DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0803-08

壳体约束对液体爆炸抛撒流场特性的影响*

陆晓霞[1],李 磊[1,2],赵守田[1],严晓芳[1],王金生[1],韩 超[1]
(1.防化研究院国民核生化灾害防护国家重点实验室,北京 102205;
2.清华大学航天航空学院,北京 100190)

摘要:进行了不同壳体约束条件下的液体爆炸抛撒实验,讨论了壳体对起爆后早期抛撒流场特征的影响,分析了爆炸分散过程中液体的状态变化和破碎分散机理,并通过数值模拟进行了对比分析。结果表明,在爆炸反射稀疏波的作用下液体发生空化现象,壳体强度越高,空化发生的延迟越大,发生位置越靠近爆心,同时,爆炸产物气体与液体在其界面附近越早发生掺混。

关键词:流体力学;爆炸抛撒;壳体;液体;空化
中图分类号:O357 **国标学科代码**:1302531 **文献标志码**:A

液体爆炸抛撒在燃料空气炸药(FAE)、冷激波灭火弹等方面有重要的应用。自 20 世纪 60 年代起,液体爆炸抛撒就受到了持续关注,由于涉及炸药爆轰、爆炸波系的传播与反射、液体破碎、气溶胶形成与扩散等多尺度复杂过程,液体破碎分散机理至今没有完全明确。早期认为,起爆后液体呈一个连续环状"液体活塞"向外运动,并将抛撒过程划分为若干阶段分别进行了建模和计算[1-3]。该"液体环"模型在相关研究中得到广泛应用,在此基础上发展了"液体环"断裂破碎的若干判据[4-6],例如不稳定增长判据、能量判据等。李磊等[7]进行了水平约束的爆炸抛撒实验,指出抛撒过程中液体的不均匀性。任晓冰等[8]进行了不同比药量(炸药与被分散液体质量之比从 1.7×10^{-4} 到 6.6×10^{-4})和不同黏性液体的爆炸抛撒实验,指出对小药量情况,主液体区呈交叉树枝状形态,随着药量增大,主液体区在爆炸产物气体推动下形成环状带向外飞散,并呈现雾化液滴群状态。L. Li 等[9]进一步考察了比药量增大至 0.023 情况下不同液体的分散特征。任晓冰等[8]、L. Li 等[9]指出了传统的"液体环"理论的不足,但主要关注薄壳体(厚度为 0.2 mm 的透明胶片)的抛撒过程。蒋治海等[10]指出不同厚度壳体材料在爆炸抛撒时破碎方式不同,周保顺等[11]通过数值模拟讨论了壳体强度对液体初始速度的影响,而高洪泉等[12]讨论了壳体强度对 FAE 作用威力的影响。这些研究表明:壳体材料和厚度对液体爆炸抛撒形成云团有较大影响,但均是从工程应用角度进行规律的总结,未讨论不同壳体条件下的早期抛撒流场特征。

本文中,在文献[8-9]的基础上,进行不同材料壳体的液体爆炸抛撒实验,讨论壳体对早期抛撒形态特征的影响,并进一步分析爆炸分散过程中液体的状态变化和破碎分散机理。

1 实验设置

实验装置包括爆炸分散容器、支架、照明系统、同步电路、高速摄影系统,布局如图 1 所示。

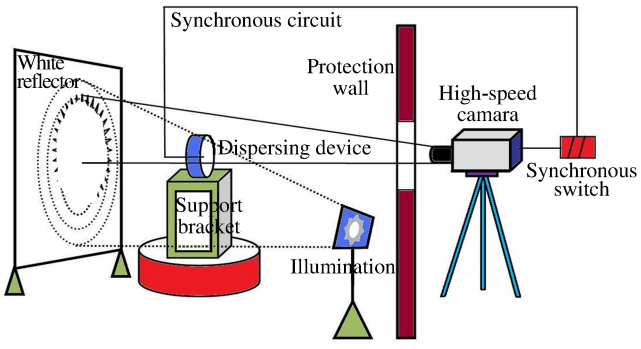


图 1 实验布局示意图
Fig. 1 Experiment layout

* **收稿日期**:2015-03-24;**修回日期**:2015-09-22
基金项目:国家自然科学基金面上项目(10572149);国家自然科学基金 NSAF 重点项目(10676120)
第一作者:陆晓霞(1981—),女,博士,助理研究员,xiaoxia@ustc.edu.cn。

实验在密闭空间内进行，采用两台高速摄像仪 MotionXtra HG-100K 和 Phantom V9.1，通过不同角度观察窗口同时记录分散过程，拍摄频率分别为 10^4 和 2×10^4 s^{-1}，同步触发装置为电磁继电器。

FAE 武器的比药量一般在 0.01 左右，且有一定强度的壳体约束，因此实验中采用的比药量在 0.01 左右。壳体材料分别为强度依次提高的 3 种：1 mm 厚有机玻璃材料、3 mm 厚 PVC 材料和 3 mm 厚不锈钢，如图 2(a)～(c)所示。另外，将文献[8-9]中 0.2 mm 超薄胶片约束的分散结果用于比较分析，装置如图 2(d)所示。分散介质为纯净水，炸药采用钝化黑索今炸药柱(直径 9 mm，密度约 1 600 kg/m^3)，装填在 1 mm 厚度塑料爆管内，置于圆柱容器中心轴上。爆炸分散容器固定在支架上，安装方式如图 2(d)所示，装置下方留空，以避免爆炸冲击波在支座上的反射过快形成对液体抛撒流场的干扰。



图 2 不同壳体材料的爆炸分散装置

Fig. 2 Explosive dispersion devices made of different shell materials

2 实验结果和分析

2.1 实验现象

2.1.1 实验 1：1 mm 厚有机玻璃圆柱壳体

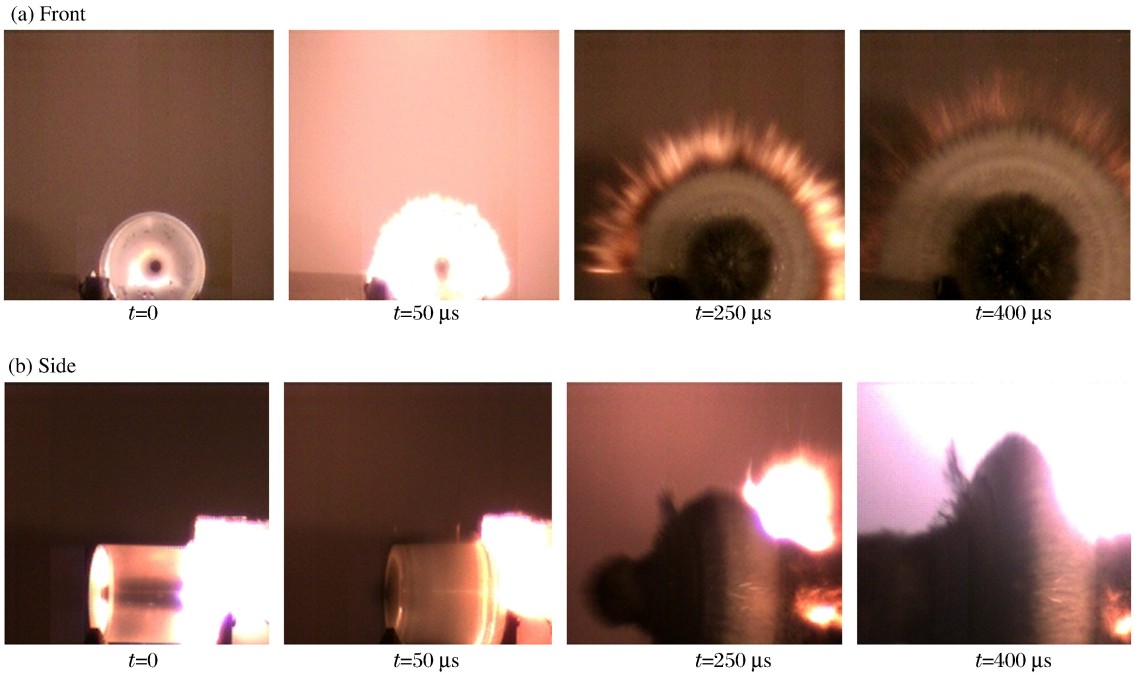


图 3 实验 1 液体飞散情况

Fig. 3 Photographs of liquid dispersal flow in experiment 1

壳体如图 2(a)，内径为 104.5 mm，高度为 92 mm，炸药量为 9.4 g，比药量为 0.011。图 3 给出了炸药起爆后液体的喷射情况，起爆时刻 $t=0$。

起爆时，爆管背面有明显膨胀，冲击波已进入液体，但液体保持透明状态，与文献[13]中记录的液体中冲击波传播现象相符，即冲击压缩不会导致液体的透光性显著改变。经过 50 μs，壳体开始膨胀但尚未出现裂纹，说明冲击波已到达容器外壳并向内反射稀疏波，液体浑浊证明状态已发生改变，内部很可能产生了大量的空化气泡，透光性显著降低。

周向壳体的破碎大约发生在起爆后 200～250 μs，壳体膨胀至原始半径的约 2 倍。黑色的爆炸产物气体从圆柱壳体前端冲出，液体主要沿着半径方向飞散，飞散形态符合文献[8-9]中给出的比药量较大情况的特征。而液体冲出时前沿较规则，到达近 3 倍初始半径距离时，毛刺状射流才逐渐明显。这是由于药量更大，导致壳体破碎更细小、更均匀。冲出的液体颜色泛白，说明对光线有更强烈的散射，可以认为是气泡与致密液滴混合体，说明液体(至少是表面液体)已经彻底破碎成为细小液滴。

分散的液体形成一个环状区域向外飞散，外界面为液体与空气界面，内界面为液体与爆轰产物气体界面。开始形成时“液体环”所占体积已经超出初始体积，飞散过程中环状液体宽度不断增加，因此它并非连续液体。在液体飞散初期，内界面最初具有明显规则边界，在飞散的过程中逐渐变得不规则和模糊，说明爆炸产物气体与液体的混合发生于液体飞散过程。

2.1.2　实验 2：3 mm 厚 PVC 材料圆柱壳体

壳体如图 2(b)，两端为铝壳端盖，壳体内径为 103 mm，高度为 112 mm，端盖外径为 120 mm，炸药量为 9.4 g，比药量约为 0.010。图 4 为起爆后不同时刻的分散流场图像。

与实验 1 和与文献[8-9]中比药量较大的实验相对比，实验 2 中液体未形成明显环状区域，也未形成树枝状射流结构，而是从壳体半径范围内向外扩展的“水幕”。截至起爆后 1 ms，抛撒液体与爆炸产物气体的内界面尚未出现，而外界面已经推至距爆心 3.5 倍半径以外，即该组实验中没有观察到爆炸产物气体显著的膨胀过程。

根据不同时刻液体冲出半径 R_1 与初始半径 R_0 的关系，结合液体表观形态(表面泛白、呈气雾状)，判断液体已发生显著空化或破碎为气泡、液滴与蒸汽的复杂混合物。

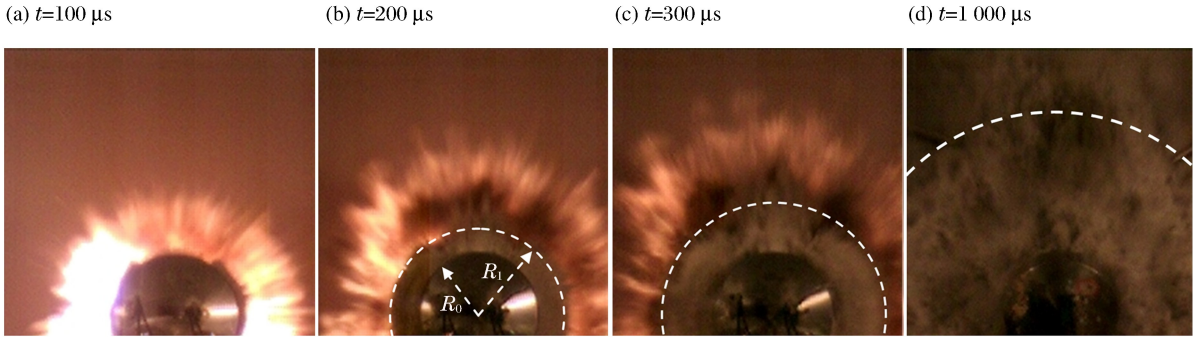


图 4　实验 2 液体飞散情况

Fig. 4　Photographs of liquid dispersal flow in experiment 2

2.1.3　实验 3：3 mm 厚不锈钢壳体

壳体如图 2(c)，内径为 80 mm，比药量为 0.016。实验时，为考察液体冲出情况，在壳体上管壁中部预置 5 mm 宽槽，整个容器内有 1mm 厚度有机玻璃衬膜。图 5 为起爆后不同时刻的分散流场形态。液体首先从开槽部位冲出，不锈钢壳体破碎与之相比约有 100 μs 延迟。从液体区域所占体积进行类似分析可得到，实验 3 中冲出的液体也不是连续液体，而是已经空化、破碎形成的气液混合物。

在实验 3 中照片显示的内界面模糊不清，判断雾状液体与爆炸产物有较多混合，1.5 ms 时外界面扩展至 5～6 倍初始半径左右位置。

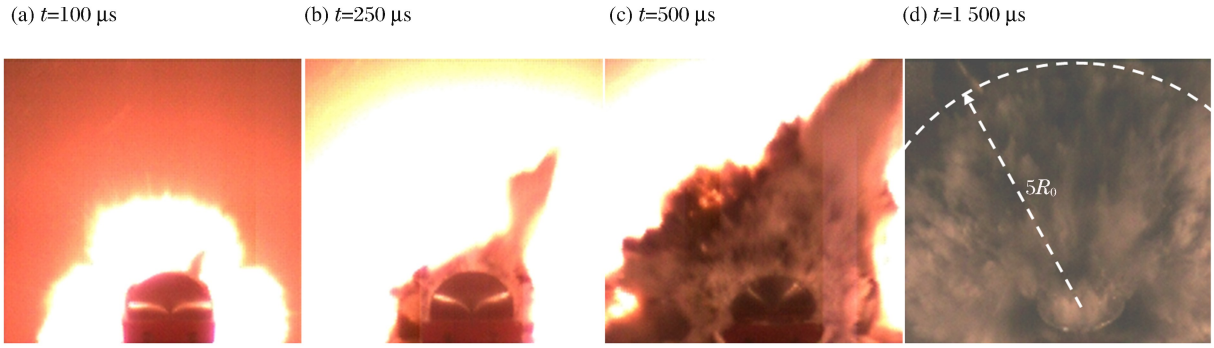


图 5 实验 3 液体飞散情况

Fig. 5 Photographs of liquid dispersal flow in experiment 3

2.2 壳体效应

有机玻璃壳体两端约束比 PVC 和不锈钢弱，实验中有爆炸产物气体从两端冲出，因此在实验 1 中爆炸产物气体泄压要快于实验 2 和 3。但比较爆炸产物气体的膨胀形态可以看到，实验 1 中爆炸产物气体在起爆后 400 μs 内持续推动液体向外运动，它与液体界面较清晰易分辨，其膨胀范围显著大于容器初始半径。而实验 2 和 3 中，没有观察到爆炸产物气体显著的膨胀过程。由此推测，壳体强度越大，爆炸产物气体膨胀越弱，越早与液体在界面上发生掺混。

将实验 1 与文献[8-9]中超薄壳体实验进行对比，图 6 给出了实验 1 中环状液体内外界面的位置变化情况、内外界面的径向增长速度，和文献[8]中 0.2 mm 薄胶片约束条件下（比药量 6.6×10^{-4}）液体内外界面的运动情况。由于实验过程中，内外界面形态逐渐趋于不规则和模糊（界面附近的液体已为离散液滴，而不再是连续液体），因此本节中内外界面位置的确定由其平均半径给出，只代表液体（抛撒介质）所占据区域的范围的变化，而不代表确定液体颗粒的运动轨迹和速度。

由图 6 可知，外界面（液体或液滴群与外界空气界面）向外推进快，内界面向外推进慢。实验 1 中在起爆后 400 μs 左右，其内界面向外运动的速度由正转负，抛撒液体区域不仅向外扩展，也向爆心聚拢；而文献[8]中 0.2 mm 薄胶片约束条件下，截至起爆后 7 ms，其内外界面仍处于向外运动情况，亦即其中心爆炸产物气体仍处于膨胀阶段。图 7 给出了实验 1 与文献[8]中实验起爆后 1 ms 左右液体与爆炸产物气体界面形态，可看到实验 1 中液体（或液滴群）生成的与爆炸产物气体在界面附近掺混、以致产生向内射流状的流动形态，而 0.2 mm 薄胶片约束条件下中液体内界面仍维持平整。后者比前者的约束条件更弱，抛撒液体内界面能够在更长时间内维持向外扩展及界面清晰。

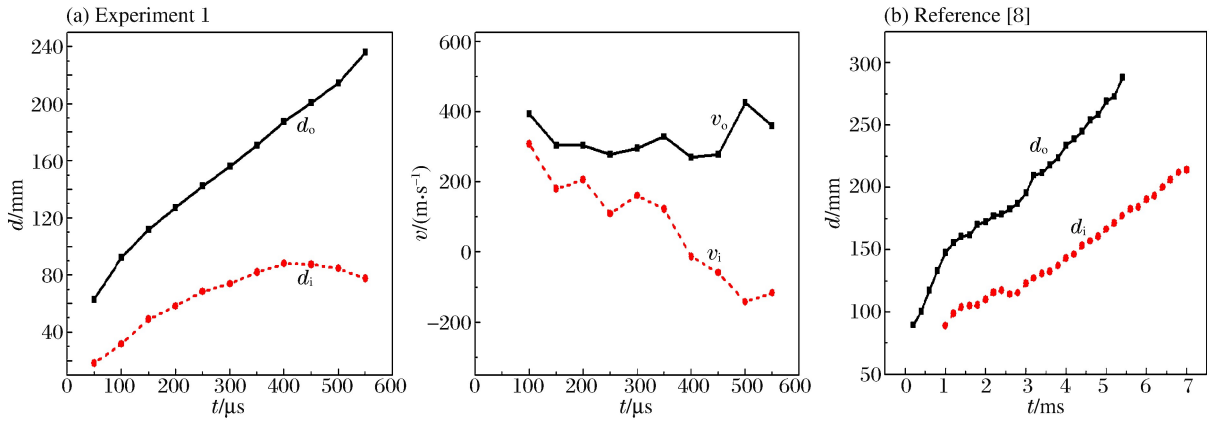


图 6 液体内外界面的运动情况

Fig. 6 Movements of inner and outer interfaces of liquid region

从界面不稳定的产生机理，对其中的原因进行分析表明：炸药起爆初期，在爆炸冲击波和爆炸产物气体高压作用下，液体与爆炸产物气体界面加速向外运动，产物气体密度很快降低，界面发生 Rayleigh-Taylor 不稳定，产生一定扰动。当壳体约束较强时（如 3 mmPVC 材料约束和3 mm 不锈钢壳体约束），爆炸冲击波在壳体上产生较强的反射冲击波，反射冲击波穿过产物气体-液体界面，原本已有扰动的界面随即发生 Richtmyer-Meshkov 不稳定[14]，使扰动更快增长，掺混程度更大；而对于较弱约束情况，反射冲击波很快被削弱，则没有 Richtmyer-Meshkov 不稳定对界面扰动的增强作用，液体与爆炸产物气体的掺混过程也相对较缓慢。

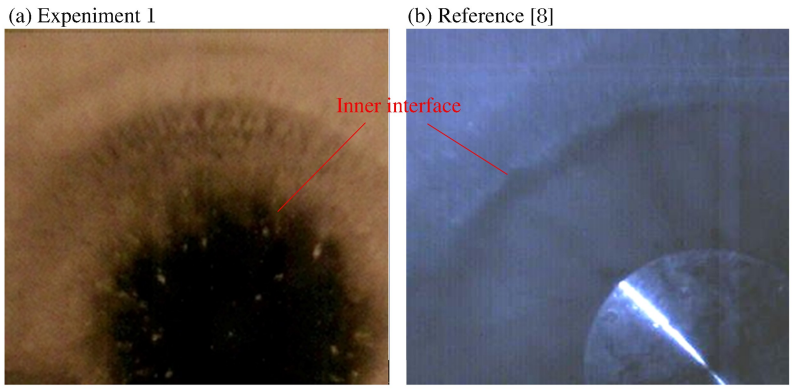


图 7　起爆后 1 ms 液体与爆炸产物气体界面形态

Fig. 7　Configurations of interfaces between liquid and explosive product at 1 ms after detonation

3　数值模拟

3.1　模型和参数设置

因高速摄影拍摄频率有限，且难以拍摄到不透明壳体内部的液体状态，因此通过数值模拟对液体爆炸抛撒早期壳体破碎前后的过程进行研究。根据上面的实验结果，对圆柱形轴对称爆炸抛撒装置而言，液体主体主要沿径向轴对称抛撒。建立二维计算模型，根据对称性，选取横截面的 1/4 模型进行计算。计算过程包含炸药爆轰、分散介质运动、壳体（包括爆管和外壳）变形和运动以及周围空气的运动过程，其中炸药（爆炸产物气体）、分散介质和空气的变形运动较剧烈，因此采用欧拉方法描述，壳体的运动用拉氏方法描述，采用双精度 AUTODYN-2D 进行计算。

选取的壳体材料与实验一致，各部分材料、几何尺寸和力学参数选择见表 1。其中，r_i 为内径，r_o 为外径，ρ_0 为初始密度，K 为体积模量，G 为剪切模量，S 为拉伸强度，η 为断裂伸长率。炸药采用 JWL 状态方程，水采用 Grüneisen 方程，根据文献[15]，水能够承受一定的动态拉应力，约为 40 MPa。为了便于比较计算结果，各种壳体模型的内径保持一致，数值模拟与实验结果对比时主要考察变化趋势。

表 1　计算参数

Table 1　Calculation parameters

部位	材料	r_i/mm	r_o/mm	ρ_0/(kg·m^{-3})	K/GPa	G/GPa	S/MPa	η/%
炸药	RDX	—	4.50	1 630	—	—	—	—
液体	水	5.50	52.25	1 000	—	—	40	—
爆管	塑料	4.50	5.50	1 265	2	0.5	34.5	3.5
壳体	有机玻璃	52.25	53.25	1 180	3.92	0.035	70	0.5
	PVC	52.25	55.25	1 380	4.82	1.22	65	0.5
	不锈钢	52.25	55.25	7 860	167.00	73.00	600	0.4

计算区域选择 120 mm×120 mm 方形区域，边界上设置无反射边界条件。对 Euler 流场采用均匀网格划分，分别选取 240×240 网格、480×480 网格和 960×960 网格，对起爆早期过程进行计算，结果表明 480×480 网格和 960×960 网格所反映的流场特征基本一致，因此采用 480×480 网格进行数值模拟。计算获得有机玻璃壳体条件下起爆后 100 μs 液体内、外界面速度约为 260 和 385 m/s，与实验 1 测试值（见图 6(b)，分别为 306 和 392 m/s）大致相符。

3.2 计算结果分析

图 8 给出了 3 种材料壳体情况起爆后不同时刻压力的径向分布。可以看到，当爆炸冲击波在壳体上反射后(爆炸冲击波到达壳体时间大约 22 μs)，随着壳体的膨胀，液体中出现负压(即拉伸)区域。壳体强度不同，反射冲击波强度不同，则拉伸状态出现的时间也不同。

液体受爆炸冲击加载后出现负压区域的主要原因是，炸药爆炸产生的冲击波强度很高，到达壳体时仍有数百兆帕，它在壳体外侧反射的稀疏波强度也很大，该稀疏波与 Taylor 稀疏波相互作用，液体压力急剧下降，液体产生空化甚至层裂。空化的发展则导致液体破碎成为液滴群。

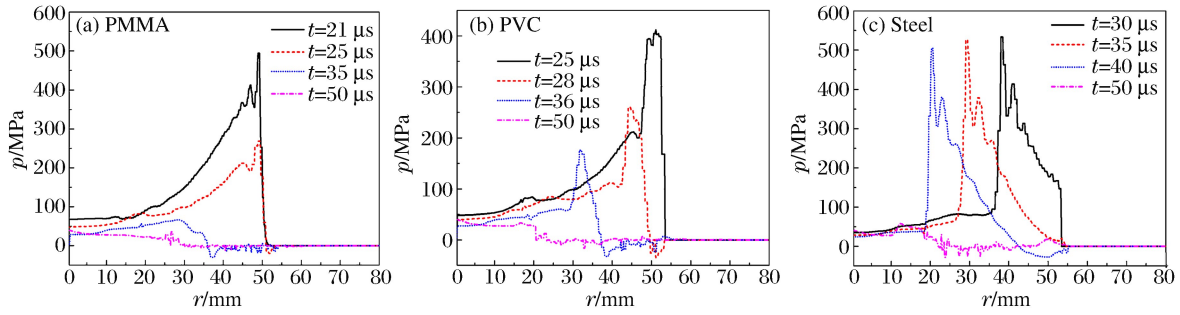


图 8 不同材料壳体情况起爆后不同时刻压力的径向分布

Fig. 8 Radial distribution of pressure at different times after detonation for different shells

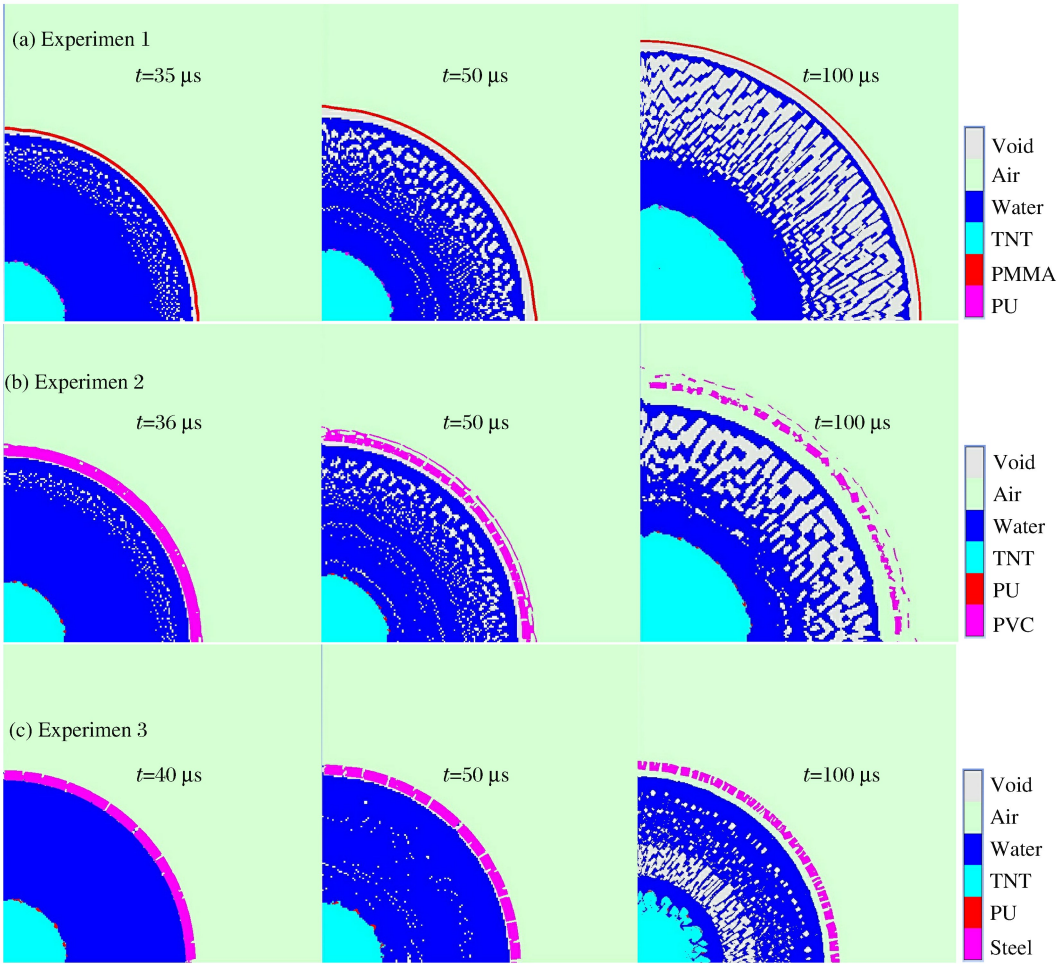


图 9 不同材料壳体情况起爆后不同时刻水中空化气泡的发展

Fig. 9 Cavitation in water at different times after detonation for different shells

图 9 给出了 3 种不同材料壳体约束条件下起爆后不同时刻爆炸产物气体和液体的膨胀和空化情况。1 mm 厚有机玻璃壳体条件下爆炸冲击波到达液体-壳体界面后，空化几乎立即在壳体内侧壁面附近区域发生，与实验观测结果相符；3 mm 厚 PVC 材料壳体约束条件下约有 5 μs 延迟；而 3 mm 厚不锈钢壳体约束条件下空化发生更迟，且先发生于液体中部和靠近爆炸产物气体处，而靠近外界面的部位空化气泡反而分布较少。这是由于弱约束条件下，壳体上反射冲击波可忽略不计，强反射稀疏波与跟随爆炸冲击波的 Taylor 稀疏波波在壳体附近相遇，随即产生拉伸及空化，见图 8(a)。而较强的壳体约束情况下，爆炸冲击波在壳体上反射也较强，先使液体压力进一步升高而后因壳体向外膨胀而卸载，当该反射冲击波到达爆炸产物气体-液体界面时，向液体内反射稀疏波，该稀疏波再与由于外部壳体膨胀产生的稀疏波相遇，才使液体发生空化，见图 8(c)。因此对于较强壳体约束的情况，空化出现的时间较晚，发生部位更靠近爆心。

另外，由图 9 看到，爆炸产物气体与液体界面形态发展规律，在约束壳体强度不同时也有较大不同。对 3 mm 不锈钢壳体，起爆后 100 μs 产物气体与液体界面已发展得十分不规则，而对于 1 mm 厚有机玻璃和 3 mm 厚 PVC 材料两种较弱的壳体约束的情况，界面在该时间内保持平滑。这从计算上说明了，壳体约束越强，爆炸产物气体越早与液体在界面上发生掺混，与实验观测结果相符合。

4　结　论

对在比药量 0.01 左右、不同壳体材料约束下的液体爆炸抛撒过程进行了实验和数值模拟研究，进一步揭示了液体爆炸抛撒早期液体破碎和分散过程的重要形态特征。主要有如下结论。

(1)液体在壳体破裂前、冲击波在外界面上反射过后，已发生空化现象，性质发生改变，壳体破裂后冲出的“液体环”是包含大量空化气泡、液滴和蒸汽的复杂混合物，壳体较弱时空化发生在壳体附近，而壳体强度越强，空化发生的延迟越大，发生位置越靠近爆心。

(2)壳体约束越强，爆炸产物气体与液体界面不稳定现象发展越快，两者在局部越早发生掺混。

所得到的结论有助于揭示液体爆炸抛撒的液体破碎机理，对液体爆炸抛撒过程的建模尤其是对不同壳体约束条件下爆炸抛撒云团初始粒径分布的估计，也有一定的指导意义。

参考文献：

[1] Samirant M. Dynamic measurements in combustible and detonable aerosols[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989,14:47-56.

[2] Zabelka R J, Smith L H. Explosively Dispersed Liquid[R]. AD-86-3268, 1969.

[3] Gardner D R. Near-field dispersal modeling for liquid fuel-air explosives[R]. SAND-90-0686, 1990.

[4] 薛社生，刘家骢，秦承森. 燃料爆炸抛撒成雾的实验与数值研究[J]. 爆炸与冲击，2001,21(4):272-276.
Xue Shesheng, Liu Jiacong, Qin Chengsen. Experimental and numerical investigation on explosive dispersal and cloud forming[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(4):272-276.

[5] 丁珏. 液体的爆炸抛撒理论模型及全过程数值模拟[D]. 南京：南京理工大学，2001.

[6] 秦承森，王裴，王丽丽，等. 液体环轴对称抛洒首次破碎的理论分析[J]. 爆炸与冲击，2007,27(3):198-203.
Qin Chengsen, Wang Pei, Wang Lili, et al. An investigation of the primary dissemination of breakup in the axisymmetric a liquid ring[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(3):198-203.

[7] 李磊，崔箭，董玉才，等. 液体爆炸分散过程中界面破碎的实验研究[J]. 科学通报，2009,54(12):1693-1700.
Li Lei, Cui Jian, Dong Yucai, et al. Experimental investigations to the interfaces breakup during liquid explosive disseminations process[J]. Chinese Science Bulletin, 2009,54(12):1693-1700.

[8] 任晓冰，李磊，严晓芳，等. 液体爆炸抛撒特征的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2010,30(5):487-492.
Ren Xiaobing, Li Lei, Yan Xiaofang, et al. Dispersion characters of liquid induced by explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):487-492.

[9] Li L, Ren X B, Lu X X, et al. On the characteristics of liquid explosive dspersing fow[C]// ICFM2010, WASET. Amsterdam: Academic Science Research, 2010:159-163.

[10] 蒋治海,龙新平,韩勇,等.炸药爆炸驱动壳体破裂及液体喷射过程试验研究[J].含能材料,2011,19(3):321-324.
Jiang Zhihai, Long Xinping, Han Yong, et al. Experimental studies on shell fracturing and jet forming and developing process driven by detonation[J]. Chinese Joumal of Energenic Material, 2011,19(3):321-324.

[11] 周保顺,王少龙,罗永锋,等.壳体对燃料近区抛撒速度影响的数值模拟[J].火炸药学报,2010,33(2):53-56.
Zhou Baoshun, Wang Shaolong, Luo Yongfeng, et al. Numerical simulation on influence of shell on fuel near-field dispersal velocity[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010,33(2):53-56.

[12] 高洪泉,卢芳云,王少龙,等.抛撒药壳体对一次起爆型云爆弹威力的影响规律[J].爆炸与冲击,2011,31(4):380-384.
Gao Hongquan, Lu Fangyun, Wang Shaolong, et al. Influences of inner shells outside disperse explosive on SEFAE damage power[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(4):380-384.

[13] 龙新平,韩勇,蒋治海,等.炸药爆轰驱动水的初期过程[J].爆炸与冲击,2010,30(1):12-16.
Long Xinping, Han Yong, Jiang Zhihai, et al. Measurement and numerical simulation of initial stage about detonation products driving water[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):12-16.

[14] Brouillette M. The Richtmyer-Meshkov instability[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002,34:445-68.

[15] Bogach A A, Utkin A V. Strength of water under pulsed loading[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2000,41:752-758.

Effects of shell constraints on flow characteristics in an explosive dispersal of a liquid volume

Lu Xiaoxia[1], Li Lei[1,2], Zhao Shoutian[1], Yan Xiaofang[1], Wang Jinsheng[1], Han Chao[1]

(1. *State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Research Institute of Chemical Defense, Beijing* 102205, *China*;
2. *School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: In this study, experimental investigations on the liquid's explosive dispersal under different shell constraints were carried out, effects of shell constraints on the early characteristics of the flow field were discussed, and the mechanism for liquid state transition and breakup was analyzed and compared with the numerical simulation. The results show that cavitation occurs in the liquid when the rarefaction waves reflects on the shell. The stronger the shell constraint, the greater the delay of the cavitation that emerges and the closer to the center where the cavitation is located, and the earlier the explosive product mixes with the liquid on the nearby interfaces.

Key words: fluid mechanics; explosive dispersal; shell constraint; liquid; cavitation

(责任编辑 丁 峰)