

# 核电厂安全壳过滤排放系统

杨军, 杨晔, 隋增光

华中科技大学能源与动力工程学院核工程与核技术系, 武汉 430074

**摘要** 核电厂安全壳过滤排放系统是严重事故的重要缓解措施之一, 能够通过过滤、排气、降压, 防止安全壳发生超压失效。目前, 许多国家已重启或开启了对安全壳过滤排放系统的研究工作, 安全壳过滤排放系统有可能成为全球核电厂的标准配置之一。中国国家核安全局颁布的核电厂安全法规也要求安全壳应配备有足够过滤能力的排气系统。国内在运、在建以及规划中的大多数核电厂都配备了安全壳过滤排放系统, 以文丘里洗涤类型为主, 本文讨论安全壳过排放系统在国内的应用, 研究现状及发展趋势。

**关键词** 安全壳过滤排放系统; 严重事故缓解; 文丘里洗涤

安全壳过滤排放系统是一种应对核电厂严重事故的措施, 能够通过排气降压防止潜在的安全壳超压失效, 避免或减轻放射性物质释放到外界, 设计思想是由“堵”到“疏”。本文讨论了核电厂安全壳过滤排放系统(FCVS)在中国的应用、研究现状及发展趋势。20世纪80年代以来, 世界上许多核电厂均已安装了该系统, 功能示意如图1所示。

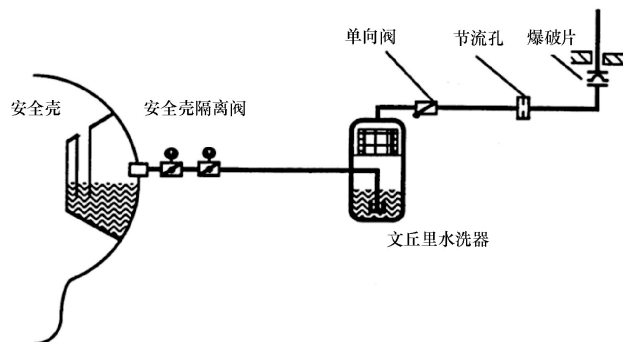


图1 安全壳过滤排放系统功能

Fig. 1 Schematic of filtered containment venting system

2011年的福岛核事故严重影响了公众对于核能安全的信心。该事故促使世界各国的核安全部门重新评估安全准则, 并加强核安全监管。事故也减缓了包括中国在内的许多国家的核能发展进程。中国的内陆核电项目暂缓建设, 沿海核电项目也受到影响。不过, 经过几年的谨慎评估和审核, 中国的核电发展开始回归正常, 并成为目前世界核能发展速度最快的国家<sup>[1]</sup>。

福岛核事故以来, 对核电厂事故的分析 and 应对缓解措施引起了广泛关注<sup>[2-5]</sup>。其中, 对适用于严重事故缓解的安全壳过滤排放系统, 各国启动了相关评估和研究工作。事故发生后的第3年, 经济合作与发展组织(经合组织, OECD)发表了一份报告, 总结了核电厂安全壳过滤排放系统在主要经合组织成员国的政策和应用现状<sup>[6]</sup>。从这份报告可以了解到, 法国所有在运的核电站都配备了法国电力公司(EDF)开发的沙床型安全壳过滤排放系统(图2<sup>[6]</sup>)。并使用法国电力公司开发的U5运行规程。为了进一步提高过滤排气降压系统的性能, 在沙床过滤器的上游配置金属预过滤器, 可将大部分的放射性微粒留存在安全壳中。这份报告还给出了目前已开发的安全壳过滤排放系统的技术描述(表1)。其他一些国家的核电厂, 如德国、新西兰、瑞典, 也配备了安全壳过滤排放系统, 另有国家尚未配备(表2)。不过, 该报告中没有给出英国、中国和印度的相关情况。

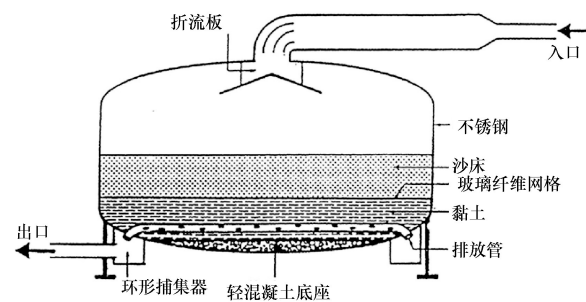


图2 沙床类型过滤系统

Fig. 2 Sand-bed type filter system

收稿日期: 2017-01-15; 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家“千人计划”青年人才项目(0222120003); 华中科技大学2017年人才引进基金项目(3004120119)

作者简介: 杨军, 教授, 研究方向为反应堆热工水力与安全分析, 电子信箱: yang\_jun@hust.edu.cn

引用格式: 杨军, 杨晔, 隋增光. 核电厂安全壳过滤排放系统[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 14-17; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.11.001

表1 主要的FCVS

Table1 Major FCVS designs

FCVS 类型	设计供应方
Sand-bed filter	EDF
Dry filter system, DFM	Westinghouse
FILTRA-MVSS	Westinghouse
SVEN(Safety Venting)	Westinghouse
Wet scrubber and metal fiber	CCI
Combined Venturi scrubber	AREVA

表2 经合组织成员国FCVS应用现状

Table 2 Status on the implementation of FCVSs in OECD countries

Country	NPPs	no FCVSs	HSSP	Metal + sand-bed	DFM	FILTRA-MVSS	SULZER CCI	EFADS
			V					
Belgium	7 PWR	□						
Bulgaria	2 VVER-1000		●					
Canada	19 PHWR Single unit (1) Multi units (18)		●		○			●
Czech Republic	4 VVER-440 2 VVER-1000	■						
Finland	2 VVER 440 2 BWR	■	●					
France	58 PWR			●				
Germany	7 PWR 2 BWR 24 PWR	□	●		●			
Japan	26 BWR	□	○					
Mexico	2 BWR	■						
Netherlands	1 PWR		●					
Romania	2 PHWR		○					
Slovakia	4 VVER-400 6 VVER-440	■						
Russia	11 VVER-1000	■						
Slovenia	1 PWR				●			
South Korea	19 PWR 4 PHWR 6 PWR	□	●					
Spain	1 BWR	□						
Sweden	3 PWR 7 BWR					●		
Switzerland	3 PWR 2 BWR		●			●	●	
USA	69 PWR 35 BWR	■						

### 1 法规要求

中国国家核安全局2016年发布的《核动力厂设计安全规定(征求意见稿)》要求核电厂在发生严重事故的情况下能够确保安全壳的结构完整性。该规定在6.3.4.3部分着重强调,应充分考虑严重事故下,系统具有控制放射性物质从安全壳向外释放的能力<sup>[7]</sup>。在6.7.4部分说明安全壳应配备有足够过滤能力的排气系统,并且该系统应足够可靠。

### 2 核电厂过滤排放系统配置

根据国际原子能机构的数据,目前中国有37座在运反应

堆,20座在建,还有一些反应堆在规划之中<sup>[8]</sup>。不同核电厂的安全壳过滤排放系统的类型有所不同,其中一部分核电厂的过滤排放系统配置如表3所示。采用早期法国技术的核电厂,如大亚湾和岭澳一期核电厂,配备了沙床类型系统<sup>[9]</sup>。其它大多数的核电厂配备了文丘里洗涤器类型的系统(图3<sup>[10]</sup>),主要由文丘里洗涤器和金属纤维过滤器组成<sup>[10]</sup>。此外,规划建设的多数核电厂也将配备安全壳过滤排放系统。在建的AP1000机组由于设有其他严重事故缓解措施,因此未安装过滤排放系统。

表3 中国核电厂的FCVS

Table 3 FCVS in China NPPs

NPP	FCVS	堆型
秦山二期	EUF	4×CNP650
大亚湾	Metal+Sand-bed	2×M310
岭澳一期	Metal+Sand-bed	2×M310
岭澳二期	Venturi+fiber filter	2×CPR1000
福清一期	Venturi+fiber filter	2×M310
福清二期	Venturi+fiber filter	2×ACP1000
方家山	Venturi+fiber filter	2×M310
海南	Venturi+fiber filter	2×CNP650
红沿河一期	Venturi+fiber filter	2×CPR1000
红沿河二期	Venturi+fiber filter	2×ACPR1000
宁德一期	Venturi+fiber filter	2×CPR1000
阳江1-4号机组	Venturi+fiber filter	4×CPR1000
阳江5、6号机组	Venturi+fiber filter	2×ACPR1000
防城港1、2号机组	Venturi+fiber filter	2×CPR1000
三门	N/A	2×AP1000
海阳	N/A	2×AP1000

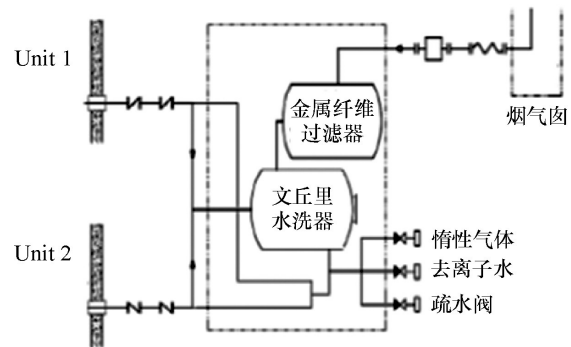


图3 双堆共用的FCVS设计示范

Fig. 3 Demonstration of shared FCVS design

### 3 研究现状

福岛核事故之后,一些主要的核能企业及一些研究单位开始启动并加快了安全壳过滤排放系统研发和工程设计工作。中船重工开发了基于洗涤文丘里洗涤器和金属纤维过滤器的新型安全壳过滤排放系统(图4)<sup>[9]</sup>。其主要由文丘里洗涤单元(喷嘴和洗涤液),脱水挡板单元和金属纤维过滤单

元组成。文丘里管使洗涤液雾化,以留存大部分的气溶胶。分子碘和有机碘与硫代硫酸钠反应生成稳定的混合物,溶解于液体中,2~100 μm厚度的金属纤维过滤层用以留存气溶胶和雾化液滴。该系统运行过程不需要电力。

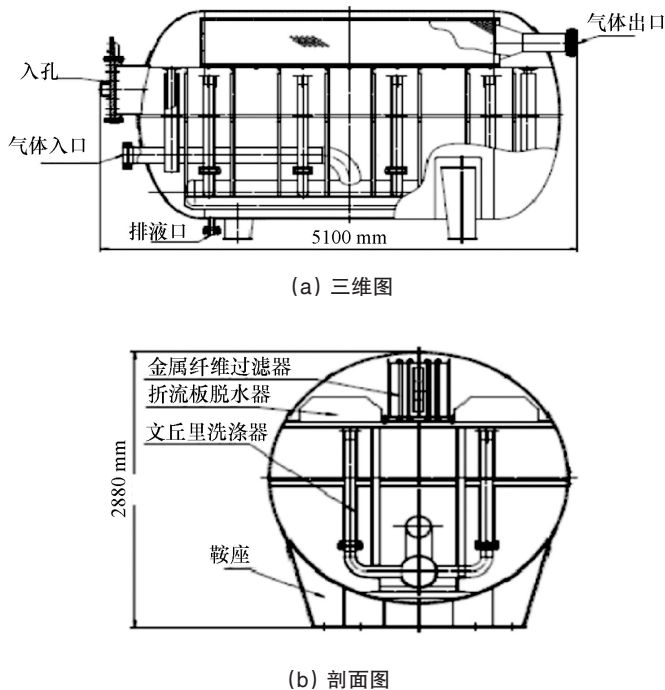


图4 基于文丘里洗涤器和金属纤维FCVS

Fig. 4 FCVS based on venturi scrubber and metal fiber

哈尔滨工程大学与中国核电工程公司对安全壳过滤排放系统进行了合作研究。研究重点包括文丘里水洗器的流动特性、气溶胶和碘的选择与取样,以及文丘里水洗器和金属纤维过滤器的结构设计和过滤性能<sup>[11-13]</sup>。

上海交通大学与中核集团福建福清核电公司合作,对严重事故下压水堆安全壳过滤排放系统的降压策略进行研究分析<sup>[10,14-15]</sup>。另外,上海交通大学的其他研究人员依据核安全局的指导,对核电厂严重事故下的安全壳排气所造成的放射性后果进行了评估<sup>[16]</sup>。上海交通大学对秦山二期反应堆安全壳降压和过滤系统进行了研究分析<sup>[17]</sup>。目前,也有关于安全壳过滤排放系统中气溶胶和碘的去污因子方面的研究<sup>[18-19]</sup>。

早期核电厂设计中,两个反应堆机组共用一个安全壳过滤排放系统(图3),该过滤系统仅能应对单堆排放。通过安全隔离阀,安全壳过滤排放系统能够在两个反应堆之间切换使用。然而,在某些极端情况下,如两个反应堆同时需要排气降压,就会对这个系统的性能造成挑战。为了解决这个问题,中广核工程公司和核工程公司的工程师和研究人员对当前的设计和运行机组提出了设计升级方案<sup>[20-21]</sup>。近来建设的反应堆,如阳江5、6号机组和红沿河5、6号机组等都将采用各自独立的单堆一套的安全壳过滤排放系统。福清3、4号机组和阳江5、6号机组分别在2009年和2013年对安全壳过滤排放系统进行了招标。

#### 4 总结

福岛事故后,相关核能监管部门对于核电厂应对严重事故的能力和措施进行进一步审查,中国核安全局也明确提出在设计核电机组时必须考虑其对严重事故的缓解能力。随着核安全局对过滤排放系统的要求越来越高,拥有较高的过滤效率和可靠的运行性能的安全壳过滤排放系统开始被广泛研究和设计,并越来越多地应用到中国和其他一些国家的核电厂中,这是应对和缓解严重事故并保障核能安全的一个重要进展。

上述几种安全壳过滤排放系统通过可控的过滤、排气和降压,可以有效地减小安全壳超压失效和放射性物质大规模泄露的可能性。其中,基于洗涤文丘里洗涤器和金属纤维过滤器的新型安全壳过滤排放系统将成为安全壳过滤排放系统的发展趋势。

#### 参考文献 (References)

- [1] Yang J, Lee D Y, Miwa S, et al. Overview of filtered containment venting in Asia NPPs[C]. The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety Gyeongju, Korea, October 9-13, 2016.
- [2] Yang J, Choi S W, Lim J, et al. Assessment of performance of BWR passive safety systems in a small break LOCA with integral testing and code simulation[J]. Nuclear Engineering & Design, 2012, 247: 128-135.
- [3] Yang J, Lim J, Choi S W, et al. Behaviors of passive safety systems under a feed water line break LOCA on a generation III plus boiling water reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 83: 35-42.
- [4] Lim J, Choi S W, Yang J, et al. Assessment of passive safety system performance under main steam line break accident[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64: 287-294.
- [5] Rassame S, Griffiths M, Yang J, et al. Experimental investigation of void distribution in suppression pool over the duration of a loss of coolant accident using steam-water two-phase mixture[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 75(5): 570-580.
- [6] OECD/NEA/CSNI. Status report on filtered containment venting[R]. OECD/NEA/CSNI, 2014.
- [7] 核动力厂设计安全规定[EB/OL]. [2017-06-23]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201611/W020161102359577021361.pdf>
- [8] IAEA. Power reactor information system[B/OL]. (2017-06-21). <http://www.iaea.org/pris/>.
- [9] 付嫒, 郭建辉, 董强, 等. 核电站安全壳过滤排放系统国内外研究概况[J]. 舰船防化, 2011(4): 12-15.  
Fu Man, Guo Jianhui, Dong Qiang, et al. Study on containment filtration and exhaust systems of nuclear power plants at home and abroad[J]. Chemical Defence on Ships, 2011(4): 12-15.
- [10] 袁凯, 曹学武, 顾健, 等. 压水堆核电厂安全壳过滤排放系统卸压策略分析[J]. 核科学与工程, 2014(2): 236-241.  
Yuan Kai, Cao Xuewu, Gu Jian, et al. Analysis of depressurization strategy of PWR containment filtered venting system[J]. Nuclear Science and Engineering, 2014(2): 236-241.
- [11] 王盟, 孙中宁, 谷海峰, 等. 自吸式文丘里水洗器阻力特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1353-1356.  
Wang Meng, Sun Zhongning, Gu Haifeng, et al. Experimental study of pressure drop characteristics of venturi working at self-priming mode

- [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1353-1356.
- [12] 王盟, 孙中宁, 谷海峰. 自吸式文丘里水分离器结构设计程序开发[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(6): 701-704.  
Wang Meng, Sun Zhongning, Gu Haifeng. Development of structure design program for venturi scrubber working at self-priming mode[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(6): 701-704.
- [13] 周夏峰, 谷海峰, 李富. 安全壳过滤排放系统实验用气溶胶的确定及相关参数的选取[J]. 核动力工程, 2014(5): 124-127.  
Zhou Xiaofeng, Gu Haifeng, Li Fu. Determination of experimental aerosols for filtered containment venting system and selection of technical parameter[J]. Nuclear Power Engineering, 2014(5): 124-127.
- [14] Yuan K, Guo D Q, Tong L L, et al. Evaluation of containment venting strategy via VFS path for advanced passive PWR NPP[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 73(5): 102-106.
- [15] Yuan K, Qie W Q, Tong L L, et al. Analysis on containment depressurization under severe accidents for a Chinese 1000MWe NPP [J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, 65(2): 8-14.
- [16] 李京喜, 黄高峰, 曹学武. 核电厂严重事故下安全壳通风导致放射性后果的快速评价[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(7): 848-851.  
Li Jingxi, Huang Gaofeng, Cao Xuewu. Quick evaluation of radiological consequences for containment venting in severe accident of nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(7): 848-851.
- [17] 周志贵. 秦山二期安全壳超压后的过滤及卸压[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
Zhou Zhigui. Reactor containment decompression and filtration in Qinshan NPP phase II[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [18] 王军龙, 孙中宁, 谷海峰, 等. 放置条件对分光光度法测定安全壳过滤排放系统中碘离子的影响[J]. 理化检验: 化学分册, 2014(12): 1592-1594.  
Wang Junlong, Sun Zhongning, Gu Haifeng, et al. Effect of storage conditions on spectrophotometric determination of iodide ion in custard filtering system[J]. Physical Testing and Chemical Analysis part B: Chemical Analysis, 2014(12): 1592-1594.
- [19] 张娜娜, 谷海峰, 王军龙, 等. 气溶胶取样测试技术研究及实验验证 [J]. 应用科技, 2013(2): 67-72.  
Zhang Nana, Gu Haifeng, Wang Junlong, et al. Research and experiments for aerosol sampling and measurement technique[J]. Applied Science and Technology, 2013(2): 67-72.
- [20] 赵鑫, 叶子青, 陈丽, 等. CPR1000 核电厂安全壳过滤排放系统的设计改进[J]. 核动力工程, 2014(2): 110-113.  
Zhao Xin, Ye Ziqin, Chen Li, et al. Analysis on modification of containment filtration and exhaust system of CPR1000[J]. Nuclear Power Engineering, 2014(2): 110-113.
- [21] 林继铭, 陈鹏, 张世顺. 核电厂安全壳超压失效概率及过滤排放系统启动压力分析[J]. 核动力工程, 2011, 32(3): 10-14.  
Lin Jiming, Chen Peng, Zhang Shishun. Study of containment overpressure fragility curve and analysis of opening pressure for containment filtration and exhaust system[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(3): 10-14.

## Overview of filtered containment venting in China

YANG Jun, YANG Ye, SUI Zengguang

Nuclear Engineering and Technology Department, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China

**Abstract** To mitigate severe accidents (SAs) in nuclear power plants (NPPs), filtered containment venting system (FCVS) is designed to prevent the potential containment overpressure failure through the filtered venting process. So far, many investigations and research works have been initiated or resumed particularly about the reinforced FCVS, which is expected to become the standard configuration of most NPPs. The NPP safety regulation, the safety regulation of nuclear power plant design (HAF102) issued by the Chinese NNSA, requires that NPPs should have venting systems with adequate filtration. Now, either most NPPs of operating reactor units under construction or more units planned in China are going to be equipped with FCVS, with priority of Venturi scrubber type system. At present, major nuclear energy companies, research institutions and universities are initiating or accelerating research and engineering projects on FCVS designs with enhanced performance.

**Keywords** filtered containment venting system; mitigation of severe accidents; venturi scrubber

(责任编辑 祝叶华)