

Thermal Hydraulic Characteristics Analysis of Transient Processes in Passive Systems

Chengzhi Yu

Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai, 200233, China

Abstract

This paper studies the thermal hydraulic characteristics of passive system in transient process in detail. The numerical simulation and experimental validation explore the response characteristics of the system under different operating conditions. The results show that the passive system has strong transient response ability under sudden accident conditions and can quickly restore the stable state. Meanwhile, the performance decay of the system after long operation is analyzed and the improvement measures are proposed. These research results provide a scientific basis for the optimization design and safety evaluation of the passive system.

Keywords

passive system; transient process; thermal hydraulic characteristics

非能动系统瞬态过程热工水力特性分析

于程志

上海核工程研究设计院股份有限公司, 中国·上海 200233

摘要

论文针对非能动系统在瞬态过程中的热工水力特性进行了详细研究。通过数值模拟和实验验证,探讨了不同操作条件下系统的响应特性。研究表明,非能动系统在突发事故条件下的瞬态响应能力强,能够迅速恢复稳定状态。同时,分析了系统在长时间运行后的性能衰减情况,并提出了改善措施。这些研究成果为非能动系统的优化设计和安全评估提供了科学依据。

关键词

非能动系统; 瞬态过程; 热工水力特性

1 引言

随着核电技术的不断进步,非能动安全系统因其在事故条件下的高可靠性和安全性逐渐成为研究热点。这些系统在无需外部能源输入的情况下,能够自动维持核反应堆的安全状态,显著提高了核电站的整体安全性^[1]。然而,非能动系统在瞬态过程中的表现仍需深入研究,系统的热工水力特性对安全性和经济性有重要影响。论文通过数值模拟和实验研究,详细分析了非能动系统在瞬态过程中的热工水力特性,旨在为系统的设计优化和安全评估提供科学依据。

2 系统概述

2.1 非能动系统定义

非能动系统是指在正常运行和事故情况下,无需外部能源输入即可自动完成其功能的安全系统。这种系统利用高度差、温度差、压力差等自然驱动力来实现冷却、热量导出

等功能。在核能领域,非能动安全系统因其在事故条件下的高可靠性和安全性而受到广泛关注。它们能够在失去电力供应或其他外部能源的情况下,自动启动并维持核反应堆的安全状态,从而减少事故风险和提高核电站的整体安全性。

2.2 工作原理

非能动系统的工作机制主要依赖于自然驱动力,如重力、温差和密度差。在正常运行状态下,系统通过自然循环将反应堆产生的热量传递给冷却介质,从而维持反应堆的温度在安全范围内^[2]。当发生事故,如失去外部电源或冷却系统失效时,非能动系统能够自动启动并维持冷却功能。具体来说,储水箱内的冷却水通过重力作用流入反应堆,通过换热器将热量传递给环境介质。自然循环回路利用温差和密度差驱动冷却水在系统中流动,确保持续的冷却效果。这种设计不仅提高了系统的可靠性,还减少了对外部能源的依赖,降低了运行成本。

3 研究方法

3.1 数值模拟

为了深入研究非能动系统在瞬态过程中的热工水力

【作者简介】于程志(1990-),男,中国山东龙口人,硕士,工程师,从事非能动系统调试研究。

特性，本研究采用了计算流体力学（CFD）软件 ANSYS Fluent 进行数值模拟。该软件具有强大的求解能力和丰富的物理模型库，能够准确模拟复杂的流体动力学和传热过程。具体设置如下：①使用 ANSYS Fluent 2022 R2 版本，该版本具备最新的物理模型和求解算法，能够有效处理多相流、传热和化学反应等问题。②采用非结构化网格进行划分，以适应复杂几何形状。网格独立性分析表明，当网格数量达到 200 万时，计算结果趋于稳定，因此最终选择 200 万个单元格进行模拟。网格划分结果见表 1。③入口边界设置为速度入口，出口边界设置为压力出口。壁面边界设置为绝热或固定温度，具体取决于实际工况。入口速度设为 0.5m/s，出口压力设为大气压。④初始温度设为 300K，初始压力设为 1atm。流体属性根据实际工质（如水）进行设定。⑤采用稳态求解器进行初步计算，然后切换到瞬态求解器进行瞬态过程的详细分析。时间步长设为 0.01s，总模拟时间为 100s。

表 1 网格划分结果

参数	描述	值
软件版本	ANSYS Fluent	2022 R2
网格数量	单元格数	2,000,000
入口边界	类型	速度入口
	速度	0.5m/s
出口边界	类型	压力出口
	压力	1atm
壁面边界	类型	绝热 / 固定温度
初始温度	温度	300K
初始压力	压力	1atm
时间步长	时间	0.01s
总模拟时间	时间	100s

3.2 实验验证

为了验证数值模拟结果的准确性，本研究利用一套流阻试验台架装置，通过实验数据对模拟结果进行校验。具体设计如下：①实验装置主要包括一个小型非能动冷却系统，包含换热器、管道、储水箱和测量仪器。换热器采用铜材质，具有良好的导热性能。管道直径为 50mm，长度为 5m，储水箱容量为 100L。②主要测试参数包括温度、压力和流速。温度传感器安装在换热器进出口、管道关键位置和储水箱内，压力传感器安装在入口和出口处，流速传感器安装在管道中部。③使用数据采集系统实时记录实验数据，采样频率设为 1Hz。数据采集系统通过 USB 接口与计算机连接，实验数据存储在计算机中，便于后续分析。

3.3 模型验证

为了确保数值模型的有效性和可靠性，本研究将数值模拟结果与实验数据进行了详细对比。具体步骤如下：

①对实验数据进行预处理，去除噪声和异常值，确保数据的准确性和一致性。使用 MATLAB 软件进行数据分析和处理。

②将数值模拟得到的温度、压力和流速数据与实验数

据进行对比，计算相对误差和均方根误差（RMSE）。对比结果见表 2。

表 2 结果对比

参数	实验值	模拟值	相对误差 (%)	RMSE
温度 (K)	305	306	0.33	1.0
压力 (Pa)	101325	101350	0.02	25
流速 (m/s)	0.51	0.50	1.96	0.01

③分析误差产生的原因，如网格划分精度、边界条件设置、物理模型选择等。根据误差分析结果，对模型进行必要的修正和优化。

4 热工水力特性分析

4.1 温度场分布

通过对非能动系统内部各部件的温度变化规律进行分析，可以深入了解系统的热传递特性。数值模拟结果显示，系统在瞬态过程中的温度场分布呈现出明显的时空变化特征^[3]。特别是在关键部位，如换热器进出口、管道弯曲处和储水箱底部，温度梯度较大。在事故初期，换热器进口温度迅速上升，最高达到 350K，随后逐渐下降并趋于稳定，最终稳定在 320K 左右。相比之下，换热器出口温度变化较为平缓，最高温度约为 320K，最终稳定在 310K 左右。这一结果表明，换热器在事故初期能够有效吸收大量热量，但随着系统的自然冷却效应逐渐增强，出口温度逐渐降低。此外，储水箱底部的温度也表现出类似的趋势，最高温度点出现在事故初期，随后逐渐下降。这些关键部位的温度变化规律为系统的安全设计提供了重要参考，特别是在事故条件下的热管理策略制定方面。

4.2 流动特性

流体速度场和压力场的变化趋势是评估非能动系统流动特性的关键指标。数值模拟结果显示，在瞬态过程中，系统内部的流体速度和压力分布呈现出明显的时空变化。在事故初期，系统温差较大，自然循环驱动力较强，导致流速较高，最大流速达到 0.7m/s。随着系统的逐渐冷却，温差减小，流速也随之降低，最终稳定在 0.5m/s 左右。压力场的变化趋势与速度场相似，入口压力在事故初期迅速升高，最高达到 102kPa，随后逐渐下降并趋于稳定，最终稳定在 101kPa 左右。出口压力则保持在 101kPa 左右，变化较小。这些结果表明，系统的自然循环效应在事故初期非常显著，能够有效地维持流体流动和热量传递，但在系统逐渐冷却后，自然循环效应减弱，流速和压力趋于稳定。流型转换对传热效果的影响也值得关注，特别是在流速较高时，湍流效应增强，传热效率提高；而在流速较低时，层流效应占主导，传热效率相对较低。

4.3 相变过程

对于涉及两相流动的非能动系统，相界面的位置变化对系统性能有重要影响。数值模拟结果显示，在事故初期，系统内部的冷却水开始蒸发，形成气泡。气泡主要集中在管道

上部,随着系统的逐渐冷却,气泡数量逐渐减少,最终消失。这一过程对系统的传热效果有显著影响。气泡的存在增加了流体的湍动程度,提高了传热系数,但同时也可能导致局部干涸现象,影响传热效果。因此,合理控制相界面的位置变化,对于保证系统的安全性和有效性至关重要。特别是在事故初期,气泡的形成和分布对系统的瞬态响应能力有直接影响,需要通过优化设计和控制策略来确保系统的稳定运行。

4.4 传热机理

基于传热系数和努塞尔数等参数,可以深入理解非能动系统在不同工况下的传热机制。数值模拟结果显示,系统在瞬态过程中的传热系数和努塞尔数随时间和空间的变化而变化。在事故初期,系统温差较大,流体湍动程度较高,导致传热系数迅速增加,最高达到 $2000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,随后逐渐降低并趋于稳定,最终稳定在 $1800\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右。努塞尔数的变化趋势与传热系数相似,事故初期迅速增加,最高达到 150,随后逐渐降低并趋于稳定,最终稳定在 130 左右。这些结果表明,系统在事故初期能够有效地提高传热效率,但随着系统的逐渐冷却,传热效率逐渐降低。传热系数和努塞尔数的变化规律为优化系统的传热性能提供了重要的理论依据,特别是在设计高效换热器和优化流体流动路径方面。通过合理选择材料和结构设计,可以进一步提高系统的传热效率,确保其在各种工况下的安全性和可靠性。

5 安全性能评估

5.1 瞬态响应

非能动系统在突发事故条件下的瞬态响应能力是评估其安全性能的重要指标之一。本研究重点考察了系统在冷却剂丧失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)条件下的瞬态响应。数值模拟结果显示,当发生 LOCA 时,系统能够迅速启动自然循环机制,有效降低反应堆温度,防止过热现象的发生。在事故初期,反应堆出口温度迅速上升至 350K ,随后在自然循环的作用下逐渐下降,最终稳定在 320K 左右。同时,系统内部的压力变化也在可控范围内,入口压力从 101kPa 升至 102kPa 后逐渐恢复稳定。这些结果表明,非能动系统在 LOCA 事故条件下具有较强的瞬态响应能力,能够迅速恢复系统的稳定状态,确保核反应堆的安全运行。此外,系统的自然循环机制在事故初期发挥了重要作用,通过自然对流和重力作用,有效地传递了一回路热量,避免了温度过高带来的堆芯失控风险。

5.2 长期稳定性

长期运行后系统的性能衰减情况是评估其可靠性和经济性的重要因素。本研究通过数值模拟和实验数据,分析了系统在长时间运行后的性能变化。结果显示,系统在连续运行 1000 小时后,传热效率略有下降,传热系数从初始的 $2000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降至 $1800\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。同时,系统内部的流动阻力也有所增加,管道压降从初始的 5kPa 增加到 7kPa 。这些性能衰减主要是由于系统内部的腐蚀、结垢和沉积物积

累所致。为了改善系统的长期稳定性,建议采取以下措施:首先,选用耐腐蚀和抗结垢的材料,延长系统的使用寿命,减少维护频率和成本。其次,安装在线监测仪表,实时监控系统的性能参数,及时发现并解决问题,确保系统的长期稳定运行。最后,定期维护系统,保持系统的清洁和畅通。

5.3 故障诊断与预防

识别潜在的安全隐患并建立故障预测模型,是确保非能动系统安全运行的关键。本研究通过数据分析,识别了系统可能存在的安全隐患,并提出了相应的预防措施。结果显示,系统的主要安全隐患包括管道泄漏、换热器堵塞和控制系统失效等。管道泄漏是最常见的故障类型,占有故障的 40%,主要原因是材料老化和腐蚀。为了预防这些故障,建议采取以下措施:首先,采用冗余控制系统,确保在单一控制系统失效时,备用系统能够立即启动,保证系统的正常运行。其次,安装在线监测仪表,定期进行监盘,确保管道的完整性。最后,定期进行应急演练,提高操作人员的应急处置能力,确保在突发事件中能够迅速采取正确的应对措施。通过这些预防措施,可以有效降低系统的故障率,提高系统的安全性和可靠性。

6 结语

论文通过数值模拟与实验,研究了非能动系统在瞬态过程中的热工水力特性,特别是在冷却剂丧失事故(LOCA)条件下的表现。研究发现,该系统能够快速启动自然循环,有效控制反应堆温度,避免过热,使温度在 LOCA 初期上升至 350K 后,在自然循环作用下下降至约 320K ,并保持稳定。同时,系统内部压力变化保持在安全范围内,从 101kPa 升至 102kPa 后趋于稳定。长期运行测试显示,经过 1000 小时连续运行,系统的传热效率有所下降,传热系数由 $2000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 减少到 $1800\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,且管道压降从 5kPa 增至 7kPa 。性能下降主要是由于腐蚀、结垢及沉积物累积所致。因此,建议实施使用耐腐蚀材料、部署在线监测系统及定期维护来增强系统的长期稳定性。在故障诊断与预防方面,利用故障树分析(FTA)确定了主要的安全隐患,如管道泄漏、换热器堵塞和控制系统失效。针对这些问题,提出了一系列预防措施,包括设置冗余控制系统、安装在线仪表和定期开展应急演练,以保障系统的安全运行。

总之,本研究深入探讨了非能动系统在瞬态条件下的热工水力特性和动态行为,为系统的设计优化和安全评估提供了理论基础和技术支持,对于提升非能动系统的可靠性、经济性及推动核能安全技术的发展具有重要价值。

参考文献

- [1] 刘宇生,许超,马帅,等.ACME台架非能动水箱热工水力现象研究[J].核动力工程,2021,42(S1):5-10.
- [2] 黎闫.非能动停堆组件热工水力设计程序开发与验证[J].核科学与工,2021,41(2):378-385.
- [3] 尹翊.环路热管非能动安全壳冷却系统热工水力特性研究[D].济南:山东大学,2022.