

压水堆非能动安全壳气溶胶沉降的PIRT研究

王政辉, 路长冬, 付鹏涛

中广核研究院有限公司反应堆理论与安全研究所, 广东 深圳

收稿日期: 2024年10月22日; 录用日期: 2024年11月14日; 发布日期: 2025年1月8日

摘要

压水堆发生事故后安全壳内高温高压的大气会载带放射性气溶胶到内部换热器传热管周围, 形成抽吸效应并循环流动, 气溶胶被卷吸进入传热管管间时将造成大量沉积。根据非能动安全壳内大气夹带气溶胶运动时的机理, 本研究开展了不同气溶胶行为机理的沉降速率分析, 建立了非能动安全壳气溶胶沉降影响因素的重要性排序表(PIRT), 识别出安全壳热的大气的局部冷却和内部换热器传热管附近的大气抽吸是影响非能动安全壳内气溶胶沉降的重要机理, 应在非能动安全壳内气溶胶的模化实验和理论模拟中需要予以重点关注。

关键词

非能动安全壳, 现象识别和分级, 重要性排序表, 气溶胶沉降

Phenomena Identification Ranking Table (PIRT) Study for Influencing Factors of Aerosol Deposition in Passive Containment of Pressurized Water Reactor

Zhenghui Wang, Changdong Lu, Pengtao Fu

Reactor Theory and Safety Department, China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd.,
Shenzhen Guangdong

Received: Oct. 22nd, 2024; accepted: Nov. 14th, 2024; published: Jan. 8th, 2025

Abstract

After an accident occurred in pressurized water reactor, the high-temperature and high-pressure atmosphere inside the containment could carry radioactive aerosols to the vicinity of the heat

exchanger's heat transfer tubes, creating a suction effect and circulating flow. When aerosols were drawn into the gaps of the heat transfer tubes, it could lead to significant deposition. Based on the mechanisms of aerosol movement in the non-active containment atmosphere, this study conducted an analysis of the settling rates of different aerosol behavior mechanisms and established a Phenomena identification Ranking Table (PIRT) for the factors affecting aerosol settling in the passive containment. It identified that the local cooling of the hot atmosphere in the containment and the atmospheric suction near the heat transfer tubes of the internal heat exchanger are important mechanisms influencing aerosol settling in the non-active containment, which should be given special attention in both experimental modeling and theoretical simulations of aerosols in the non-active containment.

Keywords

Assive Containment, Phenomena Identification Ranking Table, PIRT, Aerosol Deposition

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

压水堆核电站非能动安全壳依靠自然降低事故后放射性气溶胶的释放,从而缓解事故后果。付亚茹等针对 AP1000 非能动电厂的事故特点,深入研究了冷管段双端剪切大破口失水事故后安全壳内气溶胶的自然去除机理,发现 AP1000 气溶胶主要去除机制为扩散泳、热泳和重力沉降,扩散泳贡献最大,其次是热泳和重力沉降[1],其中扩散泳沉降速率和安全壳的热工状态紧密相关。刘建昌等针对华龙一号冷管段双端剪切大破口失水事故开展了安全壳内气溶胶自然沉降现象研究,分析了气溶胶粒径分布特性、气溶胶释放假设对自然沉降现象的影响,研究发现气溶胶的粒径分布特性、放射性气溶胶释放特性和安全壳热工状态等会影响气溶胶自然沉降过程[2]。这些研究表明安全壳内气溶胶行为受气溶胶性质以及安全壳内热工状态等因素的影响。因此,对气溶胶沉降因素开展重要性排序是研究非能动核电站在事故工况下安全壳内放射性气溶胶自然行为的前提,也是程序适用性验证的基础。

2. 非能动安全壳的特点

非能动安全壳采用了非能动安全壳热量导出系统(EPS),其主要的技术特点是不依赖于外部动力,仅通过利用重力和密度差等自然力驱动安全壳内空气自然循环,保证核电站事故工况下的冷却[3]。

2.1. 非能动安全壳热量导出系统方案

EPS 系统主要由下降管、内部换热器、上升管、外部换热器、集气器和换热水箱组成,系统原理见图 1。当核电站一回路边界破损,大量的蒸气被释放至安全壳内,进而导致安全壳内压力、温度迅速上升,当安全壳喷淋系统不可用时, EPS 系统投入运行。这些高温蒸气以冷凝的方式将热量传递给内部换热器,低温水在换热器内升温、膨胀,沿着系统上升管将安全壳内的热量导出至安全壳外部换热水箱,外部水箱最终将热量排放到大气环境,进而达到使安全壳降温、降压的目的[4]。

2.2. 非能动安全壳热量导出系统的运行

当核电站一回路边界破损,大量一回路冷却剂闪蒸形成蒸气,释放至安全壳内,热的蒸气和空气上

升到内部换热器附近后被迅速冷却。其中蒸气被快速冷凝形成水滴，蒸气分压迅速降低，在内部换热器传热管附近形成抽吸效应，大量空气被卷吸进入内部换热器。空气被冷却后密度增大向下流动，到达底部一回路破损边界时又被破口喷放的蒸气加热，向上运动，由此形成空气的自然循环(详见图2)。在此

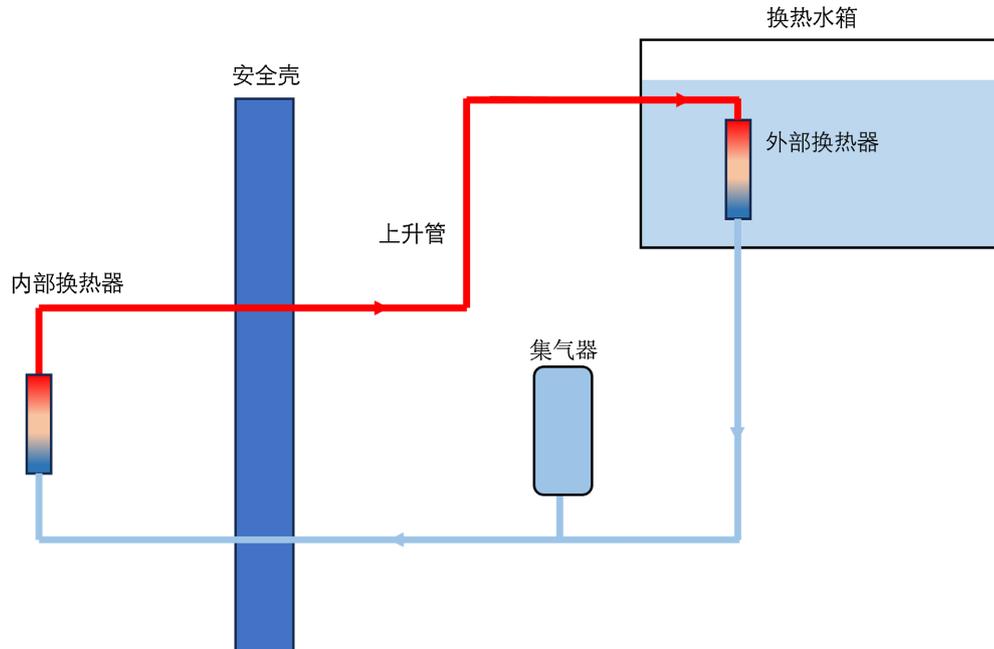


Figure 1. Schematic diagram of EPS system principle
图 1. EPS 系统原理示意图

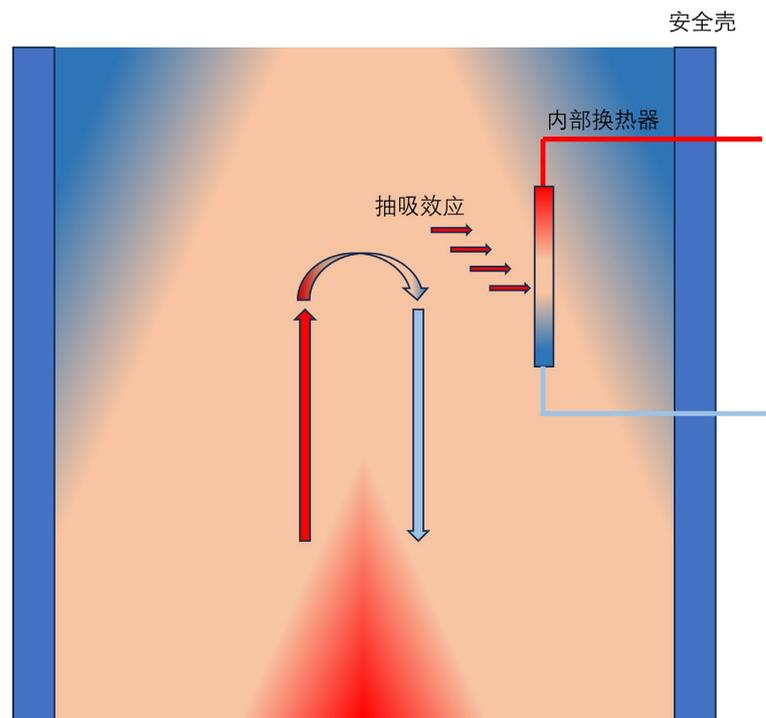


Figure 2. State of atmospheric flow in containment after EPS activation
图 2. EPS 启动后安全壳内大气流动状态

过程中,安全壳内的气体组分和温度形成明显分层,即下部破口处的蒸气浓度高,空气温度高,上部内部换热器传热管附近蒸气浓度低,空气温度低[5]。

3. 非能动安全壳大气内气溶胶沉降机理

高温高压冷却剂泄漏后闪蒸形成蒸气,夹带一回路和堆芯内的放射性产物形成放射性气溶胶释放到安全壳,安全壳内大气温度和压力、蒸汽浓度以及大气的流动状态均会对气溶胶的沉降造成影响。此外,气溶胶的凝聚、壁面沉积和重力沉降等将进一步影响安全壳大气内气溶胶的扩沉降。通常,安全壳大气内放射性气溶胶的粒径范围为 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$,其几何粒径中位值在 $0.44\ \mu\text{m}$ 左右,质量中位粒径在 $1.2\ \mu\text{m}$ 左右。对于大颗粒的气溶胶($>10\ \mu\text{m}$)粒子,其在重力的作用下迅速沉积,无法长期悬浮在安全壳大气中;对于 $10\ \mu\text{m}$ 以下粒子,尤其是小于 $1\ \mu\text{m}$ 左右粒子易受流场扰动影响,会长期悬浮,同时做缓慢的沉降和扩散运动。因此,放射性气溶胶的扩散和沉降特性受粒径影响较大,而扩散和沉降的不同会导致气溶胶粒子有不同的凝聚特性,凝聚又会导致气溶胶粒子粒径的变化,从而进一步影响气溶胶粒子的沉降[6]。

总的来说,气溶胶的沉降过程主要包括迁移、扩散和沉积[7]。根据沉积机理的不同,主要有重力沉积、热泳沉积、扩散泳沉积和布朗沉积等,沉积是气溶胶粒子沉降的重要途径,气溶胶的沉降机理见表1。

Table 1. Settlement mechanism of aerosol

表 1. 气溶胶的沉降机理

气溶胶的沉降过程		影响因素
气溶胶迁移	惯性碰撞	由粒子运动惯性造成碰撞拦截,去除效率取决于粒子的斯托克斯数。
气溶胶扩散	湍流扩散	由流场的纵向脉动造成,包括涡流碰撞和涡流扩散。
	布朗扩散	由分子的自由热运动造成,与气溶胶粒子粒径相关。
气溶胶沉积	重力沉积	气溶胶粒子受到重力作用会产生竖直向下的运动,从而使得气溶胶粒子在水平面上沉积,该现象在长距离低流速且气溶胶粒子粒径和密度较大时会显著发生。
	热泳沉积	气溶胶粒子在一个有温度梯度的流场中时,会从高温区域向低温区域运动,该现象称为热泳。当流场中存在壁面时,粒子就会向冷壁面沉积,称为热泳沉积。
	扩散泳沉积	气溶胶的扩散泳现象是因为其载体气体中的蒸汽在墙壁表面上凝结而引起的,扩散泳基本上与气溶胶的尺寸无关。

4. 安全壳内气溶胶沉降因素识别及排序(PIRT)

4.1. 非能动安全壳大空间气溶胶沉降因素分析

根据美国核管会(NRC)开发的PIRT九步法,评价气溶胶在安全壳大气流场中扩散和沉降时,影响评价标准的因素包括但不限于以下方面:安全壳大气的流动情况、安全壳体积和表面积、非能动安全壳热量导出系统的冷却能力、安全壳内设备隔间的布置状况[8]。其引起的重要的现象识别见表2,这是根据大气流场的流动路径来确定的。

4.2. 非能动安全壳大空间气溶胶沉降速率分析

安全壳气溶胶行为受安全壳载气行为和气溶胶自然去除两个方面的影响。一方面,核电厂事故下一回路破口喷放的蒸汽会形成射流,扰动安全壳大气的流动,促使载气夹带气溶胶流动。同时,非能动安全壳系统的运行时,自然循环的安全壳大气也会夹带气溶胶流动。另一方面,气溶胶扩散到安全壳大空间后,会发生自然沉降。

Table 2. Identification list of important phenomena
表 2. 重要现象识别表

阶段	重要现象
间隙释放 压力容器内早期释放	闪蒸冷却剂的射流
	下部隔间结构的滞留
	安全壳热的大气上升
	安全壳热的大气的局部冷却
	蒸气凝结造成喷雾的捕集
	内部换热器传热管附近的大气抽吸
	安全壳冷的大气下降
压力容器外释放	安全壳大气再加热
压力容器晚期释放	冷却剂的再挥发, 气溶胶再悬浮

通常情况下, 安全壳内载气的流动速度较慢($<0.3 \text{ Ma}$), 尤其非能动冷却系统运行时的安全壳大气自然流动。通过非能动安全壳冷却系统的冷凝速率, 计算安全壳内的局部压差, 再采用伯努利方程可以计算不同压差下大气的流动速度, 可以发现壳内的空气流速不超过 40 m/s , 详见图 3。

安全壳内气溶胶沉降机理包括湍流沉积、重力沉降、扩散泳、热泳和布朗扩散。计算不同粒径下, 安全壳内气溶胶粒子在不同机制下的沉积速度见图 4。从图 4 可以发现, 大颗粒气溶胶的湍流沉积速度较快, 能达到 1 m/s 左右, 小颗粒气溶胶则沉积速度较慢, 各个机理都有贡献, 总的沉积速度不超过 0.01 m/s 。进一步对比图 3 的安全壳内空气流动速度, 可以发现在安全壳存在局部压差的位置, 空气的流速远高于气溶胶自然去除(重力、扩散泳、热泳、布朗扩散)的速度, 与湍流沉积的速度大致在一个量级。因此, 在安全壳内载气剧烈运动的区域(特别是一回路破口处、内部换热器传热管附近), 主要依靠湍流扩散去除, 在安全壳内其它稳态区域, 没有湍流, 则气溶胶自然去除是重要的去除机理。

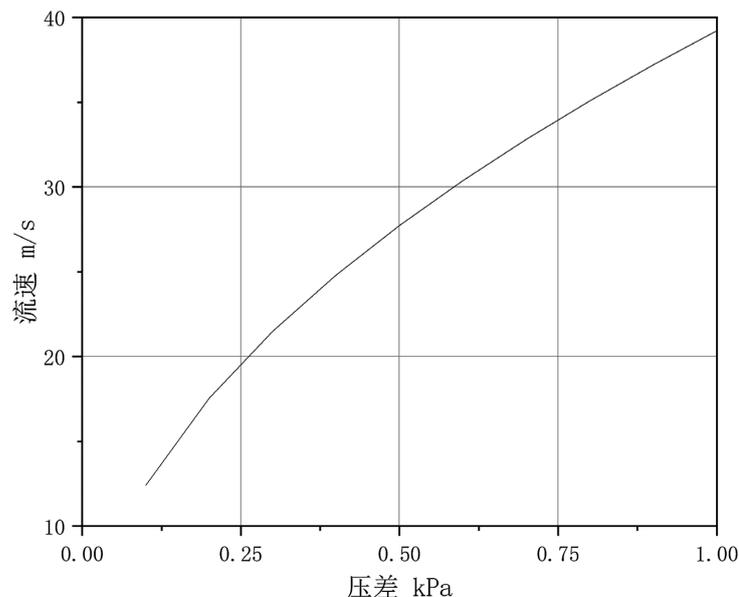


Figure 3. The flow rate of gas under local pressure difference of the containment
图 3. 安全壳局部压差下载气的流动速度

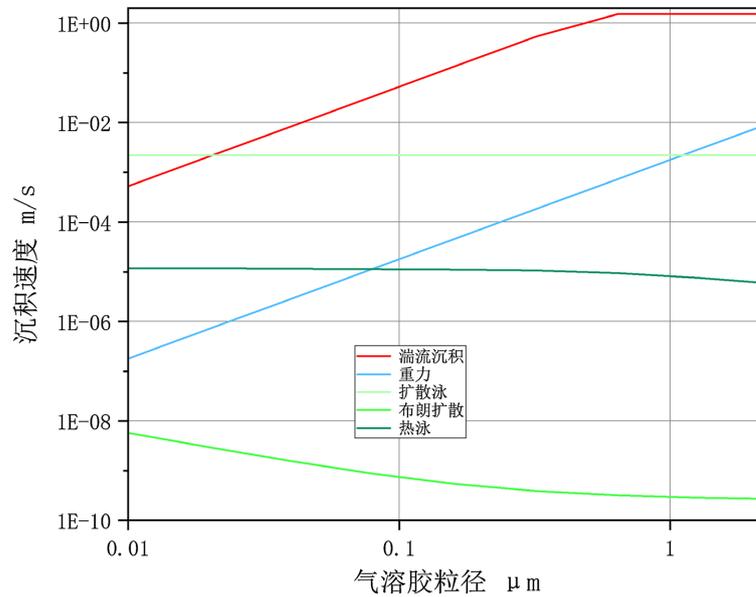


Figure 4. Deposition velocity of aerosol in containment under different mechanisms
 图 4. 安全壳内气溶胶在不同机制作用下的沉积速度

4.3. 非能动安全壳大空间气溶胶沉降因素的 PIRT 建立

根据上述研究步骤,考虑事故下安全壳内空气流动情况,将事故后安全壳内气溶胶沉降分为两个阶段,早期释放和长期释放阶段。通过不同阶段的沉降评价标准确定各现象的重要等级,得到气溶胶沉降因素的 PIRT 见表 3。表 3 将相对重要度现象、过程采用 H(高)、M(中)、L(低)和 N(无影响)进行分级。另外,也根据目前行业内对每种机理的掌握水平进行排序,以 K(已知),P(部分未知)和 U 来表示(未知) [9]。

Table 3. PIRT of aerosol deposition factors
 表 3. 气溶胶沉降因素的 PIRT

重要现象	早期释放	长期释放	知识水平分级
闪蒸冷却剂的射流	H	N	K
下部隔间结构的滞留	H	N	P
安全壳热的大气上升	H	L	P
安全壳冷的大气下降	L	L	K
安全壳热的大气的局部冷却	H	H	U
蒸气凝结造成喷雾的捕集	M	L	K
内部换热器传热管附近的大气抽吸	H	H	U
安全壳大气再加热	N	L	U
冷却剂的再挥发,气溶胶再悬浮	N	L	U

根据表 3,闪蒸冷却剂的射流、下部隔间结构的滞留、安全壳热的大气的局部冷却和内部换热器传热管附近的大气抽吸都是重要现象,这是由于这些现象都伴随着安全壳内大气剧烈流动,极大地影响了气溶胶行为。其中,安全壳热的大气的局部冷却和内部换热器传热管附近的大气抽吸是非能动安全壳内出现的新现象,目前对这两个新现象的机理认知还十分有限,模化实验应该特别体现这两种重要现象。安

全壳内气溶胶重要现象的相关机理和参数见表 4，开展模化实验时应该确保相关参数的模化，从而保证实验的准确性。

Table 4. Relevant mechanism of important phenomena

表 4. 重要现象的相关机理

重要现象	机理	参数
闪蒸冷却剂的射流	-惯性碰撞 -冷凝和重力沉降 -气泡中的气溶胶去除	-气溶胶粒径和密度 -气泡上升速度 -气泡直径 -射流的流速 -蒸气质量流量 -安全壳大气气体粘度和压力 -Cm (Cunningham)修正系数
下部隔间结构的滞留	-惯性碰撞 -湍流扩散	-斯托克斯数 -大气流动速度和方向 -气溶胶粒径和密度
安全壳热的大气上升 安全壳冷的大气下降	-重力沉降 -湍流扩散	-气溶胶粒径和密度 -大气流动速度和方向
安全壳热的大气的局部冷却	-扩散泳沉积	-气溶胶粒径和密度 -冷凝速率
蒸气凝结造成喷雾的捕集	-斯蒂芬流 -扩散迁移 -吸收沉降 -惯性碰撞 -布朗扩散	-冷凝速率 -蒸汽份额 -液滴表面积 -捕集空间体积 -液滴雷诺数 -佩克莱数和斯托克斯数
内部换热器传热管附近的大气抽吸	-斯蒂芬流 -吸收沉降 -惯性碰撞	-冷凝速率 -蒸汽份额 -总质量流
安全壳大气再加热 冷却剂的再挥发，气溶胶再悬浮	-气溶胶吸湿增长 -蒸汽再夹带	-堆芯衰变热

5. 结论

本研究分析了压水堆非能动安全壳内载气和气溶胶的行为，计算了不同机制下气溶胶粒子的沉降速率。在非能动安全壳内，气溶胶在载气剧烈流动区域的主要机制是湍流沉积，其它区域的主要机制是气溶胶的自然沉积(其中扩散泳占主导)。根据气溶胶行为，结合事故后的安全壳内大气的迁移行为，建立了安全壳内气溶胶沉降因素的 PIRT 表，识别出安全壳内不同区域和时间段内气溶胶沉积和迁移过程中所涉及的现象，并按照这些现象的内在机理对沉降速率的影响进行重要性评估和等级划分，得到了非能动安全壳内气溶胶模化实验和理论模拟需要重点关注安全壳热大气的局部冷却和内部换热器传热管附近的大气抽吸。

参考文献

- [1] 付亚茹, 耿璐, 孙大威, 等. AP1000 核电厂安全壳内气溶胶自然去除分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 700-705.
- [2] 刘建昌, 陈忆晨, 余剑, 等. 华龙一号失水事故后安全壳内气溶胶自然沉降现象研究[J]. 核安全, 2022(1): 21.

- [3] 梁潇, 肖术芳, 陶俊, 等. 非能动安全壳冷却系统 DBC 工况下流动传热特性研究[J]. 核科学与工程, 2024, 44(2): 385-394.
- [4] 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.
- [5] 葛魁, 王辉, 王明军, 等. 华龙一号非能动安全壳热量导出系统热工水力特性研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(5): 769-777.
- [6] Powers, D.A., Washington, K.E., Sprung, J.L., *et al.* (1996) A Simplified Model of Aerosol Removal by Natural Processes in Reactor Containments. Nuclear Regulatory Commission.
- [7] 袁伟, 左莉, 陈显波, 等. 地下军事建筑核事故气溶胶扩散研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8455-8459.
- [8] Li, J., Zhang, B., Gao, P., Miao, F. and Shan, J. (2023) Improvement and Validation of Aerosol Models for Natural Deposition Mechanism in Reactor Containment. *Nuclear Engineering and Technology*, **55**, 2628-2641. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.04.014>
- [9] Shaw, R.A., Larson, T.K. and Dimenna, R.K. (1988) Development of a Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) for Thermal-Hydraulic Phenomena during a PWR LBLOCA. EG&G Idaho, Inc., NUREG/CR-5074 (August).