

核电厂中流固耦合现象数值模拟研究综述

陆道纲, 张立殷

(华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206)

摘要:流固耦合现象在核电厂中广泛存在, 该现象引起的结构动力学问题对核电厂结构完整性和安全性有重要影响。目前, 国内外对核电厂中流固耦合现象的研究给予越来越多的关注。本文介绍华北电力大学在该方面的一些研究进展, 例如, 快堆燃料组件抗震分析新的流体附加质量计算方法研究; 蒸汽发生器换热管双管漩涡脱落的数值模拟; 一个先进堆燃料组件平行板上流动引起的漩涡脱落数值模拟; 由地震引起的自由表面对快堆主容器冲击现象的研究; 移动粒子法求解液面晃动及晃动引起离散现象的研究等。

关键词:流固耦合; 抗震分析; 漩涡脱落; 液面晃动; 移动粒子法

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)S0-0076-08

Review of Research on Numerical Simulation for Phenomena of Fluid-Structure Interaction in Nuclear Power Plants

LU Dao-gang, ZHANG Li-yin

(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The phenomena of fluid-structure interaction exist widely in nuclear power plants. Structural dynamic problems caused by those phenomena have important influence on the structure integrity and safety of nuclear power plants, which attract more and more attentions on this aspect at home and abroad now. North China Electric Power University (NCEPU) has been doing some related researches. The paper introduces some researches, such as a new method to calculate the added mass for the seismic analysis of the fuel assembly in fast breeder reactor (FBR), simulation on the vortex shedding of double heat exchange tubes in a steam generator, simulation on the vortex shedding caused by the cross-flow over plates in a fuel assembly of an advanced reactor, the research on the impacting phenomenon of the free-surface on the vessel head in a storage tank as the main vessel of the China Experimental Fast Reactor (CEFR) shaken by the earthquake, and the researches on the solution of the liquid sloshing by moving particle semi-implicit (MPS) and the scattering phenomenon caused by sloshing, and so on.

Key words: fluid-structure interaction; seismic analysis; vortex shedding; liquid sloshing; moving particle semi-implicit

流固耦合现象在核电厂中广泛存在,由其引起的振动现象(也被称为流致振动)复杂而多样,例如,核燃料组件在冷却剂冲刷下的振动、流体输送管道的颤振、蒸汽发生器管束的振动、压水堆吊篮组件冷却剂冲刷下的脉动等,其对核电站结构完整性和安全性有重要影响。西方国家在先进核反应堆的设计中充分考虑了流致振动的影响;ASME 规范也在 1995 年的版本中新加入了关于圆管和管群的流致振动的设计准则。国家核安全局把流致振动列为重点核安全审查项目。因此,有关核电厂流致振动(特别是流固耦合现象)的研究具有重大的现实意义。

华北电力大学在流固耦合数值模拟方面做了一些相关研究工作,主要包括三个方面:快堆燃料组件流体附加质量计算方法研究;漩涡脱落数值模拟;液面晃动响应研究。

1 快堆燃料组件流体附加质量计算方法研究

流固耦合问题中流体对结构的附加质量的计算方法是将动水压力等效成质量附加在结构上。这种质量等效原则在各行业得到广泛应用,但缺乏详细理论推导。华北电力大学王万惠等^[1]应用势流函数理论,用微分法推导出流体附加质量计算公式,并将推导得到的公式运用于快堆堆芯组件抗震分析中,通过与实验结果和相关研究进行对比,论证了计算公式的正确性。附加质量计算方法的研究结果为相关数值模拟建立基础。

1.1 附加质量计算公式推导

推导过程以简化的快堆燃料组件作为对象,采用窄缝的势流函数理论进行分析,计算模型如图 1 所示。图 1 中, ϕ_1 、 ϕ_2 、 $2A$ 、 $2B$ 、 L 分别代表左侧区域势函数、右侧区域势函数、燃料组件长、燃料组件宽、燃料组件之间间隙。图 1 中的模型代表 3 根燃料组件横截面图,其中,中间 1 根燃料组件不固定,两侧的两根燃料组件固定。

从流体力学的连续性方程出发,把流体假设成不可压缩平面无旋流动,建立边界条件,求解出势流函数,然后利用伯努利方程得到压强

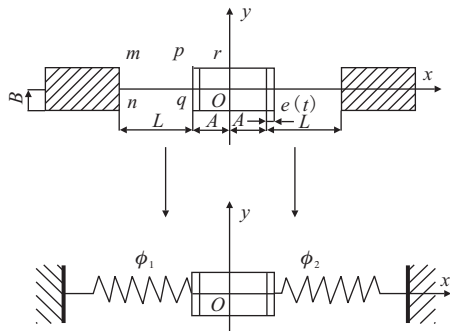


图 1 燃料组件计算模型

Fig. 1 Calculation model of fuel assembly

的关系式,最后利用流体和固体相互间的力平衡建立关系式,从而可得流体附加质量如下:

$$m_c = \frac{2\rho}{L} \left(\frac{1}{3} B^3 + A^2 B + 2LAB \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; L 为堆芯燃料组件之间的间隙; A 、 B 为与模型相关的参数。

1.2 附加质量公式在快堆堆芯组件抗震分析中的运用

浸没在液态钠中的快堆堆芯组件在地震作用下发生振动,可能导致组件结构损坏或堆芯结构变形,从而影响反应堆结构完整和安全,而燃料周围流体的运动使该振动表现为强烈的非线性,因此,研究地震引起的流固耦合效应对快堆抗震分析十分重要。利用前面推导的附加质量公式(1)对单根和两根燃料组件用 CASTEM 在空气和水中进行建模。两根燃料组件模型如图 2 所示。

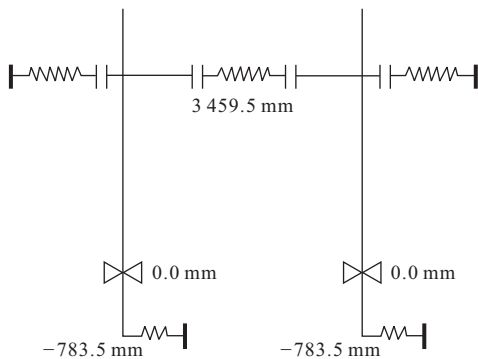


图 2 两根燃料组件计算模型

Fig. 2 Model of double fuel assemblies

经计算得到的频率、碰撞力分别与试验值和相关研究成果比较,结果表明,计算值与试验值吻合。其中,采用不同程序及不同方法计算出的燃料组件在水中的固有频率列于表1。由表1可看出,本次模型计算具有较高的精确性。

表1 燃料组件在水中的固有频率

Table 1 Natural frequency of fuel assemblies in water

模型	频率/Hz	与试验值的 相对偏差/%
试验	2.73	
文献[2]计算(FINAS)	3.07	12
Westergaard 计算(CASTEM)	3.08	13
本次模型计算(CASTEM)	2.78	2

2 漩涡脱落的数值模拟

当流体横向掠过圆管或平板时,会在其后方形成漩涡脱落,漩涡周期性脱落可能诱发这些结构的振动,而结构的振动又反过来影响漩涡的脱落。这种流固耦合现象在核电厂运行过程中有可能出现。所以,核电厂中各种漩涡脱落现象的研究与数值模拟对于确保反应堆的安全性具有重要意义。

2.1 双管漩涡脱落

在核电厂蒸汽发生器中,流体横掠换热管管束,换热管有可能发生漩涡脱落而诱发振动。华北电力大学卫媛媛等^[3]采用任意的拉格朗日欧拉有限元方法(ALE-FEM)数值模拟双管在横向流作用下的漩涡脱落现象。通过改变两管间距,模拟过程揭示了两管间距与漩涡脱落频率的变化关系。

选取如下相关尺寸进行数值模拟计算:直径 $d=22$ mm,两管间距 $P=31$ mm,假定来流速度 $u=1.0$ m/s,粘度 $\nu=1.4 \times 10^{-6}$ m²/s。 Re 为 1.6×10^4 时不同时刻的速度向量如图3所示。通过数值模拟,得到节点上的压力变化具有一定的周期性,漩涡脱落的频率即为压力变化的频率。在相同条件下计算得到双管的漩涡脱落频率介于单倍直径时单管的理论计算频率与双倍直径时单管的理论计算频率之间。

漩涡脱落频率最重要的影响因素是两管间距:间距大到一定程度,管束内的流动与单管相似;间距小到一定程度后,管间会相互影响,极端情况下,两管无限接近,近似为直径为 $2d$ 的单管。数值模拟计算同一雷诺数下管间距分别为 $1.4d$ 、 $2d$ 和 $4d$ 时的漩涡脱落频率。结果表明:在管间距从 $1.4d$ 变化到 $4d$ 的过程中,漩涡脱落频率越来越接近单管的理论计算值。这种现象验证了管间距对管束漩涡脱落特性的影响;当间距很小时,管间相互影响较大;当间距大到一定程度时,各管的流动与单管相似。当两管无限接近时,它们的漩涡脱落频率近似为直径为原始直径两倍下的单管的理论计算频率。

2.2 板状燃料组件平行板上流动引起的漩涡脱落

板状燃料组件具有较高的释热率和换热效率,对较小体积的反应堆可达到较高的功率。板状燃料组件已在许多先进堆和军用动力堆中得到运用。因此,对板状燃料组件展开相关研究具有重大的现实意义。

1) 不同流速下窄通道内长板上流动引起的漩涡脱落

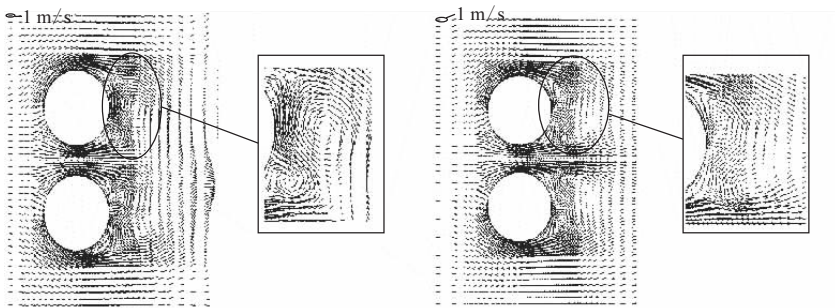


图3 Re 为 1.6×10^4 时不同时刻的速度向量

Fig. 3 Velocity vector in different moments at $Re=1.6 \times 10^4$

华北电力大学张娟花等^[4]基于流行的任意拉格朗日欧拉(ALE)坐标下的贴体坐标(BFC)法,利用 Lie 导数修正网格移动后的流体速度和压力,开发出了 1 套板状燃料组件流固耦合二维数值模拟的软件。张娟花利用该软件模拟了两端固支的单板结构在不同流速下的漩涡脱落以及板受迫振动时的流致振动现象。

数值模拟得到矩形长板漩涡脱落速度矢量及板前端速度矢量放大如图 4、5 所示。其中,白色矩形部分为平行板,板的左、右两端固支。流场左端为流体入口,右端为流体出口。

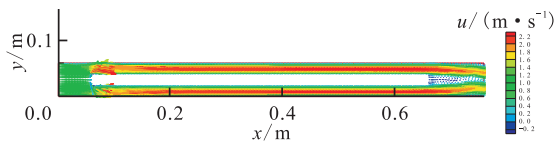


图 4 漩涡脱落速度矢量

Fig. 4 Velocity vector of vortex shedding

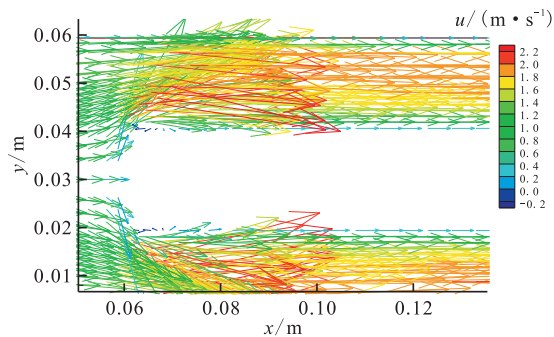


图 5 板前端速度矢量的放大

Fig. 5 Local enlargement of velocity vector of vortex shedding in front of plate

对于厚度为 0.02 m、长度为 0.6 m 的板,采用不同流速进行模拟计算,得到的结果列于表 2。从表 2 可看出:对于板厚、板长分别相等的矩形长板,当轴向流体速度增加时,漩涡脱落

表 2 长板漩涡脱落参数比较

Table 2 Comparison of vortex shedding parameters of long plate

流体速度/(m·s ⁻¹)	周期/s	频率/Hz
1.0	0.068 60	14.50
5.0	0.011 55	86.50
10.0	0.006 94	144.09

的周期减小,频率增加。

为研究流体以一定速度沿轴向流过受迫振动的板状组件时的流致振动现象,在程序中建立了板进行受迫振动的模型。板做余弦受迫振动的位移为:

$$ym_i = \frac{0.001d}{4.0} \cdot$$

$$\cos\left(\frac{x_i - \frac{1}{2} - x_p}{l}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (2)$$

其中: d 为板厚; x_p 为板左端边界坐标; T 为受迫振动周期。

对于厚度为 0.02 m、长度为 0.6 m、振动周期为 0.1 s 的板,模拟计算结果列于表 3。由表 3 可知:对于相同的长板和受迫振动周期,流体以不同速度沿轴向流动时,漩涡脱落的频率不随流速的变化而变化,受迫振动加速了板后漩涡的脱落,也影响着漩涡脱落的频率。

表 3 板受迫振动下漩涡脱落参数比较

Table 3 Comparison of vortex shedding parameters of long plate under forced vibration

流体速度/(m·s ⁻¹)	周期/s	频率/Hz
1.0	0.050 0	20.00
5.0	0.050 2	19.92

2) 流体横掠平行双板引起的漩涡脱落

华北电力大学李全星等^[5]在张娟花等编写的程序基础上进行进一步的开发,对流体横掠平行双板引起的漩涡脱落进行数值模拟。

利用开发的程序模拟了在不同长宽比 L/D 下单柱体的漩涡脱落情况,得出:当长宽比小于某个数值时,漩涡脱落频率随着长宽比的增加而增加;当长宽比大于该数时,漩涡脱落频率基本保持不变。数值模拟与试验测得的斯特罗哈数对比如图 6 所示。由图 6 可见,模拟结果与试验结果基本一致。

李全星等进一步模拟同一雷诺数下不同板间距 T/D (T 为间距, D 为柱体截面直径)情况下双柱体漩涡脱落情况。其中, $T/D=5.8$ 时的流场分布和局部放大如图 7 所示。

综合各间距情况下对应的漩涡脱落频率,得到了频率变化情况。结果验证了节距对柱体系漩涡脱落特性的影响;当两柱体间节距很小

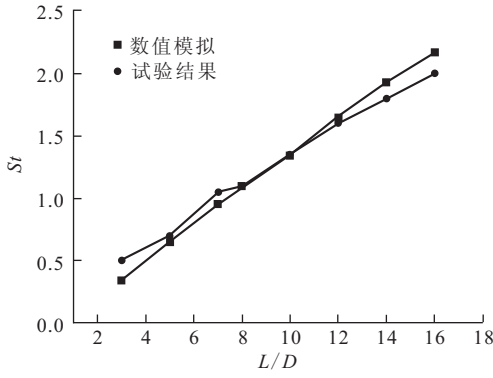


图6 数值模拟与试验测得的斯特罗哈数对比
Fig. 6 Comparison of numerical simulation and experimental measurements of Strouhal number

时,柱体间的相互影响较大;当柱体间节距小到一定程度时,各柱体的流动与单柱体相似,这时的漩涡脱落频率近似等于直径为原始直径两倍下的单柱体理论计算的漩涡脱落频率。

在实际反应堆板状燃料组件中,板间距非

常小,因此,板间的相互影响非常重要。将开发的程序用于模拟双平行长板(长 0.6 m,厚 0.02 m),板间节距 $T=2D$,得到如图 8 所示的流场图。

3 中国实验快堆主容器内正弦三波激励下液面晃动响应的数值模拟

中国实验快堆(CEFR)装有液态金属钠,因上面充有氩气,所以,液态金属钠具有液体自由表面。在地震力作用下,该自由表面会产生晃动。这种晃动现象可能会对结构强度产生不利影响。如果晃动幅度很大,自由液面有可能冲击快堆容器顶盖,影响快堆顶盖结构完整性。所以,该现象的研究具有重要的价值。

关于晃动问题,目前国际上主要有两种研究方法:网格法和粒子法。网格法计算速度快,精度较高。但网格法在求解自由表面问题上具有很大的局限性,特别是在计算液面晃动对容

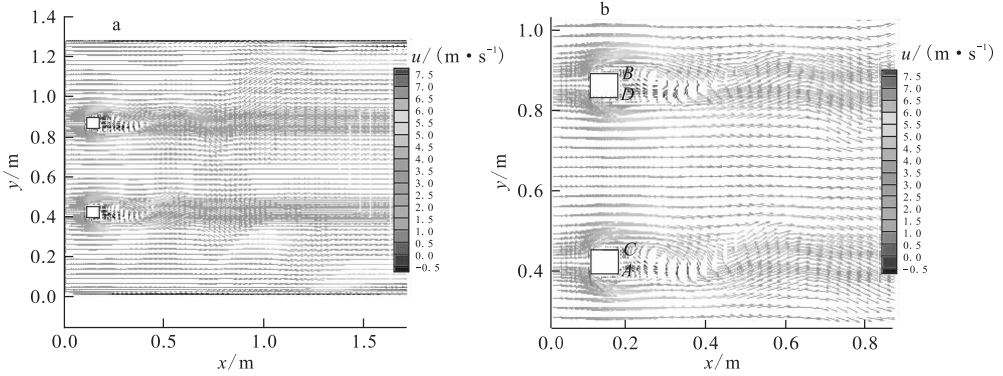


图7 $T/D=5.8$ 时的流场分布(a)及局部放大(b)
Fig. 7 Flow distribution (a) and local enlargement (b) at $T/D=5.8$

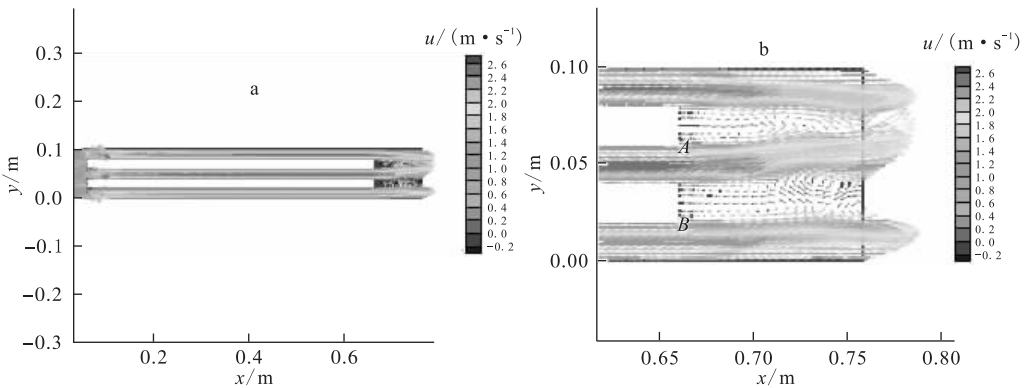


图8 流体掠过平行双板时板周围流场分布(a)及局部放大(b)

Fig. 8 Distribution of flow around plates (a) and local enlargement (b) at fluid flows over two-plate parallel

器壁和顶盖的冲击压力方面存在很大的不足。移动粒子法(moving particle semi-implicit, MPS)是一种无网格方法,采用粒子间相互作用的模型来描述流体力学的基本方程,对它进行离散。移动粒子法能准确形象地模拟出自由表面流动的各种现象,甚至是液滴的飞溅和再融合。

国际上已开发出多种方法用于晃动波高的预测,但对于晃动波冲击容器顶盖的非线性力学行为尚无很好的预测方法。华北电力大学利用网格法和移动粒子法对CEFR主容器内正弦三波激励下液面晃动响应进行数值模拟。

3.1 基于网格法的液面晃动响应数值模拟

华北电力大学陆道纲等^[6]开发了软件BELIEF-3,并结合现有软件CASTEM2000,编制了1套可用于估算正弦三波激励下液面晃动对容器壁和顶盖冲击压力的计算方法。

BELIEF-3采用贴体坐标(BFC)法和任意拉格朗日欧拉(ALE)坐标体系描述粘性不可压缩流体的Navier-Stokes方程,计算网格具有贴合和跟踪自由表面及其它移动边界的功能,实现了对非线性晃动过程的真实模拟,波高和液体内的压力分布精确可靠,只是当晃动波高很大时,自由表面流速相应很大,数值计算的稳定性难以保证。CASTEM2000运用Liu等^[7]的方法处理流体与固体相互耦合及流体晃动。该方法把流体运动看成无旋无粘的不可压势流,忽略了流体粘性带来的非线性影响。该软件原则上适用于微波幅的晃动分析,当晃动幅度较小时,会过低估计波高,当晃动幅度很大时,则会过高估计波高;且计算出的压力不是液体中的真实压力,而是流体的动压力,不能直接用作结构表面的载荷。

分别使用BELIEF-3和CASTEM2000对

日本三菱重工的圆筒和双层同心圆筒夹层中的自由表面流体在正弦三波作用下的晃动试验进行了验证分析。结果表明,BELIEF-3的结果与试验结果非常接近,而CASTEM2000的结果与理论解析值很接近,与试验结果稍有差距。这是由于CASTEM2000忽略了流体粘性带来的非线性影响。自由液面晃动波高一般很难准确预测,CEFR主容器内正弦三波激励下的自由液面响应是波高达数m的大幅晃动,非线性效果会使CASTEM2000过高估计其波高。因有一定保守性,从工程角度看,CASTEM2000仍可用于估算CEFR主容器的地震晃动载荷。

因此,采用CASTEM2000计算正弦三波激励下的最大波高,液面在3个不同时刻的晃动形象如图9所示。采用BELIEF-3计算正弦三波激励下的压力分布。

根据两软件各自特长,将它们巧妙结合起来进行计算,其计算结果既有足够的安全余量又不过分保守,所以,有较高的工程应用价值。计算结果为CEFR主容器及堆内构件的应力分析提供了重要的载荷输入。

3.2 基于移动粒子法的CEFR自由表面流体对容器顶盖冲击现象的数值模拟

华北电力大学卫媛媛等^[8]采用移动粒子法数值模拟了正弦三波激励下液面晃动对容器顶盖的冲击现象,得到的冲击压力为容器结构完整性分析提供了载荷。

在移动粒子法中,用移动的粒子来代表流体,每个粒子都有其相应的位置、质量、动量及能量等信息,用粒子间相互作用的形式来描述梯度、散度、拉普拉斯算子等模型。

经过与相关试验结果对比,验证了移动粒子法对于自由液面晃动的有效性。在此基础上,参考CEFR主容器的尺寸,近似给出了主

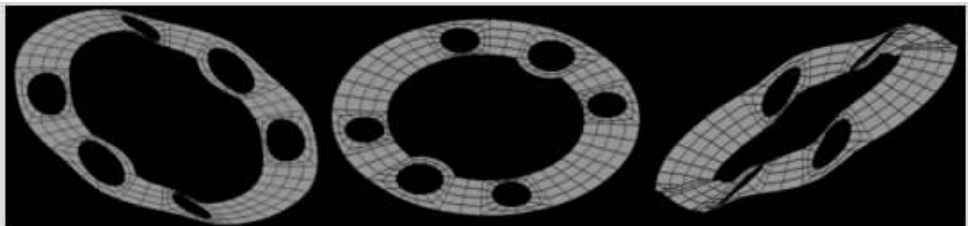


图9 网络法计算得到的液面在不同时刻的晃动

Fig. 9 Sloshing of liquid level in different moments calculated by grid method

容器的模型。

在正弦三波的激励下,得到容器内液面不同时刻的晃动形象如图 10 所示。由图 10 可清楚地看到流体撞击压力容器壁和顶盖的现象。

通过计算给出了不同时刻容器顶盖上不同点所受到的冲击压力。当流体未撞击壁面时,其上的压力为 0;仅当流体撞击到壁面时,壁面上才受压力。计算结果反映了自由液体表面对容器顶盖的冲击情况。

3.3 移动粒子方法对晃动抑制板效果的分析

华北电力大学王艺萍^[9]采用移动粒子法,用正弦三波代替地震波作为输入载荷,在中国实验快堆主容器中设计了不同尺寸、位置的晃

动抑制板,分别模拟了各个环板对晃动的抑制作用,并与无环板的情况进行了比较。通过观察和数据结果分析,找到了抑制快堆液钠晃动较为有效的尺寸和位置,为进一步深入精确的研究提供了参考。

由图 10 可明显看到无环板的主容器内流体有冲击压力容器侧壁和顶盖的现象。在压力容器内的不同位置设置了不同尺寸的环板,以研究环板对液体晃动的抑制情况。在液面下 0.5、1.5 m 的位置设置了宽度 L 为 1、2 和 3 m 的环板。其中,环板宽度不同,设置位置相同时,在同一时刻容器内液体晃动情况如图 11 所示。

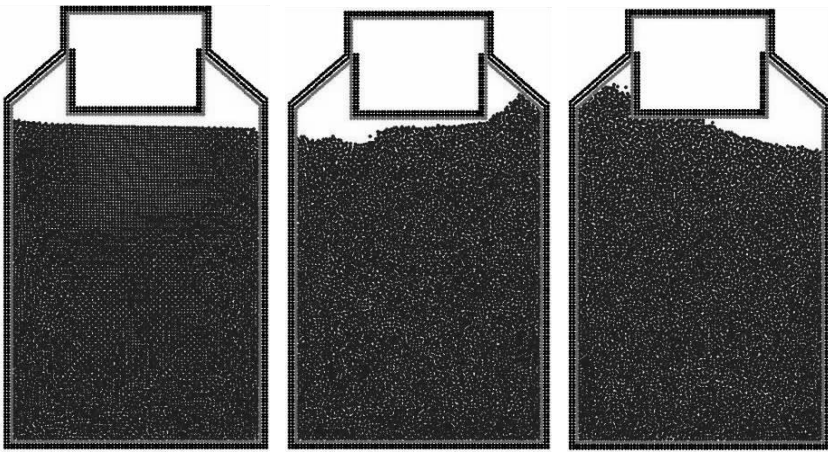


图 10 MPS 计算得到的不同时刻的液面晃动

Fig. 10 Sloshing of liquid level in different moments calculated by MPS

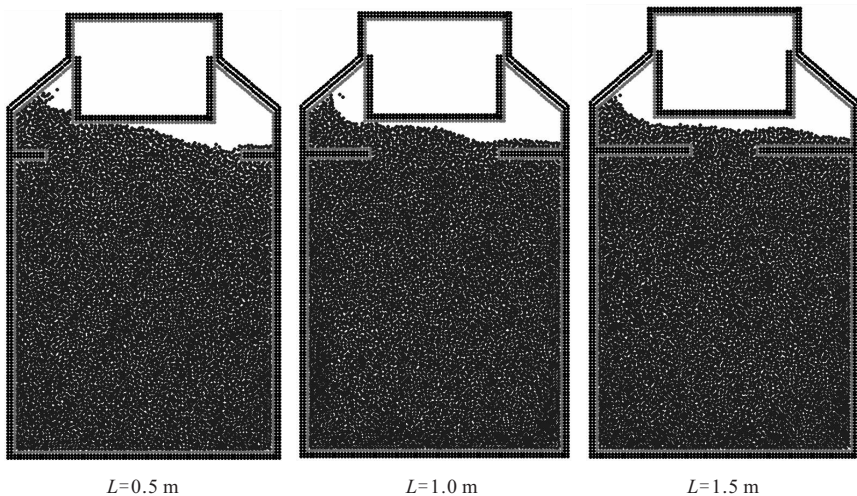


图 11 $t=0.5$ h 时容器内的液体晃动

Fig. 11 Liquid sloshing in vessel at $t=0.5$ h

通过计算给出了不同时刻容器顶盖上不同点所受到的冲击压力,从而对晃动抑制板的效果进行评估。最终得到如下结论:在满足环板设计的其他条件下,环板的位置应尽可能靠近液面,环板的宽度应设计在容器内半径的 $1/2$ 左右,这样既可保证环板对晃动的抑制效果,又可节省材料和制造费用。

4 结论

核电站中的流固耦合现象对核电站的完整性和安全性有重要影响,需要加强这方面的研究。华北电力大学的以上研究主要针对二维模型,目前正在开展三维下的流固耦合现象研究,研究结果将进一步促进该方面研究的发展。

参考文献:

[1] 王万惠,陆道纲. 快堆燃料组件抗震分析流体附加质量计算方法研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(7): 602-607.
WANG Wanhui, LU Daogang. Method of calculating added mass for seismic analysis of fuel assembly in fast breeder reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(7): 602-607(in Chinese).

[2] 文静. 中国实验快堆堆芯单方面水平抗震分析研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院, 2006.

[3] 卫媛媛,陆道纲,杨林民. 双管旋涡脱落的数值模拟[C]//第14届全国反应堆结构力学会论文集. 北京:《原子能科学技术》编辑部, 2008.

[4] 张娟花,陆道纲. 窄流道中柔性单板流固耦合数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(10): 903-909.
ZHANG Juanhua, LU Daogang. Numerical simulation on flow-structure interaction for the flexible plate in a narrow flow channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(10): 903-909(in Chinese).

[5] 中国工程热物理学会. 工程热物理学会学术会议论文集[C]. 北京:[出版者不祥], 2009.

[6] 陆道纲. CEFR主容器内正弦三波激励下液面晃动响应[J]. 核科学与工程, 2003, 23(4): 306-310.
LU Daogang. Sloshing response of the free surface in the main vessel of CEFR excited by 3 sine waves[J]. Nuclear Science and Engineering, 2003, 23(4): 306-310(in Chinese).

[7] LIU W K, MA D C. Coupling effect between liquid sloshing and flexible fluid filled system[J]. Nuclear Engineering and Design, 1982, 72: 345-375.

[8] 卫媛媛,陆道纲. 基于移动粒子法的快堆自由表面流体对容器顶盖冲击现象的数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(10): 910-914.
WEI yuanyuan, LU Daogang. Numerical simulation to phenomenon of main vessel free surface flow impact coping for fast reactor by moving particle semi-implicit method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(10): 910-914 (in Chinese).

[9] 王艺萍. 快堆主容器内自由表面液钠晃动抑制方法的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2008.