DOI: 10.11883/bzycj-2017-0188
文章编号: 1001-1455(2018)06-1412-07

高速破片撞击充液容器拖拽阶段气腔特性研究*

马丽英,李向东,周兰伟,张高峰
(南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为研究液压水锤效应拖拽阶段的气腔特性,利用数值模拟与实验相结合的方法对破片撞击充液容器的过程进行研究,并分析了破片撞击速度和液体介质对液压水锤效应拖拽阶段气腔的影响。结果表明:破片撞击充液容器时,在液体中形成的气腔形状为圆锥形,其最大直径和长度随破片的运动逐渐增大,气腔长径比最终趋于一稳定变化区域,约在 3.8~3.9 之间;气腔最大直径随着破片撞击速度的增大而增大;柴油介质中形成气腔的最大直径和长径比变化规律与水介质中形成的相同,气腔长径比最终在 4.25 左右浮动,柴油介质中形成气腔的最大直径和长径比均大于水介质中形成的。

关键词: 充液容器;气腔特性;撞击速度;液体介质
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

大部分类型的战斗部爆炸都会产生高速破片,破片撞击充液容器(如飞机与车辆的油箱、输油管道以及油罐车等)会产生水锤效应,水锤效应能大幅增强破片对容器的毁伤能力,不少飞机的损毁都是由于破片撞击油箱形成的液压水锤效应[1]。水锤效应的研究对战场目标和民用设施的防护设计都具有非常重要的意义,二战后就受到了美国等发达国家的重视,并开展了很多相关研究[2-3]。揭示破片撞击充液容器时形成的气腔特性是研究液压水锤的重要内容之一,气腔特性不仅体现了高速破片在液体中的速度变化,同时还影响作用在容器壳体上载荷的大小及分布。国外学者[4-7]也开展了一些研究工作,如 Aristoff 等[8]对低速破片垂直入射自由水面进行冲击实验,并对气腔脉动特性及其脉动速度对气腔形状的影响进行研究,得到气腔长度与时间的关系式。Varas 等[9-10]用速度 600~900 m/s 的钢制球形破片(直径 12.5 mm)撞击充液的铝合金(6063-T5)方管,来模拟机翼油箱受到撞击的情况,但只对比了方管中不同充液比对气腔形状的影响,并未对气腔其他影响因素进行研究。国内相关研究主要针对海军武器研制的需要,研究弹药入射自由水面并在水中运动及其形成的气腔特性[11-13]。而针对高速破片撞击充液容器形成气腔的研究较少。

本文中主要研究高速破片撞击充液容器时形成的气腔特性与破片撞击速度、液体介质类型的关系,为油箱结构的响应及毁伤奠定基础。

1 气腔形成过程及其特性表征

1.1 气腔的形成

破片撞击充液容器时形成的液压水锤效应主要分为侵彻阶段、冲击阶段、拖拽阶段、空腔阶段(空腔阶段有两种情况:一种情况下破片剩余速度较低,破片留在容器内;另一种情况下破片剩余速度较高,破片穿出容器),见图 1。气腔形成于水锤效应的拖拽阶段,即破片进入液体后并在其内部运动,由于受到液体黏滞阻力的作用,速度不断衰减;同时,破片在水中运动过程中不断将动能传递给水,部分能量使水沿垂直弹道方向运动从而在破片尾部形成一个低压区,使得空气(和液体蒸汽)进入箱体,形成气腔。

1.2 气腔特性表征

高速破片在液体中运动时,在破片尾部形成一个以破片弹道方向为对称轴的圆锥形气腔如图 2 所

* 收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-09-21
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11572159)
第一作者: 马丽英(1990—),女,硕士; 通信作者: 李向东,lixiangd@njust.edu.cn。

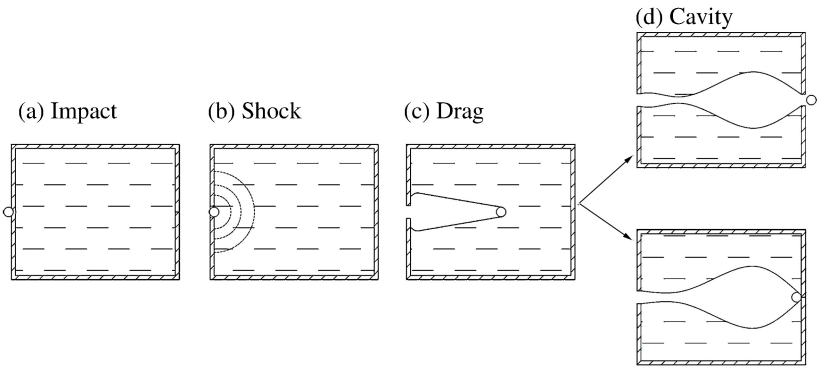


图 1　液压水锤效应形成过程

Fig. 1　Hydrodynamic ram forming process

示，气腔长度为 L，气腔最大直径为 D（简称为气腔直径）。气腔随破片在水中运动距离的变化而变化，并且气腔特性（如气腔长度、气腔直径）还与破片的初速、液体介质类型等因素有关。

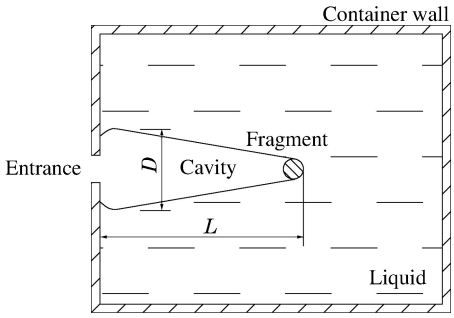


图 2　气腔特性表征示意图

Fig. 2　Sketch of cavity characteristics

2　数值模拟及实验方法

首先以充水容器为例，采用数值计算与实验相结合的方法，研究破片撞击容器后形成气腔的特性。

箱体尺寸为 400 mm×400 mm×500 mm，材料为铝合金 2024-T4，容器壳体壁厚为 4 mm。破片为∅9.5 mm（约 3.5 g）的钢球。

2.1　有限元模型的建立

数值模拟时，用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述充液容器箱体，材料主要参数如表 1 所示；用 Plastic Kinematic 材料模型描述破片（钢），破片密度为 7 830 kg/m^3，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3。

表 1　箱体材料主要参数

Table 1　Main parameters of filling liquid container

材料	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	μ	A/MPa	B/MPa	C	n	m	Grüneisen 状态方程		
									c/(m·s^{-1})	S_1	γ
铝合金	2 797	69.63	0.33	265	462	0.015	0.34	1.0	5 286	1.4	2.0

用 Null 模型和 Grüneisen 状态方程描述水，用 Null 模型和 Linear Polynomial 状态方程描述空气，材料参数见表 2。钢球和铝合金箱体为 Lagrange 网格，水和空气为 Euler 网格。Lagrange 网格和 Euler 网格之间采用 ALE（Arbitrary Lagrange-Euler）方法进行耦合，建立的有限元模型如图 3 所示。

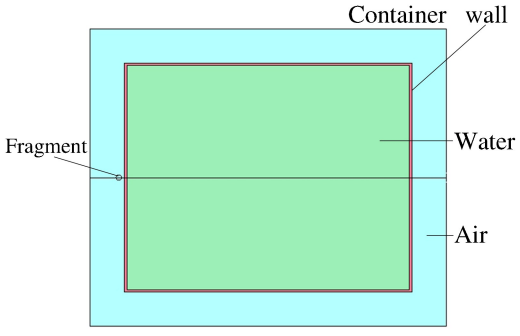


图 3　有限元模型

Fig. 3　Finite element model

表 2　水和空气的主要材料参数表

Table 2　Material parameters of water and air

材料	ρ/(kg·m^{-3})	c/(m·s^{-1})	S_1	C_4	C_5
水	1 000	1 480	1.979	—	—
空气	1.25	—	—	0.4	0.4

2.2 实验方法

实验布置如图 4 所示。实验时,用弹道枪发射球形破片撞击充液容器。用测速靶和计时仪测得破片撞击容器时的速度,并用高速相机拍摄破片在液体内的运动情况和气腔形态。为了拍摄容器内气腔的大小及变化,容器两侧壁采用有机玻璃,并在其中一侧有机玻璃上粘贴刻度纸,如图 5 所示,用于获得气腔的具体尺寸。充液容器后布置了一块白色背景布,便于高速相机捕捉破片位置。

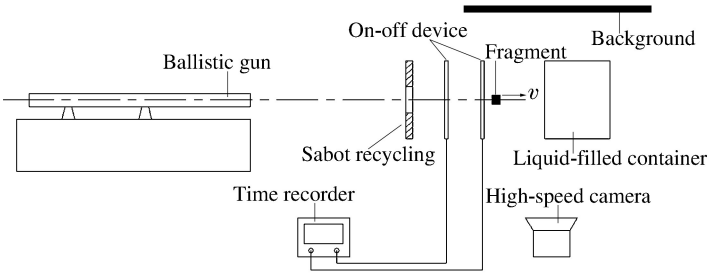


图 4 实验装置及布置示意图

Fig. 4 Experimental device and layout diagram



图 5 充液容器(实验)

Fig. 5 Liquid-filled container (experiment)

实验测得破片撞击充液容器前壁面的速度为 686 m/s,并用数值计算的方法模拟了球形破片以相同速度撞击充液容器的过程。

3 拖拽阶段气腔特性变化规律

3.1 气腔的形成过程

图 6 为数值计算和实验中破片撞击充液容器并形成气腔的过程,从图 6 可以看出,数值计算中气腔

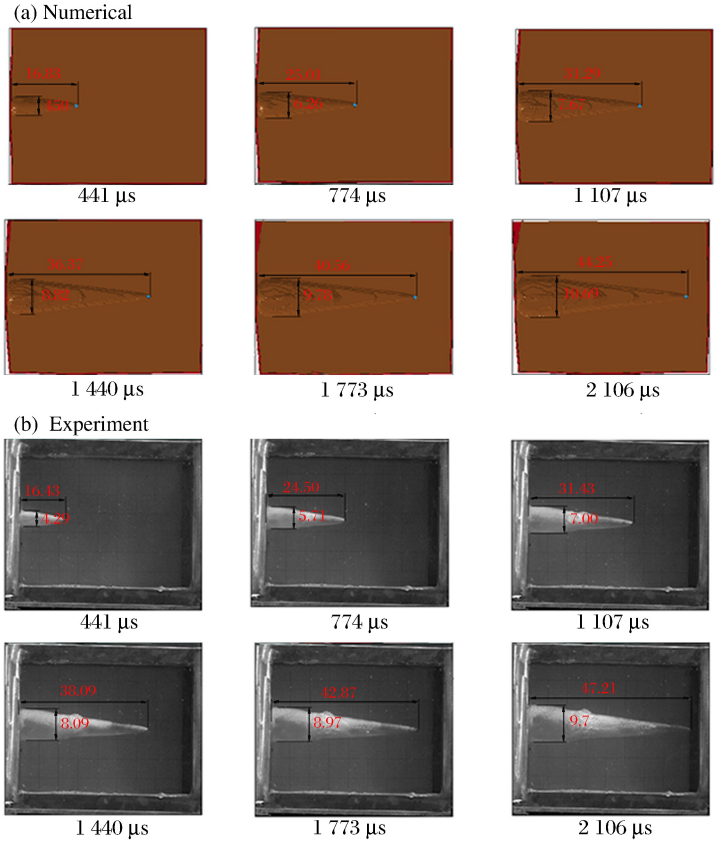


图 6 气腔大小随时间变化的数值计算结果与实验照片(单位:cm)

Fig. 6 Numerical and experimental results of cavity characteristics varies with time (unit: cm)

的形状及形成过程与实验照片一致。数值模拟中，破片首先穿透容器壁面，在水中运动。破片入水后，沿弹道方向向前运动，并在尾部拖拽出一个圆锥形气腔。随着破片水中运动时间的增加，破片尾部气腔的长度和直径随破片是增大的，即气腔是不断膨胀的。在气腔膨胀过程中，气腔不断挤压充液容器的前壁面，使得前壁面朝着与破片运动方向相反的方向变形凸起。

3.2　气腔特性随时间的变化规律

气腔长度和气腔直径随时间的变化曲线如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出，随着破片在水中运动时间的增加，气腔长度不断增加。破片初入水时速度较大，气腔长度增加得比较快。由于水具有黏性，破片在水中的速度衰减得很快，气腔长度增加的幅度逐渐减小。数值计算得到的气腔长度略小于实验测得的气腔长度(即在水中运动相同时间后，数值计算中破片移动的距离比在实验中移动的距离大)，最大偏差为 6.27%。从图 7(b)中可以看出，气腔直径的变化规律与气腔长度变化规律相似，破片速度较大时，气腔直径增大较快(即气腔膨胀较快)，速度减小时，气腔直径增加幅度放缓。

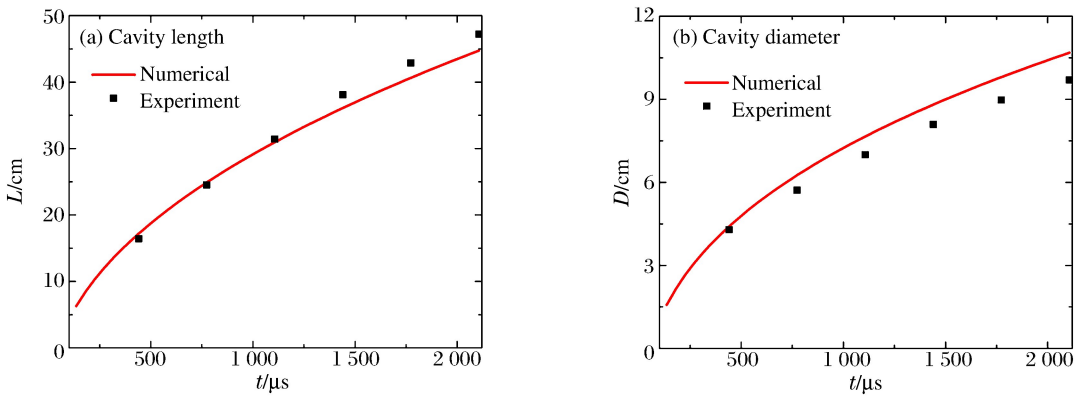


图 7　气腔特性曲线

Fig. 7　Cavity characteristic curve

实验测得的气腔直径和长度与数值计算的最大偏差为 10.52%。说明建立的有限元模型和选用的材料模型合理，下文以相同的模型及材料参数计算研究破片撞击速度和液体介质对气腔特性的影响。

4　破片撞击速度对气腔特性的影响

为研究破片撞击速度对液体中形成的气腔特性的影响，下面计算破片以不同速度撞击充水容器的过程，速度范围 600～2 200 m/s，间隔 400 m/s。

破片以不同速度撞击充液容器时，破片在液体内气腔特性及速度曲线如图 8 所示(上升曲线为气腔

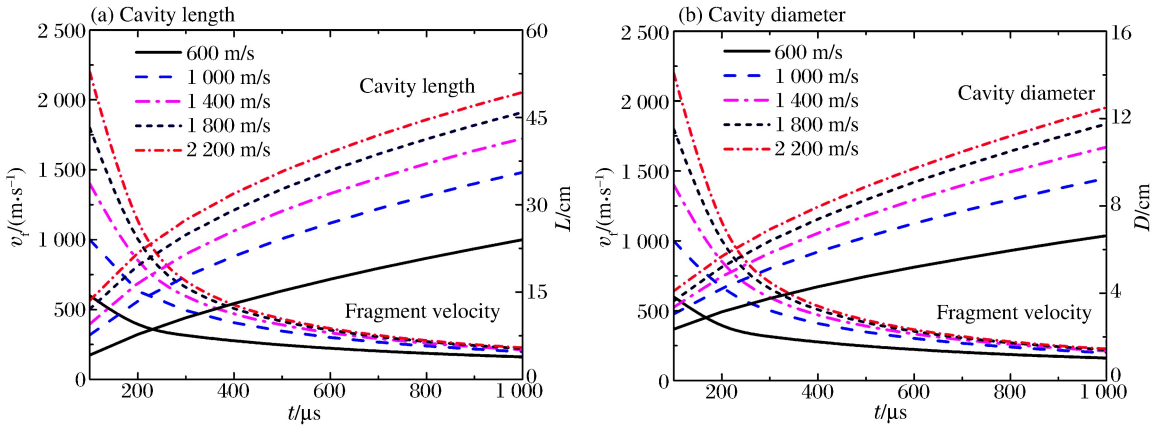


图 8　不同撞击速度下气腔特性曲线

Fig. 8　Cavity characteristic curves with different impact velocities

长度或直径随时间变化曲线,下降曲线为速度随时间变化曲线)。从图中可以看出,随着破片撞击速度增加,破片在水中运动相同时间后,形成的气腔长度和直径均增大。说明破片撞击速度越大,传递给水的能量越多,形成气腔的体积越大。从速度随时间变化曲线可以看出,破片的撞击速度越大,入水后速度下降越明显。气腔长度和直径随破片撞击速度呈非线性增加的趋势。撞击速度小于 1 400 m/s 时,速度变化对气腔长度和直径的增加率的影响较为明显,增加率较大;撞击速度大于 1 400 m/s 时,随着速度的增大,气腔长度和直径的增加率均减小。

破片以不同速度撞击充水容器时形成气腔长度与气腔直径之比(L/D)随时间的变化曲线如图 9 所示,破片撞击速度较低(小于 1 400 m/s)时,气腔长径比随破片撞击动能的增加而增大;破片撞击动能较高(大于 1 400 m/s)时,气腔长径比是先上升后下降,最终趋于一个稳定变化区域,约在 3.8～3.9 之间。撞击速度越高,L/D 趋于稳定变化区域的时间越短。

5 液体介质对气腔特性的影响

为了研究介质类型对气腔特性的影响,下面对破片以 686 m/s 的速度撞击柴油介质形成液压水锤效应拖拽阶段的气腔特性进行数值模拟。计算时更换液体介质为柴油,其密度为 837 kg/m^3,声速为 1 775 m/s,$S_1=1.725$,其他参数不变。

数值计算中,破片以 686 m/s 的速度撞击充满水和柴油两种介质的容器时形成的气腔特性曲线如图 10 所示。从图中可以看出,在柴油中形成的气腔直径与在水中形成的气腔直径相差不大。而气腔长度比在水中增加得快,且差值随破片在液体中的运动而逐渐增大。主要是因为柴油的密度小于水,其相对于水较容易压缩。破片在柴油介质内运动时所受阻力小于水,破片的存速高;随着运动时间的增加,速度差越来越大。

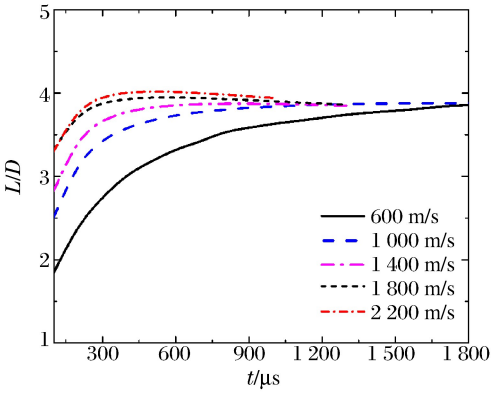


图 9 不同撞击速度下 L/D 随时间变化曲线

Fig. 9 Cavity L/D-time curves with different impact velocities)

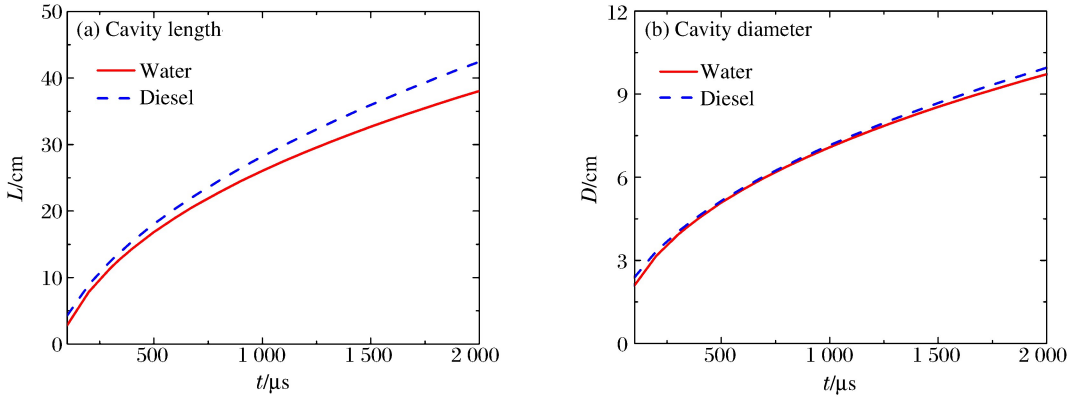


图 10 不同介质中的气腔特性曲线(水和柴油)

Fig. 10 Cavity characteristic curves in different liquid (water and diesel)

为考虑密度对气腔长度的影响,对图 10 中的横轴进行无量纲化处理后的曲线如图 11 所示,其中 d_f 为破片直径,u_0 为破片进入液体的初速(因为破片穿透容器前壁面撞击不同液体介质时产生的初始冲击波强度不同,消耗的破片动能不同,所以破片进入水和柴油的速度不同。根据数值计算中破片的速度

变化可以得到，破片进入水和柴油的速度分别为 493、496 m/s），ρ_l 为液体介质的密度，ρ_f 为破片密度。从图中可以看出，水和柴油中气腔长度几乎重合，最大偏差为 0.59%，说明密度（破片进入液体的速度影响可以忽略）为影响气腔特性的主要因素。

水和柴油两种介质中气腔长度与直径之比（L/D）随时间的变化曲线如图 12 所示，可以看出柴油介质中长径比随时间变化规律与水介质基本一致。在破片刚入柴油介质中时，气腔的长径比迅速增加，破片在柴油介质中运动一段时间后趋于一稳定变化区域。柴油中，L/D 趋于稳定后约在 4.25 左右浮动，是水介质的 1.09 倍。柴油介质中的长径比始终大于水中的长径比，且两条曲线几乎同时趋于稳定变化区域。说明介质类型对 L/D 达到稳定值的时间无影响，而对 L/D 的定值大小有影响。

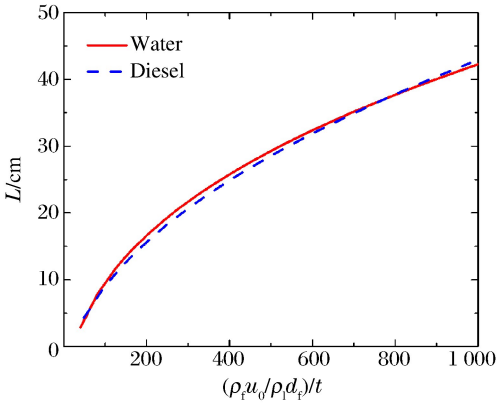


图 11　气腔长度无量纲曲线（水和柴油）

Fig. 11　Normalized curves of cavity length (water and diesel)

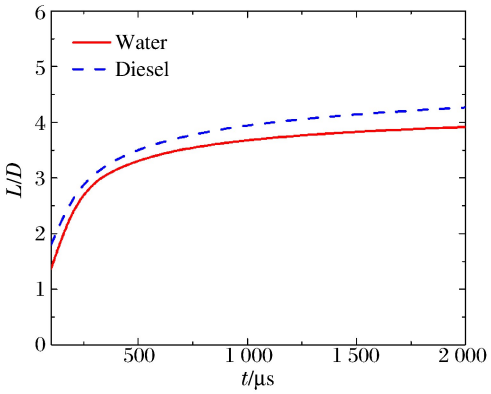


图 12　不同介质中的 L/D 随时间变化曲线（水和柴油）

Fig. 12　Cavity L/D-time curves in different liquids (water and diesel)

6　结　论

（1）破片撞击充液容器时形成圆锥形气腔，其最大直径和长度随破片的运动而逐渐增大，破片入液体时速度较大，气腔长度和直径增加较快；随着破片速度的衰减，气腔长度和直径增加的幅度逐渐减小。

（2）破片撞击充水容器时形成气腔的长度和最大直径随着破片撞击速度的增大而增大。气腔长径比（L/D）随破片撞击速度的增大更快趋于一稳定变化区域，约在 3.8～3.9 之间。

（3）破片撞击充满柴油容器时形成气腔的最大直径和长径比变化规律与水介质中相同，气腔长径比最终在 4.25 左右浮动，柴油介质中气腔最大直径和长径比（L/D）均大于水介质。

参考文献：

[1]　MOUSSA N A, WHALE M D, GROZMANN D E, et al. Potential for fuel tank fire and hydrodynamic ram from uncontained aircraft engine debris[R]. Hughes Technical Center, US, 1997.

[2]　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.

[3]　DISIMILE P J, DAVIS J, TOY N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(2):61-72.

[4]　SHEPARD T, ABRAHAM J, SCHWALBACH D, et al. Velocity and density effect on impact force during water entry of sphere[J]. Journal of Remote Sensing & GIS, 2014,3(3):1000129.

[5]　TRUSCOTT T T, TECHET A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres[J]. Physics of Fluids, 2009,21(12):121703.

[6]　LECYSYN N, BONY-DANDRIEUX A, APRIN L, et al. 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(1):635-643.

[7] LECYSYN N, DANDRIEUX A, HEYMES F, et al. Ballistic impact on an industrial tank: study and modeling of consequences[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,172(2):587-594.

[8] ARISTOFF J M, TRUSCOTT T T, TECHET A H, et al. The water entry of decelerating spheres[J]. Physics of Fluids, 2010,22(3):032102.

[9] 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.

[10] VARAS D, LOPEZ-PUENTE J, ZAERA R. Numerical analysis of the hydrodynamic ram phenomenon in aircraft fuel tanks[J]. AIAA Journal, 2012,50(7):1621-1630.

[11] 蒋运华,徐胜利,周杰.运动体小扰动下入水空泡试验研究[J].弹道学报,2016,28(1):81-86.
JIANG Yunhua, XU Shengli, ZHOU Jie. Experimental study on water entry cavity for vehicle with small perturbation[J]. Journal of Ballistics, 2016,28(1):81-86.

[12] 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. Experiment investigation on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):579-584.

[13] 郭子涛.弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

Characteristics of draging period cavity formation in liquid filling container by fragment impacting

MA Liying, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, ZHANG Gaofeng

(*Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: To study the characteristics of the cavities formed by the fragment impacting liquid filling container, the forming process of the cavities in the liquid-filled containers was studied through numerical and experimental studies. In addition, the effects of the impacting velocity and the liquid medium of the cavity were analyzed. The results show that the cavity formed in the liquid is approximate a cone, the maximum diameter, length and length-diameter ratio of the cavity increase with fragment moving. The ratio of length to diameter eventually approches a certain value, and the value is approximate 3.9. The maximum diameter of the cavity increases with the increase of the fragment impact velocity. The maximum diameter and the length-diameter ratio of the cavity in the diesel medium are similar to those in the water medium, and the length-diameter ratio of the cavity approches 4.25. The maximum diameter and the length-diameter ratio in the diesel medium are larger than those in the water medium.

Keywords: liquid-filled container; cavity characteristics; impact velocity; liquid medium

(责任编辑 曾月蓉)