

# Research on Aerosol Filtration in Containment Vessel by MEMS Inertial Impactor

Houbo Qi<sup>1</sup>, Fenglei Niu<sup>1\*</sup>, Mingqiang Yi<sup>2</sup>, Yu Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Passive Nuclear Power Safety and Technology, North China Electric Power University, Beijing

<sup>2</sup>Microfluidic Foundry L.L.C., San Pablo, CA, USA

Email: \*[niufenglei@ncepu.edu.cn](mailto:niufenglei@ncepu.edu.cn)

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2015; accepted: Apr. 10<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

When there is a serious nuclear accident, the concentration of radioactive aerosols in the containment will increase rapidly. It will increase the risk of accident and cause a serious damage to the atmospheric environment if such radioactive aerosols directly release. So the filter used for adsorbing radioactive aerosols is necessary. The common aerosol filters use mesh structures or filter papers, which need filter papers replacement and can significantly increase the flow resistance in the course of aerosol deposition and retard the containment pressure relief following the nuclear accidents. This paper proposes and studies MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) inertial impactor filter that filtrates and collects radioactive aerosols without replacing filter papers. The paper verifies the feasibility of the idea with help of the calculation results.

## Keywords

Nuclear Power Plant, Aerosol, Filter, MEMS Inertial Impactor

---

# 用微流体惯性冲击器过滤安全壳内气溶胶的研究

齐厚博<sup>1</sup>, 牛风雷<sup>1\*</sup>, 易明强<sup>2</sup>, 玉宇<sup>1</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>华北电力大学, 非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京

<sup>2</sup>微流体铸造有限责任公司, 圣巴勃罗, 加利福尼亚州, 美国

Email: [niufenglei@ncepu.edu.cn](mailto:niufenglei@ncepu.edu.cn)

收稿日期: 2015年3月25日; 录用日期: 2015年4月10日; 发布日期: 2015年4月16日

## 摘要

核电站出现严重核事故时, 反应堆安全壳内的放射性气溶胶将迅速增加, 一旦释放于大气环境中将带来严重后果, 增大事故的危险性, 故需使用相应的过滤吸附装置避免此种放射性气溶胶向大气中扩散。现有的反应堆安全壳内气溶胶过滤器大多数为网状结构, 需要定时更换滤纸, 且气溶胶在滤纸上的沉积会影响事故情况下的泄压。本文研究、设计了一个不需更换滤纸即可收集过滤安全壳内气溶胶的微流体惯性冲击式气溶胶过滤器(简称MEMS过滤器), 并用模拟试验验证了该设想的可行性。

## 关键词

核电站, 气溶胶, 过滤, 微流体惯性冲击器

## 1. 引言

核电站内部大气环境中的天然放射性气溶胶通常情况下浓度很低且处于平衡状态[1], 但出现严重核事故时, 核电站一回路承压边界完整性被破坏出现泄漏, 将导致人工放射性气溶胶在热压动力作用下迅速释放到核电站内部环境大气中造成其放射性气溶胶浓度显著升高[2], 如果将此类放射性气溶胶直接排放到大气中将严重危害大气环境。目前核电站使用的过滤器主要有高效过滤器、活性炭过滤器、文丘里洗涤器, 砂堆过滤器几种[3], 虽然能对放射性气溶胶进行一定的过滤和收集, 但存在需要高放射性条件下更换滤纸、产生二次放射性液态或固态废物等缺点[4]。本文设计、研究了一个微流体惯性冲击式气溶胶过滤器(简称 MEMS 过滤器), 能够收集微米尺寸的颗粒, 且弥补上述不足。微机电系统(MEMS)是微型设备技术, 微型器件有很多潜在好处, 例如性能高、功耗低、反应灵敏、成本低等。在过去的二十年中, MEMS 技术有过很大的进步, 但据调查显示, 目前还没有将 MEMS 惯性冲击器其应用于气溶胶收集的先例。本文提出的 MEMS 过滤器着眼于实现安全壳内部微米范围内气溶胶的收集, 无论在设计理念上还是技术上都是一次新的尝试。

## 2. 原理及几何模型

MEMS 过滤器实质是一个微流体惯性冲击器, 该惯性冲击器利用摄入其中粒子的惯性将不同粒径的粒子进行分离, 实现收集和过滤。设计 MEMS 过滤器为 T 型管, 扁形喷嘴入口, 即如图 1 所示。当不同尺寸的微粒打入过滤器中后, 由于气溶胶粒子的惯性, 粒径大的粒子将会打在 T 型管底板上, 粒径小的粒子会随管内的空气流继续运动而不被收集。依据调研结果, 反应堆安全壳内的气溶胶粒子多为  $2\ \mu\text{m}$  左右, 故实现对气溶胶微粒收集的关键是设计合理的 T 型管尺寸, 使得尺寸在  $2\ \mu\text{m}$  的粒子能被有效收集。

## 3. 计算模型的建立

### 3.1. 管道内连续性流场的建立

Marple 等人[5]-[7]深入研究了惯性冲击器, 在理论研究方面, 数值求解冲击器内空气流场的 Navier-

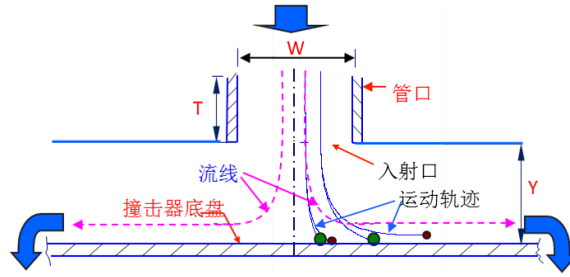


Figure 1. Inertial impactor model  
图 1. 微流体惯性冲击器几何模型

Stokes 方程。流体力学中，当雷诺数  $Re$  小于 2300 时流体为层流流动，此时流体也可视为不可压缩流体。

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[ 1.257 + 0.4e^{-\left(\frac{1.1d_p}{2\lambda}\right)} \right] \quad (3-1)$$

其中  $u$  为入口平均流速， $w$  为管口宽度， $\gamma$  为运动粘度。本文设计的 T 型管因入口宽度， $w$  远小于其长度  $L$ ，从而可以忽略一个维度方向的速度，将流体的流动简化为二维，并设在小雷诺数下做层流流动，同时忽视流体流动的对流条件，在模拟 T 型冲击器中的流场时，对其建立斯托克斯方程和连续性方程。经过对长度  $w$ ，速度  $u$  以及压力  $p = \frac{u\gamma\rho_f}{w}$  ( $\rho_f$  为流场的密度)的规范化后，在二维坐标  $(x, y)$ 、无量纲流场  $(u, w)$  以及流场压力场中通过求解 N-S 方程和连续性方程求得。

### 3.2. 离散相轨道计算模型的建立

颗粒的作用力平衡方程(颗粒惯性 = 作用在颗粒上的各种力)在笛卡尔坐标系下的形式( $x$  方向)为[8]

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3-2)$$

式中， $F_D(u - u_p)$  为颗粒的单位质量曳力， $N/kg$ ； $u$  为流体相速度， $m/s$ ； $u_p$  为颗粒速度， $m/s$ ； $\rho$  为流体密度， $kg/m^3$ ； $\rho_p$  为颗粒密度(骨架密度)， $kg/m^3$ 。本文中设定核电站中气溶胶的颗粒直径为  $2 \mu m$ ，适用于 Stokes 曳力公式。此时， $F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c}$ 。 $\mu$  为流体动力黏度， $Pa \cdot s$ ；系数  $C_c$  为 Stokes 曳力公式的

Cunningham 修正(考虑稀薄气体力学的颗粒壁面速度滑移的修正)， $C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left[ 1.257 + 0.4e^{-\left(\frac{1.1d_p}{2\lambda}\right)} \right]$ ， $\lambda$  为气体分子平均自由程， $m$ 。

### 3.3. T 型过滤器尺寸设计

粒子的运动服从牛顿第二定律，即  $F = ma$ ，在载流场中，粒子将具有由于粒子与流体间由于斯托克斯曳力而产生的相对速度，设颗粒球体的直径为  $d_p$ ，则斯托克斯曳力为  $6\pi\rho_f\gamma v_r d_p$ ，其中  $v_r$  是颗粒与流体间的相对速度，将问题进行规范化，则颗粒的无量纲运动方程为[9]

$$\begin{aligned} \frac{Stk}{2} \frac{d^2x}{dt^2} &= u - \frac{dx}{dt} \\ \frac{Stk}{2} \frac{d^2y}{dt^2} &= v - \frac{dy}{dt} \end{aligned} \quad (3-3)$$

$(x, y)$  表示粒子在  $t$  时刻的位置,  $(u, v)$  表示流场在坐标  $(x, y)$  时的速度。  $Stk$  即斯托克斯数定义为[6],

$$Stk = \frac{Re}{9} \left( \frac{\rho_p}{\rho_f} + \frac{1}{2} \right) \left( \frac{d_p}{W} \right)^2 \quad (3-4)$$

式中  $\rho_p$  为粒子密度,  $d_p$  为粒子直径,  $u$  为入口平均速度,  $w$  为管口宽度,  $\gamma$  为流体的运动粘度。  $Stk$  为粒子在静止流体中的停止距离与进口喷管的宽度之比, 故  $Stk$  与粒子是否能被收集有直接关系。

对于不同  $Stk$ , T 型冲击器对粒子的收集效率不同, 经模拟试验获得收集效率曲线如图 2 所示。

由效率曲线可知, 当  $\sqrt{Stk}$  数大于 1.1 时, 收集效率  $E$  为 1, 即粒子全部被收集; 当  $\sqrt{Stk}$  小于 1 时, 收集效率  $E$  为 0, 即粒子全部流出。模拟试验结果表明, 若获得最佳收集效果, 关键是在安全壳内部环境条件下确定合理的 T 型冲击器尺寸。通过相关试验可获得不同尺寸 T 型冲击器( $Y/W$ )的收集效率与不同雷诺数的关系如图 3 所示。

由图 3 模拟试验结果可得, 当  $Y/W = 1/2$  时, 收集效率对雷诺数的依赖比  $Y/W = 1$  时小, 因此, 为保证在安全壳内不同雷诺数下的适用性, 选择  $Y/W = 1/2$  的尺寸设计。

#### 4. 模拟试验验证

本模拟试验采用颗粒轨道模型对气相和颗粒相以及两相之间的相互耦合作用进行模拟时, 即在欧拉坐标系下考察流体相的运动, 在拉格朗日坐标系下考察离散颗粒相的运动。为计算射入的颗粒, 将颗粒相的边界在进出口设置成 Escape 面, 壁面全部设置为 Trap 面。试验模拟小雷诺数下的颗粒运动, 即颗粒的运动为层流, 气相采用速度入口以及自由出口的类型。

根据试验分析及核电站安全壳内的具体环境条件, 模拟气溶胶粒子为合金材料颗粒, 密度是空气的 8030 倍, 并设粒子直径为 2  $\mu\text{m}$ , 设定温度为 150 $^{\circ}\text{C}$  [10]。模拟计算时, 设计气相和颗粒的入口压力为 0.407 Mpa [10], 考虑粒子在运动中受重力、布朗运动阻力、热泳力、萨夫曼力及压力梯度力作用。对于 T 型冲击器而言, 设计微米级别尺寸以满足小雷诺数的条件, T 管的入口直径设计为  $W = 1 \text{ mm}$ , 出口  $Y = 0.5 \text{ mm}$ , 高度  $T = 1 \text{ mm}$ 。为保证粒子的碰撞距离, 设计较长的收集板为 13 mm。用以上尺寸设计 T 型冲击式过滤器尺寸, Navier-Stokes 方程及连续性方程使用 FLUENT 软件 DPM 模型进行求解, 并根据实际情况设计入口流速为 6 m/s。

#### 5. 模拟试验结果

根据方程(3)(4)及设计的 T 型冲击器尺寸, 进行模拟计算。在理论方面, 流体可视为不可压缩流体, 依据具体适用情况, 设雷诺数  $Re = 340$ , 使用 FLUENT 软件模拟得到 T 型冲击器内空气流场如图 4 所示。

在计算中, 经过网格敏感性分析, 使用 39414 网格节点进行计算。则根据实际情况, 由式(3)(4)可得  $Stk = 1.21 > 1.1$ 。由分析可得, 如果设计合理, 粒子将会被全部收集。本试验设计连续喷入颗粒, 并用 FLUENT 软件 DPM 模型追踪其运动轨迹, 获得粒子轨迹图线如图 5 所示。

#### 6. 结论及分析

1) 由图 5 可知, 打入 T 型冲击器的气溶胶粒子被全部收集, 即模拟试验用已被认可的计算流体力学 FLUENT 软件验证了该方案尺寸设计的合理性。同时说明了使用微流体惯性冲击器进行气溶胶收集的设想是可行的。

2) 通过图 5 粒子的运动轨迹图可以看出, 粒子在 T 型冲击器内沉积很快, 故在实际设计中 T 型冲击器底板不需要设计过长。

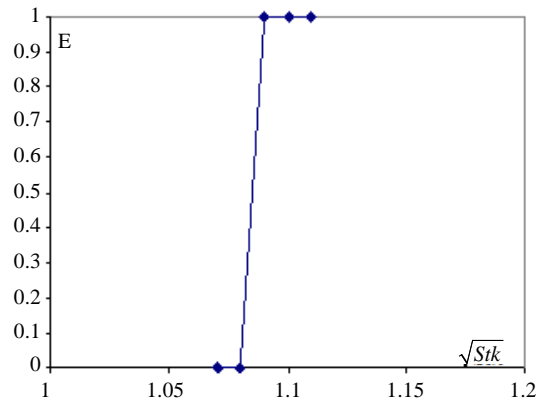


Figure 2. Relation between the fraction of the collected particles ( $E$ ) and  $\sqrt{Stk}$

图 2. 收集效率( $E$ )与  $\sqrt{Stk}$  的关系

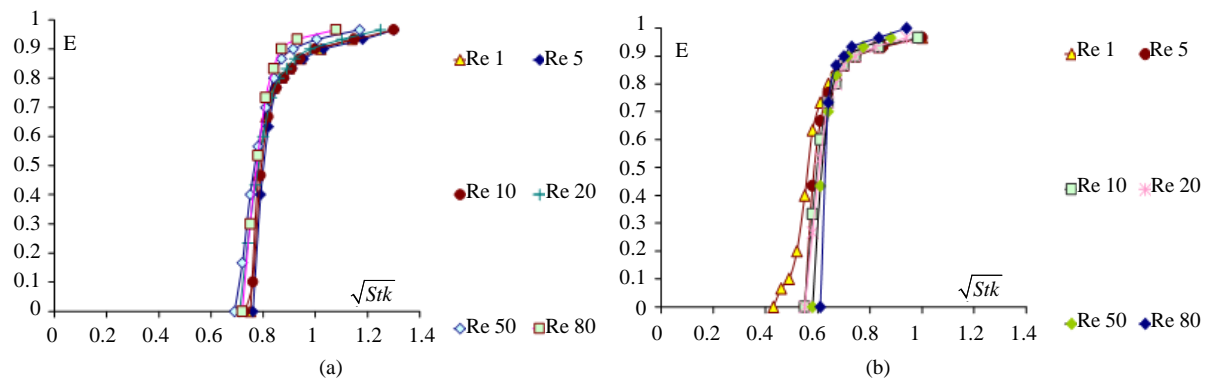


Figure 3. (a) Efficiency curves ( $Y/W = T/W = 1$ ); (b) Efficiency curves ( $Y/W = 1/2$  and  $T/W = 1$ )

图 3. (a) 效率曲线( $Y/W = T/W = 1$ ); (b) 效率曲线( $Y/W = 1/2$  and  $T/W = 1$ )

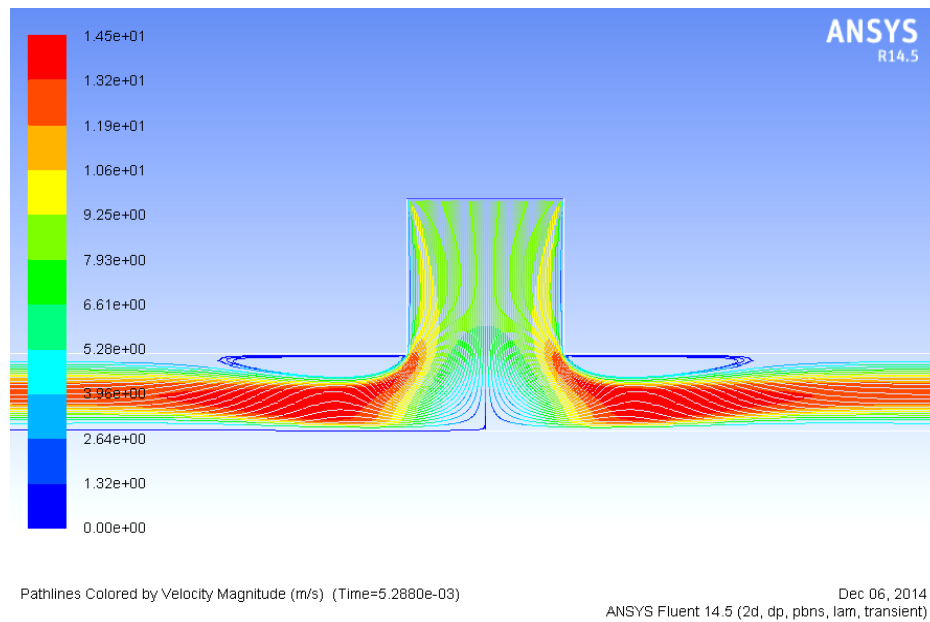


Figure 4. Air flow field in T tube impactor

图 4. 微流体惯性冲击器内部的空气流场

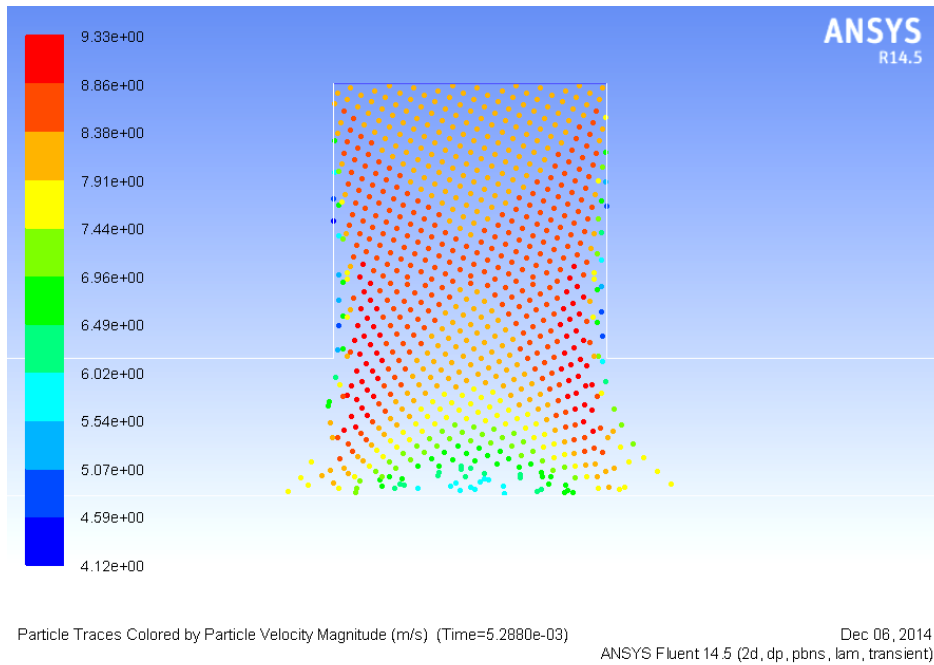


Figure 5. Particles trajectories in T tube  
图 5. 粒子运动轨迹图

3) MEMS 惯性冲击器具有小型化、低成本、精度高、物理性好等优点, 适用于安全壳内部环境, 且因其体积微小, 实际操作中可使用多个冲击器排列进行过滤收集, 提高收集效率, 微小的体积在过滤气溶胶的同时对事故情况下的泄压速度影响不大。

此外, 本文作者之一, 易明强博士已掌握相关微机电加工技术, 且已经研发出尺寸小于 1 mm 的微观冲击器喷嘴, 并进行了微米尺寸粒子的收集, 故本文提出的使用 MEMS 惯性冲击器收集微米尺寸气溶胶粒子的设想具有现实意义。

事故情况下放射性气溶胶释放到空气中将导致严重的污染, 如何在事故情况下简单而有效的收集过滤放射性气溶胶是亟待解决的问题。本文经过分析及验证, 证明了应用 MEMS 惯性冲击器过滤安全壳内放射性气溶胶的可行性。此方法原理简单且具有实际意义, 不需要更换滤纸即可实现过滤, 同时不影响事故情况下安全壳内的泄压速度, 且不会产生二次放射性废物。可以预想, 如果此方法成功应用, 将弥补现有气溶胶过滤方法的缺陷, 为有效防止事故情况下放射性气溶胶释放开辟出新的思路。

## 致 谢

感谢国家自然科学基金项目资助(项目号 91326108)。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙雪霆, 季松涛, 刘振华, 等 (2012) 核燃料循环临界事故中气溶胶行为研究. *原子能科学技术*, **46**, 314-319.
- [2] 陈祥磊, 王益元, 熊启发, 等 (2011) 核电站放射性气溶胶探测器入射粒子模拟分析. *舰船科学技术*, **33**, 53-57.
- [3] Arunkumar, R., Hogancamp, K.U., Parsons, M.S., et al. (2007) High-efficiency particulate a filter test stand and aerosol generator for particle loading studies. *Review of Scientific Instruments*, **78**, 1-10.
- [4] 于连涛, 林宇清 (2011) 核电站核空气净化系统运行经验反馈及分析. *中国核学会 2011 年年会论文集*, 贵州, 257-261.
- [5] Marple, V.A. and Liu, B.Y.H. (1975) On fluid flow and aerosol impaction in inertial impactor. *Journal of Colloid and*

*Interface Science*, **53**, 31-34.

- [6] Marple, V.A., Liu, B.Y.H. and Whitby, K.T. (1974) On the flow fields of inertial impactor. *Journal of Fluids Engineering*, **96**, 394-400.
- [7] Marple, V.A., Rubow, K.L. and Behm, S.M. (1991) A microorifice uniform deposit impactor (MOUDI): Description, calibration, and use. *Aerosol Science and Technology*, **14**, 434-446.
- [8] 汝小龙, 周涛, 林达平, 等 (2013) 两种截面窄通道内 PM1 颗粒沉积数值模拟对比研究. *核动力工程*, **34**, 42-46.
- [9] Soo, S.L. (1967) *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell Publishing Company, New York.
- [10] 林诚格 (2008) 非能动安全先进核电厂 AP1000. 原子能出版社, 北京, 122-127.