

核电站中气溶胶再悬浮的 CFD 研究

江斌¹, 黄挺¹, 陈炼¹, 常华健^{1,2}

(1. 国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209;

2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:利用三维计算流体力学程序 GASFLOW 分析了气溶胶的再悬浮行为。通过拉格朗日粒子模型计算得出再悬浮率,并将所得结果与集总参数程序 ASTEC 的计算结果与国际标准例题中的 STORM 试验台架测试的 SR11 试验结果进行对比。计算结果表明,GASFLOW 程序能较好地模拟气溶胶的再悬浮行为,且相对于集总参数程序而言,能清晰直观地展示不同时刻气溶胶的位置分布,可为压水堆核电站严重事故条件下的气溶胶行为分析提供参考。

关键词:GASFLOW 程序;气溶胶;再悬浮;拉格朗日粒子模型;位置分布

中图分类号:TL364

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)05-0790-06

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0622

CFD Research on Aerosol Resuspension in Nuclear Power Plant

JIANG Bin¹, HUANG Ting¹, CHEN Lian¹, CHANG Huajian^{1,2}

(1. State Nuclear Hua Qing (Beijing) Nuclear Power Technology

R&D Center Co. Ltd., Beijing 102209, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The aerosol resuspension behavior was simulated by three-dimensional computational fluid dynamics program GASFLOW. The resuspension rate was calculated by Lagrangian particle model and compared with the results obtained from the calculation of the lumped parameter program ASTEC and the test results obtained from STORM series tests-SR11 in the international standard problems. The results show that GASFLOW program can simulate the aerosol resuspension behavior well. Compared with lumped parameter program, GASFLOW program can clearly and intuitively display the aerosol position distribution at different time, which can provide reference for aerosol behavior analysis under severe accident conditions of pressurized water reactor nuclear power plant.

Key words: GASFLOW program; aerosol; resuspension; Lagrangian particle model; position distribution

收稿日期:2019-08-13;修回日期:2019-11-13

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX06004006)

作者简介:江斌(1988—),男,山西大同人,工程师,硕士研究生,从事严重事故及反应堆热工水力研究

网络出版时间:2020-01-21;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200120.1430.008.html>

压水堆核电站在严重事故晚期时,由于可能出现的氢气燃烧或爆燃等现象造成的瞬时气流冲击,会使得已沉积在安全壳壁面内的气溶胶再次悬浮到气空间中,导致安全壳气空间内裂变产物浓度再次上升,从而可能导致放射性物质的再次释放。由于气溶胶再悬浮会对事故晚期放射性源项产生影响,最终影响释放到环境中的放射性物质总量,因此有必要对该类现象进行深入研究。

已有用于反应堆严重事故评估的系统分析程序如 ASTEC 等^[1],根据不同原理开发了气溶胶再悬浮机理的计算模型。但该类程序是集总参数程序,不能精细获悉气溶胶不同时刻粒子的位置分布等物理量,这不利于了解事故细节。

1979 年三哩岛核事故后,美国核管会更加意识到反应堆氢气安全研究的重要性,开始资助洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)开发专门针对反应堆氢气研究的计算流体力学(CFD)程序 HMS,这是一款专门用于反应堆安全壳内氢气扩散模拟的 CFD 程序,也是 GASFLOW 程序的最初版本。1995 年,美国和德国卡尔斯鲁厄研究中心(FzK,即现在的 KIT 大学)通过 10 年的合作,共同开发出了利用 FORTRAN-90 语言编写的 GASFLOW-II。之后, KIT 开始独立开发新版本的 GASFLOW,不断提升其计算能力和应用范围,其间经历了 GASFLOW2.1 及 GASFLOW3.3^[2]。

GASFLOW 是一款用于模拟流体动力、传热传质、化学反应、气溶胶输运与沉降及其他严重事故时反应堆内相关现象的 CFD 程序^[3]。GASFLOW 采用隐式连续欧拉-任意拉格朗日欧拉(ICE'd ALE)的方法求解三维可压缩多组分的纳维-斯托克斯方程,该方法属于有限差分法,最初由 Hirt 等^[4]提出,可适用于求解所有流速的计算流体力学问题。每个版本的 GASFLOW 都经过了国际上多项标准实验的验证,其计算结果也被多个亚洲和欧洲国家的权威机构所认可。拉格朗日方法描述了物质颗粒的运动,它是时间和空间的函数;欧拉方法描述了空间固定体积中的流动情况,求解其控制方程相对于拉格朗日方法更容易。ICE'd ALE 方法能求解包括压声速和超声速

在内的所有流动问题,因为其具有与隐式连续欧拉法类似的隐式方程。其优势包括可采用比显式方法大得多的时间步长,以及能求解全拉格朗日方法无法求解的问题。控制方程可利用有限体积法在经典的交错网格上求解,其中,流体的状态量通过控制体中心网格求解,而速度矢量通过控制体面网格求解。由于采用了非贴体网格和亚网格技术,以及简化的工程建模方法,使得 GASFLOW 在计算大型安全壳内的流场时具有很高的效率。

本文以 GASFLOW3.3 为基础,对气溶胶粒子进行受力分析,利用力学平衡原理建立气溶胶再悬浮模型,并与国际标准例题 ISP40 的 STORM 试验 SR11^[5]结果进行对比,在此基础上对 GASFLOW 中再悬浮模型的改进提出合理化建议。

1 模型描述

根据经济合作与发展组织(OECD)能源署^[6]的有关定义,再悬浮是指由于流体流动的拖曳力,结构表面已经沉积的气溶胶或凝聚物以细小碎片的形式悬浮起来。再悬浮也可由重新定位的熔体上注水产生的蒸汽尖峰或氢燃烧产生的流动所触发。

目前,有关气溶胶再悬浮的模型通常分为两类,一类为力学平衡(FB)模型,另外一类为能量累积(EA)模型^[7]。GASFLOW 中用于模拟气溶胶行为的模型包括拉格朗日粒子模型、随机湍流粒子扩散模型、粒子沉降模型、粒子再悬浮模型及粒子云模型^[8]。GASFLOW3.3 采用了 FB 模型,对单一气溶胶粒子进行受力分析,且为计算简便,将粒子近似为球体。实际两相流动中,经常采用基于体积的当量球半径来计算粒子拖曳力^[9]。图 1 为稳定发展的湍流场中,沉积于壁面上的单一球形粒子的受力分析示意图。

对于单一球形粒子,其受到的各力表达式如下。

$$\mathbf{F}_g = \frac{\pi}{6} \rho_p d_p^3 \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_b = \frac{\pi}{6} \rho_g d_p^3 \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_a = \frac{A d_p}{12 z_0^2} \left(1 + \frac{A^2 K^2}{108 z_0} d_p \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_d = \frac{\pi}{8} C_d \rho_g d_p^2 U_{\text{gcp}}^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_l = 1.615 \rho_g \sqrt{\nu} U_{\text{gcp}} \sqrt{\frac{\partial U_g}{\partial y}} d_p^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_f = f_s \mathbf{F}_n = f_s (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_a - \mathbf{F}_b - \mathbf{F}_l) \quad (6)$$

其中： \mathbf{F}_g 为粒子受到的重力； \mathbf{F}_b 为浮力； \mathbf{F}_a 为黏性力^[10]； \mathbf{F}_d 为拖曳力； \mathbf{F}_l 为升力^[11]； \mathbf{F}_f 为摩擦力； \mathbf{g} 为重力加速度； d_p 为气溶胶粒径； ρ_p 和 ρ_g 分别为气溶胶粒子和气体的密度； A 为 Hamaker 常数； z_0 为球体颗粒与沉积表面的平衡间距； K 为粒子材料属性参数， $K = (1 - N^2)Y$ ， N 和 Y 分别为材料的泊松比和杨氏模量； C_d 为拖曳力系数， $C_d = 0.4 + 24/Re + 6/(1 + \sqrt{Re})$ ， Re 为粒子雷诺数； U_{gcp} 为黏性底层中静止的气溶胶粒子中心处的气体流速； ν 为流体的运动黏性系数； U_g 为平行于沉积表面的气体流速； f_s 为静摩擦力系数； y 为垂直于流动方向的距离； \mathbf{F}_n 为平板对粒子的支持力。

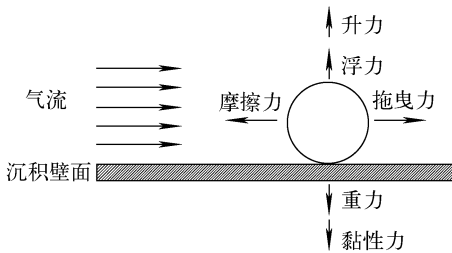


图1 稳定且完全发展的湍流场中单一球形粒子的受力

Fig. 1 Force acting on single spherical particle with steady and fully developed turbulent flow

此外，流体中的粒子通常还会受到压力梯度力、虚拟质量力、Basset 力、Magnus 力、Saffman 力和热泳力等作用。尽管作用在粒子上的力十分复杂，但在气溶胶悬浮体系中，由于气体的密度通常远小于粒子的密度，与粒子本身惯性相比，浮力、压力梯度力和虚拟质量力等均很小，可忽略不计^[12]。在以上两相间的相互作用力中，拖曳力是十分重要的力，它是对两相间的相对流动、传热和传质等起着重要作用的力。根据 Evett 等^[13]的公式可计算出拖曳力。

上述受力中，重力、浮力和黏性力仅取决于粒子和气体的物理性质，与气流速度无关。主要的黏性力是范德瓦尔斯力、静电力和其他黏

性力。这些力主要受到下列因素的影响：粒子的材料、形状和尺寸，表面的材料、粗糙度和污染程度；环境气体的相对湿度和温度；粒子-表面接触的持续时间和初始接触速度。而拖曳力和升力取决于气流速度且随气流速度的增大而增大。当气流速度增大到一定程度，拖曳力等于静摩擦力时，气溶胶粒子开始运动并离开沉积表面，此时：

$$\mathbf{F}_d = f_s (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_a - \mathbf{F}_b - \mathbf{F}_l) \quad (7)$$

将式(1)~(5)代入式(7)中，可得：

$$\frac{\pi}{8} C_d \rho_g d_p^2 U_{\text{gcp}}^2 / f_s = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g + \frac{A d_p}{12 z_0^2} \cdot \left(1 + \frac{A^2 K^2}{108 z_0^7} d_p \right) - 1.615 \rho_g \sqrt{\nu} U_{\text{gcp}} \sqrt{\frac{\partial U_g}{\partial y}} d_p^2 \quad (8)$$

式(8)是以 U_{gcp} 为未知数的方程，通过求解该方程可得出单一粒子的最小悬浮速度，将其用 $U_{\text{gcp}0}$ 表示。当气流速度大于该速度时，气溶胶粒子就可悬浮起来。

2 几何建模及计算条件

2.1 几何建模

STORM 试验台架位于意大利的 Ispra，是由联合研究中心 JRC 运行维护的。STORM 试验 SR11 分为两个独立阶段，第 1 阶段集中在气溶胶粒子由于热泳和湍流影响导致的沉积现象，第 2 阶段关注的是已沉积的气溶胶粒子在逐步增加的气流下导致的再悬浮现象。

GASFLOW 是一个适合于大尺度、安全壳内的工程 CFD 程序，对于细长小管径是否适用需进一步研究。为便于对模型适用性进行分析，利用 GASFLOW 建立一长方形管道模型，其方形管口尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ，长度为 5.005 m ，初始条件与 SR11 设置完全一致。设定初始状态下气溶胶的沉积区域如图 2 所示。

在保证气溶胶充分沉积后，在管口处设定一持续 1 s 的速度边界，使管内产生一水平方向的流场，该风流将使沉积的气溶胶产生再悬浮，再悬浮率 η 的计算公式为：

$$\eta = 1 - \frac{N_t}{N_0} \quad (9)$$

其中： N_0 为初始状态下沉积在表面的气溶胶颗

粒数量; N_r 为气流停止时沉积在表面的气溶胶颗粒数量。

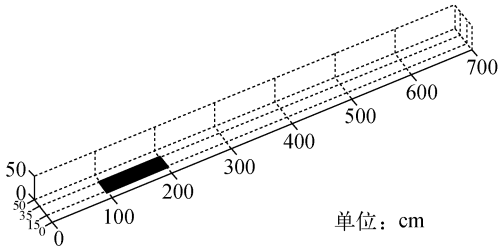


图2 气溶胶初始沉积区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of aerosol initial deposition area

2.2 初始条件

表1列出计算分析的初始条件。其中边界层厚度、拖曳力系数粗糙度因子和颗粒与沉积表面的平衡间距粗糙度因子是 GASFLOW3.3 中与再悬浮模型相关的3个主要输入参数。核电站在严重事故条件下,安全壳内气溶胶粒子中包含了各种核素成分,粒径的典型值为 $1.0 \mu\text{m}^{[14]}$,因此本文选取该典型直径进行分析。

表1 计算的初始条件

Table 1 Initial condition for calculation

参数	数值
边界风速, m/s	4
颗粒粒径, μm	1.0
颗粒密度, kg/m^3	3.675
边界层厚度, m	0.1
拖曳力系数粗糙度因子	10.0
颗粒与沉积表面的平衡间距粗糙度因子	100.0
颗粒与沉积表面的平衡间距, m	4.0×10^{-10}
运动黏性系数, m^2/s	1.5×10^{-5}
Hamaker 常数, erg	1.0×10^{-12}
静摩擦系数	0.45
泊松比	0.29
杨氏模量, dynes/cm^2	2.1×10^{12}

由于气溶胶粒子运动具有随机性,因此数目越多的粒子数量越能更好地反映再悬浮的随

机特性。但太多粒子数量会占用大量的计算资源,因此需对初始气溶胶粒子的数量进行合理选定。

图3示出在表1设定的初始条件下,气溶胶再悬浮率随气溶胶粒子数量的变化。由图3可看出,当气溶胶粒子数量大于等于 1×10^5 时,气溶胶再悬浮率的计算结果基本保持不变,因此选定气溶胶粒子数量为 1×10^5 个进行后续的分析计算。

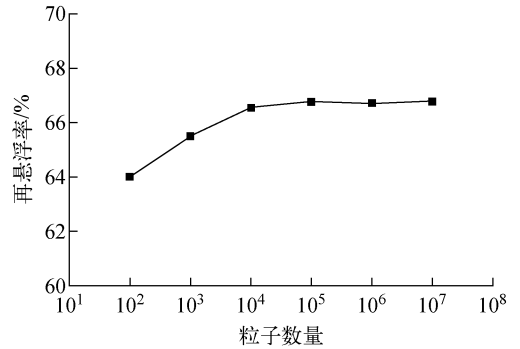


图3 不同气溶胶粒子数量的再悬浮率

Fig.3 Resuspension rate

for different aerosol particle numbers

GASFLOW 是利用拉格朗日粒子追踪法进行计算分析的,为计算的简便,同时在工程角度适用的情况下,不考虑粒子间的相互作用,且粒子与流场间的作用和传热微乎其微,因此也不予考虑。

3 计算结果及分析

3.1 再悬浮率

图4示出 STORM 试验 SR11 的结果及 ASTEC 和 GASFLOW 程序的计算结果。其中 FB-1、FB-2、RNR-1 和 RNR-2 分别代表 ASTEC 程序中 SOPHAEROS 模块采用的两种不同模型计算的结果。FB-1 和 FB-2 均采用 FB 模型,区别在于 FB-1 的黏性力系数为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ N}/\text{m}$, FB-2 的黏性力系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ N}/\text{m}$ 。RNR-1 和 RNR-2 均采用 EA 模型,区别在于 RNR-1 的最大时间步长为 1.0 s, RNR-2 的最大时间步长为 30.0 s。GASFLOW-1 和 GASFLOW-2 采用的是 FB 模型,区别在于 GASFLOW-1 的杨氏模量为 $2.1 \times 10^{12} \text{ dynes}/\text{cm}^2$, GASFLOW-2 的

杨氏模量为 2.1×10^{13} dynes/cm²。从图 4 可看出,GASFLOW 与 ASTEC 程序的计算结果有所不同,这是由于两者采用的是不同模型,且

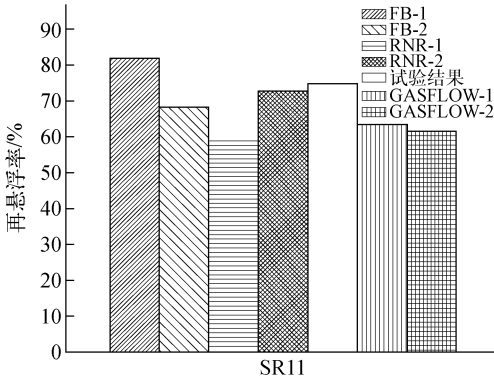


图 4 再悬浮率试验与计算结果的对比
Fig. 4 Comparison of resuspension rate between test and calculated results

ASTEC 是集总参数程序,GASFLOW 是 CFD 程序,因此计算结果有所差别。GASFLOW-1 和 GASFLOW-2 的计算结果也有所差别,这是由于两者的杨氏模量不同,因而导致两者的黏性力不同,再悬浮率也不同,这一结论与 FB-1 和 FB-2 的计算结果不同是一致的,说明黏性力是影响再悬浮率的一个重要因素。同时还可看出,GASFLOW-1 和 GASFLOW-2 与试验结果 SR11 的差距在 20% 以内,在工程应用范围内符合较好,GASFLOW 能较好模拟气溶胶的行为,可在工程应用中提供参考。

3.2 位置分布

图 5 示出两个不同时刻气溶胶粒子的位置分布。由图 5 可看出,距流场越近再悬浮粒子的数量越多,这是由于距流场不同,所受到的升力大小也不同。

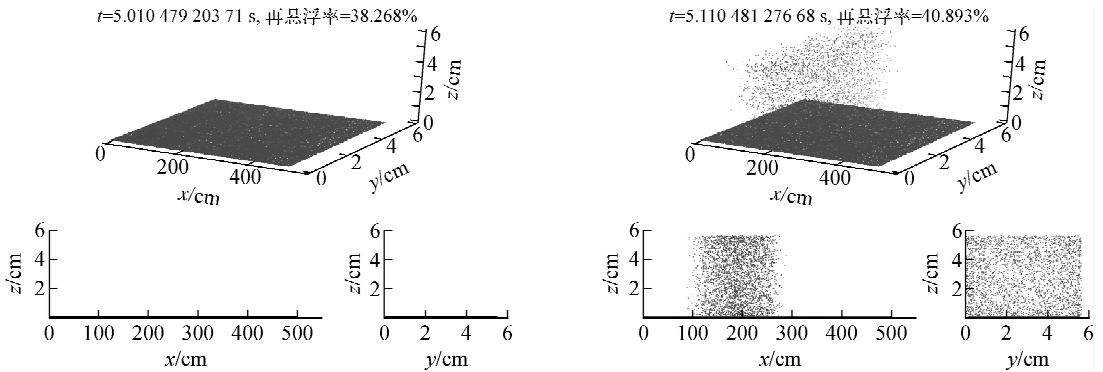


图 5 不同时刻气溶胶的位置分布
Fig. 5 Position distribution of aerosol at different time

图 6 示出气溶胶再悬浮率随时间变化的定量分析。由图 6 可看出,气溶胶的再悬浮是一

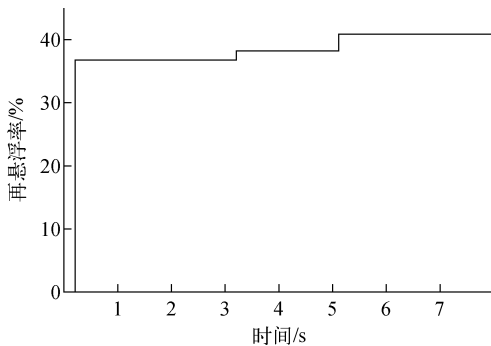


图 6 气溶胶再悬浮率随时间的变化
Fig. 6 Change of aerosol resuspension rate with time

瞬态过程,再悬浮率随时间的变化是一阶梯状的过程。

4 结论

研究表明,GASFLOW3.3 中的再悬浮模型基本用来模拟核电站中气溶胶的再悬浮行为,根据计算结果可得到以下结论。

- 1) GASFLOW 与 ASTEC 程序的计算结果有所区别,黏性力是影响再悬浮率的一个重要因素。
- 2) 气溶胶的再悬浮是一瞬态过程,再悬浮率随时间的变化是一阶梯状的过程。只要已沉积的气溶胶粒子最小悬浮速度小于气流速度,气溶胶粒子就可悬浮。

3) 由计算结果可看出, GASFLOW 作为一个 CFD 程序, 计算结果与 SR11 试验结果的差距在 20% 以内, 在工程范围内是可接受的。GASFLOW 能较好模拟气溶胶的行为, 并展示不同时刻气溶胶粒子位置的分布, 可为工程应用提供参考。

4) 气溶胶再悬浮现象是安全壳内严重事故晚期的一个重要现象, 从试验结果和两个程序计算的结果可看出, 均有超过 50% 的气溶胶粒子在严重事故晚期发生再悬浮, 这一比例对于源项的影响很大, 在源项分析中需多加关注。同时, 更加合理精确的气溶胶再悬浮模型有待进一步开发。

参考文献:

- [1] BUJAN A, TOTH B, ZEYEN R. ASTEC V1.3 code assessment on the STORM aerosols mechanical resuspension tests, EUR 23233 EN[R]. [S. l.]: JRC, 2008.
- [2] TRAVIS J R, JORDAN T, RRYL P, et al. GASFLOW3.3: A computational fluid dynamics code for gases aerosols, and combustion: Volume 2: User's manual[R]. Germany: KIT, 2012.
- [3] 肖建军, 周志伟, 经荣清. 核电站安全壳内氢气扩散和燃烧的分析程序 GASFLOW 及其应用[J]. 核科学与工程, 2005, 25(4): 317-321.
XIAO Jianjun, ZHOU Zhiwei, JING Xingqing. GASFLOW: CFD code for the distribution and combustion of hydrogen in the containment[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(4): 317-321(in Chinese).
- [4] HIRT C W, AMSDEN A A, COOK J L. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds[J]. Journal of Computational Physics, 1974, 14(3): 227-253.
- [5] ALFREDO R C, JOAQUIM A C, GIOVANNI D S. International standard problem 40 aerosol deposition and resuspension, EUR 18708 EN, NEA/CSNI/R(99)4[R]. [S. l.]: [s. n.], 1999.
- [6] SUGIMOTO J, KAJIMOTO M, HASHIMOTO K, et al. Short overview on the definition and significance of the late phase fission produce aerosol/vapor source, NEA/CSNI/R(94)30[R]. [S. l.]: [s. n.], 1994.
- [7] ZINSKIND G, FICHMAN M, GUTFINGER C. Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows-review and analysis[J]. Journal of Aerosol Science, 1995, 26(4): 613-644.
- [8] TRAVIS J R, ROYL P, XIAO J, et al. GASFLOW3.3: A computational fluid dynamics code for gases aerosols, and combustion, Volume 1: Theory and Computational Model[R]. Germany: KIT, 2011.
- [9] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [10] BARON D. The influence of flattening on the adhesion of particles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, 40(1): 1-13.
- [11] SAFFMAN P G. The lift on a small sphere in a slow shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1965, 22: 385-400.
- [12] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [13] EVETT J B, LIU C. Fundamentals of fluid mechanics[M]. New York: McGraw-Hill, 1987: 381-390.
- [14] SEHGAL B R. Nuclear safety in light water reactors: Severe accident phenomenology[M]. US: Academic Press, 2012: 457.