核电运行及事故颗粒物运动沉积分析方法研究

周涛^{1,2,3*}, 李子超^{1,2,3}, 李兵^{1,2,3}, 秦雪猛^{1,2,3}, 朱亮宇^{1,2,3}, 石顺^{1,2,3}

1. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京 102206;

2. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京 102206;

3. 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 102206

*联系人, E-mail: zhoutao@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-26; 接受日期: 2018-09-06; 网络出版日期: 2019-06-12

国家重点研发计划专项课题(编号: 2016YFC1402500)和北京市自然科学基金(编号: 3172032)资助

摘要 颗粒物的运动沉积对核电正常及事故工况的运行特性有重要影响. 本文分析了颗粒物对核电安全影响的背景、内涵及重要性; 概括了颗粒物和介质的基本特性、受力及受力模型、运动沉积模型; 给出了核电在正常运行、设计基准事故及严重事故工况下颗粒物类型的分布. 对比了国内外分析颗粒物运动特性的数值模拟方法、程序计算方法及实验分析方法; 数值模拟和程序计算方法周期短、成本低; 实验分析方法则更加接近真实情况; 三者可相互补充、相互验证; 数值模拟和程序计算的分析结果与实验方法的实验结果趋势符合较好. 得出对核电系统颗粒物运动特性的研究还处于初级阶段, 需要了解其运动特性, 尽量降低颗粒物的危害. 指出了未来核电颗粒物运动沉积的研究方向, 为核电运行及事故下颗粒物运动沉积研究提供了理论基础.

关键词 核电站, 严重事故, 颗粒物, 运动沉积, 分析方法

PACS: 28.52.Nh, 87.52.-g, 42.68.Jg, 28.41.Te

1 引言

核电厂发生严重事故的概率极低, 随着第三代反应堆华龙一号、AP1000、EPR在中国建设成功, 核电的安全可靠性得到了进一步的保证. 但这只是工程的安全性, 并不能保证事故百分百不发生. 2011年发生在日本福岛核电站的严重事故更是凸显了这一点. 核电站运行中和事故工况下都有颗粒物的产生, 颗粒物可能危害核电站的安全运行并对人体健康和环境产生危害. 通过分析国内外对核电站颗粒物的实验研究、

数值模拟和程序计算的研究进展可以发现, 上述研究均存在一定的局限性, 比如描述不准确、范围有限和没有公认的研究结果等问题, 且针对核电站颗粒物的研究还不多. 在实验研究方面, 对核电颗粒性腐蚀产物的研究, 国外大多数学者将其腐蚀产物的沉积量和组成成分作为研究方向, 但对腐蚀产物运动和沉积机理缺乏研究. 一回路冷却剂对颗粒沉积分布的影响也是无法获知的, 而沉积颗粒物的尺寸是否具有分布规律, 也没有较深入的研究. 特别是对于此类腐蚀产物在压水堆蒸汽发生器传热管中的明显沉积现

引用格式: 周涛, 李子超, 李兵, 等. 核电运行及事故颗粒物运动沉积分析方法研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 114603

Zhou T, Li Z C, Li B, et al. Study on the method of nuclear power operation and analysis of movement and deposition of accident particles (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 114603, doi: [10.1360/SSPMA2018-00236](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00236)

象, 未给予足够重视. 在数值模拟和程序计算方面, 受限于计算能力, 对核电站某一特定位置不同介质中颗粒物的研究较多, 对整体颗粒运动沉积研究较少; 对颗粒物运动规律和化学腐蚀研究较多, 对具体沉积机理和模型改进研究较少. 因此, 研究核电站严重事故下和正常运行工况下颗粒物的产生和运动, 控制其影响范围, 有着重要的科学价值和工程意义.

2 问题背景与价值

2.1 问题背景

2.1.1 正常工况

随着核电的发展, 核电的安全可靠性越来越受到人们的重视. 一回路因腐蚀产物的释放、活化和沉积等引起的停堆辐射剂量过高是核电站面临的难题, 颗粒物对管道的影响如图1所示.

从图1可以看出, 冷却剂中的颗粒物会对一回路管路产生化学腐蚀、磨蚀-腐蚀、物理磨损、加速腐蚀(FAC)等效应, 降低一回路性能. 同时颗粒物会在壁面沉积, 造成传热恶化; 管道弯头和反应堆堆芯是物理磨损和颗粒物沉积的重点区域, 严重时可能发生堵塞.

2.1.2 设计基准事故

核电站的设计基准事故, 主要包括管道破裂事故、失水事故、控制棒弹出事故、泵轴卡死及断裂事故等. 在管道破裂事故中, 蒸汽或冷却水从管道中喷出, 同时颗粒物随介质喷出, 因此颗粒物会在大空间内形成气溶胶. 第四代反应堆中的超临界水、钠和铅铋等介质中颗粒迁移也会危及系统及其周围人员的安全. 此外, 模块式球床高温气冷堆^[1]是中国第四代反应堆之一, 也是国际公认的新一代先进反应堆, 但其产生的石墨粉尘会导致一系列问题, 可能影响反应堆的安全运行.

2.1.3 严重事故

在核电站发生严重事故时, 如高能燃料与冷却剂相互作用(FCI)情况下产生的熔融物喷射到安全壳, 安全壳内会产生大量的气溶胶. 放射性气溶胶将沉积在安全壳的壁面上, 降低了自然循环换热系数, 加剧了堆芯的熔化速率, 同时气溶胶在安全壳内的扩散、沉积及分布会直接影响释放到环境中的放射性源项及整

个核电站的放射性分布. 放射性裂变产物能否被去除, 不仅直接关系到核电站的安全与否, 也关系到核电站工作人员及其周围人员的安全与否. 已经建成的第三代核电站AP1000的一个重要改进是增加了钢制安全壳, 在发生严重事故时可以通过喷淋冷却来降低反应堆中的温度和压力, AP1000非能动冷却系统如图2所示.

从图2可以看出, 由于钢制安全壳的内表面可能沉积大量的气溶胶, 传热热阻增加, 导致传热性能不佳, 严重阻碍了热量的导出, 增加了事故的严重程度. 另外, 模块式球床高温气冷堆严重事故会引发一系列的粉尘放射性污染问题, 例如钠冷快堆^[2]中, 钠火等严重事故, 也会危及系统及周围人们的安全.

2.2 类型范围

2.2.1 位置范围

以压水堆为例, 核电站安全壳内、一回路二回路管道内和蒸汽发生器内都可以产生并受到颗粒物的影响, 核电站颗粒物产生位置如图3所示.

2.2.2 堆型位置

不同反应堆堆型结构不同, 颗粒物产生和存在的位置也不相同, 不同反应堆堆型颗粒物产生位置对比

图1 颗粒物对管道影响

Figure 1 Influence of particulates on pipes.

图2 AP1000非能动冷却系统

Figure 2 Passive cooling system of AP1000.

图 3 核电系统颗粒物产生位置

Figure 3 Location of particulates in nuclear power system.

如表1所示。

从表1可以看出, 核电站最容易产生颗粒物的位置是反应堆堆芯、一回路管道和安全壳, 尤其反应堆堆芯是整个核电站运行的核心, 必须研究颗粒物运动沉积规律、控制其产生和沉积, 以预防严重事故发生。

2.2.3 运行工况下颗粒物产生类型

在核电运行和设计基准事故工况下反应堆颗粒物产生情况如表2所示。

表 1 不同堆型颗粒物产生位置

Table 1 Particle production position in different reactor type

反应堆类型	堆芯	一回路管道	蒸汽发生器	二回路	三回路	安全壳
压水堆	√	√	√	√	—	√
沸水堆	√	√	—	—	—	√
超临界水堆	√	√	—	—	—	√
熔盐堆	√	√	√	√	√	√
钠冷快堆	√	√	√	√	—	√
气冷快堆	√	√	—	—	—	√
铅冷快堆	√	√	—	—	—	√
高温气冷堆	√	√	√	√	—	√

表 2 运行工况核电站颗粒物产生情况

Table 2 Particulates production under operating conditions in nuclear power plants

正常工况	位置	描述
1	一回路	冷却剂对材料的腐蚀作用产生颗粒与沉积
2	蒸汽发生器	细小颗粒物在蒸汽发生器一、二次侧均发生沉积
3	二回路	各管道及阀门控制处产生腐蚀颗粒与沉积
4	安全壳内	少量气溶胶在安全壳内的沉积和扩散

从图3和表2可以看出, 正常运行过程中, 核电站一回路、二回路、蒸汽发生器和安全壳等都会产生并受到颗粒物的影响; 设计基准事故(DBA)中颗粒物存在位置和正常工况下相同。

2.2.4 严重事故下颗粒物产生类型

严重事故工况下反应堆颗粒物产生情况如表3所示。

从图3和表3可以看出, 严重事故情况下, 放射性气溶胶会在安全壳内和环境中释放, 造成严重后果。

2.3 问题价值

2.3.1 安全价值

放射性气溶胶在安全壳内的产生和运动机理尚未有清楚的认识, 有必要了解核事故后安全壳内气溶胶的运动特性, 设计更高效的系统, 减少颗粒物向环境的释放。当核泄漏事故发生后, 核素在附近大气和水体中扩散, 目前对核泄漏后放射性物质在环境中迁移过程的研究还不完善, 大部分只考虑大气和水体运动, 对其他介质研究较少, 对放射性颗粒物的自身过程考虑很少。研究颗粒物在安全壳内的运动机理及特性,

表 3 严重事故工况核电站颗粒物产生情况**Table 3** Particulates production under severe accidents in nuclear power plants

严重事故	位置	描述
1	安全壳	气溶胶在安全壳内的扩散
2	环境	气溶胶在大气和水体中的扩散

可以了解并减少放射性颗粒物的扩散, 具有重要的安全价值.

2.3.2 技术价值

以压水堆为例, 奥氏体不锈钢和镍基合金为核电厂一回路主设备所用的主要材料. 奥氏体不锈钢主要由304钢和316钢组成, 镍基合金主要由600和690合金组成. 这些材料在一般工业应用中具有优异的耐腐蚀性和耐高温性, 但长期在压水堆核电站高温高压水环境中, 造成的应力腐蚀开裂和晶间腐蚀等问题威胁着反应堆的安全, 给核电站的运行带来了很多麻烦. 当设备严重腐蚀到需要更换时, 由于辐射、设备制造成本等原因, 更换成本极大, 费用高, 经济效益差. 因此, 需要了解颗粒物的运动腐蚀特性, 减少颗粒物对设备的腐蚀. 研究颗粒物在运行及事故时的运动沉积规律, 可以优化和提高核电设计和运行的技术水平, 具有重要的技术价值.

2.3.3 科学价值

核电站运行及事故情况下, 对于材料腐蚀、腐蚀产物迁移预测以及辐射场计算方面, 国际上还有一些学者基于核电站水化学现场数据, 开发了完全依靠经验公式和半经验公式模型的计算机软件. 对于腐蚀产物迁移沉积和数值计算方面, 由于实验研究困难较大, 国内外学者的通常做法是, 依据半经验模型编制相关计算程序, 对腐蚀产物迁移沉积做一些程序计算. 但压水堆核电厂加锌水化学运行数据较难获得, 再加上压水堆核电站水化学环境复杂, 使得程序计算建模有较大困难, 并且计算结果难以验证. 对颗粒物的运动沉积进行研究, 可以推进两相流和工程热物理学科的进展, 具有重要的科学价值.

2.3.4 历史价值

核电经历了很长时间的发展, 但是对颗粒物运动

沉积的研究时间还较短, 因此对于颗粒物的实验和模型的分析结果没有经过时间的验证, 许多问题在实际工程中还尚未解决. 即将建成的华龙一号和刚建成的AP1000等第三代核电站中考虑了颗粒物可能的影响, 一体化程序中包含颗粒物模块, 但是尚不全面, 缺乏检验工具和手段, 模型的正确性有待历史的检验. 对颗粒物的运动沉积进行研究, 可以推进先进核电站的发展, 具有重要的历史价值.

2.4 问题内涵

2.4.1 正常运行工况

反应堆运行时, 主要包括以下三个方面内容: 一是保证压力边界部件和设备的完整性, 防止和减轻均匀腐蚀、应力腐蚀开裂和晶间腐蚀等问题; 二是保证核燃料包层的完整性, 防止腐蚀产物在堆芯沉积, 影响堆芯的传热效率和中子通量分布, 进而产生轴向偏差; 三是控制反应堆的辐照剂量, 特别是在检修时的辐照剂量. 水化学控制的优劣直接影响核电的经济性、反应堆的安全性和电厂的寿命, 由于燃料棒、堆内构件和其他部件受到高压过冷态的冷却剂磨蚀-腐蚀、腐蚀冲刷和FAC(管道流体加速腐蚀)效应的影响, 许多细小颗粒由此产生, 这些颗粒将与冷却剂一同进入主回路, 并会对一回路造成物理磨损、FAC效应、化学腐蚀和磨蚀-腐蚀. 这将降低一回路的性能, 甚至破坏一回路的完整性. 同时, 含有颗粒物的冷却剂在一回路中流动, 这会影响一回路的传热性能, 并导致局部传热恶化. 以上均会对一回路的管道产生一定的消耗进而缩短其寿命.

2.4.2 设计基准事故工况

设计基准事故工况下, 如失流事故, 管路中流量降低, 加之颗粒物运动沉积的影响, 可能对流动换热产生不利影响; 如失水事故, 同样会因颗粒物的运动沉积造成传热恶化; 如热阱丧失事故, 更是会加剧传热恶化. 因此在设计基准事故中, 包括湍流和热泳效应都会造成颗粒物的沉积. 如果不加以控制, 发展到严重事故, 造成的安全和环境影响将会更加严重. 这里, 各种颗粒物的沉积影响将是重要的安全隐患.

2.4.3 严重事故工况

随着堆芯熔化和压力容器被损坏, 可能会发生蒸

汽爆炸、高压熔融材料的喷射以及堆芯碎片与混凝土的相互作用等现象, 大量气溶胶产生并释放到安全壳中. 事故早期, 安全壳内很高的温度梯度会导致气溶胶发生热泳运动而迁移, 最后沉降到安全壳内表面. 与此同时, 高温、高压下高流速气溶胶相互之间的湍流漩涡碰撞等各种复杂作用也会引起部分气溶胶沉积. 事故晚期, 安全壳内压力和温度得到控制而大大降低, 气溶胶流速也会剧减, 此时气溶胶相互之间的湍流漩涡碰撞等作用将不再明显, 热泳沉积是气溶胶的主要沉积机理.

2.4.4 环境扩散

沿海核电站发生严重事故后, 大量放射性物质会被泄漏到海洋中, 首先需要了解事故类别和规模, 然后计算和预测事故后果, 最后制定应急决策. 核素在海洋中迁移扩散过程如图4所示.

从图4可以看出, 发生放射性核素泄漏事件后, 一部分核素通过大气传播, 一部分核素通过海水传播, 在重力和降雨等因素作用下, 部分大气中的核素落入海洋. 在海洋中, 核素受到海水运动影响的同时, 还有自身衰变、悬浮物对核素的吸附沉降和生物富集等因素的影响. 近年来, 不少学者对海洋中核素的运动情况进行了相应的研究.

表 4 颗粒物基本特征

Table 4 Basic characteristics of particulates

颗粒特性		定义	作用
粒径	等表面积直径	假设球形颗粒与被考察颗粒具有相同的表面积, 则球形颗粒的直径等于被考察颗粒的等面积直径	主要用于颗粒表面积相关过程的计算, 例如传热和吸附等作用
	等体积直径	假设球形颗粒具有与被考察颗粒相同的体积, 球形颗粒的直径等于被考察颗粒的等体积直径	主要用于计算与颗粒体积相关的过程, 如堆积颗粒的孔隙度
	等比表面积直径	假设球形颗粒具有与被考察颗粒相同的比表面积, 球形颗粒的直径等于被考察颗粒的等比表面积直径	主要用于计算燃烧和液滴蒸发等反应过程
形状系数	球形度	颗粒外形接近球体的程度	对气固两相流的流动特性以及两相间的反应均有一定影响
	圆形体	颗粒在某一平面上的投影接近圆形的程度	球形度难以测定, 一般用圆形体近似表示球形度
其他	比表面积	单位体积颗粒所具有的的表面积	对涉及气固两相间的化学反应、传热、传质等过程有重要影响
	粒度分布	反应颗粒相的最重要特性之一	
	容积份额	固体相在单位容积混合物中所占据的容积	对颗粒的运动沉积有重要影响
	沉降速度	颗粒重力与浮力达到平衡时, 以恒速下降, 称为自由沉降速度

图 4 放射性气溶胶扩散
Figure 4 Diffusion of radioactive aerosol.

3 具体对象与模型

3.1 颗粒特征

3.1.1 几何特征

颗粒物的基本特征主要包括粒径与粒径分布、颗粒的密度、比表面积、容积份额和沉降速度^[3]等. 利用颗粒物的这些基本特征, 可以研究颗粒的沉降、分离和捕集的方法. 这些基本特征也是选择、设计和使用颗粒物脱除装置的基础, 颗粒物的基本特征如表4所示.

3.1.2 类型特征

反应堆中形成的颗粒物一般来说可以分为几类,

如表5所示.

从表5可以看出, 主要的细颗粒物有一回路的活化腐蚀产物钴、银、铈等; 二回路管道内的腐蚀产物 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeCr_2O_4 等; 裂变产物碘、碱金属、碱土金属等; 反应堆燃料的氧化物铀、钚和 Na_2O 等; 钠冷快堆中的钠颗粒和高温气冷堆中的石墨粉尘.

3.2 介质类型

在不同反应堆中, 颗粒物存在的介质不同, 颗粒物的化学组成也不相同. 不同堆型介质对比如表6所示.

由于不同介质的物理和化学性质存在较大差别, 颗粒物存在介质不同, 核电运行及事故工况下颗粒物运动沉积规律也不相同. 归纳表6可以得出, 核电站颗粒物存在的主要介质有: 气体(空气、氦气、蒸汽)、液体(水、熔融盐、液态钠、液体铅合金)、超临界水. 其中, 气体黏度小、密度小、颗粒跟随性差; 液体密度大、黏度大、颗粒跟随性较好; 超临界水的物理性质介于气体和液体之间, 且在临界点附近性质变化大. 另外, 周涛团队^[4]还研究了颗粒物在氢气、二氧化碳及其混合气体中的运动情况.

3.3 作用力类型

根据是否与颗粒和流体间的相对运动^[5]有关, 作用力类型可以分成两大类: 第一类为体积和各种梯度力(与颗粒和流体间的相对运动无关), 主要包括涡泳力、布朗扩散力、涡扩散力、热泳力、压力梯度力、电泳力等; 第二类包括广义阻力和广义升力(与流体和颗粒间的相对运动有关). 广义阻力包括Basset力、黏性阻力、附加质量力等(与流体和颗粒相对运动速度方向相同的力); 广义升力包括Magnus力、Saffman力等(与气流和颗粒相对运动速度方向垂直的力). 一般来说, 在湍流边界层中, 不但要考虑与湍流相关的涡泳力和涡扩散力, 还必须考虑黏性阻力、重力、布朗扩散力、Saffman力. 颗粒物的受力模型如图5所示.

图5中, ∇V 为 Z 方向速度梯度, 单位 $1/\text{s}$; ∇U 为 X 方向速度梯度, 单位 $1/\text{s}$; M 为颗粒旋转力矩, 单位 N m ; ∇P 为压力梯度, 单位 Pa/m ; ∇T 为温度梯度, 单位 K/m ; F_g 为重力; F_{th} 为热泳力; F_L 为Saffman升力; F_d 为曳力; F_{buo} 为浮力; F_M 为Magnus力; F_{Brown} 为布朗力; F_A 为虚假质量力; F_B 为Basset力; F_p 为压力梯度力. 以

表 5 核电站颗粒物种类

Table 5 Particulates in nuclear power plants

工况	分类
正常运行工况	一回路活化腐蚀产物: 如钴、银、铈等 二回路管道内的腐蚀产物如: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeCr_2O_4 等 反应堆燃料的氧化物如: 铀、钚和 Na_2O 等
严重事故工况	裂变产物如: 碘、碱金属、碱土金属等 钠冷快堆中的钠颗粒、高温气冷堆中的石墨粉尘

表 6 介质类型

Table 6 Medium type

堆型	工况	介质
压水堆	正常工况	水、蒸汽
	事故工况	水、蒸汽、空气
沸水堆	正常工况	水、蒸汽
	事故工况	水、蒸汽、空气
超临界水堆	正常工况	水、超临界水、蒸汽
	事故工况	水、超临界水、蒸汽、空气
熔盐堆	正常工况	水、蒸汽、熔融盐
	事故工况	水、蒸汽、空气、熔融盐
钠冷快堆	正常工况	水、蒸汽、液态钠
	事故工况	水、蒸汽、空气、液态钠
气冷快堆	正常工况	水、蒸汽、氦气
	事故工况	水、蒸汽、空气、氦气
铅冷快堆	正常工况	水、蒸汽、液态铅合金
	事故工况	水、蒸汽、空气、液态铅合金
高温气冷堆	正常工况	水、蒸汽、氦气
	事故工况	水、蒸汽、空气、氦气

上力的单位均为N. 颗粒物的受力类型如表7所示.

3.4 作用力模型

目前各国对表7中所述受力类型进行了较多研究, 得出了一些计算模型, 这些模型是对颗粒物运动特性进行描述的基础.

(1) 曳力计算模型

细颗粒在黏性流体中运动时, 流体作用在细颗粒上的曳力是由压差曳力和摩擦曳力两个部分组成的. 在连续稳定的流场中, 作用在单个粒子上的曳力^[6]如下表示:

$$F_d = 0.5 C_D \rho_f A |u_p - u_f| (u_p - u_f), \quad (1)$$

图 5 颗粒物的受力模型

Figure 5 Force model of particulates.

式中, F_d 为曳力, 单位 N; C_D 为曳力系数; ρ_f 为气体密度, 单位 kg/m^3 ; A 为颗粒在速度差方向上的投影面积, 单位 m^2 , 对于球形颗粒 $A = \pi d_p^2/4$; u_p 为颗粒相速度, u_f 为气体相速度, 单位均为 m/s .

不可压缩牛顿流体中球形细颗粒的曳力系数 C_D 只是颗粒雷诺数 Re_p 的函数, 取值由以下公式确定:

$$\begin{aligned} \text{当 } 0 \leq Re_p \leq 1, C_D &= \frac{24}{Re_p}; \\ \text{当 } 1 < Re_p \leq 500, C_D &= \frac{24}{Re_p} (1 + 0.1 Re_p^{0.75}); \\ \text{当 } 500 < Re_p \leq 200000, C_D &= 0.44. \end{aligned} \quad (2)$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |u_p - u_f|}{\mu},$$

式中, μ 为气体动力黏度, 单位 Pa s ; d_p 为颗粒当量直径, 单位 m ; 其他参量同公式(1).

(2) Saffman力计算模型

当细颗粒在有速度梯度的流场中运动时, 由于颗粒两端流速的不同, 细颗粒将受到一个与主流速度方向垂直的力. 在雷诺数较低的情况下, Saffman力^[7]如下表示:

$$F_L = 1.615 \rho_f \nu^{0.5} d_p^2 (u_f - u_p) \left| \frac{du_f}{dx} \right|^{0.5}, \quad (3)$$

式中, F_L 为Saffman力, 单位 N; ν 为气体运动黏度, 单位 m^2/s ; d_p 为颗粒当量直径, 单位 m ; $\frac{du_f}{dx}$ 为气体在 X 方向上的速度梯度, 单位 $1/\text{s}$; 其他同公式(1).

(3) 热泳力计算模型

悬浮于流场中的细粒子会受到一个由于温度梯度造成的与温度梯度反向的力, 即热泳力. 热泳力^[8]如下表示:

$$F_{th} = - \frac{6\pi\mu\nu d_p C_s (k^{-1} + C_t Kn) \nabla T / T}{(1 + 3C_m Kn)(1 + 2k^{-1} + 2C_t Kn)}, \quad (4)$$

式中, d_p 为颗粒当量直径, 单位 m ; μ 为气体动力黏度, 单位 Pa s ; ν 为气体运动黏度, 单位 m^2/s ; $C_m = 1.14$ 为滑移边界条件中动量交换系数; $C_s = 1.17$ 为热滑移系数;

表 7 颗粒物受力类型

Table 7 Force types of particulates

力的类型		定义
第一类	涡扩散力	指物质在湍流流体中所施加的力, 主要依赖于流体颗粒的不规则运动
	压力梯度力	指由于压力梯度作用在颗粒上的力, 它类似于物体由于静止流体中重力引起的压力梯度而产生的浮力
	热泳力	具有温度梯度的流场中的颗粒将受到来自高温区的热压力并迁移到低温区
	电泳力	在非均匀电场中, 中性粒子在增加场强的方向上受到静电吸引
	布朗扩散力	小颗粒在介质中同一时间内各方向受到的周围分子撞击数是不同的, 从而产生随机运动的力
第二类	黏性阻力	物体相对于流体运动, 物体的附面层存在速度梯度和黏性力, 表现为物体的阻力
	广义阻力	Basset力 瞬时流动阻力, 考虑到颗粒加速过程, 在此期间, Basset力对颗粒运动有更大的影响. 此外, Basset力只发生在黏性流体中, 并且与流动的不稳定性有关
	附加质量力	颗粒在流体中做加速运动时, 它要引起周围流体做加速运动而产生的附加作用力
	广义升力	Saffman力 当颗粒所在的流体场中存在速度梯度时, 即使颗粒不旋转, 也会受到升力效应, 这种升力是由黏性流体的剪切作用引起的 Magnus力 由于速度梯度的存在, 冲刷颗粒的力量是不均匀的, 颗粒形状不规则, 导致颗粒各点所受到的形状摩擦阻力不一样, 形成旋转力矩进而导致颗粒旋转

$C_t = 2.18$ 为温度跳跃边界条件中动量交换系数; Kn 为克努森数, $Kn = \lambda/L$, λ 为气体分子的平均自由程, m ; L 为流场中物体的特征长度, m ; ∇T 为气体 X 方向上的温度梯度, 单位 K/m ; k 为气体导热系数, 单位 $W/(m \cdot K)$; T 为气体绝对温度, 单位 K .

(4) 布朗力计算模型

空气分子的不规则运动对细粒子不断撞击, 使其产生不规则的位移, 即布朗力的作用. 当颗粒较小时, 如亚微米颗粒, 布朗力有较大影响. 布朗力^[9]的幅值表示为

$$F_{\text{Browni}} = m_p G_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}}, \quad (5)$$

式中, m_p 为颗粒质量, 单位 kg ; G_i 为期望为 0 方差为 1 的高斯概率分布随机数; Δt 为积分时间步长, 单位 S ; S_0 表示为

$$S_0 = \frac{216 \nu K_b T}{\pi^2 \rho_f d_p^3 S^2 C_c}, \quad (6)$$

其中, T 为气体绝对温度, 单位 K ; $K_b = 1.38 \times 10^{-23}$ 为波尔兹曼常数, 单位 J/K ; $S = \rho_p / \rho_f$, ρ_p, ρ_f 分别为颗粒密度和流体密度, 单位 kg/m^3 ; $C_c = 1.17$ 为滑动修正系数. 其他同公式(1)和(4).

(5) 虚拟质量力

当颗粒相对于周围流体加速时, 周围会产生二次流. 为了使颗粒运动, 除了消耗加速自身所需的功外, 还要额外消耗产生二次流动的功.

对于球形颗粒, 当颗粒与流体做相对变速运动时, 虚拟质量力可表示为

$$F_a = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi a_p^3 \right) \bar{\rho} \frac{d(u_f - u_p)}{dt}, \quad (7)$$

式中, u_f 为流体速度, m/s ; u_p 为固体颗粒的速度, m/s .

对于常压下的气固悬浮系统, 只有当颗粒具有较大的加速度时, 虚拟质量力才是明显的, 因此在正常情况下可以忽略.

(6) 马格努斯旋转提升力

在气固两相流动过程中, 颗粒之间的非对心碰撞会使颗粒产生旋转. 在流体流场不均匀的情况下, 速度梯度的存在也会使颗粒产生旋转. 在低雷诺数时, 颗粒旋转会驱动流体接近其表面, 以便在与旋转方向相同的方向上增加速度, 并在另一侧降低速度. 在这

种情况下, 颗粒受到一个与颗粒运动方向垂直的力, 驱使粒子向更高速侧移动, 这种力称为马格努斯旋转提升力.

旋转球体的马格努斯旋转提升力的计算公式为

$$F_M = \pi a_p^3 \bar{\rho} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} [1 + O(Re)], \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 为球体旋转的角速度, rad/s ; $\mathbf{V}$ 为颗粒与流体的相对速度, m/s ; $\mathbf{V} = \mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f$; F_M 的方向与 $\mathbf{V}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 所在平面垂直, N ; $\bar{\rho}$ 为流体的密度, kg/m^3 .

(7) 范德华斯力

范德华斯力包括分子之间和原子之间除化学结合力以外的所有作用力, 对于半径为 a 的球体, 与平面接触时范德华斯力为

$$F_v = \left(\frac{h\omega}{8\pi^2 Z_0^2} \right) a, \quad (9)$$

式中, $h\omega$ 为利富希兹-范德华斯常数, $Z_0 \cong 4 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$); a 为颗粒半径, m .

随着两物体之间的距离增大, 范德华斯力很快减弱, 当距离大于 $100 \text{ \AA}$ 时, 这种黏着力就可以忽略不计. 故范德华斯力只存在于紧靠壁面的颗粒与壁面之间以及紧靠在一起的颗粒之间.

3.5 数值模拟模型

3.5.1 时均数学模型

在二维和三维粒子的数值模拟中, 很多人已经做了大量的工作, 积累了大量的数值模拟经验, 但作为工程应用, 目前的颗粒物相关的数值模拟主要还是基于时均 N-S 方程的数学模型. 主要模型如表 8 所示.

最早期的模型是单颗粒动力学模型^[10], 它考虑了流场中颗粒的平均或对流运动轨迹, 即已知的均匀速度场和均匀温度场, 以及颗粒速度和温度沿轨道的变化. 其缺点是没有考虑颗粒运动对流场的影响. 这是一个过于简单的模型.

20 世纪 60 年代 Zuber 等人^[11]提出了扩散漂移模型, 认为颗粒相的滑移主要是由颗粒相的瞬时速度和时均速度的差异引起的, 即颗粒相宏观运动引起的质量迁移, 它是由粒子自身的运动引起的. 颗粒的瞬时速度与颗粒的时均速度之间的差异仍然是根据 Fick 扩散定律确定的. 扩散漂移模型的上述假设也与实际情况有很大的不同. 还存在一种拟流体, 它将颗粒与真实流

表 8 数值模拟模型

Table 8 Numerical simulation models

模型	提出时间	特点
单颗粒动力学模型	最早期	考虑了流场中颗粒的平均或对流运动轨迹, 没有考虑颗粒运动对流场的影响
扩散漂移模型	20世纪60年代	认为颗粒相的滑移主要是由于颗粒相的瞬时速度与时均速度的差造成的
无滑移单流体模型	20世纪60年代后期到70年代中期	假设颗粒的时间平均速度等于局部流体相速度, 颗粒相与连续相扩散系数和温度相同, 不考虑流体与颗粒间的阻力
双流体模型	20世纪70年代初	基于欧拉框架, 将各相视为一个连续的介质, 它们彼此穿透并相互耦合, 但具有不同的运动特性
颗粒轨道模型	20世纪70年代末期	考虑流体相湍流对颗粒的影响

体相互渗透, 并且将单相流体流动的封闭模型应用于处理气相和颗粒相的两相流的多流体模型, 但这种处理是否合理有待进一步研究.

从20世纪60年代末到70年代中期, Spalding^[12]提出了一种无滑移单流体模型, 其中假定颗粒的时间平均速度等于局部流体的相速度, 颗粒相与连续相扩散系数和温度相同, 并且不考虑流体与颗粒之间的阻力, 所以模型比较简单, 精度很低, 往往与实验相差很大.

20世纪70年代末, Crowe等人^[13]和Yuu等人^[14]提出了颗粒轨道模型, 考虑到湍流对粒子的影响, 可以描述单个颗粒的运动过程, 但不能反映“穿越轨道效应(Crossing Trajectory Effect)”等颗粒行为. 为此, Gasman等人^[15]基于模型流体的时均流场和湍动能场, 提出了一种广泛应用的随机轨道模型, 并通过不同的近似选择流体的瞬时或脉动速度, 随机轨道模型相当于半直接模拟, 要给出颗粒相的详细信息, 计算量非常大.

Yang等人^[16]提出的修正扩散模型应用于二维湍流气固两相流的分析. Ounis等人^[17]推导了多维湍流气固两相流中颗粒相扩散速度的计算公式, 然后用计算公式对台阶后的二维气固两相流进行了分析, 数值模拟结果与实验结果吻合较好. 然而, 固体颗粒尺寸较大(颗粒直径为43 μm), 不涉及非常小的可吸入颗粒. 此外, 研究的重点是等温气固两相流.

3.5.2 FLUENT模型

FLUENT中已有的气固两相流模型, 可以分析具有温差的多维颗粒的流动, 为后续分析可吸入颗粒物在有温度梯度下的运动特性提供了依据. 能够实现模拟的模型主要有离散相模型^[18]、多相流模型^[19]、VOF模型、欧拉模型^[20]等, 具体比较如表9所示.

当计算颗粒的轨迹时, FLUENT跟踪计算颗粒沿着轨道的热量、质量和动量的增益和损失, 这些物理量可用于随后连续相的计算, 因此当连续相位影响离散相位时, 用户也可以考虑离散相对连续相位的作用. 离散和连续相的控制方程交替求解, 直到两个收敛(二者计算解不再变化), 从而实现双向耦合计算. 图6示意了两相之间的热量、质量与动量间的交换.

3.6 程序计算模型

3.6.1 控制方程

在程序中采用颗粒的通用动力学方程来描述与颗粒相关的守恒性. 如果将单位体积内的颗粒个数(数密度)表示成关于空间位置、颗粒体积和时间的连续函数 $n = n(x, v, t)$, 那么关于颗粒数密度分布的通用动力学方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u_i \frac{\partial n}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial n}{\partial x_i} \right) + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)_{\text{gro}} + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)_{\text{coag}}, \quad (10)$$

式中, t 为时间, s ; D 为颗粒的扩散系数; u_i 为流场的速度, m/s ; 右边第二项为颗粒生长项; 右边第三项为颗粒凝并项.

3.6.2 湍流沉积模型

有温度场的核电系统中, 颗粒在壁面沉积的机制可分为两种: 热泳沉积机制和非热泳沉积机制. 非热泳沉积机制主要有: 湍流旋涡扩散和碰撞, 布朗扩散, 惯性碰撞等. 其中对等于或大于0.1 μm 的中性(不带电荷)粒子, 可以忽略布朗扩散.

颗粒沉积效率(The Deposition Efficiency)的定义

表 9 数值模拟模型

Table 9 Numerical simulation model

模型	特点	适用范围
离散相模型	基于欧拉拉格朗日模型, 对固体相的每个颗粒单独进行求解, 从而获得详细的颗粒动力学信息, 包括颗粒-颗粒、颗粒-流体以及颗粒-器壁间相互作用	采用Lagrangian-Eulerian法. 粒子运动是基于拉格朗日方法, 连续流体计算是基于欧拉方法. DPM可以跟踪单个粒子的轨迹. 然而, 该方法不考虑颗粒对连续流体运动的影响, 因此仅适用于颗粒体积不大于总体积10%的情况
混合模型	考虑到界面的传递特性和两相间的扩散和脉冲作用; 使用滑移速度的概念, 允许相以不同速度运动	考虑了离散相与连续相之间的速度差及其相互作用, 但相和相是不相容的, 动量方程和连续方程的物理参数是各相体积的平均值, 主相的体积值不是由体积方程守恒得到的, 而是1减去其他离散相的值
欧拉模型	把颗粒和气体看作两种流体, 空间中的每个点都有其自身的速度、温度和密度. 这些流体存在于同一空间中并相互渗透, 但各自具有不同的体积分数并且存在滑移	可以对每个相进行单独的计算, 每个相具有独立的守恒方程. 适应性强, 代价是必须在每个阶段上执行迭代计算, 计算量是非常大的. 故Mixture是Eulerian模型的一种折衷
VOF模型	VOF方法使用体积率函数来表示流体自由表面的位置和流体所占据的体积. 该方法记忆量占内存小, 是一种简单有效的方法	能较好地反映多相流之间的界面情况. 例如, 大气泡在液体中以较慢的速度流动, 气液界面等. 由于VOF模型中所用的方程的物理参数, 如密度、黏度等, 是相物理性质的体积平均值, 所以各相速度之间的差不能太大, 否则计算结果的精度将受到很大影响. 通常使用非稳态仿真来模拟VOF. 主相的体积值不是由体积方程守恒得到的, 而是1减去其他离散相的值

图 6 离散相与连续相之间的热量、质量与动量的交换

Figure 6 Exchange of heat, mass and momentum between discrete and continuous phases.

是: 从流道进口起始粒子沉积为零开始, 流经一定距离后粒子沉积的百分数. 把由热泳力引起的沉积效率叫热泳沉积效率, 其他非热泳力引起的沉积效率叫湍流沉积效率. 以下是湍流沉积效率计算方法.

Wood^[21]提出湍流沉积为

$$\eta_2 = 1 - \exp(-\pi DL V^+ u^* / Q), \quad (11)$$

式中, V^+ 为无量纲速度, u^* 为摩擦速度(与壁面摩擦剪切力和流体密度相关).

$$V^+ = 0.057 S_c^{-2/3} + 4.5 \times 10^{-4} \tau^{+2} - \tau^+ g_y^+, \quad (12)$$

$$\tau^+ = \frac{Sdu^*}{18\nu^2} C_c, \quad (13)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_a}}, \quad (14)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-1.1d/2\lambda}), \quad (15)$$

式中, S_c 是施密特数; ν 是运动黏性系数, m^2/s ; S 为粒子密度与流体密度之比; u_m 为流体平均速度, m/s ; g_y^+ 为无量纲重力; τ_w 为管道壁面的剪应力(能从fluent中得出), N ; ρ_a 为空气密度 kg/m^3 .

湍流沉积^[22]过程如图7所示.

从图7可以看出, 流体流动过程中分为三个部分, 湍流核心区、过渡区和黏性底层区.

在湍流核心区中, 颗粒的径向运动主要由该区域的湍流扩散引起, 该区域的速度梯度、温度梯度都很小, Saffman力、热泳力很小, 主要是轴向的曳力起作用. 该区域中脉动强度低, 颗粒相与气相作用充分, 速度(温度)分布较为平均.

在过渡区中, 湍流扩散减弱, 气体脉动加强, 颗粒受到湍流和漩涡的双重作用, 颗粒的跟随性下降. Saffman力、热泳力逐渐增加, 曳力逐渐减小. 该区域中壁面法向的脉动速度梯度引起颗粒加速向壁面运动.

在黏性底层中, 速度场(温度场)急剧变化, 没有湍流扩散效应, 颗粒受到主要是黏性力的作用, 颗粒凭借惯性进入这一层.

3.6.3 碰撞计算模型

现有的颗粒碰撞模型主要有两种类型. 第一类是基于气固两相流中颗粒间的碰撞, 它类似于空气动力

图 7 湍流沉积
Figure 7 Turbulent deposition.

学中空气分子之间碰撞的假设, 从而在玻尔兹曼输运方程的基础上建立随机碰撞模型, 如Kitron模型^[23]和Lun模型^[24]. 第二类模型是基于拉格朗日轨道的粒子间碰撞模型, 如Oesterle模型^[25]、Tanaka模型^[26]和Sommerfeld模型^[27]. 第一类模型的相似假设限制了其应用范围, 一般只适用于高雷诺数、稀相、大颗粒(>100 μm)气固两相流. 第二类模型对纳米颗粒具有较好的适用性(<1 μm).

(1) Sommerfeld碰撞模型

Sommerfeld碰撞模型主要为: 在体积为 V , 颗粒数为 N 的网格中, 在 Δt 时间内任何一对颗粒发生碰撞的频率为

$$\eta_p = \frac{\pi(R_1 + R_2)^2 |\mathbf{v}_d| N \Delta t}{V}, \quad (16)$$

式中, $\mathbf{v}_d$ 为其相对速度, m/s; R_1 , R_2 为相碰颗粒的半径, m. 虚拟颗粒的速度遵循正态分布, 通过计算足够数量的颗粒在给定时间内通过给定网格来获得方差和平均值.

(2) Oesterle碰撞模型

Oesterle碰撞模型主要为: 半径为 r_i , 速度为 $\mathbf{v}_i$ 的颗粒与环境其他颗粒发生碰撞的频率为

$$\eta_p = \sqrt{2} \pi (r_1 + r_0)^2 |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0| N, \quad (17)$$

式中, $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_0$ 为流场中颗粒速度, m/s; r_0 , r_1 为颗粒半径, m; N 为颗粒浓度, 个/m³; 系数 $\sqrt{2}$ 是把一维情况扩展到三维情况的修正系数. 如果在网格内发生碰撞, 虚拟颗粒的速度和旋转速度取网格的平均速度, 用随机方法求出两个颗粒的碰撞点.

3.6.4 热泳沉积模型

在具有温度梯度的流场中颗粒物受到热泳力的作

用, 壁面温度低于流体温度时, 颗粒物受到的热泳力朝向壁面方向, 导致颗粒沉积在壁面上.

层流条件下的热泳沉积率计算模型如表10^[28-30]所示.

湍流条件下热泳沉积率计算模型如表11^[31-36]所示.

表11中后5个模型与第1个模型有所不同, 后5个模型计算的是任意管长 L 下的湍流热泳沉积效率, 而Batchelor和Shen是管长 $L \rightarrow \infty$ 时的总热泳沉积率.

考虑到研究对象是一个有限长的通道, 所以应当考虑通道长度和形状对热泳沉积的影响. 而Romay公式中考虑到这两个因素对热泳沉积的影响, 赵磊^[34]的改进型热泳沉积公式也是基于Romay公式. Romay公式和赵磊改进型热泳公式更适用于粒径较小的颗粒, 后面的计算较多用到这两个公式. 华北电力大学周涛团队^[35]对热泳沉积率的公式修正, 部分研究也是基于Romay公式.

3.6.5 总沉积率模型

对于两种机制共同作用的综合沉积效率, 可以采用下式方法处理:

$$\eta_{\text{combined}} = \eta_1 + \eta_2 + f_{1,2}, \quad (18)$$

式中, η_1 , η_2 是机制1和2的沉积效率, $f_{1,2}$ 是度量机制1和2交互作用的参数. 确定 $f_{1,2}$ 的方法有如下4种.

0值近似法: 综合沉积效率等于两种机制引起的效率之和, 如下式:

$$f_{1,2} = 0. \quad (19)$$

依次作用法: 综合沉积效率相当于假定第二种沉

表 10 层流条件下的热泳沉积率计算模型

Table 10 Thermodynamic deposition rate calculation model under laminar flow

模型	公式
Stratmann模型 ^[28]	$\eta_{\infty} = 1 - \exp\left[-0.845 \left(\frac{PrK_{th} + 0.025}{T_w / (T_e - T_w) + 0.28}\right)^{0.932}\right]$
Walker模型 ^[29]	$\eta_L = \beta_1 = 4.07 \frac{PrK_{th}}{T_w} (T_e - T_w) \left(\frac{L}{Pe_g}\right)^{2/3} \varphi_0$
Lin模型 ^[30]	$\eta = 0.549\beta_1^{0.48}, 0.006 < \beta_1 < 0.15$
	$\eta = 0.783\beta_1^{0.94}, 0.007 < \beta_1 < 0.19$

表 11 湍流条件下热泳沉积率计算模型

Table 11 Thermal bath deposition rate calculation model under turbulent condition

模型	公式
Batchelor模型 ^[31]	$\eta_{\infty} = PrK_{th} \left(\frac{T_e - T_w}{T_e} \right) \left(1 + (1 - PrK_{th}) \left(\frac{T_e - T_w}{T_e} \right) \right)$
Romay模型 ^[32]	$\eta_L = 1 - \left[\frac{T_w + (T_e - T_w) \exp(-\pi DhL / \rho QC_p)}{T_e} \right]^{PrK_{th}}$
Housiadas模型 ^[33]	$\eta_L = 1 - \left(\frac{T_w}{T_e} \right)^{PrK_{th}}$
赵磊模型 ^[34]	$\eta_L = \frac{T_e - T_w}{T_e} PrK_{th} \left(1 - \exp(-\pi DhL / \rho QC_p) \right) + 5.22 \left(\frac{T_e - T_w}{T_e} \right)^2$
周涛模型 ^[35]	$\eta = 1 - (T_w / T_e)^{\frac{PrK_{th}}{6}}$ $\eta = 1 - 3.1608 Nu^{-0.2854} (T_e / T_w)^{0.0875} (K_{th} Pr)^{-0.0040}$
Jyh-Shyan Lin模型 ^[36]	$\eta_L = 1 - \exp(-0.2 \beta_i), 0.017 < \beta_i < 34$

积机制发生在第一种沉积机制没有发生作用的那些粒子身上, 是一种依次关系, 如下式:

$$\eta_{combined} = \alpha \eta_1 + (1 - \alpha) \eta_2. \quad (20)$$

负值法: 综合沉积效率为两种独立沉积效率之和减去其相互作用的乘积, 如下式:

$$\eta_{combined} = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2. \quad (21)$$

正值法: 综合的沉积效率为两种独立沉积效率之和加上其相互作用的乘积, 如下式:

$$\eta_{combined} = \eta_1 + \eta_2 + \eta_1 \eta_2. \quad (22)$$

4 研究方法与管理

4.1 类型及进展

4.1.1 分类

目前研究核电站中颗粒物的方法主要有: 程序计算、数值模拟和实验方法。

程序计算方法^[37]主要是利用颗粒物运动沉积模型编制程序对颗粒物进行研究。细颗粒物在流体中受到热泳力^[38]、重力^[39]、湍流力^[40]等影响, 可以分别建立受力模型, 然后编制相应的计算程序进行分析。

数值模拟方法主要是利用ANSYS等软件对颗粒物进行模拟研究。周涛课题组^[41]利用ANSYS等数值模

拟软件对颗粒物运动沉积行为进行计算分析, 并研究沉积机理。在反应堆严重事故分析^[42]过程中, 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求解的离散方程, 并应用到MAEROS模型中。MELCOR^[43]、ASTEC^[44]等主流程序的气溶胶运动计算模块均以该模型为基础, 并与其他事故现象的诸多模型进行耦合。

利用实验方法对颗粒物运动沉积机理进行研究也是重要方法。如华北电力大学核热工安全与标准化研究所的气溶胶运动沉积实验台架^[45]和中国原子能科学研究院的非能动冷却安全壳内气溶胶迁移机理试验^[46]。国际上和国内均已经搭建了研究严重事故下核电站颗粒物运动沉积实验台架, 主要研究安全壳和管道内颗粒物的重力沉降、热泳沉积和湍流沉积等非能动沉积行为。其中包括欧洲联合研究中心(Joint Research Centre)的GRACE试验平台^[47]、德国的THAI试验平台等。托斯坎实验室^[48]采用实验和数值模拟两种方法对喷淋条件下安全壳内气溶胶的脱除进行了研究, 分析了不同压力、温度及粒径对气溶胶运动沉积的影响, 表明大颗粒更容易被冲刷去除, 小颗粒则相对困难。萨尔内实验团队^[49]对严重事故下核电站内氧化碘的形成过程和气溶胶的行为进行了分析研究, 通过实验和模型研究得出了严重事故下气溶胶运动沉积的影响因素及相关规律。

4.1.2 进展

国内外核电运行和颗粒物运动沉积的研究进展如表12^[45,46,50-55]所示。

4.2 类型及进展

4.2.1 数值模拟

(1) 软件比较

目前, 世界上很多商用CFD软件都能对颗粒物的运动进行数值模拟, 但是其求解器的算法, 适应性等各有千秋, 能计算颗粒物的软件及其特点如表13所示。

(2) 模拟计算流程

对于存在温差的气固两相流场, 除重力外, 颗粒相还受到其他的各种力引起的加速作用, 用数值方法计算的基本流程如图8所示。

从图8可以看出, 对颗粒进行数值分析时, 首先需要对颗粒物与流体关系进行基本假设, 如颗粒直径很小, 不考虑气体的浮力和质量力的存在; 颗粒相是稀薄相, 不考虑颗粒之间的碰撞等。然后建立几何模型,

并进行网格划分, 从而选取适合的边界条件, 如速度入口、压力出口、入口边界颗粒物的浓度、固体壁面边界条件。然后选择合适精度的算法和监测量进行调节, 最后对于稳态计算进行网格独立性验证, 对于瞬态计算还需对步长进行独立性验证, 得到计算结果。

4.2.2 程序计算

(1) 程序比较

对核电厂颗粒物迁移预测计算方面, 国际上还有一些学者基于核电站现场数据, 开发了完全依靠经验公式和半经验公式的计算软件, 具体程序如表14^[45,56-65]所示。

(2) 程序计算流程

目前大多程序计算的具体流程如图9所示。

4.2.3 实验方法

(1) 方法比较

目前常规的去颗粒装置主要有机械脱除、电

表 12 国内外研究进展

Table 12 Research progress at home and abroad

机构	进展
德国贝克尔公司 ^[50,51]	完成了安全壳内气溶胶运动行为实验, 并在此基础上进行了数值模拟和程序计算
日本原子能院 ^[52,53]	完成了气溶胶大尺度管道完整性实验(WIND), 研究了碘化铯气溶胶在管道内的行为
意大利比萨大学 ^[54]	进行了ASTEC和MELCOR软件的FPT-2测试, 并对气溶胶和裂变产物(FP)进行了灵敏度分析
法国辐射防护研究所 ^[55]	完成了ASTEC V2.1程序的开发, 测试了碘气溶胶粒子、气态分子碘的运动行为, 采用了大量仪器来测量参数, 如温度、压力、湿度、氢气、氧气的浓度等
中国原子能科学研究院 ^[46]	完成了放射性气溶胶在安全壳内和管道内的数值模拟和程序计算工作, 同时完成了非能动冷却安全壳内的气溶胶迁移机理试验
华北电力大学核热工安全与标准化研究所 ^[45]	完成了高温高压水中、超临界水中、常温常压水中、空气中、铅铋合金和二氧化碳中细颗粒物运动沉积的数值模拟和程序计算, 完成了气溶胶运动沉积实验, 即将完成超临界水中细颗粒物运动沉积实验

表 13 数值模拟软件及其特点

Table 13 Numerical simulation software and its features

数值模拟软件	特点
FLUENT	一种优秀的不可压缩流动求解器, 具有较小的可压缩流动特性. 非结构化网格求解器. 它不是最好的, 但是是最通用的
CFX	唯一使用完全隐式耦合算法的大型商业软件. 该算法的先进性、丰富的物理模型以及前处理和后处理的完整性使ANSYS CFX在精度、计算稳定性、计算速度和灵活性方面具有出色的性能
OpenFOAM	与商用CFD软件ANSYS Fluent和CFX类似, 但它是开源的, 将偏微分方程离散化
STAR-CCM+	强大的网格能力, 先进的物理模型, 强大的可视化, 强大的兼容性, 能够处理超过10亿个网格
Phoenics	世界上第一个商用CFD软件, 具有很大的开放性, 大量的模型选择, 提供了欧拉算法和拉格朗日算法

图 8 模拟计算流程

Figure 8 Numerical calculation process.

泳脱除、布袋脱除、加湿脱除. 但是, 对于超细颗粒而言, 由于它们的质量小, 气流的跟随性非常好, 并且它

们几乎总是跟随气流并且难以从气流中分离, 因此, 常规除尘方法的去除效率相对较低. 核电站中环境复杂, 常规脱除装置难以实现, 热泳沉积作为一种自然脱除颗粒物方法是一个很好的方向.

为了研究热泳运动沉积机理, 国内外学者做了大量实验研究, 具体结果如表15^[45,66-70]所示.

(2) 方法举例

由华北电力大学周涛教授带领的核热工安全与标准化研究所^[45]设计了可视化颗粒物热泳沉积实验装置. 实验系统的整体设计如图10所示.

本实验系统沿流动方向包含几个部分: 颗粒发生部分、空气加热部分、气固搅浑部分、实验段部分、测量部分和气固两相流中的后处理部分. 实验台布置如图11所示.

首先, 由颗粒发生装置制备出粒径为0.1–1 μm的空心微珠颗粒; 之后, 为了得到温度较高的气固两相流, 由气泵鼓风, 将空气不停地送入管道中. 气泵还设有旁路系统, 用以稳定整个系统的流量, 同时对于调节流量也有辅助作用. 空气进入加热器后, 将空气加热到100°C–200°C, 加热器通过控制箱进行温度调节; 最后,

表 14 国内外颗粒物计算程序

Table 14 Domestic and foreign particulate calculation program

程序	特点
日本学者开发的ACE-II程序 ^[56]	认为腐蚀产物可以进入内氧化层和外氧化层, 而不直接进入冷却剂, 计算了腐蚀产物对管壁的沉积和侵蚀; 依赖于电厂数据对传热系数进行修正, 完全依赖经验公式
韩国开发的CRUDTRAN程序 ^[57,58]	用于预测活化和腐蚀产物的运动行为, 可以预测铁离子和微粒的行为; 将主回路简化为4个部分, 分别是堆芯腐蚀产物、蒸汽发生器腐蚀产物、冷却剂中的颗粒物和离子
瑞士开发的DISER程序 ^[57,59]	建立了腐蚀产物溶解于冷却剂的模型. 模拟主冷却剂中3种物质形态下的腐蚀产物: 离子、胶体、微粒
保加利亚开发的MIGA程序 ^[59,60]	该程序考虑了微粒和离子两种物质形态, 管壁只考虑一层氧化层和一层沉积层
法国CEA开发的PACTOLE程序 ^[61]	PACTOLE是用于预测压水堆腐蚀产物的活化行为随时间变化的经验程序; 世界上最好的腐蚀产物计算程序之一是PACTOLE程序, PACTOLE程序考虑运输过程中腐蚀产物的侵蚀、沉淀、溶解、热迁移和沉积
匈牙利开发的PADTRAN程序 ^[57]	用于不活泼核素的迁移模拟, 微粒会沉积在所有区域的表面, 包括堆芯的燃料包壳
西屋公司开发的CORA程序 ^[62]	该程序可以对压水堆系统内腐蚀产物的行为做出可靠性预测, 包括腐蚀产物的释放、腐蚀产物在燃料表面的沉积以及在中子辐照区的活化、活化产物的沉积等
法国IRSN开发的ASTEC程序 ^[63]	主要应用于事故下源项确定、概率评估、事故管理和物理分析等, 考虑蒸汽冷凝情况下, 分析裂变产物气溶胶的运动行为
美国核管会开发的MELCOR程序 ^[64]	严重事故下, 应用于反应堆压力容器熔融物行为评估和裂变产物气溶胶行为预测
中科华核电技术研究院开发的LILY程序 ^[65]	基于已有成熟理论及实验参数, 模拟分析一回路系统中基金属、基金属表面氧化层、冷却剂中的溶解物和悬浮物、各区域管壁表面沉积物之间的物质交换现象, 最终获得主循环冷却剂系统中主要腐蚀产物的分布; 但是只能计算稳态, 而不能计算瞬态
华北电力大学核热工安全与标准化研究所开发的AIR程序 ^[45]	多气载颗粒运动沉积、气液固细颗粒运动沉积计算程序; 颗粒沉积计算程序, 但该软件侧重于颗粒物理沉积计算

图 9 程序计算流程图

Figure 9 Flow chart of program calculation.

表 15 实验对比

Table 15 Experimental comparison

	实验段	测量方式
Yu-Chen Chang实验 ^[66]	两个不同直径的圆管嵌套组成, 圆管之间通冷却水冷却	利用冷凝核子计数器(Condensation Nucleus Counter, CNC)和激光气固计数器(Laser Aerosol Spectrometer, LAS-X)在实验管段的出口处和入口处测量颗粒数目随时间变化趋势
Chiou实验 ^[67]	长2 m, 直径为3 cm的塑料管, 内部有直径为1.6 cm的不锈钢管的沉积壁面	校准的浮力测量仪
Toda实验 ^[68]	两水平放置的平板间的2 mm通道	利用CCD照相机
Romay实验 ^[69]	长0.965 m、内径0.49 cm的不锈钢圆管, 外为环形冷却剂通道; 在预热段中可以将气固两相流体加热到一定的温度, 有水冷(20°C)的环形通道	利用CNC
杨瑞昌实验 ^[70]	采用实验段总长1086 mm, 断面管道尺寸21.3 mm×40 mm	三维PDA系统, 即三维粒子动态分析仪(Particle Dynamics Analyzer)
周涛实验 ^[45]	矩形通道总长1086 mm, 断面主通道尺寸为20 mm×20 mm, 冷却水通道截面尺寸为长60 mm, 宽35 mm的凹型槽结构	三维PDA系统, 即三维粒子动态分析仪(Particle Dynamics Analyzer)

热空气与颗粒充分混合后, 进入实验通道. 由于实验通道三面冷却, 因此会有一个温度梯度, 从而发生热泳运动和热泳沉积. 在气固两相流流过通道时, 使用PDA测量系统和热电偶测温系统对相关参数进行准确测量. 尾部气固两相流可以进一步加以利用, 从而进行排放源出口模拟实验.

4.3 应用效果

4.3.1 数值模拟应用

利用数值模拟方法能够直观反映颗粒物在流场中的运动情况、流体和颗粒物的相互作用情况等, 得到的结果更加直观精细. 例如, 周涛团队核热工安全与

图 10 实验系统

Figure 10 Experimental system.

图 11 (网络版彩图)实验布置

Figure 11 (Color online) Experiment layout.

标准化研究所成员方晓璐^[71]对AP1000严重事故下安全壳颗粒物运动数值模拟结果如图12所示。

从图12(a)可以看出,通过数值模拟方法能够得到清晰的颗粒物速度轨迹线,从而可以预测在整个安全壳的上下封头处,会有四个相对比较对称的漩涡,且最大速度也出现在上下封头的漩涡处。这主要是由于空气温度较高,与冷壁面之间发生热交换,形成了自然循环,并且在上下椭圆封头处,会出现二次流现象,在自然循环及二次流的综合作用下就形成了四个漩涡。

从图12(b)可以看出,数值模拟方法能够得到安全壳任意位置的浓度结果,在水平平面内,气溶胶浓度分布均呈现靠近中心位置浓度比较低,而两边边缘位置浓度分布高。这主要是因为水平平面内由于在靠近安全壳边缘的位置温度梯度比较大,因而由于温度梯度产生的热泳力就更大,因此在边缘位置热泳沉积就

更大。

4.3.2 程序计算应用

利用程序计算方法计算速度更快,能够更有针对性地分析颗粒物运动结果,但是只能得到少量的结果。例如,周涛团队成员杨旭^[72]研究了不同介质中颗粒物沉积率的变化,计算结果如图13所示。

从图13可以看出,利用程序计算的方法可以得到沉积率的具体大小,程序计算的结果是建立在理论计算和实验基础上的,得到合适的计算模型需要实验支撑。当粒径增加时,热泳沉积率和总沉积率略有下降,湍流沉积率不断增加,但是3种沉积效率变化都不大。总沉积效率和热泳沉积效率要大于湍流沉积效率。可见粒径对高温气冷堆中的粉尘的沉积影响不大。

4.3.3 实验方法应用

用实验方法对某一重要参数进行验证更有利于对程序计算和数值模拟的完善。周涛团队成员王泽雷^[73]对颗粒物在管道中的运动进行了可视化研究,实验结果如图14所示。

从图14可以看出,通道中分散系小颗粒的轴向速度变化趋势大致为“倒U”形,即通道中间区域的颗粒具有较大的轴向速度,随着对壁面的靠近,两侧颗粒轴向速度逐渐减小;特别是邻近壁面的区域,颗粒轴向速度迅速下降达到极小值,说明壁面的限制与摩擦作用限制了小颗粒轴向速度在邻近区域中的发展。紧邻通道两侧壁面的区域中平均粒径最小,说明较小颗粒大量聚集于这两个区域,其次平均粒径较小的区域为通道中间区域,说明该区域中较大颗粒更快的向四周扩散,就留下相对较多的较小颗粒。

图 12 (网络版彩图)气溶胶在安全壳内的分布. (a) 碘气溶胶在安全壳内的速度迹线分布; (b) 不同种类气溶胶在安全壳内水平面分布

Figure 12 (Color online) Distribution of iodine aerosols in containment. (a) Distribution of velocity traces of iodine aerosols in containment; (b) different kinds of aerosols distributed in the containment level.

图 13 (网络版彩图)不同介质中颗粒物沉积率. (a) 空气中沉积率的变化; (b) 铅铋合金中沉积率变化

Figure 13 (Color online) Changes of deposition rate in different. (a) Changes of deposition rate in the air; (b) changes of deposition rate in the lead-bismuth alloys.

4.3.4 方法比较

(1) 综合对比

数值模拟、程序计算和实验方法三者各有优缺点, 3种方法并不是相互独立的, 有机地将3种方法结合起来能够更好地服务于颗粒物的运动沉积研究. 3种方法的优缺点如表16所示.

(2) 实例比较

清华大学刘若雷^[74]实验结果与公式计算结果的脱除效率对比如图15所示.

从图15可以看出, 数值模拟和经验公式计算得到的颗粒脱除效率与实验测量结果都符合较好, 可以从一定的角度反映颗粒的沉积运动规律, 可是如果从定

量角度来看却存在着一定的差异. 分析认为, 由于实验时实际颗粒的粒径范围较宽, 不同尺度的颗粒可能在沉积机理上并不完全相同, 并且由于在数值模拟和经验公式计算中采用了取平均粒径进行计算的处理方法, 也造成计算结果与实验结果可能存在一定差异.

5 发展方向与趋势

(1) 要依靠数学方法, 同时注意不同数学方法原理带来的误差, 注重选择准确合理的方法对不同方法的分析结果进行相互验证.

(2) 目前, 由于缺乏实际的运行数据, 许多研究使

图 14 (网络版彩图)颗粒物运动实验结果. (a) 颗粒物轴向平均速度分布; (b) 颗粒物中间测点粒径分布

Figure 14 (Color online) Experimental results of particulates movement. (a) Axial mean velocity distribution of particles; (b) particle size distribution in the middle measuring point.

表 16 方法比较

Table 16 Method comparison

方法	优点	缺点
数值模拟	能够直观地得到流场中所有位置的具体信息, 计算结果全面; 成本较低; 周期较短	受计算机性能影响较大; 计算量大; 需要进行实验验证, 不能直接计算沉积率
程序计算	能够得到相对全面的信息; 成本低; 周期短	计算结果不够直观; 需要进行实验验证
实验方法	是程序计算和数值模拟的基础; 可以呈现更加直观的认识	受环境影响大; 影响因素多; 测量困难; 存在测量误差和人为误差; 数据后处理复杂; 成本大; 周期长

图 15 不同方法计算结果对比. (a) 总沉积效率比较; (b) 热泳沉积效率比较

Figure 15 Comparison of calculated results by different methods. (a) Total deposition efficiency comparison; (b) thermophoretic deposition efficiency comparison.

用程序计算数据或测试数据. 因此, 需要加强模糊数学、粗糙集理论、未确知数学和灰色理论等数学方法的应用.

(3) 在建模过程中要注意简化模型的精准性; 也要注意非线性精准模型的求解性. 避免快速简化模型带来的误差影响到模型本身的可靠度, 也要实现利用非

线性精准模型得到清晰答案, 便于计算可靠性结论.

(4) 由于气体温度梯度的作用, 会产生一个力来迫使悬浮在气体中的颗粒向低温移动, 这种过程就叫热泳运动. 当气溶胶和周围固体壁之间存在温度梯度时, 会出现热泳动现象, 并引起热泳沉积. 因此, 热泳沉积

过程的研究是非常重要的课题.

(5) 颗粒的沉积运动是一个受到湍流力、重力和热泳力等多种作用的综合过程, 这些作用是相互增强, 还是有削弱现象, 还要根据具体实际环境和时间效应进一步完善计算模型.

(6) 目前对大颗粒的研究较多, 相对成熟, 对亚微米、纳米等小颗粒物的研究还很欠缺, 应该加强这方面研究.

(7) 在用非确定论对物理过程建模过程中, 对于多维不确定参数和小功能故障进行概率评估, 存在计算精度差, 计算效率低以及工作量大的问题, 所以需要提高效率, 减少计算成本和负担.

(8) 建立准确的物理热工计算模型, 编制程序并进行实验验证, 积极实现在核热耦合条件下的特性分析.

(9) 增强系统运行经验, 强化数据库建立和完善, 注重人因及其相应的安全文化.

(10) 随着新型第三代和第四代反应堆的研究发展, 要研究不同介质中不同种类颗粒运动沉积对换热的影响.

(11) 在核电站中, 物理及化学沉积, 及其加锌的影响, 也是必须要考虑的重要影响因素.

(12) 对于严重事故情况下的放射性, 要掌握颗粒运动随核素在空气或海洋中的变化规律, 减少事故危害.

(13) 在核电站运行过程中, 微纳米颗粒在通道中的运动, 发挥其正向影响避免其反向影响值得研究.

(14) 目前放射性颗粒物在大气中的扩散模型相对简单, 需要根据放射性颗粒物性质, 进一步研究其在大气中的迁移机制, 并耦合实时气象, 开发实时、可视化、高精度的软件.

(15) 放射性颗粒物在水体中的扩散模型较少, 并且相对粗糙, 需要进一步研究其在水体中的迁移扩散机制, 以建立更精准的扩散模型.

(16) 放射性颗粒物的扩散与源项、大气沉降、地形、气象环境等多种因素有关, 跨学科性强, 需要综合研究.

6 结论

(1) 研究不同介质不同类型颗粒物对核电系统的安全性有重要影响, 必须对颗粒物的运动沉积特性进行深入研究.

(2) 对核电系统颗粒物运动特性的研究还处于初级阶段, 需要了解其运动特性, 尽量降低颗粒物的危害. 同时, 注意稀相、多相流与材料耦合的作用机制和微纳米粒子的运动特性.

(3) 分析方法要多渠道并举, 选择建立精确模型, 实现准确的理论模拟和实验验证.

参考文献

- Ling L, Sun H, Gao C, et al. Requirement for RPV radiation supervision of the improved M310 units and its practice in the high temperature gas cooled reactor. *Nucl Safety*, 2018, 17: 7–11
- Hou B, Tian L, Zhou K, et al. Concept design scheme of small sodium cooled fast reactor nuclear power used for offshore oil drilling platform. *At Energy Sci Tech*, 2018, 52: 495–501
- Porcheron E, Lemaitre P, Marchand D, et al. Experimental and numerical approaches of aerosol removal in spray conditions for containment application. *Nucl Eng Des*, 2010, 240: 336–343
- Fan Y N. Study on Thermally Deposited Fine Particles with Multiple Airborne Particles (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2013 [樊昱楠. 多气载细颗粒热泳沉积研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2013]
- Healy D P, Young J B. An experimental and theoretical study of particle deposition due to thermophoresis and turbulence in an annular flow. *Int J Multiphase Flow*, 2010, 36: 870–881
- Lu X. Study on the Settlement Characteristics of Diesel Engine Exhaust Particles by Thermophoresis and Relevitation Rules (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009 [卢晓. 柴油机排气微粒热泳沉降特性及再悬浮规律的研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2009]
- Xue Y. Study on the Movement of Fine Particles in the Flow and Temperature Boundary Layer (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2002 [薛元. 细颗粒在流动与温度边界层中的运动规律研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2002]
- Zhou T, Yang R C, Zhao L. Study on removal of inhalable particulate matter by turbulent circular channel thermophoresis (in Chinese). *Enviro*

- Pollut Control Tech Equip, 2006, 7: 134–137 [周涛, 杨瑞昌, 赵磊. 湍流环形通道热泳脱除可吸入颗粒物技术研究. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7: 134–137]
- 9 Anbuechzian N, Srinivasan K, Chandrasekaran K, et al. Thermophoresis and Brownian motion effects on boundary layer flow of nanofluid in presence of thermal stratification due to solar energy. *Appl Math Mech-Engl Ed*, 2012, 33: 765–780
- 10 Oykc H A. Aerosol Mechanics. Gu Z C, et al. Trans. Beijing: Science Press, 1960 [Oykc H A. 气溶胶力学. 顾震潮, 等译. 北京: 科学出版社, 1960]
- 11 Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J Heat Transfer*, 1965, 87: 453–468
- 12 Spalding D B. Mathematical Models of Continuous Combustion. In: Emissions from Continuous Combustion Systems. Boston: Springer, 1972. 3–21
- 13 Crowe C T, Sharma M P, Stock D E. The particle-source-in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows. *J Fluids Eng*, 1977, 99: 325–331
- 14 Yuu S, Yasukouchi N, Hirokawa Y, et al. Particle turbulent diffusion in a dust laden round jet. *AIChE J*, 1978, 24: 509–519
- 15 Gasman A D, Ioannides E. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors. AIAA Paper No. 81-0323, 1981. 1285–1293
- 16 Yang R, Zhou W, Fukuda K, et al. Modified diffusion flux model for analysis of turbulent gas-particle two-phase flows. *Tsinghua Sci Technol*, 2005, 10: 189–195
- 17 Ounis H, Ahmadi G, McLaughlin J B. Dispersion and deposition of Brownian particles from point sources in a simulated turbulent channel flow. *J Colloid Interface Sci*, 1991, 147: 233–250
- 18 Peters B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual fuel particles. *Combust Flame*, 2002, 131: 132–146
- 19 Li Z, Xi G. Numerical investigation of unsteady IGV-impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor. *J Northwestern Polytech Univ*, 2007, 22: 1715–1721
- 20 José C H S, Arias-Zugasti M. Analysis of the space charge singularity near the Taylor cone apex via simplified Eulerian model for electrospray beams in vacuum. *J Aerosol Sci*, 2018, 118: 82–99
- 21 Wood N B. The mass transfer of particles and acid vapour to cooled surfaces. *J Inst Energy*, 1981, 76: 76–93
- 22 Merrill B J, Hargman D L. MELCOR aerosol transport module modification for NSSR-1. Technical Reports. Office of Scientific & Technical Information, 1996
- 23 Kitron A, Elperin T, Tamir A. Monte Carlo simulation of gas-solids suspension flows in impinging streams reactors. *Int J Multiphase Flow*, 1990, 16: 1–17
- 24 Lun C K K, Savage S B. A simple kinetic theory for granular flow of rough, inelastic, spherical particles. *J Appl Mech*, 1987, 54: 47–53
- 25 Oesterle B, Petitjean A. Simulation of particle-to-particle interactions in gas solid flows. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19: 199–211
- 26 Kawaguchi T, Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method (comparison between the two- and three-dimensional models). *Powder Technol*, 1998, 96: 129–138
- 27 Sommerfeld M, Zivkovic G. Recent advances in the numerical simulation of pneumatic conveying through pipe systems. *Computational Methods in Applied Sciences*. Hirsch Ch, ed. London: Elsevier Science Publishers S.V., 1992. 201–212
- 28 Stratmann F, Otto E, Fissan H. Thermophoretic and diffusional particle transport in cooled laminar tube flow. *J Aerosol Sci*, 1994, 25: 1305–1319
- 29 Maxwell J C. On stresses in rarified gases arising from inequalities of temperature. *Philos Trans R Soc London*, 1879, 170: 231–256
- 30 Lin J S, Tsai C J, Chang C P. Suppression of particle deposition in tube flow by thermophoresis. *J Aerosol Sci*, 2004, 35: 1235–1250
- 31 Batchelor G K, Shen C. Thermophoretic deposition of particles in gas flowing over cold surfaces. *J Colloid Interface Sci*, 1985, 107: 21–37
- 32 Romay F J, Takagaki S S, Pui D Y H, et al. Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow. *J Aerosol Sci*, 1998, 29: 943–959
- 33 Housiadas C, Drossinos Y. Thermophoretic deposition in tube flow. *Aerosol Sci Tech*, 2005, 39: 304–318
- 34 Zhao L. Experimental Study on the Motion Characteristics of Inhalable Particles in the Temperature Field (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Beijing: Tsinghua University, 2006 [赵磊. 温场内可吸入颗粒物运动特性实验研究. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2006]
- 35 Zhou T. Postdoctoral Research Report of Tsinghua University. Beijing: Tsinghua University, 2005 [周涛. 清华大学博士后研究报告. 北京: 清华大学, 2005]
- 36 Lin J S, Tsai C J, Tung K L, et al. Thermophoretic particle deposition efficiency in turbulent tube flow. *J Chin Instit Chem Eng*, 2008, 39: 281–

- 37 Khaki Arani M, Esteki M H, Ayoobian N. Validation of STRCS code for calculation of fission-product transport in reactor coolant system during severe accidents. *Ann Nucl Energy*, 2018, 114: 206–213
- 38 Tao C, Zhao G, Yu S, et al. Experimental study of thermophoretic deposition of HTGR graphite particles in a straight pipe. *Prog Nucl Energy*, 2018, 107: 136–147
- 39 Nicolaou L. Inertial and gravitational effects on aerosol deposition in the conducting airways. *J Aerosol Sci*, 2018, 120: 32–51
- 40 Li Z Z, Wei J, Bo Y U. Theoretical and numerical analyses of interphase forces in dilute particle-laden channel turbulence. *J Univ Chin Academy Sci*, 2017, 34: 147–152
- 41 Wang Y, Zhou T, Li B. Simulating Fine Particle Deposition in Coolant Channel of Fast Reactor. In: *Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering*. 2017
- 42 Sun X T, Chen L L, Wei Y S, et al. Analysis of the influence of passive containment cooling on aerosol deposition under serious accidents (in Chinese). *Atom Energy Sci Tech*, 2016, 50: 2219–2223 [孙雪霆, 陈林林, 魏严淞, 等. 非能动安全壳冷却对严重事故下气溶胶沉积影响分析. *原子能科学技术*, 2016, 50: 2219–2223]
- 43 Summers R M, Cole R K J, Smith R C, et al. MELCOR computer code manuals: Primer and user's guides, Version 1.8.3 September 1994. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports. Sandia National Laboratories, 1995
- 44 Kljenak I, Dapper M, Dienstbier J, et al. Thermal-hydraulic and aerosol containment phenomena modelling in ASTEC severe accident computer code. *Nucl Eng Des*, 2010, 240: 656–667
- 45 Li Y. Study on Sedimentation Mechanism of Submicron Particles in Smog Emission Source (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2012 [李洋. 雾霾排放源亚微米颗粒物热泳沉积机理研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2012]
- 46 Xiao Z G, Sun X T, Chen L L, et al. Design of concentration measurement point for test of in-containment aerosol deposition. *Nucl Safety*, 2017, 16: 82–94
- 47 Snepvangers L J M, van de Vate J F. Diffusiophoresis of fission product aerosol in an LWR containment after core meltdown. Report. Holland: Joint Research Centre, 1987
- 48 Porcheron E, Lemaitre P, Nuboer A, et al. Heat, mass and aerosol transfers in spray conditions for containment application. *J Power Energy Sys*, 2008, 2: 633–647
- 49 Dickinson S, Auvinen A, Ammar Y, et al. Experimental and modelling studies of iodine oxide formation and aerosol behaviour relevant to nuclear reactor accidents. *Ann Nucl Energy*, 2014, 74: 200–207
- 50 Gupta S, Schmidt E, von Laufenberg B, et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behaviour in light water reactor containments. *Nucl Eng Des*, 2015, 294: 183–201
- 51 Kljenak I, Mavko B. Simulation of containment thermal-hydraulics in the Marviken Blowdown 16 experiment with ASTEC and CONTAIN codes. *Nucl Eng Des*, 2011, 241: 1063–1070
- 52 Igarashi M, Hidaka A, Yu M, et al. Scoping test and analysis on CsI aerosol behavior in a straight pipe in WIND project. In: *Proceedings of the ASME 1996 ICONE 4: ASME/JSME International Conference on Nuclear Engineering*. New Orleans, 1996
- 53 Hidaka A, Maruyama Y, Igarashi M, et al. Experimental and analytical study on aerosol behavior in WIND project. *Nucl Eng Des*, 2000, 200: 303–315
- 54 Gonfiotti B, Paci S. Stand-alone containment analysis of Phébus FPT tests with ASTEC and MELCOR codes: The FPT-2 test. *Heliyon*, 2018, 4: e00553
- 55 March P, Simondi-Teisseire B. Overview of the facility and experiments performed in Phébus FP. *Ann Nucl Energy*, 2013, 61: 11–22
- 56 International Atomic Energy Agency. Modelling of Transport of Radioactive Substances in the Primary Circuit of Water-cooled Reactors. IAEA-TECDOC NO.1672. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. 4–52
- 57 Miura S, Hamada S, Masamune A, et al. CUB-domain containing protein 1 represses the epithelial phenotype of pancreatic cancer cells. *Exp Cell Res*, 2014, 321: 209–218
- 58 Lee C B. Modeling of Corrosion Product Transport in PWR Primary Coolant. Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990
- 59 Iqbal, Rafique M, Miza N M, et al. Review of computer codes for modeling corrosion product transport and activity build-up in light water

- reactors. *Nukleonika*, 2010, 55: 263–269
- 60 Dinov K A. A model of crud particle/wall interaction and deposition in a pressurized water reactor primary system. *Nucl Tech*, 1991, 94: 281–285
- 61 Liu J, Liu Y Y, Zhang C M. Application of corrosion product program in radiation safety of primary circuit of pwr nuclear power plant (in Chinese). In: Proceedings of the 2013 Annual Conference of Radiation Protection Branch of China Nuclear Society. Xiamen, 2013 [刘健, 刘圆圆, 张春明. 腐蚀产物程序在压水堆核电厂一回路辐射安全中的应用. 见: 中国核学会辐射防护分会2013年学术年会. 厦门, 2013]
- 62 Kang S, Sejvar J. CORA-II model of PWR corrosion-product transport. Technical Report. TI85920892, Nuclear Technology Division, 1985
- 63 Chatelard P, Belon S, Bosland L, et al. Main modelling features of the ASTEC V2.1 major version. *Ann Nucl Energy*, 2016, 93: 83–93
- 64 Lim K, Cho Y, Whang S, et al. Evaluation of an IVR-ERVC strategy for a high power reactor using MELCOR 2.1. *Ann Nucl Energy*, 2017, 109: 337–349
- 65 Guan Y, Zhang X X, Wang Y N, et al. Development and verification of activated corrosion product analysis software LILY (in Chinese). In: Proceedings of the 7th Symposium on Reactor Physics and Nuclear Materials. Xi'an, 2015 [管宇, 张晓茜, 王一楠, 等. 活化腐蚀产物分析软件 LILY 的研发与验证. 见: 第七届反应堆物理与核材料学术研讨会. 西安, 2015]
- 66 Chang Y C, Ranade M B A, Gentry J W. Thermophoretic deposition in flow along an annular cross-section: Experiment and simulation. *J Aerosol Sci*, 1995, 26: 407–428
- 67 Chiou M C, Cleaver J W. Effect of thermophoresis on sub-micron particle deposition from a laminar forced convection boundary layer flow onto an isothermal cylinder. *J Aerosol Sci*, 1996, 27: 1155–1167
- 68 Toda A, Ohnishi H, Dobashi R, et al. Experimental study on the relation between thermophoresis and size of aerosol particles. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 2710–2713
- 69 Francisco J R, Takagaki S S, David Y H, et al. Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent tube flow. *J Aerosol Sci*, 1998, 29: 942–959
- 70 Zhou T, Yang R C, Zhang J G, et al. Experimental study on the thermophoretic law of submicron particle motion in the boundary layer of rectangular tube (in Chinese). *Proce CSEE*, 2010, 30: 92–97 [周涛, 杨瑞昌, 张记刚, 等. 矩形管边界层内亚微米颗粒运动热泳规律的实验研究. *中国电机工程学报*, 2010, 30: 92–97]
- 71 Fang X L. Study on Sediment Movement Characteristics of Aerosol Under AP1000 Serious Accident (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2017 [方晓璐. AP1000严重事故下气溶胶运动沉积特性研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2017]
- 72 Yang X. Study on the Difference of Fine Particle Deposition in Gas and Liquid Medium (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2016 [杨旭. 气体和液体介质中细颗粒沉积的差异性研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2016]
- 73 Wang Z L. Study on the Mixing of Solid Liquid and Fine Particles in Narrow Channels (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: North China Electric Power University, 2013 [王泽雷. 窄通道中固液细粒子混合运动研究. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2013]
- 74 Liu R L. Characteristics of Inhalable Particulates in Turbulent Temperature Field (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2009 [刘若雷. 湍流温度场内可吸入颗粒物运动特性研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2009]

Study on the method of nuclear power operation and analysis of movement and deposition of accident particles

ZHOU Tao^{1,2,3*}, LI ZiChao^{1,2,3}, LI Bing^{1,2,3}, QIN XueMeng^{1,2,3},
ZHU LiangYu^{1,2,3} & SHI Shun^{1,2,3}

¹ School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

² Institute of Nuclear Thermal-Hydraulic Safety and Standardization, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

³ Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

The movement and deposition of particulates play an important role under normal and abnormal operation conditions in nuclear power plants. The background, connotation and importance of the particulates influence on nuclear power plants security are analyzed. The basic characteristics, force and force models, and motion deposition models of particulates and the medium are summarized. The particulates distribution types of nuclear power plants in normal operation condition, design basis accidents and severe accidents conditions are given. The numerical simulation methods, program calculation methods and experimental methods for analyzing particulates motion characteristics at home and abroad are compared. It is concluded that the numerical simulation and the program calculation methods have the advantages of short period, low cost, and the experimental method is closer to the real situation. The three methods can complement and verify each other. The trend of numerical simulation and program calculation are in good agreement with the experimental results. The study on the motion characteristics of particulates in nuclear power system is still in its infancy, and it is necessary to understand its motion characteristics so as to minimize the hazards of particulates. The direction of future analysis methods for the movement of nuclear power particles is pointed out. It provides a theoretical basis for the study of the movement and deposition of particulates under normal operation and accident conditions in nuclear power plants.

nuclear power plants, serious accident, particulates, movement and deposition, analysis methods

PACS: 28.52.Nh, 87.52.-g, 42.68.Jg, 28.41.Te

doi: [10.1360/SSPMA2018-00236](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00236)