

炸药周围水层对空气冲击波反射超压影响的实验研究

徐海斌, 张德志, 秦学军, 刘峻岭, 史国凯, 刘文祥

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 通过在容器内用适量水包裹炸药进行水消减冲击波的爆炸实验, 研究水与炸药的质量比值、比例距离对冲击波反射超压的影响, 并对水消减冲击波的规律进行了分析。研究表明: 相比于无水爆炸, 置水后冲击波反射超压随比例距离增大呈先增后减趋势, 在比例距离为 $0.255 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时, 置水后的反射超压峰值均大于无水时的结果, 且随着水药比的增大而增大, 水药比为 6 时的压力峰值可达无水时的 8 倍; 当比例距离增大至 $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 时, 水可以显著降低反射超压峰值, 相比无水爆炸降幅可达 60%。

关键词: 爆炸力学; 水消波; 冲击波; 水药比; 爆炸容器

中图分类号: O383.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)07-1027-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.014

An Investigation on Mitigation Effect of Water Surrounding an Explosive on Reflected Overpressure of Shock Wave

XU Hai-bin, ZHANG De-zhi, QIN Xue-jun, LIU Jun-ling, SHI Guo-kai, LIU Wen-xiang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The mitigation effect of water on blast shock is investigated. The explosion is tested in a confined space without and with water in order to estimate the influences of the parameters, such as water-to-explosive weight ratio and scaled distance, on the reflected overpressure of shock wave. The results indicate that the reflected overpressure of explosion immersed in water firstly increases and then decreases with the increase in scaled distance compared with that without water. It is found that the reflected overpressure significantly increases with the increase in the water-to-explosive weight ratio when the scaled distance is not larger than $0.255 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$. Typically, the overpressure increases eight-fold when the ratio is 6. The overpressure can be decreased by 60% by using water when the scaled distance is $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$.

Key words: explosion mechanics; water mitigation effect; shock wave; water-to-explosive weight ratio; explosion vessel

0 引言

通过在爆炸物周围放置适量水来降低冲击波减轻爆炸的损害是国外近些年正在研究的一个新方

法^[1-4]。该方法可以减小爆炸物存储地点周围的危险区面积, 或提高爆炸物储存设施的储存量。水障碍物如水墙等搭建方便、成本低, 具有很强的可移动性, 因此具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172245)

作者简介: 徐海斌(1980—), 男, 助理研究员。E-mail: xuhaibin@nint.ac.cn;

张德志(1973—), 男, 研究员。E-mail: azhao@nint.ac.cn

Keenan 等^[1]通过置水前后的准静态气压及其冲量变化的实验研究验证了在炸药存储单元房间内用水墙隔爆的可行性,置水后气压降幅高达 90%; Chabin 等^[2]实验研究了水对比例距离不小于 $1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 处的自由场压力及其冲量的影响规律; Hansson 等^[3]在 KLOTZ-Club 隧道内 1 t 的 TNT 当量炮弹周围放置 2 t 水的全尺度实验中研究了置水前后隧道轴向不同距离处的准静态压力变化规律; Malvar 等^[4]在销毁弹药用的爆炸容器内炸药周围放水袋获取了准静态气压峰值 70% 的消减效果。毛益明等^[5]开展过用水墙消减爆炸冲击波的实验研究; 赵汉中^[6]依据国外的实验结果开展过封闭空间内水消波的数值模拟研究。国内外学者主要研究水对空间较大的准静态气压或比例距离较大的自由场压力的影响规律,对反射超压的研究极少,关于水对比例距离较小处 ($< 1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$) 冲击波影响规律的实验研究更为罕见。

本文通过在容器内将球形炸药放入球形约束的水中进行置水爆炸实验,测量了容器内壁反射超压,研究了水的质量与炸药 TNT 当量的比值(简称水药比)和比例距离不同对反射超压的影响,分析了不同水药比置水对不同比例距离处爆炸冲击波的消减规律。

1 实验说明

为了考核不同比例距离时炸药周围置水对反射超压的影响,评估置水消波效果,分别在 3 个容器内共进行了 4 种比例距离的置水爆炸实验,如图 1 所示。柱形容器内径为 100 mm,轴向内长约 1 m;球形容器内径为 523 mm;方形容器内部边长为 500 mm。历次爆炸实验的相关参数见表 1 所示。

实验中分别采用了 60 g、10 g 和 1 g TNT 当量的炸药作为爆炸源。60 g 和 10 g TNT 当量炸药由 1 g TNT 当量起爆药球与球形主炸药组合而成,1 g TNT 当量的起爆药球采用直径 1 mm、线装药密度为 0.5 g/m 黑索今的铅皮柔爆索中心引爆;置水实验时将爆炸源放入盛水的球形薄壁壳内中心处,确保炸药中心对称爆炸,如图 2 所示。实验中共采用了两种材料的盛水结构,分别为聚氯乙烯塑料(PVC)和玻璃。比例距离为 $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 的置水实验采用壁厚 $\leq 0.18 \text{ mm}$ 的 PVC 薄球壳,其余实验均采用壁厚约为 0.5 mm 的玻璃球壳,由于球壳壁厚与水球直径的比值较小,球壳本身质量大大低于水的质量,

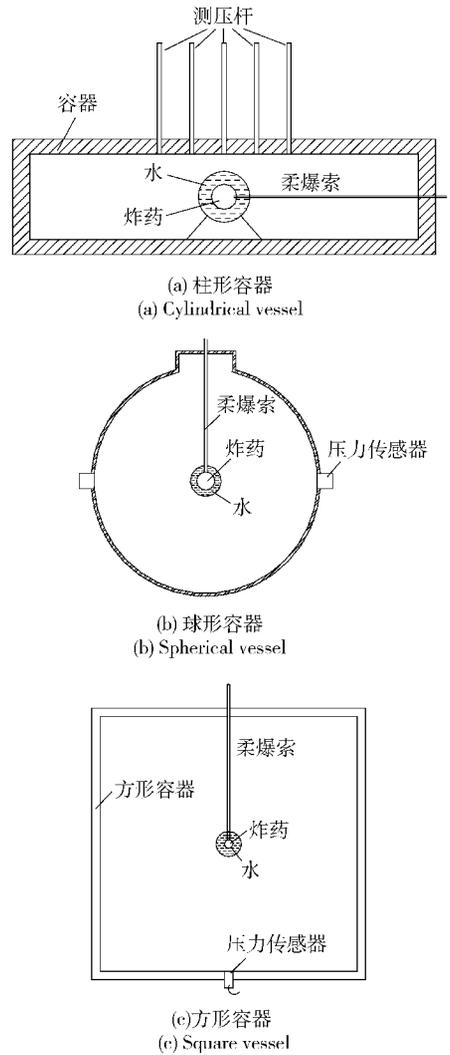


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schemes of the experimental setups

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

实验编号	TNT 当量/g	实验容器	比例距离/ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-\frac{1}{3}}$)	水药比
1	60	柱形容器	0.255	0
2	60	柱形容器	0.255	2
3	60	柱形容器	0.255	6
4	60	柱形容器	0.255	20
5	60	球形容器	0.668	0
6	60	球形容器	0.668	0
7	60	球形容器	0.668	4
8	10	球形容器	1.21	0
9	10	球形容器	1.21	4
10	10	球形容器	1.21	11
11	10	球形容器	1.21	20
12	1	方形容器	2.50	0
13	1	方形容器	2.50	10

加上玻璃抗拉性差,基本可以忽略球壳对实验结果的影响。

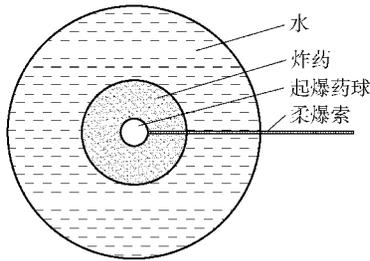


图2 置水实验的爆炸装置

Fig. 2 The spherical explosive immersed in water

柱形容器中,通过在容器爆心环面安装长度为0.5 m的压杆式压力测试系统^[7],测量容器内壁处冲击波反射超压,测点距爆心100 mm,比例距离约为 $0.255 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 。压杆为一细长弹性杆,爆炸载荷作用在杆的一端,产生一维弹性应力波,通过测量压杆近中间位置的应变,利用一维应力波理论可以得到爆炸冲击波作用在杆端的压力。

在球形容器和方形容器中,通过平齐安装方式将压电式压力传感器固定于容器壁面,测量容器内壁的反射超压。球形容器内安装药量分别为60 g和10 g TNT当量,比例距离分别为 $0.668 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 、 $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$,方形容器内安装药量为1 g TNT当量,比例距离为 $2.50 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 。

2 实验结果及分析

图3(a)、图3(b)和图3(c)分别是比例距离为 $0.255 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 、 $0.668 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 和 $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 处置水前后的反射超压曲线。图3(a)上图的压力曲线由压杆式的压力测试系统获取,其中负值的应力波为入射应力波经杆末端反射所形成,反射前后的应力幅值基本相同,且二者的时间差正是应力波在杆中传播所需的时间,说明该压杆测试系统工作正常。

由图3(a)可以看出,在比例距离为 $0.255 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 处,置水使反射超压显著增加,反射超压峰值约为无水时的8倍。置水实验中少数压力波形在最大峰值前已出现幅值相对较小的压力脉冲,见图3(a)下图,首个压力脉冲峰值约为126 MPa,其波形与无水爆炸的压力曲线基本相同,由冲击波幅值可以排除由于传入水中的冲击波透射到空气中形成的新的冲击波,因此推测,可能是当水层破裂后由炸药爆轰产生的高温高压气体穿过水层在水球外形成空气冲击

波,又由于水分散的偶然性,因此个别实验中面向“裂缝”的测点测取到该幅值显著的空气冲击波。之后压力出现幅值较高的负脉冲和震荡波形,可能是此时压杆发生了急剧振动影响了应变信号的正常测量。

在比例距离为 $0.668 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 处,置水爆炸时的反射超压峰值出现在首个波峰之后约 $25 \mu\text{s}$,置水时实测的反射超压峰值较无水爆炸大致相同。无水 and 置水爆炸反射超压的第1个周期内均出现了2个峰。分析认为,无水爆炸时第2个峰值应是球壳内凹的结构使测点周围的爆炸冲击波在测点汇聚而成;置水爆炸时,空气冲击波部分能量被转化为水的动能和内能,故第1峰低于无水爆炸第1峰,反射超压曲线在之后的几十微秒内维持10 MPa上下波动,期间出现的17.6 MPa的压力峰值可能是反射的空气冲击波因球形容器的内凹结构在测点处汇聚引起的,由于水对空气冲击波的衰减使冲击波速度降低,因此第2峰与第1峰的时间间隔为 $15 \mu\text{s}$,比无水爆炸的 $6 \mu\text{s}$ 更长,见图3(b),后续的压力波形出现不符合物理意义的振荡,应是传感器自身原因造成的。

在比例距离为 $1.21 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ 处,冲击波经球形容器内壁反射后在容器中心汇聚,之后又返回作用于容器内壁,如此来回多次后,容器内载荷分布相对均匀。水药比为11时,第2峰和第3峰分别约为首个波峰20%和15%,压力首个波峰、第2峰和第3峰约为无水爆炸的40%、25%和18%;压力第2峰和第3峰到达时间间隔分别约1.03 ms和1.16 ms,分别约为无水爆炸时的2.3倍和2.9倍,压力第2峰和第3峰的平均波速分别为500 m/s和450 m/s,见图3(c)。由图3(c)可见,水对该比例距离处的反射超压有明显的衰减效果,且随着时间推移水吸收的能量更多,使衰减效果更显著,容器内载荷分布趋于平稳的时间更短。

置水爆炸实验测得的大多数压力波形在峰值后出现剧烈的上下振荡现象,应是水滴或“水块”高速撞击传感器影响了压力测试系统的测量,对利用压力波形进行积分来获取冲量产生了不利影响。

表2为实验测得的置水前后不同比例距离处的反射超压峰值。由表2可见,绝大多数的反射超压峰值为压力波形的首波峰,分析认为容器形状对反射超压峰值的影响较少。置水爆炸过程分析如下:置水爆炸初期,爆轰波传播到水后在水中形成冲击波,向爆轰产物内部传入稀疏波。冲击波到达水与

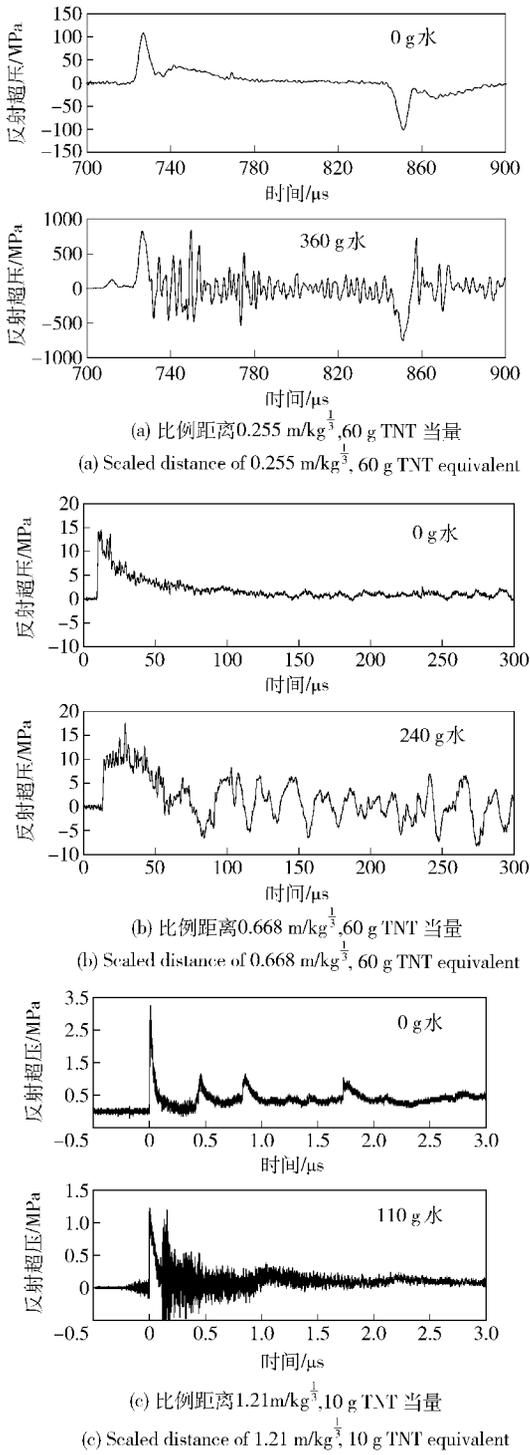


图 3 置水前后的压力曲线比较

Fig. 3 Comparison of pressure curves measured with and without water

空气界面时向水中反射形成稀疏波,自由面附近的水发生“层裂”,质点速度加倍,出现向空气中喷射、飞溅的现象,使炸药周围水层的完整性遭到破坏。水层破裂的时间与水药比或水层厚度有关。随着水层的破裂,部分爆轰产物穿过水的阻挡与飞溅水点混合,

并在水层外形成空气冲击波。其余爆轰产物继续推动水层加速运动。在小比例距离如 $0.255 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,因水相变耗散的能量较少,由于高速运动的“成片”水和爆轰产物对壁面的撞击,反而增强了爆炸的破坏威力,因此置水后的反射超压峰值均大于无水爆炸的结果,且随着水药比的增大而增大。之后,由于流动中的 Taylor 不稳定性和 Helmholtz 不稳定性的作用,高速运动的水发生分裂、破碎和雾化,不同大小、形状的水滴受不同惯性和空气阻力作用,开始前后分散,与空气冲击波逐渐拉开。在较大比例距离如 $0.668 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,空气冲击波首先到达壁面产生峰值为 10 MPa 的反射超压,之后由于爆轰产物和水点陆续撞击壁面,使反射超压曲线在之后的几十微秒内维持较高幅值上下波动。随着传播距离的增加,水在空气中进一步分裂、破碎、细化并减速,水相变、运动和分散的耗能过程对爆炸威力的消减作用开始凸显,在 $1.21 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,水药比 4 和 11 的反射超压峰值均比无水时降低了近 60%,消波效果显著。在 $2.50 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,水药比为 10 时的反射超压峰值比无水时降低了 30%,仍具有较明显的消波效果,但低于比例距离为 $1.21 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时的消波效果。

表 2 不同比例距离处实测的反射超压峰值

Tab. 2 Measured reflected overpressures at different scaled distances

实验编号	比例距离/ $(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	水药比	超压峰值/MPa
1	0.255	0	108
2	0.255	2	>534
3	0.255	6	830
4	0.255	20	880
5	0.668	0	16.5
6	0.668	0	14.6
7	0.668	4	17.6
8	1.21	0	3.25
9	1.21	4	1.25
10	1.21	11	1.24
11	1.21	20	<0.55*
12	2.50	0	0.346
13	2.50	10	0.235

注: * 指该值为通道未触发阈值,仅供参考。

图 4 表示不同比例距离处的反射超压峰值增减幅度与水药比之间的关系。由图 4 可见,用水直接包裹炸药进行爆炸的方法在不同的比例距离处对反射

超压的影响有可能是完全相反的。在比例距离较小处,炸药周围置水使反射超压幅值大幅上升,在比例距离较大处,适量水可以有效降低该处反射超压幅值,反射超压上升和下降幅度均与比例距离和水药比密切相关。

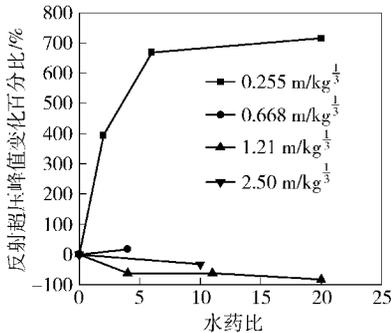


图4 不同比例距离处反射超压峰值变化百分比与水药比关系曲线

Fig. 4 The influence of water-to-explosive weight ratio on reflected overpressure at different scaled distances

将本文的实验结果与国外类似置水爆炸实验结果^[1,3]进行比较。从中可以看出,出现显著消波效果的国外置水实验场所主要为爆炸载荷密度较低的密闭空间^[1]或比例距离较大的狭长通道^[3],两种实验场所的比例距离均较大,它们的结果均与本文中比例距离较大的结果相符合。本文中水对反射超压的降幅最高为60%,文献[1]中水对准静态气压的降幅高达90%,造成这种差别的主要原因可能是文献[1]测取准静态气压时水相变发生得更充分。

在水消波措施的实际应用中,需要根据比例距离设计合理的水药比,有些场合甚至不能放置水来作为消波措施。

3 结论

在容器内通过将球形炸药浸入球形约束的水中进行水药比为0~20的置水爆炸实验,研究了水对0.255~2.50 m/kg^{1/3}的比例距离处爆炸冲击波反射超压的影响规律,可得出以下结论:

1) 在比例距离为0.255 m/kg^{1/3}处,反射超压峰值随水药比的增大而增大,置水后的压力峰值可达无水时的8倍。

2) 在比例距离为1.21 m/kg^{1/3}处,水药比低于20时置水可以显著降低反射超压峰值,相比无水爆炸降幅可达60%。

3) 水药比为10的置水对比例距离为2.50 m/kg^{1/3}处的反射超压峰值的消减效果降低至30%。

4) 反射超压上升和下降幅度均与比例距离和水药比密切相关。炸药周围置水使比例距离较小处反射超压幅值大幅上升,适量置水可以有效降低比例距离较大处反射超压幅值。

本文的实验结果可以为下一步的数值模拟研究提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Keenan W A, Wager P C. Mitigation of confined explosion effects by placing water in proximity of explosives [C] // The 25th DoD Explosives Safety Seminar. Anaheim, California; DoD, 1992: 311 - 339.
- [2] Chabin P, Pitiot F. Blast wave mitigation by water [C] // The 28th DoD Explosives Safety Seminar. Orlando, Florida; DoD, 1998: 1 - 10.
- [3] Hansson H, Forsen R. Mitigation effects of water on ground shock: large scale testing in Älvdalen, FOA-R-97-00510-311 [R]. Sweden: Swedish Defence Research Establishment, 1997: 1 - 26.
- [4] Malvar L J, Tancretto J E. Analytical and tests results for water mitigation of explosion effects [C] // The 28th DoD Explosives Safety Seminar. Orlando, Florida; DoD, 1998: 1 - 12.
- [5] 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(增刊2): 84 - 89.
MAO Yi-ming, FANG Qin, ZHANG Ya-dong, et al. Comparison investigation on mitigation effect of water and concrete explosion-proof walls [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 84 - 89. (in Chinese)
- [6] 赵汉中. 在封闭结构中水对爆炸冲击波的削波作用 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 253 - 256.
ZHAO Han-zhong. Water mitigation effects on explosions in confined chambers [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 253 - 256. (in Chinese)
- [7] 张德志, 李焰, 钟方平, 等. 冲击波壁面反射压力的压杆测试法 [J]. 兵工学报, 2007, 28(10): 1256 - 1260.
ZHANG De-zhi, LI Yan, ZHONG Fang-ping, et al. Pressure bar method to measure the reflected blast wave pressure in small scale distance [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(10): 1256 - 1260. (in Chinese)