DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0525-07

水及盛水容器对近距离爆炸载荷影响的实验研究*

徐海斌[1,2],钟方平[2],杨 军[2],张德志[2],秦学军[2],
刘峻岭[2],史国凯[2],梁志刚[2],沈兆武[1]
(1.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027;
2.西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要:为研究用水包围炸药的方式对爆炸载荷的作用机理,在两端开口的钢筒内进行了水直接包覆炸药的爆炸实验,利用光纤位移干涉仪获取了钢筒外壁的径向速度和动态变形。结果表明:不同于无水爆炸,爆轰产物通过水的"裂缝"在空气中形成冲击波,造成该冲击波出现时间更晚、强度更低、持续时间更长,并要求相应的数值模拟采用二维以上的计算模型;盛水结构的材料密度越低、厚度越小对爆炸载荷的影响越小。

关键词:爆炸力学;爆炸载荷;水;钢筒;质点速度
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

爆炸物的组装、存储和销毁等过程中,需采用适当方法尽量降低爆炸物意外引爆对人类生命财产和周围建筑物的损害。近年来,用水消减爆炸产生的空气冲击波的方法越来越受到重视,其中用水包围爆炸物的方法由于其成本低、使用方便、搭建快等特点,能够应用于很多场所,如炸药临时存放点、拆除或销毁弹药现场,常见的放置水(简称置水)的方法有在爆炸物上直接覆盖水袋或水枕、在爆炸物周围设置水墙等。因此,研究用水包围炸药的方式对爆炸载荷的作用机理,对于拓展该消波方式的应用是很有必要的。由于水包围炸药爆炸的过程与空中爆炸、水中爆炸各不相同,尤其是关于水与爆炸后高温高压气体及空气的作用过程和机理的报道较少,与盛水结构相关的研究未见报道。目前,已开展了一些关于水包围乃至直接覆盖炸药对较大比例距离处爆炸载荷影响的实验研究[1-5],大多数的研究表明用水包围炸药可以大大消减爆炸冲击波[1-4],而全尺寸大当量置水爆炸实验却表明水消减冲击波的效果较低[5]。因此,需要进一步开展水包覆炸药的置水爆炸研究,研究该消波方式对爆炸载荷的作用机理。

本文中,采用在钢筒内用水直接包覆炸药的方式进行比例距离为 0.128 m/kg$^{1/3}$ 的爆炸实验,用光纤位移干涉仪测量爆心环面径向速度和钢筒变形,分析炸药被水直接包裹时近距离爆炸载荷对钢筒的作用过程,评估盛水结构材料对小比例距离的爆炸载荷和钢筒响应的影响,探讨爆炸初期水与冲击波和空气的作用过程,以期为进一步掌握炸药被水包围时水对爆炸冲击波的作用机理提供参考,并为下一步的数值模拟提供基本的实验数据。

1 实验方法

实验示意图如图 1 所示:钢筒材料为 20 钢,两端开口,内径为 100 mm,壁厚 12 mm,筒长 400 mm;光纤位移干涉仪[6]用于测量爆心环面钢筒外壁的动态速度和钢筒动态变形;爆炸源采用由柔爆索中心引爆的球形组装炸药,且各次实验中的柔爆索长度相同。球形起爆药球用微米级 PETN 粉压制而成,较大的主炸药用密度约为 1.67 g/cm^3 的 TNT50/RDX50,组装炸药总的爆炸威力约为 60 g TNT 当量。已有的实验表明,这种结构的装药爆轰波球形度都较好[7]。置水实验时,将球形装药放入注满水的薄壁球壳的中心,实现爆心对称约束水的目的,使爆炸冲击波与水的作用过程具有良好的对称性,见图 2。

* **收稿日期**:2014-11-25;**修回日期**:2015-04-29
基金项目:国家自然科学基金项目(11172245)
第一作者:徐海斌(1980—),男,博士研究生,xuhaibin@nint.ac.cn。

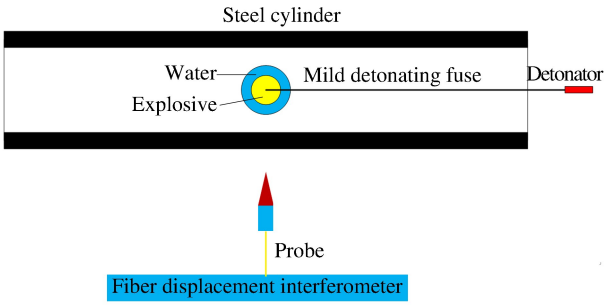

图 1 钢筒置水爆炸示意图

Fig. 1 Schematics of the explosion with water in a steel cylinder

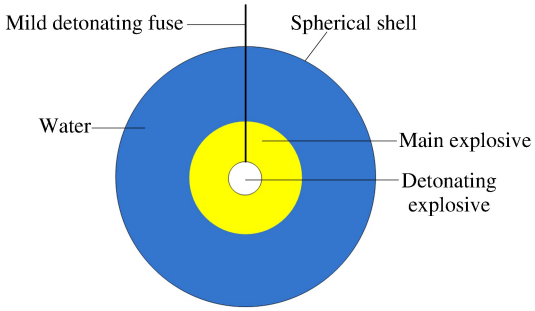

图 2 置水球形装药示意图

Fig. 2 Schematics of the spherical charge surrounded by water

薄壁球壳作为盛水结构,需要有一定的刚度和强度,以确保注水后的球壳仍基本保持球形。实验中,分别采用了玻璃球壳和 PVC 球壳作为置水装置,置水量约为 120 g,水的质量和炸药 TNT 当量的比值(简称水药比)为 2,如图 3 所示,炸药球直径为 38 mm,“水球”外径为 66 mm。PVC 的密度约为 1.4 g/cm^3,玻璃的密度约为 2.5 g/cm^3;PVC 壳壁的厚度小于 0.18 mm,质量约为 3 g;玻璃壳壁的厚度约为 0.5 mm,质量约为 20 g。共进行了 1 次无水爆炸和 2 次置水爆炸实验。实验中,采用雷管末端电探针信号作为零时信号,无水实验中在炸药表面布置探针测时;PVC 壳置水实验中采用与无水爆炸实验中长度相同的柔爆索,据此确定爆轰波到达炸药球表面的时刻与无水爆炸时的相同。

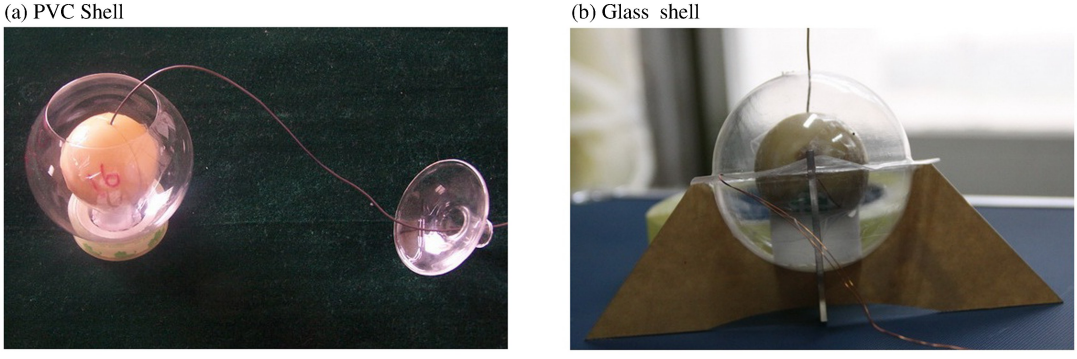

图 3 待注水的爆炸装置

Fig. 3 The spherical charge placed in the unfilled shell

2 实验结果及分析

2.1 置水前后钢筒外壁的质点速度

图 4 给出了光纤位移干涉仪实测的无水和置水爆炸时爆心环面钢筒外壁质点速度曲线,速度正值表示钢筒外壁向外扩张。可见,无水爆炸实验中,钢筒外壁质点速度振荡上升,钢筒进入外扩阶段,速度最大值约为 24.6 m/s;之后,钢筒外壁速度下降,进入收缩阶段;随着速度升为正值,钢筒又进入外扩阶段;如此反复,即钢筒发生“呼吸振动”,其周期约为 70 μs,速度上下峰值均随振荡逐渐减小。PVC 球壳和玻璃球壳置水爆炸时,爆心环面钢筒外壁的质点速度最大值分别为 69.9 和 132.8 m/s,分别约为无水爆炸时的 3 倍和 5 倍。这说明该条件下的置水爆炸对钢筒内壁产生的压力显著大于无水爆炸,PVC 球壳置水爆炸时钢筒同样发生“呼吸振动”。图 4(b)中玻璃球壳置水爆炸时爆心环面钢筒外壁质点速度曲线的初始和结束部分存在大量的毛刺,这主要是因为在这 2 个时段探头接收到的信号光太弱,降低了信号的对比度,在将频率-时间对提取出来换算成速度-时间对的数据处理过程中产生了这些毛刺。

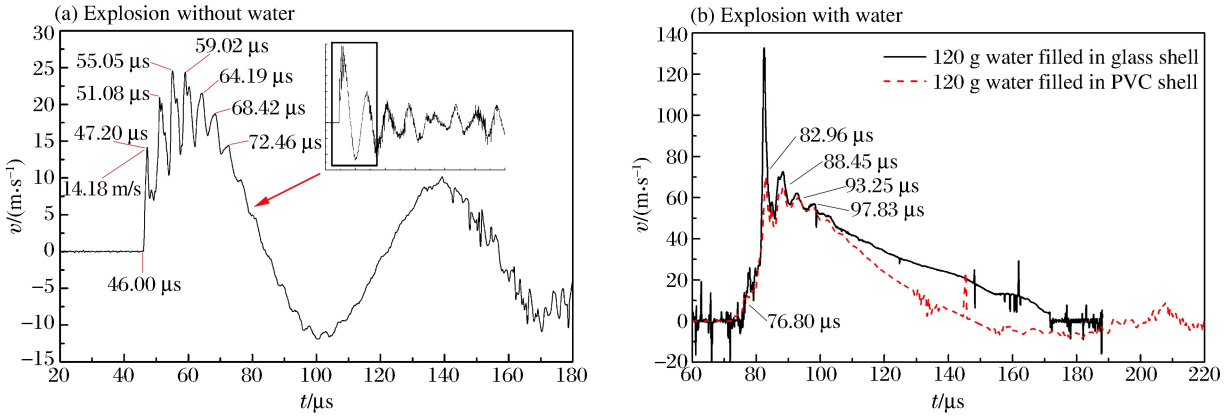

图 4　爆心环面钢筒外壁质点速度-时间曲线

Fig. 4　Particle velocity-time curves of the steel-cylinder outer surface centered at the explosion

2.2　置水前后钢筒的变形

钢筒在小比例距离爆炸加载下会发生复杂的弹塑性变形，并在置水爆炸实验中出现了破裂现象。PVC 球壳置水实验后钢筒爆心环面环向变形基本均匀，而玻璃球壳置水实验后钢筒爆心环面环向变形不均匀，如图 5 所示。钢筒上下变形差异是由炸药上下侧玻璃球壳厚度不同引起的，玻璃球壳端盖增加了炸药上侧的玻璃质量，使向上的爆炸威力增强。

图 6 是由实测速度曲线积分得到的爆心环面钢筒外壁被测点的位移曲线。可见，无水爆炸时钢筒测点径向位移在 40 μs 内从零增至约 0.5 mm，钢筒变形平均速度为 12.5 m/s，之后降至约 0.25 mm，然后发生上下振荡，这是由钢筒的呼吸振动所致，其稳定值约为 0.29 mm，表明钢筒产生了塑性变形。PVC 球壳和玻璃球壳内置水爆炸时钢筒径向位移分别在 75 和 100 μs 内从零升至 2.2 和 3.1 mm，钢筒变形平均速度分别为 29、31 m/s，PVC 球壳内置水爆炸加载下钢筒径向位移曲线同样出现上下振荡的现象，其稳定值约为 1.94 mm。可见，用玻璃球壳内置水爆炸时钢筒变形量最大，变形速度最快；无水爆炸时钢筒变形量最小，变形速度最慢。

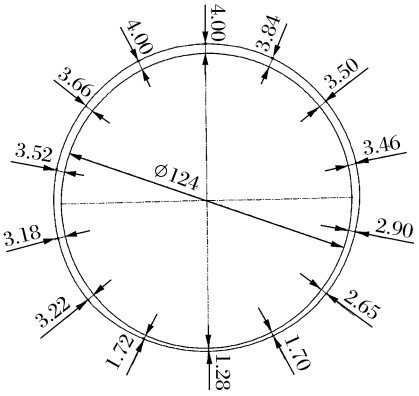

图 5　玻璃壳置水爆炸钢筒爆心环面外壁径向位移

Fig. 5　Radial displacement of the steel-cylinder outer surface centered at the explosion with water in the glass shell

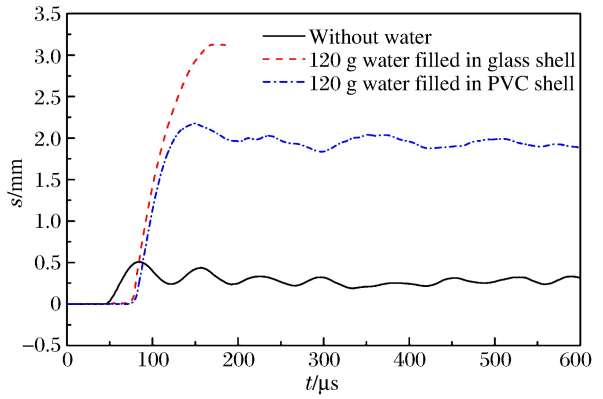

图 6　不同情况下爆心环面钢筒外壁径向位移-时间曲线

Fig. 6　Radial displacement-time curves of the steel-cylinder outer surface centered at the explosion in different cases

根据实测的速度曲线，得到的无水和置水爆炸实验结果见表 1，表中 m_e 为炸药 TNT 当量，m_w 为置水量，c_c 为冲击波走时，v_p 为峰值速度，s_s 为稳定位移，γ 为钢筒环向塑性变形，表中还列出了以往实验中 120 g TNT 当量和 180 g TNT 当量炸药无水爆炸时长 600 mm 的钢筒的变形情况作为参考[8]，该钢筒其余参数与长 400 mm 的钢筒的相同。可见，水药比为 2 的 60 g TNT 当量炸药置水爆炸与 120 g TNT 炸药无水爆炸时钢筒的塑性变形基本相同，约为 180 g TNT 炸药无水爆炸时钢筒塑性变形量的

1/2,但置水爆炸时钢筒还出现了轴向破裂现象,120 g TNT 和 180 g TNT 当量炸药爆炸时没有观察到钢筒出现裂缝。结构在高速冲击下的剪切破坏与材料细观上的绝热剪切带有关[9]。本实验中出现钢筒小变形断裂的原因可能是水撞击产生高应变率,导致材料塑性降低,形成的绝热剪切带使钢筒断裂。

表 1 无水和置水爆炸实验结果

Table 1 Measured results of explosion without and with water

m_e/g	m_w/g	c_c/μs			v_p/(m·s^{-1})	s_s/mm	γ/%
		雷管爆炸	药球表面	钢筒外壁			
60	0	0	39.6	46.0	24.6	0.29	0.47
60	120(玻璃)				132.8	3.12*	5.0*(有裂缝)
60	120(PVC)	0	39.6	72.1	69.9	1.94	3.1(有裂缝)
120	0				73$^{\Delta}$	2.28$^{\Delta}$	4.2$^{\Delta}$
180	0				110$^{\Delta}$	5.15$^{\Delta}$	8.3$^{\Delta}$

* 指按峰值变形获得的数据;Δ 指轴向长度为 600 mm 的钢筒用探针测量的数据,仅作参考。

上述结果说明,相同炸药下有水爆炸时钢筒的变形时间更长、变形速度更高,即爆炸对钢筒的作用力更大;水药比为 2 的玻璃球壳置水爆炸时钢筒变形量最大,约为无水爆炸时的 10 倍;PVC 球壳置相同水时约为无水爆炸时的 8 倍,即水会大大增强爆炸对该比例距离处钢筒的冲量作用。相比 PVC 球壳,用玻璃球壳作为盛水结构对爆炸的增强作用更显著。

分析认为,当水中的冲击波传到盛水结构时,发生加载或卸载反射,并向盛水结构中透射冲击波。该透射冲击波到达自由面时,发生卸载反射,盛水结构向外膨胀且质点速度增加,当反射的卸载波回到盛水结构与水的交界面时将反射冲击波。因此,在盛水结构中将来回反射卸载波和冲击波,盛水结构的速度随着反射次数增加而增加,每次反射的速度增量与两处界面的反射系数有关。当盛水结构的波阻抗(大于水的波阻抗)增加时,盛水结构加速更快,因此对爆炸载荷的影响也较大。当盛水结构的波阻抗小于水的波阻抗时,盛水结构的速度增加变缓,对爆炸载荷的影响减小。

盛水结构的材料密度越低、厚度越小则其质量越小、波阻抗越小,动能就越小,对钢筒壁面撞击的作用力越小、作用时间越短,因此对爆炸载荷的影响也越小。

3 钢筒破坏过程探讨

3.1 无水爆炸

由图 4(a)可见,无水爆炸时钢筒在速度波形的第 1 个 1/4 周期内,发生受迫振动,速度振荡上升后下降,振荡周期约为 4.2 μs,该振荡应是由于应力波在内外壁面来回反射造成的,振荡周期受加载波与卸载波衰减和相互叠加影响;其后,钢筒主要表现为自由振动。

由表 1 可知,无水爆炸时冲击波从炸药表面至钢筒外壁共用时 6.36 μs,弹性应力波以 5.0 km/s 在钢筒内外壁传播的耗时约为 2.4 μs,得到冲击波由炸药表面至钢筒内壁的走时为 3.96 μs,炸药表面距钢筒内壁约 30 mm,因此在该传播距离上的空气冲击波平均速度约为 7.6 km/s。炸药爆炸初期,爆炸产物紧跟空气冲击波,两者没有完全分离;之后,冲击波和爆炸产物才因速度不同而相距越来越远[10]。速度波形中 46.0 μs 开始的幅值约为 14.2 m/s 的第 1 个速度脉冲应是由空气冲击波引起的,根据强间断柱面波在弹性介质中的传播规律,沿径向有公式[11]:

$$v_r = -\sqrt{a/r}\,p_0/(\rho_0 c_0) \tag{1}$$

式中:v_r 指半径为 r 处的径向质点速度,a 为钢筒内半径,p_0 为钢筒内壁的应力,ρ_0 和 c_0 分别为钢筒的初始密度和波速。

得到钢筒内壁处的应力即空气冲击波在内壁的反射超压峰值约为 310 MPa,估算该冲击波到达钢筒内壁时波速约为 6.0 km/s;第 2 个速度峰值 20.9 m/s 可能是由于紧跟空气冲击波的爆轰产物的撞击引起的,对应的压力峰值约为 457 MPa;后继的波峰可能是钢筒壁面应力波复杂叠加导致的。

3.2　置水爆炸

图 4(b)中，玻璃壳和 PVC 壳 2 种置水方式下实测的速度波形均没有由零直接上升至速度峰值，速度上升沿从 76 μs 开始出现幅值接近 15 m/s、持续约 4 μs 的相对平缓的“小台阶”，且最大速度比无水爆炸时的速度增加很多。下面以 PVC 置水为例，对置水爆炸时的作用过程进行分析，如图 7 所示。

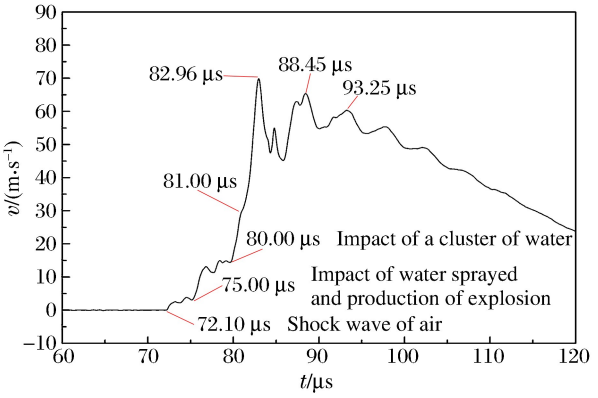

图 7　PVC 壳置水爆炸实测的钢筒外壁质点速度-时间曲线

Fig. 7　Measured particle velocity-time curve of the steel-cylinder outer surface centered at the explosion with water in the PVC shell

置水爆炸时，爆炸冲击波传播到水后，高温高压气体推动水运动，同时在水中形成冲击波，使水的动能和内能均开始增加，一部分爆炸能量被水吸收，随着水团向外扩散，气体温度、压力逐渐下降。装药附近水中的冲击波速度可达 6.0 km/s，随着冲击波在水中传播，波阵面的压力和传播速度快速下降，当冲击波到水/空气界面即水的自由面时，冲击波在水自由面发生反射，自由面水的质点速度约为入射波后水的质点速度的 2 倍，因此自由面水的质点速度与入射冲击波中的压力基本成正比。如果入射冲击波是按指数关系衰减的，则压力由其最大值迅速减小，导致距自由面不同位置处的水的运动速度不同，从而使自由面附近的水点向空气喷射、飞溅。

随着水的喷射、飞溅、空气扰动和水的扩散运动等造成水的破碎，高温高压气体通过水的“空气缝隙”向前运动，并在水的前方形成新的冲击波，该冲击波压力幅值相比刚传播到水时的冲击波压力已大大降低，但其传播速度比水飞溅的运动速度快，因此该冲击波先于水作用到钢筒内壁产生一个弹性的应力波。3 μs 后，质点速度大小不同的飞溅水点和部分爆轰产物的混合物陆续撞击到钢筒内壁，撞击作用持续约 5 μs。随后基本成片的水撞击到钢筒内壁，对应图 7 中 80 μs 开始的上升沿较陡的速度波形；在 81 μs 时速度波形有一个拐点，由式(1)得到对应的应力约为 660 MPa，可能是由材料发生动态屈服引起的；之后速度快速上升至峰值，相应的应力值约为 1.4 GPa，可以推算出撞击时水的速度约为 535 m/s，波速约为 2.56 km/s。此后钢筒外壁速度因卸载波的影响开始振荡下降，随着时间增加，外壁面的速度振荡也随之趋于平缓。

由钢筒外壁质点速度 3.8 m/s，入射波质点速度应为 1.9 m/s，代入式(1)，算出该弹性波的压力峰值约为 80 MPa，此值为穿过水“缝隙”形成的空气冲击波反射超压峰值。同理，钢筒外壁速度峰值 13 m/s对应的压力峰值约为 284 MPa，应为飞溅水点和部分爆轰产物的“混合物”对钢筒的作用强度。假定“混合物”以水为主，根据“混合物”与钢筒撞击面上动量守恒条件，得到飞溅水点撞击钢筒的质点速度约为 197 m/s，该值显著低于水的峰值质点速度，说明“混合物”应是以爆轰产物为主。其作用强度低于没有水的爆轰产物造成的影响，可能是水对爆轰产物的阻挡作用所致。

根据球形冲击波在水中传播的峰值压力计算公式[11]：

$$p_m = A\,(r_0/r)^{\alpha} \tag{2}$$

式中：p_m 为压力峰值；r_0 为装药半径，取为 0.019 m；r 为测点距爆心距离，取为 0.033 m；A 和 α 为与炸药相关的参数，本实验中由能量相似原则计算得到系数 A 为 12.36 GPa，α 为 3，得到冲击波在水中传播至空气与水的界面附近时的峰值压力约为 2.36 GPa。

根据水的冲击压缩特性[12]，水与空气界面处水的初始质点速度约 1.56 km/s，此处以自由面的质点速度加倍进行了计算。当冲击波压力为 1～20 G Pa 时，水中冲击波平均速度取为 4.46 km/s。将爆轰波到达炸药表面的时刻定义为零时刻，根据上述分析，由表 1 可得爆炸产生的冲击波作用到钢筒外壁的时刻约为 35.4 μs，减去冲击波在水中和钢筒壁面的传播用时，得到飞溅水点由水表面运动至钢筒内壁用时 29.5 μs，相应的平均速度约为 576 m/s。该平均速度小于水与空气界面处的初始质点速度，其原因可能有：(1)界面处的初始质点速度是依入射冲击波压力峰值得到的，而后续的质点速度按指数关

系衰减,因此飞溅水整体的平均初始速度低于界面处的初始质点速度;(2)水滴在空气中高速运动时受空气阻力作用速度有一定的下降;(3)利用经验式(2)计算近场爆炸的压力存在一定的误差,自由面质点速度加倍的处理方式也会导致初始质点速度在一定程度上被高估。

通过上述分析,进一步认识水对爆炸冲击波的作用机理。炸药周围置 2 倍水后,水运动至比距离为 0.128 m/kg$^{1/3}$ 处时已经发生分裂、破碎等过程,爆炸能的一部分已经转化为水的运动能并与空气发生摩擦、减速从而消耗能量。在水中传播的冲击波使空气界面处的水发生溅射、飞散、破裂之后,高温高压的气态爆轰产物通过水的"裂缝"在空气中形成冲击波,因此该冲击波形成时间晚于无水爆炸,这种形成方式同样限制了冲击波强度,延长了冲击波的持续时间。由于从爆心至该比例距离处的整个衰减过程很短,水仍具有较大的动能,会与爆炸形成的空气冲击波在较短时间内共同作用目标物,产生巨大的冲击作用。可见,如果在开阔空间置水爆炸时,此后运动速度高于水的空气冲击波将进一步拉大与水(滴)的距离,随着水在空气作用下发生减速运动,水的运动能逐渐降低,在高温高压气体推动和空气阻碍的共同作用下,不同大小和初始速度的飞溅水进行不同程度的减速,从而在传播方向上进一步分散,即水的冲击作用幅值降低、作用时间增加[13]。在更大比距离处,水的运动能将可忽略,此时空气冲击波占主导作用,但由于一部分爆炸能被水消耗,因此冲击波幅值显著小于无水爆炸空气冲击波。

关于在水直接包覆下炸药爆炸的数值模拟问题:一方面,根据置水爆炸获取的钢筒外壁速度曲线可以确定,水在 0.128 m/kg$^{1/3}$ 处已经开始分裂,环向分布不均匀,因此原本以球对称传播的爆炸冲击波各个方向的幅值不同,且各方向的水的动能也不同,说明在较小比例距离处不同方向的压力和冲量很可能会有较大偏差;另一方面,不同于无水爆炸,由于爆炸后高温高压气体和水复杂的作用过程导致空气冲击波形成过程与水的破碎密切相关,该冲击波是由高温高压气体通过水的"裂缝"形成的,而采用一维数值模型会使水始终处于高温高压气体和空气之间,将会改变置水爆炸的作用过程,使爆炸冲击波的消减效果出现偏差。上述分析说明,水包覆下炸药爆炸的数值模拟应采用二维以上模型,条件许可时最好用三维模型以便获取更合理的计算结果。

4 结 论

通过比例距离为 0.128 m/kg$^{1/3}$ 的钢筒内爆炸实验,探讨了无水和水直接包覆炸药爆炸时钢筒的破坏过程,依据钢筒径向速度曲线,分析了水与冲击波和空气的作用机理,结果表明:(1)置水爆炸时,水中传播的冲击波使空气界面的水发生溅射、飞散、破裂后,高温高压气态爆轰产物通过水的"裂缝"在空气中形成冲击波,相比无水爆炸,这种形成方式使该冲击波出现更晚、强度更低、持续更久;(2)在水包覆下炸药爆炸的数值模拟中,由于空气冲击波在水发生破碎之后形成,爆炸初期不同方向的压力和冲量是不同的,而采用一维模型会改变置水爆炸的作用机理,扩大较小比例距离处的计算偏差,应采用二维或三维模型以获取更合理的计算结果;(3)玻璃壳和 PVC 壳内置水直接包覆炸药时,该比例距离处的钢筒变形量分别是无水爆炸时的 10 倍和 8 倍,波阻抗大于水的波阻抗的盛水结构材料密度越低、厚度越小对爆炸载荷的影响越小;(4)用光纤位移干涉仪可以以非接触的方式获取钢筒径向质点速度、位移时程曲线,可作为爆炸力学重要的动态测试技术,尤其适用于动态大冲量加载下小型目标物的大变形测量。

参考文献:

[1] Keenan W A, Wager P C. Mitigation of confined explosion effects by placing water in proximity of explosions[C]// Proceedings of the 25th DoD Explosives Safety Seminar. Anaheim, CL, USA, 1992.

[2] Forsen R, Hansson H, Carlberg C. Small scale tests on mitigation effects of water in a model of the KLOTZ Club tunnel in Aelvdalen[C]// Proceedings of the 27th DoD Explosives Safety Seminar. Las Vegas, USA, 1997.

[3] Chabin P, Pitiot F. Blast wave mitigation by water[C]// Proceedings of the 28th DoD Explosives Safety Seminar. Orlando, FL, USA, 1998.

[4] 毛益明,方秦,张亚栋,等. 水体与混凝土防爆墙消波减爆作用对比研究[J]. 兵工学报,2009,30(S2):84-89.
Mao Yiming, Fang Qin, Zhang Yadong, et al. Comparison investigation on mitigation effect of water and concrete

explosion-proof walls[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(S2):84-89.

[5] Hansson H, Forsen R. Mitigation effects of water on ground shock: Large scale testing in alvdalen[R]. PB97206965, 1997.

[6] 杨军，王克逸，徐海斌，等. 光纤位移干涉仪的研制及其 Hopkinson 压杆实验中的应用[J]. 红外与激光工程，2013，42(1):102-107.
Yang Jun, Wang Keyi, Xu Haibin, et al. Development of an optical-fiber displacement interferometer and its application in Hopkinson pressure bar experiment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1):102-107.

[7] 张德志，钟方平，王占江，等. 柱形爆炸容器内壁载荷研究实验技术[C]//第四届全国爆炸力学实验技术交流会论文集. 福建：中国力学学会爆炸力学实验技术专业组，2006:237-241.

[8] 秦学军，张德志，杨军，等. 内部爆炸作用下钢筒变形过程的电探针测量技术[J]. 爆炸与冲击，2014，34(1):115-119.
Qin Xuejun, Zhang Dezhi, Yang Jun, et al. Electric probe measurement technique on deformation process of cylindrical steel shell under inside-explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(1):115-119.

[9] 马利，胡洋，辛键，等. 圆柱形爆炸容器绝热剪切瞬态失效过程[J]. 爆炸与冲击，2012，32(2):136-142.
Ma Li, Hu Yang, Xin Jian, et al. Transient failure process of explosion containment vessels subjected to adiabatic shear[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(2):136-142.

[10] 刘文祥，张德志，钟方平，等. 球形和等长径圆柱装药在爆炸近区内载荷差异的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2013，33(3):330-336.
Liu Wenxiang, Zhang Dezhi, Zhong Fangping, et al. Experiment investigations on normal reflected blast wave near the spherical explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(3):330-336.

[11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2010:228-234.

[12] 奥尔连科 Л П. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011:606-610，1330-1331.

[13] 徐海斌，张德志，秦学军，等. 炸药周围水层对空气冲击波反射超压影响的实验研究[J]. 兵工学报，2014，35(7):1027-1031.
Xu Haibin, Zhang Dezhi, Qin Xuejun, et al. An investigation on mitigation effect of water surrounding an explosive on reflected overpressure of shock wave[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(7):1027-1031.

Experimental study for effects of water and its container on explosion loading near explosive

Xu Haibin[1,2], Zhong Fangping[2], Yang Jun[2], Zhang Dezhi[2], Qin Xuejun[2], Liu Junling[2], Shi Guokai[2], Liang Zhigang[2], Shen Zhaowu[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui*, *China*;
2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: To explore the mitigating mechanism of detonation of a high explosive surrounded by water, experiments of explosion with and without water were carried out in an open-ended steel cylinder. The particle velocity and the displacement of the outer surface of the cylinder were obtained by an optical-fiber displacement interferometer. The results indicate that shock wave will not be formed in air by the product of detonation until the water surrounding the product is separated to a fissure, which causes the later appearance and lower magnitude of shock wave with a longer duration compared with an explosion without water. It means that two-dimensional or three-dimensional numerical models are required to conduct the simulations of explosions with water. It is also observed that the augment of blast load decreases with the decrease of the density of the water container as well as its thickness.

Key words: mechanics of explosion; blast load; water; steel cylinder; particle velocity

（责任编辑　张凌云）