

# 破片冲击作用下油箱动力学响应行为实验研究\*

贾豪博<sup>1</sup>, 任柯融<sup>2,3</sup>, 卿 华<sup>2</sup>,  
张景飞<sup>1</sup>, 徐文涛<sup>1</sup>, 唐光武<sup>4</sup>

- (1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 郑州 450000;
2. 空军工程大学 航空机务士官学校, 河南 信阳 464000;
3. 国防科技大学 理学院, 长沙 410008;
4. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400067)

(本刊编委唐光武来稿)

**摘要:** 研究了破片冲击作用下的油箱动力学响应行为.通过开展弹道冲击实验,使用高速摄像机对实验过程进行记录,利用三维数字图像相关技术测试了后壁板的响应历史,分析了油箱在不同破片入射速度下的毁伤形式及动态响应行为.结果表明:当破片以 955~1 667 m/s 的速度冲击油箱时,前壁板的损伤形式为圆形孔洞,后壁板损伤形式为花瓣形破口;随着破片入射速度的提升,后壁板的动态响应速度和应变水平都有了显著提升;后壁板的动态响应主要包括后壁板中心区域塑性变形和后壁板整体变形两个阶段;随着后壁板变形程度增大,在对角线和板边位置处产生了塑性铰线.

**关键词:** 破片冲击; 油箱; 水锤效应; 动态响应; 数字图像相关

**中图分类号:** O38 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440002

## Experimental Study on Dynamic Responses of Fuel Tanks Under Fragment Impacts

JIA Haobo<sup>1</sup>, REN Kerong<sup>2,3</sup>, QING Hua<sup>2</sup>,  
ZHANG Jingfei<sup>1</sup>, XU Wentao<sup>1</sup>, TANG Guangwu<sup>4</sup>

- (1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, P.R.China;
2. Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University, Xinyang, Henan 464000, P.R.China;
3. College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410008, P.R.China;
4. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R.China)

(Contributed by TANG Guangwu, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** The dynamic responses of fuel tanks under fragment impacts were investigated. The ballistic impact

\* 收稿日期: 2023-01-04; 修订日期: 2023-02-20

作者简介: 贾豪博(1998—),男,硕士生(通讯作者. E-mail: renkerong@nudt.edu.cn).

引用格式: 贾豪博,卿华,任柯融,张景飞,徐文涛,唐光武.破片冲击作用下油箱动力学响应行为实验研究[J].应用数学和力学,2023,44(8):944-952.

tests on fuel tanks were carried out, the test processes were recorded with a high-speed camera, the dynamic morphologies of the fuel tank back wall were obtained with the 3D digital image correlation technique, and the damage forms and dynamic responses of the tanks under different fragment impact velocities were analyzed. The results show that, the damage to the tank front wall is in the form of circular holes and that to the back wall is in the form of “petal-shaped” breaches with radial cracks at fragment impact velocities of 955~1 667 m/s. The dynamic response speed and strain level of the tank back wall dramatically increases with the fragment impact velocity. The dynamic response of the tank back wall mainly includes 2 parts: the plastic deformation of the wall center and the overall deformation of the wall. With the increase of the deformation extent of the tank back wall, plastic hinge lines will occur along the wall diagonals and edges.

**Key words:** fragment impact; fuel tank; hydrodynamic ram; dynamic response; digital image correlation

## 0 引 言

当破片以极高的速度穿透充液结构时,会在液体中形成强烈的压力波并作用在充液结构上,使充液结构发生严重的物理变形、甚至破坏,这就是水锤效应<sup>[1]</sup>.油箱作为飞机易损部件中暴露面积最大的一部分,其内部往往装载有大量的液体燃油,研究油箱在高速破片冲击下的结构动力学响应机理对于飞机油箱部件的易损性研究具有重要意义.

自 20 世纪 70 年代开始,国内外学者对油箱在高速破片冲击下的毁伤效应展开了一系列的实验研究. Nishida 等<sup>[2]</sup>使用不同尺寸的球形破片撞击充水铝合金方管,研究了壁板裂纹扩展形式与破片尺寸之间的关系. Deletombe 等<sup>[3]</sup>使用 7.62 mm 的射弹进行了射击实验,研究了射弹在穿透液体时引起的空腔形状,并对液体内瞬态冲击波的压力进行了测量. 马丽英等<sup>[4]</sup>通过弹道枪实验研究了油箱内液体种类对油箱毁伤的影响规律,发现液体密度是主要的影响因素. 张伟和黄威等<sup>[5-6]</sup>开展了破片低速冲击试验,主要关注的是破片速度衰减、形成的空腔形态以及冲击波衰减规律. 近些年来也有不少学者使用数值模拟的方法对油箱的结构破坏响应进行了分析,解江等<sup>[7]</sup>使用有限元软件 LS-DYNA 对冲击爆炸载荷下铝合金板的动态响应进行了数值模拟. 张宇等<sup>[8]</sup>使用 SPH 单元进行建模,分析了球型破片冲击对不同形状油箱的毁伤效应,发现随着破片入射速度增大,油箱的形状对油箱抗毁伤能力的影响不断减小. Kwon 等<sup>[9-10]</sup>使用 ALE 方法进行模拟,分析了破片质量、速度、入射角度及液体充液量等因素对水锤效应的影响. 杨砚世等<sup>[11]</sup>模拟了多枚破片冲击油箱时产生的水锤效应,分析了多枚破片入射间距对油箱毁伤的影响规律. 陈照峰等<sup>[12]</sup>、李亚智等<sup>[13]</sup>也针对射弹冲击充液油箱过程进行了研究,结果表明,充液油箱相比于空油箱而言,其在受到破片冲击时的物理毁伤效果更为严重.

目前对于高速破片冲击油箱的问题主要集中于研究破片尺寸、数量、入射方向,液体种类以及油箱形状等方面对油箱破坏效应的影响,针对油箱结构的动态变形与破坏机理探讨较少. 本文开展了油箱的弹道冲击实验,利用三维数字图像相关技术(digital image correlation technique,简称 DIC 技术)测试了后壁板的位移、应变历史,研究了油箱在 955~1 667 m/s 的破片冲击速度下的结构响应与破坏模式,可为油箱结构设计与防护提供参考.

## 1 实验设计

使用尺寸为  $\phi 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$  的圆柱形 45#钢破片进行弹道枪实验,实验时破片以 955~1 667 m/s 的速度冲击油箱,实验装置主要包括弹道枪、挡托装置、测速靶、油箱和高速摄像机,实验现场布置如图 1 所示. 实验时使用弹道枪发射破片;使用挡托装置拦截弹托,防止弹托击打在油箱上,入射速度由测速靶测量;油箱是由 2 块 2 mm 厚(前后壁板)和 4 块 3 mm 厚(侧壁板)的 2024 铝合金铆接而成,其尺寸为 440 mm $\times$ 190 mm $\times$ 416 mm,油箱为满油状态,内部充填航空煤油. 油箱前后壁板和侧壁板之间用 5052 铝合金铆钉连接,侧壁板之间用 304L 不锈钢铆钉连接,铆钉直径均为 4 mm;使用 3 台高速摄像机记录整个实验过程,其中一台摄像机位于油箱右前方 45°处,观察油箱前壁板的变形,两台摄像机位于油箱后方,观察油箱后壁板的变形情况.

在实验中,破片以 955~1 667 m/s 的速度发射,破片的入射瞄准点位于油箱正上方位置,如图 1 所示,通过调整射弹装药量来控制破片入射速度,共进行 4 次高速破片冲击实验,实验工况如表 1 所示。

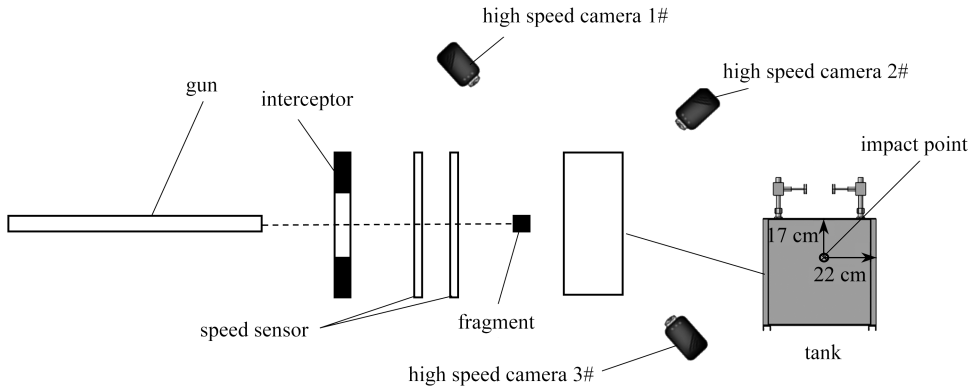


图 1 实验布置图

Fig. 1 The experimental layout

表 1 实验工况

Table 1 The experimental working conditions

No.	fragment mass $m/g$	fragment impact velocity $v/(m \cdot s^{-1})$
1	6.7	955
2	6.8	1 195
3	6.8	1 364
4	6.7	1 667

由于破片冲击作用下油箱的动态响应时间非常短(通常在  $\mu s$  量级),传统应变片测试技术难以监测到油箱箱体在空间上的动态响应过程,因此采用 DIC 技术<sup>[14-15]</sup>对油箱后壁板的动态响应过程进行了记录。DIC 技术需要使用两台高速摄像机对同一块壁板进行同步记录,位置如图 1 中的高速摄像机 2 号、3 号所示。实验前在油箱后壁板表面喷涂随机黑白散斑,同时使用矫正板拍摄矫正图像,确保图像精度,如图 2、图 3 所示。在实验结束后使用数字图像相关算法,通过追踪散斑内像素点位置随时间的变化,进而得到后壁板散斑区域的位移与应变数据<sup>[16]</sup>。

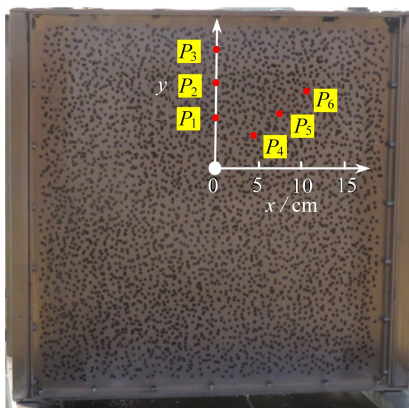


图 2 随机散斑

Fig. 2 Random speckles

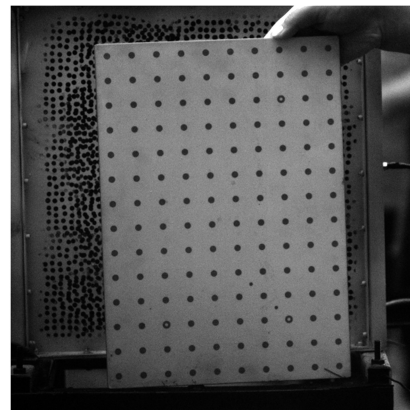


图 3 矫正板

Fig. 3 The straightening plate

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同破片入射速度下油箱变形特征

图 4 给出了破片在不同入射速度下油箱前后壁板的损伤尺寸,图 5 给出了油箱实验前后壁板的损伤形

貌.通过对比油箱前后壁板损伤尺寸,发现油箱前壁板的损伤形式主要为直径 15~18 mm 的圆形破孔;油箱后壁板主要损伤形式为花瓣形开裂、并伴随有大面积翘曲变形,且裂纹尺寸随着破片入射速度的增大而增大.破片入射速度较小时,裂纹尺寸也较小,随着破片入射速度的增大,裂纹不断向外扩展,当破片入射速度增大到 1 364 m/s 时,平均损伤尺寸增大到 125 mm,当破片入射速度增大到 1 667 m/s 时,平均损伤尺寸增大到 251 mm.这说明了在冲击条件一定时,随着破片入射速度的提高,破片对油箱箱体有着更强的毁伤效果.

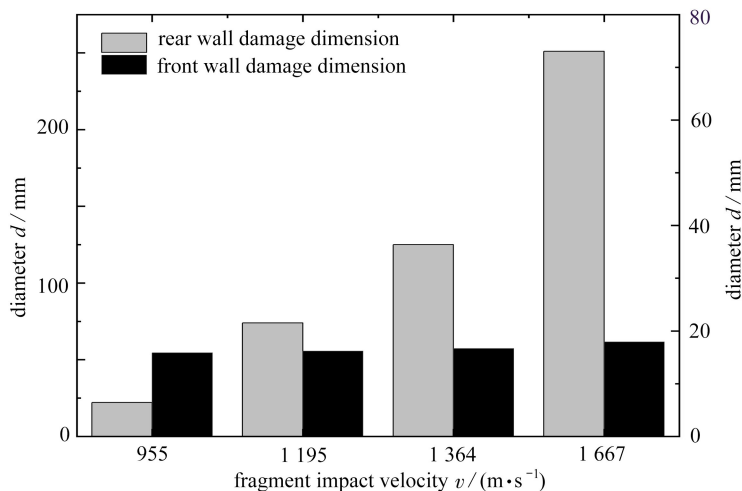


图 4 油箱前后壁板的损伤尺寸

Fig. 4 The dimensions of the damages to the front and rear walls of the fuel tank

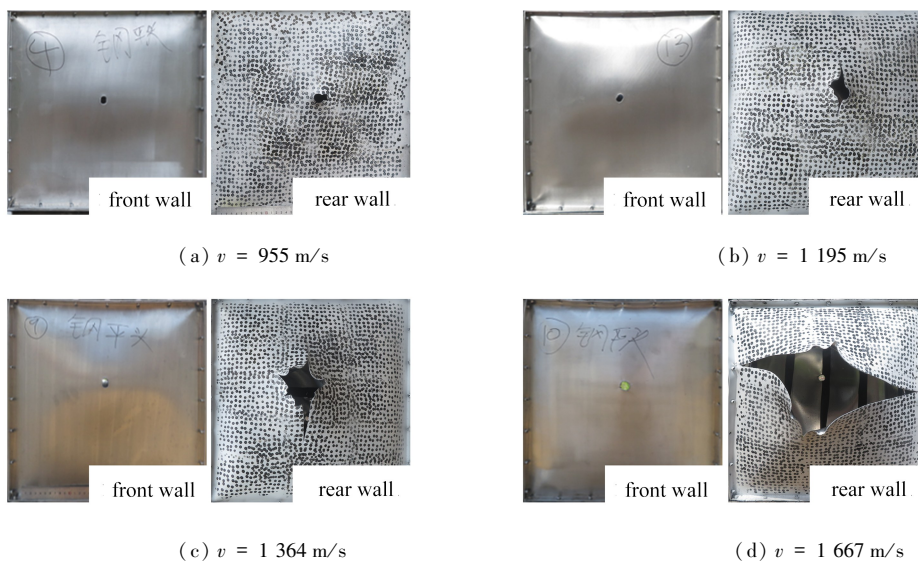


图 5 油箱前后壁板损伤形貌

Fig. 5 Damage morphologies of the front and rear walls of the oil tank

## 2.2 后壁板动态响应

通过实验结果可以发现,油箱后壁板的毁伤程度是油箱箱体结构中最严重的一部分,因此下面着重对后壁板的动态响应行为进行分析.图 6 给出了破片入射速度为 1 195 m/s 时破片穿出油箱后,后壁板不同时刻所拍摄的高速摄影图像以及使用三维 DIC 方法得到的后壁板  $z$  轴方向的位移云图,由于破片射出过程中携带了部分的煤油对摄像头进行了遮挡,因此 DIC 位移云图中有一块空白区域没有数据.图 6 的  $t = 0$  ms 时刻为破片穿出油箱后壁板的时刻.

从图 6 可以看出,油箱后壁板的动力学响应过程主要包括两个阶段,即  $t = 0 \sim 1$  ms 的后壁板中心区域塑性变形阶段,以及  $t = 1$  ms 之后的后壁板整体变形阶段.在破片穿出油箱后壁板时,后壁板弹道线位置首先受力发生变形,随后变形区域迅速向板边扩展.图 7 是由三维 DIC 方法得到的油箱后壁板典型位置的等效应变



曲线,典型测点位置如图 2 所示.以破片出射位置为原点,  $P_1, P_2, P_3$  分别距离原点 6 cm, 10 cm, 14 cm,  $P_4, P_5, P_6$  位于后壁板对角线上且与原点的距离分别和  $P_1, P_2, P_3$  相同.从图中可以发现对于与破孔距离相同的两个测点来说,对角线上测点的应变要大于破孔上方测点的应变,且随着与破孔距离的增加,两个测点之间应变的差距越大,如  $P_1$  与  $P_4$  之间最大等效应变相差 0.001,  $P_2$  与  $P_5$  之间最大等效应变相差 0.015,  $P_3$  与  $P_6$  最大等效应变相差 0.006.这是因为后壁板在对角线位置处产生了塑性铰线,从而使后壁板在对角线处产生了较大的应变.

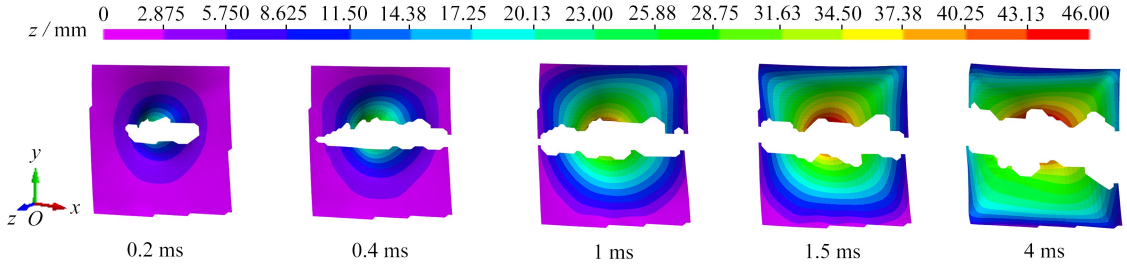


图 6 油箱后壁板高速摄影照片及 DIC 测试的  $z$  方向位移云图

Fig. 6 High speed photographs of oil tank rear walls and displacement contours in the  $z$ -axis direction measured by DIC

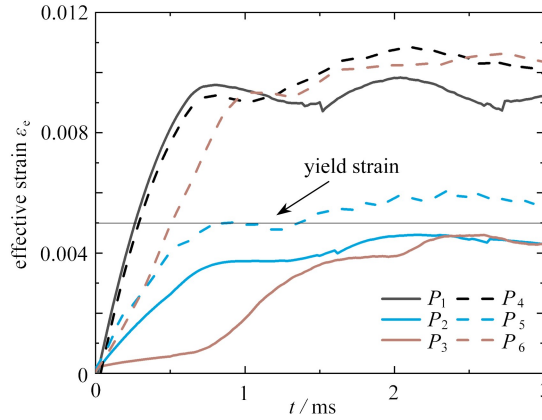


图 7 等效应变时程曲线

Fig. 7 Effective strain time history curves

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

随着油箱内空穴的扩大,整块后壁板都将受到水锤压力的作用,此阶段为典型的固支方板受分布力载荷作用的过程,此时根据 Kirchhoff-Love 薄板理论<sup>[17]</sup>,矩形板的动态行为由下述方程控制:

$$\partial Q_x / \partial x + \partial Q_y / \partial y + p = \mu \ddot{u}, \tag{1}$$

$$\partial M_x / \partial x + \partial M_{xy} / \partial y - Q_x = 0, \tag{2}$$

$$\partial M_y / \partial y + \partial M_{xy} / \partial x - Q_y = 0, \tag{3}$$

$$\dot{\kappa}_x = - \partial^2 \dot{u} / \partial x^2, \tag{4}$$

$$\dot{\kappa}_y = - \partial^2 \dot{u} / \partial y^2, \tag{5}$$

$$\dot{\kappa}_{xy} = - \partial^2 \dot{u} / \partial x \partial y, \tag{6}$$

式中,  $Q_x, Q_y, M_x, M_y$  分别为矩形板在压力作用下的横向剪力和弯矩,  $M_{xy}$  为扭矩,  $\mu$  为单位面积的质量,  $p$  为板所受压力载荷,  $u$  为挠度变形;  $\ddot{u} = \partial^2 u / \partial t^2$ , 其中  $t$  表示时间;  $\dot{\kappa}$  为单元中面曲率的变化率.

对于固支方板,受分布力载荷作用产生大挠度变形时,在其两条对角线及四条固支边处都会产生塑性铰线<sup>[18-19]</sup>,图 8 为破片入射速度为 955~1 667 m/s 时不同时刻的高速摄影图片,其中  $t = 0$  ms 为破片穿出油箱后壁板的时刻,拍摄结果也证实了这一点现象,在图中可以发现当液压水锤作用到整块后壁板时,后壁板变

形达到了最大值,并且在铆钉的约束作用下在板边位置形成了环形塑性铰线.随着破片入射速度增大,油箱后壁板的塑性铰线更加明显,当破片入射速度达到  $1\ 667\ \text{m/s}$  时,后壁板左右位置的铆钉发生断裂,后壁板中央位置在液压水锤的作用下发生更为严重的“十字型”撕裂.

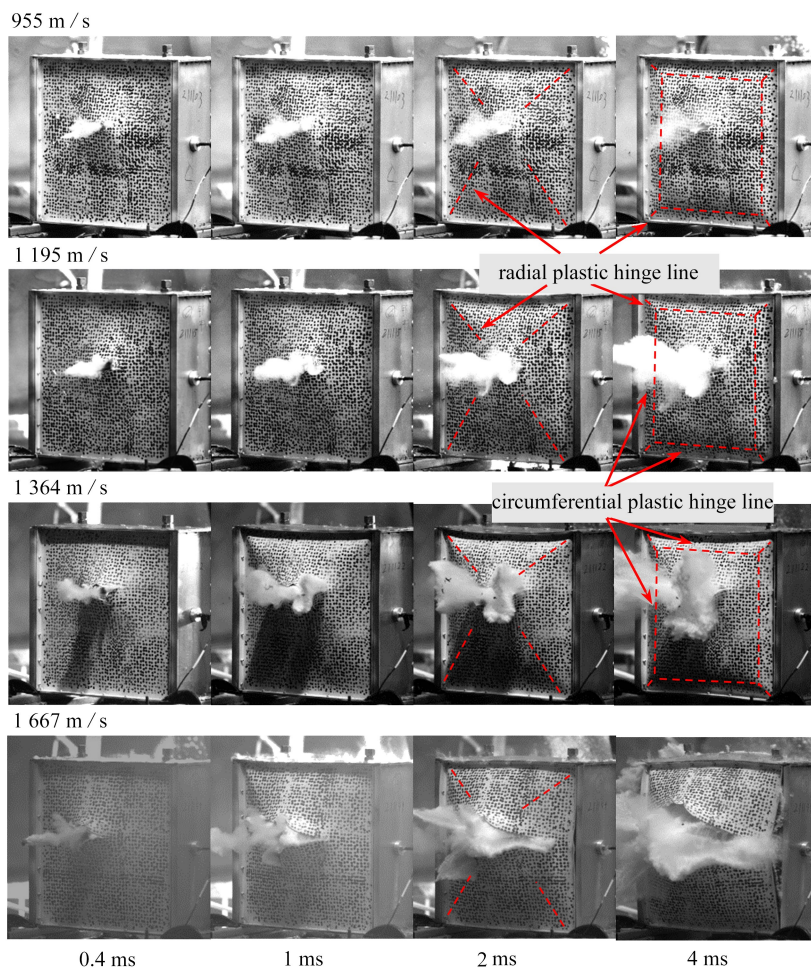


图 8 不同入射速度下油箱后壁板高速摄影图

Fig. 8 High speed photographs of the tank rear wall at different fragment impact velocities

图 9 是破片入射速度为  $955\sim 1\ 667\ \text{m/s}$  时油箱后壁板右上方对角线上距离破孔  $13\ \text{cm}$  位置处的等效应变时程曲线.在破片穿出油箱之后,等效应变快速增大,然后逐渐趋向于一个定值,当破片入射速度为  $955\ \text{m/s}$  时,该位置处的应变在  $1\ \text{ms}$  时刻达到了  $0.009$ ,当破片入射速度为  $1\ 667\ \text{m/s}$  时,该位置处的应变在  $0.6\ \text{ms}$  时刻达到了  $0.014\ 7$ ,时间较前者提前了  $0.4\ \text{ms}$ ,等效应变提高了  $63\%$ .由此可见,随着破片入射速度提高,后壁板的动态响应速度、应变水平都有着显著的提升.

综上所述,油箱后壁板在破片高速冲击下的动态响应过程可以总结为以下 5 个阶段:

1) 破片穿透前壁板后在煤油中运动时,所产生冲击波传递到油箱后壁板后,后壁板弹道线位置附近处区域首先发生球形鼓包变形,鼓包中央的变形挠度最大,后壁板变形模式如图 10(a) 所示.

2) 破片穿透后壁板后,留下一个带有裂纹的破孔.随着油箱内空腔的不断扩大大,后壁板弹道线以外的空间区域相继受到液压水锤的作用并发生变形,球形鼓包面积逐渐扩大,同时后壁板破孔周围的裂纹也开始向外扩展.由图 4 可知,裂纹扩展长度与破片入射速度有关,入射速度越快,形成的裂纹就越长,后壁板变形模式如图 10(b) 所示.

3) 当后壁板的球形鼓包变形扩展到后壁板边缘后,在壁板对角线位置处开始产生径向交叉的对角线塑性铰线,后壁板变形模式如图 10(c) 所示.

4) 随着破孔周围壁板的变形程度进一步增大,径向塑性铰线逐渐缩短并在后壁板边缘处产生了环形塑性铰线,后壁板变形模式如图 10(d)所示。

5) 最后随着空腔的反复膨胀坍塌,煤油动能逐渐消耗殆尽,后壁板的变形又反复振荡,最后趋于一个稳定值。

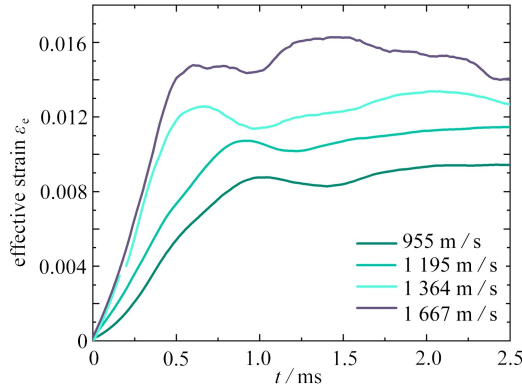


图 9 不同入射速度下后壁板典型位置等效应变时程曲线

Fig. 9 Effective strain time history curves of the typical positions of the rear wall at different fragment impact velocities

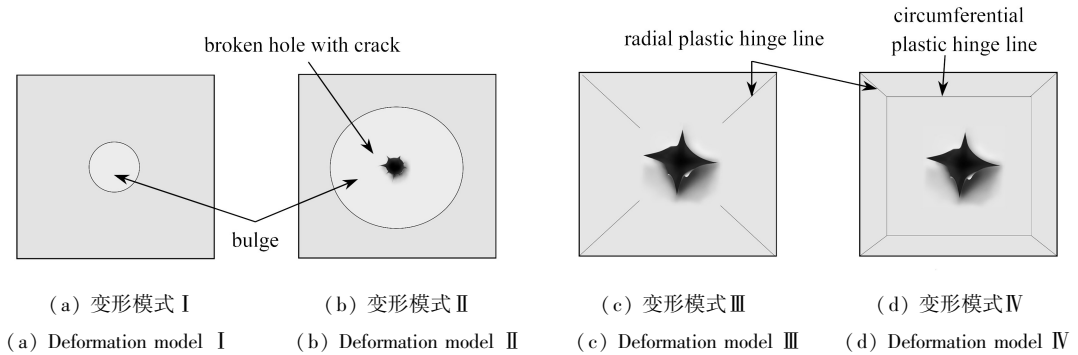


图 10 后壁板变形模式演变规律

Fig. 10 Evolution laws of deformation modes of the rear wall

### 3 结 论

本文通过实验研究了破片高速冲击下油箱的动力学响应行为,重点关注了油箱前后壁板的毁伤形式以及油箱后壁板的动态响应行为,并对后壁板变形模式的演化规律进行了归纳分析,主要得到了以下结论:

1) 当高速破片冲击油箱时,油箱前壁板的毁伤形式主要为圆形孔洞,后壁板的毁伤形式为花瓣形开裂、并伴随有大面积翘曲变形;破片入射速度从 955 m/s 提升到 1 667 m/s 时,前壁板平均损伤尺寸维持在 15 ~ 18 mm 之间,后壁板平均损伤尺寸由 22 mm 扩大到 251 mm。

2) 当破片入射速度由 955 m/s 提高到 1 667 m/s 时,后壁板同一位置的等效应变提高了 63%,时间提前了 0.4 ms,可见后壁板的应变水平和动态响应速度都随着破片入射速度提高有了显著提升。

3) 油箱后壁板的动力学响应过程主要包括两个阶段:后壁板中心区域塑性变形阶段以及后壁板整体变形阶段,后壁板在中心区域塑性变形阶段的变形模式主要为球形鼓包和带有裂纹的破孔,当球形鼓包变形扩展到后壁板边缘后,后壁板进入整体变形阶段,并在对角线和边缘位置处形成塑性铰线,最后随着空腔的坍塌,后壁板的变形在反复振荡中趋于一个稳定值。

### 参考文献 (References):

- [1] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted

- to hydrodynamic ram[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2012, **16**(1): 19-28.
- [2] NISHIDA M, TANAKA K. Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32**(12): 2000-2016.
- [3] DELETOMBE E, FABIS J, DUPAS J, et al. Experimental analysis of 7.62 mm hydrodynamic ram in containers [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, **37**: 1-21.
- [4] 马丽英, 李向东, 周兰伟, 等. 高速破片撞击充不同介质液体容器的数值计算及实验研究[J]. 振动与冲击, 2018, **37**(24): 115-122. (MA Liying, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Numerical simulation and experimental study on high-speed fragment impact filling different liquid containers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, **37**(24): 115-122. (in Chinese))
- [5] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, **31**(6): 579-584. (ZHANG Wei, GUO Zitao, XIAO Xinke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, **31**(6): 579-584. (in Chinese))
- [6] 张伟, 黄威, 任鹏, 等. 高速弹体水平入水产生冲击波特特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, **48**(4): 37-41. (ZHANG Wei, HUANG Wei, REN Peng, et al. The underwater shock wave characteristics caused by high speed horizontal water entry projectile[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, **48**(4): 37-41. (in Chinese))
- [7] 解江, 李翰, 周书婷, 等. 爆炸冲击载荷下航空铝合金平板动态响应数值分析方法[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(4): 410-420. (XIE Jiang, LI Han, ZHOU Shuting, et al. A numerical method for dynamic responses of aviation aluminum alloy plates under blast loads[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(4): 410-420. (in Chinese))
- [8] 张宇, 王彬文, 刘小川, 等. 球形弹丸对不同构型充液油箱的毁伤效应[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(35): 26-32. (ZHANG Yu, WANG Binwen, LIU Xiaochuan, et al. Study on the damage effects of spherical projectiles on different configuration fuel tanks [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(35): 26-32. (in Chinese))
- [9] KWON Y W, YANG K, ADAMS C. Modeling and simulation of high-velocity projectile impact on storage tank [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2016, **138**(4): 041303.
- [10] KWON Y, YUN K. Numerical parametric study of hydrodynamic ram[J]. *International Journal of Multiphysics*, 2017, **11**(1): 15-47.
- [11] 杨砚世, 肖志华, 李向东. 破片撞击燃料箱时水锤效应的数值仿真研究[J]. 爆破器材, 2014, **43**(4): 26-31. (YANG Yanshi, XIAO Zhihua, LI Xiangdong. Numerical simulation study on hydrodynamic ram due to the penetration of fuel tank by high energy fragments[J]. *Explosive Materials*, 2014, **43**(4): 26-31. (in Chinese))
- [12] 陈照峰, 刘国繁, 高伟, 等. 高速子弹穿透充液油箱的数值模拟[J]. 航空计算技术, 2014, **44**(1): 98-101. (CHEN Zhaofeng, LIU Guofan, GAO Wei, et al. Numerical simulation of filled fuel tank submitted high-speed bullet penetrated[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2014, **44**(1): 98-101. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] SUTTON M A, WOLTERS W J, PETERS W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method[J]. *Image & Vision Computing*, 1983, **1**(3): 133-139.
- [15] HELM J D, SUTTON M A, MCNEILL S R. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(7): 1911-1920.
- [16] TIWARI V, SUTTON M A, MCNEILL S R. Assessment of high-speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: methodology development and validation[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, **47**(4): 561-579.
- [17] 徐晓建, 邓子辰. 基于简化的应变梯度理论下 Kirchhoff 板模型边值问题的提法及其应用[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(12): 1205-1215. (XU Xiaojian, DENG Zichen. The formulation and application of Kirchhoff plate model boundary value problem based on simplified strain gradient theory[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(12): 1205-1215. (in Chinese))



- 2022, **43**(4): 363-373.(XU Xiaojian, DENG Zichen. Boundary value problems of a kirchhoff type plate model based on the simplified strain gradient elasticity and the application[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(4): 363-373.(in Chinese))
- [18] 姚术健. 箱形结构内部爆炸等效缩比实验方法及破坏特性研究[D]. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.(YAO Shujian. Investigations on the scaling method and damage features of box-shaped structures under internal blast loading[D]. PhD Thesis. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.(in Chinese))
- [19] 柳占立, 初东阳, 王涛, 等. 爆炸和冲击载荷下金属材料及结构的动态失效仿真[J]. *应用数学和力学*, 2021, **42**(1): 1-14.(LIU Zhanli, CHU Dongyang, WANG Tao, et al. Dynamic failure simulation of metal materials and structures under blast and impact loading[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(1): 1-14.(in Chinese))