

非能动安全壳冷却机制安全壳大气净化分析

佟立丽, 曹学武

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 采用一体化严重事故分析工具, 建立包括主冷却剂系统、专设安全设施、非能动安全壳冷却系统的事故分析模型, 该模型耦合了核电厂热工水力、安全壳响应及裂变产物行为分析。研究了小破口失水事故 (SB-LOCA)、大破口失水事故 (LB-LOCA) 以及主给水丧失事故 (LOFW) 始发严重事故序列下非能动安全壳冷却机制对安全壳大气的净化作用, 对非能动安全壳空冷和水冷工况下对安全壳内气溶胶的去除行为进行了分析。通过无冷却、空冷有效、空冷和水冷同时有效的三种工况下气溶胶行为的比对分析, 研究了冷却机制对扩散电泳和热电泳引起的气溶胶沉积。分析结果表明, 非能动安全壳冷却机制可以增强气溶胶扩散电泳和热电泳的去除效应, 相关分析可为严重事故管理导则的制定提供技术支持。

关键词 非能动安全壳冷却机制; 气溶胶; 扩散电泳; 热电泳

中图分类号 TL364+.4

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.003

Analysis of Containment Aerosol Removal Induced by Passive Containment Cooling Mechanism

TONG Lili, CAO Xuewu

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Based on an integrated severe accident analysis code, a severe accident analysis model is established to include the Reactor Coolant System (RCS), the Engineered Safeguard Facility (ESF) and the containment system, coupled with a thermo-hydraulic analysis, the containment response and the fission products behavior. A passive containment cooling system model is also built with consideration of the air convection cooling and the liquid film heat transfer. Three typical severe accidents induced by small break loss of the coolant accident (SB-LOCA), large break loss of the coolant accident (LB-LOCA) and loss of the feed water accident (LOFW) are considered with the containment atmosphere decontamination as a result of the passive containment cooling mechanism. For every sequence, three different cases are considered, which are the case without cooling, the case with air convection, and the case with air convection and liquid film. The aerosol behaviors for different cases are studied focusing on the volatile fission products and non-volatile fission products. The results show that the passive containment cooling mechanism can enhance the removal effect of diffusion phoresis and thermo-phoresis.

Keywords passive containment cooling mechanism; aerosol removal; diffusionphoresis; thermophoresis

0 引言

裂变产物释放后, 将在主系统和安全壳内迁移。阿贡实验室开展的源项实验项目 STEP 关注易挥发的裂变产物 Cs、I、Te 和 Rb^[1]; 爱德华实验室开展了燃料严重损伤 SFD-SD 实验, 采用 0.9m 长, 32 根燃料棒组成的钢钨镍合金组件研究堆

芯的降级及熔化, 同时也包括裂变产物的释放^[2]。许多实验对气溶胶行为的研究^[3-4]起到了很大作用, 认为裂变产物最初是以蒸汽的形态释放的, 除了惰性气体, 其他裂变产物释放以后将快速转变为气溶胶^[5]。因此, 研究气溶胶的运动规律和去除机制是必要的, 合理和有效的气溶胶行为预测决定了源项

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-06-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2009CB724301); 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (2010GB109004)

作者简介: 佟立丽, 博士, 研究方向为核反应堆严重事故, 电子信箱: lltong@sjtu.edu.cn

评价的可靠性。对于气溶胶的去除,大多数压水堆都采用喷淋系统去除气溶胶微粒^[9],在严重事故下通过安装在通风过滤装置上的过滤器对裂变产物进行捕集^[7]。对于安全壳大气中放射性物质的自然去除包括重力沉降、扩散电泳、热电泳和惯性碰撞等^[8-9]。目前,开发了一些描述安全壳内气溶胶行为的计算模型,并已植入反应堆安全分析程序中^[10-11]。

近年来,国内在核电厂严重事故源项领域已经开展了一些研究工作,中国核电工程公司针对百万千瓦级核电厂,应用 Astec 程序计算该类型核电厂在发生蒸汽发生器完全失去给水严重事故工况下放射性裂变产物在安全壳内释放迁移的情况,并对安全壳喷淋系统对气溶胶的去除进行了分析^[12]。中国原子能科学研究院利用 Melcor 程序分析秦山一期核电厂全厂断电事故进程中放射性裂变产物的行为^[13]。可见目前国内并未系统开展严重事故下裂变产物行为的研究,也未系统开展严重事故下缓解裂变产物释放的研究。

非能动安全壳冷却系统是专设安全系统,在事故下导出安全壳内的热量,降低安全壳内的温度和压力,减小了安全壳内外的压差,降低了裂变产物向安全壳外泄漏的驱动力,从而限制了安全壳内放射性裂变产物向环境的释放。目前,国内在消化吸收 AP1000 非能动安全壳冷却技术的同时,也有在二代加核电技术上研发非能动安全壳冷却系统的需求,不仅涉及安全壳内的热工设计,也需对安全壳大气净化有效性的论证。本文选取典型事故序列进行非能动安全壳冷却机制下的安全壳大气净化分析。

1 计算模型和分析方法

1.1 模型建立

本文建立的事故分析模型耦合了热工水力、安全壳响应和裂变产物行为的计算,可以模拟严重事故的全部进程。安全壳采用 17 个控制体进行模拟(如图 1),其中节点 1 为堆腔,节点 2 为安全壳底部一层空间,节点 3 为安全壳底部二层空间,节点 4 为安全壳环廊,节点 5 为稳压器隔间,节点 6

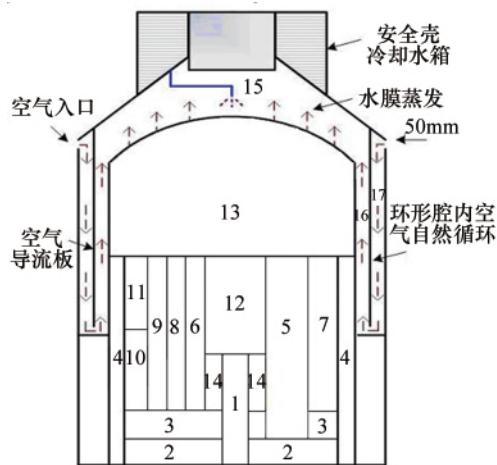


图 1 安全壳节点示意

Fig. 1 Node of containment

为压力容器顶盖存放间,节点 7 为环路 2,节点 8 为热交换器间,节点 9 为堆内构件存放池,节点 10 为环路 1,节点 11 为通风机房,节点 12 为换料水池,节点 13 为安全壳大厅,节点 14 为小环廊,节点 15 为非能动安全壳冷却系统的穹顶,节点 16 为非能动安全壳冷却系统的环形空间,节点 17 为非能动安全壳冷却系统的下降段。环形空间和下降段建立在核电厂运行层 20m 标高的上部,环形空间和下降段之间有空气导流板,外部空气入口设在 50m 标高处。相关的专设安全设施采用单独的控制模块进行模拟。为了研究严重事故下裂变产物的行为,对 12 组裂变产物进行跟踪计算(表 1)。其中,第 1 组为惰性气体类;第 2,3,6,10,11 组为挥发性类;其余组为非挥发性类。

表 1 裂变产物分组
Table 1 Group of products

| 组号 | 化合物形式 |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Xe, Kr |
| 2 | CsI, RbI |
| 3 | TeO ₂ |
| 4 | SrO |
| 5 | MoO ₂ , RuO ₂ , TcO ₂ , RhO ₂ |
| 6 | CsOH, RbOH |
| 7 | BaO |
| 8 | La ₂ O ₃ , Pr ₂ O ₃ , Nd ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ , NbO ₂ , AmO ₂ , CmO ₂ |
| 9 | CeO ₂ , NpO ₂ , PuO ₂ |
| 10 | Sb |
| 11 | Te ₂ |
| 12 | UO ₂ |

1.2 安全壳响应

针对所建立的非能动安全壳冷却模型,选取冷管段破口当量直径为 25mm 的小破口失水事故(SB-LOCA)进行安全壳响应特性研究。图 2 给出了 SB-LOCA 事故下当非能动安全壳冷却系统启动以后安全壳的响应,基准事故分析的是无外部非能动安全壳冷却系统的单层钢筋混凝土安全壳。由于重力排水刚触发时重力压头较大,因此重力排水流量较大,随着事故的进一步发展,重力排水流量逐渐减少,而空气流量则在 80—160kg/s 的范围内。当非能动安全壳冷却的水冷功能有效时,安全壳冷却水箱内的水向钢制安全壳喷洒,在钢制安全壳外表面形成水膜,与空气的自然对流冷却一起作用,使得安全壳大气发生冷凝和自然循环,从而达到使安全壳降温降压的效果,事故后期安全壳压力维持在 0.1MPa 左右。但是如果非能动安全壳冷却的水冷功能丧失时,此时只有空气的自然对流冷却,同样也起到一定程度的安全壳外部冷却,因此安全壳大气也会发生冷凝和自然循环,相比基准事故,安全壳也能起到一定程度的降温降压,安全壳压力维持在 0.2MPa 左右。对于不采取任何缓解措施的基准事故,安全壳压力呈逐渐上升的趋势,有导致安全壳超压失效的风险。

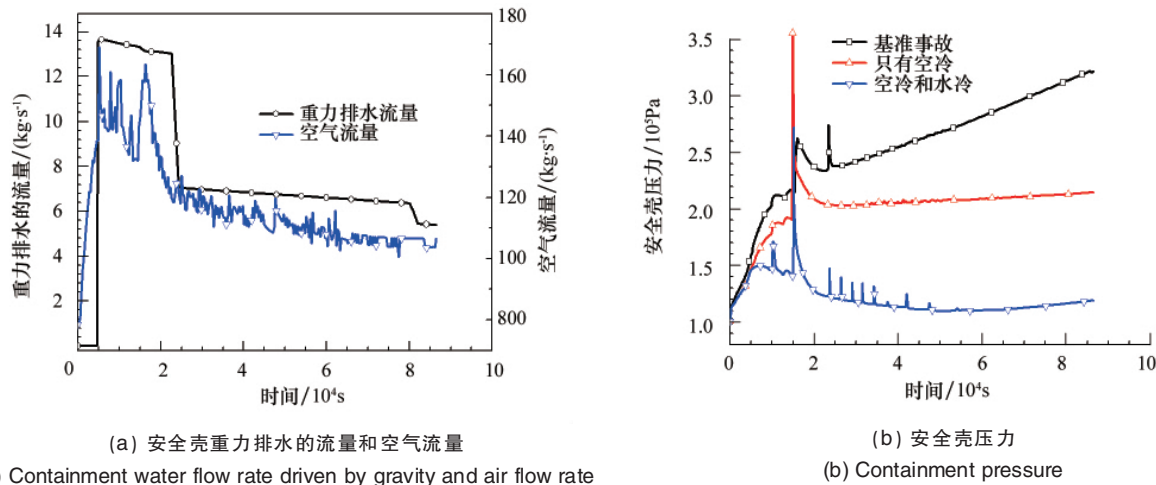


图 2 非能动安全壳冷却机制下安全壳的响应 (SB-LOCA)
Fig. 2 Containment response by the mechanism of passive containment cooling (SB-LOCA)

2 计算结果与分析

2.1 安全壳内气溶胶行为

选取 SB-LOCA 事故序列分析安全壳内气溶胶随事故进程的变化,分析非能动安全壳冷却对安全壳大气空间气溶胶去除的影响。图 3 给出了非能动安全壳冷却对安全壳内气溶胶去除的影响,可以看出,安全壳内 CsI 组气溶胶的快速增加发生在堆芯开始熔化之后,对于基准事故,安全壳内的 CsI 气溶胶通过自然沉积的作用逐渐沉积在安全壳内的墙壁、地板和设备表面;对于只有空冷的情况,由于安全壳外部有了空

气的自然对流冷却,从而增强了安全壳大气的冷凝和自然循环,因此安全壳内更多的 CsI 组气溶胶沉积下来,从而导致安全壳大气内的 CsI 组气溶胶比基准事故少;对于空冷和水冷同时有效的情况,安全壳外部的冷却效果更强,因此安全壳内沉积的 CsI 组气溶胶更多,从而导致安全壳大气内的 CsI 组气溶胶要比只有空冷有效时的情况更少。SrO 气溶胶的快速释放发生在压力容器失效后,即压力容器外释放,与挥发性裂变产物 CsI 组气溶胶相类似,安全壳外部冷却越好,安全壳大气内 SrO 气溶胶就越少。

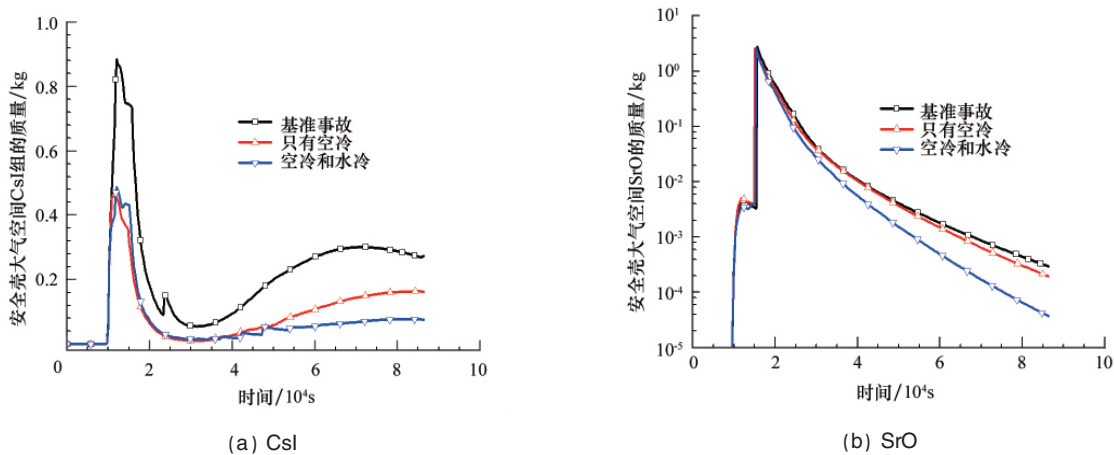


图 3 非能动安全壳冷却对安全壳内气溶胶去除的影响 (SB-LOCA)
Fig. 3 Aerosol removal in containment influenced by passive containment cooling (SB-LOCA)

2.2 非能动安全壳冷却对安全壳大气净化分析

选取了 SB-LOCA (冷管段破口当量直径为 25mm)、LB-LOCA(冷管段两端剪切)和 LOFW(主给水丧失)事故,对只有非能动安全壳冷却系统的空冷功能,以及空冷和水冷功能同时有效的情况下,对安全壳内气溶胶去除机制分别进行了计算。由图 4 可知,非能动安全壳冷却机制可以增强气溶胶扩散电泳和热电泳的去除效应。对于只有空冷的情况,热电泳

使气溶胶去除所占比例为 4.7%—9.4%,扩散电泳使气溶胶去除所占比例为 10.5%—16.8%。对于水冷和空冷功能同时有效时,扩散电泳和热电泳的去除效应进一步增强,热电泳使气溶胶去除所占比例为 7.0%—12.4%,扩散电泳使气溶胶去除所占比例为 18.1%—31.2%。

当非能动安全壳冷却系统起作用时,由于安全壳的外部冷却导致安全壳大气的冷凝和自然循环,使得安全壳大气和

安全壳壁面之间具有较高的传热率,从而增强了安全壳内气溶胶的沉积。因此,在非能动安全壳冷却机制下,相比无缓解的基准事故,气溶胶的扩散电泳和热电泳去除将会起到较大的作用。

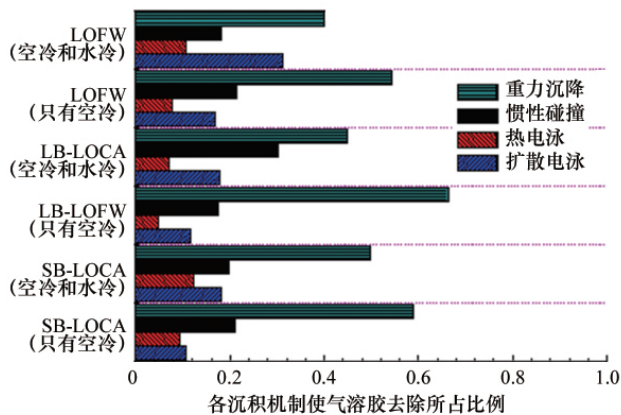


图 4 非能动安全壳冷却机制下各沉积机制使气溶胶去除所占比例

Fig. 4 Removal portion by different mechanisms of aerosol deposition by passive containment cooling

3 结论

本文建立了耦合热工水力、安全壳响应和裂变产物行为的事事故分析模型,选取了小破口失水事故(SB-LOCA)、大破口失水事故(LB-LOCA)以及主给水丧失事故(LOFW)始发典型事故序列,研究非能动安全壳冷却机制下的安全壳大气净化行为。研究表明:非能动安全壳冷却机制可以增强气溶胶扩散电泳和热电泳的去除效应。对于只有空冷的情况,热电泳使气溶胶去除所占比例为 4.7%—9.4%,扩散电泳使气溶胶去除所占比例为 10.5%—16.8%。对于水冷和空冷功能同时有效时,扩散电泳和热电泳的去除效应进一步增强,热电泳使气溶胶去除所占比例为 7.0%—12.4%,扩散电泳使气溶胶去除所占比例为 18.1%—31.2%。

参考文献 (References)

[1] Herczeg J E, Ritzman R L, Oehiberg R N. Source term experiments program (STEP)[C]//Proceeding of an International Conference on Source

Term Evaluation for Accident Conditions. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1986.

- [2] Martinson Z R, Gasparini M, Hobbins R R, *et al.* PBF (Power Burst Facility) severe fuel damage test1: 3 results report[R]. NUGEG/CR-5354 (EGG-2565), Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1989.
- [3] Makynen J M, Jokiniemi J K, Ahonen P P, *et al.* AHMED experiments on hygroscopic and inert aerosol behavior in LWR containment conditions: Experimental results [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1997, 178(1): 45-59.
- [4] Castelo A de los R, Capitão J A, De Santi G. International standard problem 40: Aerosol deposition and resuspension [R]. Issy -les -Moulineaux, Cedex: OECD Nuclear Euclear Agency, Joint Research Centre, European Commission, 1999.
- [5] Ammirabile L, Bielauskas A, Bujan A. Progress of ASTEC validation on fission product release and transport in circuit and containment [C]. The 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008) Nesseber, Bulgaria, September 23-25, 2008.
- [6] Powers D A, Burson S B. A simplified model of aerosol removal by containment spray [R]. NUREG/CR -5966, Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1993.
- [7] Soffer L, Burson S B, Ferrell C M. Accident source terms for light-water nuclear power plants [R]. NUREG -1465, Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1995.
- [8] Michael E, Phillip G. Correlations of the rates of removal of coagulation and depositing aerosols for application to nuclear reactor safety problems [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1988, 107(3): 324-344.
- [9] Epstein M, Hauser G M, Henry R E. Thermophoretic deposition of particles in natural convection flow from a vertical plate [J]. *Transaction of the ASME*, 1985, 107: 272-276.
- [10] Luis E, Herranz B. In-containment source term key insights gained from a comparison between the PHEBUS-FP programme and the US-NRC NUREG-1465 revised source term[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2010, 52(5): 481-486.
- [11] Ivo K, Maik D, Jiri D. Thermal-hydraulic and aerosol containment phenomena modeling in ASTEC severe accident computer code [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(3): 656-667.
- [12] 马如冰, 赵博. 百万千瓦级核电厂蒸汽发生器失去给水事故源项计算分析[J]. *核安全*, 2007(4): 45-50.
Ma Rubing, Zhao Bo. *Nuclear Safety*, 2007(4): 45-50.
- [13] 樊申, 张应超, 季松涛. 秦山 I 期核电厂全厂断电事故源项研究[J]. *原子能科学技术*, 2006, 40(5): 553-558.
Fan Shen, Zhang Yingchao, Ji Songtao. *Atomic Energy Science and Technology*, 2006, 40(5): 553-558.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。