

文章编号: 1674-8190(2022)03-040-10

水锤效应影响因素及防护结构的数值研究

杨秋足^{1,2}, 张玉林¹, 杨扬¹, 徐绯¹, 王计真^{3,4}

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 太原理工大学 航空航天学院, 太原 030024)

(3. 中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 西安 710065)

(4. 西安交通大学 机械学院, 西安 710049)

摘要: 燃油箱作为飞机上易损性最高的部件, 当其遭受高速射弹袭击时会产生破坏严重的液压水锤效应, 直接威胁飞机安全, 对水锤效应问题的数值研究具有重要意义。采用CEL方法对水锤效应问题进行数值模拟, 首先同已有试验结果进行对比, 验证数值计算模型的准确性; 然后分析射弹入射速度、充液率对水锤效应的影响; 最后对水锤效应的防护设计进行数值分析, 优选防护结构设置形式。结果表明: 水锤效应的破坏威力来自于冲击波, 射弹动能越大、充液率越高, 对油箱的破坏性越大; 设置防护挡板能够在一定程度上降低冲击波对油箱结构的破坏程度, 空气防护挡板结构的防护效果最佳。

关键词: CEL方法; 高速冲击; 水锤效应; 油箱; 防护结构

中图分类号: V221.91; O385

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Research on Influencing Factors of Hydrodynamics Ram Effect and Protective Structure

YANG Qiuzu^{1,2}, ZHANG Yulin¹, YANG Yang¹, XU Fei¹, WANG Jizhen^{3,4}

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As the most vulnerable part of the aircraft, the fuel tank is damaged by hydrodynamics ram effect when attacked by high-speed projectiles, which will directly threaten the safety of the aircraft. The numerical research on the hydrodynamics ram effect is of great significance. In this paper, CEL (coupled Eulerian Lagrangian) method is used to simulate the hydrodynamics ram effect. Firstly, the accuracy of the numerical model is verified by comparing with the existing experimental results; Then, the effects of impact velocity and liquid filling rate on the hydrodynamics ram effect are analyzed. Finally, in order to reduce the damage power of hydrodynamics ram effect, the design of protective structure is numerically analyzed. The results show that the damage power of hydrodynamics ram effect comes from shock wave. The greater the kinetic energy of projectile and the higher the liquid filling rate, the greater the damage of oil tank. The protective baffle can reduce the damage caused by shock wave to the oil tank structure to a certain extent, and the air-interlayer protective structure is the best for the protective effect.

Key words: CEL method; high speed impact; hydrodynamics ram effect; oil tank; protective structure

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(11972309); 中央高校基本科研业务费专项资金(310201901A012)
高等学校学科创新引智计划(111计划)基地项目(BP0719007)

通信作者: 徐绯, xufei@nwpu.edu.cn

引用格式: 杨秋足, 张玉林, 杨扬, 等. 水锤效应影响因素及防护结构的数值研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 40-49.

YANG Qiuzu, ZHANG Yulin, YANG Yang, et al. Numerical research on influencing factors of hydrodynamics ram effect and protective structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 40-49. (in Chinese)

0 引言

在众多的飞机部件中,燃油系统中油箱的暴露面积通常占全机的50%以上,当燃油箱受到高速射弹袭击时,水锤效应是造成油箱破坏的重要原因之一,为了设计具有高生存力的油箱结构,对水锤效应下油箱的动态响应及其破坏机理进行研究尤为重要。

水锤效应作为一种比较常见且杀伤力巨大的破坏现象,自二战后就受到了美国等发达国家的重视,并开展了许多研究^[1-3]。目前已有的对水锤效应的研究按研究方法可分为理论研究、实验研究和数值仿真研究^[4-5]。理论分析进展缓慢,引入过多假设导致其结果缺乏准确性;实验研究成本高、危险性大;而数值仿真可重复性高、方便捕捉内部现象,成为研究水锤效应的重要手段。

国外,R. Vignjevic等^[6]率先使用SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法模拟水锤效应,结构和流体均使用粒子离散,并将仿真得到的空腔形状与实验进行对比,验证了SPH方法的可行性;M. Sauer^[7]发现当流体域范围较大时,使用SPH方法耗时较长,故采用有限元和SPH耦合的方法来计算高速破片冲击下容器的破坏问题,液体在大变形时转换成SPH粒子,该方法能够较好地仿真液体飞溅现象,计算效率也得以提高;Y. Kwon等^[8]利用Ls-Dyna中的ALE方法对水锤效应进行仿真,对照实验数据验证了模型的准确性后,又对结构壁厚、弹体冲击速度、弹体质量、弹体形状和冲击角度对水锤效应的影响分别做了分析讨论。

国内,Liu F等^[9]使用Autodyna软件中的SPH方法来离散液体,研究发现,在液舱内壁面加入橡胶层能够减小结构的变形;韩璐等^[10]对影响水锤效应的破片速度、形状、入射角度、方向等进行了深入研究;李向东团队^[11-13]从ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)方法和实验方法结合的角度,对多破片作用下的液压水锤效应进行了研究,同时他们也从实验中观测到了水锤效应产生时会发生液体喷溅现象,并分析了影响液体喷溅的因素;李典等^[14]、仲强等^[15]对水锤效应的载荷特性以及舰船上常用的陶瓷/液舱复合结构产生水锤效应时的破坏过程和破坏模式进行了研究;Yang H Q^[16]利用包含空化和气液界面追踪模块的计算流体力学软件CFD-ACE+建立了多相多物理场的数值模型,模型较好地重现了液体的喷溅现象,同时也能

仿真空泡的生长过程。

迄今为止,研究人员对飞机油箱水锤效应影响因素的研究已较为全面,也取得了丰富的研究成果。但对于水锤效应演化过程中流场内部压力、空腔形态的关注比较少,尤其对油箱防护结构设计方面的研究甚是缺乏。本文采用Abaqus软件里的CEL方法对水锤效应问题进行模拟,通过与实验结果对比,验证仿真模型的准确性;之后,以该油箱模型为研究对象,开展入射速度、充液率对油箱内部压力、空腔演化、结构响应的影响规律研究;同时借鉴舰艇防雷舱结构设计特点^[17],对油箱增设单层、具有空气夹层两种防护结构对水锤效应破坏威力的影响进行研究,揭示水锤效应对结构的损伤程度及破坏机理,以期对油箱结构的优化设计提供参数支持。

1 射弹冲击油箱的有限元模型建立

射弹高速侵彻油箱的有限元模型包括弹丸、油箱、燃油、空气四部分,为了验证本文计算模型的准确性,参考文献^[18]中的试验:载满燃油的箱体尺寸为750 mm×150 mm×150 mm,箱体左右两端采用150 mm×150 mm×30 mm PMMA有机玻璃固定(便于试验观察),四周采用2.5 mm厚的铝合金6063-T5固定。试验中,采用速度900 m/s、直径12.5 mm的钢球冲击油箱,因为在整个侵彻过程中未观察到钢球有明显的变形,所以在数值建模中将钢球作为刚体处理,采用内存为64 G、CPU为i9 9900K的计算机进行计算。

1.1 射弹和油箱结构模型

为减少计算量,数值计算时只建立1/2的射弹、油箱模型,如图1所示。弹体共1 280个单元,容器共79 652个单元,采用Johnson-Cook本构模型和Johnson-Cook Damage损伤模型来描述箱体材料的塑性行为和破坏特征^[19],模型中使用的具体材料参数如表1所示。

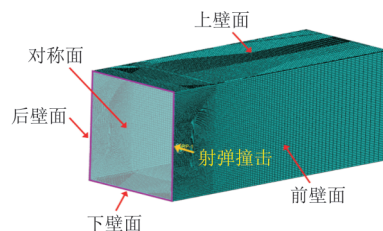


图1 射弹和箱体结构有限元模型

Fig. 1 Finite element model of projectile and box structure

表 1 结构材料参数^[19]
Table 1 Structural material parameters^[19]

参数	数值	
	6063-T5	PMMA
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700	1 180
E/GPa	71	3
ν	0.33	0.35
A/GPa	0.2	—
B/GPa	0.144	—
n	0.62	—
C	0	—
M	1	—
D	0.2	—

1.2 流体模型

模型中的液体部分使用状态方程来描述流体的压力、体积和能量特性,各项同性压力 P 可由 Mie-Gruneisen 状态方程得到:

$$P(\rho, e) = \left(1 - \frac{1}{2}\gamma_0\eta\right)P_H + \gamma_0\rho_0E_m \quad (1)$$

其中,

$$P_H = \frac{\rho_0c^2\eta}{(1-s\eta)^2} \quad (2)$$

式中: E_m 为单位质量的内能; η 为一阶体积修正量, $\eta = \rho/\rho_0 - 1$; γ_0 为 Gruneisen 常数; s 为状态方程的曲线拟合参数; c 为材料中声速。

模型外部的空气则采用理想气体状态方程:

$$P = (\gamma - 1)\rho_0E_0 \quad (3)$$

式中: γ 为绝热系数。

流体的材料参数如表 2 所示。

表 2 流体材料参数^[19]
Table 2 Fluid material parameters^[19]

参数	数值	
	水	空气
$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 000	1.22
$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1 448	—
η	3	—
s	1.979	—
γ_0	0.11	—
γ	—	1.4
$E_m/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	—	253

1.3 流固耦合方法实现

本文采用的 CEL 方法融合了拉格朗日算法和欧拉算法各自的特点,使用欧拉算法描述流体,能有效地解决大变形问题;同时使用拉格朗日网格来离散结构体,可得到准确的应力应变响应。在流体与固体耦合作用时,采用耦合面来抑制欧拉网格描述的流体穿透拉格朗日单元网格。最终欧拉区域大小如图 2 所示,模型中液体区域通过预定义材料场的方式赋予水的材料属性、外部欧拉域赋予空气的材料属性。

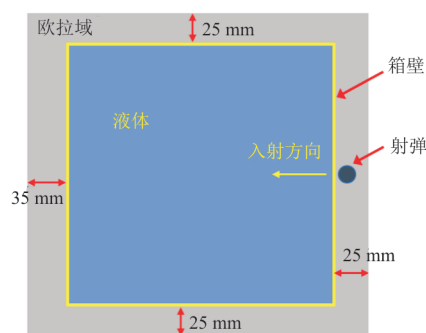


图 2 流固耦合计算域设置

Fig. 2 The setup of calculation domain for fluid structure coupling

1.4 模型验证

首先同 D. Varas 等^[18]的水锤效应实验结果进行对比,验证数值计算模型的准确性。在整个水锤效应过程中,弹体的速度变化情况与实验结果的对比如图 3 所示,可以看出:CEL 方法得到的速度结果与实验值比较接近,最大相对误差是 6.9%,发生在 $t=0.125$ ms 时刻。

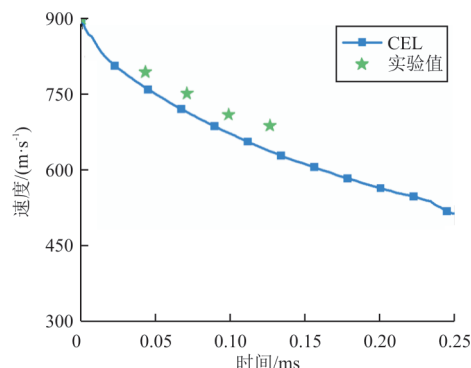


图 3 弹体速度衰减时间曲线

Fig. 3 Fragment velocity-time curves of projectile

然后将计算得到的结构壁面的整体变形情况与实验结果进行对比,如图 4 所示,可以看出:数值

计算得到的壁面变形破坏模式与实验结果比较吻合,前后壁面整体都由于水锤效应的影响产生了较大范围的变形,在弹体直接穿透位置局部,前壁面破孔处较为整齐,后壁面穿孔处局部隆起,孔沿相对参差不齐。

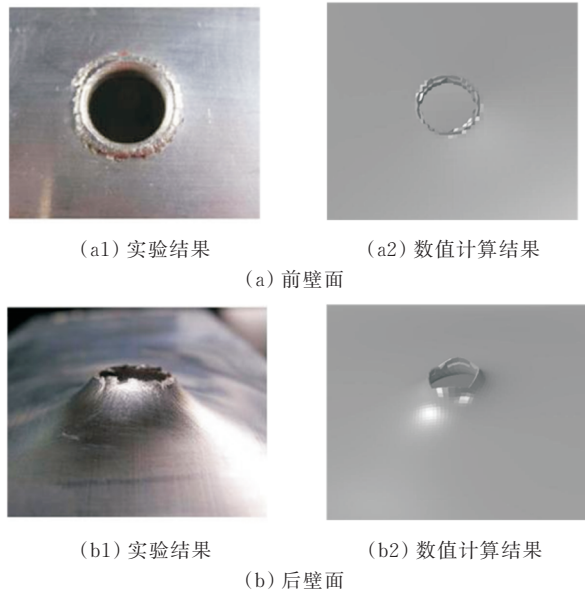


图 4 壁面变形对比

Fig. 4 The comparison of wall deformation

2 水锤效应问题数值分析

在已验证其正确性的有限元模型基础上,开展入射速度、充液率对飞机油箱水锤效应的影响研究(箱内液体采用RP-3航空煤油^[20]),分析射弹侵彻过程中液体内部压力、空腔形态、结构响应的变化趋势;为了降低水锤效应的破坏威力,对防护结构设计进行数值分析。数值研究中,从弹体入射点开始沿入射方向上每隔 10 cm 取一个测量点(P1~P14)。

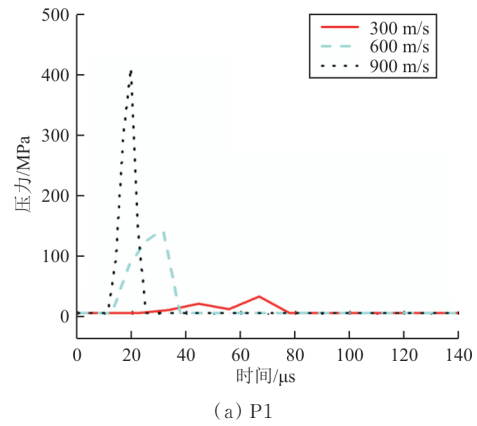
2.1 弹体入射速度对水锤效应的影响

对弹体分别以 300、600 和 900 m/s 的初始速度撞击完全充液的油箱进行数值模拟,对比分析弹体动能对水锤效应的影响。

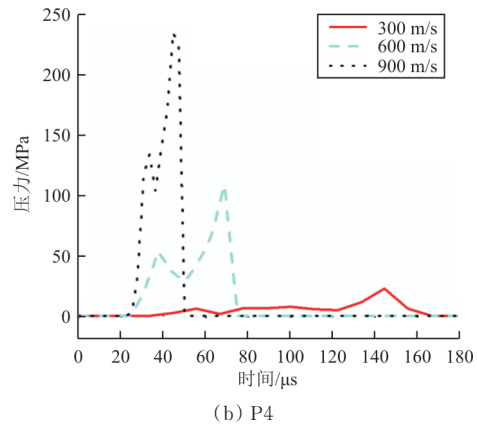
2.1.1 弹体入射速度对液体内部压力的影响

箱体内部各典型压力测点的压力时间曲线随撞击速度的变化如图 5 所示,可以看出:弹体冲击速度对压力峰值影响很大,以 P1 点为例,900 m/s 时的压力峰值 412.5 MPa 是 600 m/s 时的 2.93 倍,

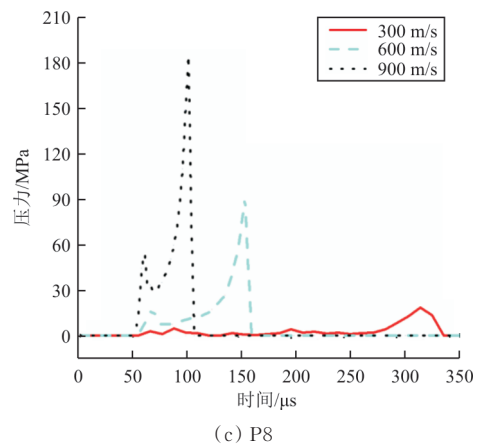
是 300 m/s 时的 14.9 倍;压力脉冲持续时间受弹体速度的影响很大,总的来说就是:弹体速度越大、压力峰值越高,压力脉冲持续时间则会变短。弹体入射速度为 900 m/s 时产生的压力峰值达到了 412.5 MPa,但对应的整个压力脉冲持续时间却只有 16.8 μ s,当弹体速度为 300 m/s 时产生的压力峰值仅为 27.7 MPa,峰值出现时间由于弹体速度减小相应延后,但整个压力脉冲持续时间达到了 55.5 μ s。



(a) P1



(b) P4



(c) P8

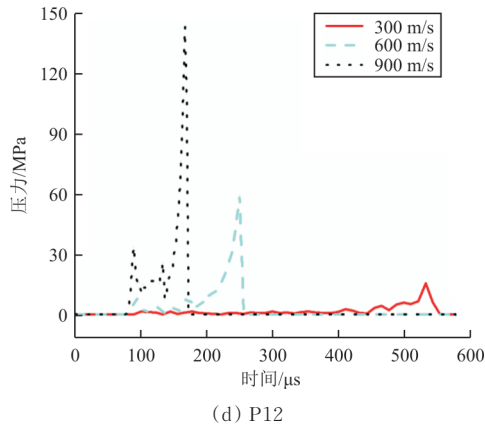


图5 不同入射速度下的入射路径上各测点压力曲线
Fig. 5 Pressure-time histories of fluid on the incident path

2.1.2 弹体入射速度对空腔形态的影响

弹体以不同速度冲击含液容器时空腔直径 D 随时间的变化如图6所示,可以看出:在不同速度下空腔增长的速率都是随着时间增长而放缓,而且弹体的冲击速度越大形成的空腔直径越大。弹体以300、600和900 m/s速度入射时最终形成的空腔最大直径分别为100.8、119.6和133.7 mm。

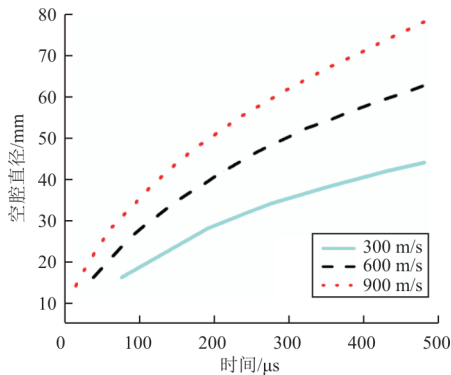


图6 弹体以不同速度入射时空腔直径拓展曲线
Fig. 6 Deformation of cavity under different impact velocity

不同入射速度下对应的射弹射出后空腔形态如图7所示。

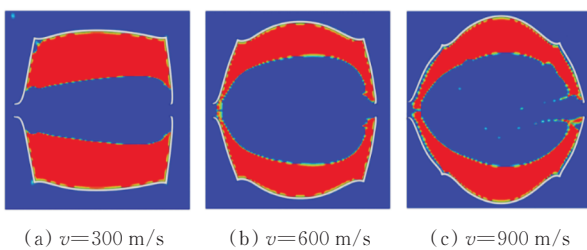


图7 不同弹体冲击速度下的空腔形态
Fig. 7 Cavity shape under different impact velocity

从图7可以看出:当弹体入射速度较高,比如600和900 m/s时,由于液体获得的动能相对更多,最终形成的空腔沿长度方向半径差异不是很大;而当弹体入射速度相对较低时,当弹体运动到后壁面时剩余速度相对较小,在此位置附近弹体推开液体的能力有限,因此靠近后壁面附近空腔半径更小,造成其最终形成的空腔长径比更大,更显细长。

2.1.3 弹体入射速度对结构响应的影响

弹体以不同速度冲击时,液箱结构的变形能在整个过程中的变化如图8所示。

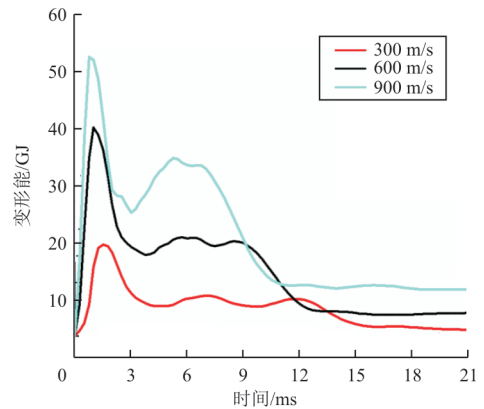


图8 不同弹体冲击速度下油箱结构变形能对比
Fig. 8 Comparison of structural deformation energy under different impact velocity

从图8可以看出:弹体速度越大,箱体出现的最大变形以及最终的塑性变形都更大。以900 m/s时结构的变性能曲线为例,曲线出现第一个也是最大峰值是其产生的空腔膨胀到最大尺寸时产生的,然后结构的弹性变形恢复,结构变形能逐渐减小,当空腔收缩到一定尺寸时又开始重新膨胀变大,同时内部也产生射流对结构有挤压冲击作用,使结构重新产生变形,变形能再次增加出现第二个峰值,之后随着整个液箱体系中能量的逐渐耗散,箱体变形能逐渐减小并最终趋于稳定。从曲线的峰值来看,900 m/s的最大变形能是600 m/s的1.34倍,是300 m/s的3.05倍,表明冲击速度的增大显著提升了壁面变形水平。

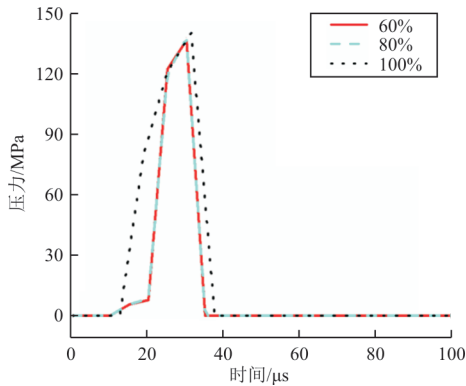
2.2 充液率对水锤效应的影响

在飞行器服役环境中,油箱并不总是处于完全充液状态,相对而言更容易在燃料有消耗时遭受打击,因此对弹体以600 m/s的速度冲击充液率

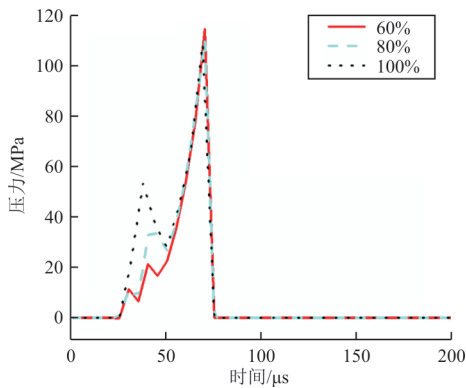
分别为 60%、80% 和 100% 的容器进行计算,研究充液率对水锤效应的影响。

2.2.1 充液率对容器内部压力分布的影响

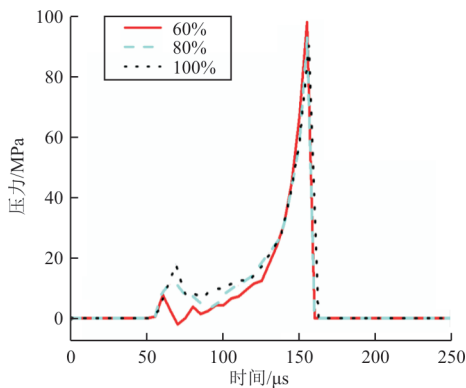
弹体撞击不同充液率的容器时,液体内部的压力沿弹体运动路径的分布如图 9 所示,P1 压力点靠近弹体入射位置,压力峰值为弹体撞击前壁面和液面的初始冲击波强度;距入射点距离较远的 P4、P8 和 P12 压力曲线中的第一个峰值则是初始冲击波传递到该处的剩余强度,第二个峰值是弹体运动到该点处撞击产生的压力场。



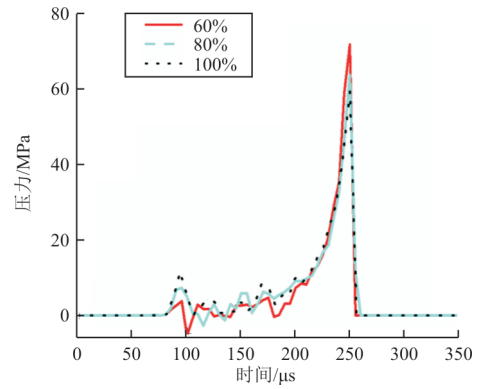
(a) P1



(b) P4



(c) P8



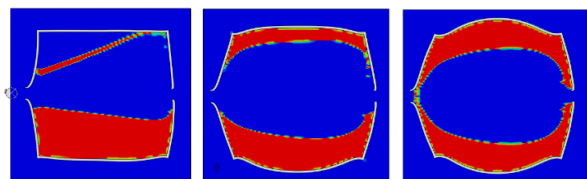
(d) P12

图 9 不同充液率下沿入射路径上测点的压力变化曲线
Fig. 9 Pressure-time histories of fluid on the incident path

从图 9 可以看出:充液率较高时,含液量高,容器内的液体初始冲击波强度大,当弹体击穿前壁面时,容器内液体对前壁面的支撑作用越明显,所消耗能量会更多,因而产生了更强的初始冲击波;而含液量较低时,由于弹体消耗能量更小,剩余动能更大,故在远离入射点的地方由于直接撞击引起的该点压力峰值更大。

2.2.2 充液率对空腔演化的影响

弹体撞击不同含液量的容器时,射出容器后形成的空腔如图 10 所示,可以看出:随着容器内液体含量的降低,同一时刻容器内液体的含量越少空腔的体积越大,且空腔更易向液体更少的一侧膨胀,空腔不再像完全充液时对称;空腔在上下两侧的形态差异最终也会导致上下壁面变形不一致,而且充液率的变化也使得液体对壁面的作用方式发生改变,当液体含量相对较多时,空腔在膨胀过程中主要对壁面产生挤压作用,而液体含量相对较少时,弹体的高速运动排开的液体迅速飞溅到上壁面,此时上壁面主要承受来自液体的抨击压力。



(a) 充液率为 60% (b) 充液率为 80% (c) 充液率为 100%

图 10 不同充液率下空腔最终形态

Fig. 10 Final shape of cavity under different filling rate

2.2.3 充液率对结构响应的影响

当容器中液体含量不同时,遭受液压水锤效应作用时系统内主要的能量变化如图 11 所示。

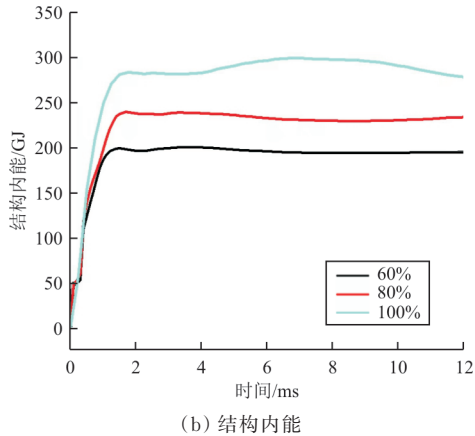
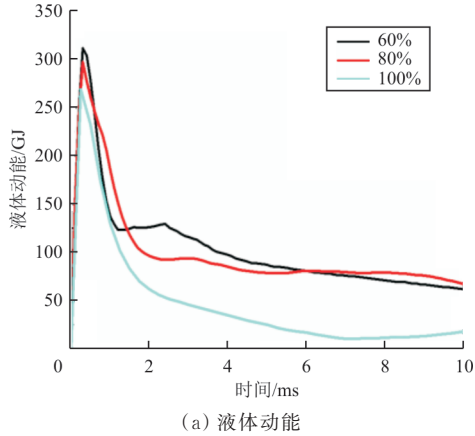


图 11 不同充液率下结构能量变化曲线
Fig. 11 Structure energy curves

从图 11(a)可以看出:充液率越低液体得到的动能反而越大。这是由于不完全充液时,容器上部为压缩性较好的空气,给了液体运动的空间,液体能够获得更多的动能,后续液体在容器中晃动动能逐渐消耗。而完全充液时液体得到的能量同时通过挤压作用传递到结构壁面上,造成壁面变形破坏,因此液体动能峰值相对较低,同时动能下降迅速。

从图 11(b)可以看出:含液量越高,结构获得的内能越大,表明结构的变形程度更大,充液率降低 40%,水锤效应下容器内能减小 33%。这也反映了液压水锤效应形成过程中液体挤压比液体晃动的破坏更为显著,同时容器充液率越高,形成的液压水锤效应破坏性越强。

2.3 水锤效应的防护设计

当油箱遭受外物冲击时,设置防护挡板能够削弱弹体在充液结构中的侵彻能力,而防护结构会额外增加飞机重量,重量问题是飞机结构设计中需要认真考虑的问题。本文侧重点是防护结构设置形式的优选,暂不考虑重量的影响,对同等重量条件下的挡板位置以及设置形式开展研究(本节弹体均以 600 m/s 的初速度冲击满载油箱)。

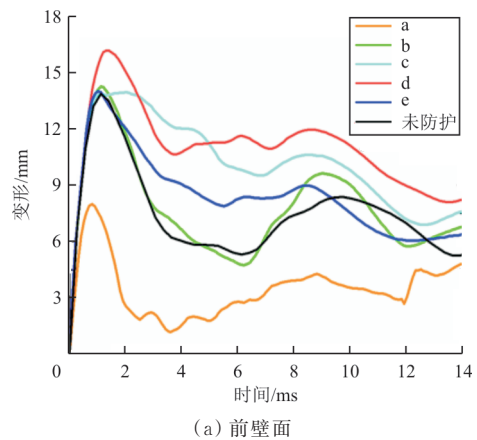
2.3.1 添加挡板防护

在结构内引入一厚度与壁面相近,为 2 mm 的铝合金板,根据挡板放置位置不同设置数值实验(不涉及重量的影响),如表 3 所示。

表 3 防护挡板参数设置
Table 3 Parameter setting of protective baffle

实验组	挡板厚度/mm	挡板位置	挡板数量
a	2	前壁面	1
b	2	后壁面	1
c	2	容器中央	1
d	2	距前壁面 1/3 位置	1
e	2	距前壁面 2/3 位置	1

加入挡板后容器各个壁面的变形情况如图 12 所示,可以看出:在前后壁面处添加防护均能够有效减小对应壁面的变形程度,但增强前后壁面阻碍了液体向两端运动,这也造成了上壁面的最大变形反而比未防护时更大;而将挡板放置在容器内部时对减小上壁面变形效果显著,综合对比来看,将挡板放置于容器中间时效果最好,不仅使上壁面变形量下降了 63.15%,也能在一定程度上减小前后壁面的变形。



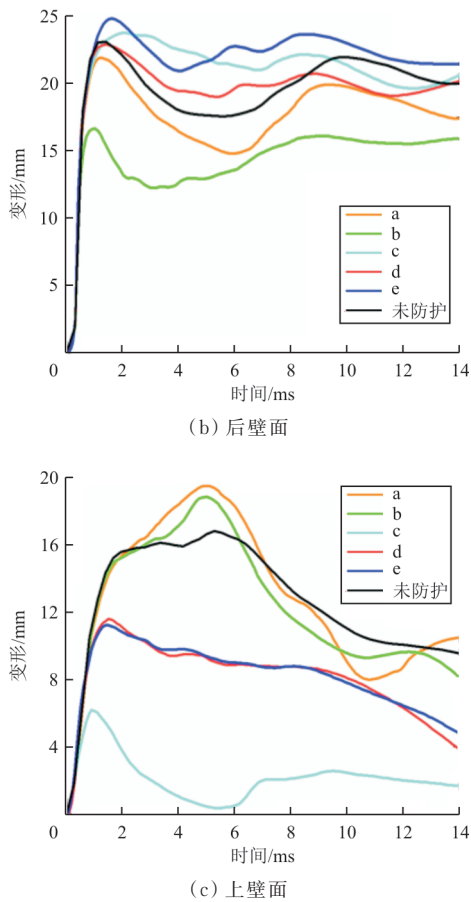


图 12 不同防护挡板的壁面变形
Fig. 12 Deformation of wall

在结构中加入挡板的防护机制:一是增加了结构刚度,减小了壁面变形量;二是板自身产生塑性变形耗散了能量。结合计算结果来看,在引入相同重量的情况下,在实际防护设计时,可结合构件的重要程度,需要对哪个壁面进行特殊防护就将防护挡板放置于该壁面;而从减少结构整体变形的角度来说,将挡板放置于容器中间位置是最优的。

2.3.2 添加空气隔层防护

产生液压水锤效应的另一类比较严重的破坏是由冲击波引起的,若能够减小冲击波强度也能进一步提高结构的安全性。借鉴舰艇防雷舱结构设计特点,在液箱中加入厚度为 10 mm 的空气隔层,两侧采用 1 mm 的铝合金隔板,研究其对水锤效应的影响(不涉及重量的影响)。

两种防护结构的前后壁面穿孔处的变形轮廓如图 13 所示,可以看出:具有空气隔层的防护结构

前后壁面结构变形均有减小,而上壁面变形差异显著,最大变形量从 15.7 mm 减小到 2.8 mm,变形降低幅度达 82%。这是因为空气隔层的存在对冲击波的传播具有一定的延缓作用,从而减小了对容器前后壁面的挤压,结构的整体变形减小。

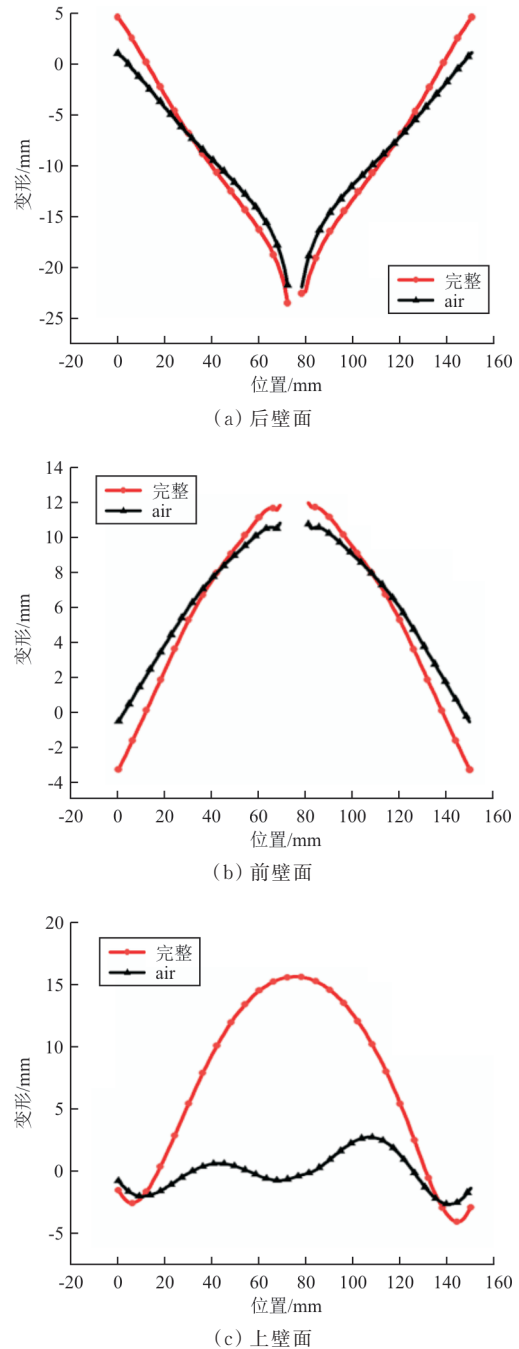


图 13 添加空气隔层防护的壁面变形
Fig. 13 Deformation of wall

结构能量吸收曲线如图 14 所示,可以看出:增加空气隔层能够明显地衰减结构整体对弹体能量

的吸收,加入隔层后结构最终的内能仅为原始结构的 55.6%,更多的能量通过空气隔层结构吸收耗散,表明结构破坏变形程度大幅减小,同时也证明添加空气隔层结构防护的有效性。

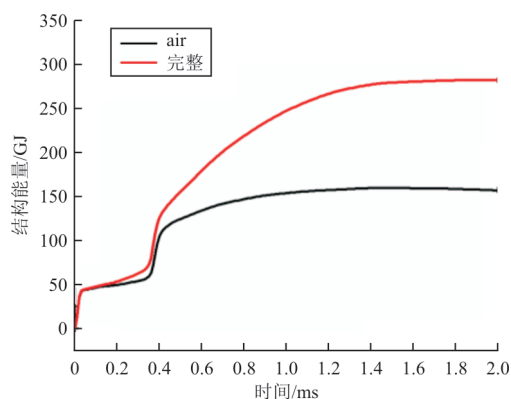


图 14 结构能量吸收曲线

Fig. 14 Energy absorption curves of structure

在容器中设置空气隔层的保护机制:一是由于空气和水波阻抗差异较大阻碍了冲击波的传播;二是由于空气易于被压缩,空气隔层为水在形成空泡时提供了足够的流动空间从而释放压力和能量,减轻了对结构的挤压作用;三是空气隔层结构本身产生塑性变形,吸收部分弹体动能,减轻容器壁面的吸能变形。

3 结 论

(1) 弹体初始动能越大,引起的液体内部压力峰值越大,形成的空腔体积越大,箱体结构的变形能峰值越高,但相应的压力脉冲持续时间越短。

(2) 充液率的变化也使得液体对壁面的作用方式发生了改变,充液率越低,液体得到的动能越大,反映出液压水锤效应形成过程中的液体挤压比液体晃荡的破坏更为显著,同时容器充液率越高,形成的液压水锤效应破坏性更强。

(3) 添加防护能够有效减少壁面的变形量,综合对比来看,将挡板放置于容器中间时效果最好,不仅使上壁面变形量下降了 63.15%,也能在一定程度上减小前后壁面的变形。

(4) 添加 10 mm 空气隔层防护,能够减少结构对 44.4% 弹体能量的吸收,结构上壁面破坏变形程度降低 82%。

参考文献

- [1] BURT F S. Hydrodynamic research[J]. British Journal of Applied Physics, 1961, 12(7): 323-328.
- [2] MORSE C R, STEPKA F S. Effect of projectile size and material on impact fracture of walls of liquid-filled tanks: NASA-TN-D-3627 [R]. Cleveland: NASA Lewis Research Center, 1966.
- [3] LUNDSTROM E A. Structural response of flat panels to hydraulic ram pressure loading[R]. China Lake, CA: Naval Weapons Center, 1988.
- [4] 刘国繁,陈照峰,王永健,等. 飞机油箱水锤效应研究方法及其进展[J]. 航空工程进展, 2014, 5(1): 1-6.
LIU Guofan, CHEN Zhaofeng, WANG Yongjian, et al. Research methods and progress of the hydrodynamic ram effect of aircraft fuel tanks[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] 李咪咪,王永超,杨殿国,等. 飞机油箱水锤效应研究方法及其影响因素[J]. 航空工程进展, 2014, 5(2): 135-140.
LI Mimi, WANG Yongchao, YANG Dianguo, et al. Research methods and factors of hydrodynamic ram effect for aircraft fuel tanks[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(2): 135-140. (in Chinese)
- [6] VIGNJEVIC R, DE T, VUYST J C, et al. Modelling of impact on a fuel tank using smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2005, 231(11): 1970-1978.
- [7] SAUER M. Simulation of high velocity impact in fluid-filled containers using finite elements with adaptive coupling to smoothed particle hydrodynamics [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(6): 511-520.
- [8] KWON Y, YUN K. Numerical parametric study of hydrodynamic ram [J]. International Journal of Multiphysics, 2017, 11(1): 15-47.
- [9] LIU F, KONG X S, ZHENG C, et al. The influence of rubber layer on the response of fluid-filled container due to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2018, 183: 671-681.
- [10] 韩璐,韩庆,杨爽. 飞机油箱水锤效应影响因素及其影响程度研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 489-500.
HAN Lu, HAN Qing, YANG Shuang. Simulation analysis of hydrodynamic ram factors and effects in aircraft fuel tank [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 489-500. (in Chinese)
- [11] 蓝肖颖. 双破片作用下液压水锤叠加效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
LAN Xiaoying. Study on the superposition effect of hydraulic water hammer under the action of double fragments[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] JI Y Z Y, LI X D, ZHOU L W, et al. Comparison of the

- hydrodynamic ram caused by one and two projectiles impacting water-filled containers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137: 103467.
- [13] 陈安然, 李向东, 周兰伟, 等. 液水水锤效应引起液体喷溅特性及其影响因素实验研究[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(5): 144-152.
CHEN Anran, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Experimental study on the characteristics and influencing factors of liquid spurt caused by hydrodynamic ram [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(5): 144-152. (in Chinese)
- [14] 李典, 朱锡, 侯海量, 等. 高速杆式弹体侵入下蓄液结构载荷特性的有限元分析[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(1): 1-8.
LI Dian, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Finite element analysis of load characteristic of liquid-filled structure subjected to high velocity long rod projectile penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 仲强, 侯海量, 朱锡, 等. 陶瓷/液舱复合结构抗侵彻数值分析[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(3): 510-519.
ZHONG Qiang, HOU Hailiang, ZHU Xi, et al. Numerical analysis of penetration resistance of ceramic /fluid cabin composite structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 510-519. (in Chinese)
- [16] YANG H Q. A multiphase and multiphysics CFD technique for fuel spurt prediction with cavitation and fluid-structure interaction [C] // *AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*. USA: AIAA, 2015: 1-11.
- [17] 胡方靓. 蜂窝状防护液舱结构抗高速破片侵彻研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
HU Fangliang. Penetration resistance of honeycomb protective liquid cabin to high-speed fragment [J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] VARAS D, LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 81-91.
- [19] VARAS D, ZAERA J, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(3): 363-374.
- [20] 张明. 超临界压力蛇形管内航空煤油 RP-3 氧化结焦特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
ZHANG Ming. Investigation on the characteristic of thermal oxidation deposition of RP-3 kerosene in serpentine tubes under supercritical pressure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

作者简介:

杨秋足(1991—),男,博士,讲师。主要研究方向:冲击动力学、多相流、流固耦合问题仿真等。

张玉林(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机生存力、流固耦合等。

杨扬(1986—),男,博士,副教授。主要研究方向:高精度数值波浪水池构建技术及其工程应用。

徐绯(1970—),女,博士,教授。主要研究方向:冲击载荷作用下材料/结构的动态断裂和失效、SPH无网格并行计算方法及其工程应用、复合材料修补结构设计及其理论试验分析方法等。

王计真(1987—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:冲击动力学。

(编辑:马文静)