

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.006

悬挂式矩形水墙对爆炸冲击波削减效果的实验研究*

张波涛^① 岳亚军^② 姜林^②

①中国兵器工业集团江山重工研究院有限公司(湖北襄阳,441100)

②南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

[摘要] 为探究开放空间中水对爆炸冲击波的削减效果,基于水平激波管搭建了冲击波与悬挂式矩形水墙相互作用的实验平台,在水墙近场位置开展了8组实验。利用高速纹影测试系统记录冲击波与水墙的相互作用过程,并研究水墙厚度对水墙破碎效果以及运动速度的影响。利用压力测试系统记录水墙后方的压力变化,并结合高速纹影测试结果进行分析。结果表明:水墙后方的压力变化与冲击波的反射、透射以及绕射现象无关,主要取决于水墙产生的冲击作用;动量提取为悬挂式矩形水墙的主要减爆机制;水墙对冲击波峰值压力具有明显的削减效果,且随着水墙厚度的减小,对峰值压力的削减效果逐渐增加;水墙对峰值冲量的削减效果并不明显。

[关键词] 悬挂式矩形水墙;爆炸冲击波;水墙厚度;削减效果

[分类号] O383

Experimental Study on the Reduction Effect of Suspended Rectangular Water Walls on Explosion Shock Waves

ZHANG Botao^①, YUE Yajun^②, JIANG Lin^②

①Jiangshan Heavy Industry Research Institute Co., Ltd, China North Industries Group (Hubei Xiangyang, 441100)

②School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To investigate the reduction effect of water on explosion shock waves in open spaces, an experimental platform was constructed based on a horizontal shock tube for the interaction between shock waves and suspended rectangular water walls. Eight sets of experiments were conducted at the near-field position of the water wall. The process of interaction between shock waves and water walls was recorded using a high-speed schlieren testing system, and the influence of water wall thickness on wall fragmentation and velocity was investigated. A pressure testing system was used to record the pressure changes behind the water wall, and the results were analyzed in conjunction with the high-speed schlieren imaging data. The results show that the pressure changes behind the water wall are not related to the reflection, transmission, and diffraction phenomena of shock waves, but mainly depend on the impact effect generated by the water wall. Momentum extraction is the main explosion reduction mechanism for suspended rectangular water walls. The water wall has a significant reduction effect on the peak pressure of the shock wave, and as the thickness of the water wall decreases, the reduction effect on the peak pressure gradually increases. However, the reduction effect on the peak impulse is not significant.

[KEYWORDS] suspended rectangular water wall; explosion shock wave; thickness of water wall; reduction effect

0 引言

爆炸产生的冲击波对建筑物和民用基础设施构成了巨大威胁^[1-3]。为了减轻爆炸产生的危害,必须制定有效的防爆措施。在爆炸物周围设置悬挂式矩形水墙是一种潜在方法。主要原因是水的价格低

廉、来源广泛;并且相关研究表明,水介质能够减轻爆炸产生的冲击效果^[4-6]。

水介质有细水雾、水幕(水帘)、水体墙以及悬挂式水墙等多种使用形态,它们的削波减爆机制与水介质的使用形态相关。细水雾通过动能、破碎能、显热、潜热(蒸发)4种方式吸收爆炸产生的能量,其中,潜热吸能是细水雾削减爆炸冲击波的主要机

* 收稿日期:2023-07-12

第一作者:张波涛(1977—),男,研究员,主要从事爆炸力学和冲击动力学相关的研究。E-mail:zbt1022023@163.com

通信作者:姜林(1990—),男,博士,副教授,主要从事铝热剂燃烧和爆炸力学相关的研究。E-mail:lijiang@njust.edu.cn

制^[7-10]。Willauer等^[7]在密闭舱室中开展了细水雾对高能炸药TNT和Destex爆炸抑制效果的实验。结果表明:细水雾使TNT和Destex的冲量、峰值压力和准静态压力分别降低了40%、36%、35%和43%、25%、33%。陈鹏宇等^[8]在舰舱的缩比模型中开展了细水雾减爆实验研究,对比分析了有水雾和无水雾工况下13.5 g和27.5 g TNT舱内爆炸典型位置的峰值压力和准静态压力。结果表明:水雾的存在对舱内爆炸载荷的峰值压力和准静态压力均有明显的削弱效果。水幕(水帘)是指以一定的速度向特定方向运动的超过一定密度的一群液滴^[11],其减爆机制与细水雾相同。李钰阳^[11]和胡洋等^[12]开展了水幕衰减爆炸冲击波的数值仿真研究。结果表明:水幕对爆炸冲击波峰值压力和温度均有明显的减弱效果。然而,使用细水雾、水幕(水帘)抑爆技术时需要综合考虑各种因素,要保证喷出的液滴既能有效抑制爆炸威力,又不能对结构设施造成二次损害^[10],这在工程应用中具有较大难度。

水体墙是以水为主体,并用各种形式的容器储存、构建而成的防爆墙。与刚性墙不同的是,水体墙在爆炸中被破坏,因为爆炸波的部分能量被转化为水的动能,这种现象被称为动量提取。由于加载的时间尺度太小,水没有足够的时间进行分解和蒸发,动量提取和冲击波的反射、绕射被认为是水体墙主要的减爆机制^[13-16]。Zhang等^[13]使用装满水的矩形塑料容器开展了水体墙减爆实验。研究发现:水体墙能够有效削减冲击波峰值压力,并且削减效果与Zhou等^[17]采用刚性墙数值仿真计算出的结果非常接近。这一发现表明,水体墙的主要削减机制类似于刚性墙,可以反射、绕射以及偏转爆炸冲击波。Bornstein等^[15]进行了一系列小规模爆炸实验,以评估水体墙对装甲车的防护效果。研究发现,水体墙可以有效地减轻钢板变形。此外,Bornstein等^[15]认为,水体墙的主要减爆机制是动量提取。

目前,对于悬挂式矩形水墙的研究非常有限。悬挂式矩形水墙通常放置在爆炸物的一侧,并与爆炸物保持一定的距离,从而减轻水墙后方的爆炸载荷。Zakrajsek等^[4]开展了水体墙以及悬挂式水墙对爆炸冲击波削减效果的实验。研究发现:水体墙和悬挂式水墙对峰值压力的削减均达到40%以上;其中,设置悬挂式水墙时,峰值压力的削减效果最佳,可达到81%。Son等^[5]利用爆轰激波管研究了3 mm厚的悬挂式水墙对冲击波的衰减效果,发现设置水墙时爆炸冲击波峰值压力和冲量分别降低了82%和75%。然而,在上述的研究中,并没有关于

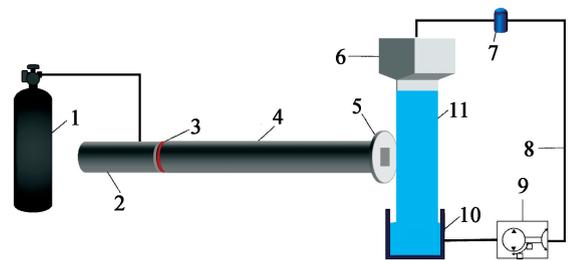
悬挂式矩形水墙减爆机制的研究。由于测量和观察的困难,目前尚不清楚悬挂式矩形水墙近场位置爆炸冲击波与水墙的相互作用过程,且未能对水墙后方的压力时程曲线进行详细解释。

基于水平激波管搭建了冲击波与悬挂式矩形水墙相互作用的实验平台,开展了马赫数 $Ma = 1.44$ 和 $Ma = 1.92$ 的入射冲击波分别与2、4 mm和6 mm厚的水墙相互作用的实验。通过高速纹影测试系统记录冲击波作用下水墙的运动过程,研究水墙厚度对水墙破碎效果以及运动速度的影响。通过压力测试系统记录水墙后方的压力变化,并结合纹影图对压力-时间曲线进行详细分析。最后,量化水墙厚度对冲击波峰值压力和峰值冲量的削减效果。以期为悬挂式矩形水墙防爆系统的设计提供参考。

1 实验设计

1.1 实验平台

采用长度5.2 m、内径60 mm的水平激波管。实验平台主要由冲击波发生系统和矩形水墙生成系统组成,如图1所示。



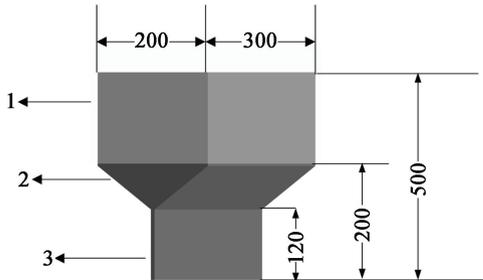
1 - 高压气瓶;2 - 高压段;3 - 膜片;4 - 低压段;
5 - 法兰盘;6 - 矩形水墙发生装置;7 - 过滤器;
8 - 水管;9 - 水泵;10 - 水箱;11 - 水墙。

图1 冲击波与悬挂式矩形水墙相互作用的实验平台
Fig. 1 Experimental platform for interaction between shock waves and suspended rectangular water walls

冲击波发生系统主要包括高压气瓶、水平激波管和膜片。激波管由高压段(长1.3 m)和低压段(长3.9 m)组成。通过膜片将高压段和低压段分割开来。高压气瓶为高压段提供高压驱动力,当高压段的压力超过膜片的极限时,膜片就会破裂成孔,同时生成的冲击波会向低压段传播。水墙生成系统由水墙发生装置、蓄水箱、水泵、过滤器和水管等组成,可以生成连续不断的悬挂式矩形水墙。

图2为水墙发生装置,主要材质为玻璃钢和304不锈钢,总体尺寸200 mm × 300 mm × 500 mm,

壁厚 2 mm。水墙发生装置包括盛水箱、漏斗和导流板 3 个部分,在漏斗出口处加装 120 mm 长的导流板,能够将湍流转换为层流。水墙宽度约 280 mm,距激波管口约 60 mm。通过改变导流板间距可以改变水墙厚度 T 。图 3 为生成的悬挂式矩形水墙。



1 - 盛水箱; 2 - 漏斗; 3 - 导流板。

图 2 矩形水墙发生装置(单位:mm)

Fig. 2 Rectangular water wall generator (Unit: mm)



(a) 侧面

(b) 正面

图 3 悬挂式矩形水墙(单位:mm)

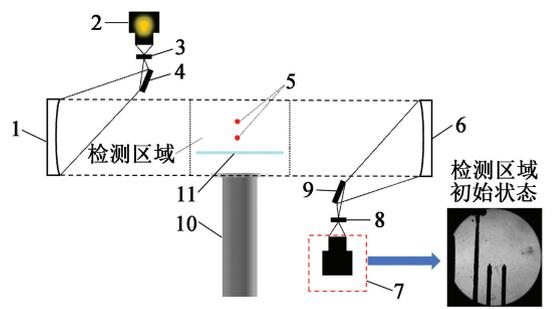
Fig. 3 Suspended rectangular water wall (Unit: mm)

1.2 测试系统

高速纹影测试系统由激光光源、光源狭缝、刀口、反射镜以及高速摄影机等组成,系统布局如图 4 所示。采用日本 Photorn 公司生产的 Fastcam Mini AX200 型高速摄影机,参数见表 1。两个主反射镜 M_1 与 M_2 之间的距离为 5 m,主反射镜焦距为 300 mm。激光光源通过 3 mm 的狭缝和反射镜后,在 M_1 和 M_2 之间形成平行光; M_2 通过反射镜聚焦于刀口;最后,通过高速摄影机记录检测区域的图像。

压力测试系统主要由压力传感器、信号放大器、数据采集器、计算机和配套的信号电缆组成,系统布局如图 5 所示。

受水墙附近的空限制,典型的铅笔式压力传感器不能在不破坏水面流动的情况下使用。美国 PCB 公司的 113B21 系列的压电式压力传感器测得的压力接近铅笔式压力传感器^[4]。因此,使用此类型的压电式压力传感器代替铅笔式压力传感器。压力传感器 PT1、PT2 分别布置在距离激波管出口 800



1 - 主反射镜 M_1 ; 2 - 激光光源; 3 - 光源狭缝; 4 - 反射镜; 5 - 压力传感器; 6 - 主反射镜 M_2 ; 7 - 高速摄影机; 8 - 刀口; 9 - 反射镜; 10 - 激波管; 11 - 矩形水墙。

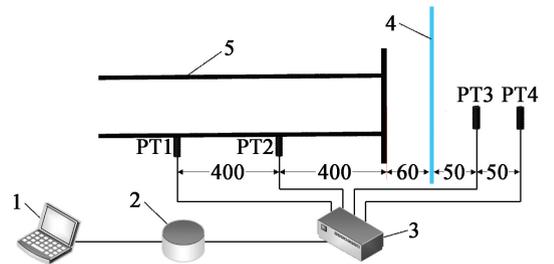
图 4 高速纹影测试系统

Fig. 4 High-speed schlieren system

表 1 高速摄影机参数

Tab. 1 Parameters of the high-speed camera

分辨率	曝光时间/ s	快门速率/ s	帧速率/ (帧 · s ⁻¹)
640 × 480	0.000 01	1/900 000	20 000



1 - 计算器; 2 - 数据采集器; 3 - 信号放大器; 4 - 矩形水墙; 5 - 激波管。

图 5 压力测试系统(单位:mm)

Fig. 5 Pressure testing system (Unit: mm)

mm 和 400 mm 处,用于确定入射冲击波马赫数。采用 1.6 mm 厚的硬纸膜和 1.5 mm 厚的 PET 聚酯薄膜可获得相应马赫数的入射冲击波^[18],详细参数见表 2。压力传感器 PT3、PT4 分别布置在激波管正前方 110 mm 和 160 mm 处,即水墙后方 50 mm 和 100 mm 处,用于测量水墙后方的压力。采用江苏联能技术有限公司的 YE5859 型信号放大器;荷兰 TiePie 公司的 HS6 型数据采集器,选用 1 MHz 的采样频

表 2 冲击波马赫数

Tab. 2 Mach number of shock waves

膜片材料	冲击波速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	入射冲击波 马赫数 Ma
硬纸膜	490	1.44
PET 聚酯薄膜	653	1.92

率。采集到的信号使用计算机保存。

1.3 实验方案

共开展了8组实验,包括2组空白实验($T=0$ mm)和6组正式实验,实验工况见表3。

表3 实验工况

Tab.3 Experimental conditions

工况	Ma	T/mm
1 [#]	1.44	0
2 [#]	1.92	0
3 [#]	1.44	2
4 [#]	1.44	4
5 [#]	1.44	6
6 [#]	1.92	2
7 [#]	1.92	4
8 [#]	1.92	6

2 结果与分析

2.1 空白实验

图6为无水墙时高速摄影机拍摄的冲击波($Ma=1.92$)传播过程纹影图。为了便于记录,规定冲击波刚到达激波管口时为0 ms。图6中:当 $t=0$ ms时,到达激波管口的冲击波为平面波,且波阵面较为平整;但在靠近激波管管壁处,冲击波的波阵面具有一定的弧度,这是因为冲击波离开激波管口时发生了衍射。随着时间的推移,衍射效果越来越明显,弧形冲击波的占比也越来越大。在 $t=0.05$ ms时,波阵面的形状已经完全变成弧形。同时,靠近激

波管口处观察到涡环。涡环是冲击波后高速气流在激波管口处分离并卷起产生的。当 t 为0.10~0.40 ms时,冲击波持续向右侧扩散,最后超出视场范围。

图7为无水墙时测点PT3和PT4的压力-时间曲线。可以看出,该曲线为典型的冲击波超压曲线。为了便于比较,将各工况的时间数据进行偏移,使时间原点为测点PT3压力开始上升时刻。

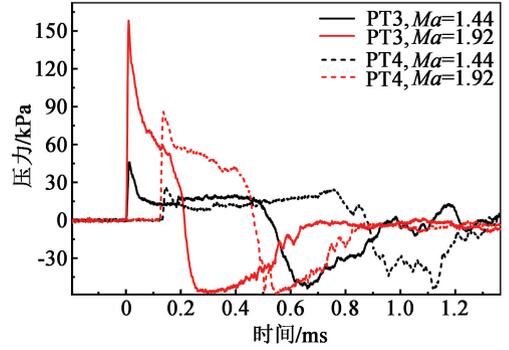


图7 无水墙时不同测点的压力-时间曲线

Fig.7 Pressure-time curves at different measuring points without water wall

由图7可得到无水墙时测点PT3和PT4处的峰值压力,并利用式(1)^[1]计算得到对应的峰值冲量,结果如表4所示。

$$I = \int_{t_0}^t \Delta p(t) dt. \quad (1)$$

式中: I 为冲击波的冲量; t 为正压作用时间; $p(t)$ 为冲击波压力随时间变化的函数。

2.2 冲击波与矩形水墙的相互作用

2.2.1 水墙运动过程分析

图8为 $Ma=1.92$ 的入射冲击波与厚度 $T=2$ mm

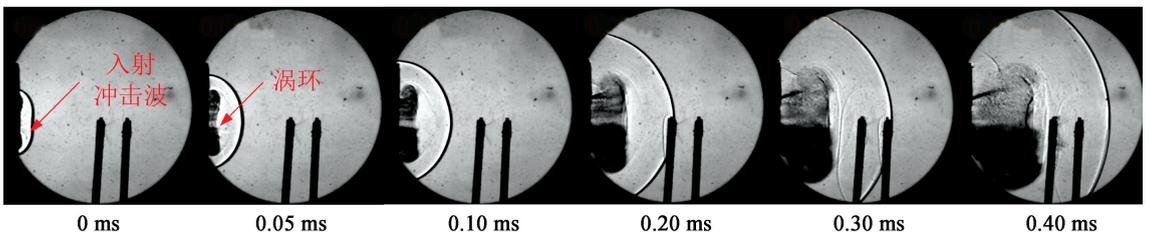


图6 无水墙时冲击波传播过程纹影图($Ma=1.92$)

Fig.6 Schlieren images of shock wave propagation without water wall ($Ma=1.92$)

表4 无水墙时测点PT3和PT4的峰值压力和峰值冲量

Tab.4 Peak pressure and peak impulse at measurement points PT3 and PT4 without water wall

马赫数	PT3			PT4		
	峰值压力/ kPa	压力作用时间/ ms	峰值冲量/ (kPa·ms)	峰值压力/ kPa	压力作用时间/ ms	峰值冲量/ (kPa·ms)
1.44	46.02	0~0.528	8.81	26.69	0.132~0.877	10.48
1.92	158.18	0~0.213	14.09	87.98	0.124~0.467	16.30

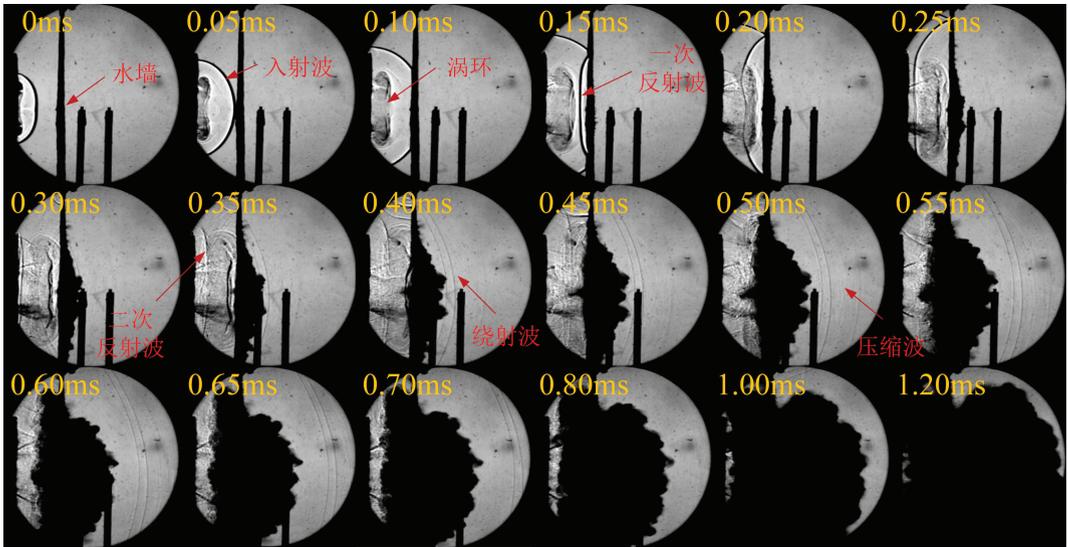


图 8 冲击波与水墙相互作用的纹影图 ($Ma = 1.92, T = 2 \text{ mm}$)

Fig. 8 Schlieren images of the interaction between shock wave and water wall ($Ma = 1.92, T = 2 \text{ mm}$)

的矩形水墙相互作用的纹影照片。高速摄影机的拍摄画面为二维投影图像。通过对图像进行分析和处理,可以获得水墙在投影平面的位移曲线,如图 9 所示。

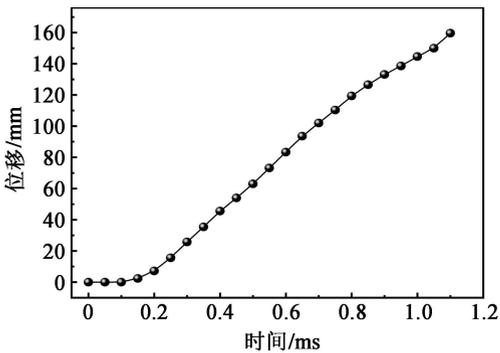


图 9 冲击波与水墙相互作用的位移曲线

Fig. 9 Displacement curve of the interaction between the shock wave and the water wall

结合图 8 和图 9 进行分析。可以看出,冲击波作用下水墙运动过程可以分为以下 4 个阶段:

1) 初始运动阶段,即 0 ~ 0.10 ms。0.05 ms 时,冲击波的演变过程与无水墙时一致。0.10 ms 时,入射冲击波到达界面 I (由空气传播到水墙),并在水墙内部产生了一个微弱的透射波。由于水墙相对较薄、透射波强度较弱,照片并未在水墙内部显示出透射波。此过程中,水墙的运动形态并未发生变化。

2) 加速运动阶段,即 0.10 ~ 0.25 ms。0.15 ms 时,产生向管口方向运动的反射波,这是阻抗失配引起的,空气的声阻抗 $414 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 比水的声阻抗 $1.5 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 低几个数量级,冲击波的能量只有一小部分被传输到水墙中,大部分被水墙反射,

这也是水墙内部形成的透射波比较微弱的原因。在此过程中,水膜内部形成的透射波将会到达界面 II (由水墙传播到空气),并反射回拉伸波(稀疏波),界面 II 附近的水在此拉伸力的作用下会向空气中喷射水流,产生 Richtmyer-Meshkov (R-M) 不稳定性^[19] 现象。0.20 ~ 0.25 ms 时,反射波继续向管口方向运动;同时,波后的高速气流作用于水墙,水墙发生破碎并形成水滴,在界面 II 出现明显的小凸起,且凸起集中在水墙的中间部分。这是受 Rayleigh-Taylor (R-T) 不稳定性^[20] 的影响,当冲击波后高速气流(轻流体)作用于水墙(重流体)时,水墙受到气动力的作用,由于此时的气动力大于空气阻力,水墙会向右侧加速运动。

3) 稳定运动阶段,即 0.25 ~ 0.85 ms。0.30 ~ 0.40 ms 时,冲击波后高速气流和涡环共同作用于水墙,界面 II 的不稳定性现象更加明显,中心凸起变得更大。此外,在 0.35 ms 时发现水墙后方出现 2 个球形的冲击波。关于此现象,最初有 2 个观点:其一,是运动的水墙压缩空气形成的压缩波;其二,为二次反射波作用于水墙时产生的透射波。对于以上 2 个观点进行了如下分析:假设水墙后方的冲击波是运动的水膜压缩空气产生,水墙后方仅能形成一个球面波,显然此观点不正确;二次反射波在 0.50 ms 时与水墙发生相互作用,产生的相应透射波也应在 0.50 ms 后,由此认为观点二也不正确。后经分析认为,水墙后方的 2 个球形冲击波是绕射波,冲击波与水墙相互作用的过程中,反射波的波长不断增加,当波长大于水墙宽度时,会在水墙两侧形成绕射波。由于矩形水墙的中轴线与入射冲击波的中轴线

不完全重合,入射冲击波到达水墙两侧的时间不同,导致观察到2个绕射波。绕射波仅在水墙两侧运动,因此对水墙后的流动并没有影响。此外,在水墙后方还观察到微弱的压缩波。压缩波是由水墙后方的扰动空气产生的,在波后高速气流和涡环的作用下,水墙像一个快速运动的活塞,压缩空气。0.45 ~ 0.85 ms时,二次反射波、波后高速气流以及涡环共同作用于水墙,并驱动水墙向后运动,水膜的破碎程度加剧。在此过程中,水墙受到的气动力与空气阻力相等,做匀速运动,运动速度达到最大,约为183 m/s。

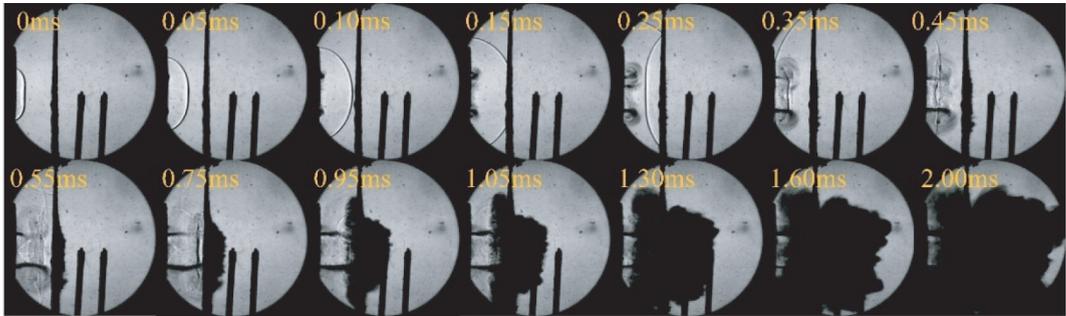
4) 减速运动阶段,即0.85 ~ 1.20 ms。水墙持续向后运动,在空气阻力的作用下,水滴发生二次破碎并形成细水雾,水墙表面出现了局部雾化现象。且随着时间的推移,水墙逐渐超出纹影仪的可视范

围。在此过程中,水墙受到的气动力小于水膜受到的空气阻力,开始做减速运动。

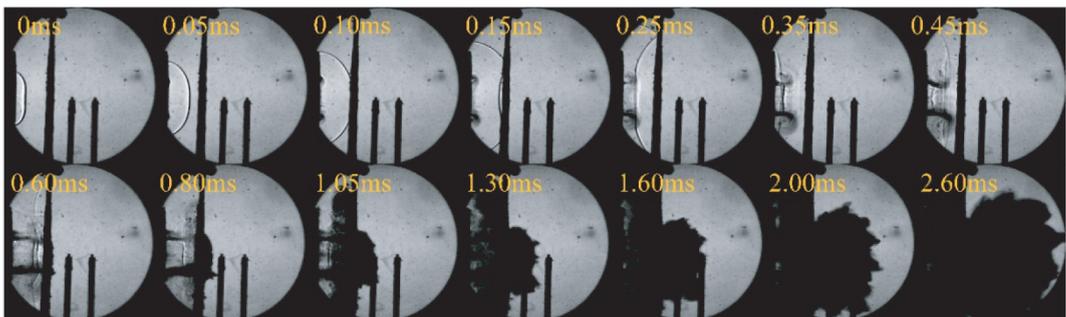
2.2.2 水墙厚度对水墙运动过程的影响

图8、图10和图11为 $Ma = 1.44$ 和 $Ma = 1.92$ 的冲击波分别与不同厚度的水墙相互作用的纹影图。不仅可观察到反射波、绕射波、微弱的压缩波,还可观察到水墙的变形、破碎以及雾化的全过程。研究还发现,当入射冲击波马赫数一定时,随着水墙厚度的增加,水墙变形和破碎的效果逐渐减弱,主要表现在:水墙越厚,液滴的扩散范围越小,且抛撒距离逐渐减小。

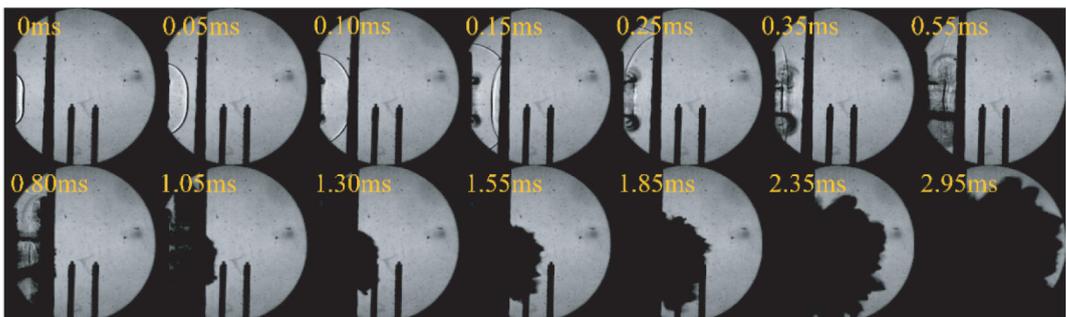
图12(a)为冲击波与矩形水墙相互作用的位移情况。水墙均经历了初始运动阶段、加速运动阶段和稳定运动阶段,且水膜运动到测点PT3和PT4处时均处于稳定运动阶段。由于高速摄影机所记录的



(a) $T = 2$ mm



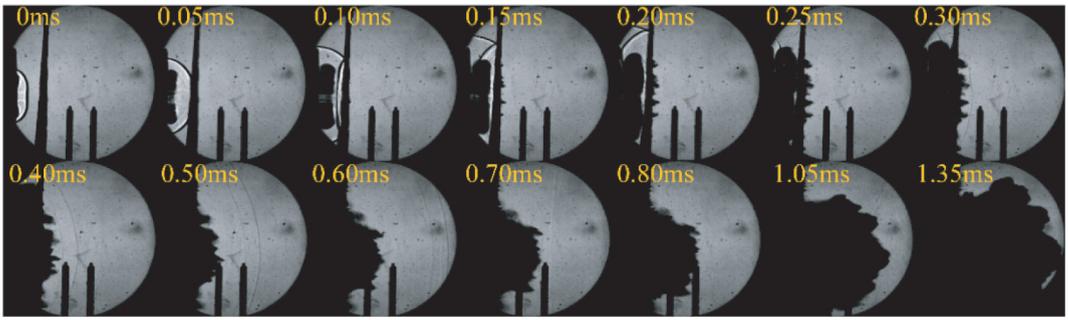
(b) $T = 4$ mm



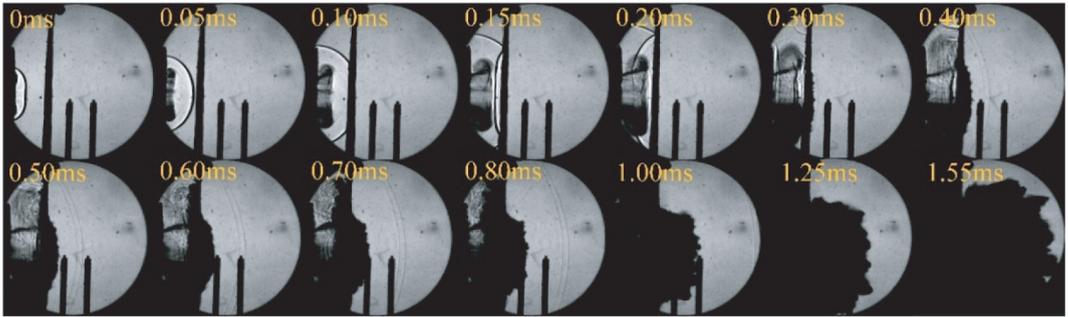
(c) $T = 6$ mm

图10 冲击波分别与不同厚度水墙相互作用的纹影图($Ma = 1.44$)

Fig. 10 Schlieren images of the interaction between shock waves and water walls of different thicknesses ($Ma = 1.44$)



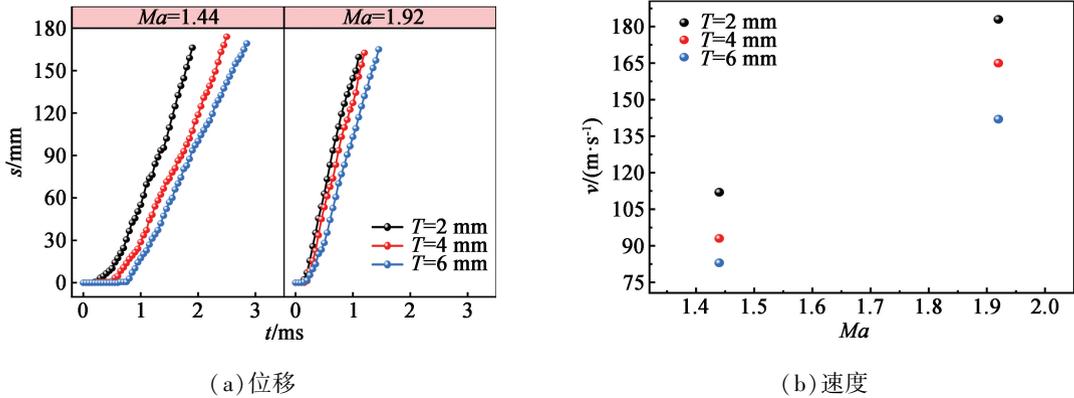
(a) $T=4\text{ mm}$



(b) $T=6\text{ mm}$

图 11 冲击波分别与不同厚度水墙相互作用的纹影图 ($Ma = 1.92$)

Fig. 11 Schlieren images of the interaction between shock waves and water walls of different thicknesses ($Ma = 1.92$)



(a) 位移

(b) 速度

图 12 冲击波与水墙相互作用的位移和速度

Fig. 12 Displacement and velocity of the interaction between the shock waves and the water walls

照片范围有限,并不是所有工况下的水墙都能够被观察到减速运动阶段。图 12(b)为水墙稳定运动阶段的速度。随着水墙厚度的增加,水墙的运动速度逐渐减小。这是因为,随着水墙厚度的增加,空气阻力会逐渐增大,进而造成水墙运动速度减小。

2.3 压力-时间曲线

2.3.1 压力-时间曲线分析

测点 PT3 和 PT4 处 $Ma = 1.92$ 的入射冲击波与 $T=2\text{ mm}$ 的矩形水墙相互作用时的压力-时间曲线见图 13(a) 和图 13(b)。可以看出,测点 PT3 和 PT4 的压力曲线上升时间分别为 $64\text{ }\mu\text{s}$ 和 $45\text{ }\mu\text{s}$,而典型冲击波超压曲线的上升时间应为 $7\sim 12\text{ }\mu\text{s}$,这

说明冲击波作用于矩形水墙时水墙后方不会产生冲击波。在图 8 中,水墙后方并未观察到透射波;而且,绕射波仅在水墙两侧运动,对水墙后的流动并没有影响。分析认为,矩形水墙后方的压力变化与冲击波的反射、透射以及绕射现象无关。

图 13(a) 和图 13(b)中, $T=2\text{ mm}$ 时测点 PT3 和 PT4 的压力曲线变化趋势基本一致。结合图 8 仅对测点 PT3 的压力变化进行分析。可以发现,压力-时间曲线具有 2 个作用阶段。0 ~ 0.278 ms 为压力作用的第一阶段。该阶段压力的持续时间为 0.278 ms,而水墙运动到测点 PT3 所用的时间约为 0.250 ms(图 8 中 0.10 ~ 0.35 ms),两者的相对误差约为

10%。由此认为,该阶段的压力变化是水墙向后运动过程中产生的压缩波引起的。而压缩波的强度又取决于水墙的运动速度,因此第一阶段的压力变化取决于水墙的运动速度。 $0.278 \sim 0.440$ ms 为压力作用的第二阶段。很显然,该阶段的压力变化是水墙冲击造成的,水墙在冲击波后高速气流的作用下加速至一定的速度,具有较大的动量(即动量提取效应),水墙运动到测点 PT3 时(图 8 中 0.35 ms)引起该阶段的压力变化,这说明第二阶段的压力变化取决于受冲击水墙所具有的动能。

2.3.2 峰值压力和峰值冲量

图 13 为 $Ma = 1.92$ 和 $Ma = 1.44$ 的冲击波分别与 2、4 mm 和 6 mm 厚的水墙相互作用的压力-时间曲线。可以看出,压力-时间曲线均具有压缩波作用阶段和水墙冲击阶段。将压缩波作用阶段与水墙冲击阶段进行对比发现,水墙冲击阶段产生的峰值压力均高于压缩波作用阶段,冲量变化也主要由水墙冲击引起。由此可见,水墙后方的压力变化主要取决于水墙的冲击作用。这说明水墙近场位置动量提取为悬挂式矩形水墙的主要减爆机制。

表 5 为有水墙时测点 PT3 和 PT4 的峰值压力和峰值冲量。其中,峰值压力为水墙冲击阶段产生,

峰值冲量为压缩波作用阶段和水墙冲击阶段叠加产生,可利用式(1)计算得到。由表 5 可知,当冲击波马赫数相同时,峰值压力随水墙厚度的增加而增加。这是因为当水墙厚度增加时,尽管水墙的运动速度会减小,但质量成倍增加(水墙的质量与厚度成正比关系),进而导致受冲击水墙具有的动能增加,该阶段的压力峰值也随之增加。纹影图也可做出详细的解释,当水墙运动到测点 PT3 和 PT4 位置时,随着水墙厚度的增加,水墙的破碎程度逐渐减弱,这表明水墙破碎时耗散的能量逐渐减少,因而产生的峰值压力更大。测点 PT3 和 PT4 处,峰值冲量的变化规律与峰值压力的变化规律基本相同,均随水墙厚度的增加而增加。

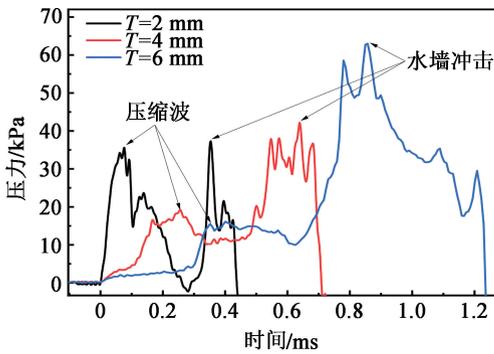
2.4 削减效果

表 6 为测点 PT3 和 PT4 处的峰值压力削减率 K_1 和峰值冲量削减率 K_2 。削减率为正,表示水墙对冲击波峰值压力(峰值冲量)具有削减效果;削减率为负,则表示水墙具有增强效果。

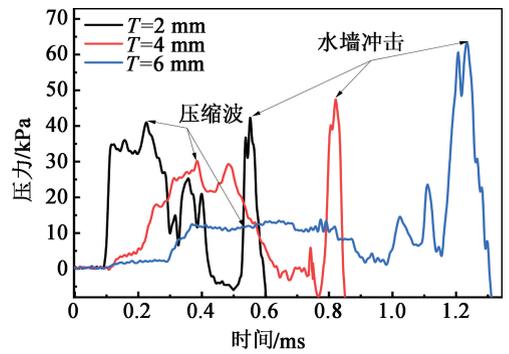
峰值压力削减率

$$K_1 = \frac{p - p_0}{p_0} \times 100\%; \quad (2)$$

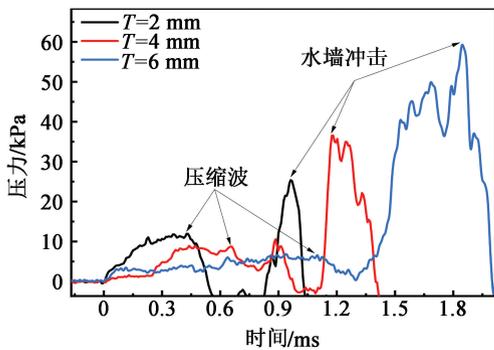
峰值冲量削减率



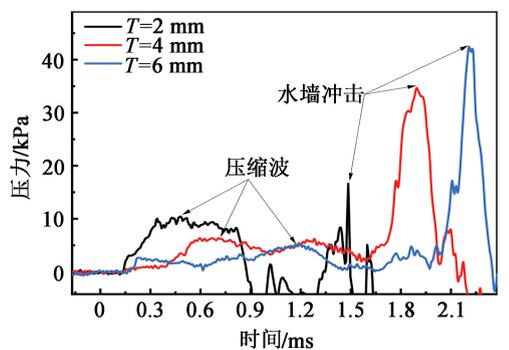
(a) PT3 ($Ma = 1.92$)



(b) PT4 ($Ma = 1.92$)



(c) PT3 ($Ma = 1.44$)



(d) PT4 ($Ma = 1.44$)

图 13 冲击波与不同厚度的水墙相互作用的压力-时间曲线

Fig. 13 Pressure-time curves of the interaction between shock waves and water walls of different thicknesses

表 5 测点 PT3 和 PT4 处的峰值压力和峰值冲量

Tab. 5 Peak pressure and peak impulse at measuring points PT3 and PT4

马赫数	厚度/ mm	PT3			PT4		
		峰值压力/ kPa	压力作用时间/ ms	峰值冲量/ (kPa · ms)	峰值压力/ kPa	压力作用时间/ ms	峰值冲量/ (kPa · ms)
1.44	2	25.65	0 ~ 1.026	16.94	5.31	0.132 ~ 1.496	6.43
	4	36.53	0 ~ 1.401	34.44	10.90	0.141 ~ 2.136	10.42
	6	59.19	0 ~ 2.000	42.45	26.22	0.177 ~ 2.350	13.64
1.92	2	56.04	0 ~ 0.437	41.29	10.00	0.088 ~ 0.594	9.60
	4	63.24	0 ~ 0.708	47.62	17.43	0.111 ~ 0.845	10.02
	6	95.55	0 ~ 1.232	63.57	38.16	0.103 ~ 1.304	14.08

表 6 削减率

Tab. 6 Reduction rate

Ma	T/ mm	K ₁ /%		K ₂ /%	
		PT3	PT4	PT3	PT4
1.44	2	44.26	36.53	39.73	38.64
	4	20.62	-29.04	-23.72	0.57
	6	-28.62	-58.30	-197.62	-30.15
1.92	2	64.57	53.07	29.03	41.10
	4	60.02	45.87	-23.70	38.53
	6	39.59	27.74	-170.83	13.62

$$K_2 = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: p_0 为无水墙时的峰值压力; p 为有水墙时的峰值压力; I_0 为无水墙时的峰值冲量; I 为有水墙时的峰值冲量。

表 6 中,水墙在测点 PT3 和 PT4 处均对冲击波峰值压力具有明显的削减效果。水墙越薄,对峰值压力的削减效果越显著。峰值压力的最大削减率为 64.57%,但 $Ma = 1.44$ 的冲击波作用于 4 mm 和 6 mm 厚的水墙时,反而会对峰值压力有增大效果。

此外还发现,在测点 PT3 处,仅 2 mm 厚的水墙对峰值冲量有削减效果;在测点 PT4 处,水墙对 $Ma = 1.92$ 的冲击波具有明显的削减效果,且水墙越薄,对峰值冲量的削减效果越明显,最大削减率达到 41.10%。由此可见,水墙对峰值冲量的削减效果受目标与水墙间距的影响,当目标距离水墙太近时,并不能达到削减峰值冲量的效果。

3 结论

利用水平激波管搭建冲击波与悬挂式矩形水墙

相互作用的实验平台。开展 $Ma = 1.44$ 和 $Ma = 1.92$ 的入射冲击波分别与 2、4 mm 和 6 mm 厚水墙相互作用的实验。通过高速纹影测试系统记录冲击波作用下水墙的运动过程。通过压力测试系统记录水墙后方 50 mm 和 100 mm 处的压力变化。研究表明:

1) 在水墙近场位置,冲击波作用下水墙具有初期运动阶段、加速运动阶段、稳定运动阶段和减速运动阶段,水墙冲击作用大多发生在稳定运动阶段,并且此阶段运动速度达到最大。

2) 水墙越薄,水墙的变形和破碎效果越显著,水墙的稳定运动速度越大。

3) 将压力-时间曲线与纹影图相结合进行分析,在水墙近场位置,水墙后方的压力变化与冲击波的反射、透射以及绕射现象无关,主要取决于水墙产生的冲击作用,即动量提取为悬挂式矩形水墙的主要减爆机制。

4) 水墙越厚,冲击波作用于水墙时产生的峰值压力和峰值冲量越大。

5) 矩形水墙对冲击波峰值压力具有明显的削减效果,随着水墙厚度的减小,对峰值压力的削减效果逐渐增加,最大削减率为 64.57%。但冲击波马赫数较小、水墙厚度较大时,水墙对峰值压力反而有增强效果。水墙对峰值冲量的削减效果并不明显,且受目标与水墙间距的影响。

参 考 文 献

- [1] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
NING J G, WANG C, MA T B. Explosion and Shock Dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

- [2] 邵先锋, 赵捍东, 朱福林, 等. 爆炸冲击波作用于便携式防爆墙的绕射规律[J]. 爆破器材, 2017, 46(6): 6-10, 16.
SHAO X F, ZHAO H D, ZHU F L, et al. Diffraction laws of explosion shock waves acting on portable explosion-proof walls [J]. Explosive Materials, 2017, 46(6): 6-10, 16.
- [3] 崔小杰, 张孙嘉, 张国伟. 基于 AUTODYN 的复合防护结构数值模拟[J]. 爆破器材, 2019, 48(1): 52-57.
CUI X J, ZHANG S J, ZHANG G W. Numerical simulation of composite protective structure based on AUTODYN [J]. Explosive Materials, 2019, 48(6): 52-57.
- [4] ZAKRAJSEK A J, MIKLASZEWSKI E J, GULDENBECHER D R, et al. Experimental analysis of blast mitigation associated with water sheets [J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1426(1): 92-95.
- [5] SON S F, ZAKRAJSEK A J, MIKLASZEWSKI E J, et al. Experimental investigation of blast mitigation for target protection [M]//Blast mitigation: experimental and numerical studies. New York: Springer, 2014: 1-19.
- [6] 叶经方, 董刚, 解立峰. 管道内水雾对冲击波衰减作用的实验研究[J]. 爆破器材, 2006, 35(5): 1-4.
YE J F, DONG G, XIE L F. Experimental investigation of shock wave decay by water mist in duct [J]. Explosive Materials, 2006, 35(5): 1-4.
- [7] WILLAUER H D, ANANTH R, FARLEY J P, et al. Mitigation of TNT and Dextex explosion effects using water mist [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/2/3): 1068-1073.
- [8] 陈鹏宇, 侯海量, 刘贵兵, 等. 水雾对舱内装药爆炸载荷的耗散效能试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(5): 927-933.
CHEN P Y, HOU H L, LIU G B, et al. Experimental investigation on mitigating effect of water mist on the explosive shock wave inside cabin [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(5): 927-933.
- [9] 胡翔. 细水雾对冲击波的削弱作用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
HU X. Research on the mitigation of shock wave using fine water mist [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [10] 张国栋, 侯海量, 刘贵兵, 等. 舰船舱室水雾抑爆技术研究进展[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(2): 1-11.
ZHANG G D, HOU H L, LIU G B, et al. Research progress of water mist explosion suppression technology in warship compartment [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(2): 1-11.
- [11] 李钰阳. 通道内水幕帘减弱冲击波强度问题的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
LI Y Y. Numerical study of water curtain decreasing the intensity of shock wave in a channel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [12] 胡洋, 李士军, 李奇. 水幕帘衰减爆炸冲击波数值研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 61-64, 80.
HU Y, LI S J, LI Q. Attenuation of shock wave passing through water curtain [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(4): 61-64, 80.
- [13] ZHANG L, CHEN L, FANG Q, et al. Mitigation of blast loadings on structures by an anti-blast plastic water wall [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(2): 461-469.
- [14] CHEN L, ZHANG L, FANG Q, et al. Performance based investigation on the construction of anti-blast water wall [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 81: 17-33.
- [15] BORNSTEIN H, PHILLIPS P, ANDERSON C. Evaluation of the blast mitigating effects of fluid containers [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 222-228.
- [16] BORNSTEIN H, RYAN S, MOURITZ A P. Blast mitigation with fluid containers: effect of mitigant type [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113: 106-117.
- [17] ZHOU X Q, HAO H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(5): 363-375.
- [18] 徐启明. 低马赫数激波与燃料相互作用实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
XU Q M. Experimental study on the interaction of shock wave and fuel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [19] RANJAN D, OAKLEY J, BONAZZA R. Shock-bubble interactions [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43(1): 117-140.
- [20] TAYLOR G I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I [J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1950, 201(1065): 192-196.