

doi: 10.7690/bgzdh.2014.01.011

高速破片撞击飞机油箱的数值模拟研究

白强本, 李向东, 贾飞, 杨亚东
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究飞机油箱在水锤作用下的破坏效应, 运用数值计算方法对高速破片撞击充水箱体的破坏响应进行研究。采用赋予破片速度和 ALE 建模的方法数值模拟高速破片撞击充水箱体的破坏响应, 并对不同破片速度和不同充水比下箱体的变形进行比较分析。计算结果表明: 破片撞击充水体时的破坏效应较空箱体要严重得多, 箱体前后壁的穿孔处周围是发生破坏最严重的区域; 箱体前后壁的变形量随破片速度的增加而增加; 部分充水箱体的变形明显小于完全充水的情况, 但对于充水 75% 和 85% 的箱体变形差距不大。

关键词: 高速破片; 充水体; 水锤效应; 数值模拟

中图分类号: TJ410.1 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on High-Speed Fragment Impact Against an Aircraft Fuel Tank

Bai Qiangben, Li Xiangdong, Jia Fei, Yang Yadong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to evaluate the damage of fuel tanks for aircrafts by hydrodynamic ram (HRAM) event, the damage of characteristics of a water-filled tank facing a fragment impacting are calculated by numerical simulation method of given velocity fragment and the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) technique, the results of tank wall damage are compared with different velocities of fragments and different water filling ratios. The research results show: the damage impacting a full-filled tank is more serious than impacting an empty one, the entry and exit walls relative to the impacted shell have the most serious damage. With the fragment velocity increasing, the deformations on the entry and exit wall are also increasing. The deformation of part-filled tank wall is much smaller than full-filled tank wall. The deformation on 75% filled tank and 85% filled tank is relatively close.

Keywords: high-speed fragment; water-filled tank; hydrodynamic ram; numerical simulation

0 引言

飞机的主要易损部件中, 油箱的易损面积最大, 约占飞机总体易损面积的 75%^[1], 因而对飞机油箱结构的易损性研究一直是国内外学者关注的热点。当高速破片撞击飞机油箱时, 会在液体中产生强大的压力冲击波并作用在四周的油箱壁上, 对油箱的结构造成毁灭性的破坏, 这种现象称作水锤效应。由于水锤效应的巨大破坏力, 它已成为迄今为止飞机最致命的毁伤因素之一。

针对高速破片撞击充液油箱的破坏效应, 国内外学者进行了许多相关研究。Rosenburg^[2]教授分析了液压冲击效应, 研究了破片与充液油箱的相互作用机理; Varas 等^[3-4]分别用试验和仿真研究了破片撞击充满水的条形铝箱时的水锤破坏效应, 揭示了液内空腔的形成过程; 杜忠华^[4]通过对破片撞击普通油箱和带有橡胶内衬的油箱进行对比, 得到由于带橡胶的油箱具有自闭合功能, 不容易被破坏; 李亚智^[5]通过破片撞击充液油箱和空油箱的模拟对比, 初步得出了由于流固耦合作用, 充液油箱的破坏要比空油箱严重得多。但目前针对水锤效应对油箱破坏的影响因素研究还不多见。笔者运用数值计

算的方法研究了高速破片撞击充水箱体的破坏响应, 分析了水锤效应对箱体的破坏效应、影响破坏效果的因素以及对箱体破坏的影响规律, 为飞机目标的易损性评估及防空弹药的设计提供参考。

1 高速破片撞击充液箱体的数值模拟

1.1 撞击动力学的基本方程

撞击动力学有限元基本方程^[6]为

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 和 $Q(t)$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和外力作用向量, 分别由各自的单元矩阵和向量组集成; $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 分别为节点加速度向量和节点速度向量。

1.2 箱体和液体之间的 ALE 耦合算法

ALE 耦合算法的基本方程为

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + \omega_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: X_i 为拉格朗日坐标, x_i 为欧拉坐标; 相对速度 $\omega_i = v_i - u_i$, v_i 和 u_i 分别为物质和网格速度。

箱体和液体之间的作用引入拉格朗日和欧拉坐

收稿日期: 2013-08-18; 修回日期: 2013-09-17

作者简介: 白强本(1988—), 男, 甘肃人, 工学硕士, 从事终点效应和目标易损性研究。

标之外的第 3 个任意的参照坐标。利用材料时间导数和参照几何构型的时间导数两者之间的替换关系得到 ALE 算法的控制方程如下：

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \omega_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3)$$

动量守恒方程

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \omega_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (4)$$

能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \omega_j \frac{\partial E}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} v_{i,j} + b_j v_j \quad (5)$$

1.3 有限元模型

水锤效应是指油箱在受到破片的高速撞击时，破片的动能通过液体以冲击波的形式作用在油箱壁上，对油箱结构造成破坏。由于涉及到箱体和液体之间的流固耦合，水锤效应下油箱壁的破坏响应研究的关键在于：采用 ALE 流固耦合算法，充分考虑撞击中破片、箱体和液体之间的耦合效应；根据流固作用的特殊性选择相应的材料模型和参数，使之能够更准确地模拟破片对充液油箱的破坏^[7]。

1.3.1 计算模型及网格划分

用充水的铝制箱体代替飞机油箱进行研究，箱体尺寸 150 mm×150 mm×300 mm，壁厚 3 mm，破片为球形，质量 8 g。建模时考虑到模型的对称性，为了提高计算效率，对于完全充水箱体，只建 1/4 模型，对于部分充水箱体，只建 1/2 模型。箱体和破片采用六面体 SOLID164 实体单元建模。经过多

种尺寸的网格比较发现，破片和箱体接触的区域网格划分得越细，得到的结果越接近实际，相应的网格数量也会大幅增加。划分网格时破片和箱体接触区域网格相对细致，在远离接触区域网格相对稀疏。

为描述液体的流动和箱体的变形，建模时还要考虑箱体周围的空气。箱内的水和箱体周围的空气共节点，采用六面体 SOLID164 实体单元建模，定义多物质 ALE 算法关键词*SECTION_SOLID_ALE (ELFORM=11)。在划分网格时，为减少网格数量，破片穿过的区域网格划分的较细致，其他区域网格划分相对稀疏。最后有限元网格划分如图 1 所示。

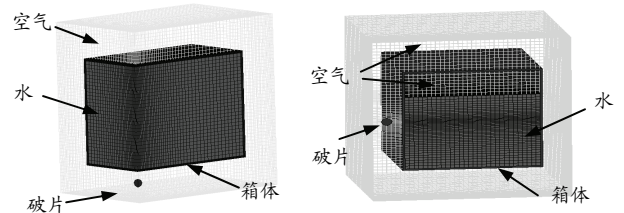


图 1 有限元模型示意图

图 1 有限元模型示意图

1.3.2 材料模型及参数

破片材料采用钢，箱体材料采用铝，均采用 Johnson-Cook 模型和 Gruneisen 状态方程来描述。其屈服应力表达式为

$$\sigma_y = \left(A + B (\epsilon^p)^n \right) \left(1 + C \ln \epsilon^* \right) \left(1 - (T^*)^m \right) \quad (6)$$

式中 A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数； ϵ^p 为有效塑性应变； $\epsilon^* = \epsilon^p / \epsilon_0$ 为有效塑性应变率； $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ 为相对温度。箱体和破片的材料参数见表 1。

表 1 箱体和破片的材料参数

参数	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	μ	A / MPa	B / MPa	C	n	m	Gruneisen Eos		
									$c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	γ
钢	7 830	210	0.22	792	510	0.014	0.26	1.03	4 569	1.49	1.27
铝	2 780	68.96	0.33	420	426	0.015	0.34	1.00	5 286	1.40	2.00

水介质采用空材料模型 (Mat-Null) 和 Gruneisen 状态方程描述，其材料压缩状态压力为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \quad (7)$$

材料膨胀状态的压力为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \quad (8)$$

式中： C 是冲击波速度 $u_s - u_p$ 曲线的截距； γ_0 是 Gruneisen 系数； a 是对 γ_0 的一阶体积修正； S_1 、 S_2

和 S_3 是 $u_s - u_p$ 曲线斜率系数。

空气介质采用空材料模型 (Mat-Null) 和线性多项式 (Eos-Liner-Polynomial) 状态方程描述。线性多项式状态方程表示单位初始体积内能的线性关系。压力值由下式给定：

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (9)$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 为常数。其中， $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ， ρ / ρ_0 为现在密度与初始密度之比。水和空气的材料参数见表 2。

表 2 水和空气的材料参数

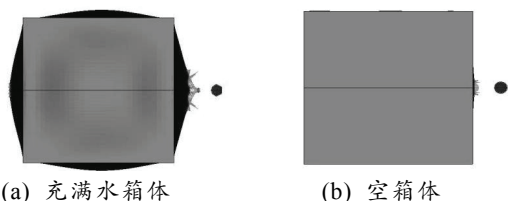
参数	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	v / Pas	$C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	C_4	C_5
水	1 000	0.89×10^{-3}	1 448	1.979	0	0	0.11	3.0	—	—
空气	1.22	1.77×10^{-5}	—	—	—	—	—	—	0.4	0.4

破片和箱体前后壁接触采用侵蚀接触算法。失效准则基于应力张量偏量，当单元有效塑性应变达到失效应变或单元压力达到最小失效压力时失效。

2 计算结果与分析

2.1 水锤效应分析

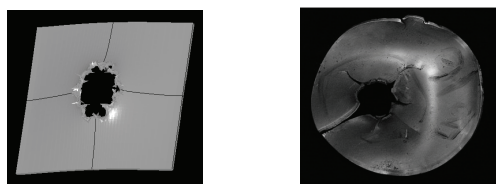
图 2 是破片以 1 200 m/s 的速度分别击穿充满水的箱体和空箱体时的破坏情况。从图 2(b) 中可看出，破片击穿空箱体时，除了箱壁上形成与破片直径相当的开孔之外，箱体再无明显变化；从图 2(a) 可看出，破片击穿充满水的箱体时，箱体后壁上的穿孔被撕裂，形成远大于破片直径的花瓣状开口，四周箱壁外凸，前后壁尤为严重。显然，破片击穿充满水箱体造成的破坏要严重得多，最严重的破坏集中在箱体上的前后穿孔周围。图 3 为速度 1 200 m/s 的破片击穿空箱体和充满水箱体后后壁变形的仿真和实验照片，对比可发现，仿真结果和实际较相符。



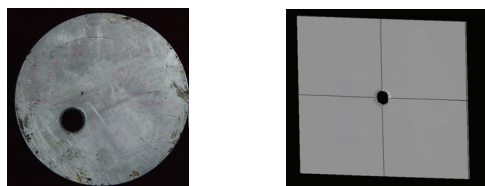
(a) 充满水箱体

(b) 空箱体

图 2 破片击穿箱体时的破坏(破片从左侧进入)



(a) 充满水箱体(左:仿真;右:实验)

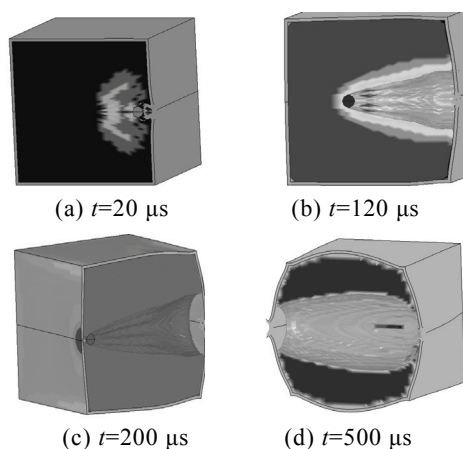


(b) 空箱体(左:仿真;右:实验)

图 3 仿真和实验对箱体后壁的破坏对比
(破片速度 1 200 m/s)

水锤效应对箱体的破坏过程分为 3 个阶段：冲击阶段、液体拖曳阶段和空腔阶段。破片撞击充水箱体时水锤效应的响应过程如图 4 所示，图中破片速度为 1 200 m/s，箱体内完全充水。在 20 μs 时，破片刚侵入箱体，属于冲击阶段，此时产生的破坏主要集中在穿透点附近，破片能量转移到液体中，在穿透点处形成高压半球冲击波，作用于油箱前壁上的穿孔周围，使穿孔撕裂，成花瓣状外翻，如图 4(a)。在 120 μs 时，破片前进到液体中央，部分能量转移

到液体，变成液体的动能，破片速度因液体阻力而减小，同时，液体的运动会产生径向压力场，破片后方液体被排开，形成空穴。与上一阶段相反，液体在冲击波的作用下开始加速运动，导致液体的峰值压力减小，但是作用时间延长，这个阶段叫作液体拖曳阶段，如图 4(b)。在 200 μs 时，破片即将穿出箱体后壁，此时由于冲击波的传播速度大于破片的前进速度，后壁上有液体施加的预应力，如图 4(c)。在 500 μs 时，由于液体中的空穴膨胀，形成一个大的空腔，流体的运动在破片后面形成空腔，空气从箱体穿孔进入空腔，由于液体试图恢复原状，空腔出现振荡，这种振荡会导致严重的压力脉冲，足以破坏油箱的结构，属于空腔阶段，如图 4(d)。

图 4 完全充水箱体在不同时刻的破坏响应
(破片速度 1 200 m/s)

2.2 破片速度对箱体破坏的影响

飞机目标受到爆炸或导弹攻击时，撞击油箱的破片速度一般较高，为了揭示破片在不同速度下对箱壁的破坏规律，选择从 900~2 100 m/s 之间 5 种不同速度进行研究。

图 5 是箱体前壁随时间的变形图，从图中能够清楚地看到，随着破片速度的增加，箱体变形量明显增加。前壁的变形从破片撞击箱体开始，破片在液体中前进时，液体中产生的高压半球冲击波持续对箱体前壁产生作用，使前壁持续变形。冲击波刚形成时，液体还未开始运动，冲击波主要集中于前壁上，使得前壁在前期变形幅度较大，之后随着液体的运动，冲击波的向前传播，前壁的变形幅度逐渐减小。

图 6 是箱体后壁随时间的变形，和前壁一样，后壁的变形量随破片速度的增加明显增加。在 150 μs 之前，由于液内高压半球冲击波刚形成，还未传到箱体后壁，此时后壁基本无变形。150 μs 之后，冲击波首先作用到后壁，使后壁开始变形，此

时变形幅度较。当破片抵达后壁时，箱体的变形开始加剧，随后在高压冲击波的作用下，后壁的变形幅度一直在高位持续。400 μs 之后，由于水锤作用下空腔的持续振荡，箱体的变形量依然在增加。通过前壁和后壁的变形对比可发现，后壁的变形量较前壁要大得多。

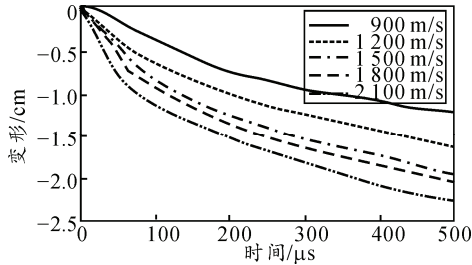


图 5 不同破片速度下箱体前壁随时间的变形

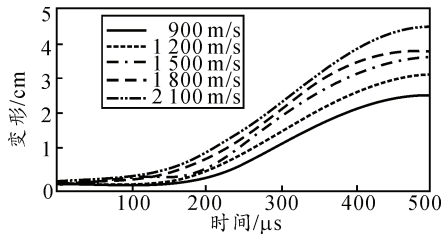


图 6 不同破片速度下箱体后壁随时间的变形

2.3 充水比对箱体破坏的影响

对于飞机油箱，只有很短时间内是完全充满的，受到攻击时油箱一般都是未充满的。为了研究破片对不同充水比的箱体的破坏情况，笔者分别模拟了充水分别为 75%、85% 的 2 种箱体受到破片 ($V=1200\text{ m/s}$) 撞击的情况，并与同速度下破片对完全充水箱体的破坏变形进行了比较。

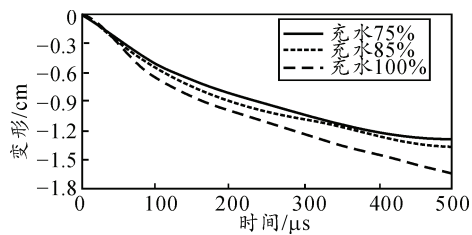


图 7 不同充水比下箱体前壁随时间的变形

图 7 和图 8 分别是箱体前、后壁随时间的变形图，从图中可以看出，前壁在 100 μs 之前，后壁在 300 μs 之前，部分充水和完全充水箱体随时间的变形很接近，在破片侵入前期，箱体的破坏主要来自于液体中的高压半球冲击波的作用。随着时间的增加，在 300 μs 以后，部分充水箱体的破坏要明显小于完全充水箱体，由于空气的可压缩性较强，在部分充水的箱体中，液体的能量得以分散，使得空腔的振荡减弱，破坏效应也相应减小。对充水 75% 和充水 85% 2 种箱体的变形比较发现，前者与后者变

形量的差距不大，进一步验证了空气的可压缩性对空腔振荡的减弱作用。

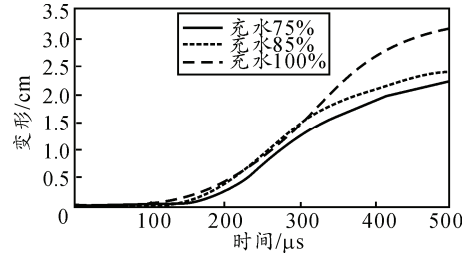


图 8 不同充水比下箱体后壁随时间的变形

3 结论

通过对破片撞击充水箱体的破坏过程、不同速度下箱体变形和不同充水比下箱体变形的计算分析，得到如下结论：

1) 和撞击空箱体相比，破片撞击充水箱体时，由于水锤效应的作用，引起的破坏要严重得多，其中对直接受到撞击的箱体前后壁，特别是破片穿孔周围的破坏最为严重。

2) 液压水锤作用下箱体变形程度随破片速度的增加而递增，破片速度越快，引起的破坏越严重。后壁的变形要明显大于前壁。

3) 破片撞击箱体前期，部分充水箱体和完全充水箱体的变形比较接近；破片撞击箱体后期，由于空气的可压缩性较强，使得空腔的振荡作用减弱，部分充水的箱体变形明显小于完全充水的箱体。比较充水比分别为 75% 和 85% 箱体的变形，二者变形量的差距不大。

参考文献：

[1] Ball, R. E. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design[M]. 2nd ed. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc. NY, 2003: 317-330.

[2] Rosenberg Z, Bless S J, Gallagher F P. A Model for Hydrodynamic Failure Based on Fracture Mechanics Analysis[J]. International Journal on Impact Engineering, 1987, 6(1): 51-61.

[3] 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.

[4] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Numerical modeling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3): 363-374.

[5] 杜忠华, 闫文敏, 朱建生. 破片撞击充液密闭油箱的实验研究及数值仿真[J]. 实验力学, 2008, 12(6): 520-524.

[6] 李亚智, 陈钢. 充液箱体受弹丸撞击下动态响应的数值模拟[J]. 机械强度, 2007, 29(1): 143-147.

[7] 张作刚, 翟胜路, 王彦. 战时飞机部件损坏率分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 8-10.