

# 非能动安全壳冷却对严重事故下 气溶胶沉积影响分析

孙雪霆, 陈林林, 魏严淞, 季松涛

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

**摘要:**采用分区法模型计算了不同热工条件下的气溶胶沉积情况, 分析了4种自然沉积机理对不同粒径气溶胶的沉积作用。研究表明, 气溶胶扩散泳沉积受热工情况影响最为显著。针对AP系列压水堆非能动安全壳冷却的设计特性, 可通过降低壁面温度来提高气溶胶的扩散泳沉积, 增强安全壳内的气溶胶净化作用, 从而提高严重事故下安全壳内的放射性去除效果。

**关键词:**严重事故; 非能动安全壳冷却; 气溶胶沉积; 扩散泳

**中图分类号:** TL364

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2016)12-2219-05

**doi:** 10.7538/yzk.2016.50.12.2219

## Analysis of Aerosol Deposition Affected by Passive Containment Cooling in Severe Accident Condition

SUN Xue-ting, CHEN Lin-lin, WEI Yan-song, JI Song-tao

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Aerosol deposition in different thermal conditions was calculated with sectional method model, and effects of four natural deposition mechanisms on various aerosol diameters were analyzed. The result shows that diffusiophoresis deposition of aerosol is the most affected by thermal condition. According to the feature of passive containment cooling of AP series pressurized water reactor, the reduction of radioactivity in severe accident conditions can be enhanced through decreasing the temperature of containment wall to improve diffusiophoresis deposition of aerosol.

**Key words:** severe accident; passive containment cooling; aerosol deposition; diffusiophoresis

核电厂在发生严重事故时, 放射性裂变产物以气体、蒸汽、气溶胶形式释放。其中气溶胶作为放射性裂变产物的主要载体, 其在空间中的扩散、分布和沉积等过程较为复杂, 影响释放到环境中的放射性源项, 在反应堆严重事故领

域受到重点关注。传统核电厂中的安全壳喷淋系统 in 发生严重事故时能够清洗掉绝大部分悬浮在安全壳气空间中的气溶胶; AP 系列大型先进压水堆取消了安全壳喷淋系统, 气溶胶的去除依靠自然沉积作用。非能动安全壳冷却系

统设计改变了安全壳内的热工参数,使气溶胶的沉积情况发生了变化,因此需要研究气溶胶受不同沉积机理影响的结果,并可利用这些沉积机理的特点增强严重事故下安全壳内的气溶胶去除效果。

本文采用分区法模型计算不同热工条件下的气溶胶沉积情况,分析4种自然沉积机理对不同粒径气溶胶的沉积作用。

## 1 分析模型

一般用通用动力学方程描述气溶胶的行为,利用分区法可将该方程转化为可以数值解的离散方程,并应用到 MAEROS 模型<sup>[1]</sup>中。MELCOR<sup>[2]</sup>、ASTEC<sup>[3]</sup>等主流核电厂安全分析程序的气溶胶行为计算部分均以该模型为基础,并与其他事故现象模型相耦合。

将  $Q_l$  定义为  $t$  时刻  $l$  区间内单位体积气溶胶总质量,则有:

$$Q_l(t) = \sum_{k=1}^s Q_{l,k}(t) \quad (1)$$

其中:  $Q_{l,k}(t)$  为单位体积内  $l$  区间化学成分  $k$  的质量;  $s$  为化学成分总数目。则 MAEROS 模型表述为:

$$\begin{aligned} \frac{dc_{l,k}(t)}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} (\beta_{i,j,l} c_{j,k} c_i + \beta_{i,j,l} c_{i,k} c_j) - \\ & \sum_{i=1}^{l-1} (\beta_{i,l} c_i c_{l,k} - \beta_{i,l} c_{l,k} c_i) - \frac{1}{2} \beta_{l,l} c_{l,k} - \\ & c_{l,k} \sum_{i=l+1}^m \beta_{i,l} c_i + S_{l,k} - R_{l,k} \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $c_{l,k}(t)$  为  $t$  时刻、 $l$  ( $l=1,2,\dots,m$ ) 区间内  $k$  ( $k=1,2,\dots,N_a$ ) 组分单位体积内的气溶胶质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\beta$  为气溶胶聚合核,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{kg})$ ;  $S$  为气溶胶源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $R$  为沉积项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。式(2)中,等号右侧前4项为气溶胶聚合作用,第5项为气溶胶源项,最后一项为沉积项,气溶胶动力学主要由这几种行为构成,气溶胶的去除则依靠沉积作用。

在沉积项中,用4种沉积机理的速度来计算气溶胶的沉积项:

$$R_{l,k}(t) = \sum_{j=1}^{N_s} \frac{A_j}{V} (v_{\text{Sed}} + v_{\text{Dif}} + v_{\text{Tph}} + v_{\text{Dph}}) \cdot c_{l,k}(t) \quad (3)$$

其中:  $A_j$  为某一热构件的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$  为气空

间的体积,  $\text{m}^3$ ;  $v_{\text{Sed}}$ 、 $v_{\text{Dif}}$ 、 $v_{\text{Tph}}$ 、 $v_{\text{Dph}}$  分别为气溶胶的重力沉降速度、布朗扩散速度、热泳速度、扩散泳速度。

4种沉积机理的速度分别表述如下。

### 1) 重力沉降

$$v_{\text{Sed}} = \frac{\rho_p g d_p^2 C_m}{18 \eta \chi} \quad (4)$$

其中:  $\rho_p$  为颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $d_p$  为颗粒等效粒径,  $\text{m}$ ;  $C_m$  为 Cunningham 滑移修正系数;  $\eta$  为空气的动力黏度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\chi$  为动态形状参数。

### 2) 布朗扩散

$$v_{\text{Dif}} = \frac{\sigma T_g C_m}{3 \pi \eta_b d_p \delta_{\text{Dif}}} \quad (5)$$

其中:  $\sigma$  为 Boltzmann 常数,  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T_g$  为气空间温度,  $\text{K}$ ;  $\eta_b$  为空气动力黏度,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $\delta_{\text{Dif}}$  为扩散运动的边界层厚度,  $\text{m}$ 。

### 3) 热泳

$$v_{\text{Tph}} = \frac{1.5 \gamma C_m (C_t Kn + \lambda_g / \lambda_p) \nabla T}{\chi \rho_g T_w (1 + 3 F_{\text{slip}} Kn) (1 + 2 C_t Kn + 2 \lambda_g / \lambda_p)} \quad (6)$$

其中:  $Kn$  为颗粒 Knudsen 数;  $\lambda_g$ 、 $\lambda_p$  分别为空气热导率与气溶胶热导率;  $\nabla T$  为表面温度梯度,  $\text{K}/\text{m}$ ;  $\rho_g$  为气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T_w$  为壁面温度,  $\text{K}$ ;  $F_{\text{slip}}$  为滑移系数;  $C_t$  为热调节常数。气空间与表面温差除以热泳边界层厚度可得出表面温度梯度  $\nabla T$ , 即  $\nabla T = (T_g - T_f) / \delta_{\text{Tph}}$ , 其中热泳边界层厚度  $\delta_{\text{Tph}}$  取经验值  $3 \text{ mm}$ 。

### 4) 扩散泳

$$v_{\text{Dph}} = \frac{\gamma_s \sqrt{M_s}}{\gamma_s \sqrt{M_s} + \gamma_{nc} \sqrt{M_{nc}}} \cdot \frac{q_m}{\rho_s} \quad (7)$$

其中:  $M_s$ 、 $M_{nc}$  分别为水和不可凝气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;  $q_m$  为水蒸气向表面凝结的质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\rho_s$  为饱和水蒸气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma_s$ 、 $\gamma_{nc}$  分别为气空间中水蒸气和不可凝气体的摩尔分数,  $\gamma_s + \gamma_{nc} = 1$ 。式(7)中,凝结质量流量  $q_m$  根据 Stephan 定律<sup>[4]</sup>表述为:

$$q_m = \beta \frac{p}{R(T + \Delta T)} \frac{1}{1 - n_0} \ln \frac{p - p_{\text{Ds}}(T_f)}{p - p_{\text{D}}} \quad (8)$$

其中:  $p$  为气空间总压力,  $\text{Pa}$ ;  $R$  为气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为气空间温度与液膜表

面温度的算术平均值,K; $\Delta T$  为液膜表面与壁面表面的温差,K; $n_0$  为气空间中水蒸气的摩尔分数; $p_{Ds}(T_f)$  和  $p_D$  分别为水蒸气在壁面温度下的饱和压力和 在气空间中的压力,Pa; $\beta$  为系数, $\beta$  的表达式为<sup>[4]</sup>:

$$\beta = \frac{\alpha}{\rho c_p} \left( \frac{D \rho c_p}{\lambda} \right)^{1-n}$$

(9)

其中: $\alpha$  为对流换热系数,W/(m<sup>2</sup> · K); $\rho$  为气体混合物在温度  $T$  时的平均密度,kg/m<sup>3</sup>;  $c_p$  为气体混合物的平均比定压热容,J/(kg · K); $D$  为水蒸气在温度  $T$  时的扩散系数,m<sup>2</sup>/s; $\lambda$  为气体混合物在温度  $T$  时的平均热导率,W/(m · K); $n$  为通过对流换热系数计算得出的指数。

式(8)中的  $\Delta T$  通过下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\Delta T = \frac{0.75 q_m^{\frac{4}{3}}}{\lambda_w} \Delta_E \left( \frac{3 \eta_w h}{\rho_w^2 g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

(10)

其中: $q_m$  为凝结质量流量,kg/(m<sup>2</sup> · s); $\lambda_w$  为水在温度  $T$  时的热导率,W/(m · K); $\eta_w$  为水在温度  $T$  时的动力黏度,kg/(m · s); $\rho_w$  为水在温度  $T$  时的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta_E$  为水在液膜表面温度  $T_f$  下的汽化潜热,J/kg; $h$  为壁面上的液膜高度,m。

在计算扩散泳时,设定初始温差  $\Delta T$ ,通过式(8)与式(10)迭代,可得出凝结质量流量  $q_m$ 。

2 计算分析

2.1 计算参数

选取中国原子能科学研究院开展的严重事故下放射源项及迁移机理研究试验平台为计算模型。该平台模拟严重事故下安全壳内的热工环境,针对 AP 系列大型先进压水堆安全壳的设计特点,对气溶胶迁移机理进行试验研究。试验平台的主试验容器为立式压力容器,容积为 0.762 m<sup>3</sup>,其竖直壁面外部设有冷却水套,利用循环水控制竖直壁面温度。试验以 TiO<sub>2</sub> 为气溶胶物质向容器内注入,在达到预定浓度后令其在试验容器内部自由演化。0 时刻容器内气溶胶符合对数正态分布,利用空气动力学粒径分级器测得平均粒径为 2.06 μm,几何标准差为 2.2。根据该参数计算得出 0 时刻气溶胶的质量分布如图 1 所示。

选取 3 种典型工况进行计算,热工参数列

于表 1。表 1 中:S01 为常温常压工况,且气空间内不含水蒸气;D01、D02 的气空间内水蒸气均为饱和状态,且气空间与侧壁面存在温差,其中 D02 的侧壁面温度较 D01 的侧壁面温度低。计算中认为气空间压力、气空间温度、壁面温度及相对湿度均保持恒定。

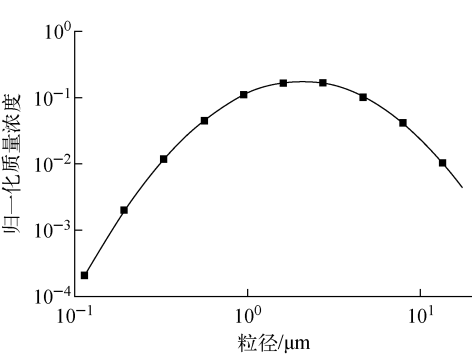


图 1 初始气溶胶质量分布

Fig. 1 Initial aerosol mass distribution

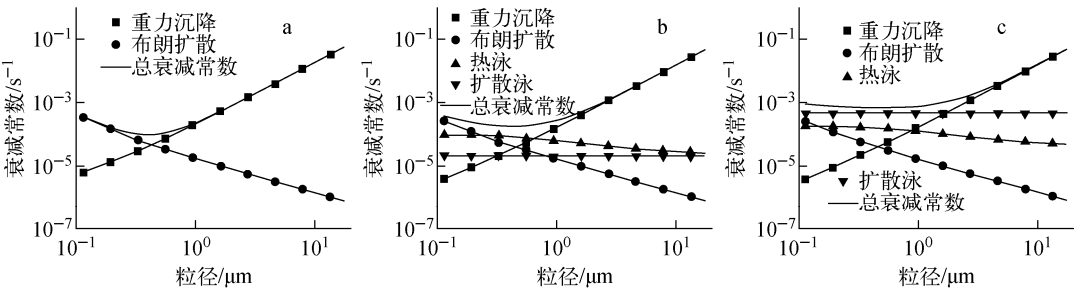
表 1 计算热工参数

| Table 1 Thermal parameter for calculation |               |             |            |            |
|-------------------------------------------|---------------|-------------|------------|------------|
| 工况                                        | 气空间<br>压力/MPa | 气空间<br>温度/K | 壁面<br>温度/K | 相对<br>湿度/% |
| S01                                       | 0.10          | 298.2       | 298.2      | 0          |
| D01                                       | 0.21          | 363.2       | 355.2      | 100        |
| D02                                       | 0.21          | 363.2       | 348.2      | 100        |

2.2 气溶胶衰减常数

气溶胶浓度的衰减近似符合指数规律,可用衰减常数描述气溶胶的衰减,衰减常数越大,气溶胶浓度降低得越快。不同粒径的气溶胶的沉积情况不同,应对不同粒径的气溶胶衰减常数进行分析。

图 2 示出计算得出的不同工况下的衰减常数。由图 2a 可见,在 S01 工况下,气空间与壁面间没有温差,且气空间内无水蒸气,故没有热泳和扩散泳作用,只存在重力沉降和布朗扩散沉积作用。其中,重力沉降随粒径的增大而增大,布朗扩散随粒径的增大而减小,且该两种沉积机理随粒径的变化非常明显,在计算范围内均变化数个数量级。另外,在绝大部分粒径范围内,某一种沉积机理在总衰减常数中占主要作用,小粒径范围以布朗扩散为主,大粒径范围以重力沉降为主。



a——S01 工况;b——D01 工况;c——D02 工况

图 2 不同工况下的衰减常数

Fig. 2 Decay constant of different cases

相对于 S01 工况,D01 工况和 D02 工况除气空间与侧壁面间存在温差外,气空间内含有饱和水蒸气,因此气溶胶沉积机理中增加了热泳及扩散泳作用。热泳衰减常数随粒径的增大而减小。对于扩散泳衰减常数,由图 2 并结合式(7)可发现,由于扩散泳与气溶胶粒径无关,故衰减常数对粒径呈水平线。此外,从气空间-侧壁面温差来看,虽然 D02 仅比 D01 提高了 7.0 K,但 D02 的扩散泳衰减常数比 D01 的提高了 21.7 倍,相比之下 D02 的热泳衰减常数比 D01 的仅提高了 1.87 倍,可以看出温差对扩散泳衰减常数的影响更为明显。

2.3 气溶胶质量分布

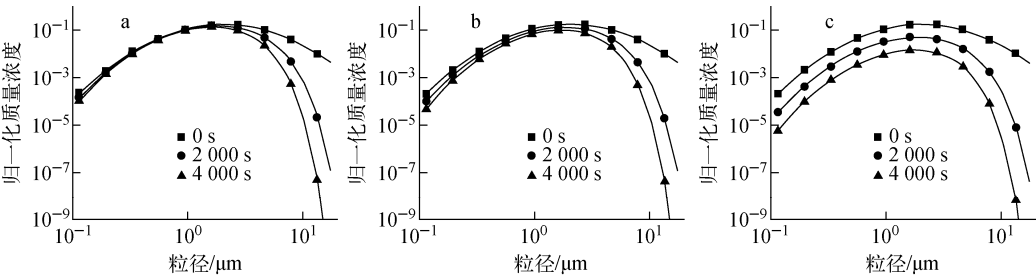
通过质量分布的变化对比可得出不同条件下气溶胶质量分布随时间的变化,并得出不同粒径范围受不同沉积机理的影响。计算得出 3 种工况在 0、2 000 和 4 000 s 时的质量浓度分布,如图 3 所示。由图 3a 可看出,在只有重力沉降和布朗扩散两种沉积机理的情况下,气溶胶质量浓度在最大和最小的粒径范围降低得较快,而在 0.3~1.0 μm 的粒径范围内降低得较

慢,其中在大粒径范围降低得尤为迅速。结合图 2a 的 S01 工况衰减常数可得出,由于在 0.3~1.0 μm 的粒径范围内相对其他粒径范围衰减常数较小,故质量浓度降低较慢,而大粒径和小粒径的质量浓度降低得较快,特别是较大粒径由于受重力沉降沉积作用特别显著,导致质量浓度降低得更快。

由图 3b、c 可见:根据图 2b、c 的衰减常数的对比,由于 D02 比 D01 各粒径的总衰减常数大,故 D02 比 D01 的质量浓度下降得更快。此外,由于扩散泳沉积作用与气溶胶粒径无关,D02 相对 D01 的扩散泳沉积在全部粒径范围的增大幅度均相同,在图中表现为各粒径的质量浓度降低速度更为接近。

2.4 气溶胶质量浓度

气溶胶质量浓度的变化能直观地得出气溶胶的去除效果。计算得出不同工况下总质量浓度随时间的变化,如图 4 所示。其中,S01 的质量浓度的降低速度最慢,D01 次之,D02 最快。质量浓度下降的关系与沉积机理相对应,由于 D01和D02加入了热泳及扩散泳作用,故质量



a——S01 工况;b——D01 工况;c——D02 工况

图 3 不同工况下的质量分布

Fig. 3 Mass distribution of different cases

浓度较 S01 的降低得更快。另外,由于 D02 比 D01 的气空间-壁面温差的增大特别显著地增强了扩散泳作用,使前者比后者的质量浓度降低得尤为迅速。

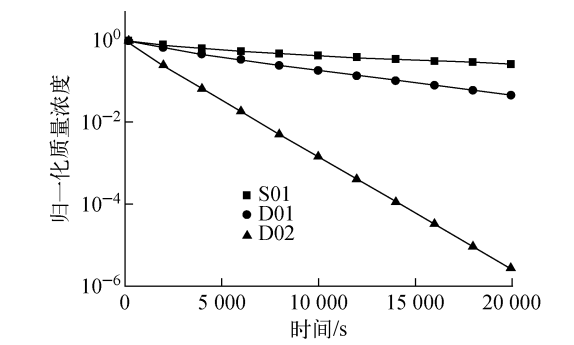


图 4 总质量浓度的变化  
Fig. 4 Change of total mass concentration

### 3 结论

本文对不同工况下的气溶胶的沉积进行了计算。通过比较分析得出以下结论:1) 在 4 种气溶胶沉积机理中,重力沉降和布朗扩散两种沉积机理持续存在,当气空间和壁面存在温差时会有热泳沉积作用,当气空间中的水蒸气向壁面凝结时会存在扩散泳沉积作用;由于水蒸气凝结需要气空间-壁面温差,故当扩散泳存在时必然伴随热泳作用。2) 从沉积衰减常数随粒径的变化可知,重力沉降随粒径的增大而增大,布朗扩散随粒径的增大而减小,且变化幅度较大;热泳随粒径的增大而减小,但减小的幅度没有前两者剧烈;扩散泳与粒径无关。3) 从热工条件对沉积影响来看,热工条件对重力沉降、布朗扩散两种沉积机理的影响不明显;热泳与气空间-壁面温差有关,温差越大,热泳作用越大;扩散泳与气空间内的水蒸气向壁面凝结的质量流量有关,对于相同的气空间-壁面温差的增加,扩散泳比热泳沉积增加的效果更大。

传统核电厂在发生严重事故时启动安全壳内部喷淋可清洗掉安全壳内悬浮的大部分气溶胶。另外,水凝结在气溶胶表面使颗粒变大,增

加了气溶胶的重力沉降沉积,也可增强气溶胶的去除效果。由于 AP 系列大型先进压水堆取消了安全壳内部喷淋,而改为非能动安全壳系统的外部冷却方式,使得严重事故时不能通过内部喷淋去除安全壳内的气溶胶,而必须依靠自然沉积作用<sup>[5-6]</sup>。利用本文分析的气溶胶沉积特点,在 AP 系列大型先进压水堆发生严重事故时应考虑采取措施降低安全壳壁面温度,增大气空间与壁面之间的温差,增强水蒸气向钢制安全壳壁面的凝结,提高气溶胶的扩散泳沉积,从而提高严重事故下安全壳内的气溶胶净化作用及放射性去除效果。

### 参考文献:

[1] GELBARD F. MAEROS user manual, NUREG/CR-1391, SAND80-0822 [R]. Albuquerque, N M; Sandia National Laboratories, 1982.

[2] GAUNTT R O, COLE R K, ERICKSON C M, et al. MELCOR computer code manual, Volume 2; Reference Manual Version 1. 8. 5, NUREG/CR-6119, Vol. 2, Rev. 2, SAND2000-2417/2[R]. Albuquerque, N M; Sandia National Laboratories, 2000.

[3] WEBER G. ASTEC V0 description of aerosol models in the containment part of ASTEC, ASTEC-V0/DOC/99-20[R]. France; IPSN and Germany; GRS, 1999.

[4] KLEIN-HEBLING W, SCHWINGES B. ASTEC V0 CPA module program reference manual, Rev 0, ASTEC-V0/DOC/01-34 [R]. France; IPSN and Germany; GRS, 1998.

[5] Westinghouse Electric Company LLC. AP1000 european design control document, EPS-GW-GL-700-Rev 1[R]. US; Westinghouse Electric Company LLC, 2009.

[6] Nuclear Regulation Commission. Final safety evaluation report related to certification of the AP1000 standard plant design, NUREG-1793 [R]. US; Nuclear Regulation Commission, 2011.