DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1001-09

爆炸实验水池防护性能及动力学响应分析*

胡亚峰[1],金建峰[1],顾文彬[2],陈 亮[1],张瑞江[1]
(1.中国华阴兵器试验中心,陕西 华阴 714200;
2.解放军理工大学野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要:针对爆炸实验水池强度设计问题,利用非线性动力学程序 LS-DYNA 对 10 kg TNT 爆炸后的水中冲击波传播规律及爆炸水池结构动态响应情况进行了数值模拟,对空气桶和气泡帷幕削弱水中冲击波的能力进行了定量计算,结果表明:空气桶对冲击波峰值压力削弱作用接近 50%,对比冲量削弱作用达到 16.2%;气泡帷幕对壁面反射冲击波的削弱作用高达 86.2%,对比冲量削弱作用达到 75.6%。在此基础上进一步分析了冲击载荷作用以及结构响应机理,指出了内衬钢板和混凝土围堰的危险区域,对爆炸能量在各物质间的分配和传递规律进行了初步探索,为相关爆炸水池的工程设计提供参考。

关键词:爆炸水池;应力应变响应;防护性能;LS-DYNA
中图分类号:O383.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

爆炸水池是开展武器弹药毁伤效能评估的基础条件,是完成战斗部破碎性实验,进行水下威力参数测定以及开展水下毁伤技术研究的重要场所[1-2]。美国西南研究所对水槽、抑制挡板、填充沙隔墙、织物隔板的抗冲击侵彻能力进行研究,设计建造了内径 9.15 m、深 9.15 m 的钢质圆顶、水槽式筒形钢筋混凝土爆轰室,可承受 45 kg TNT 当量的威力实验[1]。目前国内同等尺寸爆炸水池的设计承试能力还远远达不到 45 kg TNT 当量。国内爆炸水池的工程设计通常是基于静态力学理论,按照等效静载的方式评估结构强度,但是对于高强度、高应变率的爆炸载荷,静态力学设计方法显然不能反映爆炸水池的实际动力学响应,也难以评估其结构的薄弱环节、危险区域以及作用机理。另外,破碎性实验[2]是统计战斗部自然破片质量分布的重要手段,对杀伤力评估具有重要意义,为了隔绝水介质使壳体充分破碎,该实验通常将战斗部放置在空气桶里面引爆,为了削弱水中冲击载荷,池壁前方通常会设置一层气泡帷幕。空气桶和气泡帷幕将空气因素引入单一水介质,对水中冲击载荷的强度会产生不可忽视的显著影响,也大大增加了结构设计的难度。关于水中冲击波的传播规律和衰减规律已有大量研究[3-4],而对气泡帷幕防护作用的相关研究却比较少[5-7],关于空气桶的作用目前还停留在定性认识阶段,并没有相关论文发表。对于集成了空气桶、气泡帷幕、合金钢内衬、混凝土围堰、无限介质土壤和水介质的复杂抗爆体系,目前还没有成熟可靠的设计方法可以遵循,采用理论解析的方法更是难以实现。

因此本文中针对复合结构爆炸水池强度设计问题,利用非线性动力学程序 LS-DYNA 对 10 kg TNT 爆炸后的水中冲击波传播规律及爆炸水池结构动态响应情况进行数值模拟,对空气桶和气泡帷幕削弱水中冲击波的能力进行定量计算,指出内衬钢板和混凝土围堰的危险区域,分析冲击载荷作用以及结构动态响应机理,为相关爆炸水池的结构设计提供参考。

1 计算模型与参数

1.1 模型的建立

爆炸实验水池如图 1 所示,其基本参数为:内径 10 m、深 8 m;钢板内衬为 15MnV 合金钢材料,壁厚 0.02 m;围堰为混凝土材料,厚 1 m;设定土壤为无限介质,采用透射边界。装药为 10 kg TNT 球形

* **收稿日期**:2016-04-12;**修回日期**:2016-11-20
基金项目:总装备部试验技术研究重点项目(2011SY3213001)
第一作者:胡亚峰(1988—),男,硕士,工程师,827734300@qq.com。

炸药，爆心设置在距底面 4 m 的中心位置。空气柱直径 0.5 m、高 1 m。气泡帷幕厚度设为 0.08 m。因此，本文中计算模型中包含 6 种材料：15MnV 合金钢内衬、混凝土围堰、无限介质土壤、水、TNT 炸药、以及空气。

为了研究不同实验条件下水池的冲击动力学性能，设计了 4 种不同的实验模型：模型Ⅰ为初始模型；模型Ⅱ在模型Ⅰ的基础上设置了空气桶；模型Ⅲ在模型Ⅰ的基础上设置气泡帷幕；模型Ⅳ同时设置了空气桶和气泡帷幕。设计模型Ⅰ的目的主要是为了参照 P. Cole 经验公式进行可行性分析，同时作为另外 3 种模型的对比模型。另外为了便于分析，取 A、B、C 等 3 个典型位置，如图 2 所示：位置 A 为壁面中心，位置 B 为池壁与底面的交界处，位置 C 为底面中心。

采用 TrueGrid 软件建立 1/4 三维数值计算模型，如图 2 所示，其中炸药区域采用在 k 文件中填充的方式“*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY”加入，模型中水、炸药和空气采用 ALE 算法，编为一个 ALE 多物质组，无限介质土壤、混凝土围堰和钢板内衬采用 Langrange 算法，两者之间应用流-固耦合，空气上表面和土壤外侧施加透射边界。为了简化气泡帷幕模型，根据空气压缩机单位时间气流量以及气泡从池底升到水面的时间，将气泡帷幕等效为 0.08 m 厚的空气层，气泡帷幕也采用填充方式生成。

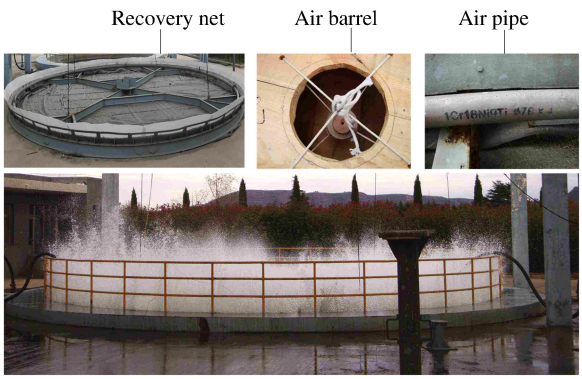

图 1 爆炸实验水池示意图

Fig. 1 Sketch of explosion testing pool

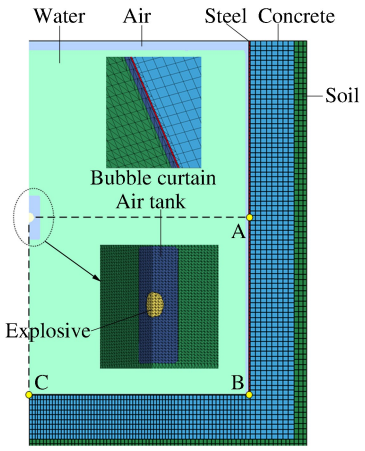

图 2 爆炸水池模型及其网格划分情况

Fig. 2 Sketch of finite element structure and meshing condition

1.2 材料模型及参数

TNT 炸药采用 Mat_High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程，具体参数如表 1 所示[8]，其中 ρ 为材料密度；D_0 为炸药爆速；P_{CJ} 为炸药爆炸产生的爆轰波 C-J 面压力；E_0 为初始内能；A、B、R_1、R_2、ω 为实验确定的常数。

内衬钢板采用 Plastic-Kinematic 模型，该模型考虑了材料的弹塑性特性、强化效应以及应变率效应，材料参数见表 2[9]，其中 E 为弹性模量；λ 为泊松比；E_t 为剪切弹性模量；σ_s 为材料的弹性屈服强度；C、P 为材料应变率相关常数；β 为随动硬化系数。

由于混凝土不直接承受冲击加载，不会产生破碎、裂纹等大变形，因此采用 Plastic-Kinematic 模型足以描述应力应变状态及风险区域，具体材料参数列于表 3[10]。

土壤采用 Mat_Soil_And_Foam 模型，密度 $\rho=1.8$ g/cm^3；泊松比 $\lambda=0.48$；弹性模量 $E=47.38$ MPa；体积载模量 $K=394.8$ MPa，设土壤单元的初始体积为 V_0，受力压缩后的体积为 V_1，则体应变表示为：$-\ln(V_1/V_0)$，土壤的压力与体应变关系如表 4[10] 所示。

空气采用空物质材料本构模型和线性多项式状态方程。水采用空物质材料本构模型和 Grüneisen 状态方程，具体参数列于表 5[10]，其中 c 是 u_s-u_p（冲击波速度-质点速度[11]）曲线的截距；S_1、S_2 和 S_3 是 u_s-u_p 曲线斜率的系数；γ_0 为 Grüneisen 常数；α 是对 γ_0 的一阶体积修正；E_0 为单位体积初始内能。

表 1 TNT 炸药材料参数

Table 1 Material parameters of TNT explosive

ρ/(g·cm^{-3})	D_0/(km·s^{-1})	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	$R2$	ω	E_0/MJ
1.63	6.93	27	371	7.43	4.15	0.95	0.3	0.007

表 2 内衬钢板材料参数

Table 2 Material parameters of steel inner-lined plate

ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	λ	σ_s/GPa	E_t/GPa	C	P	β
7 850	206	0.3	0.337	9.4	40.4	5	1

表 3 混凝土材料参数

Table 3 Material parameters of concrete

ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	λ	σ_s/GPa	E_t/GPa	C	P	β
2 400	30	0.18	0.035	12.7	0	0	0.8

表 4 土壤压力与体应变关系

Table 4 Relation between pressure and volumetric strain

体应变	0.0	0.05	0.09	0.15	0.19	0.21	0.22	0.25
压力/MPa	0.0	0.34	0.45	1.27	2.08	2.71	3.92	5.66

表 5 水的状态参数

Table 5 State parameters of water

ρ/(g·cm^{-3})	c/(m·s^{-1})	S_1	S_2	S_3	γ_0	α	E_0/MJ
1 020	1 650	1.92	−1.98	0.22	0.5	0	0

2　水中爆炸冲击波压力模拟结果及分析

在大量理论和实验研究基础上，前人总结了一些水中爆炸冲击波参数的计算模型。应用最广的是 P. Cole 关于无限水中爆炸冲击波峰值压力计算公式[12]：

$$p_m = 53.3\left(\frac{C^{1/3}}{r}\right)^{1.13} \tag{1}$$

式中：r 为装药中心距测点的距离，m；p_m 为测点 r 处得冲击波峰值压力，MPa；C 为炸药当量，kg。公式(1)的适用范围为(20～200)r_0，r_0 为装药半径。

将与装药中心等高、距离装药中心分别 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 m 的位置设为观测点。表 6 是不同位置冲击波峰值压力数值计算结果与 P. Cole 公式计算值对比，除了 2 m 处数值模拟结果偏高 10.6%，其他位置数值模拟结果与 P. Cole 公式相对值误差均小于±10%。表明水中爆炸冲击波作用的计算模型和参数可信，计算结果正确，满足计算精度要求。另外，池壁位置(r=5 m)的反射冲击波压力目前还没有经验公式可以计算，因为反射面的材质、结构特征、波阻抗等力学性质对水中冲击波的反射系数都有显著影响。水是可压缩性较小的流体介质，对于刚性壁面，当入射压力为 1～100 MPa 时，其反射系数 $K_r \approx 2$[13]。对于实际工程问题，则有 $1 < K_r < 2$。

如图 3 所示，对比拟合曲线与 P. Cole 压力曲线可以看出：初始阶段相对误差较大，但随着比例距离的增加，相对误差可以控制在 10%以内。由于比例距离越小，冲击波高频成分越多，对传感器的响应频率要求越高，冲击波近场压力测试结果一般都会偏低，这也是 P. Cole 经验公式在比例距离较小时计算结果会偏低的原因。在比例距离较大时计算结果还是比较准确的。参照 P. Cole 经验公式，可以认为在本研究条件下，所建立的模型对于水中爆炸载荷的计算结果真实可信。

表 6 水中冲击波峰值压力计算值与理论值对比

Table 6 Contrast of numerical calculation and empirical formulas

距离/m	峰值压力/MPa		计算与理论值的相对误差/%
	P. Cole 理论计算值	数值计算结果平均值	
2.0	57.97	64.1	10.6
2.5	45.05	47.0	4.3
3.0	36.66	37.4	2.0
3.5	30.80	29.8	−3.2
4.0	26.49	25.3	−4.5
4.5	23.19	21.6	−6.8
5.0	20.59	31.2*	

注：由于池壁位置入射压力峰值被反射压力峰值覆盖，因此此值仅为反射压力峰值。

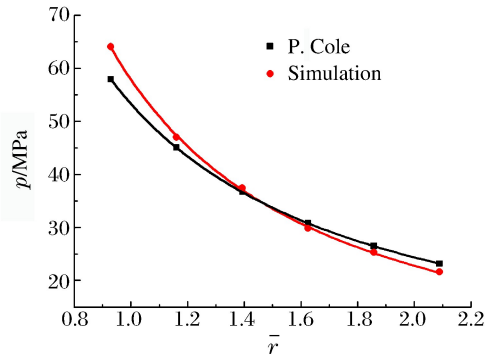

图 3 数值计算拟合曲线与 P. Cole 压力曲线的对比

Fig. 3 Contrast curves of numerical calculation and P. Cole empirical formulas

3 防护性能及动力学响应分析

3.1 压力与比冲量载荷的变化规律

以模型Ⅰ为例，模拟结果如图 4 所示：爆炸发生后，很快在水中形成冲击波，$t=1.760$ ms 时，水中冲击波的波阵面清晰而狭窄，同时在爆心位置会形成由内向外传播的稀疏波。$t=3.139$ ms 时冲击波到达左右边界，并发生正反射。冲击波压力在开口自由端迅速卸载，并形成向下传播的稀疏波，从而导致底面边界反射冲击波的作用时间减少、衰减速度较壁面反射冲击波明显提升，由图 4(c)可以看出：$t=3.979$ ms 时，底面边界反射冲击波的强度明显低于壁面反射冲击波，波阵面也较为模糊。$t=4.338$ ms 时，左右边界反射冲击波上端也同样受到了自由面传过来的稀疏波的影响，从底端到自由水面，反射冲击波的强度逐渐降低。

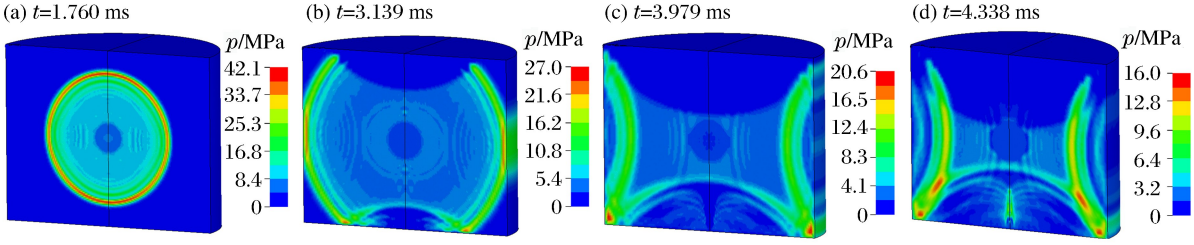

图 4 模型Ⅰ水中冲击波传播过程

Fig. 4 Propagation process of chock wave in water (model Ⅰ)

冲击波对边界钢板的作用效果不仅取决于冲击强度，还受到作用时间的显著影响。将 A、C 两个典型位置的冲击波强度曲线对时间积分，可以得到比冲量(单位面积冲量)变化曲线，如图 5 所示，由于水中爆炸产生的气泡脉动以及半封闭空间冲击波反射叠加等效应，位置 A 比冲量从 $t=2.9$ ms 时刻起，经历了 2 次明显的阶跃上升，位置 B 比冲量从 $t=2.3$ ms 起，经历了 2 次阶跃上升和 1 段平缓上升。比冲量的第 1 次阶跃上升是首次冲击波反射压力作用的结果，位置 A 的作用时间大约为 1.3 ms，要明显长于位置 B 的 0.5 ms。首次冲击，位置 A 获得

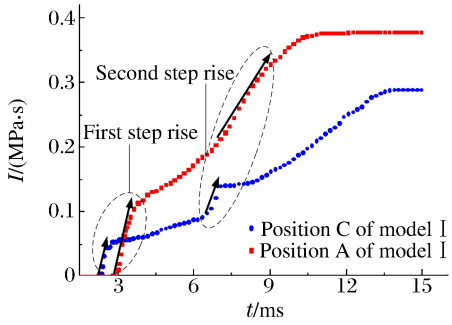

图 5 观察点 A、C 两点比冲量时程曲线

Fig. 5 Contrast curves of specific impulse in positions A, C

的比冲量为 0.131 MPa·s，位置 B 获得的比冲量为 0.054 MPa·s，位置 A 获得的比冲量高出位置 B 一倍以上。第 2 次阶跃上升开始于气泡二次脉动冲击波到达的时刻。$t=15$ ms 时爆炸作用基本结束，位置 A 获得的冲量高出 B 位置 30%。这种现象产生的主要原因是水池开口自由端形成的稀疏波主要向下传播，降低了底面反射冲击波的作用时间，并加快了其衰减速率，因此水池壁面中心位置最容易产生塑性变形，需要进行重点防护。

3.2　空气桶和气泡帷幕对冲击波的削弱作用

以装药中心同一水平高度、距离装药中心 2.0 m 位置为主要观测点，得到不同模型的冲击波压力对比曲线。图 6 为模型Ⅱ与模型Ⅰ的对比曲线，可见设置空气桶对峰值压力有明显的削弱作用，由局部视图可以看出，无空气桶时，冲击波衰减曲线类似于直角斜三角形，陡然上升，平缓下降。有空气桶时，冲击波衰减曲线出现明显的波动，类似于锯齿形，这是因为爆炸产物首先驱动空气运动，形成空气冲击波，并迅速衰减，然后空气冲击波作用于水介质，形成水中冲击波，由于空气和水的波阻抗不同，会在两个介质之间形成透射波与反射波，如此反复几次，就会形成锯齿状波动的衰减曲线。随着距离的增加削弱效果略有增加，在距离爆心 4.0 m 处，本模型的削弱作用为 48.8%。

从图 7 的对比曲线中可以看出，模型Ⅰ的冲击波压力时程曲线在 5、10 ms 左右出现了 2 次峰值，这是由于水中爆炸气泡脉动和冲击波反射叠加等效应引起的。但模型Ⅲ设置了气泡帷幕，从而抹平了该时刻的 2 个峰值，可见气泡帷幕对壁面反射冲击波的削弱作用十分显著，避免了反射波在中心汇聚产生二次脉动。由于气泡帷幕的作用，冲击波从水中进入空气，相当于从高阻抗介质进入一种很低阻抗的介质，会首先反射一个很强的卸载波，将冲击波压力迅速卸载掉。由图 7 中气泡帷幕在冲击波作用下的压力云图可以看出：气泡帷幕类似于自由面，冲击波压力在该位置几乎被卸载殆尽，冲击波波阵面也逐渐模糊；最大压力出现在壁面中心位置，达到 4.3 MPa，而模型Ⅰ无气泡帷幕情况下，反射压力高达 31.2 MPa，气泡帷幕对冲击波反射压力的削弱能力高达 86.2%。伍俊等[14]在直径 10 m、深 10 m 的爆炸水池中（混凝土围堰＋钢衬内壁结构，气幕发生管道和空气压缩机与本文研究对象为同一规格产品），测试了气泡帷幕的防护能力：1 kg TNT 进行了两次对比实验，气泡帷幕对反射冲击波的削弱作用为 89%；5 kg TNT 仅进行了气幕防护实验，实验结果相对理论值削减了 85.1%。本文计算的 TNT 当量为 10 kg，得到气泡帷幕对反射冲击波的削弱作用为 86.2%。随着入射冲击波强度的增加，气泡帷幕的削弱能力逐渐降低，对于 5～20 MPa 的入射压力，气泡帷幕的削弱作用在 80%以上。

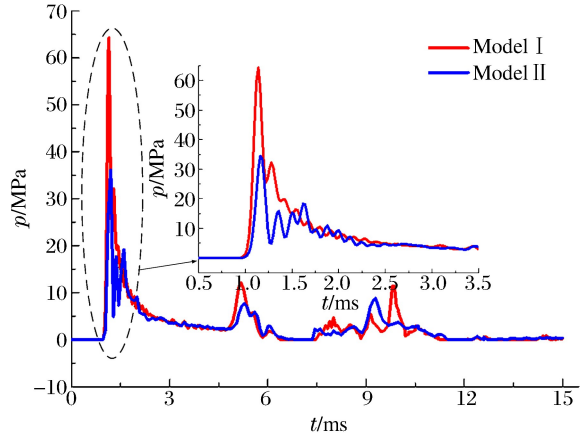

图 6　模型Ⅱ与模型Ⅰ冲击波压力对比曲线

Fig. 6　Contrast curves of shock wave pressure (models Ⅰ & Ⅱ)

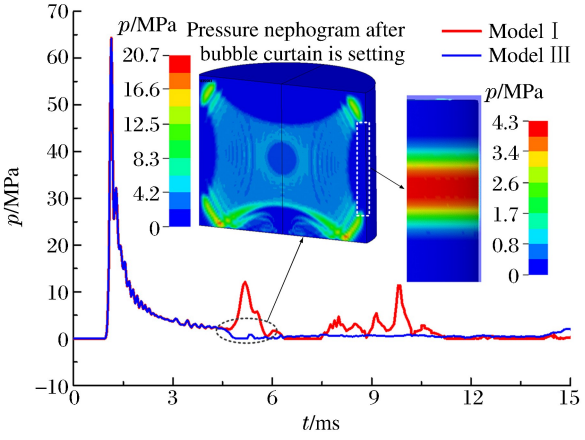

图 7　模型Ⅲ与模型Ⅰ冲击波压力对比曲线

Fig. 7　Contrast curves of shock wave pressure (models Ⅰ & Ⅲ)

3.3　钢板内衬动态响应分析

爆炸水池钢板内衬作为大型圆柱薄壳，其内部爆炸冲击载荷具有轴向对称性，因此剪切应力不会是主要屈服条件，可采用 Mises 屈服准则对其进行应力分析[15]。本文中主要通过分析钢板内衬单元的

Mises 等效应力来评估塑性应变风险。数值计算结果显示,模型Ⅰ的钢板内衬没有产生任何塑性形变,位置 B 和 C 的应力都远未到达钢板屈服极限,只有位置 A(壁面中心)有较大区域等效应力达到 328.1 MPa,接近钢板屈服极限 337 MPa,因此主要通过钢板内衬位置 A 的应力应变状态进行分析。

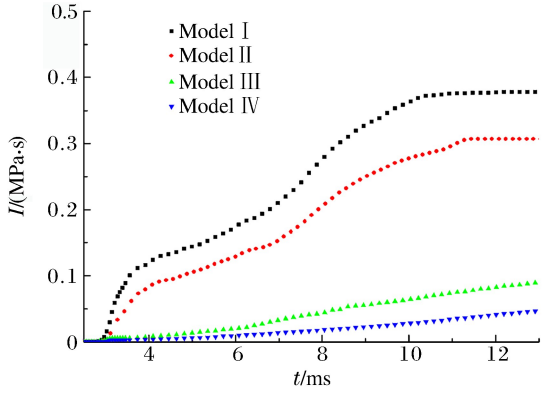

图 8 不同模型位置 A 比冲量时程曲线

Fig. 8 Contrast curves of specific impulse of steel in position A

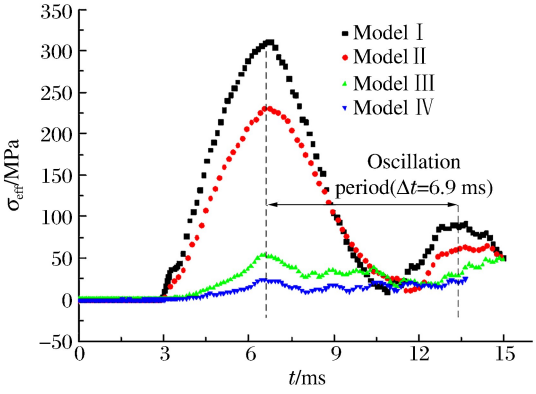

图 9 不同模型位置 A 等效应力时程曲线

Fig. 9 Contrast curves of effective stress of steel in position A

图 8 给出了不同模型在位置 A 处所承受的比冲量时程曲线,空气桶的设置使位置 A 的比冲量削弱了 16.2%,但是基本没有改变比冲量时程曲线阶跃上升的形态。气泡帷幕的设置使位置 A 的比冲量削弱了 75.6%,同时消除了比冲量时程曲线陡峭的上升沿,使其上升更加平缓。图 9 给出了不同模型在位置 A 处的等效应力变化曲线,各模型的应力峰值并非在冲击加载的瞬间就能到达,首次冲击从 $t=2.9$ ms开始最多持续 1 ms,但是应力峰值通常出现在 $t=6.5$ ms,此时第 1 次冲击加载已经结束,钢板内衬在惯性作用下持续沿径向移动,达到最大位移,此时周向拉伸应力达到最大,也是在 Mises 准则下最容易发生屈服的时刻。

表 7 给出了空气桶和气泡帷幕对钢板内衬典型位置应力峰值的影响情况,气泡帷幕对位置 A 和 B 的衰减作用较为明显,空气桶对位置 C 的衰减作用较为明显。对于最容易产生塑性变形的位置 A,空气桶和气泡帷幕的联合作用,使其峰值应力衰减了 92.6%。气泡帷幕虽然不直接对位置 C 进行防护,但是大大减弱了壁面冲击波反射叠加从而形成二次脉动的能力,因此气泡帷幕对位置 C 的峰值应力有 34.5%的削弱能力。

表 7 空气桶和气泡帷幕对钢板内衬典型位置应力峰值的影响

Table 7 Effect of air tank and bubble curtain on effective stress in typical positions of steel lining

典型位置	应力峰值/MPa				衰减率/%		
	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅳ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅳ
A	328.1	231.5	53.5	24.2	29.4	83.6	92.6
B	76.9	44.9	31.7	25.2	43.9	58.8	67.2
C	201.5	108.2	132.0	83.1	46.3	34.5	58.8

3.4 混凝土动态响应分析

混凝土作为一种波阻抗较高的介质,可以最大限度透射钢板内部应力,其自身阻抗越高,透射应力就越高。图 10 给出了不同模型混凝土介质的塑性应变区域,模型Ⅰ底面中心位置 C 处产生的塑性变形最大,达到了 0.24%,其次是底边折角 B 位置,大约在 0.15%~0.17%的水平,最后是壁面中心点位置 A,只有不到 0.1%的塑性形变。在钢板内衬应力分析中,3 个位置中位置 A 最危险,但是混凝土的应力情况却是位置 A 最安全。其原因主要有两点:一方面,钢板的惯性移动受到了混凝土的阻滞,而混凝土的惯性移动却不能被土壤有效阻滞,导致底面折角和底面中心处有应力集中,产生较大塑性形变,

而池壁混凝土的惯性移动不会产生应力集中，所以塑性形变较小；另一方面，根据一维弹性应力波理论，土壤密度虽然和混凝土差距不大，但是弹性模量远远低于混凝土，从而导致土壤介质的声速和波阻抗都很小，透射应力波能力有限，导致混凝土背面产生明显的反射拉伸塑性应变区，加重了混凝土在位置 A 产生塑性变形的风险。在混凝土较容易发生塑性变形的区域，可以采用重晶石和铁矿石配制而成的重混凝土进行浇筑，以提高结构抗爆能力。

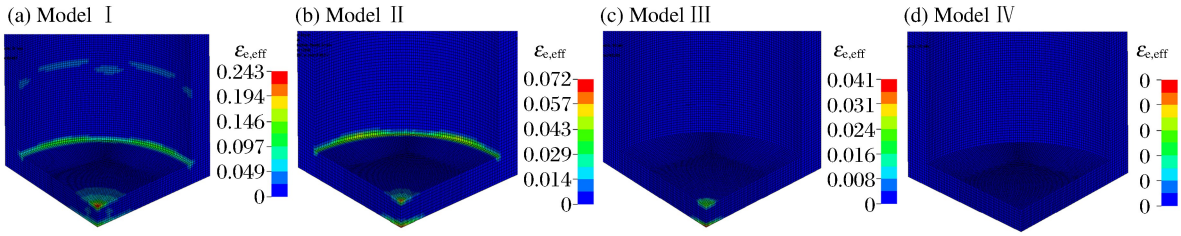

图 10　不同模型混凝土围堰的塑性应变区域

Fig. 10　Plastic strain zone of concrete cofferdam in each model

针对混凝土风险区域位置 B 和 C，图 11～12 给出了不同模型该位置的等效应力时程曲线。位置 B 作为应力集中最明显的区域，其应力在 $t=13$ ms 之前，维持了较高的平台，平台期大约为 9 ms。随后进入弹性卸载阶段。由图 11 可以看出，空气桶和气泡帷幕对位置 B 应力削弱明显，模型Ⅳ相对于模型Ⅰ削弱了 56.7%。由图 12 可以看出，位置 C 等效应力波动较为明显，与正反射冲击波压力作用和有关，该位置大约在 $t=9$ ms 时刻开始进入弹性卸载阶段，模型Ⅳ相对于模型Ⅰ应力峰值削弱了 53.3%。

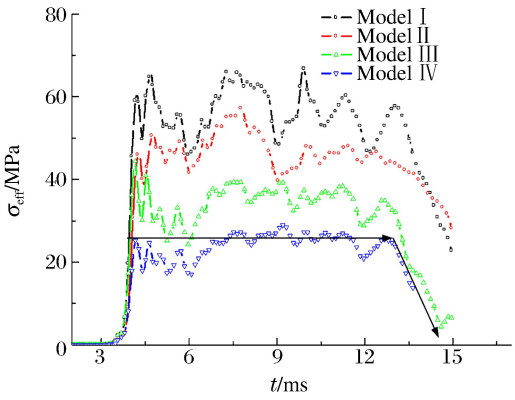

图 11　不同模型位置 B 的等效应力时程曲线

Fig. 11　Contrast curves of effective stress in position B

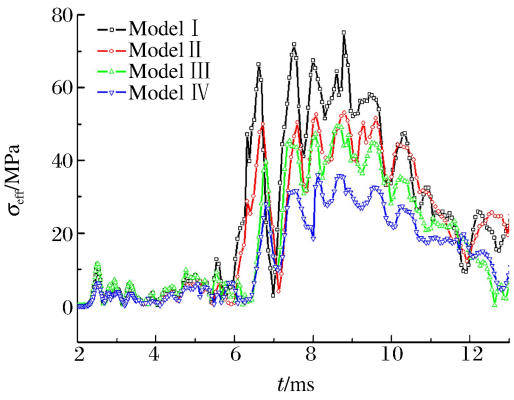

图 12　不同模型 C 位置的等效应力时程曲线

Fig. 12　Contrast curves of effective stress in position C

3.5　能量分析

在本计算模型中，爆炸能量主要以内能和动能的形式在各物质中体现，内能包括弹性变形能和塑性变形能，弹性变形能最终会通过其他形式释放出来，残存的能量为塑性变形能。图 13 给出了不同模型钢板内衬的内能变化曲线，模型Ⅰ内能峰值为 5.86 MJ，相当于 1.3 kg TNT 的能量，模型Ⅱ在此基础上削减了 45.2%，模型Ⅲ在此基础上削减了 96.3%，模型Ⅳ在此基础上削减了 98.4%。气泡帷幕的作用要强于空气桶。内能变化曲线在经历第 1 个波动周期之后，逐渐趋于稳定，仅有小幅震荡，其中弹性变形能的成分要超过 90%。图 14 给出了不同模型混凝土的内能变化曲线，其波形与钢板内能变化曲线类似。都是在经历大的波动之后，逐渐趋于稳定，并有小幅震荡。模型Ⅰ混凝土获得的最大内能为 0.6 MJ，相当于该模型中钢板内能峰值的 10.2%，模型Ⅳ混凝土获得的最大内能为 0.04 MJ，相当于该模型中钢板内能峰值的 43.5%。可见混凝土吸收的能量比较小，其主要作用在于阻碍钢板的惯性移动，维持结构的稳固。

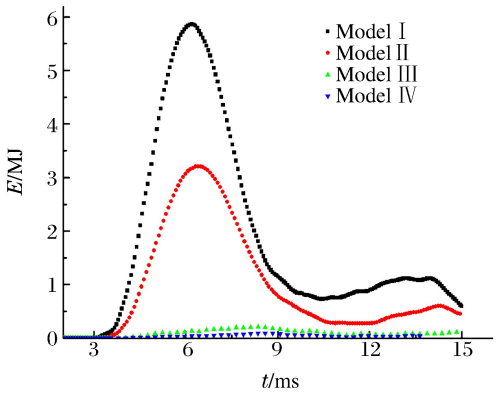

图 13 不同模型钢板内衬的内能变化曲线

Fig. 13 Contrast curves of internal energy in steel lining

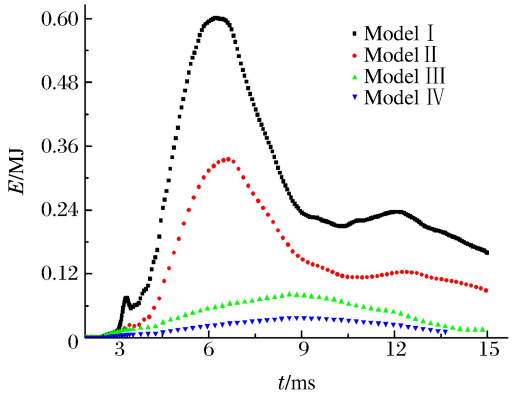

图 14 不同模型混凝土的内能变化曲线

Fig. 14 Contrast curves of internal energy in concrete cofferdam

4 结 论

利用非线性动力学程序 LS-DYNA 对 10 kg TNT 爆炸后的水中冲击波传播规律及水介质威力池结构的动态响应情况进行了数值模拟研究,结果表明:

(1)数值模拟能够较好地反映水中爆炸冲击波的分布规律和衰减规律,计算结果与经验公式的相对误差在 10%以内,具有较高的可信度。

(2)空气桶对冲击波峰值压力的削弱作用接近 50%,对比冲量的削弱作用达到 16.2%;气泡帷幕对壁面反射冲击波的削弱作用高达 86.2%,对比冲量的削弱作用达到 75.6%,气泡帷幕可有效减弱水中气泡脉动。

(3)钢板的应力峰值出现在惯性移动最大时刻,弹性震荡周期为 6.9ms,从钢板透射到混凝土中的能量仅占爆炸总能量的 1.4%,混凝土吸能作用有限,其主要作用在于阻碍钢板的惯性移动,维持整体结构的稳固。混凝土围堰的危险区域和钢板截然相反,底面中心和底边折角处产生应力集中明显,且底面中心位置会有明显反射拉伸塑性应变区。

参考文献:

[1] 马俊海,施力琳. 美军常规武器试验靶场手册[M]. 北京:国防工业出版社,2014.

[2] 王益森,刘徽伯. 弹药试验鉴定技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[3] Saito T, Marumoto M, Yamashita H. Experimental and numerical studies of underwater shock wave attenuation [J]. Shock Waves, 2003,13(2):139-148.

[4] Kira A, Fujita M, Itoh S. Underwater explosion of spherical explosive[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,85(1):64-71.

[5] 樊自建,沈兆武,马宏昊,等. 空气隔层对水中冲击波衰减效果的实验研究[J]. 中国科技大学学报,2007,37(10):1306-1311.
Fan Zijian, Shen Zhaowu, Ma Honghao, et al. Experimental study on attenuation of underwater shock wave by air interlayer[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007,37(10):1306-1311.

[6] 周睿,冯顺山. 气泡帷幕对水中冲击波峰值压力衰减特征的研究[J]. 工程爆破,2001,7(2):13-17.
Zhou Rui, Feng Shunshan. Study on weaking peck pressure of underwater shock wave by bubble curtain[J]. Engineer Blasting, 2001,7(2):13-17.

[7] 张志波,李春军,李红勇,等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破,2003,20(2):75-76.
Zhang Zhibo, Li Chunjun, Li Hongyong, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting[J]. Blasting, 2003,20(2):75-76.

[8] 顾文彬，胡亚峰，徐浩铭，等. 复合结构防爆罐抗爆特性的数值模拟[J]. 含能材料，2014，22(3)：325-331.
Gu Wenbin，Hu Yafeng，Xu Haoming，et al. Numerical simulation of blast resistant characteristics for the composite structure anti-explosion container[J]. Chinese Journal of Energetic Materials，2014，22(3)：325-331.
[9] 张秀华，张春巍，段忠东. 爆炸荷载作用下钢框架柱冲击响应与破坏模式的数值模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2009，25(4)：656-661.
Zhang Xiuhua，Zhang Chunwei，Duan Zhongdong，et al. Numerical simulation on impact responses and failure modes of steel frame structural columns subject to blast loads[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)，2009，25(4)：656-661.
[10] 时党勇，李裕春，张国民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
[11] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual[R]. California：Livermore Software Technology Corporation，2003.
[12] P. 库尔. 水下爆炸[M]. 北京：国防工业出版社，1960.
[13] 黄芬. 压力动态标准方法研究[D]. 南京：南京理工大学，2003.
[14] 伍俊，庄铁栓，闰鹏，等. 水中爆炸实验装置结构设计与防护研究[J]. 振动与冲击，2013，32(11)：131-136.
Wu Jun，Zhuang Tieshuan，Yan Peng，et al. Structural design of a test facility for underwater explosion and its protection measure to reduce shock wave[J]. Journal of Vibration and Shock，2013，32(11)：131-136.
[15] 徐秉业，刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京：清华大学出版社，1995.

Protective performance and dynamic response analysis of explosion testing pool

Hu Yafeng[1]，Jin Janfeng[1]，Gu Wenbin[2]，Chen Liang[1]，Zhang Ruijiang[1]
(1. *Huayin Ordnance Test Center*，*Huayin* 714200，*Shaanxi*，*China*；
2. *College of Field Engineering*，*PLA University of Science and Technology*，*Nanjing* 210007，*Jiangsu*，*China*)

Abstract：In this work，in view of the design issues concerning the strength of the explosion testing pool，we simulated numerically the shock wave propagation in water and structural dynamic responses of the testing pool subjected to a 10 kg TNT explosion impact loading using the nonlinear dynamics program LS-DYNA. We also quantitatively calculated the capability of the air tank and the bubble curtain to weaken the shock wave in water. The results show that the weakening effect of the air tank on the shock wave peak pressure and the specific impulse is close to 50% and 16.2%，that of the bubble curtain on the shock wave reflection and the specific impulse is as high as 86.2% and 75.6%. Based on this，we further analyzed the mechanism of the impact loading and the structural response and carried out a preliminary investigation of the distribution and transmission of the explosion energy between each substance. Our work can be used as reference for the engineering design of similar explosion testing pools.

Keywords：explosion testing pool；stress and strain response；protective performance；LS-DYNA

(责任编辑　曾月蓉)