



核科学与工程

抑压水池温度分层影响因素*

郭容达, 张丹迪, 曹学武

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 201100)

摘要: 对于小型模块式反应堆, 可采用安全壳抑压装置限制失水事故引起的安全壳快速升温升压。然而随着排放质量流率及水池水温的变化, 水池中可能出现温度分层现象, 进而降低传热传质效果。建立了抑压排放水池温度分层实验装置, 开展了蒸汽质量流率、鼓风机淹没深度及气水容积比对水池温度分层特性影响的实验研究。结果表明: 在较宽的蒸汽质量流率范围内, 水池内均发生了温度分层现象, 随着质量流率增大, 对分层的影响程度减弱, 冷热交界面下移, 带动更多水体参与热量交换; 鼓风机淹没深度增加导致热交界面位置下移, 水体搅动作用增强, 从而提高水体冷却利用率; 气水容积比增大, 冷热交界面下移, 受扰动区域增大。

关键词: 抑压水池; 质量流率; 冷热交界面; 温度分层

中图分类号: TL334

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220084

Experimental research on influencing factors of temperature stratification in suppression pool

Guo Rongda, Zhang Dandi, Cao Xuewu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201100, China)

Abstract: For small modular reactors, containment suppression devices can be used to limit the rapid increment of temperature and pressure in the containment caused by loss of coolant accidents (LOCAs). However, temperature stratification may occur in the suppression pool with the change of the mass flow flux and water temperature during the process of discharge, which reduces the heat and mass transfer. In this paper, an experimental facility for temperature stratification of suppression pool is established. The effects of steam mass flow flux, submerged depth of sparger and gas-water volume ratio on the temperature stratification characteristics in the pool are studied. Results show that there is temperature stratification in the pool at a wide range of steam mass flow flux. With the increase of mass flow flux, the influence on stratification is weakened, and the thermal interface moves down, leading to more water participating in heat exchange. With the increase of the submerged depth of sparger, the position of thermal interface moves down and the stirring effect of water is enhanced. As the gas-water volume ratio increases, the thermal interface moves down and the disturbed area enlarges.

Key words: suppression pool, mass flow flux, thermal interface, temperature stratification

在发生失水事故后, 大型先进压水堆采用非能动冷却措施降低安全壳温度和压力, 并关注氢气蒸汽混合气体在安全壳内的流动分布情况^[1-2]。而对于小型模块式反应堆, 由于安全壳自由容积小, 破口泄漏的高温高压冷却剂进入安全壳后发生相变, 使安全壳温度和压力快速升高甚至达到设计限值; 通过增设抑压水池装置, 能够在压差驱动作用下将安全壳内高温蒸汽排入抑压水池, 从而限制安全壳压力峰值并导出热量^[3]。进入水池的蒸汽通过直接接触冷凝将热量传递至过冷水体使局部水池温度不断升高, 池内冷热流体搅混不均匀, 导致出现温度分层现象, 而温度分层会明显降低参与冷凝过程的有效水体积和水池对高温蒸汽的冷却能力, 进而影响抑压水池装置的冷却能力, 因此研究温度分层现象对小型模块式反应堆抑压装置冷却能力的评估具有重要意义。

Gamble 等^[4]通过实验研究了蒸汽射流流速及喷口位置对抑压水池温度分布的影响, 用于开发预测射流对温度

* 收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-04-20
基金项目: 中核集团领创科研项目资助
联系方式: 郭容达, grd642293395@sjtu.edu.cn。
通信作者: 曹学武, caoxuewu@sjtu.edu.cn。

分层影响的分析模型。Jo 等^[5-7]开展开口容器内常压时蒸汽向下喷射最大质量流率为 $5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的实验研究,探究蒸汽质量流率、鼓泡器结构等对温度分层现象的作用规律,并考虑采用理查森数评估水池温度分层现象。Norman 等^[8]开展了向开口容器水平喷射 $2 \sim 6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 质量流率蒸汽的实验,用于研究水池从热分层到热混合过程的转变边界,结果表明蒸汽流率、水温和空气份额是水池温度分布的重要影响因素。Li 等^[9]开发了 $5 \sim 80 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 流率下水池温度分布现象模式图,将其划分为热混合、热分层和再混合区域。以上实验均是在开口常压下进行的。Solom 等^[10]对沸水堆抑压水池在反应堆堆芯隔离冷却系统排放蒸汽时温度分层现象进行了研究,选取蒸汽质量流率在 $34 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,闭口容器内初压 $101 \sim 198 \text{ kPa}$,鼓泡器孔垂直向下布置,发现气空间预加压会影响水池流动使温度分层加剧。Walsche 等^[11]基于 LINX 实验装置研究闭口容器内初压 101 kPa 和 250 kPa 、蒸汽质量流率 $16 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、喷口朝下时的水池温度分层现象,实验发现当水池温度较高时蒸汽会因冷却不足而发生旁排现象,直接上升进入抑压水池气空间。但是,现有闭口条件下实验研究只针对了低质量流率下的水池分层现象,未研究鼓泡器淹没深度和气水容积比等影响因素,现有实验结果不能反映小型模块式反应堆的典型参数范围。本文针对小型模块式反应堆事故后抑压和冷却需求,建立了抑压排放水池温度分层实验装置,在闭口条件下开展了宽范围蒸汽质量流率、鼓泡器淹没深度和气水容积比等参数对水池温度分层现象的影响研究,获得了水池高度方向温度分布特性及作用规律。

1 实验装置

实验装置由蒸汽供应系统、补水排水系统、温度控制与电加热系统、抑压水池容器等构成,如图 1 所示。蒸汽供应系统可以提供排放蒸汽,蒸汽压力、温度、流量等参数根据实验要求进行调节;补水排水系统实现抑压水池容器内水位的调节;温度控制与电加热系统用于对蒸汽管道进行加热保温,避免蒸汽在管道中的冷凝。

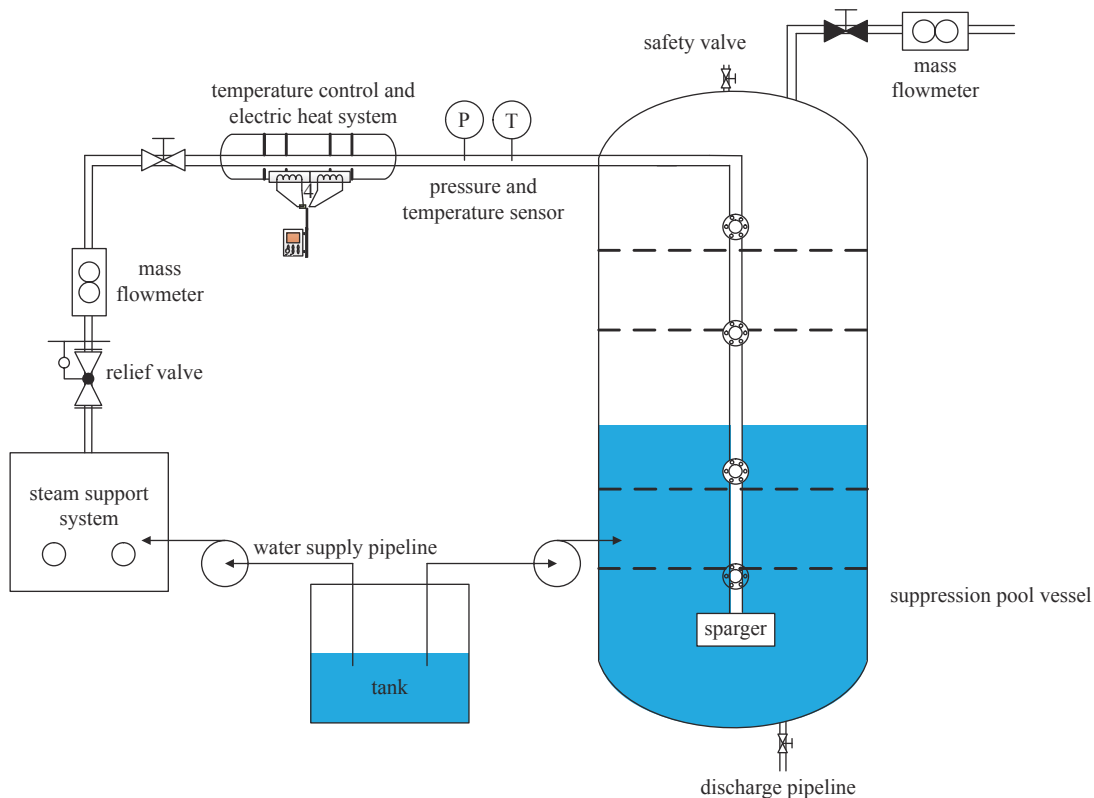


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility

图 1 实验装置示意图

抑压水池容器结构形式为圆柱筒体带椭圆形封头,总高 5000 mm ,内径 1000 mm 。鼓泡器形式“T”型,水平排布 6 孔,沿管道两侧对称分布,孔径 5 mm ,通过更换不同长度竖直排气管道实现鼓泡器淹没深度的改变。随着高温高压蒸汽的喷放,抑压水池内流体存在整体流动和温度分层现象,在抑压水池容器不同高度下布置了热电阻用于测量实验过程中水体温度,分别距离容器底部为 50 mm 、 130 mm 、 340 mm 、 600 mm 、 700 mm 、 1000 mm 、 1500 mm 。热电阻为 A 级精度,质量流量计精度为 $\pm 1\%$ 满量程,磁翻板液位计精度 $\pm 1 \text{ cm}$ 。

2 实验结果与分析

2.1 蒸汽质量流率对温度分层的影响

开展了蒸汽质量流率在 $60\sim 135\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围下对水池温度分层现象的影响研究,水池初始温度约为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,水池液位为 2.56 m ,鼓泡器淹没深度为 1.5 m 。图 2 给出了不同蒸汽质量流率下水池温度瞬态图,可以发现,随着蒸汽不断喷放进入水池,上部水体温度升高,与下部形成较大温差,冷热水体出现冷热交界面,所有工况均出现了水体温度随高度改变而形成差异的温度分层现象,这是由于出口蒸汽在竖直向上的浮升力和水平圆周方向的惯性力共同作用下驱动热水流向上运动,导致池水上部温度持续增大,靠近水池底部仍为冷水区域,因此水池不同高度上温度出现差异,上部水体与下部形成出现冷热交界面^[12]。图 3 给出了水体冷热交界面形成机理示意图。

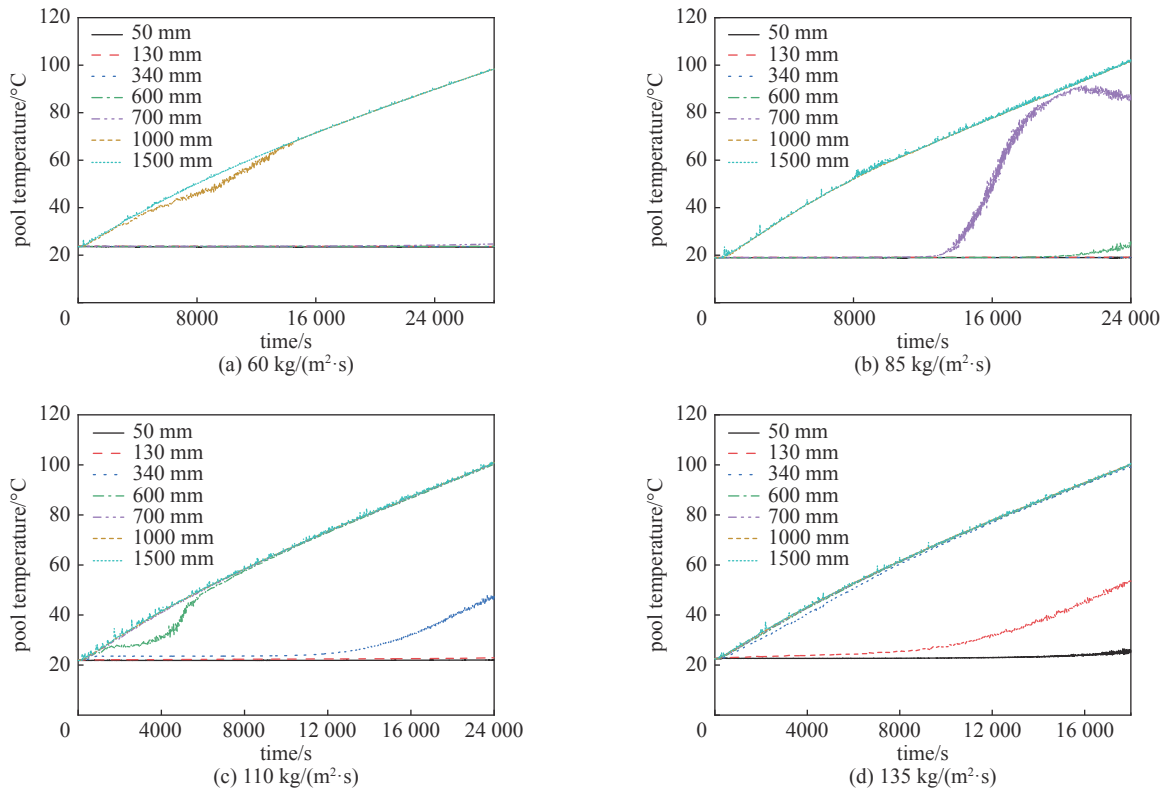


Fig. 2 Temperature transient diagram of pool at different steam mass flux

图 2 不同蒸汽质量流率下水池温度瞬态图

从图 2(a)-图 2(d)的实验结果中发现,冷热交界面分别位于距离容器底部 1000 mm 、 700 mm 、 600 mm 和 130 mm ,并且随着蒸汽质量流率增大,冷热交界面位置下移,温度分层现象减弱,这是因为质量流率的增加会使气体所受动量力增大,在对上方水体进行加热的时候能够带动更多下部水体参与热交换过程^[13]。

2.2 鼓泡器淹没深度对温度分层的影响

开展了鼓泡器淹没深度在 1.5 m 和 2.2 m 时对水池温度分层现象的影响研究,水池初始温度约为 $24\text{ }^\circ\text{C}$,水池液位为 2.56 m ,蒸汽质量流率分别为 $110\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $135\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。图 4 给出了淹没深度为 2.2 m 时的水池温度瞬态图,水池温度均出现先分层再均匀的现象, $135\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 相比 $110\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 实验条件下温度分层现象出现更早,消失也更早。图 4(a)-(b)与图 2(c)-(d)相比,当淹没深度由 1.5 m 增大至 2.2 m 时,更多的水体参与到了对蒸汽的冷凝过程,温度分层持续时间和上下水体间温差均明显降低。

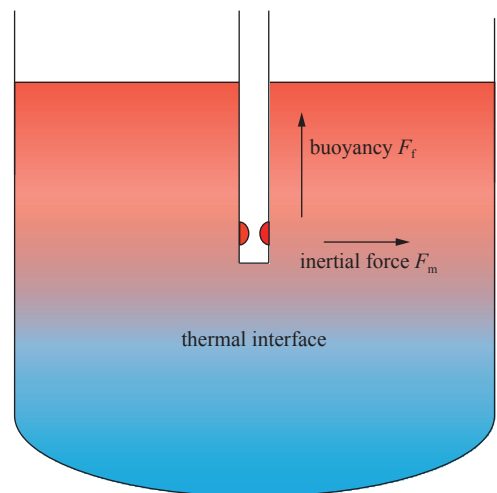


Fig. 3 Schematic diagram of formation mechanism of thermal interface

图 3 冷热交界面机理形成示意图

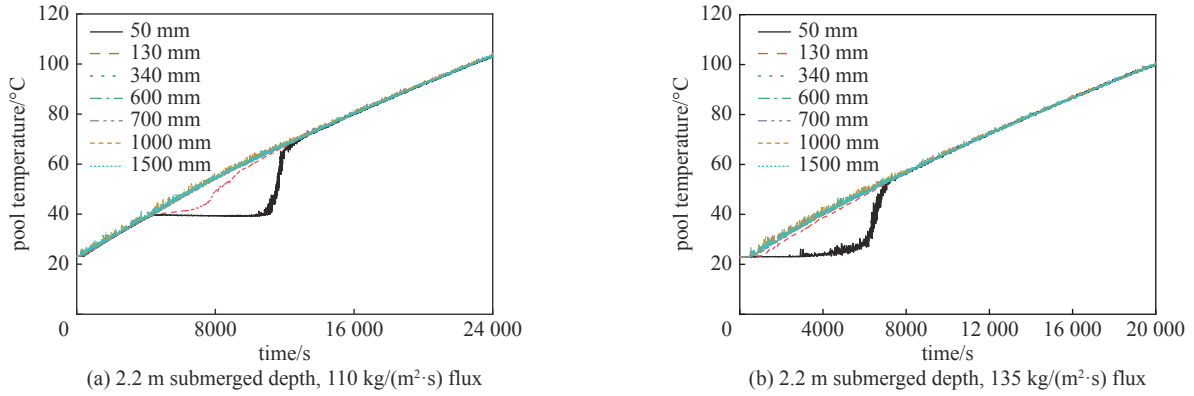


Fig. 4 Temperature transient diagram of pool at submerged depth of 2.2 m

图 4 淹没深度 2.2 m 时水池温度瞬态图

图 5(a) 和 (b) 给出相同质量流率下鼓泡器淹没深度对抑压水池高度方向上温度分布随时间变化的影响, 随着淹没深度增大, 即鼓泡器位置下移, 水池上部与下部水体温度差异显著降低, 且冷热界面不断下移, 抑压水池底部水体处搅动也得到增强, 在 10000 s 后底部温度与水池主体温度变化一致。因此认为淹没深度增大能够带动更多水体参与到蒸汽冷凝的热量交换, 使得水体温度分布趋于均匀, 导致温度分层现象明显削弱, 提高了水体的冷却利用率。

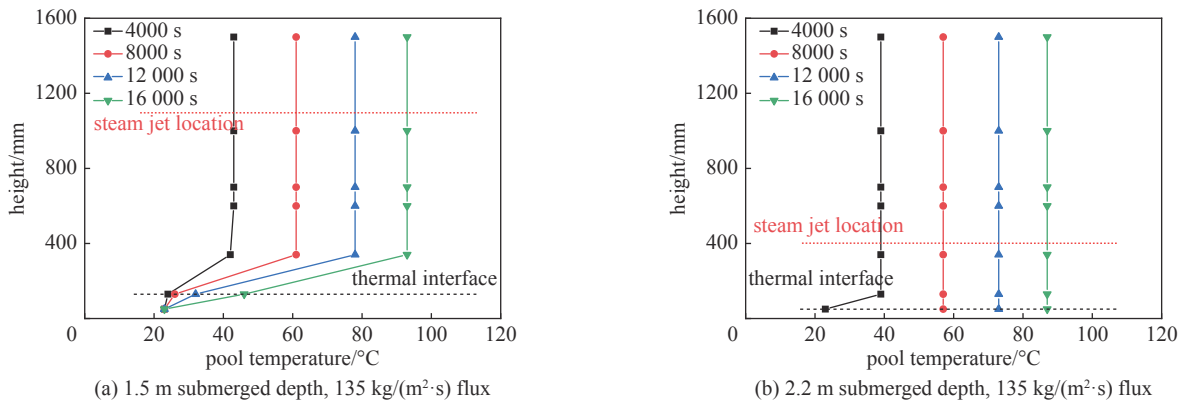


Fig. 5 Temperature distribution in pool height direction at different submerged depths

图 5 不同淹没深度下水池高度方向温度分布

2.3 气水容积比对温度分层的影响

气水容积比为 0.56 时水池温度分层曲线如图 6 所示, 这一工况可与图 2(a) 气水容积比为 0.5 的工况进行比较。当气水比为 0.56 时, 喷放初期距离容器底部 700 mm 位置处及以下出现了温度分层现象, 随着喷放的进行下部水体温度逐渐升高; 在 9000 s 时, 冷热界面处温度增长见缓, 不再随容器上方水温快速升高。

图 7(a)(b) 给出不同气水比对抑压水池高度方向温度分布的影响, 气水容积比为 0.5 时冷热界面位于距离容器底部 1000 mm, 气水容积比为 0.56 时冷热界面位于距离容器底部 700 mm。这是因为出口蒸汽气流冷凝释放的热量先传递至上部水体, 气水容积比增大, 鼓泡器上部水体积量减少, 下部水体受蒸汽冷凝带动的扰动区域增大。

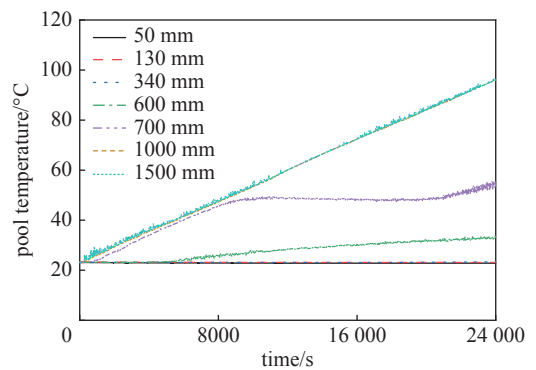


Fig. 6 Temperature transient diagram of pool while gas-water volume ratio equals 0.56

图 6 气水容积比 0.56 时水池温度瞬态图

3 结 论

本文对闭口条件抑压排放水池温度分层实验装置中温度分层现象进行实验研究, 研究蒸汽质量流率、鼓泡器

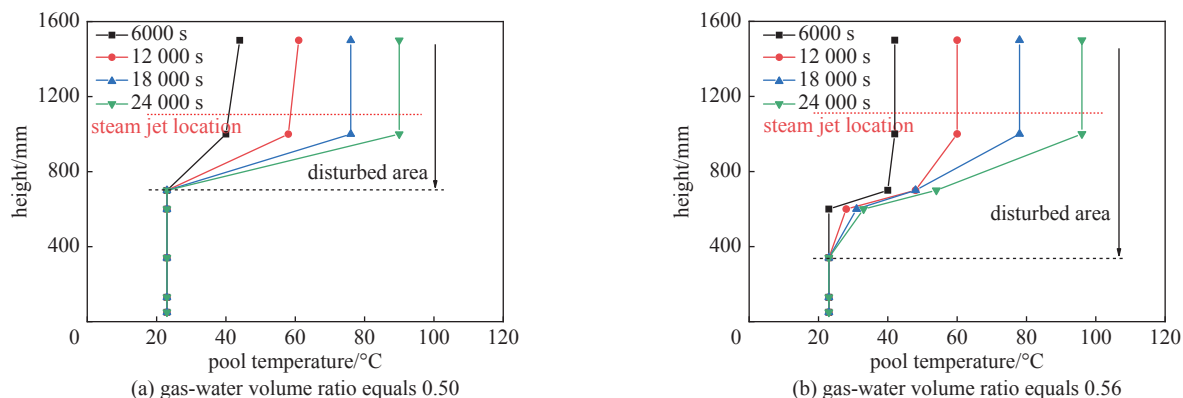


Fig. 7 Temperature distribution in pool height direction at different gas-water volume ratio

图 7 不同气水容积比下水池高度方向温度分布

淹没深度和水池气水容积比等关键参数对池内水温度分层的影响规律, 主要结论如下: 闭口条件下蒸汽质量流率在 $60\sim 135\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内, 池内水均会出现温度分层现象, 鼓泡器出口蒸汽气流受到向上浮升作用导致上方水体温度升高, 与下方冷水区域间形成冷热交界面, 随蒸汽质量流率增大, 冷热交界面接近水池底部, 温度分层程度趋于减弱; 水池冷热交界面位置随鼓泡器淹没深度增加而下移, 温度分层现象随之减弱, 水体冷却利用率提升; 抑压水池气水容积比增大导致水体总量减少, 冷热交界面下移, 受扰动区域增大。

参考文献:

- [1] 刘友宏, 孙明月. 出口高度对非能动安全壳冷却系统影响[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 126002. (Liu Youhong, Sun Mingyue. Effects of outlet height on passive containment cooling system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 126002)
- [2] 戚雄飞, 侯丽强, 杜政瑀, 等. 单隔间内氢气流动分布特性数值模拟与实验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 056002. (Qi Xiongfei, Hou Liqiang, Du Zhengyu, et al. Numerical simulation and experimental verification on distribution characteristics of hydrogen flow in single compartment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 056002)
- [3] 蒋孝蔚, 邓坚, 余红星, 等. 小型压水堆安全壳抑压传热研究[J]. *核动力工程*, 2018, 39(s1): 66-69. (Jiang Xiaowei, Deng Jian, Yu Hongxing, et al. Research on containment pressure suppression and heat transfer of small PWR[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(s1): 66-69)
- [4] Gamble R E, Nguyen T T, Shiralkar B S, et al. Pressure suppression pool mixing in passive advanced BWR plants[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 204(1/3): 321-336.
- [5] Jo B, Erkan N, Okamoto K. Richardson number criteria for direct-contact-condensation-induced thermal stratification using visualization[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 118: 103095.
- [6] Cai Jiejun, Jo B, Erkan N, et al. Effect of non-condensable gas on thermal stratification and flow patterns in suppression pool[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 300: 117-126.
- [7] Song D, Erkan N, Jo B, et al. Dimensional analysis of thermal stratification in a suppression pool[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 66: 92-100.
- [8] Norman T L, Revankar S T. Jet-plume condensation of steam-air mixtures in subcooled water, Part 1: Experiments[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(3): 524-532.
- [9] Li Weichao, Wang Jianjun, Sun Zhongning, et al. Experimental investigation on thermal stratification induced by steam direct contact condensation with non-condensable gas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154: 628-636.
- [10] Solom M, Vierow Kirkland K. Experimental investigation of BWR Suppression Pool stratification during RCIC system operation[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 310: 564-569.
- [11] De Walsche C, de Cachard F. Experimental investigation of condensation and mixing during venting of a steam/non-condensable gas mixture into a pressure suppression pool[C]//*Thermal Hydraulics: Presented at 8th International Conference on Nuclear Engineering*. 2000.
- [12] Jo B, Erkan N, Takahashi S, et al. Thermal stratification in a scaled-down suppression pool of the Fukushima Daiichi nuclear power plants[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 305: 39-50.
- [13] Gallego-Marcos I, Kudinov P, Villanueva W, et al. Pool stratification and mixing induced by steam injection through spargers: analysis of the PPOOLEX and PANDA experiments[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 337: 300-316.