

文章编号: 1001-1455(2002)03-0252-05

在封闭结构中水对爆炸冲击波的削波、减压作用

赵汉中

(华中科技大学力学系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 采用数值方法计算了封闭矩形空间中布置在炸药周围的水对爆炸冲击波的削波作用以及对于气室压力的削减作用。计算结果显示, 在各种不同的载荷密度和水/药质量比参数条件下, 冲击波峰值压力和气室压力均得到明显的削减。还计算了一个具有开口的模型隧道中水的削波作用, 并将计算结果与实验测量数据进行了比较。

关键词: 爆炸冲击波; 水的削波作用; 气室压力

中图分类号: O383.1 文献标识码: A

*

1 引言

爆炸物在存储过程中意外引爆通常会对周围的建筑物造成严重损害。从安全的角度出发, 人们在存有爆炸物的仓库周围划定危险区, 并严格限制危险区内的人员活动和建筑物数量。通过在爆炸物周围置放水来减轻意外爆炸的损害则是近年来正在研究的一个新方法^[1-5]。采用这个方法, 可以减小爆炸物仓库周围的危险区, 从而能够更有效地利用土地。

爆炸物引爆后释放出大量的能量, 并在瞬间产生极高的压力; 高压区迅速向周围扩散, 形成冲击波。当冲击波到达时, 当地压力立刻达到很高的峰值, 随后迅速下降, 最后逐渐稳定在一定的水平上。由于在爆炸过程中炸药释放出大量的热能, 爆轰物及周围气体产生膨胀, 所以在封闭空间中, 冲击波过后的压力将最终稳定在一个大大高于初始值的水平上。这个压力被称为气室压力。峰值压力的大、小直接反映出爆炸冲击波的强、弱, 它是衡量爆炸损害能力大、小的重要指标。然而, 尽管峰值压力很高, 但它维持的时间极短, 而在封闭结构中气室压力却将维持较长时间。在很多情况下, 封闭结构被内部爆炸摧毁并不是由于峰值压力瞬时超过了结构物的强度极限, 而是由于气室压力过高。所以在考虑内部爆炸对封闭结构的影响时, 气室压力的大、小也需要被作为一个重要指标。气室压力的大、小取决于初始时刻封闭空间中炸药质量的相对大、小, 同时也与爆炸过程中爆炸物的能量释放量有关。在封闭结构中的爆炸物周围置水, 不仅能够有效地削减爆炸冲击波, 也能够减小爆炸后的气室压力, 因为水在被加热、被压缩、被蒸发的过程中能吸收大量的能量。

文献[1]采用 MSC/DYTRAN 软件计算了开阔空间中水对爆炸冲击波的削波作用, 研究了置水量、炸药与水之间的空气间隙等参数对削波的影响规律。本文的前一部分将在此基础上采用 DYTRAN 研究矩形封闭结构中水对爆炸冲击波的削波作用, 以及对气室压力的削减作用。本文的后一部分将给出一个模型隧道中爆炸的算例, 并将数值计算结果与实验数据做比较。对隧道中爆炸的研究较之前一部分中对矩形封闭结构的研究具有更强的实用性。

2 状态方程

DYTRAN 通过欧拉型的有限体积法求解动量方程、能量方程、连续性方程和状态方程。对不同的流体介质(炸药爆轰物、水和空气)前三种方程相同, 但状态方程不相同。所以对状态方程要分别予以考虑。

* 收稿日期: 2001-05-14; 修回日期: 2001-07-10

作者简介: 赵汉中(1954—), 男, 博士, 副教授。

对于空气，使用理想气体的状态方程

$$p = (\gamma - 1)(\rho / \rho_0)E \tag{1}$$

式中：气体常数 $\gamma=1.4$ ； ρ 是空气密度， ρ_0 是初始密度， E 是单位体积气体的内能。

炸药的引爆过程可以根据 Chapman-Jouget 条件和 Rankine-Hugoniot 关系来模拟。炸药全部引爆后，其爆轰物的压力可以用标准 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 方程来计算。JWL 方程可以被表示为

$$p = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{2}$$

式中： A, B, ω, R_1 和 R_2 是常系数，由实验确定； $V=v/v_0$ ， v_0 和 v 是爆炸前、后炸药的比容； E 是炸药的内能。以上 JWL 方程中的系数及炸药的参数可以由手册中查出。

对于水，我们使用了一个多项式形式的状态方程

$$p = a_1 \mu + a_2 \mu^2 + a_3 \mu^3 + (b_0 + b_1 \mu + b_2 \mu^2) \rho_0 E \tag{3}$$

式中： $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ ；系数 $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$ 可以由对实验数据的拟合来确定。本文计算中系数取值于参考文献[6]。

3 矩形封闭结构中水的削波、减压作用

矩形封闭结构及炸药的布置如图 1 所示。结构的壁面被假设为刚性的。炸药为 PETN，初始时刻它具有与矩形空间相似的形状，并被放置在矩形空间中地面的中央。计算将比较置水和不置水的不同情况。置水时，水以等厚度布置在炸药的周围。将着重考虑载荷密度(即，炸药 TNT 当量/封闭空间体积)和水/药质量比(水质量/炸药 TNT 当量)对削波、减压的影响规律。

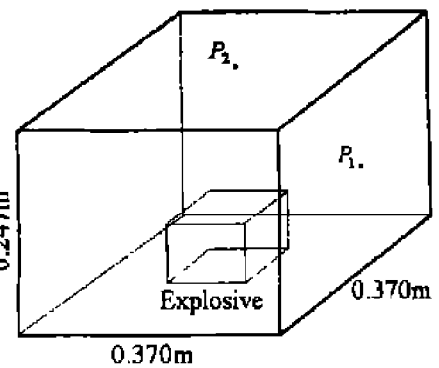


图 1 矩形封闭结构

Fig.1 Confined cube chamber

3.1 水的削波、减压作用

图 2 和图 3 分别给出载荷密度为 $1.03\text{kg}/\text{m}^3$ 时矩形侧面中心点(在图 1 中标为 P_1)上和上面中心点(P_2)上的压力曲线。置水情况下，水/药质量比为 3.07。从图中可以看出，置水后， P_1 点的峰值压力从大约 10MPa 下降为 3MPa； P_2 点的峰值压力从大约 13.7MPa 降为 4.5MPa。水对爆炸冲击波的削波作用显而易见。另外，从图 2、图 3 中的曲线也可以看出，水还将冲击波的到达时间明显推迟。冲击波过后， P_1 、 P_2 点的压力仍然上、下波动，但波动幅度越来越小，两个点上的压力最终都将趋向于同一定值，这就是气室压力。不置水时，气室压力大约是 1.9MPa，置水后则降为 1.4MPa。

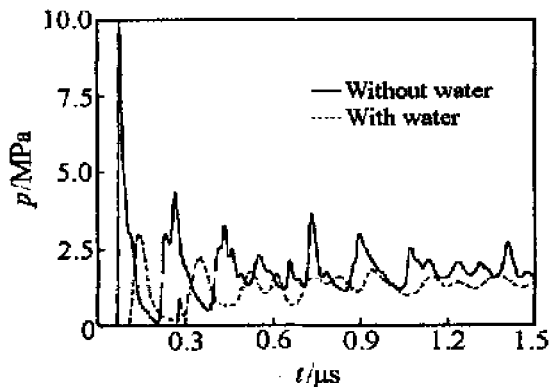


图 2 矩形封闭结构中 P_1 点的压力曲线

Fig. 2 Pressure curves at point P_1 in the confined cube chamber

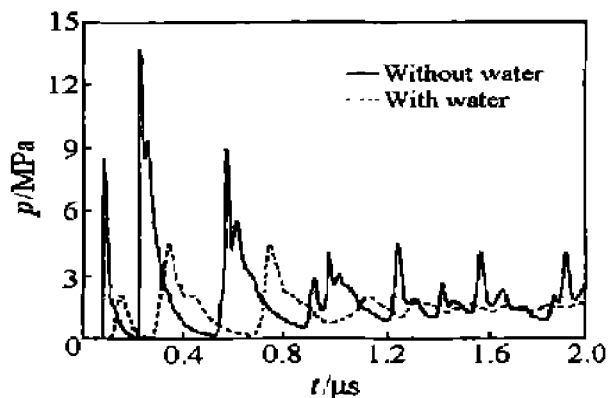


图 3 矩形封闭结构中 P_2 点的压力曲线

Fig. 3 Pressure curves at point P_2 in the confined cube chamber

表 1 列出了三种载荷密度 (1.03, 4.75, 9.80 kg/m³) 下 P_1 、 P_2 点上的峰值压力和封闭结构中的气室压力。置水情况下, 水/药质量比均为 3.07。从表中的数据可以看出, 置水后峰值压力和气室压力均有不同程度的降低。峰值压力的降低幅度介于 11% 与 70% 之间; 而气室压力的降低幅度则介于 26% (对载荷密度 1.03 kg/m³) 与 34% (对载荷密度 9.80 kg/m³) 之间。

表 1 封闭结构中不同载荷密度下的峰值压力和气室压力 (水/药质量比为 3.07)

Table 1 The peak pressure and gas pressure in the confined chamber of various loading densities (water/explosive ratio is 3.07)

载荷密度 (kg/m ³)	P_1 点的峰值压力/MPa		P_2 点的峰值压力/MPa		气室压力/MPa	
	不置水	置水	不置水	置水	不置水	置水
1.03	10.0	3.0	13.7	4.5	1.9	1.4
4.75	18.7	11.9	39.7	35.2	7.1	4.8
9.80	30.1	19.1	64.1	54.4	14.5	9.5

置水后峰值压力和气室压力明显降低是由于炸药周围的水不仅吸收了爆炸所产生的部分动能, 它通过被压缩以及被加热还吸收了大量的热能。炸药周围的水被加热后还会蒸发。因为蒸汽的焓远大于水, 蒸发过程也需要吸收大量的热能。有人还认为, 水在爆炸高温下产生的蒸气阻隔氧气供应以及水通过吸收热量对炸药爆轰物降温, 使爆轰物不能充分燃烧或者使燃烧过程减缓。这也是水能够减小爆炸压力的原因^[3]。不过目前还没有人能够通过实验或者通过理论对这一部分作用做出“定量”的分析。

3.2 水/药质量比对削波、减压作用的影响

表 2 列出了几种不同的水/药质量比情况下, P_1 、 P_2 点上的峰值压力和封闭结构中的气室压力。现在载荷密度被固定在 9.80kg/m³。从表中可以看出, 在水/药比为 2.03 时, 相对于无水情况 (水/药比为 0), P_1 、 P_2 点的峰值压力减小量最大, 分别为 47% 和 46%。水/药比再增加到 3.07, 峰值压力反倒增加了。这可能是因为在大量置水情况下, 水的厚度大, 它离 P_1 、 P_2 点所在的壁面也较近, 因此在水充分蒸发之前将会有更多的水-汽混合物“撞击”在壁面上。水-汽混合物的密度远比气体大, 在撞击过程中其动量的变化使壁面的压力上升。

表 2 封闭结构中不同水/药质量比下的峰值压力和气室压力 (载荷密度为 9.80kg/m³)

Table 2 The peak pressure and gas pressure in the confined chamber of various water/explosive ratios (loading density is 9.80kg/m³)

水/药质量比	P_1 点的峰值压力/MPa	P_2 点的峰值压力/MPa	气室压力/MPa
0.00	30.1	64.1	14.5
1.11	22.5	35.4	11.0
2.03	16.0	34.6	10.0
3.07	19.1	54.4	9.5

气室压力随着置水量的增加而逐渐减小, 因为较多的水能吸收更多的爆炸能量。不过当置水量达到一定程度后, 再增加置水量对进一步削减气室压力所起的作用会越来越不明显。因为置水过多, 炸药爆轰物与水之间的能量交换将不会那么充分。

4 模拟隧道中水的削波作用

图 4 是 ETSC '98 实验^[2]所采用的模型隧道系统的平面示意图。整个系统由主隧道 (图中标为 A 的部分)、分隧道 (图中 B 部分) 和三截支隧道 (C, D, E 部分) 组成。它们分别由半圆截面的厚钢管焊接而

成。主隧道直径 0.4m, 长 1.2m; 分隧道直径 0.25m, 长 2.8m; 三截支隧道的尺寸一样, 直径为 0.196m, 长为 0.424m。分隧道的最左端是开口的。750g TNT 当量的 PETN 炸药放在主隧道中间的地面上。按主隧道空间体积计算, 这相当于 5.0 kg/m^3 的载荷密度。实验分别考虑了置水和不置水的两种情况。在置水情况下, 水由塑料袋密封后布置在炸药周围, 水/药质量比为 2.5。隧道中布置了四个测点, 它们分别在图中 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 所示位置的地面上。四个测点上实验测量峰值压力列在表 3 中。

在数值计算方面, 所有的钢管壁都被简化为刚性壁, 分隧道的出口处为给定压力的可外流边界条件。在置水情况下, 水被模拟为炸药周围五面(四个周面和顶面)的等厚度墙。图 5 是采用前处理软件 MSC/PATRAN 生成的计算网格示意图, 网格共含有 4760 个六面体单元。

由于隧道是开口的, 所以没有确定的气室压力。我们主要考察峰值压力的变化规律。图 6、图 7 是 P_1 、 P_2 点上置水和不置水两种情况下压力随时间的变化曲线。在 P_2 点, 直接到达的冲击波在压力曲线上形成一个波峰, 由分隧道端头(图 4 中右边 P_1 点所在的端头)反射回来的压力波又形成另一更高峰。所以当地的峰值压力是由反射波形成的。从两个图中还可以看出, 置水后峰值压力明显下降, 并且冲击波的到达时间延后。

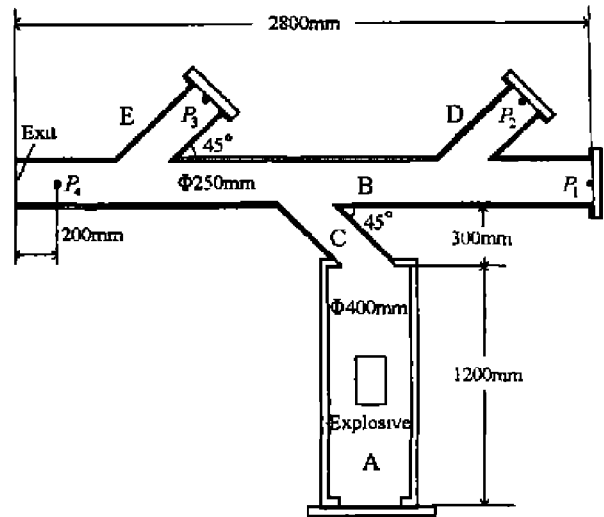


图 4 模型隧道示意图
Fig.4 Layout of the model tunnel

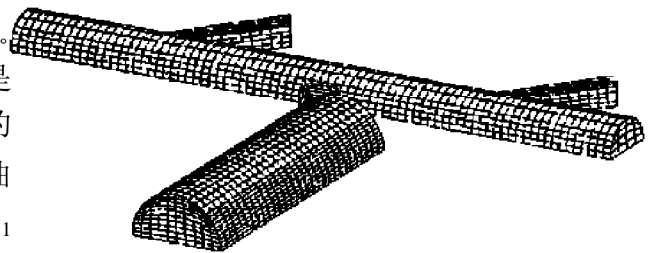


图 5 模型隧道计算网格
Fig.5 Computational mesh for the model tunnel

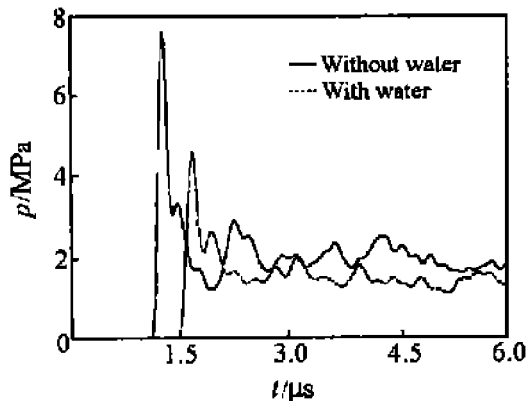


图 6 模型隧道 P_1 点的压力曲线
Fig.6 Curves of pressure at point P_1 in the model tunnel

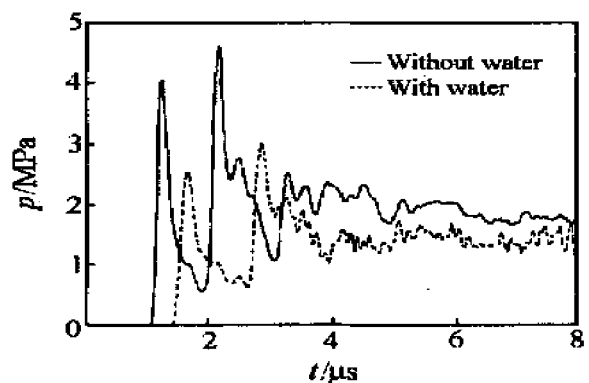


图 7 模型隧道 P_2 点的压力曲线
Fig.7 Curves of pressure at point P_2 in the model tunnel

表 3 中列出了四个测点上各种情况的峰值压力。从表中的数据不难看出, 计算值普遍高于实验测量值, 但相对误差均在 20% 以内。考虑到边界条件的简化(计算中钢管壁被简化为刚性壁)、数值计算的近似性, 以及实验测量中可能存在的误差等因素, 计算结果是可以被接受的。表 3 中还列出了水的削波效果。根据计算结果, 置 2.5 倍炸药当量的水, 峰值压力可以被减小 34% ~ 39%; 而实验测量给出的相应减小量则为 34% ~ 37%。

表 3 模型隧道中的峰值压力(载荷密度为 $5.0\text{kg}/\text{m}^3$, 置水时水/药质量比为 2.5)Table 3 Peak pressure in model tunnel (loading density is $5.0\text{kg}/\text{m}^3$ and water/explosive ratio in the water case is 2.5)

结 果	状 态	不同测点的峰值压力/MPa			
		P_1 点	P_2 点	P_3 点	P_4 点
数值计算结果	不置水	7.6	4.6	5.5	4.7
	置 水	4.6	3.0	3.6	3.1
	减小量/(%)	39	35	35	34
实验测量结果	不置水	6.7	4.3	5.0	4.1
	置 水	4.2	2.8	3.3	2.6
	减小量/(%)	37	35	34	37

5 结 论

(1) 水对爆炸冲击波的削波作用在封闭结构和有开口的隧道系统中得到证实。置水量为炸药当量的 2~2.5 倍时, 峰值压力被减小 34%(在隧道中)到 47%(在矩形封闭结构中)。对隧道系统的计算结果得到实验测量结果的证实。

(2) 在封闭结构中, 在炸药周围置水也可以同时降低气室压力, 其降低量与载荷密度和置水量有关。本文算例中得到的降低量介于 26%(对载荷密度 $1.03\text{kg}/\text{m}^3$ 和水/药质量比 3.07)与 34%(对载荷密度 $9.80\text{kg}/\text{m}^3$ 和水/药质量比 3.07)之间。

参考文献:

- [1] 赵汉中. 在开阔空间中水对爆炸冲击波的削波作用[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 26-28.
- [2] Chong K, Chin L H. Water Mitigation Model tunnel Field Tests [R]. ETSC Pretest Report IV, Lands and Estates Organisation, Ministry of Defence of Singapore, 1998.
- [3] Keenan W A, Wager P C. Mitigation of Confined Explosion Effects by Placing Water in Proximity of Explosives [A]. The 25th DoD Explosives Safety Seminar [C]. Anaheim, California, USA, 1992.
- [4] Forsen R, Hansson H, Carlberg C. Small Scale Tests on Mitigation Effecton Effects of Water in a Model of the KLOTZ Club Tunnel in Alvdalen [A]. The 27th DoD Explosives Safety Seminar [C], Las Vegas, USA, 1997.
- [5] Malvar L J, Tancreto J E. Analytical and Test Results for Water Mitigation of Explosion Effects [A]. The 28th DoD Explosives Safety Seminar [C]. Orlando, Florida, USA, 1998.
- [6] Steinberg D J. Spherical Explosions and the Equation of State of Water [R]. UCID-20974, Lawrence Livermore National Laboratory, USA, 1987.

Water Mitigation Effects on Explosions in Confined Chambers

ZHAO Han-zhong

(Department of Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The mitigation effects of water on the detonations of explosive in a confined cube chamber are studied by using a numerical code. Significant mitigation effects on shock pressure and final static gas pressure have been obtained at various loading densities, as well as various water/explosive mass ratios. The water mitigation effects on shock pressure in a tunnel system with vent are further simulated. The numerical results are compared with the experimental data.

Key words: explosion shock; water mitigation; gas pressure