

安全壳过滤排放系统中固体粉末气溶胶发生装置设计与性能研究

周夏峰¹, 谷海峰²

1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074
2. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 哈尔滨 150001

摘要 在进行安全壳过滤排放系统对气溶胶过滤性能的测试实验时, 针对现有固体粉末气溶胶发生装置不能用于高压配送系统的缺点, 本文设计了一种能够应用于高压系统、黏性粉末配送的双筒多级流化循环型气溶胶发生装置, 它不仅能够配送满足要求的气溶胶, 还实现了高压在线连续供粉功能。经过实验验证, 气溶胶配送量的相对误差在 15% 以内, 满足研究要求。

关键词 严重事故; 安全壳过滤排放系统; 气溶胶; 气溶胶发生装置

德国的核电站风险分析中指出, 90% 以上的严重事故都可能引起安全壳的晚期超压, 从而破坏安全壳的完整性^[1]。为了维持安全壳的完整性, 目前核电站一般都采用安全壳过滤排放系统作为重要的事故缓解策略, 当安全壳内部的压力达到安全壳过滤排放系统的设定压力时, 其通过主动卸压的方式使安全壳内的压力不超过其承载限值, 从而确保安全壳的完整性。福岛核事故之后, 为了防止安全壳超压, 发生类似事故, 安全壳过滤排放系统更成为众多核电站必备安装设备之一。由于发生严重事故时, 大量挥发性裂变产物、结构材料和控制棒材料会以气溶胶的形式释放到安全壳大气中, 如果直接向环境中排放, 则会对环境造成巨大的危害。因此, 安全壳过滤排放系统在主动泄压的同时, 需要通过安装在卸压管线上的过滤装置对排放气体中的放射性气溶胶进行有效过滤, 防止放射性气溶胶污染环境^[2]。根据以上论述可知, 安全壳过滤排放系统要想安全、可靠地实现主动泄压, 就需要过滤装置对放射性气溶胶进行高效过滤。因此, 在研制安全壳过滤排放系统时的一个重要内容就是进行气溶胶的过滤效率验证实验^[3]。

在安全壳过滤排放系统的过滤性能测试实验中, 如何将气溶胶配送入实验回路, 是一个迫切需要解决的问题, 因此需要利用气溶胶发生装置将气溶胶配入实验回路, 从而模拟安全壳大气中气溶胶的特性, 完成效率测试。目前, 国内常用的固体粉末气溶胶发生装置是国外研发的几款成型产品, 包括德国 BEG1000^[4]、RBG 系列气溶胶发生器^[5]和美国

TSI3400A 型气溶胶发生器^[6,7]等, 现有的气溶胶发生装置主要有链条喷嘴式、旋转刷式和流化床式。在国内, 气溶胶发生装置研制尚未成熟, 仅有一些专利“一种固体颗粒气溶胶发生装置”^[8](200520114532.4), “转盘式粉末气溶胶发生装置”^[9](201010136283.4), “齿带式粉末气溶胶发生装置”^[10](201120050150.5) 和“粉尘气溶胶发生装置”^[11](CN201010101408.X) 中提到固体颗粒气溶胶发生装置。但以上发生装置的出口压力低(最大出口压力不超过 0.3 MPa)、携带粉末的样品不能满足本实验要求等问题, 使得其不能用于安全壳过滤排放系统的过滤性能测试实验中。因此需要设计专门的气溶胶发生装置, 满足安全壳过滤排放系统性能测试的实验要求。

1 设计指标及原理

由文献[12]~[14]可知: 安全壳过滤排放系统的启动压力大约为 0.5~0.65 MPa, 并且要求该系统至少连续 24 h 对安全壳内排出的放射性气溶胶进行有效过滤。因此, 实验所需气溶胶发生装置, 应能够连续至少 24 h 不间断地向压力可达 0.65 MPa 的实验回路中配入所需气溶胶。同时, 安全壳过滤排放系统回路主管道的最大流量为 500 m³/h, 结合主管道所需的气溶胶浓度, 即可计算出气溶胶发生装置每分钟需要向实验回路主管道内配送的气溶胶质量, 并根据实验用气溶胶的特性及本实验的特点, 总结出气溶胶发生装置的设计指标^[15]如下。

工作压力: 0.1~0.65 MPa;

收稿日期: 2017-03-05; 修回日期: 2017-06-23

作者简介: 周夏峰, 讲师, 研究方向为核能科学与工程, 电子邮箱: zhouxiafeng@hust.edu.cn

引用格式: 周夏峰, 谷海峰. 安全壳过滤排放系统中固体粉末气溶胶发生装置设计与性能研究[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 18-23; doi: 10.3981/

j.issn.1000-7857.2017.11.002

连续运行时间 ≥ 24 h;

配送气溶胶粉末种类: BaSO₄、TiO₂;

配送气溶胶的质量流量: ≤ 8 g/min;

配送气溶胶质量中值直径: 1 μm ;

配送气溶胶粒径分布几何标准偏差: 1~2。

此外, 本气溶胶发生装置的设计基于气力输送原理^[16-17]。气力输送是利用气流作为载体, 在管道中输送粉、粒状固体物料, 空气(或惰性气体)的流动由输送管两端的压力差来实现, 直接给输送管内的物料颗粒提供移动所需要的能量, 将粉、粒状固体物料输送到指定位置。

2 气溶胶发生装置主体研制与实验验证

本实验根据气力输送原理, 设计加工了一种新型的气溶胶发生装置, 并在实验研究过程中, 遇到了粉末击穿、气流短路、出粉不稳定、出粉量大等问题。针对以上问题, 逐步提出解决方案, 并经过四代改进, 最终确定了新型气溶胶发生装置的设计方案, 其中各代气溶胶发生装置主体结构示意图如图1所示。

1) 第一代气溶胶发生装置主体设计。

设计并加工了第一代气溶胶发生装置主体, 如图1(a)所示, 该主体采用内外双筒体结构, 内部中心管提供气流通道和粉末的流化空间, 外层环状空腔盛装粉末, 在靠近环状空腔底部的壁上开有多个小孔, 利用四周空气的横向切力作用, 将环状空腔内的粉尘带到容器中部, 再利用发生装置底

部通入的载气, 进一步将粉末带入中心流化管内, 然后从顶部出口带出。

通过简单实验, 发现该型气溶胶发生装置存在以下不足:

(1) 由于粉末黏度大, 流动性差, 四周空气的横向气流很容易将堆积的粉末击穿, 不能很好地起到携带粉末的作用;

(2) 由于中心流化管的上端直接与出口相连, 因此随载气流入中心流化管内的粉末全部被带出发生装置, 这使得发生装置主体的出粉量过大, 而且气流携带粉末只能在中心管内产生流化, 流化空间小。

2) 第二代气溶胶发生装置主体设计。

针对第一代气溶胶发生装置主体存在的主要问题, 设计出第二代气溶胶发生装置主体, 如图1(b)所示。该代气溶胶发生装置主体主要进行了如下改进:

(1) 为解决由粉末黏度大、流动性差而造成的粉末击穿问题, 在气溶胶发生装置支架上安装了振动电机, 利用附加振动能量削弱粒子间的黏附作用, 从而增强粉末流动性, 避免击穿现象;

(2) 将中心流化管上部截掉一段, 使中心流化管出口与发生装置出口之间存在一定空间, 这样就可以让粉尘随载气从中心流化管中喷出后, 能在上部空间得到进一步流化, 形成粉末与气流充分混合的沸腾空间, 载气只携带沸腾空间中的部分粉末从出口流出, 而大部分粉末又回落到环形空腔内进行循环利用。这样既减小了发生装置的粉末配送浓度, 又提高了粉末浓度的稳定性。

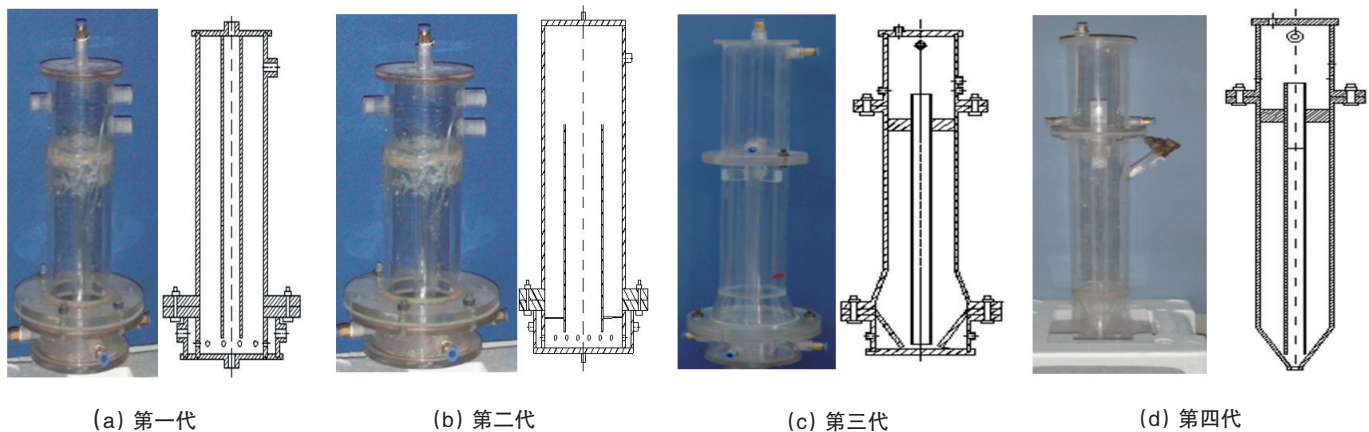


图1 各代气溶胶发生装置主体结构示意

Fig. 1 Sketch of different generation aerosol generators

对于该发生装置主体, 连续4天实验了60组实验数据, 进行出粉量稳定性的验证, 实验结果如图2所示, 从图中可以看出, 对于同一实验条件下(装粉量、压力、流量、振动力等相同), 每天的多组实验的气溶胶携带量基本围绕平均值在上下波动, 但波动量较大, 最大波动量达到40%左右。而对于不在同一天所做的实验, 出粉量的实验平均值相差较大, 即出粉量重复性不是很好, 这主要是由于粉末的湿度不同所造

成的。实验观察还发现, 对于这种竖直的圆筒供粉方式, 但四周气流有时仍会从环形空腔内流出, 造成气流的“短路”而无法携带粉末。

3) 第三代气溶胶发生装置主体的设计。

针对第二代发生装置主体存在的主要问题, 在第三代发生装置主体的下段增加一个锥型装置, 如图1(c)所示, 使粉末直接供到中心流化管处, 尽可能地避免四周气流的“短路”现象。

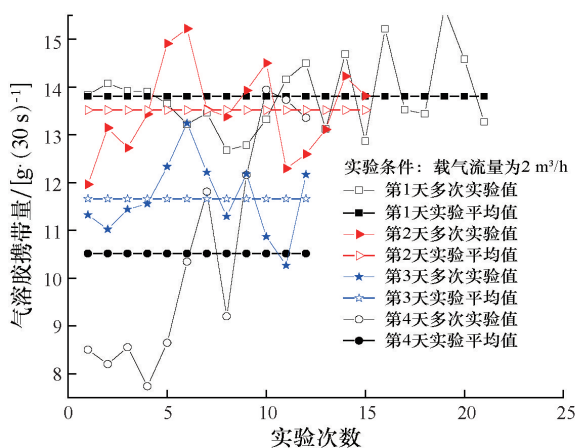


图2 第二代气溶胶发生装置主体的出粉量稳定性
Fig. 2 Stability of the powder output in the second aerosol generator

对于该发生装置主体,在每次实验前,对粉末进行烘干,减小粉末湿度对结果的影响,实验结果如图3所示。从图中可以看出,发生装置的粉末流化效果较好,与第二代发生装置主体相比每次出粉量大大减少,且波动量较小,大约在15%。有效地解决了四周进气所造成的“短路”问题,能够满足试验要求,但出粉量仍比预期值偏大。为了使该发生装置的出粉量能够满足实验所需的浓度配送要求,通过更换不同的锥形装置,改变锥形装置与中心流管之间的供粉间隙的方法实现。图4给出了供粉间隙较小的情况下的出粉量稳定性实验数据。由图可知,采用较小的锥形供料段后,供粉间隙减小,出粉量明显减小且波动量仍在允许范围内。

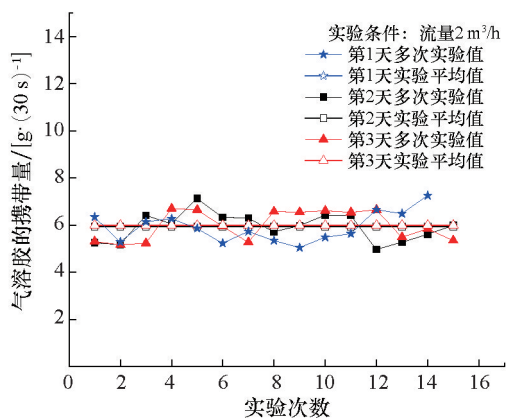


图3 第三代发生装置主体出粉量稳定性
Fig. 3 Stability of the powder output for the third aerosol generator

4) 第四代气溶胶发生装置主体的设计。

第三代气溶胶发生装置主体已经基本能够满足实验需求,但供粉间隙的调节需要更换不同的锥形,使得调节极不方便。据此提出第四代气溶胶发生装置主体,如图1(d)所示,该发生装置主体的底部设计成锥形,直接与通气管相连

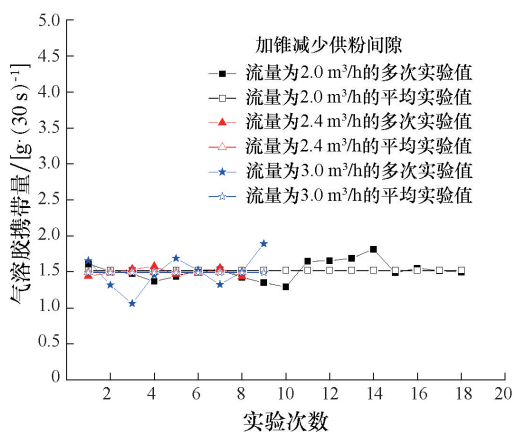


图4 供粉间隙较小时实验数据分析
Fig. 4 Data analysis in a small interval of powder input

接,使下落的粉末能够落到气溶胶发生装置进气口上,同时将中心流化管设计成带外螺纹的结构,形成可调式中心流化管,通过旋转中心管可实现供粉截面的调节,从而控制进入中心管内部的粉末量。

该发生装置主体的实验结果分析如图5所示,结果表明,实验中粉末的流化性能较好,出粉量稳定。当中心流化管的位置固定后,随着载气流量的增加,出粉量呈线性增长,这样便可以通过实验得出不同载气流量下的出粉量变化规律。图5中相应的线性拟合方程为: $Y=2.27812+1.6133X$,这样在后来的实验中,就可以根据实验所需的配送浓度调节气溶胶发生装置主体的供料间隙及载气流量达到实验的要求。

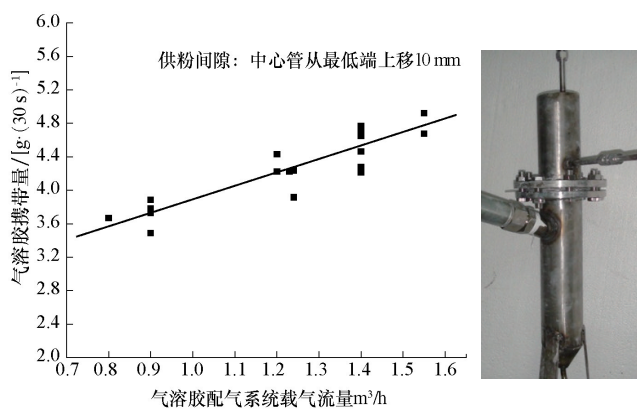


图5 第四代气溶胶发生装置主体实验数据分析
Fig. 5 Data analysis of the fourth generation aerosol generator

3 在线连续供粉部分的设计

为了保证所设计的气溶胶发生装置能够连续至少24 h不间断地向试验回路配入所需气溶胶,需要在不停止实验的情况下,通过外部在线连续供粉装置定期向气溶胶发生装置

主体内补充气溶胶粉末,因此对气溶胶发生装置在线连续供粉部分进行了专门设计,如图6所示。具体设计特点如下。

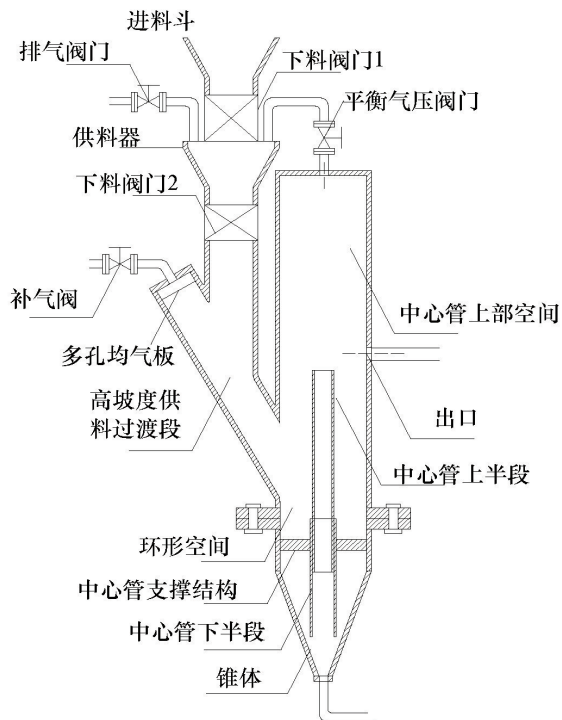


图6 气溶胶发生装置在线连续供粉部分示意

Fig. 6 Local diagram of an on-line continuous input of powder of the aerosol generator

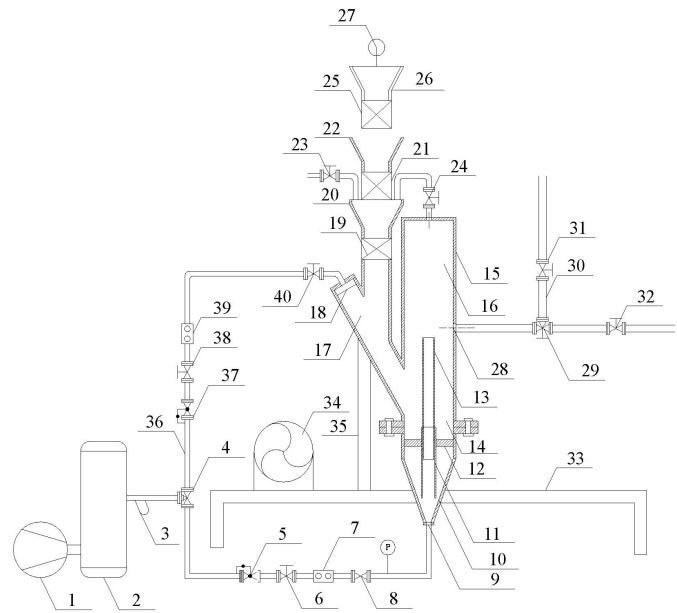
1) 当该气溶胶发生装置需要加粉末时,2个下料阀门能够使供料器分别与外界环境、气溶胶发生装置主体隔离,同时结合平衡气压阀门、排气阀门的交替使用,使得在气溶胶发生装置正常运行状态下,粉末样品能够进入进料斗,并顺利地通过供料器进入高坡度供料过渡段,实现粉末在线不间断的向气溶胶发生装置主体内部供粉的功能。

2) 多孔均气板上均匀分布着大量直径相同的小孔,使得通过补气阀进入高坡度供料过渡段的气流加速,高速气流的携带作用为粉末的充分流化提供必要的湍流和剪切力,减小了粉末的聚团,使得落入高坡度供料过渡段内的大部分粉末在未落到底部壁面前,就在高坡度供料过渡段内完成一次流化。

4 气溶胶发生装置的最终方案

根据以上不断的设计改进,最终设计并制造出一种能够应用于高压系统、黏性粉末配送的双筒多级流化循环型气溶胶发生装置,并能够实现高压在线连续供粉功能,保证该气溶胶发生装置持续稳定且长时间的向实验回路中配入所需气溶胶,如图7所示。

由于所设计的气溶胶发生装置基于气力输送原理,仅仅通过输送管两端的压力差,给输送管内的物料颗粒提供移动所需要的能量,因此其能够应用于高压系统配送;同时在线



1—压缩机由压缩机;2—储气罐;3—气体过滤器;4—三通接头;5—减压阀;6—开关阀;7—流量计;8—流量调节阀;9—发生装置底部进气口;10—锥体;11—中心管下半段;12—中心管支撑结构;13—中心管上半段;14—环形空间;15—筒体;16—中心管上部空间;17—高坡度供料过渡段;18—多孔均气板;19—下料阀门2;20—供料器;21—下料阀门1;22—进料斗;23—排气阀门;24—平衡气压阀门;25—阀门;26—储料容器;27—称重传感器;28—气流出口;29—三通阀;30,31—旁通系统;32—管道入口阀门;33—基架;34—调频振动电机;35—支撑杆件;36—补气管道;37—减压阀;38—开关阀;39—流量计;40—补气阀门

图7 气溶胶发生装置流程

Fig. 7 Flowchart of the aerosol generator

连续供粉部分中经过多孔均气板18的高速气流为粉末的充分流化提供必要的湍流和剪切力,减少粉末的团聚,在高坡度供料过渡段17内完成第一次流化,一部分流化粉末随着气流的携带进入中心管上部空间16,进行沸腾流化,另一部流化粉末由于重力落入双筒环形结构的环形空间14内,之后由发生装置低端进气口9的气流携带作用,进入中心流化管,完成第二次流化,并从中心流化管的上端喷出,由于高速气流的携带作用,粉末与气流在中心管上部空间16形成湍流,不停地进行搅混、剪切和碰撞,将团聚的粉末打散,形成细小的颗粒悬浮在气流中,从而形成粉末与气流充分混合的沸腾空间,尤其在气流出口28处,由于气流的“抽吸”作用,沸腾效果更加明显,而气流只携带沸腾空间中的部分粉末从气流出口28流出,其余粉末由于沉降作用又回落到环形空间14内,进入下一次循环,这使得黏性粉末在发生装置主体内始终处于循环和流化状态,从而进行多次湍流和剪切力的作用,使得团聚的粉末最终被流化。

使用时,打开压缩机,将储气罐内充入一定压力的压缩气体,进行气体的储存和压力稳定,之后调节减压阀、流量调节阀、补气阀门使各路管道的载气流量和压力满足实验要求,然后打开振动电机,根据粉末的黏性和气溶胶发生装置

的重量尺寸,选择合适的振动频率以获取合适的振动力,与此同时,根据实验工况需要,将气溶胶发生装置中心流化管与锥体之间的间隙和中心流化管的总高度调整至合适位置。实验时,利用在线连续供粉部分定期向气溶胶发生装置主体内补充气溶胶粉末,同时将一定压力和流量的载气通入气溶胶发生装置,携带所需量的气溶胶,并将其配送到主系统中用于实验。目前,已将该发生装置用于安全壳过滤排放系统过滤性能测试实验中,气溶胶配送量的稳定性较好,相对误差小于15%,很好地满足了实验要求。

5 结论与建议

本文依据安全壳过滤排放系统中气溶胶的配送要求,设计了一种能够应用于高压系统、黏性粉末配送的双筒多级流化循环型气溶胶发生装置,使粉末能够进行多级流化,并在发生装置主体内始终处于循环和流化状态。并实现了高压在线连续供粉、连续至少24 h不间断运行以及可方便调节等功能。目前,该发生装置已用于安全壳过滤排放系统过滤性能测试实验中,气溶胶配送量的稳定性较好,相对误差小于15%,很好地满足了实验要求,为中国迫切需要自主开发的安全壳过滤排放系统中气溶胶过滤效率验证实验提供合适浓度的稳定气溶胶,充分验证其过滤效率和性能。

参考文献 (References)

- [1] Fabian H O, Hicken E F, Tiltmann M. Thermal hydraulic and source term calculations[C]//Specialist Meeting on Filtered Containment Venting Systems, CSNI Report 148. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1988: 45-58.
- [2] 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 Ziqing, Chen Li, et al. Analysis on modification of containment filtration and exhaust system of CPR1000[J]. Nuclear Power Engineering, 2014(2): 110-113.
- [3] 周艳民, 孙中宁, 谷海峰, 等. 文丘里洗涤器去除气溶胶特性实验研究[C]//全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2015年度学术年会. 2015.
- [4] Ji Z L, Xiong Z Y. Experimental investigations on a cyclone separator performance at an extremely low particle concentration[J]. Power Technology, 2009, 191(3): 254-259.
- [5] Losch N, Tiegs V, Eckardt B. Qinshan 2 NPP's containment venting system[R]. Qinshan: Framatome ANP GmbH, 2003.
- [6] Prenni A J, Siefert R L, Onasch T B. Design and characterization of a fluidized bed aerosol generator: A source for dry submicrometer aerosol [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 32: 465-481.
- [7] TSI 公司. TSI 公司气溶胶仪器简介[C]//大气气溶胶科学技术研究进展—第八届全国气溶胶会议暨第二届海峡两岸气溶胶科技研讨会文集. 南京: 中国颗粒学会, 2005: 384-387.
- TSI company. Brief introduction of TSI aerosol instrument[C]//The 8th national aerosol conference and the 2th cross-strait workshop for aerosol science & technology. Nanjing. Chinese Society of Particology, 2005: 384-387.
- [8] 黄斌, 姚强, 宋嵩, 等. 一种固体颗粒气溶胶发生装置: 200520114532.4[P]. 2007-03-28.
Huang Bin, Yao Qiang, Song Qiang, et al. Solid particle aerosol generation system: 200520114532.4[P]. 2007-03-28.
- [9] 范维林. 转盘式粉末气溶胶发生装置: 201010136283.4[P]. 2011-04-13.
Fan Weilin. The system of rotating powder aerosol generation: 201010136283.4[P]. 2011-04-13.
- [10] 范维林. 齿带式粉末气溶胶发生装置: 201120050150.5[P]. 2011-02-28.
Fan Weilin. The system of Tooth-Belt powder aerosol generation: 201120050150.5[P]. 2011-02-28.
- [11] 范维林. 粉尘气溶胶发生装置: 201010101408.X[P]. 2010-01-27.
Fan Weilin. Powder aerosol generation system: 201010101408.X[P]. 2010-01-27.
- [12] Eric J. Containment venting system-sand bed filter: Description, operation procedure, implementation program[C]//Specialist Meeting on Filtered Containment Venting System, CSNI Report 148. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1988: 257-278.
- [13] Holm C G, Sydkraft A B, et al. A versatile containment venting system [C]//Specialist meeting on filtered containment venting system, CSNI Report 148. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1988: 163-174.
- [14] Dillmann H G, Pasler H. A filter concept to control airborne particulates releases due to severe reactor accidents and implementation using SS-fiber filters[R]. CONF-840 860, 1985, 2: 1417.
- [15] 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.
- [16] 刘龙波, 刘蜀疆, 刘红杰. 振筛进料流化床气溶胶发生器性能的初步研究[J]. 过程工程学报, 2004, 4(增刊): 876-878.
Liu Longbo, Liu Shujiang, Liu Hongjie. The primary study on the performance of a fluidized-bed aerosol generator feeding by sieve shaker[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2004, 4 (Suppl): 876-878.
- [17] 刘蜀疆, 刘龙波, 吴艳敏, 等. 用滤膜压力降法研究气溶胶发生器输出浓度的稳定性[J]. 过程工程学报, 2006, (6)1: 19-22.
Liu Shujiang, Liu Longbo, Wu Yanmin, et al. Themeasurement of concentration stability of the fluidized bed aerosol generator by measuring the pressure drop of sampling membrane filter[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, (6)1: 19-22.

Design of a new aerosol generator for filtered containment venting system and its performance

ZHOU Xiaofeng¹, GU Haifeng²

1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract In the aerosol removal efficiency test of filtered containment venting system, the aerosol generator is used to produce the aerosols delivered to the main pipe of the filtered containment venting system under a system pressure of 1 to 6.5 MPa. The main ingredient of the aerosols is barium sulphate or titanium dioxide, with a mass median diameter of 1 micron and a geometric standard size distribution of 1~2 ; the concentration of the used aerosols should be held within a range of 50~900 mg/m³. Since existing generators are usually unable to generate and disperse the cohesive powders and unable to work in such a high pressure, a new kind of aerosol generator is designed, which can not only meet the requirements for the used aerosols but also realize the function of continuously providing powders in high pressure situation. Through experiments, it is shown that the relative error of the value of aerosols generated and transmitted by the new generator is less than 15%, and it can satisfy the requirement of the research.

Keywords severe accidents; filtered containment venting system; aerosols; aerosol generators

(责任编辑 祝叶华)