

文章编号: 0258-0926(2021)03-0155-05; doi: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0155

安全壳大空间内氢气分层行为的模型研究

彭程¹, 邓坚²

1. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海, 200090;

2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 基于蒸汽/氢气混合喷放下安全壳大空间内氢气分层行为的主导机制——惯性力、粘性力及浮升力间的相互作用, 通过理论建模与实验拟合的方法, 得到了预测氢气分布特性的半经验关系式, 通过与环境中喷入中等蒸汽浓度及高蒸汽浓度实验数据的比较, 验证了该模型的合理性, 可为后期耦合安全壳内蒸汽冷凝行为影响下的氢气分布理论模型的开发提供辅助支撑; 同时, 通过将其应用于 CAP1400 缩比安全壳模型中典型氢气行为的研究发现, 在容器轴向位置可能形成轻质气体聚集区、浓度梯度区及滞止区, 该结果与国际基准实验 (ISP47) 的相关发现一致。

关键词: 氢气分布; 氢气分层; 安全壳; 模型

中图分类号: TL364⁺.4 **文献标志码:** A

Model Study on Hydrogen Stratification Behavior within a Containment

Peng Cheng¹, Deng Jian²

1. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, 200090, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In this paper, with theoretical modeling and experimental correlation, a semi-empirical model which can predict the hydrogen distribution characteristics has been proposed, based on the dominant factors of interaction among the inertial force, viscous force and buoyancy under the injection of both steam and hydrogen. The rationality of the model is verified by comparing with the experimental data under the injection of medium and high content of steam. All the theoretical work can provide extra support to further develop the hydrogen distribution model coupled with condensation effect within the containment in the future. Moreover, its application in the study of the typical hydrogen behavior on small-scaled containment model of CAP1400 demonstrates that there may be reservoir of light gas, gradient layers and stagnation region along the vertical direction, which is in line with the findings by international benchmark tests (ISP47).

Key words: Hydrogen distribution, Hydrogen stratification, Containment, Model

0 引言

核电厂的氢气安全问题在福岛事故后受到了全世界核电行业的广泛重视, 其中在安全壳空间内可能产生的氢气分层现象, 是业内已知导致氢气爆炸并威胁安全壳完整性的重要原因之一。氢气分层行为依氢气源项特性、严重事故进程或事故缓解措施的不同, 可能表现出不同的分布特性。

目前, 国内外已开展了大量不同尺寸密闭空间内将氢气作为氢气替代工质独立喷放的实验研究^[1-3], 并基于实验现象开发了相关理论模型, 如 WU 等^[4]开发了氢气分层与混合模型, 并嵌入了 BMIX++ 程序; 彭程^[5]考虑了空气阻力与夹带效应的耦合作用, 开发了氢气上升流动模型; 佟立丽等^[6]基于喷放弗洛德数 (Fr), 开发了一维氢气分布模

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-09-08

作者简介: 彭程 (1990—), 男, 讲师, 博士研究生, 现主要从事核安全分析以及严重事故机理等研究工作, E-mail: diomio@shiep.edu.cn

型,并将其应用于具有典型严重事故氢气源项特征的氢气分层行为分析中。

然而,针对核电厂严重事故进程中持续时间更久、影响更大的蒸汽/氢气混合喷放后的氢气分层现象,目前多基于计算流体动力学(CFD)或集总参数分析工具开展研究,很难直观反映主导的物理机制与氢气分布,甚至氢气分层行为间的关系;同时难以对后续耦合蒸汽冷凝行为影响下的氢气分布理论模型的开发与分析进行辅助支撑。本研究将基于早期针对密闭空间氢气分层行为控制方程的模化结果^[7],开发适用于事故早期及中期的蒸汽/氢气混合喷放后的氢气分布模型。

1 氢气分布模型建立

1.1 主导机制的确定

文献[7]针对密闭空间内气体的分层流动现象建立了控制方程,基于 Boussinesq 近似后,动量方程可以描述如下:

$$\rho_a \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \rho g \mathbf{e}_z \quad (1)$$

式中, ρ_a 为环境气体的密度; \mathbf{u} 为质量平均后的速度矢量; t 为密闭空间内气体流动的时间; ∇ 为 Hamilton 算子,表征物理量的梯度; P 为密闭空间内的压力; μ 为混合气体的动力粘度; ∇^2 为拉普拉斯算子,表征物理量梯度的散度; \mathbf{e}_z 为垂直方向的单位矢量; g 为重力加速度; ρ 为密闭空间内混合气体的平均密度。对动量方程进行无量纲化处理,方程中对应的无量纲物理量依次表示如下:

$$\mathbf{u}_{ms}^* = \frac{\mathbf{u}}{U_0} \quad (2)$$

$$P_{ms}^* = \frac{P + \rho_a g z}{(\rho_a - \rho_0) g H_{ms}} \quad (3)$$

$$t_{ms}^* = \frac{t U_0}{H_{ms}} \quad (4)$$

$$\nabla_{ms}^* = H_{ms} \nabla \quad (5)$$

$$\rho_{ms}^* = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_a - \rho_0} \quad (6)$$

式中,*号标识的物理量分别为对应速度矢量、压力、时间、Hamilton 算子及密度的无量纲量;下标 ms 表示分层介质区域; U_0 为气体喷入口处的速度; z 为容器内的轴向标高; ρ_0 为喷入气体的

密度; H_{ms} 为喷口距离容器穹顶间的高度。则动量方程可以表示为无量纲形式,即:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_{ms}^*}{\partial t_{ms}^*} + \nabla_{ms}^* \cdot (\mathbf{u}_{ms}^* \mathbf{u}_{ms}^*) = -Ri_{H_{ms}} \nabla_{ms}^* P_{ms}^* + \frac{1}{Re_{H_{ms}}} \frac{\mu}{\mu_a} \nabla_{ms}^*{}^2 \mathbf{u}_{ms}^* + Ri_{H_{ms}} \rho_{ms}^* \mathbf{e}_z \quad (7)$$

式中, Re 为雷诺数,描述初始射流在浓度分层间穿入时惯性力与粘性力的比值; Ri 为理查德森数,描述初始射流惯性力与浮升力的比值,亦为 Fr 的倒数; μ_a 为环境气体的动力粘度。

由控制方程(7)可见,安全壳空间内的轻质气体分层流动行为的主导机制为惯性力、粘性力及浮升力间的相互作用,可用 Re 及 Fr 来表征。通常,由于氢气独立喷放工况中 Re 相对较小,流体流动产生的扰动效果可以忽略,理论模型中仅考虑 Fr 的作用即可获得较满意的预测结果^[6]。但当喷放气体中含有蒸汽时,由于蒸汽粘度较氢气低至少 1 个数量级,且喷放流速增大,较好的流动性使氢气分层行为较前者可能存在较大不同,蒸汽/氢气混合喷放下的氢气分布模型应考虑 Re 与 Fr 的共同作用。

1.2 本构方程的描述

基于 Worster^[8]等建立的密闭空间内轻质气体的浮力方程,氢气分布特性可以描述如下:

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial t} = \frac{\pi B^2 u}{A} \frac{\partial \Delta_0}{\partial z} \quad (8)$$

式中, Δ_0 为无量纲浮力; B 为描述氢气流径向扩张的特征尺寸; u 为氢气流径向扩张尺寸 B 范围内的气体流动速度; A 为密闭空间的横截面积。

经过无量纲化处理,该式可以描述如下:

$$\eta = f(\varepsilon, \tau) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{z}{H_{ms}} \quad (10)$$

$$\tau = 4\pi^{2/3} \alpha^{4/3} H_{ms}^{2/3} A^{-1} F_0^{1/3} t \cdot \Gamma(Re, \chi_{H_2O}) \quad (11)$$

式中, η 为无量纲浮力通量; f 为无量纲浮力通量函数,需要借助第 2 节实验数据的拟合确定,该方法在佟立丽等^[6]的研究工作中也有涉及,其通过此方法获得的经验关系式针对羽流及浮力射流工况的验证最大相对误差分别为 15%和 35%,由此可见,采用拟合方法可以获得相对准确且实用的本构方程; ε 为无量纲标高; τ 为无量纲时间尺度,考虑 Re 及蒸汽/氢气混合喷放的修正,可表

示为式(11)； α 为气体夹带系数； F_0 为喷入气体的初始浮力通量，该值仅与入射介质、环境介质及入射流量相关； $\Gamma(Re, \chi_{H_2O})$ 为本研究中需确定的反映蒸汽/氢气混合喷放特性的函数； χ_{H_2O} 为喷放蒸汽的质量分数。

2 蒸汽/氢气混合喷放特性的经验关系式

下面将基于国际基准实验 THAI-HM2 的实验结果给出反映蒸汽/氢气混合喷放特性的具体数学表达式，以便于实际应用。

THAI项目旨在关注安全壳空间内涉及氢气、气溶胶迁移现象的复杂热工水力行为，开展了包括氢气迁移(ISP-47)、自然循环(ISP-49)及氢气分层(THAI-HM2)等众多国际基准测试，为CFD及集总参数程序的开发与验证提供了可靠的数据支持^[9]。其主体装置高度为9.2 m，直径为3.2 m，体积为60 m³。THAI-HM2实验旨在验证氢气替代氦气开展轻质气体流动特性实验的可靠性，在其实验的第1阶段，氢气与饱和蒸汽通过28.5 mm的喷口注入实验容器，容器内初始状态为常压，相关实验参数见表1。

表1 THAI-HM2实验的主要参数

Tab. 1 Main Parameters of THAI-HM2 Test

注入时间/s	注入组分	注入标高/m	质量流量/(g·s ⁻¹)
0-4200	H ₂ O + H ₂	+4.8	0.3(H ₂)+0.24(H ₂ O)

实验中标高为+5.98、+6.3、+7.2、+8.7 m处分别布置有氢气浓度测点，以显示氢气浓度随时间的变化。在本节中采用前3组标高位置处的氢气浓度数据作为被拟合数据，通过对比拟合表达式的预测结果，确定如下最优的经验关系式：

$$\tau = 4\pi^{2/3} \alpha^{4/3} H_{ms}^{2/3} A^{-1} F_0^{1/3} t (0.1 \chi_{H_2O}^2 Re^{-\chi_{He}^2}) \quad (12)$$

$$\eta = 29.08 - 95.58\varepsilon - 5.47\tau + 68.68\varepsilon^2 + 0.045\tau^2 \quad (13)$$

式中， χ_{He} 为轻质气体的质量分数。由图1可知，采用式(12)与式(13)的表达形式与实验数据点的吻合情况较好，趋势一致。

3 氢气分布模型验证

3.1 环境中喷入中等蒸汽浓度的实验验证

采用标高为+8.7 m处的氢气浓度分布数据对

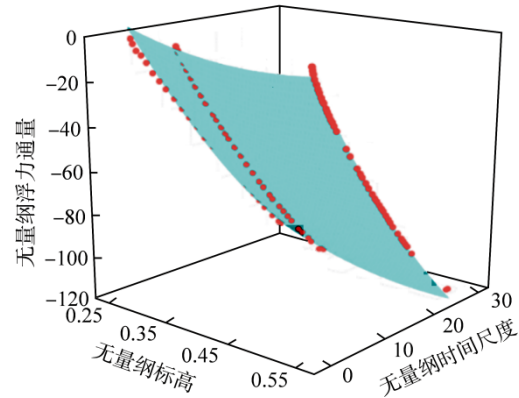


图1 基于 THAI-HM2 实验数据的拟合结果

Fig. 1 Fitting Results Based on Experimental Data from THAI-HM2

式(13)进行验证，其中无量纲浮力通量与氢气体积浓度的转化可由式(14)确定，即：

$$\beta = \frac{\rho_a \eta}{\rho_0 - \rho_a} \frac{1}{4\pi^{2/3} \alpha^{4/3} H_{ms}^{5/3} F_0^{-2/3} g} \quad (14)$$

式中， β 为氢气体积浓度。

验证结果如图2所示。可见，考虑了蒸汽/氢气混合喷放特性的氢气分布模型的预测结果与实验结果的吻合度较好，最大相对误差值出现在混合气体喷入的早期，但仍不超过25%，且随着蒸汽/氢气的持续喷放，此位置处氢气体积分数的相对误差逐渐下降至1%。

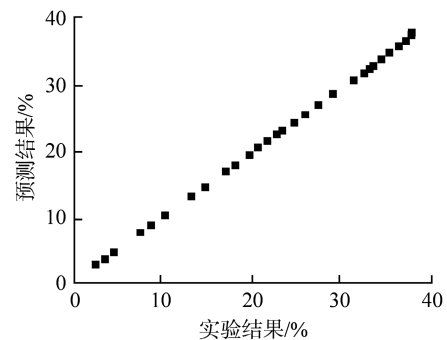


图2 氢气体积分数预测结果与实验结果的比对(中等蒸汽浓度)

Fig. 2 Comparison between Simulation Data and Experimental Data of Volume Fraction of Hydrogen (Medium Steam Content)

3.2 环境中喷入高蒸汽浓度的实验验证

文献[10]针对小尺度空间内的蒸汽/氢气混合喷放行为开展过实验研究(实验中采用氦气模拟氢气)，相关研究工况中喷放蒸汽的质量分数可高达91%，远高于THAI-HM2中喷放蒸

汽的质量分数(44.4%),主要初始条件见表2。

采用蒸汽/氢气混合喷放特性经验关系式模拟工况 P-02-O 测点的结果如图3所示。通过比较发现,对于环境中喷入高浓度(91%)蒸汽的工况,其模型预测的相对误差较中等蒸汽浓度的工况略有增加,但可以控制在 $\pm 35\%$ 以内,与氢气(或氦气)独立喷放理论模型的预测误差^[6]相一致,可以满足氢气流动分层现象的分析与未来工程应用的需求。

表2 小尺度空间内的蒸汽/氢气混合喷放实验工况
Tab.2 Experimental Condition for Injection of both Steam and Hydrogen within a Small-Scaled Enclosure

注入时间/s	注入组分	注入标高/m	质量流量/(g·s ⁻¹)	喷口尺寸/mm
0~1200	H ₂ O + He	+1.0	0.3(He)+3(H ₂ O)	50

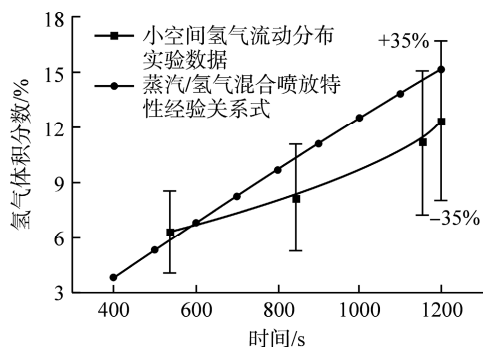


图3 氢气体积分数预测结果与实验结果的比对(高蒸汽浓度)

Fig.3 Comparison between Simulation Data and Experimental Data of Volume Fraction of Hydrogen (High Steam Content)

4 安全壳大空间内典型的氢气分层现象

以我国自主化非能动压水堆 CAP1400 安全壳尺寸为基准,按 10:1 缩比得到的安全壳模型^[5-7]作为本节的研究对象,忽略内部隔间的交互影响及空间、壁面冷凝影响,以氦气作为氢气的替代物,关注蒸汽/氢气混合喷放下安全壳大空间内普适轻质气体分布特征。该安全壳模型的内径为 4.3 m,高度为 7.5 m,体积约为 98 m³。以下封头最低点为标高 0 m,喷放口布置于标高+1.56 m。

通过保证设计工况的 Fr 符合实际电厂假想大破口失水事故(LB-LOCA)及小破口失水事故(SB-LOCA)始发下 Fr 的数量级^[5],以使得理论计算获得的安全壳模型中的氦气分布现象具有可参考性和代表性;同时该数量级也被国内外已开展的氢气流动分布实验与分析工作所认可^[11-13],确定的 Fr 数量级范围主要为 $10^0 \sim 10^2$,本节模拟工况的主要参数见表3。

对于喷放结束时安全壳大空间内的氦气浓度分布的模拟结果如图4所示。可见,在 Fr 为 332 且 Re 为 6692 的工况中,氦气在安全壳大空间内形成了自上而下浓度依次递减的分布特征,且依照浓度分布的均匀性,可分为位于上部区域的氦气积聚区、中部区域的浓度梯度区及喷口下方区域的氦气滞止区,全空间内轻质气体分布的特点类似于 Studer 等^[14]在 PANDA 实验中总结出的规律。为方便比较不同轴向位置处氦气浓度变化的大小,以氦气积聚区的浓度作为参考值,对全空间氦气浓度进行了归一化处理。氦气积聚区内,氦气的浓度几乎不发生变化;浓度梯度区内,归一化氦气浓度由喷口标高处的 0,经过容器近一半高度达到与氦气积聚区内相似的浓度;氦气滞止区处于喷口以下位置,由于混合喷放的气体在自身浮力和动量作用下向上方迁移,并逐渐扩张,仅当氦气流接触容器穹顶并填充后,才逐渐使容器中、下部浓度增加。因此,在整个喷射期间,喷口下方区域的气体仍主要为空气^[3]。

5 结论

(1)本研究从蒸汽/氢气混合喷放的主导机制出发,建立了基于 Fr 与 Re 共同影响的描述安全壳大空间内氦气分布特性的理论模型并经过了环境中喷入中等浓度(国际基准实验 THAI HM-2)、高浓度(上海交通大学小尺度空间氢气流动分布实验)蒸汽的实验验证,保证了其可靠性。

(2)将该机理模型应用于 CAP1400 缩比安全壳模型中典型氦气行为的研究发现,在蒸汽/氦气

表3 Fr 为 332 的工况的初始条件
Tab.3 Initial Conditions under Fr Number of 332

蒸汽质量流量/(g·s ⁻¹)	氦气质量流量/(g·s ⁻¹)	注入位置	喷口直径/cm	Fr	Re	喷放时间/s	容器内初始压力/MPa	混合气体温度/
2.0	0.4	中心	3.0	332	6692	1200	0.1	100

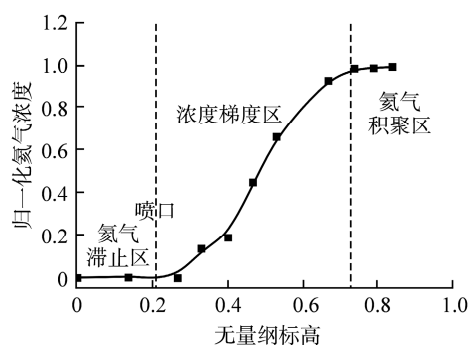


图4 安全壳大空间内氦气分布

Fig. 4 Helium Distribution within a Model Containment

混合喷放下，沿容器轴向位置可能形成氢气积聚区、浓度梯度区及氢气滞止区3部分，该结果与国际基准实验（ISP47）的相关发现一致。

参考文献：

- [1] GALLEGO E, MIGOYA E, MARTÍN-VALDEPEÑAS J M, et al. An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007(32): 2235-2245.
- [2] STUDER E, MAGNAUD J P, DABBENE F, et al. International standard problem on containment thermal-hydraulics ISP47: Step 1—Results from the MISTRA exercise [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007(237): 536-551.
- [3] TONG L L, DENG J, CAO X W. Numerical investigation on erosion of hydrogen stratification by steam jet within a local compartment [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020(44): 2665-2681.
- [4] WU H, ZHAO H H. Validation of hydrogen gas stratification and mixing models [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015(85): 137-144.
- [5] PENG C. Build-up of hydrogen up-flow model in consideration of air resistance and entrainment [J].

International Journal of Energy Research, 2019(43): 7010-7020.

- [6] TONG L L, PENG C, CAO X W. One-dimensional model of hydrogen distribution in confined space based on Froude number [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020(138): 107210.
- [7] 彭程. 安全壳大空间内氢气迁移特性实验研究[D]. 上海：上海交通大学机械与动力工程学院，2018：22-23.
- [8] WORSTER M G, HUPPERT H E. Time-dependent density profiles in a filling box [J]. *Journal of Fluid Mechanics*. 1983(132): 457-466.
- [9] GUPTA S, SCHMIDT E, LAUFENBERG B V, et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behaviour in light water reactor containments [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015(294): 183-201.
- [10] LIU H C, TONG L L, CAO X W. Experimental study on hydrogen behavior and possible risk with different injection conditions in local compartment [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020(52): 1650-1660.
- [11] PALADINO D, ANDREANI M, ZBORAY R, et al. Toward a CFD - grade database addressing LWR containment phenomena [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012(253): 331-342.
- [12] MALET J, PORCHERON E, VENDEL J. OECD international standard problem ISP-47 on containment thermal-hydraulics—conclusions of the TOSQAN part [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(10): 3209-3220.
- [13] WANG D, CAO X W. Numerical analysis of different break direction effect on hydrogen behavior in containment during a hypothetical LOCA [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017(110): 856-864.
- [14] STUDER E, BRINSTER J, TKATSCHENKO I. Interaction of a light gas stratified layer with an air jet coming from below: large scale experiments and scaling issues [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012(253): 406-412.

（责任编辑：马蓉）