

正交异性复合材料储液容器入水过程数值分析

● 张伟伟^{1,2} 金先龙^{1,2} 刘涛^{1,2}

¹上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240

²上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240

摘要：

本文采用多物质ALE流固耦合算法并使用上海超算中心“蜂鸟”工业计算机群，对柔性储液容器的入水问题进行了仿真研究。该方法可以方便的考虑多种流体同时与结构耦合。首先，通过模拟平板恒速入水试验，验证了该方法的有效性，并确定了空气的影响。进而，仿真分析了复合材料柔性容器入水时的动态响应行为，结果表明：底部“空气垫”及容器内空气对冲击载荷具有一定的缓冲作用，容器底部形状、储液量等因素也具有较大影响。仿真得到的响应规律可为容器的优化设计提供了重要的理论参考。

关键词：ALE方法，流固耦合，柔性容器，入水过程，动态响应

1. 引言

结构入水过程是极其复杂的瞬态冲击动力学问题，如何通过有效的手段准确的预测结构入水时所受的冲击载荷，对航空、航天及航海等领域都有重要意义，因而一直吸引了众多学者的研究兴趣。

早在1929年，von Karman^[1]为了研究水上飞机降落时受到的冲击力，采用动量守恒思想和附加质量法，近似求得了浮舟所受的冲击力。而早期的理论研究多是在von Karman的成果上进行扩展，如文献[2]。美苏冷战时期，入水问题的研究更侧重于航天器的水上回收试验^[3-5]。随着计算机技术的发展，数值方法在近年来逐渐成为了入水问题研究的主要手段^[6]。M Souli等^[7,8]发表并改进了求解流固耦合问题的ALE算法，并通过典型工程问题的计算证明了该方法的可靠性。Maruzewski等^[9]采用并行的SPH算法程序对球体入水进行了仿真模拟，水花效果与实验吻合较好。Lee等^[10]通过MPS方法模拟了平板入水砰击过程，并与Chung等^[11]的实验结果对比，因其模型不能够考虑“空气垫”对砰击压力的影响，在平板倾角较小（ $<3^\circ$ ）时，仿真得到的压力系数偏大，而在文献[11,12]的试验中明显“捕捉”到了“空气垫”以及大量气泡的产生。结构撞水瞬间，一部分被结构

带入水中的空气夹在结构与水中，起到了一定的缓冲作用，因而结构所受的冲击载荷比理论值[2]要小。

本文通过LS-DYNA提供的多物质ALE流-固耦合算法研究了储液容器的入水过程，同时分析了空气的影响。首先，通过仿真平板以不同角度恒速入水过程与相关成果进行对比，验证了多物质ALE方法的有效性，证实了空气垫对压力系数的影响。进而，对内含液、气的复合材料容器空投入水过程进行了仿真研究。仿真结果可作为提高容器可靠性设计的理论依据，对水上空投作业也具有一定的参考价值。

2. 理论与方法

2.1 多物质ALE连续介质力学

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法综合了Lagrangian与Eulerian方法的优点，可用于含有空间大位移与大应变的问题。

ALE参考域依托于空间域和材料域存在。设 Ω 为ALE参考坐标， x 为空间坐标， X 为材料坐标，则ALE参考域与空间域、材料域的映射关系见图1。

ALE描述中，物质的全导数必须通过链规则求出，即函数 $f(\chi, t)$ 的全导数为：

$$\dot{f}(\chi, t) = \frac{\partial f(\chi, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(\chi, t)}{\partial \chi_i} \frac{\partial \psi(X, t)}{\partial t} = f_{,t(\chi)} + \frac{\partial f}{\partial \chi_i} \frac{\partial \chi_i}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{定义网格速度 } \hat{v} \text{ 为：} \quad \frac{\partial \hat{\phi}(\chi, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{定义物质速度 } v \text{ 为：} \quad \frac{\partial \phi(X, t)}{\partial t} = \frac{\partial \hat{\phi}(\chi, t)}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\phi}(\chi, t)}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (3)$$

定义物质速度和网格速度之差为对流速度：

$$c_i = \frac{\partial \chi_i(\chi, t)}{\partial \chi_j} \frac{\partial \chi_j(X, t)}{\partial t} \quad (4)$$

在任意时刻，有： $\frac{\partial f}{\partial \chi_i} = \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial \chi_i}$ ，则式(1)化为：

$$\dot{f}(\chi, t) = f_{,t(\chi)} + \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial \chi_i} \frac{\partial \chi_i}{\partial t} = f_{,t(\chi)} + f_{,j} c_j \quad (5)$$

由上式可得ALE描述的控制方程（质量、动量、能量守恒方程）为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v}{\partial x_i} - c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho c_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho c_i \frac{\partial E}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} v_{i,j} + b_j v_j \quad (8)$$

通过控制方程并不足以组成封闭方程组，必须联合材料的本构关系方程。

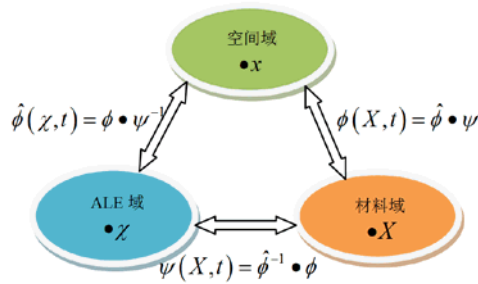


图1 ALE域与Lagrangian, Eulerian域之间的映射关系

2.2 流体材料模型

任何材料，都可以用应力偏量和压力来描述其所处的应力状态。本文采用空材料模型来描述应力偏量和应变偏量的关系：

$$\sigma'_{ij} = \gamma \dot{\epsilon}'_{ij} \quad (9)$$

其中， σ'_{ij} 与 $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 分别为应力与应变率的偏量， γ 为动力粘性系数。

状态方程（EOS）则可以用来描述了材料体积变

形与压力之间的关系。本文中，水的状态方程采用Gruneisen方程：

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \quad (10)$$

式中 E_0 为单位体积内能， C 为 u_s - u_p 曲线截距（ u_s 为冲击波波速， u_p 为质点速度）， S_1 ， S_2 和 S_3 为 u_s - u_p 曲线斜率系数， γ_0 为Gruneisen系数， a 为对 γ_0 的一阶体积修正。

空气采用线性多项式状态方程，压力随单位体积的内能线性变化，同时为体积变化的多项式，可表示为：

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (11)$$

其中， p 为压力， E_0 为初始比内能， C_0 ， C_1 ， C_2 ， C_3 ， C_4 ， C_5 与 C_6 为自定义的常数， μ 为体积变化率，令 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=0$ ， $C_4=C_5=-1$ ，其中为比热比，此时状态方程(11)缩减为：

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0$$

由式(9)与式(10)（或式(11)），可确定流体材料的应力状态：

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} = \gamma \dot{\epsilon}'_{ij} + p \delta_{ij} \quad (12)$$

2.3 多物质ALE单元计算

多物质ALE方法容许在一个单元网格中包含多种材料，通过跟踪每种材料的边界，在相应的单元中进行物质交换和输送，但需要有效地追踪各物质的界面。

本文采用VOF（Volume of fluid）方法给定物质界面的位置。其基本原理是根据ALE单元中材料体积比函数 F 来确定物质界面，而非追踪物质液面上质点的运动。 F 的值等于一个单元内流体体积与该单元体积之比， $0 < F < 1$ 。将多物质网格中的物质界面近似为平面，四周网格的体积份额用来确定该直线(或平面)的法线方向，而混合网格本身的体积份额用来确定直线(或平面)的具体位置。流-固耦合作用后，首先，需要一系列的对流运算，计算单元内流出的物质多少，动量等，再重新定位物质界面，具体的实现步骤见文献[7-13]。

假设在一个网格单元中含有 n 种不同的介质，则各体积分数 α_k 满足： $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$ ，则单元的平均应力 $\bar{\sigma}_i$ 可通过体积加权方式求得： $\bar{\sigma}_i = \sum_{k=1}^n \alpha_k \sigma_k$ ，其中 σ_k 为多物质单元内第 k 种材料相应的应力张量，进而可求得

单元内力向量为： $f_i^e = \int_{V^e} B^T \bar{\sigma}_i dV^e$ ，其中 B^T 为单元形函数， V^e 为单元体积。

2.4 结构-多物质ALE单元耦合算法

流体与结构耦合方式对耦合计算的准确性与可执行性起着重要影响。本文采用基于罚函数耦合方式实现流体与结构间的耦合作用。该方法的优点在于保证了耦合接触过程中的能量守恒。

如图2所示，当流体物质点穿透结构单元时，则根据相对位移的大小分别对结构与流体施加相应的节点力。接触面上接触力计算公式为：

$$F_{coup} = \sum_{i=1}^m [k_i d_i \cdot \hat{n}_i + C_i \dot{d}_i \cdot \hat{n}_i] \hat{n}_i \quad (13)$$

式中 F_{coup} 为流体与固体之间的接触力， d_i 为耦合点 i 处的穿透量， k_i 为对应罚刚度系数， C_i 为对应阻尼系数， \hat{n}_i 为对应位置的法向，结构表面情况可以选择根据面或节点来定义该耦合点的法向。同时，为了防止穿过结构单元的流体质点不被搜索到，需要根据ALE和拉格朗日单元的相对尺寸合理的选择耦合点的个数。

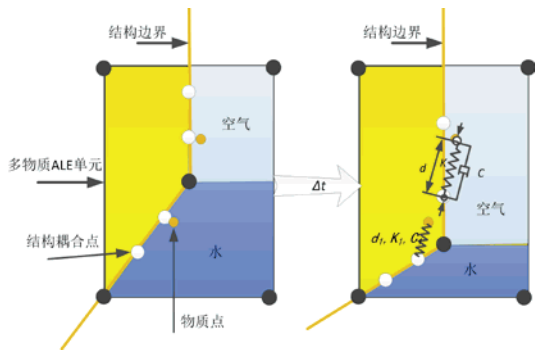


图2 基于罚函数的多物质耦合算法

3. 算例分析

3.1 平板入水冲击载荷计算

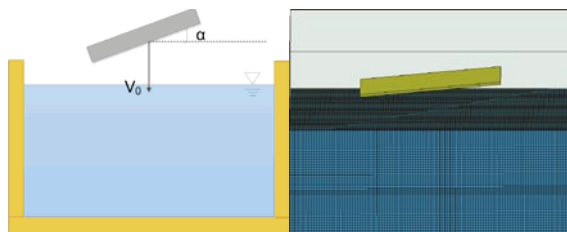


图3 平板恒速冲击水面仿真模型

为了验证仿真方法的有效性，平板恒速撞水三维仿真模型尺寸与文献^[11]一致。如图3所示，平板长0.56m，宽0.28m，厚0.01m，以恒速 $V=6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 砸击入水，ALE单元边界约束法向，以模拟固壁。表面张力

以及液体粘性的影响可以忽略，因而在模型中可不加考虑。

图4为仿真得到的最大压力系数 C_p 随倾斜角 α 的变化情况。同时，图4中还列出了Wagner的理论估计值^[2]、Chuang的实验回归结果^[12]、Chung等的实验结果^[11]以及Lee等采用改进的MPS方法得到的仿真结果^[10]来进行对比。这里，最大压力系数定义为：

$$C_p = \frac{P_{max}}{0.5\rho V^2} \quad (14)$$

其中， P_{max} 为平板中央的最大砰击压力， ρ 为液体的密度。

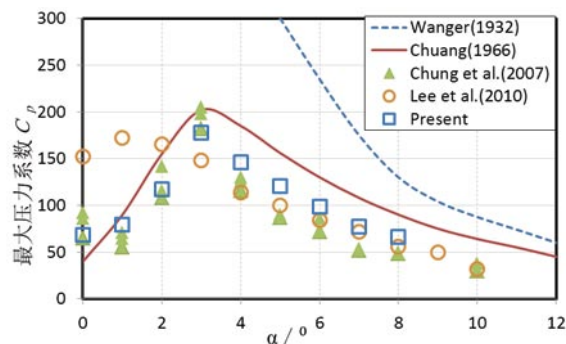


图4 最大压力系数与倾角 的关系

当平板小角度入水时，根据von Karman^[1]及Wagner^[2]的理论，在极短的时间内，平板将其下方的一部分水（附加质量）加速，并带动其一起运动。这一过程的砰击压力是非常巨大的。但是，结构砰击水面时，往往形成空气垫，由于空气垫的可压缩性，起到了一定的缓冲作用。因而，在攻角 α 较小时，实验结果与理论估计值相差甚远。从图4可见，Lee等人的仿真模型假设流体不可压缩，因而无法考虑“空气垫”及其附加效应，在 $\alpha < 3^\circ$ 时，仿真得到的最大压力系数较实验值偏大。而多物质ALE方法可以成功模拟“空气垫”效应，并反映其对砰击压力的影响，因而，仿真得到的最大压力系数变化规律与实验结果具有较好的吻合。

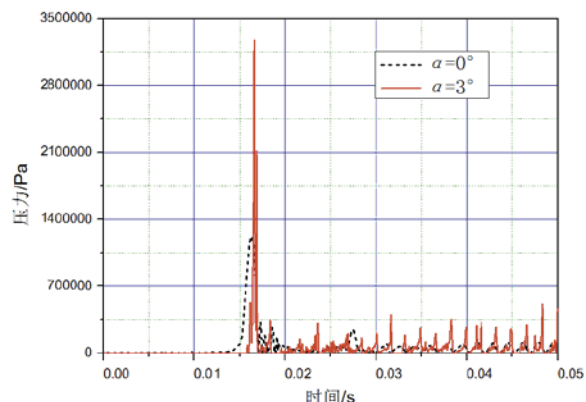


图5 不同倾角 时的压力历程

图5为当 α 为 0° 和 3° 时,平板中央压力系数变化时程。当 α 较小时,第一次峰值的持续时间较长,但峰值却较低,从另一角度证实了“空气垫”的缓冲作用,同时也说明了在模拟结构入水过程时,采用多物质ALE算法更符合实际的物理情况。

3.2 空投柔性储液容器入水数值模拟

空投柔性储液容器可广泛运用于军事、农业以及抗灾救援等领域。由于容器入水时将受到巨大的冲击载荷,在进行设计时,必须保证足够的可靠性。而实验测定又相当困难,为了缩短开发周期,减少成本,数值模拟是行之有效的办法。

某储液容器主要包含罐体、罐口及橡胶密封圈

表1 正交复合材料参数

拉压弹性模量/GPa		剪切弹性模量/GPa		主泊松比	
$E_1 = E_2$	E_3	G_1	$G_2 = G_3$	μ_{12}	$\mu_{23} = \mu_{13}$
1.529	1.07	0.389	0.269	0.163	0.384

根据2.1节的分析,空气对于砸击载荷具有一定的缓冲作用,本文设计了如表2所述的仿真工况,并详细分析储液容器入水时的响应情况。

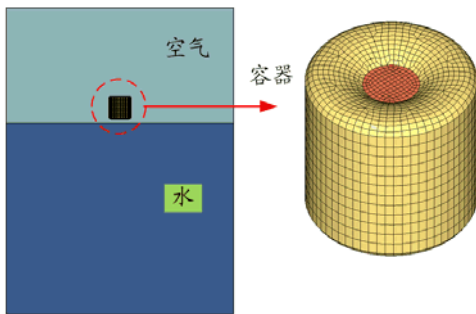


图6 空投水囊入水仿真模型

表2 仿真工况设计

工况	底部形状	储液比例	空气比例	$V_0/m \cdot s^{-1}$
I	平底	100%	0%	20
II	凹形	100%	0%	20
III	凹形	70%	30%	20
IV	凹形	80%	20%	20
V	凹形	90%	10%	20

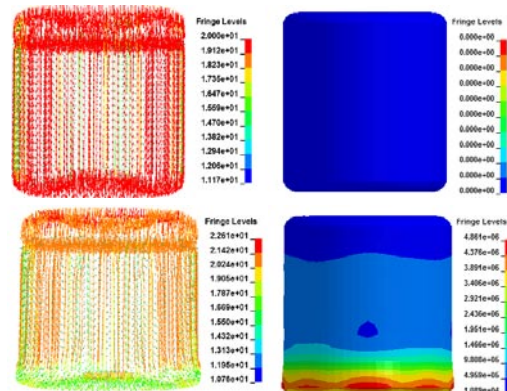
储液容器入水时,将与所处容器下方的水体撞击,并带动一部分水一起运动,传递了部分动能;同时,由于水不能承受拉力,水体质点的相互撞击使其得一部分断开后形成水花溅射开去,消耗了部分动能;此外,也有动能少量转移为空气的动能和内能;但是,还有相当一部分动能被容器吸收,转化为结构的应力和应变,甚至造成屈服和破坏。

等部分,由直升机空投至一定水域。容器主体采用10mm的尼龙增强橡胶材料制成,由于帘布为平纹织物,所以经、纬向参数一致,本文采用宏观的平均弹性常数^[14,15]来描述该复合材料的特性,参数选取如表1所示。整体有限元仿真模型如图3所示,储液罐采用4节点壳单元建模,沿厚度方向设3个积分点,每个罐体单元的耦合点数设为 4×4 个。由于储液罐几何上的复杂性,故采用对其包含的多物质ALE单元初始化的方式实现罐内液体和空气填充。模型底部施加法向约束,四周及顶部设无反射边界,初始大气压为101324.8Pa。忽略储液罐的水平方向速度,储液罐以垂向速度 V_0 冲击入水。

表3为各工况下罐体的响应情况,其中,罐体吸能比例定义为:一阶主应力峰值时刻的罐体应变能与罐及罐内物质动能减少量之比。仿真结果表明,凹形底部设计的罐体吸能比例相对于平底结构相对较小,其一阶主应力峰值也较小;同时,罐内空气被压缩到接近4倍大气压,对缓冲砸击力起到了一定作用。各工况中,工况IV的罐体响应最小,图7~11列出了该工况下的响应数据,并在下文中进行分析。

表3 各工况响应情况

工况	罐体一阶主应力峰值/MPa	罐体吸能比例	罐内最大气压/MPa
I	23.77	14.9%	\
II	22.68	13.8%	\
III	21.28	13.2%	0.328
IV	20.01	12.8%	0.351
V	21.35	13.4%	0.388



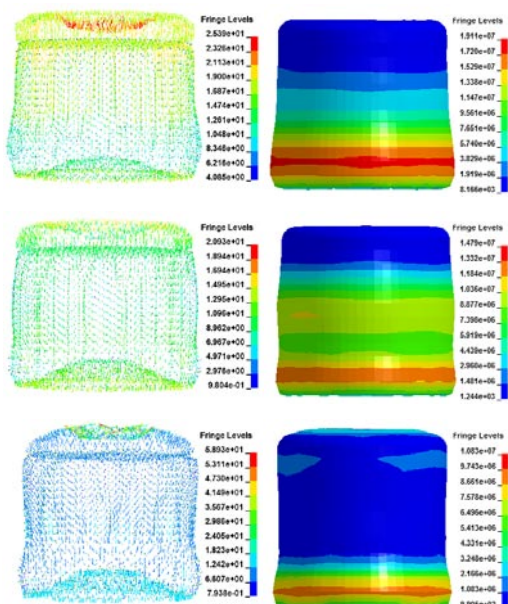


图7 罐内流体各时刻速度矢量 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和对应时刻罐体一阶主应力 (Pa) 云图, $\Delta t=5\text{ms}$

图7为工况IV中容器中流体速度矢量线及容器最大主应力云图, 图8为能量变化趋势线。入水时, 容器底部及底部储液迅速减速, 而容器和储液上部减速较慢, 因而在容器下腹部涌开, 造成较大应力, 而此时容器变形能也达到了最大值。而后, 容器在自身弹性作用下回收, 隆起部分向上移动, 直至绝大部分液体减速, 这一过程也伴随着一次动能振荡。再而后, 顶部的空气被压缩, 被容器顶带动一起向下运动, 储存物体积减小后, 容器也向稍微向内侧变形。最后整个罐体及储存物在水的阻尼作用下一起运动, 能量变化基本呈直线。

图9为最大应力时刻 (约0.01s) 罐体一阶主应力等值线分布图, 图10为该时刻罐体底部节点所受水作用力等值线分布图。砰击时, 罐体下部四周及侧面-底部过渡区域应力较大, 而受水冲击力最大的位置位于底部外形存在变化的区域。在容器底部的凹陷区域, 由于所包含空气的可压缩性, 该区域所受的冲击力较小。

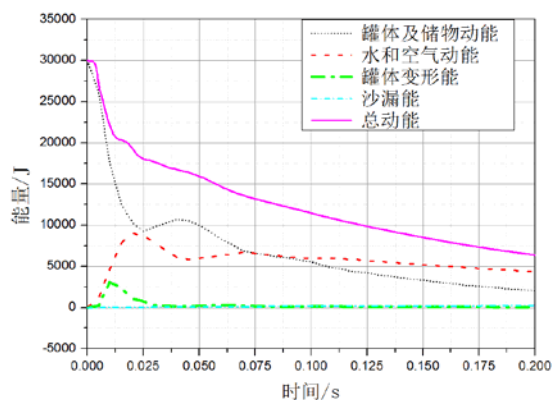


图8 工况IV能量变化趋势

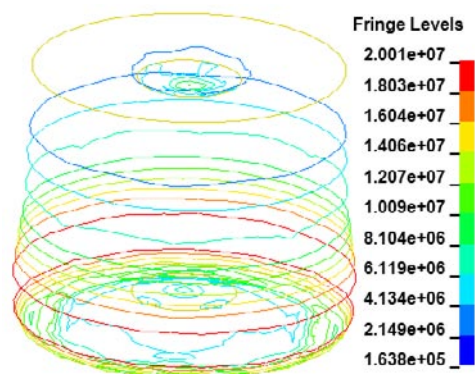


图9 最大应力时刻罐体应力等值线

图11为储液容器入水时所受到的垂向耦合力时程曲线, 砰击入水初期, 容器所受到的耦合力较大, 并带有2次明显的峰值, 且第二峰值较第一峰值更大; 随后, 垂向耦合力迅速减小, 波动幅度也逐渐减小。图8中, 容器应变能曲线、水和空气动能变化曲线也分别出现了一次峰值, 流体和结构之间的能量转移与它们相互耦合作用力密切相关。此外, 实际工程中应当避免两次耦合力极值叠加 (同时出现) 的情况发生, 而两次耦合力峰值出现时刻与容器-储液耦合系统的动态特性相关, 作者将对此展开进一步研究。

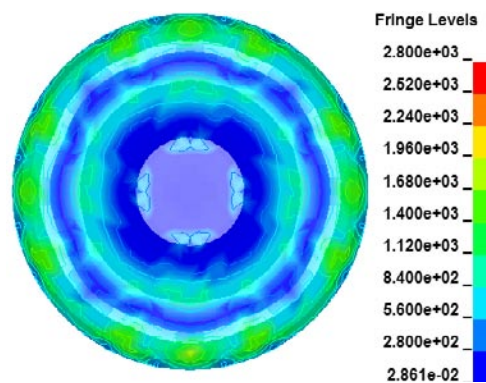


图10 最大应力时刻罐体节点所受耦合力等值线

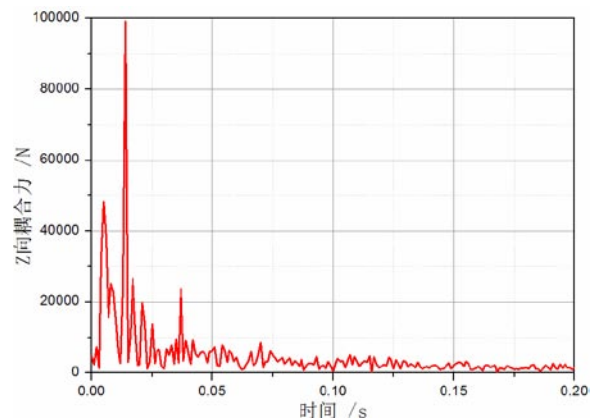


图11 罐体所受的流体Z向耦合力时程

4. 结语

本文将多物质ALE算法应用到储液柔性容器入水冲击过程的仿真中，并详细分析了结构入水时受到的冲击载荷及响应特性，主要结论如下：

(1) 多物质ALE流-固耦合方法是分析结构入水冲击过程的有效手段，仿真得到压力系数变化规律与实验数据基本吻合。

(2) 结构以较小的攻角 ($\alpha < 3^\circ$) 入射水面时，

夹在结构与水之间的空气被压缩，具有一定的缓冲作用，减小了砰击压力。

(3) 凹底的储液容器相比于平底容器更有利于“空气垫”的发展，可以减小入水的冲击，同时，容器内包含的空气也具有缓冲作用。

(4) 容器冲击入水时，整体所受砰击力会出现1~2次峰值，罐体过渡位置所受到的砰击力较大，而应力峰值出现在罐身的侧面底部位置。

参考文献：

- [1] von Karman T. The impact of seaplane floats during landing[R]. Washington DC, USA: National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Technical Notes 321, 1929.
- [2] Wagner H Trans. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Math Mech, 1932, 12(4): 193-215.
- [3] McGehee J R, Hathaway M E, Vaughan V L. Water landing characteristics of a reentry capsule[R]. Hampton VA, USA, NASA Langley Research Center, Memorandum 5-23-59L, 1959.
- [4] Herting D N, Pohlen J C, Pollock R A. Analysis and design of the Apollo landing impact system[C]. Houston, Texas, USA, Proceedings of the AIAA and NASA third manned space flight meeting, 1964: 166-178.
- [5] Hirano Y, Miura K. Water impact accelerations of axially symmetric bodies[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1970, 7(6): 762-764.
- [6] Seddon C M, Moatamedi M. Review of water entry with applications to aerospace structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 1045-1067.
- [7] Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems[J]. Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000, 190: 659-675.
- [8] Aquelet N, Souli M, Olovsson L. Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems[J]. Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195:110-132.
- [9] Pierre M, David L T, Guillaume O, et al. SPH high-performance computing simulations of rigid solids impacting the free-surface of water[J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(Extra Issue): 126-134.
- [10] Lee B H, Park J C, Kim M H, et al. Numerical simulation of impact loads using a particle method [J]. Ocean Engineering, 2010, 37: 164-173.
- [11] Chung J Y, Chung J O, Kang H D, et al. A novel experimental technique in slamming[J]. Bodies, Croatia: Proceedings of the 22nd International Workshop on Water Waves and Floating, 2007: 41-44.
- [12] Chuang L. Experiments on flat-bottom slamming [J]. Journal of Ship Research 1966, 10: 10-17.
- [13] Aquelet N., Souli M., Gabrys J., et al. A new ALE formulation for sloshing analysis[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2003,16 (4): 423-440.
- [14] 矫桂琼, 贾普荣. 复合材料力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [15] 王新峰, 周光明, 周储伟等. 基于周期性边界条件的机织复合材料多尺度分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 37(6): 730-735.