

液压水锤效应引起液体喷溅特性及其影响因素试验研究*

陈安然,李向东,周兰伟,纪杨子焱

(南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

摘要:为研究液压水锤效应引起的液体喷溅特性及其影响因素,进行了高速破片撞击充液容器的试验,测试了液体内的空腔振荡特性、压力分布特性和容器外的液体喷溅特性。试验结果表明:液压水锤效应引起的液体喷溅有两个不同的阶段。第一个阶段发生在空腔生长到最大体积后的400~700 μs内,喷溅液体的头部呈箭状;在第二个阶段出现多次形状相似的脉动喷溅,且单次脉动均发生在每次空腔溃灭之后,喷溅液体具有伞状头部与线状尾部。液体内的压力和侵彻孔的形态共同影响液体的喷溅速度,相对喷溅速度与破片的撞击速度成反比。喷溅液体在运动过程中存在速度波动,且随着喷溅次数的增加,液体喷溅速度逐渐下降,速度拐点出现的位置逐渐接近侵彻孔。

关键词:液压水锤;充液容器;高速撞击;液体喷溅

中图分类号:TJ012.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)05-144-09

Experimental study on the characteristics and influencing factors of liquid spurt caused by hydrodynamic ram

CHEN Anran, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, JI Yangziyi

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

Abstract: In order to study the characteristics of liquid spurt caused by the hydrodynamic ram and its influencing factors, experiments in which high-velocity fragment impacts the liquid-filled container have been conducted. The characteristics of cavity oscillation in the container, the pressure distribution and the liquid spurt outside the container were tested. Experimental results show that there are two different phases of the liquid spurt. The first phase occurs within 400~700 μs after the cavity grows to its maximum volume and the liquid spurt has an arrow-shaped head. In the second phase, a number of similar pulsating spurt occurs, and each single pulsating occurs after each time of the cavity collapse. The liquid spurt has an umbrella-shaped head with a linear-shape tail. The pressure in the liquid and the shape of penetration orifice affects the velocity of the liquid spurt. The relative velocity of liquid spurt decreases in inverse proportion with the increase of the fragment impact velocity. The velocity of the liquid spurt fluctuates in the motivation. The velocity of the liquid spurt decreases and the location of the inflection point of the velocity can be closer to the penetration orifice with the increase of the number of spurts.

Keywords: hydrodynamic ram; liquid-filled container; high-velocity impact; liquid spurt

燃油箱是战场大部分运动目标的必备、易燃部件,是弹药毁伤元重点打击对象之一。当高速侵彻体(破片、子弹、穿甲弹等)撞击、侵彻目标燃油箱时,产生液压水锤效应(Hydrodynamic ram)^[1-6],导致燃油箱出现不同模式的毁伤。液压水锤效应毁伤燃油箱的机制为:①引起油箱内燃油出现较大的压力波动,导致燃油箱破损;②引起燃油向外喷溅,增加油箱及周围环境的起火概率。引燃喷溅燃油的热源主要包括:破片撞击油箱壁面产生的火花、机械设备的摩擦火花、电子元器件及其线路在运行

过程中的发热和辐射表面等。

国内外学者采用理论^[7-12]、试验^[13-19]和数值模拟^[20-26]方法研究了液压水锤效应,内容多涉及破片撞击充液容器后产生的冲击波、液体内的空腔生长、容器的结构响应和液体介质类型对水锤效应的影响等,而针对液压水锤效应引起液体喷溅的相关研究较少。Lingenfelter等^[27-28]通过测量破片侵彻孔处的流场,计算了空腔内的外部环境气体和蒸发流体的相对组成;利用同步高速摄影技术,观察了内部空腔和外部喷溅液体之间

* 收稿日期:2020-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572159);国防科技基础加强计划技术领域基金资助项目(2020-JCJQ-JJ-401);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX19_0329, KYCX19_0330)

作者简介:陈安然(1995—),女,山东潍坊人,博士研究生, E-mail: lrxblsjtzbdtzb@163.com;

李向东(通信作者),男,教授,博士,博士生导师, E-mail: lixiangd@njust.edu.cn

的联系;指出液压力水锤效应引起液体喷溅的研究重点是其驱动机制。Disimile 等^[29-30]对液压力水锤效应引起的液体喷溅进行了定性研究,将该过程分为预喷溅、主喷溅、低频脉动与高速喷射4个具有不同特征的阶段,并统计了每个阶段发生的时刻和持续时间,研究了破片速度对液体喷溅的影响。试验结果表明:破片动能不影响主喷溅和低频脉动阶段,而预喷溅和高速喷射阶段只有在破片动能较高时才能观察到,这表明液体喷溅与容器内的压力波动紧密相关。在文献[31]中初步描述了空腔振荡与液体喷溅的形状特性。可以看出,液体内的空腔变化和压力特性对液体喷溅具有重要的影响。

目前为止,不同阶段喷溅液体的速度特性,影响液体喷溅时间、速度和形状的因素及影响机理的研究都不是很深入。为此,本文开展了不同速度破片撞击充液容器的试验,测量容器内的空腔生长与振荡、容器外的喷溅液体、液体内部压力的相关参数,研究液压力水锤效应引起的液体喷溅、空腔形状变化与压力波动三者之间的关系,分析喷溅液体的速度、形状特性及其影响因素。

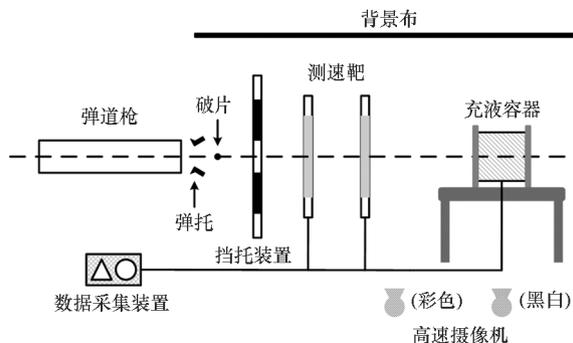
1 试验系统设计

1.1 试验系统

试验系统主要由弹道枪、挡托装置、测速靶、充液容器、高速摄像机和数据采集装置6部分构成,如图1所示。弹道枪用来加速破片,通过调整发射装药量控制破片的撞击速度。挡托装置用来阻挡破片托的碎片,避免其撞击容器。测速靶与计时仪用来测量破片的撞击速度。高速摄像机用来记录试验过程:黑白摄像机帧率为6000帧/s,采用长焦镜头,能拍摄分辨率较高的图像,将其对准充液容器以拍摄液体喷溅的局部过程;彩色摄像机帧率为16000帧/s,采用标准镜头,拍摄视角大,用来拍摄更大范围的视场。利用容器长度对高速摄像机得到的图像进行标定,得到图像与其实际尺寸的比例,测量空腔的长度和半径、喷溅液体的长度。数据采集装置与传感器相连,测量充液容器内的压力。为了研究液体喷溅、空腔形状变化与压力波动三者间的对应关系,设计了两种尺寸相同的充液容器:钢质容器和透明容器,前者用于研究容器内压力与液体喷溅对应关系的试验;后者用于研究空腔形状变化与液体喷溅对应关系的试验。

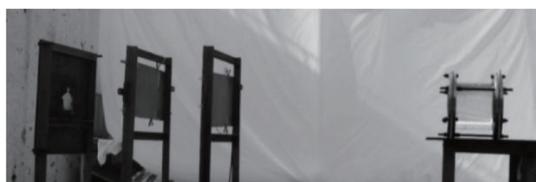
1.2 充液容器及试验方案

两种容器均为圆筒结构,外径245 mm、内径210 mm、高200 mm。容器的前后面板为300 mm ×



(a) 试验布置示意图

(a) Schematic setup of the experiment



(b) 试验实际布置

(b) Actual setup of the experiment

图1 试验布置

Fig. 1 Experimental setup

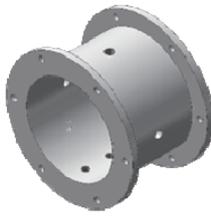
315 mm × 4 mm 的2A12-T4铝合金板,材料密度为2780 kg/m³,强度极限420 MPa。以面板中心为圆心,在 Φ 280 mm的圆周上加工了6个均匀分布的 Φ 14的通孔,用于与螺杆配合固定面板。

钢质圆筒材料为42CrMo高强度钢,上下底面加工法兰结构,如图2(a)所示。侧面加工有5个传感器安装孔和1个注水孔,其位置分布如图2(b)所示。透明圆筒材料为聚碳酸酯(Polycarbonate)。

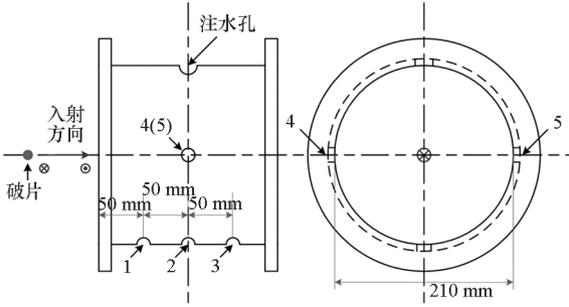
容器的安装组件包括:普通压盘、台阶压盘、橡胶密封圈、螺杆及若干螺栓螺母。透明容器的安装方式如图3所示。钢质容器的安装方式与透明容器一致,仅将中间的透明圆筒和台阶压盘替换成图2(a)所示的钢质圆筒。

试验所用的传感器型号及主要参数如表1所示。

对充满水的透明和钢质两种容器分别进行破片撞击试验,每种容器射击5发。破片为直径9.5 mm的钨合金球,密度为17600 kg/m³,速度范围为600~1200 m/s,每发试验破片的速度间隔约为150 m/s。在其中一发透明容器的试验中($u_0 = 1196$ m/s),圆筒受液压力水锤作用而破坏,液体除了从容器前后面板的侵彻孔喷溅之外,还从容器侧壁面漏出,导致液体喷溅速度等试验结果的测量不准确,故剔除,最终得到4发有效的透明容器试验数据。



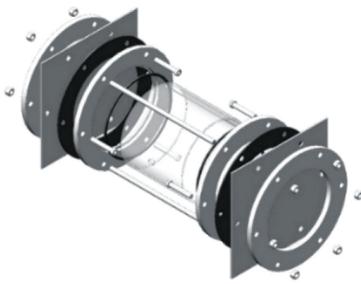
(a) 钢质圆筒
(a) Steel cylindrical container



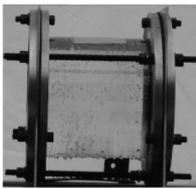
(b) 传感器孔及注水孔分布
(b) Positions of transducer installation holes and water injection hole

图 2 钢质圆筒设计及孔分布示意图

Fig. 2 Schematic of the design of steel cylindrical container and the distribution of holes



(a) 安装示意图
(a) Schematic of installation



(b) 安装实物图
(b) Actual installation

图 3 透明容器安装方式

Fig. 3 Installation of the transparent container

表 1 传感器型号及主要参数

Tab. 1 Type and inherent parameters of the transducers

参数	JF - YD - 205	JF - YD - 214
测量范围/MPa	0 ~ 30/0 ~ 60	0 ~ 200
灵敏度/ $\mu\text{C} \cdot \text{MPa}^{-1}$	100	30
频率响应/kHz	> 200	> 300
非线性/%	< 1	< 1
过载能力/%	120	110

2 试验结果及分析

2.1 液体喷溅与空腔形状变化的关系

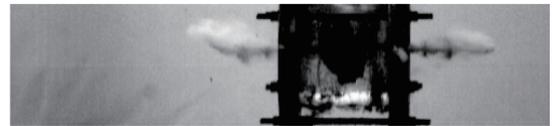
图 4 所示为高速破片侵彻透明容器的过程,其中,将高速摄像机记录到的破片撞击充液容器的前一帧设置为 0 时刻。破片撞击容器前面板时产生火光,在液体内受到阻滞力做减速运动,其尾部产生锥形空腔,并逐渐膨胀,当空腔膨胀至最大体积时,开始收缩进而迅速溃灭。在破片撞击透明容器的试验中,可以观察到多次空腔“膨胀—收缩—溃灭—再膨胀”的循环过程,该过程称为空腔振荡。在空腔振荡的不同阶段,液体从侵彻孔喷溅而出。液体内的空腔生长、收缩及第一次溃灭的过程如图 4(b) ~ (e) 所示,图 4(f) 和图 4(g) 为空腔溃灭与液体喷溅的对应照片。



(a) 0 μs (b) 334 μs (c) 501 μs



(d) 1 503 μs (e) 1 837 μs



(f) 2 672 μs



(g) 6 680 μs

图 4 破片侵彻透明容器及液体喷溅($u_0 = 988 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Process of fragment penetrated the transparent container and liquid spurt($u_0 = 988 \text{ m/s}$)

容器内空腔振荡与容器外液体喷溅的时间对应关系见表 2,一字线代表无喷溅发生。由于空腔溃灭的瞬间不一定能恰好被拍摄到,故表中空腔溃灭时刻为包含空腔溃灭瞬间的前后两帧对应时间的平均值。从表 2 中可以看出,空腔达到最大体积所需的时间约为 1 000 μs 。首次液体喷溅均发生在空腔生长至最大体积后的 400 ~ 700 μs 内,后续液体喷溅均发生在每次空

腔溃灭之后。每次液体喷溅与容器内空腔溃灭的时间差在 $0 \sim 2\ 600\ \mu\text{s}$ 内,且随着喷溅次数的增加,该时间差呈增大趋势。用首次喷溅与末

次喷溅发生的时间差代表整个喷溅阶段的持续时间,本试验中观察到的喷溅持续时间均大于 $5\ 000\ \mu\text{s}$ 。

表 2 空腔振荡与液体喷溅的时间关系

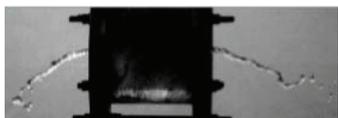
Tab. 2 Relationship of time between cavity oscillation and liquid spurt

撞击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	空腔状态	时刻/ μs	液体喷溅	时刻/ μs		时间差/ μs	
				前面板处	后面板处	前面板处	后面板处
641	体积最大	972	第一次喷溅	1 556	1 556	584	584
	第一次溃灭	2 167	第二次喷溅	4 389	4 389	2 222	2 222
	第二次溃灭	5 278	第三次喷溅	7 167	7 167	1 889	1 889
682	体积最大	1 001	第一次喷溅	1 688	1 625	687	624
	第一次溃灭	1 813	第二次喷溅	1 875	2 188	62	375
	第二次溃灭	3 563	第三次喷溅	3 813	4 063	250	500
	第三次溃灭	4 938	第四次喷溅	7 313	6 688	2 375	1 750
795	体积最大	1 028	第一次喷溅	1 444	1 444	416	416
	第一次溃灭	1 862	第二次喷溅	2 778	2 778	916	916
	第二次溃灭	5 639	第三次喷溅	—	8 056	—	2 417
988	体积最大	938	第一次喷溅	1 375	1 438	437	500
	第一次溃灭	1 969	第二次喷溅	2 188	2 188	219	219
	第二次溃灭	2 344	第三次喷溅	2 625	2 625	281	281
	第三次溃灭	3 625	第四次喷溅	3 687	3 875	63	250
	第四次溃灭	4 625	第五次喷溅	7 188	7 188	2 563	2 563

当最后一股以雾化状态喷出的液体离开容器后,观察到一段不发生液体喷溅的平稳期,持续时间为几毫秒到十几毫秒不等。其间,容器内的空腔不再振荡,可在高速摄像机的图像中观察到絮状的阴影,如图 5(a)所示。平稳期过后,容器内液体受静水压力及液体自身重力作用,从侵彻孔以柱状或大体积团状的形态逐渐流出,如图 5(b)所示。



(a) 平稳期
(a) Stable period



(b) 稳定流动
(b) Steady flow

图 5 无液体喷溅阶段

Fig. 5 Without liquid spurt phase

2.2 喷溅液体的形状特性

在不同速度破片撞击钢质容器的试验中,前后面板处的液体喷溅形态分别如图 6 和图 7 所示。为更清晰地展现液体喷溅及其雾化形态随时间的变化,以观察到液体喷溅后的第 4 帧为起始,每间隔 5 帧($1\ 220\ \mu\text{s}$)取一幅图像进行比较。可以看出,不同时刻喷出的液体具有不同的形状特性:第一股喷溅出的液体头部呈箭状,后续一股或几股喷溅液体的头部呈伞状并拖拽一条线状液柱。喷溅出的液体在向前运动过程中逐渐雾化。

2.3 容器内液体压力及侵彻孔形状对液体喷溅初始速度的影响

破片撞击钢质容器的详细试验结果如表 3 所示,表中列出了每发试验所测得的液体内部压力峰值、前后面板的侵彻孔形状以及液体喷溅的初始速度。可以看出,液体内部压力峰值随破片速度的增加而上升;前面板处液体喷溅的初始速度高于后面板处。

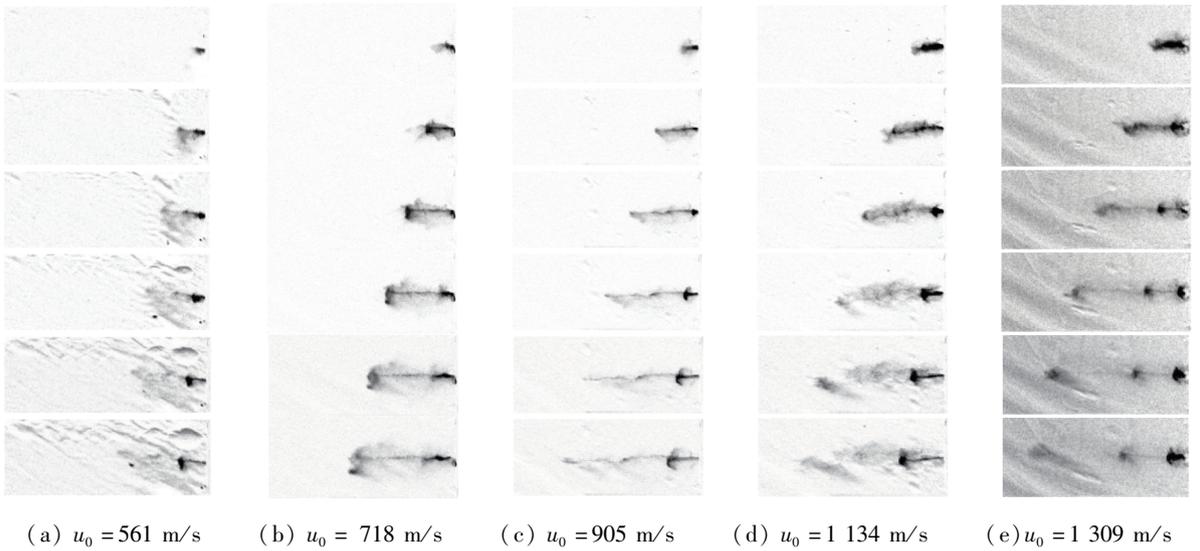


图 6 由前面板侵彻孔喷溅出的液体

Fig.6 Liquid spurt at the penetration orifice of front panel

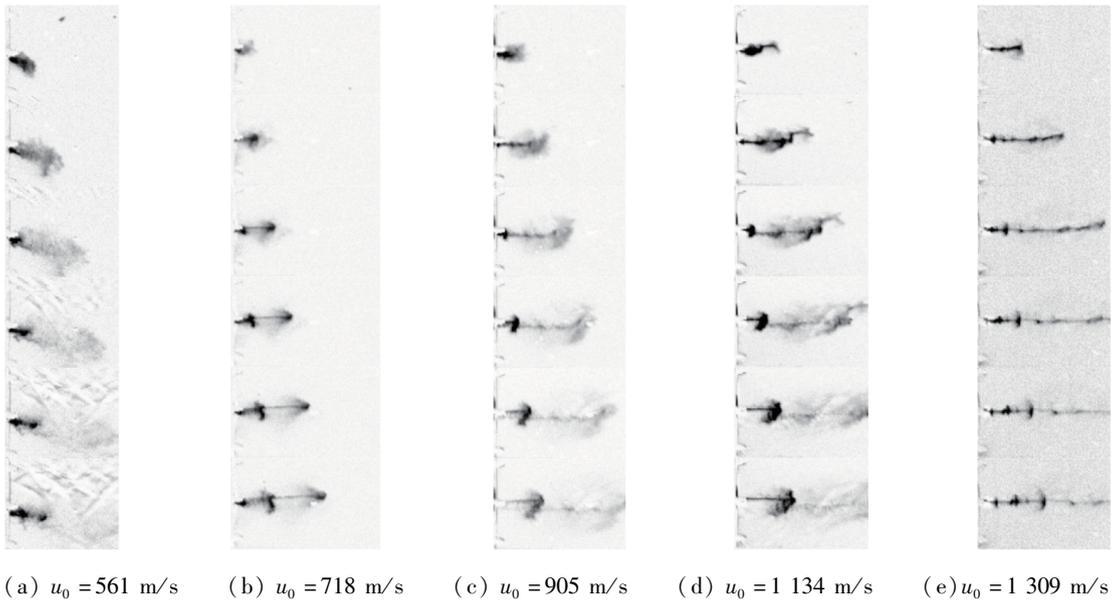


图 7 由后面板侵彻孔喷溅出的液体

Fig.7 Liquid spurt at the penetration orifice of back panel

从表 3 可以看出,前面板侵彻孔的形状特征较一致,即圆形穿孔的边缘呈翻卷状;后面板侵彻孔较前面板呈现更严重的变形,在本次试验中,共观察到 3 种典型特征:

- 1) 侵彻孔边缘呈锯齿状撕裂并带有延伸性裂纹;
- 2) 侵彻孔边缘材料拉伸后呈花瓣状外翻;
- 3) 侵彻孔边缘材料轴向拉伸。

由试验结果可知,喷溅液体的初始速度并不随破片撞击速度或液体内压力的变化而单调改变,这是因为不规则的侵彻孔形状会对液体的流动产生影响,从而改变喷溅液体的速度和形状。

定义一个无量纲的相对喷溅初始速度 c , 其值为液体喷溅的初始速度 v_s 除以破片撞击速度 u_0 , 即 $c = v_s / u_0$, 该无量纲参数与破片撞击速度的关系如图 8 所示。 c_{front} 和 c_{back} 分别代表前、后面板处液体的相对喷溅初始速度。

经拟合,前后面板侵彻孔口液体喷溅的相对初始速度服从以下规律:

$$c_{front} = 0.056 + \frac{53.941}{u_0 - 195.628} \quad (1)$$

$$c_{back} = 0.053 + \frac{44.722}{u_0 - 247.485} \quad (2)$$

由试验结果可以看出,当破片的撞击速度在 561 ~ 1 309 m/s 的范围内变化时,前后面板处喷

表 3 容器内的压力峰值、侵彻孔形状与容器外喷溅液体的初始速度

Tab.3 The pressure peak, shape of the penetration orifices and the initial velocity of liquid spurt

撞击速度/ $m \cdot s^{-1}$	峰值压力/ MPa	前面板		后面板	
		侵彻孔形状	喷溅初始速度/ $m \cdot s^{-1}$	侵彻孔形状	喷溅初始速度/ $m \cdot s^{-1}$
561	10.95		114.8		110.39
718	16.00		111.41		100.77
905	19.96		128.32		117.74
1 134	43.94		117.97		117.74
1 309	107.57		142.39		118.79

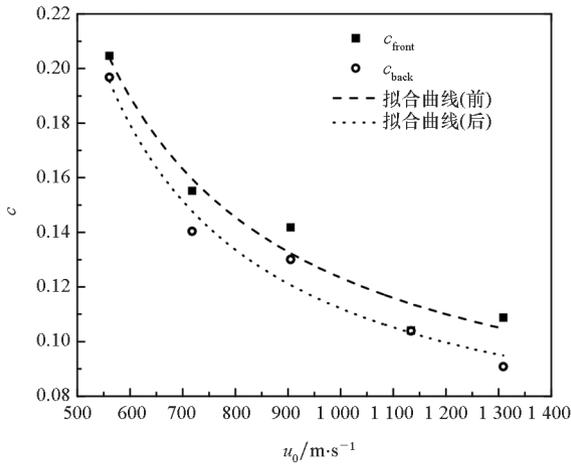


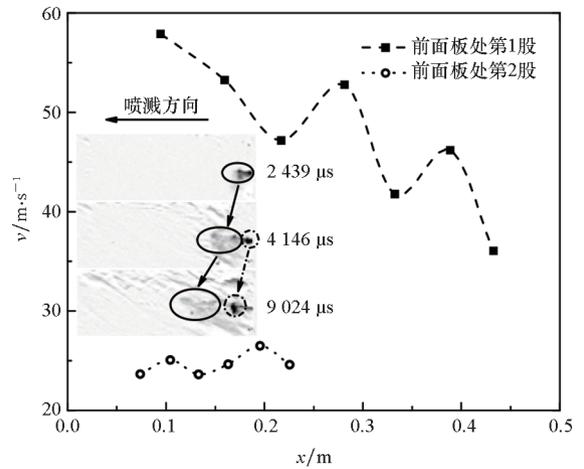
图 8 相对喷溅速度与破片撞击速度的关系曲线

Fig. 8 Fitting curves of relative velocity of the liquid spurt versus impact velocity of the fragment

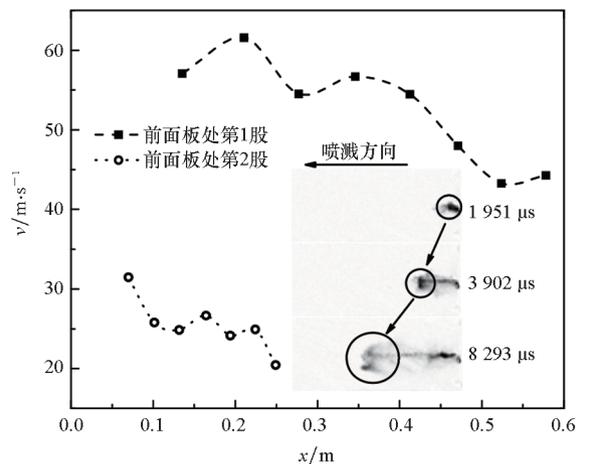
溅液体的初始速度分别在 111.41 ~ 142.39 m/s 和 100.77 ~ 118.79 m/s 的范围内变化,且二者不呈单调关系。由文献[31]的研究结果得知,可能导致该现象的原因是:当破片的撞击速度越低时,破片撞击面板所产生侵彻孔的边缘粗糙或产生裂纹的可能性越高,而粗糙的孔壁和横截面较小的裂纹可能导致液体在孔口的流速增加;较高速度的破片撞击面板所产生的侵彻孔可能相对低速破片的侵彻孔更加光滑。直观体现为喷溅液体的初始速度并不随破片撞击速度的增加而明显增大。由拟合结果可以看出,相对喷溅初始速度随破片撞击速度的增加呈反比例下降趋势。

2.4 喷溅液体的速度衰减特性

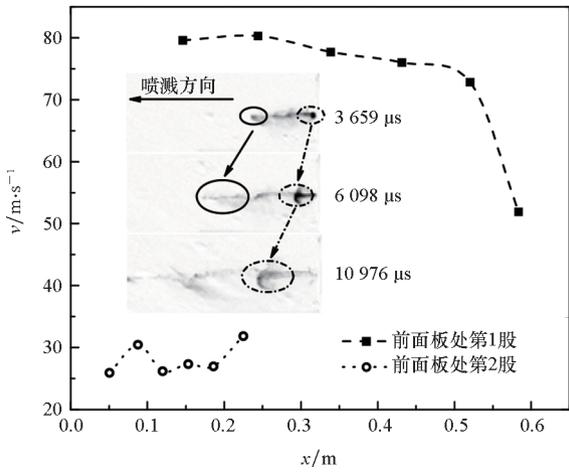
图 9 和图 10 为液体喷溅速度随位移的变化



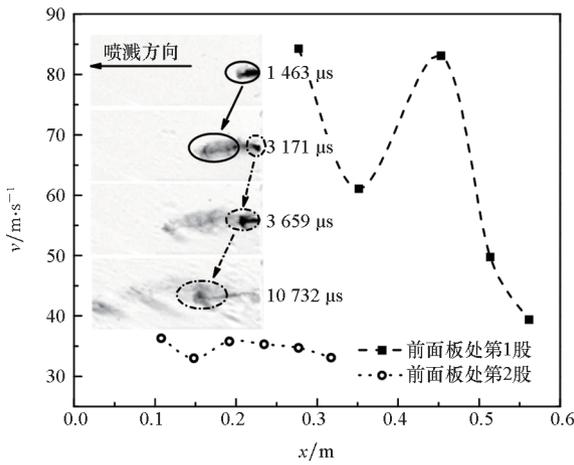
(a) $u_0 = 561 \text{ m/s}$



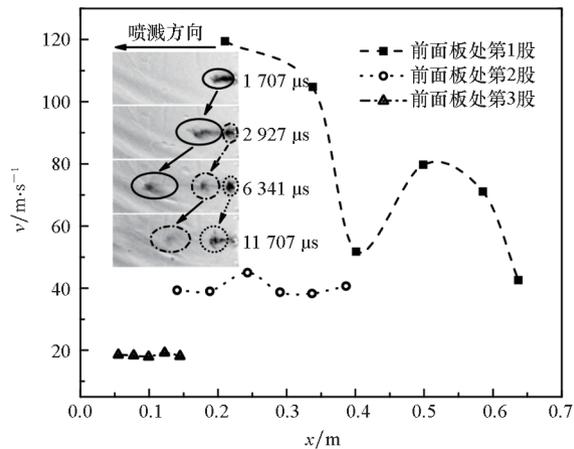
(b) $u_0 = 718 \text{ m/s}$



(c) $u_0 = 905 \text{ m/s}$



(d) $u_0 = 1 134 \text{ m/s}$

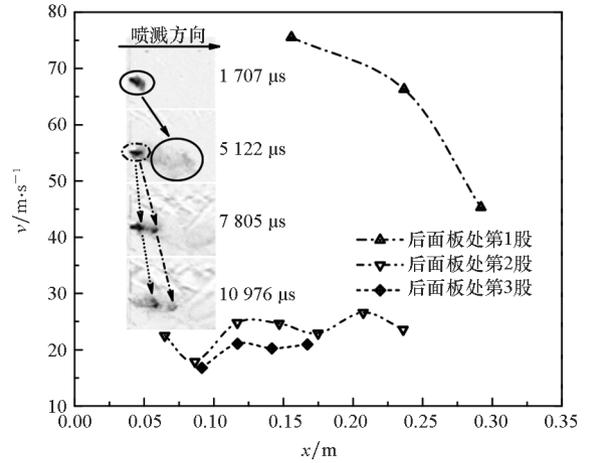


(e) $u_0 = 1 309 \text{ m/s}$

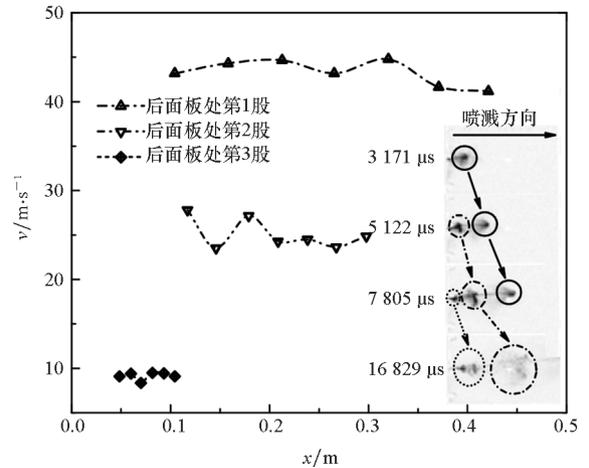
图 9 前面板的液体喷溅速度随位移的变化
Fig. 9 Velocity of liquid spurt versus displacement of front panel

规律。可以发现,液体喷溅速度随着喷溅次数的增加而下降,且单次喷出的液体在运动过程中存在速度波动的情况。在液体离开容器运动的过程中可以明显观察到液体出现了雾化,但影响速度波动的具体原因尚不明确。

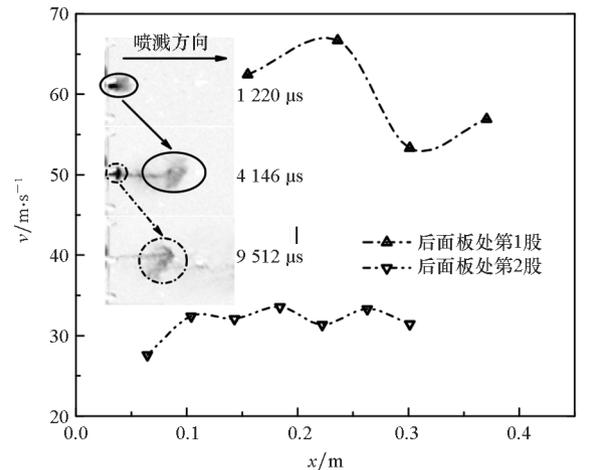
在本次试验中,第一阶段的喷溅液体在离开容器 0.2 ~ 0.4 m 后其速度发生回升,第二阶段的第一股喷溅液体在离开容器 0.05 ~ 0.1 m 后其速度发生回升。如图 9 和图 10 (a)、图 10 (b) 和图 10 (e) 所示,第三、四次液体喷溅的速度回升时,其运动距离相比前两次更小,即随着喷溅次数的增加,喷溅液体发生速度回升的位置逐渐接近侵入孔。



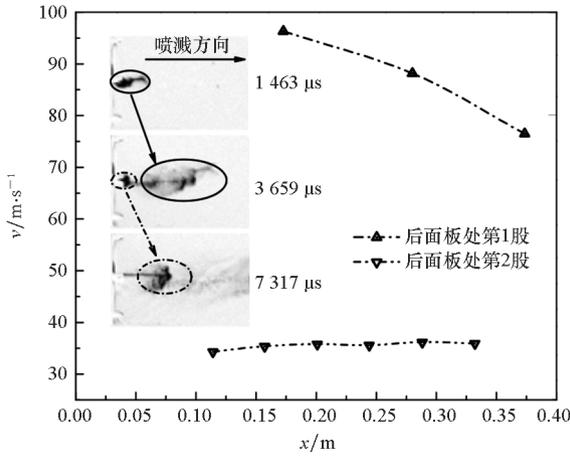
(a) $u_0 = 561 \text{ m/s}$



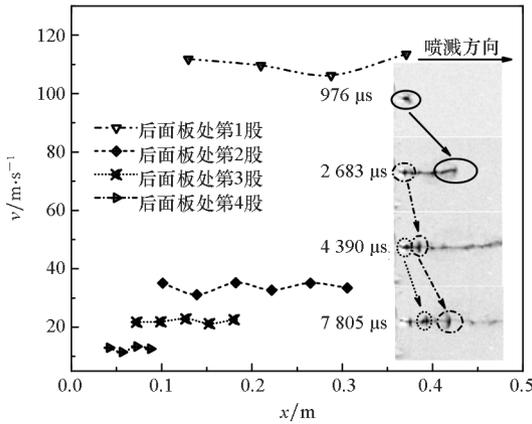
(b) $u_0 = 718 \text{ m/s}$



(c) $u_0 = 905 \text{ m/s}$



(d) $u_0 = 1\ 134\ \text{m/s}$



(e) $u_0 = 1\ 309\ \text{m/s}$

图10 后面板的液体喷溅速度随位移的变化

Fig. 10 Velocity of liquid spurt versus displacement of back panel

比较单次试验相同位置处的液体喷溅速度,得到表4所示的速度衰减率。在本次试验中,前后面板处的平均速度衰减率分别为60.39%和58.28%。

表4 喷溅液体的头部平均速度及速度衰减率

Tab.4 Average velocity of the liquid spurt and velocity attenuation rate

破片速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	喷溅方向	位移/ m	喷溅速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		速度衰减率/%
			第一次	第二次	
561	向前	0.16	53.24	24.65	53.70
	向后	0.16	75.51	24.66	67.34
718	向前	0.13	57.07	24.86	56.44
	向后	0.13	43.74	23.51	46.25
905	向前	0.15	79.57	27.33	65.65
	向后	0.15	62.45	32.08	48.63
1 134	向前	0.28	84.26	34.71	58.80
	向后	0.28	88.14	36.15	58.99
1 309	向前	0.21	119.43	38.98	67.36
	向后	0.21	109.64	32.67	70.20

3 结论

针对液口水锤效应引起液体喷溅的问题,本文设计了一套试验装置,开展了高速破片撞击充液容器的试验,研究了空腔形状变化与液体喷溅的对应关系、喷溅液体的速度及形状特性、液体内压力及侵彻孔形状对液体喷溅特性的影响,得到以下结论:

1) 高速破片撞击充液容器引起的液体喷溅呈现两个特性不同的阶段,第一个阶段发生在容器内空腔达到最大体积之后的400~700 μs内,喷溅液体的速度较高,液体头部呈箭状;第二个阶段发生在每次空腔溃灭之后,该阶段出现多次形态相似的液体喷溅,喷溅液体具有伞状头部和线状尾部。当最后一股喷雾形式的液体喷出后,存在一段不发生液体喷溅的平稳期,持续时间为几毫秒到十几毫秒不等。

2) 液体喷溅的相对初始速度与破片的撞击速度成反比,且前面板侵彻孔处的喷溅初始速度均高于后面板侵彻孔处的喷溅初始速度。

3) 喷溅液体在运动过程中存在速度波动的情况,且随着喷溅次数的增加,速度回升出现的位置逐渐接近侵彻孔。液体喷溅速度随喷溅次数的增加而下降,在本次试验中,前、后面板处喷溅液体的平均速度衰减率分别为60.39%和58.28%。

参考文献 (References)

[1] 纪杨子焱,李向东,周兰伟,等. 高速破片撞击充液容器形成液口水锤的试验研究[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(3): 70-76.
JI Yangziyi, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Experimental study on hydrodynamic ram generated by high velocity fragment impacting fluid-filled container[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(3): 70-76. (in Chinese)

[2] 马丽英,李向东,周兰伟,等. 高速破片撞击充液容器拖拽阶段气腔特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1412-1418.
MA Liying, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Characteristics of dragging period cavity formation in liquid filling container by fragment impacting[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1412-1418. (in Chinese)

[3] 纪杨子焱,李向东,周兰伟,等. 高速破片撞击充液容器拖拽阶段气腔特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1412-1418.
JI Y, LI X D, ZHOU L W, et al. Experimental and numerical study on the cumulative damage of water-filled containers impacted by two projectiles [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 135: 45-64.

[4] 蓝肖颖,李向东,周兰伟,等. 双破片撞击充液容器时液体内压力分布研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 191-197.
LAN Xiaoying, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Pressure distribution inside liquid during a liquid-filled vessel impacted by double-fragment [J]. Journal of Vibration and Shock,

- 2019, 38(19): 191 - 197. (in Chinese)
- [5] 纪杨子燚, 李向东, 周兰伟, 等. 高速侵彻体撞击充液容器形成的液压水锤效应研究进展[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 242 - 252.
JI Yangziyi, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Review of study on hydrodynamic ram effect generated due to high-velocity penetrator impacting fluid-filled container [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 242 - 252. (in Chinese)
- [6] 马丽英, 李向东, 周兰伟, 等. 高速破片撞击充液容器时容器壁面的损伤[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 56 - 67.
MA Liying, LI Xiangdong, ZHOU Lanwei, et al. Study on wall damage of vessel in high-speed fragment impact liquid-filled vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2): 56 - 67. (in Chinese)
- [7] 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(1/2/3): 635 - 643.
- [8] BALL R E. Aircraft fuel tank vulnerability to hydraulic ram; modification of the Northrop finite element, computer code BR - 1 to include fluid-structure interaction; theory and user's manual for BR - 1HR [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1974.
- [9] LEE M, LONGORIA R G, WILSON D E. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540 - 550.
- [10] LEE M. Water-entry induced cavity pressure [J]. KSME International Journal, 2000, 14(5): 562 - 568.
- [11] 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.
GUO Zitao. Research on characteristics of projectile water entry and ballistic resistance of targets under different mediums [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] FOUREST T, LAURENS J M, DELETOMBE E, et al. Analysis of bubbles dynamics created by hydrodynamic ram in confined geometries using the Rayleigh-Plesset equation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 73: 66 - 74.
- [13] POWER H L. FY 74 experimental hydraulic ram studies[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1974.
- [14] BLESS S J, FRY P F, BARBER J P, et al. Studies of hydrodynamic ram induced by high velocity spherical fragment simulators [R]. Dayton: Ohio Institute of University of Dayton, 1977.
- [15] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Experimental study of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2011, 93(10): 2598 - 2609.
- [16] ZHANG W, REN P, HUANG W, et al. Experimental and numerical study of water-filled vessel impacted by flat projectiles[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 500(11): 112054.
- [17] 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.
- [18] ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, PERNAS-SÁNCHEZ J, et al. Experimental analysis of an attenuation method for hydrodynamic ram effects [J]. Materials & Design, 2018, 155: 451 - 462.
- [19] REN P, ZHOU J Q, TIAN A, et al. Experimental investigation on dynamic failure of water-filled vessel subjected to projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 117: 153 - 163.
- [20] Jr, ANDERSON C E, SHARRON T R, WALKER J D, et al. Simulation and analysis of a 23 - mm HEI projectile hydrodynamic ram experiment [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9/10): 981 - 997.
- [21] 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.
- [22] YANG K R. Simulation of hydrodynamic ram phenomenon using MSC Dytran [R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
- [23] FOUREST T, DELETOMBE E, FAUCHER V, et al. Comparison of Keller-Miksis model and finite element bubble dynamics simulations in a confined medium. Application to the hydrodynamic ram [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2018, 68: 66 - 75.
- [24] VARAS D, ZAERA R, LÓPEZ-PUENTE J. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to hydrodynamic ram [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 19 - 28.
- [25] KIMSEY K D. Numerical simulation of hydrodynamic ram [R]. Maryland: Army Ballistic Research Laboratory, 1980.
- [26] MARTIN A. Simulation of hydrodynamic ram during impact of fluid-filled tank using SPH [D]. Cranfield: Cranfield University, 2011.
- [27] LINGENFELTER A J, LIU D. Development for orifice entrainment velocity characterization during a hydrodynamic ram event [C]//Proceedings of the 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2016.
- [28] LINGENFELTER A J, LIU D, REEDER M F, et al. Synchronized imagery assessment of hydrodynamic ram cavity features to transient spray [J]. Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2016, 23(3/4): 171 - 192.
- [29] DISIMILE P J, DAVIS J M, PYLES J M. Qualitative assessment of a transient spray caused by a hydrodynamic ram event [J]. Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2007, 14(3): 287 - 303.
- [30] DISIMILE P J, TOY N. Liquid spurt caused by hydrodynamic ram [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 65 - 74.
- [31] CHEN A R, LI X D, ZHOU L W, et al. Experimental study on the characteristics of liquid spurt caused by hydrodynamic ram [C]//Proceedings of the 31st International Symposium on Ballistics, 2019.