

SPH 方法研究空气在平板入水中的影响

闫蕊*, 徐 绯, 任选其

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要:飞机水上迫降以及船体在高速行驶时,均会发生结构物砰击水面的现象,当结构物底面较为平坦,砰击水面时会捕获空气,在板底形成空气垫。研究空气垫的形成及影响,有助于对结构物进行更准确的载荷分析。该问题的研究涉及到气固液三相的相互作用,在数值模拟中仍是一个挑战,本文使用光滑粒子流体动力学(SPH)方法对该问题进行模拟。首先,与实验结果进行对比;其次,系统地研究了平板形成空气垫以及砰击水面的过程,考查了空气、水和平板的动能变化。对比了在 SPH 模拟中考虑空气与不考虑空气得到的水压力场和平板所受压力,说明了空气对结果的影响;最后,研究了平板宽度对空气垫形成的影响,从而进一步影响加速度。

关键词:光滑粒子流体动力学;砰击;平板;空气垫;水

中图分类号:O351.2

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2017)05-0564-06

1 引 言

船体高速行驶或飞机水上迫降等行为都涉及到砰击水面的问题,此时需要考虑流体的动力学细节以及结构的破坏^[1]。对于底部平坦的结构可以简化为平板进行研究。早期对平板砰击水面的研究发现,平板所受的压力远小于声学压力,在之后的研究中认识到是由于空气垫的存在起到了缓冲的作用。Chuang^[2]对平板和不同底升角的楔形体进行了实验研究,发现底升角小于 3°的楔形体砰击水面时会捕获一部分空气,小于 1°的楔形体和平板会捕获大量的空气。Oh 等^[3]在实验中记录了空气垫的形成与消失。Lin 等^[4]的实验也显示了平板砰击水面时空气层的存在,比较了不同高度自由下落的平板砰击水面时产生的加速度和压力。上述研究工作都说明了空气垫在砰击过程中的存在及重要性。黄震球等^[5]在试验中给平板结构加入翼缘来增加空气的捕获量,实现对结构的缓冲,研究了不同翼缘高度和间距的影响。

空气的存在,使得入水问题的研究更加复杂,Zhao 等^[6]认为理论解对载荷估计过大是由于未考虑空气垫的影响。相较于理论方法,数值模拟可以得到更加直观的流体运动形态以及压力和速度等

分布细节。SPH 方法是一种无网格方法,界面处理灵活,适于模拟大变形问题^[7]。结构物入水方面,针对楔形体做了大量的研究工作,取得了较好的研究成果。如 Shao^[8]使用不可压缩 SPH 模型来处理流体和楔形体的接触。Skillen 等^[9]在每个时间步中按照 Fick 准则,沿着粒子的浓度梯度方向移动粒子,使得结构物砰击流体时,流体粒子保持均匀分布,从而保证计算的稳定性,模拟了圆柱和楔形体入水。Farsi 等^[10]使用 SPH 模拟了不同底升角的对称和不对称楔形体入水。但这些研究没有考虑空气的影响,如前文所述,平板砰击水面时空气的影响不可忽略。由于考虑空气的平板砰击水面问题是一个多相、多物理过程的复杂问题,目前相关的研究并不多。Lind 等^[11]提出了将水视为不可压缩流体,空气为可压缩流体的耦合模型,研究了平板砰击不同陡度的波峰时空气影响的大小。

结构物入水过程中空气影响的研究,有助于更全面地认识砰击问题,对结构物进行更准确的载荷分析。在前期的工作中,对考虑空气的楔形体入水进行了研究,已经检验了所使用方法处理固液气三相耦合问题的合理性^[12]。本文将该计算策略用于研究平板入水问题,相较于楔形体,空气在平板入水过程中的影响更大。首先,在方法介绍中阐述了程序中所使用的主要计算策略;其次,建立模型,将模拟结果与实验相比较,然后对空气在平板自由落体及砰击水面的影响进行了研究;最后,比较了不同平板宽度的影响。

收稿日期:2016-08-12;修改稿收到日期:2016-12-05.

基金项目:国家自然科学基金(11272266);航空基金(2013ZD53049)资助项目.

作者简介:闫蕊*(1986-),女,博士生

(E-mail:yanrui@mail.nwpu.edu.cn);

徐 绯(1970-),女,博士,教授,博士生导师.

2 方法介绍

使用 Fortran 编写的 SPH 程序对平板砸击水面进行研究,相较于商业软件,自编程序可以方便地加入最新的算法及准则。SPH 方法基于拉格朗日的连续性近似方程

$$\frac{d\rho_a}{dt} = -\rho_a \sum_{\eta} \frac{m_{\eta}}{\rho_{\eta}} (\mathbf{v}_{\eta} - \mathbf{v}_a) \cdot \nabla_a \mathbf{W}_{a\eta} \quad (1)$$

式中 ρ_a 和 $\mathbf{v}_a$ 分别为粒子 a 的密度和速度, ρ_{η} , $\mathbf{v}_{\eta}$ 和 m_{η} 分别为粒子 η 的密度、速度和质量, $\mathbf{W}_{a\eta}$ 为核函数,本文使用 Wendland 核函数,其形式为

$$W(r) = \begin{cases} \frac{1}{8}(1+3q/2)(2-q)^3 & (r_{a\eta} \leq 2h) \\ 0 & (r_{a\eta} > 2h) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $q = r_{a\eta}/h$, $r_{a\eta}$ 为粒子 a 和 η 之间的距离, h 为光滑长度,本文模拟中光滑长度取 1.5。加速度方程为

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \sum_{\eta} m_{\eta} \left\{ \frac{P_a + P_{\eta}}{\rho_a \rho_{\eta}} + R_{a\eta} + \Pi_{a\eta} \right\} \cdot \nabla_a \mathbf{W}_{a\eta} + \sum_j m_j r_{bj} f(|r_{bj}|) + g \quad (3)$$

式中 P_a 和 P_{η} 分别为粒子 a 和 η 的压力,第一项求和是针对流体粒子,第二项求和仅针对边界粒子,边界力 $f(|r_{bj}|)$ 将在 2.3 节中介绍, g 为重力加速度, $R_{a\eta}$ 为液-气界面处的稳定项,防止这两种粒子的穿透,是处理液-气界面的关键,具体形式为

$$R_{a\eta} = 0.08 \left| \frac{\rho_{0a} - \rho_{0\eta}}{\rho_{0a} + \rho_{0\eta}} \right| \left| \frac{P_a + P_{\eta}}{\rho_a \rho_{\eta}} \right| \quad (4)$$

式中 ρ_{0a} 和 $\rho_{0\eta}$ 为粒子的参考密度, $R_{a\eta}$ 只存在于距离水-空气界面 $2h$ (核函数作用范围) 内,用于界面稳定,防止界面处粒子的相互穿透。这一项所产生的力不大于和力的 8% [13]。

2.1 状态方程

流体状态方程如下 [14],

$$P_a = (\rho_{0a} c_a^2 / \gamma) [(\rho_a / \rho_{0a})^{\gamma} - 1] \quad (5)$$

式中 ρ_{0a} 是流体参考密度。 c_a 并非流体的真正声速,对于水来说需要保证密度的变化不大,在计算中一般取 10 倍的平板最大速度。为了保证计算的稳定性,空气的声速为水的 cf 倍,其中 $cf = 1 + 2.5 \log(\rho_{\text{water}} / \rho_{\text{air}})$ 。 ρ_{water} 和 ρ_{air} 分别为水和空气的参考密度 [13]。 γ 为常数,对于水 $\gamma = 7$, 对于空气 $\gamma = 1.4$ 。

2.2 粘性

式(3)的 $\Pi_{a\eta}$ 为液体粘性项,对于单一流体,适用于 Wendland 核函数的粘性项为 [15]

$$\Pi_{a\eta} = - (8 \bar{v}_{a\eta} v_{a\eta} \cdot \mathbf{r}_{a\eta}) / (\bar{\rho}_{a\eta} |\mathbf{r}_{a\eta}| \bar{h}_{a\eta}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{v}_{a\eta} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_{\eta}$ 为两粒子的速度差, $\bar{\rho}_{a\eta}$ 为粒子 a 和 η 的密度平均值, $\bar{h}_{a\eta}$ 为粒子 a 和 η 的光滑长度平均值, $\bar{v}_{a\eta}$ 为动力粘性,

$$\bar{v}_{a\eta} = \frac{1}{8} \alpha h v_{\text{sig}} \quad (7)$$

式中 $\alpha = 0.5$, $v_{\text{sig}} = 0.5(c_a + c_{\eta})$ 。当粒子的黏度差异较大时,使用

$$\bar{v}_{a\eta} / \bar{\rho}_{a\eta} \rightarrow 2 v_a v_{\eta} / (v_a \rho_a + v_{\eta} \rho_{\eta}) \quad (8)$$

替换式中相应项 [16], 其中 v_a 和 v_{η} 为粒子 a 和 η 的动力粘性,这满足粘性应力的连续性。当计算边界或平板与流体之间的粘性时对式(8)乘以 $2^{[15]}$ 。

2.3 边界

边界粒子 b 和流体粒子 j 之间的边界力为 [17]

$$f(|r_{bj}|) = \begin{cases} B_{bj} W(|r_{bj}|) / r_{bj}^2 & (r_{bj} \leq 2h) \\ 0 & (r_{bj} > 2h) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $B_{bj} = 0.02 c_j^2 / (m_b + m_j)$, c_j 是粒子 j 的声速。边界粒子密度与水相同,质量为 $\rho_0 (dp/n)^2$, 其中 dp 是初始流体粒子间距, dp/n 是初始的边界粒子距离,模拟中使用的边界粒子为三层,故 $n = 3$ 。流体粒子的质量为 $\rho_0 dp^2$ 。用于边界粒子和流体粒子的搜索域 h 是相同的。

时间积分使用的是 Verlet 积分方法 [12], 时间步长通过下式确定。

$$\Delta t = 0.5 \min(h / c_a) \quad (10)$$

2.4 平板的运动方程

平板使用的粒子与边界粒子相同,但其密度由平板的质量和尺寸决定。平板为刚体,在下落过程中无转动,故平板上每一个粒子的运动都是相同的。 R 表示平板的位移,板的运动方程为

$$dR/dt = V \quad (11)$$

$$M(dV/dt) = \sum_b f_b + Mg \quad (12)$$

求和是针对所有平板粒子, V 是平板的速度, f_b 是平板粒子所受力,由式(9)计算得到, M 是平板的质量。

3 模型介绍及模拟结果分析

3.1 模型介绍

为了研究空气垫在平板入水中的影响,本文分别建立了固-液两相模型(以下称为无空气模型),以及气-固-液三相模型(以下称为有空气模型)。图 1 给出了有空气模型的示意图,浅色区域为水,深色区域为空气。需要注意的是,在研究平板宽度影响时,平板的尺寸会有所不同,相应的水域宽度也会变

化,水深为 0.6 m。液体粒子间距为 0.0033 m,水箱边界和平板使用边界粒子,粒子间距为流体粒子间距的 1/3(0.0011 m)。本文对粒子数量进行了检验,对比了不同粒子间距的结果(0.01 m, 0.005 m, 0.0033 m 和 0.0025 m),后两种粒子间距得到的模拟结果吻合,故选用的粒子间距为 0.0033 m。水的参考密度为 1000 kg/m^3 ,空气的参考密度为 1.29 kg/m^3 。

3.2 与实验的比较

平板入水的实验工作并不多,本文选择 Lin 等^[4]的实验结果作为数值模拟结果的对照。板质量为 12.5 kg,尺寸为 $0.45 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 。SPH 模拟时板宽为 0.2 m,质量为 $12.5 \text{ kg}/0.45 \text{ m} = 27.7 \text{ kg/m}$ 。平板从 0.1 m 高度处自由下落砸击水面。在砸击问题中流体的加速度起主导作用,其影响远大于表面张力^[11],因此本文并未考虑表面张力的影响。

图 2 给出了加速度随时间的变化,为了方便有无空气两种模型与实验结果的比较,平移各自的时间坐标,使加速度 0 值均位于 0 时刻。可以看出,无空气时板在触水后加速度上升和下降均很迅速,而实验结果和有空气模拟结果加速度上升缓慢,持续时间较长。Zhao 等^[18]指出,结构的宽度(B)和长度(L)的比值越大,二维结果与三维结果差异越大。Meyerhoff^[19]测试了三种尺寸比例 $B/L=0.25$, 0.4 和 0.5 的维数差异影响,得到系数 $f(0.25)=0.95$, $f(0.4)=0.87$ 和 $f(0.5)=0.8$,如 $B/L=0.25$ 时,三维情况下得到的最大冲击力为二维时的 95%。从 f 的变化规律可以看出, B/L 比值越小,

二维模拟结果越靠近三维实验值。本算例中 $B/L=0.44$,根据 Meyerhoff 的结果, f 在 0.85 左右,但是实验结果远小于 SPH 无空气模拟结果的 85%,这说明实验中空气层有缓冲作用,而实验中也确实拍摄到了板底的空气层^[4]。有空气的 SPH 模拟得到的加速度比实验略小,因为空气不能从第三方向上逃逸,会比实验捕获更多的空气,缓冲效果比实验更明显。综上所述,成功地模拟空气垫使数值结果更接近实验值。

3.3 空气垫的形成过程及能量变化

平板从距离水面 0.1 m 处自由落体,平板的宽度为 0.45 m,质量为 62.5 kg/m ,初始时刻 $t=0 \text{ s}$ 。图 3 显示了平板砸击水面的过程。当平板下降时,下部空气受压缩,压强增大,上部压强变小,所以空气形成了绕板边缘的流动,进而形成漩涡(图 3(a)的箭头为速度方向)。当平板距离水面 0.04 m 时(图 3(b)),空气受到平板与水面的压缩,压强增大,平板加速度开始上升。图 3(c)的位置对应的加速度值为 0,此时平板速度达到最大,本文将此时的速度称为平板的触水速度,由于空气的存在,平板的触水速度为 1.26 m/s ,比理论值 $v=\sqrt{2gh}=1.4 \text{ m/s}$ 小;而空气的最大逃逸速度达到 40 m/s ,部分空气捕获在板下部形成空气垫。此后空气剧烈压缩,平板加速度迅速增大,速度开始下降,在图 3(d)的位置时,加速度达到峰值。随着平板的下降,空气仍会持续逃逸,但由于平板速度减慢,空气逃逸速度也逐渐降低。

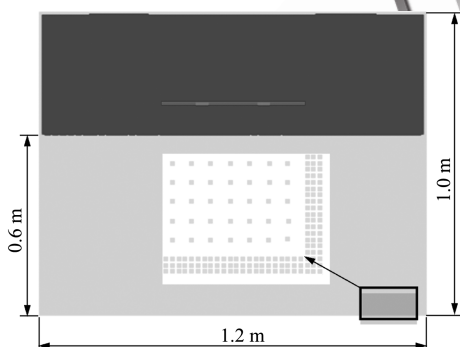


图 1 模型示意图
Fig. 1 Sketches of the SPH model

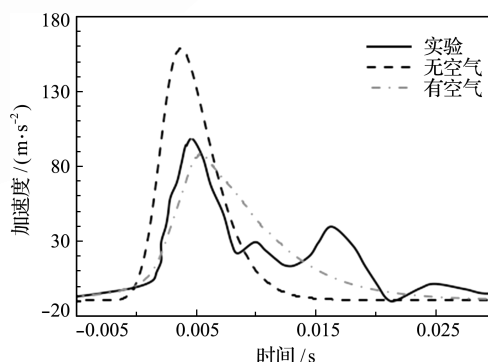


图 2 平板加速度随时间的变化
Fig. 2 Acceleration of plate as a function of time

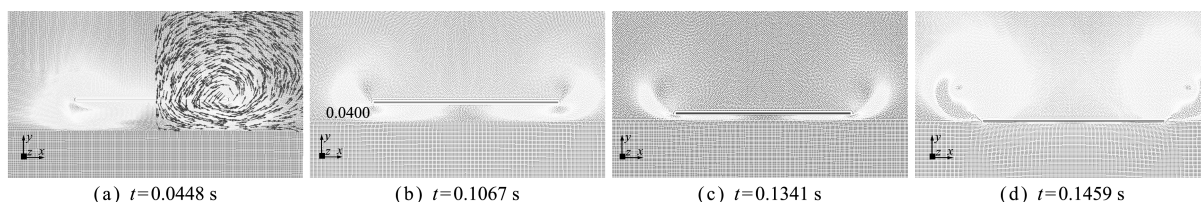


图 3 平板下落过程中的速度场
Fig. 3 Velocity field during water entry of flat plate

从图3可以看出,平板砸击过程中空气的速度非常大。图4给出了有空气模型中水、空气和平板各自总动能随时间的变化。在0.1341 s 平板开始减速,动能减小。平板继续下落推动水的运动,水的动能上升。空气的运动速度虽然很大,但是质量小,所以动能很小。空气在整个过程中只是起到缓冲的作用,延长砸击时间及减小加速度峰值,真正消耗能量的是水。需要注意的是,整个砸击过程还涉及到水、空气和板的重力势能和粘性耗散能,总能量守恒。

3.4 空气垫对平板及水域压力的影响

图5(a,c,e)显示了无空气时平板砸击水面所产生的压力场。图5(a)对应了图8无空气P1处压力值最大时刻的压力场,压力场呈长方形分布,板底部水压分布较均匀,边缘处略小。随着平板的继续下降,压力区域扩大,平板边缘处水域压力值与中心处的差异增大,如图5(c)所示。图5(e)压力波向水下扩散。

图5(b,d,f)显示了存在空气时平板砸击水面所产生的压力场。图5(b)对应了图7有空气P1处压力值最大时刻,空气由于受到剧烈压缩,压强增大;水压在中部较大(图中浅色部分),呈半圆形分布。图5(d,f)与图5(c,e)类似,但是水压力场范围较小。

压力测试点位于平板中心(P1)以及距离中心0.05 m(P2),0.15 m(P3)和0.2 m(P4)的位置,如图6所示。SPH模拟中压力的计算方法为将测试点左右0.00275 mm 范围内粒子所受垂直方向上的力相加,再除以区域宽度0.0055 m。

图7为各压力测试点压力值随时间的变化,可以看到无空气时,P1,P2和P3同时达到最大值,但是P3点处压力值下降更快,P4点处的压力值在上升阶段与前三点处吻合,但峰值较小。有空气时P3,P4与P1,P2的差异较小。Chuang^[20]指出,一般情况下平板边缘的冲击压力在一定程度上比

中心压力小,但是由于空气垫的存在,使得这一差距并不是很大。由于空气垫的存在,减小了最大压力值,无空气时压力峰值约为有空气时的2.4倍。

压力曲线与压力云图所表达的内容一致,相互补充,说明了平板砸击过程中平板所受压力 and 水的压力场的变化过程。

3.5 板宽对空气垫及加速度的影响

保持板的密度不变(138.9 kg/m^2),五种尺寸的板(0.15 m,0.3 m,0.45 m,0.6 m和0.9m)从

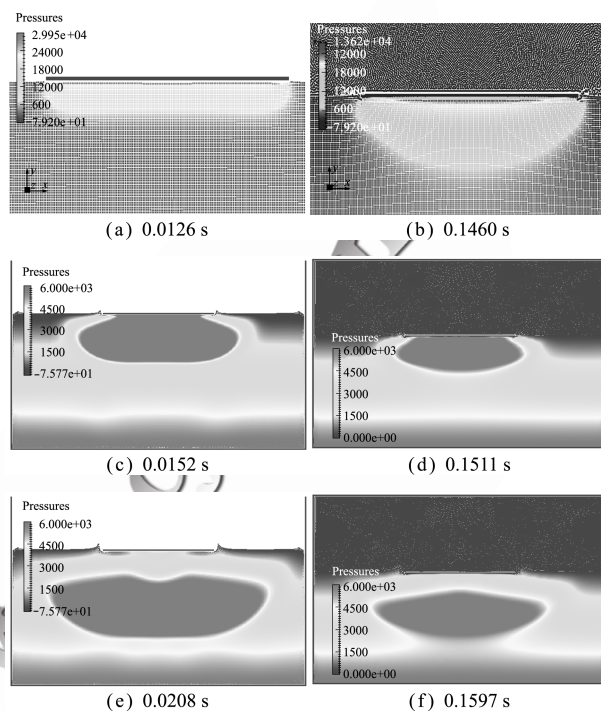


图5 压力场对比

Fig. 5 Comparison of pressure field

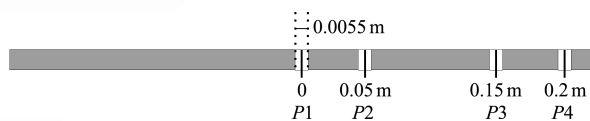


图6 压力测试点分布示意图

Fig. 6 Positions of pressure measurement on the plate

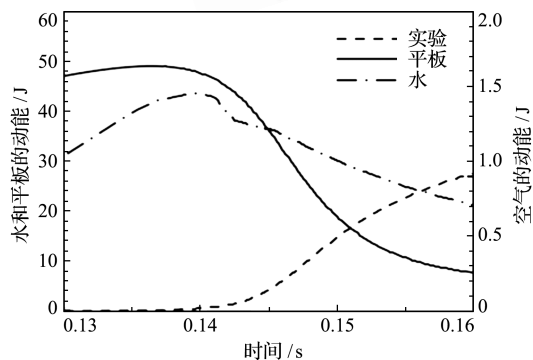


图4 水、空气和板动能随时间的变化

Fig. 4 Kinetic energy of water, air and plate as a function of time

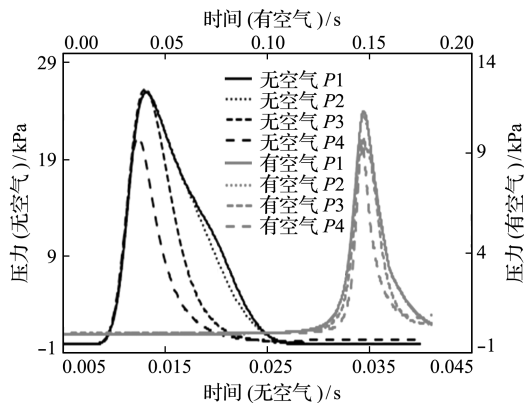


图7 板上四个点处压力随时间的变化

Fig. 7 Pressures on the flat plate as a function of time

距离水面 0.2 m 处自由下落,这里需要注意的是该问题仍是二维问题,仅改变了板的宽度。从图 8 可以看出,板越宽触水速度越小,当板宽趋于 0 时,趋势线的触水速度趋于 1.97 m/s,非常接近自由落体的理论速度 1.98 m/s。不同板宽在达到触水速度时,空气运动的最大速度都约为 30 m/s。空气的最大速度发生在板端,板底部中心的速度最小,如图 3 所示。所以板越宽,空气越难逃逸,形成的空气垫越厚,离水面较远时就开始减速(如板宽 0.15 m,距离水面约为 0.0037 m 时平板开始减速;板宽 0.9 m,距离水面约 0.031 m 时平板开始减速)。

图 9 比较了有空气和无空气时不同板宽在砰击水面后的最大加速度。将不同板宽的初始位置进行调整,使触水速度都为 1.79 m/s,使结果具有可比性。可以看出,当板宽大于 0.3 m 时,加速度值变化不大。无空气模型中 0.15 m 板宽的加速度比其他板宽下的加速度小很多,这是由于小尺寸板的边缘效应增强,并且边缘处板的压力较小,如图 7 所示。有空气模型中 0.15 m 板宽的加速度明显上升,板尺寸小时空气更容易逃逸,其各项性质就会过渡到无空气的性质,水压力场的分布与图 5 (a,c,e)更类似。

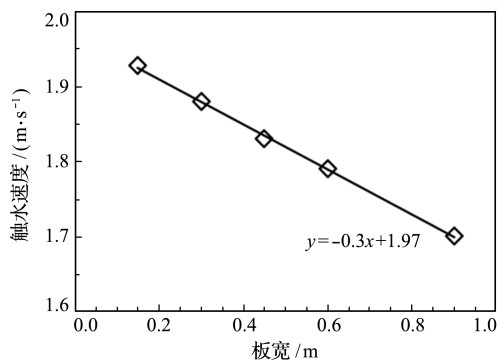


图 8 平板的宽度与触水速度的关系

Fig. 8 Relationship between velocity and the width of flat plate

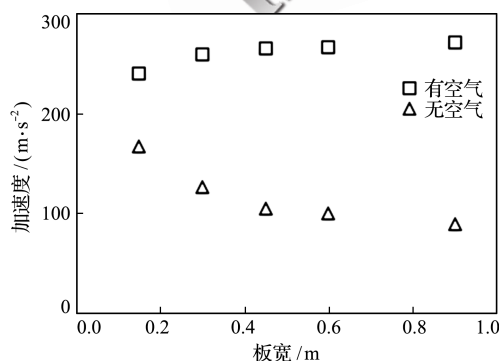


图 9 最大加速度与板宽的关系

Fig. 9 Relationship between maximum acceleration and the width of flat plate

在三维情况下,空气更易逃逸,但图 8 和图 9 说明了板宽对形成空气垫的影响,由此可以推测在三维情况下,随着结构尺寸的增大,空气垫的厚度也会增加,从而对结构砰击水面产生一定的影响。

4 结 论

本文使用 SPH 方法,将模拟结果与实验结果相比较,并且在验证了一致性的基础上对平板结构砰击水面进行了模拟,将有无空气的 SPH 模拟结果进行对比,系统地研究了空气垫的形成及在平板砰击水面时的影响。

平板靠近水面时空气会迅速逃逸,但是还会捕获,一部分空气形成空气垫。由于空气的存在,平板自由落体后的触水速度比理论值小。研究表明,空气垫在砰击过程中起到了缓冲作用,使加速度曲线上升更缓慢,峰值明显减小,但是平板的动能主要还是由水消耗。

空气的存在使平板的压力分布更均匀,压力峰值显著降低,水压力场范围变小。不同板宽的研究表明,当板尺寸足够大时,宽度变化基本不影响加速度;尺寸小时,空气更易逃脱,有空气和无空气的模拟结果相接近。

未来的研究可以进行三维的平板砰击水面的模拟,更具工程指导意义。在结构设计中也可以利用空气垫的特性,使结构捕获更多的空气,增强缓冲作用。

致谢:感谢澳大利亚莫那什大学 J. J. Monaghan 教授在研究过程中给予的建议。

参考文献 (References):

- [1] Seddon C M, Moatamedi M. Review of water entry with applications to aerospace structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32** (7):1045-1067.
- [2] Chuang S L. Slamming of Rigid Wedge-Shape Bodies With Various Deadrise Angles [R]. Washington: DTRC, 1966.
- [3] Oh S H, Kwon S H, Chung J Y. A Close Look at Air Pocket Evolution in Flat Impact [A]. *Proceeding of 24th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*[C]. Zelenogorsk, Russia, 2009.
- [4] Lin M C, Shieh L D. Simultaneous measurements of water impact on a two-dimensional body [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1997, **19**(3):125-148.
- [5] 黄震球, 张文海. 减小平底体砰击的试验研究[J]. *华中工学院学报*, 1986, **14** (5): 725-730. (HUANG Zhen-qiu, ZHANG Wen-hai. Experimental investigation on the reduction of flat-bottom body slamming

- [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1986, **14**(5): 725-730. (in Chinese))
- [6] Zhao R, Faltinsen O. Water entry of two-dimensional bodies [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, **246**(1): 593-612.
- [7] 任金莲, 欧阳洁, 蒋涛. 修正 SPH 方法在自由表面模拟中的应用 [J]. 计算力学学报, 2012, **29**: 69-73. (REN Jin-lian, OUYANG Jie, JIANG Tao. Application of the Modified SPH Method to the simulation of free surface [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, **29**: 69-73. (in Chinese))
- [8] Shao S D. Incompressible SPH simulation of water entry of a free-falling object [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2009, **59**(1): 91-115.
- [9] Skillen A, Lind S, Stansby P K, et al. Incompressible smoothed particle hydrodynamics (SPH) with reduced temporal noise and generalised Fickian smoothing applied to body-water slam and efficient wave-body interaction [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2013, **265**: 163-173.
- [10] Farsi M, Ghadimi P. Simulation of 2D symmetry and asymmetry wedge water entry by smoothed particle hydrodynamics method [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2014, **37**(3): 821-835.
- [11] Lind S J, Stansby P K, Rogers B D, et al. Numerical predictions of water-air wave slam using incompressible-compressible smoothed particle hydrodynamics [J]. *Applied Ocean Research*, 2015, **49**: 57-71.
- [12] Yan R, Monaghan J J, Valizadeh A, et al. The effect of air on solid body impact with water in two dimensions [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, **59**: 146-164.
- [13] Monaghan J J, Rafiee A. A simple SPH algorithm for multi-fluid flow with high density ratios [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, **71**(5): 537-561.
- [14] MacDonald J R. Some simple isothermal equations of state [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1966, **38**(4): 669-679.
- [15] Morris J P, Monaghan J J. A Switch to Reduce SPH viscosity [J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, **136**(1): 41-50.
- [16] Cleary P W, Monaghan J J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, **148**: 227-264.
- [17] Monaghan J J, Kajtar J B. SPH particle boundary forces for arbitrary boundaries [J]. *Computer Physics Communications*, 2009, **180**(10): 1811-1820.
- [18] Zhao R, Faltinsen O, Aarsnes J. Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation [A]. Twenty-first Symposium on Naval Hydrodynamics [C]. Trondheim, Norway, 1997.
- [19] Meyerhoff W K. Added masses of thin rectangular plates calculated from potential theory [J]. *Journal of Ship Research*, 1970, **14**: 100-111.
- [20] Chuang S L. Investigation of Impact of Rigid and Elastic Bodies with Water [R]. Washington: NSRDC, 1970.

Research on the effects of air during flat plate impacting with water using SPH method

YAN Rui*, XU Fei, REN Xuan-qi

(School of Aeronautical Structural Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The air cushion produced by the interaction of flat bottom structures and fluids is a practical problem, which happens on a moving body such as airplane or ship hitting water. Research on the formation and effects of air cushion improves the accurate measurement of loads on structures, which is a challenge in simulation because it is the interaction among air, water and solid. In this paper, smoothed particle hydrodynamics (SPH) method is used for the simulation. First of all, the SPH simulation results are compared with experimental results. Then, the processes of air cushion formation and impact with water are described carefully. The kinetic energies of air, water and plate are analyzed. Pressure field of water and pressure on the plate show the effects of air, based on the comparison between with-air and without-air SPH simulation. The influences of plate width on the formation of air cushion and acceleration are investigated in the end.

Key words: smoothed particle hydrodynamics; impact; flat plate; air cushion; water

引用本文/Cite this paper:

闫蕊, 徐菲, 任选其. SPH方法研究空气在平板入水中的影响 [J]. 计算力学学报, 2017, **34**(5): 564-569.

YAN Rui, XU Fei, REN Xuan-qi. Research on the effects of air during flat plate impacting with water using SPH method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, **34**(5): 564-569.