%。在安全壳内混合气体压力为 0.22 MPa、空气质量分数为 35% 条件下,换热功率之间的最大偏差不超过 6.02%,表明本研究仿真模型具有较高的精度。

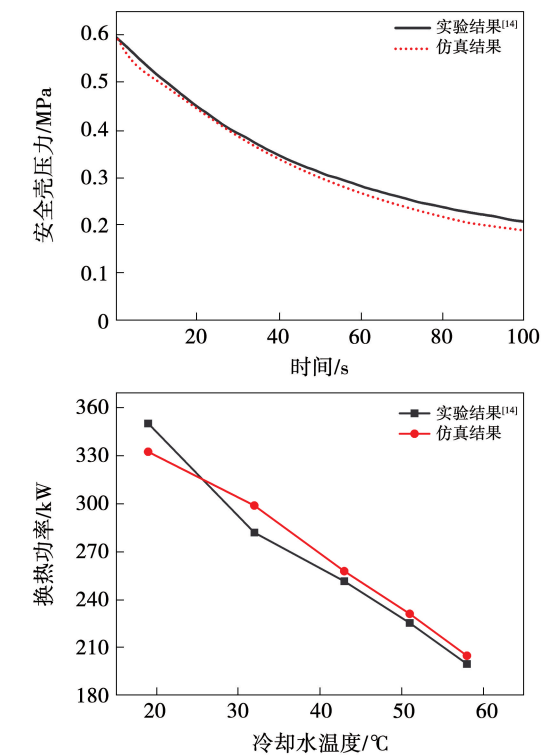


图4 模型验证

Fig.4 Model validation

2 结果分析和讨论

2.1 相变材料对换热管运行性能的影响

图5为事故发生后自然循环换热管不同高度位置的含气率和换热功率在布置相变材料前后的变化情况。仿真模型中将换热管在高度方向划分为5个部分,这里根据高度的不同定义为底部(0~0.4 m)、中下部(0.4~0.6 m)、中部(0.6~0.8 m)、中上部(0.8~1.0 m)、顶部(1.0~1.2 m)。

由图5(a)可知,换热管内所有位置的含气率在事故初期均出现下降,随后迅速升至接近1。这是因为事故发生后,冷却水经打开的阀门进入换热管,换热管外侧蒸汽通过冷凝将热量传递给冷却水,使得冷却水迅速汽化。随着自然循环建立,入口处蒸发的水被后续的冷却水补充,所以含气率逐渐下降。在事故发生后50 s左右,入口处的含气率降低至0附近,而位于换热管中部位置的蒸汽冷凝换热较充分,其回落至0的时间相较入口位置更长。而在换热管出口位置的冷却水充分吸收了蒸汽冷凝的热量,在80 s内始终维持在1附近,即完全气相的状

态。在换热进行至80 s后,含气率迅速下降并出现振荡,说明换热管出口出现了流动不稳定的现象。布置相变材料后,换热管入口、中部、出口3个位置的含气率均出现降低的现象,随着位置的不断升高,降低的幅度不断增大。观察位于换热管出口位置的含气率,其迅速下降的时刻提前至60 s附近,且下降过程中同样出现了含气率振荡的不稳定流动现象。

由图5(b)可知,布置相变材料后,换热管换热功率峰值和整体变化曲线比不布置相变材料的情况均较低。反映在管路中,即相变材料参与了部分蒸汽冷凝换热过程,减小了自然循环换热功率,从而减少了两相流气相占比。

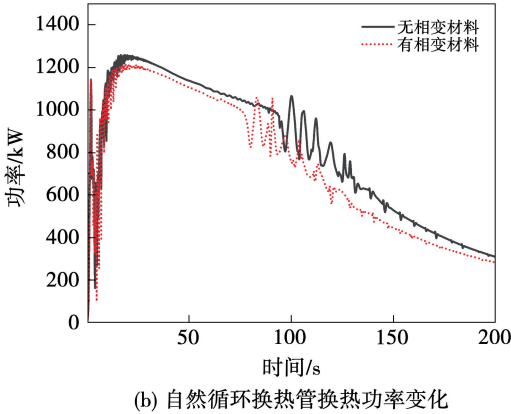
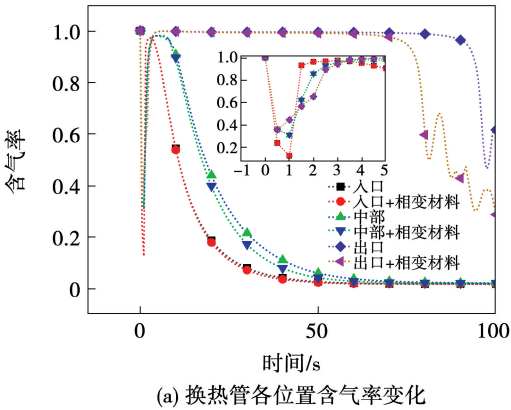
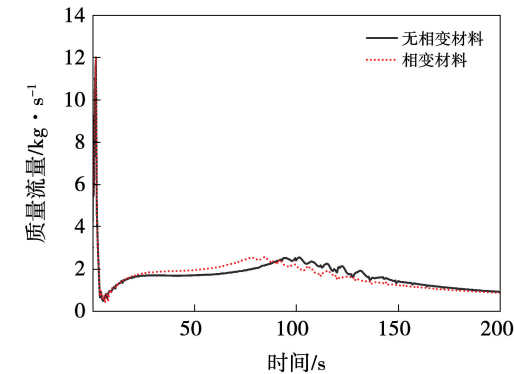


图5 相变材料对自然循环换热管各位置含气率和换热功率的影响

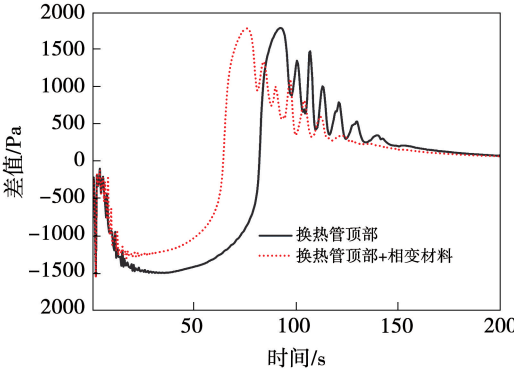
Fig.5 Effects of PCM on void fraction and heat transfer power at each location in natural circulation heat transfer tube

图6为事故发生后相变材料对自然循环换热管内流动的影响。由图6(a)可知,由于空管启动条件

下换热管内没有水,阀门打开后冷却水迅速进入,自然循环换热管质量流量在一开始到达峰值 12 kg/s,之后迅速回落至最低点。随着自然循环的建立,质量流量逐渐增长,到达 2.55 kg/s 后,随着蒸汽冷凝进行至后期,质量流量逐渐减小。由图 6(b)可知,自然循环换热管内驱动力和流动阻力的差值直接影响着质量流量。在事故发生后初期自然循环建立过程中,换热管顶部位置的流动阻力更大,随着换热的不断进行,在 82 s 时逐渐转变为流动驱动力更大。相变材料参与了蒸汽冷凝过程并吸收了部分热量。布置相变材料能够降低换热管换热功率峰值和整体变化曲线,进而减少管路中两相流气相占比。由于气相的比容远大于液相,其流动阻力也更大,因此布置相变材料后降低了自然循环阻力。自然循环建立过程中,流量增长至峰值需要的时间减少。布置相变材料后,流量峰值出现的时刻从 102 s 提前至 85 s。



(a) 自然循环换热管质量流量变化



(b) 自然循环换热管驱动力和阻力差值变化

图 6 相变材料对自然循环换热管内
流动影响

自然循环阻力包括了管道的摩擦阻力以及重力阻力。从管内流体的形态来看,气相时自然循环阻力要高于液相,且阻力的大小和气相的占比有关。图 7 为布置相变材料对换热管的自然循环阻力的影响。结合图 5 换热管各位置含气率变化分析,在事故发生后,管内水的温度迅速升高,随着水从液相向气相形态的转变,自然循环阻力迅速升高;到达峰值后,随着蒸汽冷凝换热的不断进行,管内水的液相占比逐渐增多,自然循环阻力迅速减小。相变材料的布置降低了自然循环换热管的换热功率,减少了两相流气相占比,从而减小了换热管的自然循环阻力,而且阻力降低至接近 0 的时刻前移。对于顶部换热管来说,阻力回落至接近 0 的时刻从事故发生后 98 s 前移至 81 s,自然循环阻力峰值从 1 510 Pa 降低至 1 310 Pa,下降幅度超过 13%。

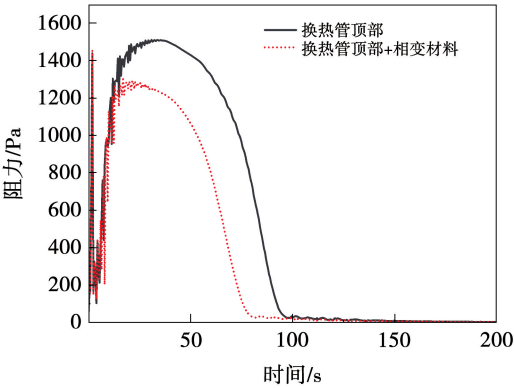


图 7 相变材料对自然循环换热管阻力的影响
Fig.7 Effect of PCM on resistance in natural
circulation heat transfer tube

2.2 相变材料对换热管换热性能的影响

事故发生后,高温蒸汽进入安全壳,原先各个位置的气体分布被扰动并发生改变。安全壳内不同位置的不凝结性气体的含量如图 8 所示。在事故发生的前 40 s,可以发现大量气体被堆积在安全壳底部的区域。这是由于顶部蒸汽的进入,对初始均匀分布的空气进行搅动和挤压,空气向远离蒸汽入口处的方向堆积。

图 9 所示为相变材料对不同位置的管外冷凝传热系数的影响。由于原先均匀分布的空气被挤压堆积至底部区域,所以在事故发生的前 7 s 内,安全壳顶部和中部位置的冷凝传热系数经历了迅速的增

Fig.6 Effects of PCM on flow in natural circulation
heat transfer tube

长,同时底部位置的不凝结性气体的含量增大,抑制了蒸汽和换热管壁面的冷凝换热。随着换热的不断进行,各个位置的冷凝传热系数逐渐降低,一方面是因为安全壳内混合气体的温度逐渐降低,温度差产生的传热驱动力不断减小;另一方面是因为蒸汽不断被冷凝,积聚在底部的不凝结性气体逐渐在安全壳内扩散,进而抑制了其他位置的蒸汽冷凝传热过程。布置了相变材料后,底部位置的传热系数变化不大,中部位置的传热系数在 50 ~ 150 s 之间有所减小,最多时减小了 11.8%,而顶部位置的传热系数在 150 s 之后减小的幅度较大,最多时减小了 6.4%。

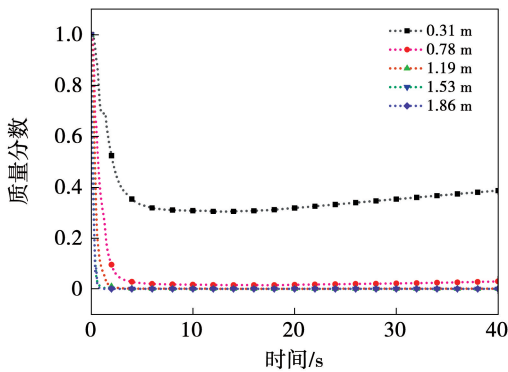


图 8 安全壳内不同高度的不凝结性气体的含量

Fig.8 Content of non-condensable gases at different heights in containment

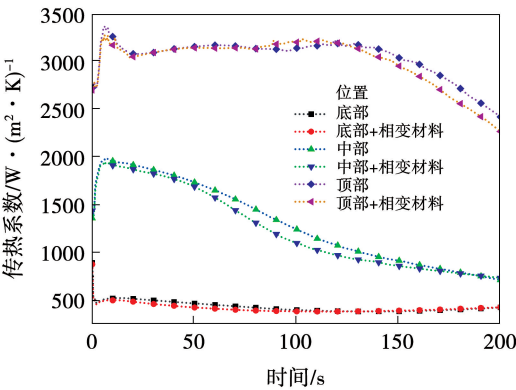


图 9 相变材料对不同位置的管外冷凝传热系数的影响

Fig.9 Effect of PCM on heat transfer coefficient of condensation outside tube at different positions

系数的影响。由图 10 可知,随着自然循环的建立和逐渐稳定,安全壳底部和中部位置的对流传热系数最先到达峰值。而位于安全壳顶部位置的管内对流传热系数在事故发生后 84 s 时到达峰值。高温蒸汽不断冷凝,各个位置的对流传热系数到达峰值后逐渐降低,自然循环换热管中液相的占比逐渐增加。在 84 s 后的各个时刻,换热管位置越低处对应的对流传热系数也越低。这是由于气液两相对流换热强度要高于单相对流换热。观察相变材料对对流传热系数的影响,在传热系数到达峰值下降的阶段,相变材料的影响都是负面的,这可以用相变材料吸收部分蒸汽冷凝的热量来解释。而在传热系数到达峰值前的阶段,观察换热管顶部的对流传热系数,发现相变材料可以使对流传热系数更快到达峰值(提前至 65 s),即加快了自然循环换热的建立和稳定,缓解了事故后初期蒸汽冷凝,自然循环换热不足的问题。

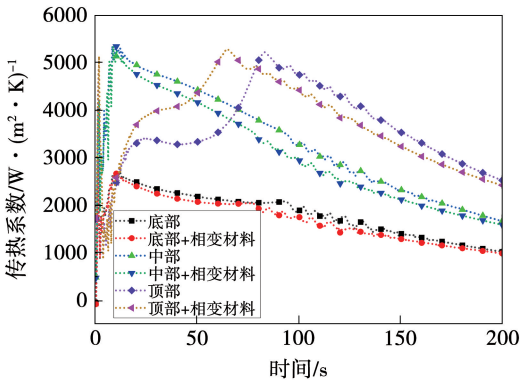


图 10 相变材料对不同位置管内对流传热系数的影响

Fig.10 Effect of PCM on convective heat transfer coefficient in tube at different positions

3 结 论

在本研究中,通过分析耦合相变材料的等高差非能动安全壳冷却系统的 Apros 动态仿真模型。从自然循环换热器的运行特性和换热特性方面出发,比较了是否布置相变材料对换热管性能的影响。

(1) 相变材料可以有效降低自然循环阻力,换热管顶部自然循环阻力峰值从 1 510 Pa 降低至 1 310 Pa,下降幅度超过 13%。

(2) 相变材料能够提前自然循环换热管的出口从气相降至气液两相的时刻,从 80 s 提前至 60 s

图 10 为相变材料对不同位置的管内对流传热

附近。

(3) 相变材料参与了部分蒸汽冷凝过程,使得换热管各位置的冷凝传热系数有所降低。

(4) 对于管内对流换热,相变材料可以使对流传热系数更快到达峰值,加快了自然循环换热的建立和稳定,缓解了事故后初期蒸汽冷凝,自然循环换热不足的问题。

参考文献:

[1] 邢 继,孙中宁,于 勇,等. “华龙一号”非能动安全壳热量导出系统研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(7):1089 – 1095,1086.

XING Ji,SUN Zhongning,YU Yong,et al. Research on HPR1000 passive containment heat removal system[J]. Journal of Harbin Engineering University,2023,44(7):1089 – 1095,1086.

[2] 李 伟,初伟钰,丛继东,等. 全厂断事故下壳内热工水力与非能动安全壳热量导出系统耦合特性实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(7):1096 – 1103.

LI Wei,CHU Weiyu,CONG Jidong,et al. Experimental study of the coupling characteristics of a thermal-hydraulic system and passive containment heat removal system in a containment vessel during a station black-out accident[J]. Journal of Harbin Engineering University,2023,44(7):1096 – 1103.

[3] SUN J,DENG J,RAN X,et al. Experimental study on flow modes and transient characteristics in low-pressure equal-height-difference natural circulation system[J]. Annals of Nuclear Energy,2021,151:107965.

[4] WANG Z,HE Y,DUAN Z,et al. Experimental study on transient flow characteristics in an equal-height-difference passive heat removal system for ocean nuclear power plants[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2023,208:124043.

[5] 朱学良,李 彦,朱群志. 相变储热换热器技术研究进展[J]. 上海电力大学学报,2022,38(5):443 – 449.

ZHU Xueliang,LI Yan,ZHU Qunzhi. Research progress of phase change heat storage exchanger technology[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2022,38(5):443 – 449.

[6] 谭 美,郭 健,陈 刚,等. 海洋核动力平台大破口事故下安

全壳压力控制与影响[J]. 船舶工程,2019,41(11):8 – 12.

TAN Mei,GUO Jian,CHEN Gang,et al. Containment pressure control and influence under reaching of floating nuclear power plant[J]. Ship Engineering,2019,41(11):8 – 12.

[7] CHO J O,KO A,SHIN S G,et al. Preliminary feasibility study of PCM condenser for PCCS of APR1400[J]. Annals of Nuclear Energy,2021,152:107959.

[8] SHIN S G,CHO J O,KO A,et al. Preliminary design of safety system using phase change material for passively cooling of nuclear reactor containment building[J]. Applied Thermal Engineering,2022,200:117672.

[9] HUI K,CHEN W,LI S,et al. Experimental study on transient thermal-hydraulic characteristics of an open natural circulation for the passive containment cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2021,179:121680.

[10] CHOI Y,JUNG J Y,LEE M S,et al. Preliminary study on a new self-sealing strategy for nuclear reactor containment buildings using phase change materials[J]. Nuclear Engineering and Design,2023,402:112099.

[11] ROSTAMI S,AFRAND M,SHAHAVER A,et al. A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage[J]. Energy,2020,211:118698.

[12] HUANG Y,WANG H,LI S,et al. Heat transfer characteristics of storage heat exchanger using different phase change materials for equal height difference passive containment cooling system[J]. Nuclear Engineering and Design,2025,432:113824.

[13] 李 勇,林原胜,谭思超,等. 海洋核动力平台堆舱非能动冷却特性研究[J]. 原子能科学技术,2017,51(4):652 – 658.

LI Yong,LIN Yuansheng,TAN Sichao,et al. Dynamic characteristics of passive compartment cooling for marine nuclear power platform[J]. Atomic Energy Science and Technology,2017,51(4):652 – 658.

[14] CHEN W,HUANG Y,WANG H,et al. Simulation study on the dynamic characteristics of natural circulation coupled phase change material for equal height difference passive containment cooling system[J]. Nuclear Engineering and Design,2024,427:113465.

(姜雪梅 编辑)