

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.04.006

# 破片撞击燃料箱时水锤效应的数值仿真研究\*

杨砚世<sup>①</sup> 肖志华<sup>②</sup> 李向东<sup>①</sup>

①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

②国营九六三一厂(湖南株洲,412007)

[摘要] 为了揭示高速破片对燃料箱的毁伤机理,采用数值计算的方法研究了单破片、多破片撞击燃料箱所形成的液压水锤效应,计算分析了单枚破片的撞击速度和多枚破片之间的距离对箱体变形的影响。结果表明,单枚破片高速撞击燃料箱时,撞击速度每增大 100 m/s,变形高度增加 4.3%;当多枚破片以 1400 m/s 的速度撞击燃料箱时,破片之间的距离越小,箱体的变形量越大;当燃料箱体的变形最大时,破片间距为 8.3 倍破片直径。

[关键词] 毁伤机理;水锤效应;燃料箱;数值仿真

[分类号] TJ02

## 引言

当破片高速撞击盛有液体的容器(如燃料箱、燃料仓等)时,破片穿透容器壳体,同时在液体中形成冲击波,液体中冲击波的压力作用在破片入口的周围,导致容器壳体向外膨胀、破裂,使已经受到穿孔削弱的壳体受到更严重的破坏,这就是水锤效应<sup>[1]</sup>。

早在 20 世纪 70 年代就有学者开展了液压水锤效应的研究工作。致力于这方面研究的科研机构有戴顿大学、美国海军研究生院和加利福尼亚科技研究有限公司。由于刚发现此物理现象,当时的主要工作是对此现象进行深入理解,并建立工程计算模型,希望能够预测箱体内的压力以及箱体的响应和破坏。Yurkovich 给出了撞击阶段的压力分析模型;Lundstrom 给出了衰减阶段的压力分析模型;美国海军研究生院初步考虑流体和固体的相互作用,应用 the plane wave piston 理论开发了用于预测箱体位移、应力和应变的 SATANS 计算机程序代码<sup>[2-5]</sup>。李亚智等<sup>[6]</sup>对水锤现象进行数值模拟时发现,带水箱体的应力和应变水平比空燃料箱有显著提高。Varas 等<sup>[7]</sup>发现了影响燃料箱壁变形的因素有破片撞击速度和箱体的燃料充填率,此外,还发现箱体的变形不仅取决于撞击体速度,而且还跟流体的动能有关<sup>[8]</sup>。Nicolas Lecysyn 等<sup>[9]</sup>着重用流体动力学行为解释弹丸碰撞燃料箱向后喷出液体的过程。

在研究方法上,陈亮等<sup>[10]</sup>运用光滑粒子流体动

力学方法(SPH)分析了破片对复合材料容器造成的水锤效应,找出水锤效应下复合材料容器上的薄弱区域。Sauer<sup>[11]</sup>对比了纯拉格朗日方法和自适应耦合 FE/SPH 方法,发现 FE/SPH 方法比纯拉格朗日方法更适用于液压水锤现象的模拟。Varas 等<sup>[12]</sup>运用 LS-DYNA 软件模拟钢球冲击盛有部分水的铝方管,并将之与试验进行对比,认为 ALE (arbitrary lagrange-euler) 技术能够真实再现水锤效应的形成过程。

过去,人们把精力主要集中在单枚破片撞击燃料箱上,研究 300 ~ 900 m/s 的撞击速度所形成的水锤效应,然而,在高速范围内的破片撞击燃料箱以及多枚破片撞击燃料箱时水锤效应的研究还未见于相关文献。本文通过 LS-DYNA 软件采用 ALE 方法对单枚破片和多枚高速(1400 ~ 2200m/s)破片造成的液压水锤效应进行模拟研究,主要研究破片撞击速度对水锤效应的影响、多枚破片同时撞击燃料箱时水锤的叠加效应以及破片撞击点之间的距离对叠加效应的影响,为战斗部设计提供一些参考。

## 1 模型结构与材料

### 1.1 有限元模型

燃料箱的内部长、宽和高分别为  $a$ 、 $b$  和  $c$ ,箱体材料为铝,壁厚为  $t$ ;破片是直径为  $d_0$  的钢质球体。

在数值计算过程中,燃料和空气采用 Euler 六面体网格,破片和燃料箱采用单点积分 Lagrange 六面体网格。拉格朗日网格和欧拉网格之间的相互作

\* 收稿日期:2013-12-17

作者简介:杨砚世(1989~),男,硕士研究生,主要从事弹药毁伤评估的研究。E-mail:yys\_1002@163.com

通信作者:李向东(1969~),男,硕士,教授,主要从事弹药毁伤评估的研究。E-mail:lixiangd@mail.njust.edu.cn

用采用流固耦合方式求解,拉格朗日介质之间采用侵蚀接触算法。

### 1.2 主要材料模型及参数

燃料箱体在计算时采用 Johnson\_Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程,主要参数如表 1、表 2 所示。燃料箱中的液体为水。

表 1 箱体材料参数

Tab.1 Material parameters of fuel tank

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\mu$
铝	2780	68.96	0.33
$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$n$
420	426	0.015	0.34
		$m$	
		1.0	

表 2 Gruneisen 状态方程参数

Tab.2 Parameters of Gruneisen Eos

$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_1$	$\gamma$
5286	1.4	2.0

采用 Cowper-Symonds 材料模型模拟破片。这里钢的密度为  $7830 \text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量为  $210 \text{ GPa}$ 。

### 2 单破片高速撞击燃料箱的水锤效应研究

#### 2.1 典型模型仿真结果与试验对比

首先对文献[8]中的试验进行数值模拟,按照试验中的几何尺寸建好模型,试验中的燃料箱为  $15 \text{ cm}$  长、 $15 \text{ cm}$  宽、 $75 \text{ cm}$  高、 $0.22 \text{ cm}$  厚的铝管,内盛有水,破片是直径为  $2.5 \text{ cm}$  的钢质球体。计算后得到的结果与试验中的结果对比如图 1~图 4 所示。

图 1 为试验中  $4.0、31.7、59.4、87.1、114.8、170.2 \mu\text{s}$  时破片在液体中运动的情况,其中破片的撞击速度  $v=900 \text{ m/s}$ ,试验中设定破片接触箱壁的瞬间  $t=0$ 。图 2 为数值模拟得到的在  $5、35、60、90、115、170 \mu\text{s}$  时刻弹丸运动的情况。可以看出数值模拟得到的气腔与试验中的基本相符。

试验(experiment)和数值计算(numerical calculation)得到的破片的位移与时间曲线如图3所示。

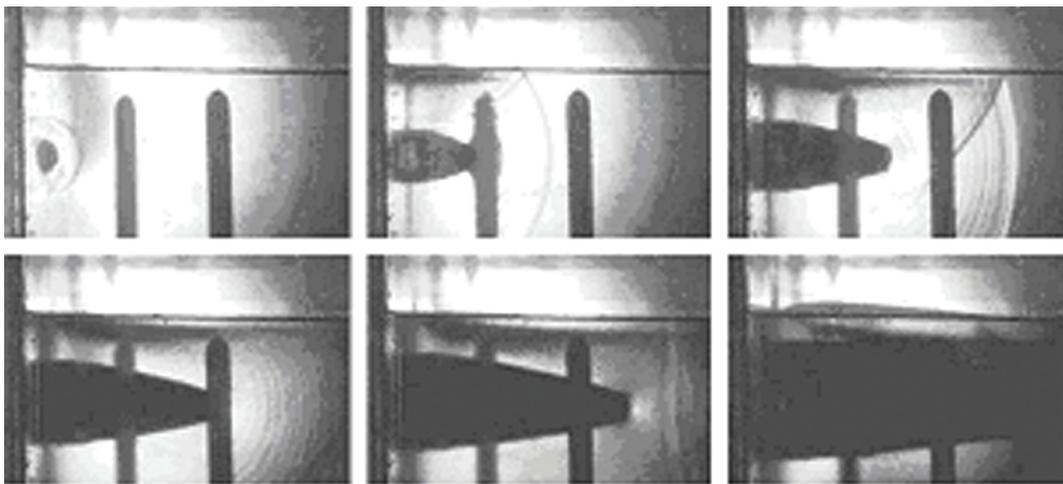


图 1 弹丸撞击盛有 75% (体积分数)液体的燃料箱试验

Fig.1 Experiment of projectile penetration of tube tank filled 75% (volume fraction) liquid

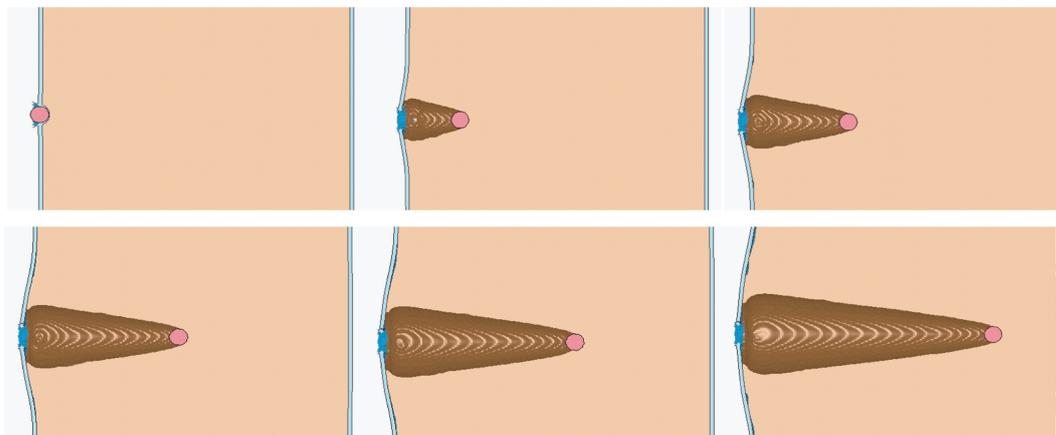


图 2 弹丸撞击盛有 75% (体积分数)液体的燃料箱的仿真结果

Fig.2 Numerical simulation of projectile penetration of tube tank filled 75% (volume fraction) liquid

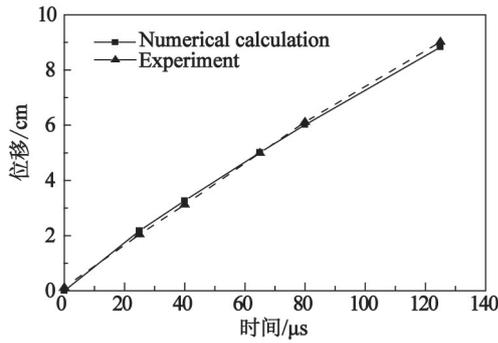


图 3 位移与时间曲线

Fig. 3 Displacement-time curve

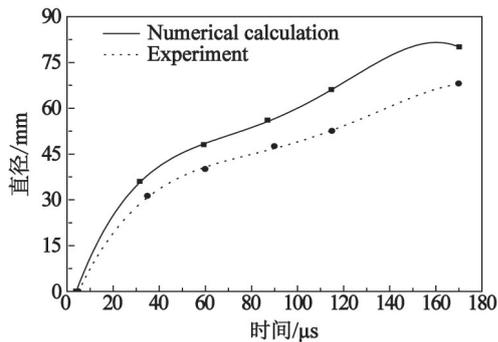


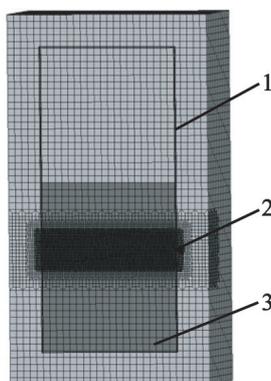
图 4 空腔直径与时间曲线

Fig. 4 Cavity diameter-time curve

由图 3 可以看出,该计算模型中的破片运动情况与试验结果符合度很高。图 4 为试验和数值计算得到的最大空腔直径随时间变化的曲线,图中的计算值略大于试验值,平均误差为 16%。这可能与破片撞击点的位置有关,试验中破片撞击位置离燃料液面更近,因而空腔会更小一些。

经过与试验的对比,本文所用的计算模型可以较好地反映实际情况,因此,在接下来的研究过程中采用相同的计算方法。

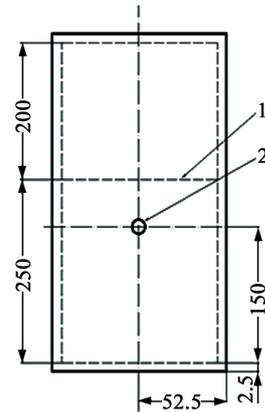
在研究单枚破片撞击燃料箱的过程中,数值计算所用的有限元模型如图 5 所示,燃料液面高度及破片的撞击位置如图 6 所示,其中,燃料箱体的参数



1 - 箱体;2 - 破片;3 - 燃料

图 5 有限元模型图

Fig. 5 Finite element model



1 - 液面;2 - 撞击点

图 6 燃料箱前壁示意图(单位:mm)

Fig. 6 Diagram of the front wall of the tank

为长  $a = 10.5 \text{ cm}$ ,宽  $b = 10.5 \text{ cm}$ ,高  $c = 45.5 \text{ cm}$ ,箱壁厚  $t = 0.25 \text{ cm}$ ;破片的直径  $d_0 = 1.2 \text{ cm}$ ,撞击速度为  $1400 \text{ m/s}$ 。

### 2.2 单枚破片高速撞击燃料箱的水锤效应

单枚破片以  $1400 \text{ m/s}$  的速度撞击燃料箱,经历对箱体的撞击、对液面的撞击、液体内部的运动等三个阶段<sup>[13]</sup>,箱体的前壁形成一个圆形鼓包,如图 7。当破片穿透燃料箱后壁的瞬间,破片在前壁上留下直径为  $1.5 \text{ cm}$  穿孔 ( $1.25 d_0$ ),此时箱体的变形直径  $d_z = 26 \text{ cm}$ ,箱体的变形高度  $\delta = 1.58 \text{ cm}$ 。

图 8 为箱体前壁分别在  $t = 0, 50, 100, 150 \mu\text{s}$  时

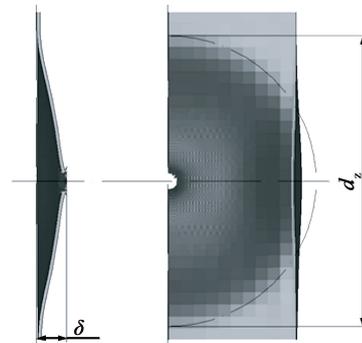


图 7 单个破片造成的箱体变形

Fig. 7 The tank distortion caused by the single fragment

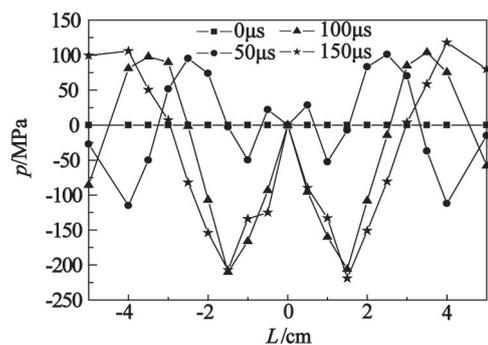


图 8 破片撞击点周围的压力

Fig. 8 The pressure distribution around the impacting point

破片撞击点周围压力分布图,  $L$  为箱体前壁内侧选取的点到破片撞击点的距离。由图 8 可以看出, 箱体内壁所受压力相对于撞击点对称, 随着时间的增大, 最大压力向撞击点周围扩散, 其强度变得越来越小, 最终形成如图 7 的箱体变形。

### 2.3 破片撞击速度对燃料箱毁伤的影响

改变破片的撞击速度 (分别取 1400、1600、1800、2000、2200 m/s), 对相同燃料填充率的燃料箱进行研究, 探究燃料箱体随破片撞击速度变化的变形规律。破片穿透箱体后壁瞬间, 箱体前壁的破坏程度随破片撞击速度的变化曲线如图 9。

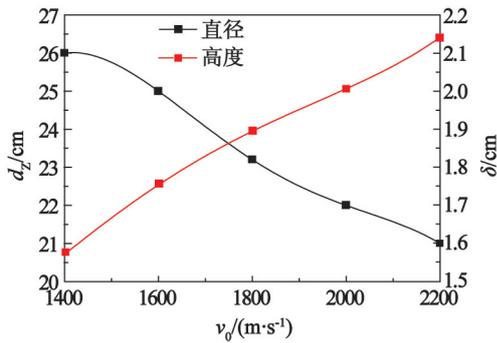


图 9 不同撞击速度下的变形直径和高度

Fig. 9 Diameters and heights of tube tank after distortion at various impacting velocities

破片以不同的撞击速度撞击箱体, 箱体的鼓包直径随着破片的撞击速度增大而减小, 同时, 箱体的变形高度随着撞击速度的增大而增大。与撞击速度为 1400 m/s 的破片对箱体破坏进行对比, 撞击速度每增加 100 m/s, 变形高度平均增加 4.3%, 箱体的变形直径平均减小 2.4%。可见, 在高速撞击过程中, 破片的撞击速度越高, 燃料箱的变形就越大。

为了便于分析, 选择撞击速度为 1400 m/s 和 2200 m/s 进行比较, 破片撞击燃料箱后在燃料中形成的冲击波的压力分布如图 10。其中, 图 10(a)、(b) 为破片撞击燃料箱的初期, 此时, 冲击波作用于箱体前壁, 撞击点周围小范围内发生变形, 破片速度越高, 具有的动能就越大, 形成的冲击波强度就大, 从而使得撞击点周围小范围内的箱体变形高度更大。随着破片在燃料中运动, 破片后面形成的空腔将越来越大, 空腔周围的燃料挤压箱体前壁, 导致前壁变形范围扩大, 如图 10(c) 和 (d)。但是破片在运动过程中, 撞击速度大的破片在燃料中形成的空腔相对细长, 空腔周围的燃料对箱体的挤压范围相对狭小, 所以箱体变形、直径减小。

选取离破片撞击点 5 cm 处壁面上的单元, 得到不同的撞击速度情况下, 该单元在不同时刻的压力

变化曲线, 如图 11。

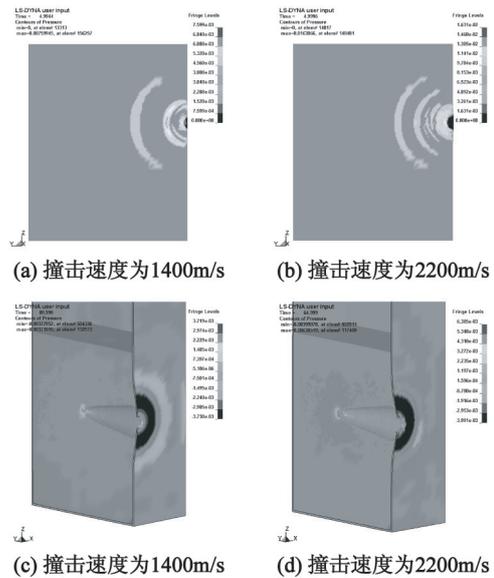


图 10 不同撞击速度燃料中冲击波的压力对比

Fig. 10 Comparison of shock wave pressure under different impacting velocities

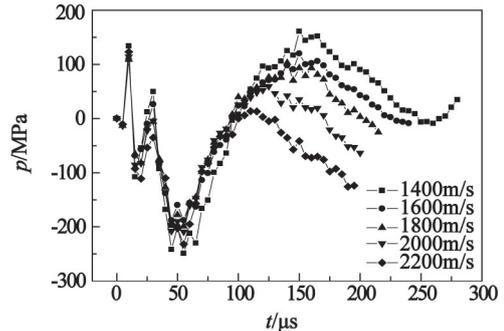


图 11 燃料箱前壁压力随破片速度的变化关系

Fig. 11 Change of anterior wall pressure as a function of impacting velocity

破片在穿透燃料箱体的过程中, 箱体前壁选取的单元所受的压力经过 3 次波动, 110  $\mu$ s 之前, 速度的变化对燃料箱体前壁压力的影响不大; 110  $\mu$ s 之后, 随着破片撞击速度增大, 箱体前壁所受的压力减小, 最大压差减小, 因而该位置处的变形高度  $\delta$  会降低, 与图 9 中的曲线相吻合。

### 3 多破片撞击燃料箱的水锤效应研究

战斗部起爆后会形成大量的破片, 这些破片撞击燃料箱时, 撞击点之间的距离以及撞击时间都不相同。这里研究两种因素对燃料箱的破坏情况, 为相关战斗部设计提供参考。

#### 3.1 两破片同时撞击燃料箱的水锤叠加效应

为了研究多破片撞击燃料箱的水锤效应, 选取两枚相同的破片同时以 1400 m/s 的速度撞击燃料箱, 两破片撞击点之间的距离为  $2\Delta L$ , 如图 12, 令上方的破片为 1# 破片, 下方的破片为 2# 破片, 两个破

片在燃料箱上的撞击点的连线的中点为  $M$  点,  $A$  点和  $M$  点到 2# 破片撞击位置处的距离相等。由图 9, 单枚破片以 1400 m/s 的速度撞击燃料箱时的破坏直径达到 26 cm, 为了研究多枚破片撞击燃料箱体是否有叠加效应,  $\Delta L$  必须小于 13 cm, 取  $\Delta L = 8$  cm 进行计算。

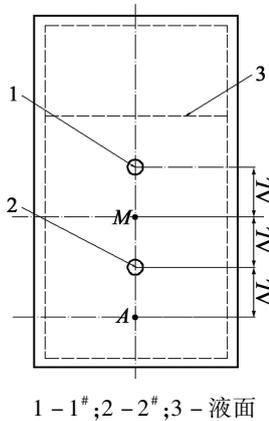


图 12 两枚高速破片的撞击位置

Fig. 12 Impacting position of two fragments with high velocity

两枚破片同时撞击箱体的前壁进入液体后, 燃料箱前壁在破片撞击点周围隆起, 随着破片继续向前运动, 两个撞击点周围箱体变形越来越大, 直至交汇于  $M$  点, 这时,  $M$  点处壁面向外隆起, 变形高度逐渐超过破片的撞击入口处。由于两枚破片在行进过程中应力波相互作用, 此时在燃料中运动的破片后形成两个不对称的空穴。

两枚破片同时高速撞击并穿透燃料箱的过程中, 箱体前壁的变形高度随时间的变化关系如图 13 所示。在 160  $\mu s$  之前,  $M$  点的变形高度  $\delta$  为  $A$  点的变形高度  $\delta$  的 2 倍, 160  $\mu s$  以后  $M$  点的变形高度略大于 2 倍的  $A$  点处的变形高度, 充分说明, 两破片同时撞击燃料箱时, 燃料箱的变形具有叠加效应。

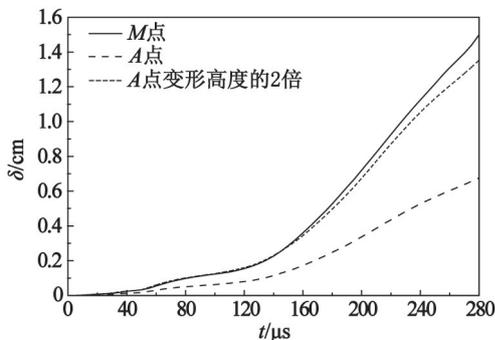


图 13  $M$  点与  $A$  点变形高度与时间的关系

Fig. 13 Distortion height and time relationships at points  $M$  and  $A$

### 3.2 破片间距对燃料箱毁伤的影响

为了研究破片间距对燃料箱毁伤的影响, 破片

间距  $\Delta L$  分别取 2、3、4、5、6、7、8、9、10 cm 进行计算, 箱体上  $M$  点和  $A$  点的变形结果如图 14。

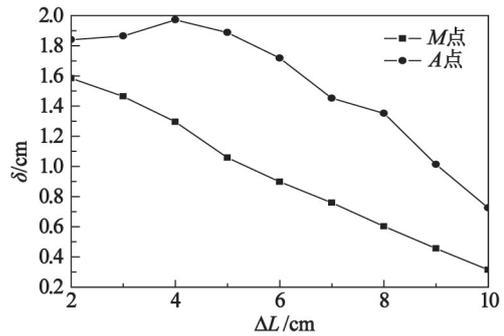


图 14  $M$  点和  $A$  点的变形高度与  $\Delta L$  的关系

Fig. 14 Distortion height and  $\Delta L$  relationships at points  $M$  and  $A$

当破片穿透燃料箱的瞬间,  $M$  点与  $A$  点的变形高度随破片不同空间间距变化的关系如图 14 所示, 当两个破片撞击燃料箱时, 随着两个破片的空间间距的增加,  $A$  点的变形高度逐渐减小, 而  $M$  点的变形高度先增大后减小。当  $\Delta L = 5$  cm 时 ( $4.16 d_0$ ),  $M$  点与  $A$  点处的变形高度的差值最大, 达到 0.81 cm。因此, 当两破片的空间间隔为  $8.3 d_0$  时, 燃料箱前壁的变形最明显。

### 4 结论

- 1) ALE 方法可以较为真实地模拟出破片冲击燃料箱时液压水锤的过程。
- 2) 破片撞击速度越高, 燃料箱体前壁的变形量越大。破片撞击速度每提高 100 m/s, 在破片穿透燃料箱的瞬间, 变形高度平均增加 4.3%, 箱体前壁的变形直径平均减小 2.4%。
- 3) 两枚破片同时撞击燃料箱对箱体的毁伤具有叠加效应。当箱体前壁的变形最为严重时, 两破片之间的距离为  $8.3 d_0$ 。

### 参考文献

[1] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 191-192.  
Li Xiangdong, Du Zhonghua. Target vulnerability [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013: 191-192.

[2] Eason R A. Computer studies of aircraft fuel tank response to ballistic penetrators[R]. California: Naval Postgraduate School, AD-A054014, 1978.

[3] Soper W R. Hydraulic ram studies [R]. California: Naval Postgraduate School, AD-A775019, 1973.

[4] Kappel L G. Hydraulic ram shock phase effects on fuel cell survivability [R]. California: Naval Postgraduate School, AD-777879, 1974.

[5] Page B D. Fuel cell entry response to hydraulic ram

- [R]. California: Naval Postgraduate School, AD-A009988, 1975.
- [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.  
Li Yazhi, Chen Gang. Numerical simulation of liquid-filled tank response to projectile impact [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1):143-147.
- [7] 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):81-91.
- [8] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Experimental study of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact [J]. Composite Structures, 2011(93):2598-2609.
- [9] Lecysyn N, Bony-Dandrieux A, Aprin L. Experimental study of hydraulic ram effects on a liquid storage tank; Analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(178):635-643.
- [10] Chen L, Song B F, Pei Y. Simulation analysis of hydrodynamic ram phenomenon in composite fuel tank to fragment impact [C]// 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.
- [11] 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):511-520.
- [12] Varas D, López-Puente J, Zaera R. Numerical modeling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to Hydrodynamic ram [J]. Aerospace Science and Technology, 2012(16):19-28.
- [13] Disimile P J, Swanson L A, Toy N. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36):821-829.

### Numerical Simulation Study on Hydrodynamic Ram Due to the Penetration of Fuel Tank by High Energy Fragments

YANG Yanshi<sup>①</sup>, XIAO Zihua<sup>②</sup>, LI Xiangdong<sup>①</sup>

①School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology ( Jiangsu Nanjing, 210094)

②No. 9631 Factory (Hu'nan Zhuzhou, 412007)

[ABSTRACT] Numerical simulation was employed in the study of hydrodynamic ram formed during the penetration of fuel tank by single or multiple fragments to understand the damage mechanism of fuel tank impacted by high-energy fragments. It was then used to analysis the tank distortion brought in by changes in impacting velocity and the distance between the impacting points. The results show that the distortion height of the fuel tank will increase by 4.3% with the increase of impacting velocity by 100 m/s for single fragment penetration; the distortion of the fuel tank will increase with the decreased distance between the impacting points for multiple fragments penetration at a constant impacting velocity of 1400 m/s and reach to the maximum when the distance between the impacting points is 8.3 times the diameter of fragment.

[KEY WORDS] damage mechanism; hydrodynamic ram; fuel tank; numerical simulation

(上接第25页)

### Application of SPH Method in the Analysis of Cylinder Charge and Steel Plate Contact Explosion

JIANG Zhenhua<sup>①②</sup>, LONG Yuan<sup>①</sup>, LIU Jianfeng<sup>①</sup>, ZHOU Hui<sup>①</sup>, LU Liang<sup>①</sup>

①College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology ( Jiangsu Nanjing, 210007)

②92057 PLA Troops (Guangdong Zhanjiang, 524000)

[ABSTRACT] Based on the finite element analysis software LS-DYNA, the detonation of cylinder charge was analyzed by the SPH method. The simulation results show that the SPH method could simulate the process of detonation and the process of dispersion of the detonation products efficiently. The 3D model of the cylinder charge and the steel plate in contact with the explosive load was set up, and the dynamic response of the steel plate was analyzed. The results show the destruction process of the slabbing and the punching of the steel plate explicitly. Same-sized experiment of the steel plate under the contact explosion load was performed. The results of the simulation and the experiment data are in good agreement, indicating that the SPH method can accurately describe the explosion and the dynamic responses of the structure under the explosion load.

[KEY WORDS] SPH method; detonation; contact explosion; numerical simulation