

基于欧拉-欧拉两相流模型的核事故 放射性物质扩散特性数值模拟

陈 诺¹, 赖志贤², 王世奇¹, 王明军¹, 田文喜¹, 秋穗正¹, 苏光辉¹

(1. 西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049;

2. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 为精细刻画核电厂事故后放射性物质扩散的时空动态特征, 提出了一种基于欧拉-欧拉两相流模型的放射性物质扩散数值模拟方法, 选择适用于描述放射性物质受浮升力驱动和环境风影响上升扩散过程的相间作用模型和湍流模型, 并将多层嵌套正六面体网格划分方法与高精度、高计算效率数值离散方法相结合, 实现了大空间内放射性物质扩散的快速、精确数值模拟。在验证了多层嵌套的正六面体网格可以更好地减小数值模拟过程中基于网格质心的格林-高斯梯度项离散格式带来的误差的基础上, 对扩散上升过程进行动态分析, 阐明了放射性物质在环境风场作用下上升扩散的一般规律。结果表明: 在上升扩散前期, 浮力起绝对主导作用, 放射性物质上升速度较大, 涡环外表面出现温度垂直分层, 环境风对涡环运动过程影响可忽略不计; 随着放射性物质上升, 高海拔环境风使烟团整体沿下风向扩散, 温度迅速下降, 涡环结构不再明显。

关键词: 核事故; 放射性物质扩散; 欧拉模型; 数值模拟

中图分类号: TL339

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-017-08

Numerical Simulation of Nuclear Accident Radioactive Materials Dispersion Characteristics Based on Eulerian Two-Phase Flow Model

CHEN Nuo¹, LAI Zhixian², WANG Shiqi¹, WANG Mingjun¹,
TIAN Wenxi¹, QIU Suizheng¹, SU Guanghui¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi;

2. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong)

ABSTRACT: To finely characterize the spatiotemporal dynamic features of the radioactive materials dispersion following a nuclear power plant accident, a numerical simulation method based on the Eulerian two-phase flow model was proposed. First, the interphase interaction and turbulence models suitable for describing the buoyancy-driven and ambient wind-affected rise and dispersion processes were selected as basic models. Furthermore, a multi-layer nested hexahedral grid partitioning method was combined with a high-precision, computationally efficient numerical discretization method to achieve rapid and accurate numerical simulations of radioactive materials dispersion over large spaces. Results of computation verified that the error caused by the Green-Gauss gradient term discretization scheme based on the grid centroid can be reduced using the

收稿日期: 2024-01-27

第一作者: 陈诺 (1999—), 女, 博士研究生, 主要从事核反应堆热工水力研究。E-mail: chennuo2436@stu.xjtu.edu.cn

引用格式: 陈诺, 赖志贤, 王世奇, 等. 基于欧拉-欧拉两相流模型的核事故放射性物质扩散特性数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 17-24.

nested hexahedral grid. Thereby, the four stages of the radioactive materials dispersion process rapid vertical rise, vortex ring displacement, dispersive ascent, and trailing edge separation and sedimentation were dynamically analyzed. Accordingly, general laws of radioactive materials dispersion under the influence of ambient wind fields were elucidated. Results demonstrated that in the initial stage of rise, buoyancy plays an absolutely dominant role, resulting in a relatively high rising velocity. Simultaneously, a vertical temperature stratification appears on the outer surface of vortex rings and the influence of ambient wind on vortex rings can be neglected. As the radioactive materials rise, the high-altitude ambient wind makes the radioactive materials disperse in the downwind direction, leading to a rapid temperature drop and less distinct structures of vortex rings.

KEYWORDS: nuclear accident; radioactive materials dispersion; Eulerian model; numerical simulation

核电厂严重事故中,核反应堆的泄漏会释放大量的放射性物质,由于此类事故气体上升速度更快,放射性物质在短时间内上升扩散,对风向下游数十公里范围内产生放射性威胁,对自然环境、人体健康和公共安全造成极大的破坏。对核电厂事故后放射性物质扩散的物理场动态时空分布进行数值模拟,能为辐射剂量计算提供数据,为快速应急决策奠定基础。

早期的理论分析及机理性实验研究^[1-4]通过简单的物理模型和类比实验来探讨放射性物质的上升演变规律,难以找到能够准确反映不同条件下的普适系数,过分依赖于实验参数和经验公式的半定量计算,也已落后于流体力学的发展现状。在表象实验研究^[5-8]方面,现有扩散顶高及宽度经验关系式适用范围较小,需要严格限定源项和大气环境。且受限于遥测技术,实验无法获得放射性物质的温度、速度和浓度等物理场分布,无法对扩散动态过程作深入的机理分析,也无法直接用于验证数值模拟中所使用的相关模型。在扩散特性数值模拟研究方面^[9-17],各种模式均得到了广泛应用,但多数研究假设放射性物质在垂直方向上已经趋于稳定,不考虑热抬升过程,直接对大气环境在水平方向上对污染物的输运过程进行模拟。且源项输入存在较大误差,呈现出高度敏感性,造成最终结果存在较大误差;考虑的计算域范围大,网格尺度大,分辨率较低,无法精细刻画放射性物质的时空动态特征。

本文基于欧拉模式建立了一套适用于不同当量和尺度下的三维放射性物质扩散数值模拟方法,选择适用于描述污染物受浮升力驱动和环境风影响上升扩散过程的相间作用模型和湍流模型,将多层嵌套正六面体网格划分方法与高精度、高计

算效率数值离散方法相结合,以实现大空间内放射性物质扩散的快速、精确数值模拟。在此基础上,对扩散过程进行动态分析,阐明放射性物质在环境风场的作用下上升扩散的一般规律。

1 模型建立

将放射性物质扩散过程视为两相过程,本节建立欧拉-欧拉两相流模型和相间作用模型,为每一相求解一系列方程。

1.1 欧拉-欧拉两相流模型

欧拉两相流模型包含6个控制方程,分别对应于各相的守恒方程,其具体形式如下。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) = \dot{m}_{cg} - \dot{m}_{gc}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{v}_c) = \dot{m}_{gc} - \dot{m}_{cg}$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\alpha_g \nabla p +$$

$$\nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} + (\dot{m}_{cg} \mathbf{v}_c - \dot{m}_{gc} \mathbf{v}_g) + \mathbf{M}_{gc}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c \mathbf{v}_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{v}_c \mathbf{v}_c) = -\alpha_c \nabla p +$$

$$\nabla \cdot \bar{\tau}_c + \alpha_c \rho_c \mathbf{g} + (\dot{m}_{gc} \mathbf{v}_g - \dot{m}_{cg} \mathbf{v}_c) + \mathbf{M}_{cg}$$

3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g h_g) = \alpha_g \frac{dp}{dt} +$$

$$\bar{\tau}_g \cdot \nabla \mathbf{v}_g - \nabla \cdot \mathbf{q}_g + S_g + Q_{cg} + \dot{m}_{cg} h_{cg} - \dot{m}_{gc} h_{gc}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c h_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{v}_c h_c) = \alpha_c \frac{dp}{dt} +$$

$$\bar{\tau}_c \cdot \nabla \mathbf{v}_c - \nabla \cdot \mathbf{q}_c + S_c + Q_{gc} + \dot{m}_{gc} h_{gc} - \dot{m}_{cg} h_{cg}$$

当求解域仅存在空气和放射性物质两相时,两相的体积分满足

$$\alpha_g + \alpha_c = 1$$

式中: 下标 g 和 c 分别表示空气相和放射性物质相; α 为相体积分数; ρ 为密度; $\mathbf{v}$ 为速度; $\dot{m}_{gc}$ 为空气质量变化率; $\dot{m}_{cg}$ 为放射性物质质量变化率; h 为焓值; $\bar{\tau}$ 为某一相的应力张量; $\mathbf{M}$ 为相间动量相互作用; $\mathbf{q}$ 为某一相的热流密度; S 为附加的能量源; Q 为通过相界面的相间能量传递; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

1.2 湍流模型

本研究使用模型的输运方程分别基于湍流动能 k 的 k 方程和基于湍流动能耗散率 ε 的 ε 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = & \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k & \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon & \end{aligned}$$

式中: k 为湍流动能; μ_{eff} 为有效黏度; ε 为湍流动能耗散率; R_ε 为旋流对湍流的贡献; G_k 为由平均速度梯度带来的湍动能; G_b 为由浮升力作用带来的湍动能; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 均为经验常量; S_k 为用户自定义的湍动能源项; S_ε 为用户自定义的湍流耗散率源项; x_i 、 x_j 为方向坐标; v_i 为组分 i 的速度。

1.3 两相流相间作用模型

1.3.1 曳力模型

曳力是指当离散相弥散在连续流体中, 且两者之间存在相对运动时, 由于黏性作用而使离散相受到的与相对运动方向相反的作用力。作用到单个粒子上的曳力可以表示为

$$\mathbf{D}_c = \frac{1}{2} C_D \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c| (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c) A_c$$

式中: $\mathbf{D}_c$ 为单个粒子所受曳力; C_D 为曳力系数; A_c 为粒子在垂直于流动方向上的投影面积。

假设粒子在流体中形状为规则球形, 则单位体积内粒子的数目为 $n_0 = \frac{6\alpha_c}{\pi d_c^3}$, 单位体积内连续相施加在离散相上的曳力为

$$\mathbf{F}_D = n_0 \mathbf{D}_c = \frac{3\alpha_c}{4d_c} C_D \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c| (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c)$$

式中: d_c 为放射性物质相粒径。

由于放射性物质上升扩散过程速度大, 且伴

有强烈的卷吸作用, 湍流强度较大, 雷诺数较高, 形态多变, 本研究使用 Tomiyama 模型进行计算, 该模型雷诺数适用范围广, 且不受离散相形态的影响, 表达式为

$$C_D =$$

$$\max \left(\min \left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right)$$

式中: Re 为无量纲数, 表示惯性力与黏性力之比; Eo 为无量纲数, 表示浮力与表面张力之比。

1.3.2 升力模型

由于流场的不均匀性, 连续相速度在垂直于流动方向上不可避免地会存在速度梯度, 当弥散相在连续相剪切流场中运动时将受到升力作用, 升力的方向与两相相对速度方向垂直, 可以表示为两相相对速度与液相速度旋度的表达式, 即

$$\mathbf{F}_L = -C_L \rho_g \alpha_c (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c) \times (\nabla \times \mathbf{v}_g)$$

式中: C_L 为升力系数; $\mathbf{F}_L$ 为升力; $\nabla \times$ 表示求旋度。

本研究使用 Moraga 模型进行计算^[18], 将粒子和粒子尾流引起的涡流相互引起的升力和空气动力引起的升力结合, 有

$$C_L =$$

$$\begin{cases} 0.0767, & \varphi \leq 6000 \\ -(0.12 - 0.2 \exp(-\frac{\varphi}{3.6} \times 10^{-5})) \cdot \exp(\frac{\varphi}{3} \times 10^{-7}), & 6000 < \varphi < 5 \times 10^7 \\ -0.6353, & \varphi \geq 5 \times 10^7 \end{cases}$$

式中: $\varphi = Re_p Re_\omega$, $Re_p = \frac{\rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_c| d_c}{\mu_g}$, $Re_\omega = \frac{\rho_g |\nabla \times \mathbf{v}_g| d_c^2}{\mu_g}$; μ_g 为空气动力黏度。

1.3.3 湍流耗散力模型

湍流耗散力是主流区中湍流脉动的体现, 使得离散相从高浓度区域向低浓度区域运动。本研究采用 Burns 等提出的基于相间曳力的计算模型^[19], 认为湍流耗散力由相间曳力作用造成的连续相湍流涡旋引起, 对相间曳力进行 Favre 平均得到湍流耗散力计算关联式为

$$\mathbf{F}_{TD} = C_{TD} \frac{C_D \mu_g \mu_{t,g} A_i Re_g}{8 d_c \rho_g \sigma_{gc}} \left(\frac{\nabla \alpha_c}{\alpha_c} - \frac{\nabla \alpha_g}{\alpha_g} \right)$$

式中: C_{TD} 为无量纲经验常数; $\mu_{t,g}$ 为空气湍流黏度; A_i 为相界面面积; σ_{gc} 为涡流黏度普朗特数。

1.3.4 虚拟质量力模型

当离散相相对于连续相加速运动时, 需要加

入虚拟质量力的作用。其表达式为

$F_{VM} =$

$$0.5\rho_g\alpha_c\left\{\frac{d\mathbf{v}_g}{dt}+(\mathbf{v}_g\cdot\nabla)\mathbf{v}_g-\left[\frac{d\mathbf{v}_c}{dt}+(\mathbf{v}_c\cdot\nabla)\mathbf{v}_c\right]\right\}$$

1.3.5 相间传热传质模型

由于相界面温度始终维持在饱和值 T_{sat} ，且相界面不具备储存热量的能力，因此，离散相向相界面的传热量即为离散相向连续相的传热量。单位体积内连续相和相界面之间的热量传递 q_{gc} 为

$$q_{gc} = h_{gc}(T_{sat} - T_g)$$

式中： h_{gc} 为单位体积内的换热系数； T_{sat} 为饱和温度； T_g 为空气相温度。

离散相与相界面之间的传热可以通过松弛时间尺度计算，单位体积内的气相与相界面之间的传热量为

$$q_{cg} = \frac{\alpha_c \rho_c c_{p,c}}{\delta t} (T_{sat} - T_c)$$

式中： δt 为松弛时间尺度； $c_{p,c}$ 为定压比热； T_c 为放射性物质相温度。

当选择求解化学组分的守恒方程时，组分输运模型通过求解第 i 种组分的对流扩散方程来预测每种组分的局部质量分数 Y_i ：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i$$

式中： $\mathbf{J}_i$ 为组分 i 的扩散通量； R_i 为化学反应中生成物组分 i 的净生成率； S_i 为从分散相加上任何自定义的源项生成率。在湍流流动中，组分输运模型通过以下形式计算质量扩散：

$$\mathbf{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$

式中： $D_{i,m}$ 为质量扩散系数； $D_{T,i}$ 为热扩散系数； Sc_i 为湍流施密特数， $Sc_i = \frac{\mu_i}{\rho D_i}$ ，默认情况下 $Sc_i = 0.7$ ， μ_i 为湍流黏度， D_i 为湍流扩散率。

2 大空间内放射性物质扩散数值模拟

2.1 网格划分及条件设置

放射性物质扩散是一个长时间的瞬态过程，对于此类大空间计算域的长时瞬态数值模拟，需要在保证数值模拟精度的前提下尽可能提升计算效率，以满足事故应急快速决策的需要。为此需要对计算域划分尺寸合适的结构化网格，并在源项附近对计算域进行局部加密，沿下风向和竖直

上升方向适度放大计算网格。

目前，此类数值模拟研究中常用的网格划分策略为沿扩散的方向步进放大网格，沿该方向上，后一个网格的长度是前一个网格的固定倍数。使用该策略对长宽高分别为 18、12、12 km 的矩形计算域进行网格划分。为有效降低网格数量，同时避免局部网格的长宽比过高，先对计算域进行 O 型块划分后再进行网格的步进放大，如图 1 所示，最终网格数量为 980 万。

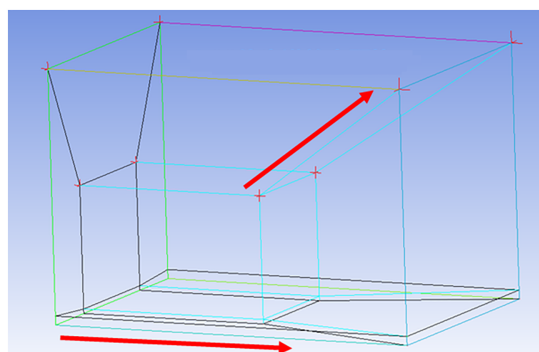


图 1 步进放大网格示意

Fig. 1 Schematic diagram of stepwise amplification grid

计算过程中发现，该网格划分策略在 O 型网格的内部斜边处使局部网格角度过大，如图 2 所示。在这些大角度网格处求解压力场时出现了失真，如图 3 所示。

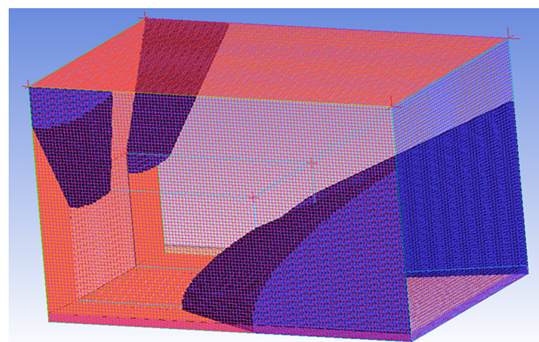


图 2 步进放大网格后角度大于 150° 网格的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of grids with angles greater than 150° after stepwise amplification

造成压力场失真的原因是采用基于网格质心的格林-高斯梯度离散格式，在使用相邻网格质心的中点作为插值点来计算相邻网格中间面上的值，当网格斜率过大时会引起失真。

为了更好地匹配梯度项离散求解格式，采用多层正六面体网格嵌套的划分策略对计算域进行网格划分。首先将计算域划分为 5 个嵌套的子计算

域并分别独立建立块, 所有子计算域的长宽高比例保持一致, 相邻计算域间的高度差为 2 400 m, 如图 4 所示。分别对每个子计算域划分正六面体网格, 如图 5 所示, 由内向外各计算域的网格尺寸分别为 22.5、45、60、70、80 m, 相邻计算域之间的交界面使用 interface 插值面传递数据。最终网格数量为 940 万, 网格质量极好。

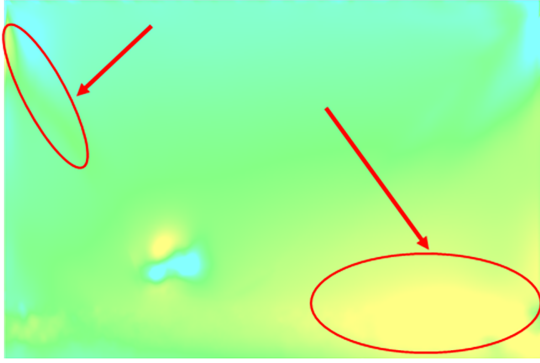


图 3 步进网格造成的压力场求解失真

Fig. 3 Distortion of pressure field solution caused by stepwise grid

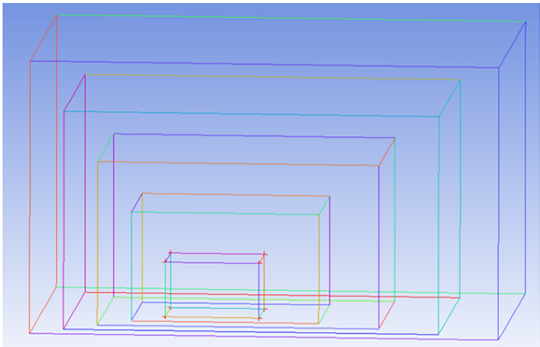


图 4 多层嵌套网格块划分示意

Fig. 4 Schematic diagram of multi-layer nested grid block partitioning

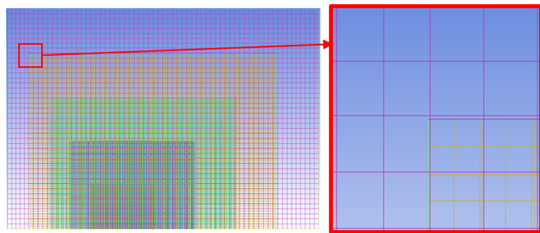


图 5 多层嵌套网格节点划分示意

Fig. 5 Schematic diagram of multi-layer nested grid node partitioning

求解后得到的压力场如图 6 所示。可以看出, 整个计算域内沿垂直方向受大气环境的温度、密度影响的压力分层在求解过程中保持稳定, 压力场不会出现求解失真现象, 仅近放射性物质区域

局部压力发生变化。

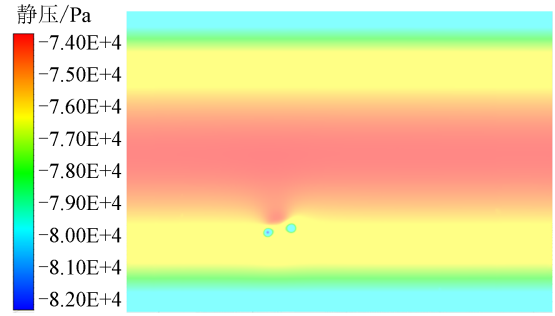


图 6 多层嵌套网格求解得到压力场

Fig. 6 Pressure field obtained by solving of multi-layer nested grids

对比步进放大与多层嵌套正六面体网格划分策略可以发现, 使用多层嵌套正六面体网格可以更好地减小数值模拟过程中基于网格质心的格林-高斯梯度项离散格式带来的误差, 因此, 本研究采用该方法对计算域进行网格划分。

设定源项半径为 150 m, 初始上升速度为 50 m/s, 风速随海拔的变化关系式为

$$U_{\text{wind}} = -0.009\,52H + 8.094\,72 \times 10^{-6}H^2 - 1.524\,85 \times 10^{-9}H^3 + 1.179\,4 \times 10^{-13}H^4 - 3.242\,6 \times 10^{-18}H^5$$

式中: U_{wind} 为风速; H 为海拔。

温度和压力随海拔的变化依据国际航空委员会的推荐公式进行设置:

$$T = \begin{cases} 288.15 - 6.5H, & 0 < H \leq 11 \\ 216.65, & 11 < H < 20 \end{cases}$$

$$P = 101\,325 (1 - 2.257 \times 10^{-2}H)^{5.256}$$

式中: T 为温度; P 为气压。

计算域下部边界设置为无滑移壁面, 其余边界全部设置为速度边界, 以拟合后的风速、压力、温度关系式对边界进行设置。

2.2 计算结果分析

截取不同时刻放射性物质的速度云图, 如图 7 所示。可以观察到: 前期放射性物质受到浮升力作用快速垂直上升, 上升速度显著高于风速; 待温度逐渐降低, 环境风起主要作用, 涡环开始朝下风向偏移, 同时由于涡环的迎风面降温更快, 上升速度略小于背风面; 顶部放射性物质进一步扩散, 涡环强度减弱并变得不再明显, 同时尾迹区与环境的温差进一步减小, 尾迹区的比例进一步增大且停止上升; 尾迹区温度与环境温度相同时, 由于重力大于浮升力而开始沉降, 上部放射性物质继续上升并与尾迹区分离。

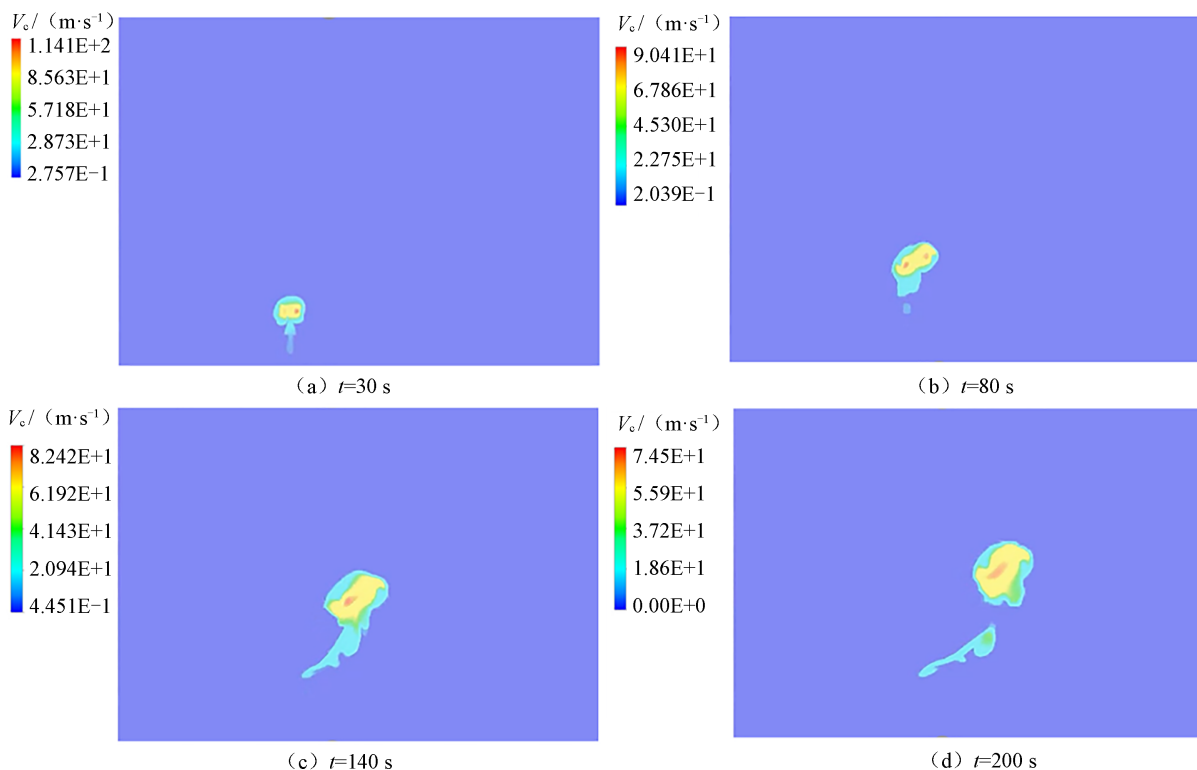


图 7 不同时刻放射性物质形态

Fig. 7 Radioactive materials forms at different moments

3 放射性物质扩散时空动态分析

本节对 2.2 中所述的扩散上升阶段的放射性物质体积分数、温度和速度的时空分布进行动态分析,探究放射性物质在环境风场下的上升和扩散规律。

$t=80\sim 140$ s 时,涡环区域温度降低,对外部空气的卷吸作用减弱。同时,由于风速随海拔升高而增大,放射性物质受环境风影响明显,整体沿下风向迁移扩散,尾迹区放射性物质留存比例增大。

图 8 为 $t=140$ s 时刻放射性物质中心剖面体积分数云图。可以看出,相比涡环偏移阶段,涡环边缘处的体积分数下降 1 个数量级,涡环内部体积分数峰值下降至 0.116,尾迹区体积分数下降 2 个数量级。虽然上部的流场结构与上一阶段相同,但由于涡环卷吸作用减弱,内部的对流扩散作用使整体中心的体积分数场区域变得相对均匀,空气造成的背风面涡环边缘局部低浓度区域消失。

图 9 展示了 $t=140$ s 时刻放射性物质的温度场。可以看出,涡环处的温度迅速下降,背风面峰值温度为 376 K,迎风面峰值温度为 330 K,二者的

温差进一步下降,但仍显著高于同一水平面的环境温度 (250 K)。

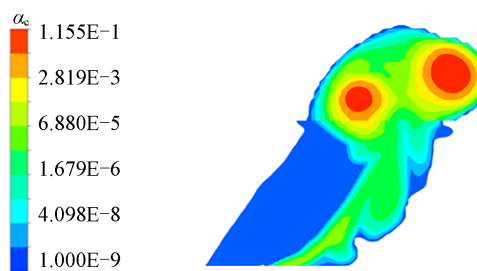
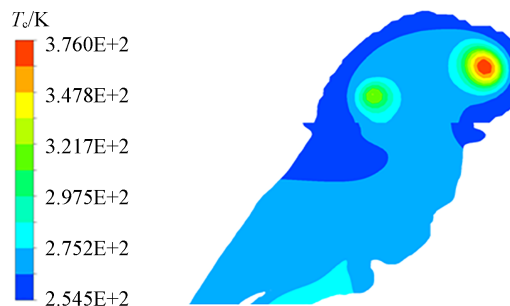
图 8 放射性物质中心剖面体积分数场 ($t=140$ s)Fig. 8 Volume fraction field of the central cross-section of the radioactive materials ($t=140$ s)图 9 放射性物质中心剖面温度场 ($t=140$ s)Fig. 9 Temperature field of the central cross-section of the radioactive materials ($t=140$ s)

图 10 展示了 $t=140$ s 时刻放射性物质的中心剖面速度场。可以看到, 由于涡环温度的下降, 涡环卷吸作用明显减弱, 涡环的结构已不再明显, 而是逐步扩散并与外围空气流场逐渐融合。

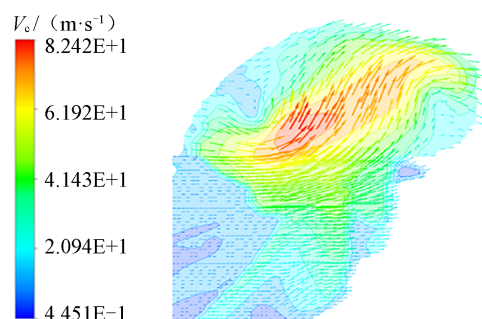


图 10 放射性物质中心剖面速度场 ($t=140$ s)

Fig. 10 Velocity field of the central cross-section of the radioactive materials ($t=140$ s)

4 结论

本文聚焦核电厂事故后放射性物质扩散阶段的物理场动态时空分布, 提出了一种基于欧拉-欧拉两相流模型的放射性物质扩散数值模拟方法, 选择适用于描述放射性物质受浮升力驱动和环境风影响上升扩散过程的相间作用模型和湍流模型, 并将多层嵌套正六面体网格划分方法与高精度、高计算效率数值离散方法相结合, 实现了大空间放射性物质扩散的快速、精确数值模拟, 阐明了放射性物质在环境风场的作用下上升扩散的一般规律。本文的主要结论如下。

1) 使用多层嵌套的正六面体网格可以更好地减小数值模拟过程中基于网格质心的格林-高斯梯度项离散格式带来的误差。

2) 放射性物质在环境风场作用下上升扩散的一般规律为: 前期浮力起绝对主导作用, 放射性物质上升速度较大, 涡环外表面出现温度垂直分层, 环境风对涡环运动过程影响可忽略不计; 当放射性物质上升后, 高海拔环境风使放射性物质整体沿下风向扩散, 温度迅速下降, 涡环结构不再明显。

参考文献:

[1] MORTON B R, TAYLOR G I, TURNER J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical

and Physical Sciences, 1956, 234(1196): 1-23.

[2] TURNER J S. Buoyant vortex rings[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1957, 239(1216): 61-75.

[3] VASEL-BE-HAGH A, CARRIVEAU R, TING D S, et al. Drag of buoyant vortex rings[J]. Physical Review, E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 2015, 92(4): 24-43.

[4] 郑毅, 应纯同. 燃烧火球浮力涡环实验与数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 187-190.

ZHENG Y, YING C T. Experimental and numerical study of combustion fireball buoyant vortex rings[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(2): 187-190.

[5] MORTON B R. Discrete dry convective entities: I review[M]//The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection. Dordrecht: Springer, 1997: 143-173.

[6] SHARON A, HALEVY I, SATTINGER D, et al. Cloud rise model for radiological dispersal devices events[J]. Atmospheric Environment, 2012, 54: 603-610.

[7] CAO X Y, ROY G, BROUSSEAU P, et al. A cloud rise model for dust and soot from high explosive detonations[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, 36(4): 303-309.

[8] 吴思远, 贺金鹏, 顾卫国, 等. 基于风洞实验的丘陵下垫面气溶胶大气扩散特性研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(11): 2086-2093.

WU S Y, HE J P, GU W G, et al. Study on aerosol atmospheric dispersion characteristic under hilly underlying surface condition based on wind tunnel experiment[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(11): 2086-2093.

[9] 葛宝珠, 陆芊芊, 陈学舜, 等. 放射性核素大气扩散数值模拟研究综述[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1599-1609.

GE B Z, LU Q Q, CHEN X S, et al. A review of the numerical simulations of the atmospheric dispersion of radionuclides[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1599-1609.

[10] JEONG H, PARK M, JEONG H, et al. Terrain and building effects on the transport of radioactive material at a nuclear site[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 68: 157-162.

[11] LIU Y, LI H, SUN S D, et al. Enhanced air

- dispersion modelling at a typical Chinese nuclear power plant site: Coupling RIMPUFF with two advanced diagnostic wind models[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 175-176: 94-104.
- [12] DRAXLER R, ARNOLD D, CHINO M, et al. World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, 139: 172-184.
- [13] MÉSZÁROS R, LEELÖSSY Á, KOVÁCS T, et al. Predictability of the dispersion of Fukushima-derived radionuclides and their homogenization in the atmosphere[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 15915.
- [14] HU X, LI D, HUANG H, et al. Modeling and sensitivity analysis of transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi accident [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14 (20): 11065-11092.
- [15] VALLERO D A. Air pollution dispersion models [M]//*Air Pollution Calculations*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 429-448.
- [16] MA X F, ZHONG W Q. CFD-DPM simulation on the atmospheric pollutant dispersion in industrial park[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(3): 298.
- [17] VON SCHOENBERG P, TUNVED P, GRAHN H, et al. Aerosol dynamics and dispersion of radioactive particles[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(6): 5173-5193.
- [18] MORAGA F J, BONETTO F J, LAHEY R T. Lateral forces on spheres in turbulent uniform shear flow[J]. *Int J Multiphas Flow*, 1999, 25: 1321-1372.
- [19] BURNS A D, FRANK T, HAMILL I, et al. The favre averaged drag model for turbulent dispersion in Eulerian multi-phase flows[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Multi-phase Flow (ICMF)*. Japan: ICMF, 2004: 392.