

摇摆条件下非能动安全壳冷却系统瞬态运行特性实验研究

王 涵, 李思念, 黄予凡, 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: 非能动安全壳冷却系统作为核电站安全系统的重要组成部分, 承担着维持安全壳结构完整性和密封性的任务。针对摇摆条件下非能动安全壳冷却系统的瞬态运行特性, 在混合气体压力为 0.6 ~ 1 MPa、冷却水温度为 25 ~ 40 °C、空气质量分数为 15% ~ 30%、摇摆角度为 0° ~ 10°、摇摆周期为 0 ~ 2 s 的条件下开展了实验研究, 获得了不同摇摆参数对系统瞬态运行的影响规律。研究结果表明: 摇摆条件有助于促进安全壳内的热量导出, 最大瞬时压降速率基本不受摇摆周期和摇摆角度的影响, 而平均压降速率则随着摇摆角度的增大或摇摆周期的减小而增大; 在所研究工况范围内, 冷却水温度对系统瞬态运行的影响可以忽略。此外压力体内发生了热分层现象, 空间高度每增加 100 mm, 压力体内混合气体温度约升高 1.43 °C。

关 键 词: 非能动安全壳冷却系统; 摇摆运动; 瞬态运行特性; 热分层现象

中图分类号: TM680

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.017

[引用本文格式] 王 涵, 李思念, 黄予凡, 等. 摇摆条件下非能动安全壳冷却系统瞬态运行特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 149-155. WANG Han, LI Sinian, HUANG Yufan, et al. Experimental study on transient operation characteristics of passive containment cooling system under swaying conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 149-155.

Experimental Study on Transient Operation Characteristics of Passive Containment Cooling System under Swaying Conditions

WANG Han, LI Sinian, HUANG Yufan, CHEN Weixiong

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

Abstract: The passive containment cooling system, as an important part of the nuclear power plant safety system, is responsible for maintaining the integrity and sealing of the containment structure. The experimental research on the transient operation characteristics of the passive containment cooling system under swaying conditions was conducted, and the influence laws of different swaying parameters on the system's transient operation were obtained under the conditions of 0.6 - 1 MPa mixture gas pressures, 25 - 40 °C cooling water temperatures, 15% - 30% air mass fractures, 0° - 10° swaying angles and 0 - 2 s swaying periods. The research results show that swaying conditions promote heat dissipation in the containment, and the maximum instantaneous pressure drop rate is basically unaffected by the swaying period and angle, while the average pressure drop rate increases with the increase of the swaying angle or the reduction of the swaying period. In the studied operating condition range, the influence of cooling water temperature on transient operation of system can be ignored. In addition, the pressure vessel has undergone thermal stratification, and the temperature of the mixture gas in the pressure vessel increases by about

收稿日期: 2024-12-24; 修订日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2241257)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (U2241257)

作者简介: 王 涵(1998-), 男, 西安交通大学博士研究生。

通信作者: 陈伟雄(1985-), 男, 西安交通大学教授。

1.43 °C for every 100 mm increase in the spacial height.

Key words: passive containment cooling system, swaying conditions, transient operation characteristics, thermal stratification phenomenon

引 言

我国海域辽阔,海洋油气资源丰富,海洋资源的开发与利用已成为现阶段我国能源战略发展方向^[1]。但海洋油气资源的开采通常远离陆地,难以从陆地直接获得外部能源供给以保障生产作业。海洋核动力平台(海洋浮动核电站、核动力船舶)因其布置灵活、机动性强等优点可为海上油气开采作业平台提供稳定高效的电力、热力,具有广阔的市场应用前景。然而,因海面风浪等环境因素,船用核动力装置受到多自由度的影响,进而改变了系统的热工水力特性^[2]。由于核能的特殊性,如何提升核动力平台的安全性是首要问题,尤其是在事故发生时无法及时获取足够外部救援的情况下,更需确保系统的安全稳定运行。

当核电站发生主管道破裂(Main Steam Line Break, MLSB)或冷却剂失水事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)时,大量水蒸气释放至安全壳内,反应堆堆芯温度迅速升高,安全壳内形成了由蒸汽、空气和氢气组成的混合气体,而空气和氢气属于不凝结气体会抑制蒸汽凝结换热^[3-4]。安全壳内的事 故热量依靠蒸汽在换热管壁面凝结,从而将事故热量导出至外部大气环境中,保证安全壳内的压力始终维持在设计压力范围内。蒸汽凝结换热是系统运行过程中最受关注的现象,而不凝结气体(氢气和空气等)会显著影响蒸汽凝结换热能力,并进而影响蒸汽扩散以及混合气体的分布特性。学者们首先对陆地条件下含不凝结气体的蒸汽凝结换热特性开展了研究。Byun 等人^[5]和 Liu 等人^[6]首次在安全壳中应用了内置式非能动换热器,并针对其换热特性开展了研究。Dehbi 等人^[7]实验研究了混合气体压力、空气质量分数和壁面过冷度对空气-蒸汽混合气体的凝结换热特性的影响,结果表明,凝结换热系数随混合气体压力增加而增加,随空气质量分数和壁面过冷度的增加而减小,并基于实验结果提出了包含混合气体压力、空气质量分数及壁面过冷度

的预测关联式。Kim 等人^[8]以闭式自然循环回路为研究对象开展了实验研究,并采用强制循环代替自然循环的方式获得范围更宽的实验参数,结果表明,增大混合气体压力或减小空气质量分数及壁面过冷度更有利用蒸汽的凝结。

此外,由于海洋核动力平台结构紧凑,壳内空间狭小,事故工况下压力迅速升高,高峰值压力严重威胁反应堆的完整性与密封性。目前,海洋条件下的研究主要针对稳态条件下的换热。谭思超等人^[9]和刘洋等人^[10]采用实验方法研究了摇摆对单相自然循环工况下圆管内换热特性的影响,结果表明,摇摆会增强系统时均换热系数,且随着摇摆幅度增加或周期减小,系统时均换热系数增强的幅度也增大,并得到适用于摇摆条件的换热系数拟合关联式。王畅^[11]的实验结果表明,摇摆会使时均换热系数增强,但在强迫循环条件下,摇摆对换热性能影响不大。Ishida 等人^[12]在对船用核反应堆自然循环的研究中发现,摇摆运动会提高自然循环工况下堆芯的换热效率。黄振等人^[13]认为,摇摆引起的加热管壁面附近流动局部扰动加剧是摇摆强化传热的主要原因。Hwang 等人^[14]选用 R-134a 为工质针对垂直上升管开展了实验研究,研究发现,摇摆会导致临界热流密度(Critical Heat Flux Density, CHF)提前出现,并针对 CHF 在摇摆条件下的边界条件进行了预测。谭思超等人^[15]针对单相自然循环开展了实验研究,结果表明,摇摆会导致自然循环流量发生波动。美国西屋公司曾依据重要程度对非能动安全壳冷却系统发展过程中的现象进行了评分和排序,其中蒸汽空气混合气体的混合与分层现象被评为 9.0 分(满分 10 分),因此被认为是最重要的现象之一^[16]。在系统运行过程中,已有研究多基于稳态工况下开展。Su 等人^[17]、Bian 等人^[18]通过实验研究发现,在系统稳态换热过程中,压力体内混合气体温度沿其竖直方向没有明显差异,一致认为压力体内未发生热分层现象。而系统的实际运行是瞬态过程,混合气体的分布直接影响系统的瞬态换热能力。Freitag 等人^[19]和 Gupta 等人^[20]通过 HAI 和 TH22 大型实验

设施研究压力体内混合气体的循环运动规律发现,混合气体中的不凝结气体会导致压力体内发生混合气体的热分层现象。本课题组前期研究发现,等高差非能动安全壳冷却系统瞬态运行时,压力体内混合气体在其竖直方向发生了热分层现象,混合气体温度自下而上逐渐增大。并且随着混合气体初始压力增大或初始空气质量分数减小,压力体内混合气体热分层强度逐渐增大^[21]。

综上所述,目前的研究主要是针对海洋条件下非能动安全壳冷却系统稳态换热特性,而系统运行过程多为瞬态运行,对于海洋条件下系统的瞬态运行特性的研究相对较少。因此,本文针对海洋条件下非能动安全壳冷却系统瞬态运行过程开展了实验研究,以安全壳内混合气体压力的变化为主,结合混合气体温度等参数变化规律,对瞬态运行特性进行了分析,对在海洋条件下相关设备的安全运行具有重要意义。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

本文设计搭建了海洋条件下非能动安全壳冷却系统实验平台,对摇摆条件下系统瞬态运行特性进行了分析。本实验系统如图 1 所示。实验系统主要包括压力体、六自由度摇摆平台、蒸汽发生器、空气压缩机、冷却水箱、采集控制系统、循环回路、离心泵及相关辅助设备等。六自由度摇摆平台借助 6 支电动缸的伸缩运动完成上平台在空间六个自由度的运动,不仅可以模拟出海洋条件下的起伏、摇摆等典型海洋运动,同时也可以完成六自由度的组合运动。所有蒸汽管路都采用保温棉进行包裹以减少蒸汽管路的散热,防止饱和蒸汽在壁面处冷凝诱发水击现象。实验所需蒸汽由电加热锅炉提供,饱和蒸汽流经稳压缸稳压后由蒸汽管路通入压力体内,最后在压力体内的换热管壁面处进行冷凝。实验中的不凝结气体为空气,空气由空气压缩机提供并通过干燥机除湿后通入压力体内。

实验系统中所有测量设备获得的实验数据由采集控制系统进行实时监测、采集,并将实验数据传输至采集控制系统中保存,便于开展后续的数据处理工作。实验参数如表 1 所示。

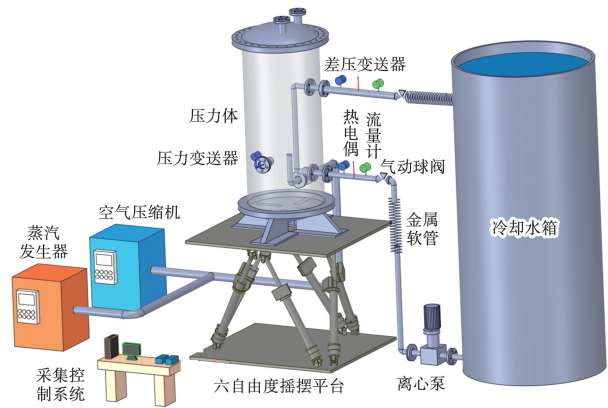


图 1 摇摆条件下非能动安全壳冷却实验系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of passive containment cooling experimental system under swaying conditions

表 1 实验参数
Tab. 1 Experimental parameters

参 数	数 值
混合气体压力/MPa	0.6 ~ 1.0
冷却水温度/℃	25 ~ 40
空气质量分数	15 ~ 30
摇摆角度 $\theta/(^{\circ})$	0 ~ 10
摇摆周期 T/s	0 ~ 2
换热管长度/mm	1 200
换热管外径/mm	37
换热管内径/mm	33
压力体直径/m	0.8
压力体高度/m	1.8

1.2 实验数据处理

为分析不凝结气体质量分数对非能动安全壳冷却系统换热特性和运行特性的影响,需要准确计算压力体内混合气体中不凝结气体的质量分数。根据实验条件下不凝结气体(空气)的质量百分比,计算所需操作条件下空气的目标压力。然后根据实验工况,通过空气压缩机通入空气或利用真空泵抽出空气。混合气体压力由安装在压力体上的压力变送器直接测量获得。根据本节中蒸汽为饱和蒸汽、混合气体中各组分的温度与混合气体温度相同的基本假设,蒸汽分压 p_s 仅与混合气体温度 t_{mix} 相关,如式(1)所示:

$$p_s = p(t_s) = p(t_{\text{mix}}) \tag{1}$$

式中: p —压力,MPa; t_s —蒸汽温度,℃。

混合气体中空气分压 p_a 的计算式为:

$$p_a = p_{\text{tot}} - p_s \tag{2}$$

式中: p_{tot} —混合气体压力, MPa。

压力体内混合气体中空气质量分数 ω_a 的计算式为^[22]:

$$\omega_a = \frac{M_a n_a}{M_a n_a + M_s n_s} = \frac{M_a p_a}{M_a p_a + M_s p_s} \tag{3}$$

式中: M —分子质量/kg·mol; n —物质的量/mol; 下标 a, s—空气和蒸汽。

将非能动安全壳冷却系统运行后的混合气体压力对时间进行求导, 最大值即为最大压降速率, 如公式(4)所示:

$$V_{\text{max}} = \text{Max} \left(\frac{|p_{i+1} - p_i|}{\tau_{i+1} - \tau_i} \right) \tag{4}$$

式中: V_{max} —最大压降速率/kPa·min⁻¹; 下标 $i+1$, i —计算过程中不同的时刻; τ —系统运行时间。

耐压模拟体中单位时间内混合气体压力下降的平均速率 V_{ave} 为:

$$V_{\text{ave}} = \frac{\Delta p}{\Delta \tau} \tag{5}$$

式中: Δp —单位时间内压力体内压力变化量, kPa; $\Delta \tau$ —单位时间, min。

1.3 实验参数测量的不确定性分析

电加热锅炉的功率为 720 kW, 可在设定压力下输出稳定蒸汽, 其最大工作压力和质量流量分别为 2.4 MPa 和 0.8 t/h。压力变送器的型号为 3051SD1, 精度为 0.025% FS, 采样率为 1 000 Hz。流量计的型号为 AXG150, 精度 0.2% FS, 采样率为 100 Hz。由于压力体内空间较大, 容易出现空气蒸汽混合气体分布不均匀的现象, 因此为准确测量内部温度, 在其内部沿垂直方向和水平方向等间距各布置 5 个 T 型热电偶, 测温范围为 -200 ~ 350 ℃, 精度为 0.5 ℃。

采用误差分析法^[18]对所测量参数的不确定性进行分析。其中, 压力体内混合气体压力相对误差为 1.13%, 温度的测量误差为 0.5 ℃, 换热管壁面温度的测量误差为 0.5 ℃。

1.4 重复性实验

为验证实验结果的可重复性, 针对摇摆条件下非能动安全壳冷却系统, 在混合气体压力为 0.8 MPa、空气质量分数为 20%、循环冷却水入口温度为

30 ℃、摇摆角度为 2°、摇摆周期为 1 s 的相同工况下, 进行了两次独立性实验, 实验结果如图 2 所示。从图中可以看出, 两次瞬态运行实验过程中压力体内混合气体压力随时间变化的最大偏差为 1.9%。综上, 瞬态运行实验中的实验结果具有良好的一致性, 表明本文获得的实验结果具有良好的重复性。

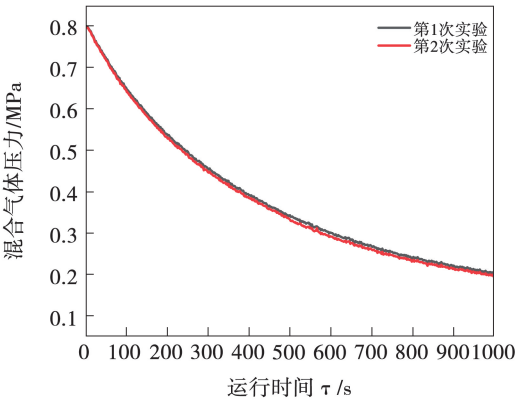


图 2 重复性实验

Fig. 2 Repeatability experiment

2 实验结果及讨论

2.1 循环冷却水温度的影响

实验开展过程中采用了容积较大的冷却水箱, 可认为冷却水温度在一定的运行时间内保持恒定不变。图 3 为 $T=1.0$ s、 $\theta=3$ ℃、混合气体压力 p_{mix} 为 0.6 ~ 1.0 MPa、循环冷却水入口温度 t_{in} 为 25 ~ 40 ℃、空气质量分数 ω_a 为 12% ~ 25% 时, 压力体内混合气体压力的变化规律。

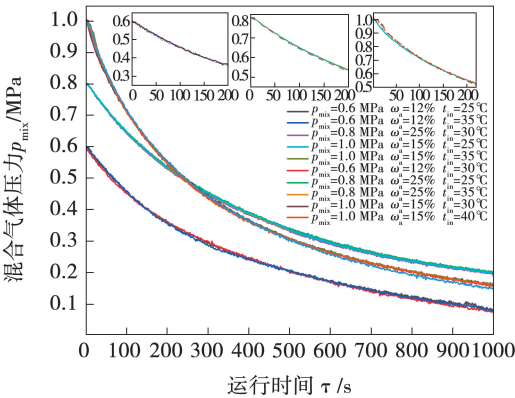


图 3 摇摆条件冷却水温度对混合气体压力的影响

Fig. 3 Influence of cooling water temperature on mixture gas pressure under swaying conditions

从图 3 可以看出,摇摆条件下压力体内混合气体压力均呈先快速下降而后平稳下降的变化规律。由此可以说明非能动安全壳冷却系统介入后,可以快速将压力体内的事故热量导出至外界环境。压力体内混合气体压力的变化仅在前 50 s 左右受到冷却水温度的影响,整体上冷却水温度未对压力体内混合气体压力变化产生影响,这与本课题组前期的研究结论一致^[23]。主要原因是压力体内混合气体温度远大于冷却水温度,换热器壁面温度主要由混合气体温度决定,冷却水温度的影响较小,而混合气体温度又取决于压力体内混合气体的压力和不凝结气体的质量分数。因此,冷却水入口温度不会对系统瞬态运行特性产生显著影响,在实验工况范围内可以忽略冷却水温度的影响。

2.2 摇摆周期对混合气体压力的影响

图 4 为摇摆角度 θ 为 3° 、混合气体压力 p_{mix} 为 0.6 ~ 0.8 MPa、循环冷却水入口温度 t_{in} 为 30°C 、空气质量分数 ω_a 为 15% ~ 30% 范围时,不同摇摆周期对压力体内混合气体压力的影响规律。从图中可以看出,相较于静止条件,摇摆条件下压力体内平均压力下降速率随摇摆周期的减小而增加,最大压降速率出现于系统启动的初始阶段,且不受摇摆频率的影响。混合气体压力为 0.6 MPa 时,相较于静止条件下,压力体内平均压降速率从 28.54 kPa/min 增加至 31.44 kPa/min。

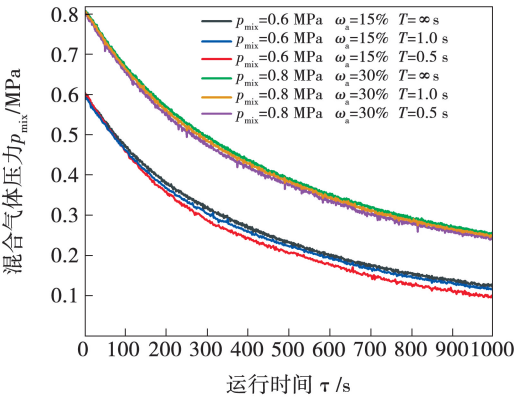


图 4 不同摇摆周期对压力体内混合气体压力的变化
Fig.4 Variation of mixture gas pressure in pressure vessel with different swaying periods

统稳态换热能力的重要因素,在系统瞬态运行过程中,压力体内混合气体温度随系统运行时间逐渐下降,因此在系统瞬态运行过程中换热管壁面过冷度一直在变化。图 5 给出了混合气体压力 p_{mix} 为 0.8 MPa、循环冷却水入口温度 t_{in} 为 30°C 、空气质量分数 ω_a 为 15% 时不同摇摆条件下换热管壁面温度的变化。从图中可以看出,摇摆条件下换热管壁面温度更低,这是因为摇摆导致换热管壁面附近流动局部扰动加剧。当混合气体压力为 0.8 MPa 时,相较于陆地条件下,压力体内平均压降速率随摇摆频率的增加小幅增加。这是因为压降速率随空气质量分数的增加而降低,空气质量分数的增加不利于蒸汽在换热管壁面的凝结,虽然摇摆有利于蒸汽在换热管壁面的凝结,但空气质量分数的影响程度比摇摆更大。从图 5 中还可以看出,摇摆条件会促进压力体内蒸汽的冷凝,区别于稳态工况冷却水流量等参数会存在周期性的波动。当系统瞬态运行时,不会有新蒸汽补充,所以不会出现周期性波动。当系统运行至 1 000 s 时,相较静止条件,摇摆条件下压降速率提高了约 15%,表明摇摆对于系统运行有较明显的影响。

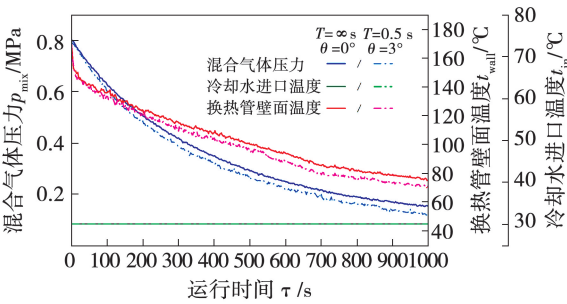


图 5 不同摇摆条件下换热管壁面温度的变化
Fig.5 Variation of wall temperature in heat exchanger tube under different swaying conditions

2.3 摇摆角度对混合气体压力的影响

图 6 为摇摆周期 T 为 2 s、摇摆角度 θ 为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 、混合气体压力 p_{mix} 为 1 MPa、循环冷却水入口温度 t_{in} 为 30°C 、空气质量分数 ω_a 为 10% 时,压力体内混合气体压力的变化规律。从图中可以看出,混合气体压力下降速率随摇摆角度的增加而增加。当摇摆角度从 0° 增加至 10° 时,混合气体压降速率从

换热管壁面过冷度是影响非能动安全壳冷却系

47.08 kPa/min 增加至 52.62 kPa/min。根据彭文平^[24]的研究可知,换热管壁面凝液量和液膜厚度均随壁面温度增大而减小,当摇摆角度较低时,换热管壁面温度较高,传热温差变化不明显,换热管壁面的凝液量变化有限。而摇摆角度的增大有利于增加壁面过冷度,使换热管内外壁面温差增大,从而有利于及时将热量导出,促进了蒸汽在换热管壁面上的凝结。

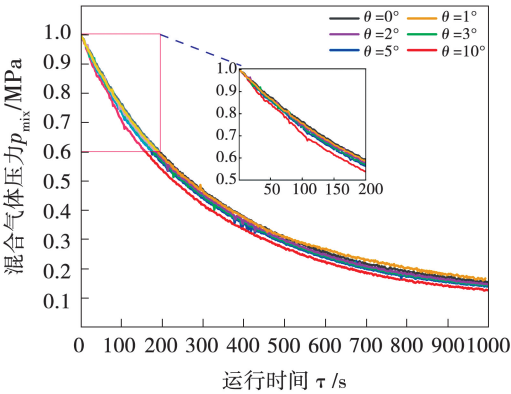


图 6 不同摇摆角度对压力体内混合气体压力的影响

Fig.6 Influence of different swaying angles on mixture gas pressure in pressure vessel

此外,本研究发现摇摆周期和摇摆幅值对系统运行特性的影响是相互关联的。具体来说,当摇摆周期或摇摆角度为定值时,摇摆越剧烈,对非能动安全壳冷却系统运行的促进程度越显著。系统运行过程中动态响应会受到周期和幅值的共同作用,进而影响非能动安全壳冷却系统的性能。

图 7 为混合气体压力 p_{mix} 为 1 MPa、摇摆角度 θ 为 $0^\circ \sim 3^\circ$ 、循环冷却水入口温度 t_{in} 为 30°C 、空气质量分数 ω_a 为 10% 时,压力体内竖直方向上不同高度位置混合气体温度的变化规律。从图中可以看出,在非能动安全壳冷却系统瞬态运行的初始时刻,压力体内竖直方向各位置混合气体温度相同,与稳态工况下压力体内混合气体温度的变化规律一致^[16],压力体内混合气体在其竖直方向上并未发生热分层现象。但在系统瞬态运行结束时刻,压力体内竖直方向各位置处混合气体温度逐渐产生差异,混合气体温度沿压力体竖直方向呈现自下而上升高的趋势。在实验工况条件下,摇摆角度越大,各位置处压力体混合气体温度越低,这主要是因为摇摆有利于

蒸汽在换热管壁面处的凝结,更有利于热量及时导出。将热分层强度定义为瞬态换热结束时,压力体内顶部与底部温度之间的差值。随着摇摆幅度的增加,压力体内的热分层强度从 15.06°C 增大至 18.86°C 。当系统瞬态运行结束时,压力体内底部空间的混合气体温度较顶部平均低约 17°C 。即在压力体内竖直方向上,空间高度每增加 100 mm,压力体内混合气体温度约升高 1.43°C 。

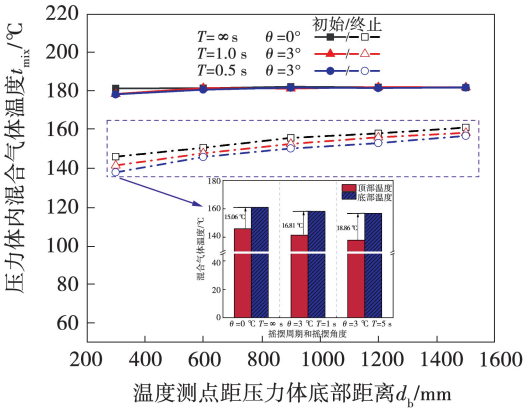


图 7 系统瞬态换热过程中混合气体温度随压力体内竖直高度的变化

Fig.7 Variation of mixture gas temperature in system's transient heat exchange process with vertical height of pressure vessel

3 结 论

本文针对摇摆条件下非能动安全壳冷却系统瞬态运行特性开展了实验研究,根据压力体内混合气体压力、温度等参数的变化规律,获得了系统瞬态运行特性,分析了各参数对系统运行特性的影响,得到如下结论:

(1) 摇摆条件有助于安全壳内的热量及时导出,平均压降速率随摇摆角度增大或摇摆周期减小而增大,冷却水温度在 $25 \sim 40^\circ\text{C}$ 时的影响可以忽略。系统瞬时最大压降速率基本不受摇摆周期和摇摆角度的影响,系统最大平均压降速率为 52.62 kPa/min 。

(2) 非能动安全壳冷却系统在瞬态运行时,压力体内沿竖直方向出现了热分层现象,混合气体温度自下而上升高,空间高度每增加 100 mm,混合气体温度约增加 1.43°C 。热分层强度随摇摆幅度的增大而增强。

参考文献:

- [1] 王 震,鲍春莉. 中国海洋能源发展报告(2022)[M]. 北京:石油工业出版社,2022.
WANG Zhen, BAO Chunli. China ocean energy development report (2022)[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2022.
- [2] 程 坤,谭思超. 海洋条件下反应堆热工水力特性研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(4):655-662.
CHENG Kun, TAN Sichao. Research progress of nuclear reactor thermal-hydraulic characteristics under ocean conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University,2019,40(4):655-662.
- [3] YADAV M K, KHANDEKAR S, SHARMA P K. An integrated approach to steam condensation studies inside reactor containments; A review[J]. Nuclear Engineering and Design,2016,300:181-209.
- [4] MARCEL C P, ROHDE M, VAN DER HAGEN T H J J. Experimental investigations on flashing-induced instabilities in one and two-parallel channels; A comparative study[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2010,34(7):879-892.
- [5] BYUN C S, JERNG D W, TODREAS N E, et al. Conceptual design and analysis of a semi-passive containment cooling system for a large concrete containment[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000,199(3):227-242.
- [6] LIU H, TODREAS N E, DRISCOLL M J. An experimental investigation of a passive cooling unit for nuclear plant containment[J]. Nuclear Engineering and Design,1999,199(3):243-255.
- [7] DEHBI A A, GOLAY M W, KAZIMI M S. Condensation experiments in steam-air and steam-air-helium mixtures under turbulent natural convection [C] // National Heat Transfer Conference AICHE, Minneapolis, United States, 1991.
- [8] KIM J W, LEE Y G, AHN H K, et al. Condensation heat transfer characteristic in the presence of non-condensable gas on natural convection at high pressure[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009,239(4):688-698.
- [9] 谭思超,庞凤阁,高璞珍,等. 摇摆对自然循环传热特性影响的实验研究[J]. 核动力工程,2006,27(5):33-36,69.
TAN Sichao, PANG Fengge, GAO Puzhen, et al. Experimental research of effect of rolling upon heat transfer characteristic of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2006,27(5):33-36,69.
- [10] 刘 洋,幸莫川,高璞珍,等. 摇摆对自然循环流动和换热影响的实验研究[J]. 核动力工程,2010,31(1):65-68.
LIU Yang, XING Mochuan, GAO Puzhen, et al. Experimental research on effect of rolling on natural circulation flow and heat transfer[J]. Nuclear Power Engineering,2010,31(1):65-68.
- [11] 王 畅. 周期力场作用下矩形通道内流动与传热特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
WANG Chang. Study of flow and heat transfer in rectangular channel in periodic force field[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2013.
- [12] ISHIDA T, YORITSUNE T. Effects of ship motions on natural circulation of deep sea research reactor DRX[J]. Nuclear Engineering & Design,2002,215(1/2):51-67.
- [13] 黄 振,高璞珍,谭思超,等. 摇摆对传热影响的机理分析[J]. 核动力工程,2010,31(3):50-54.
HUANG Zhen, GAO Puzhen, TAN Sichao, et al. Mechanism analysis of effect of rolling motion on heat transfer[J]. Nuclear Power Engineering,2010,31(3):50-54.
- [14] HWANG J, LEE Y, PARK G. Characteristics of critical heat flux under rolling condition for flow boiling in vertical tube[J]. Nuclear Engineering & Design,2012,252(1):153-162.
- [15] 谭思超,高文杰,高璞珍,等. 摇摆运动对自然循环流动不稳定性影响[J]. 核动力工程,2007,28(5):42-45.
TAN Sichao, GAO Wenjie, GAO Puzhen, et al. Effect of rolling motion on flow instability of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering,2007,28(5):42-45.
- [16] Westinghouse. AP1000 pressurized water reactor[J/OL]https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap1000-pwr.
- [17] SU J Q, SUN Z N, FAN G M, et al. Experimental study of the effect of non-condensable gases on steam condensation over a vertical tube external surface[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,262:201-208.
- [18] BIAN H Z, LU Y Z, LI C M, et al. Comprehensive parameter analyses on steam-air condensation at pressures up to 1.6 MPa[J]. Nuclear Engineering & Design,2021,385:111536.
- [19] FREITAG M, SCHMIDT E, GUPTA S, et al. Simulation benchmark based on THAI-experiment on dissolution of a steam stratification by natural convection[J]. Nuclear Engineering & Design, 2016,299:37-45.
- [20] GUPTA S. Dissolution of a light gas stratification by natural convection. In: Technical Report 1501361-TH22-TR[R]. Eschborn: Becker Technologies GmbH,2010.
- [21] CHEN W X, HUI K, WANG X Y, et al. Experimental study of steam-air mixture thermal stratification during the dropping of containment pressure[J]. Progress in Nuclear Energy,2022,149:104260.
- [22] MOFFAT R J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis [J]. Journal of Fluids Engineering, 1982,104:250-260.
- [23] HUI K, CHEN W X, LI S D, 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.
- [24] 彭文平. 汽—气凝结、液膜厚度及换热特性的研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
PENG Wenping. Study on vapor-liquid film thickness and heat transfer characteristics of vapor-liquid condensation[D]. Beijing: North China Electric Power University,2014.