DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0001-08

高速杆式弹体侵彻下蓄液结构载荷特性的有限元分析*

李 典,朱 锡,侯海量,仲 强
(海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033)

摘要: 为探讨高速弹体侵彻下蓄液结构的防护方法,采用瞬态非线性有限元,研究了高速杆式弹体侵彻下蓄液结构承受的冲击载荷特性,分析了冲击载荷的作用过程、前后板承受的载荷强度及其弹体初速度和水域尺度的影响。结果表明:弹体在蓄液结构中的初始开坑作用,将形成入射冲击波,其压力峰值极高,但作用时间短,并将在液体内产生多次反射;弹体在液体中的侵彻,将产生空化,并形成峰值小、作用时间长的空化压力载荷;后板对液体流的阻碍作用将形成出口局部高压;入射冲击波和出口局部高压的强度随着弹体初速度的增加而增大,随着水域长度的增加而不断减小。根据所受冲击载荷特性的不同,将前、后板分别划分为 3 个不同的区域,并建立了每个分区的简化计算模型。

关键词: 爆炸力学;载荷特性;有限元分析;蓄液结构;强度;影响因素
中图分类号: O344.7 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

弹体对蓄液结构的冲击与侵彻可能造成灾难性后果[1-2],如高速破片对飞机油箱的冲击与侵彻将引起油箱的爆裂等破坏。爆破型水中兵器接触爆炸产生的大量二次高速破片,会对舰船舷侧防护液舱结构产生严重的侵彻破坏。并且,随着定向聚能爆破技术在水中兵器战斗部上的广泛应用,自锻弹丸等更对舰船水下防护液舱和防护纵壁构成了严重威胁。因此,关于高速弹体入水冲击载荷特性及蓄液结构破损问题有了大量的研究工作。J. H. McMillen 等[3-4]对弹体入水冲击波传播特性进行了细致的研究。P. J. Disimile 等[5]、D. Townsend 等[6]、J. P. Borg 等[7]对蓄液结构内冲击波载荷传递机理进行了研究。其中,D. Townsend 等[6]、J. P. Borg 等[7]建立了理论分析模型,并分别提出入射冲击波传播波速关系式及激波压力关系式。近年来,对油箱等特殊容器的防护有了研究。P. J. Disimile 等[5]、D. Townsend 等[6]分别通过在水箱内布置三角锥体及隔层薄板结构,以削弱入射冲击波载荷对后板的破坏。由上可知,通过大量的弹道实验,对冲击波在液体中的传播规律进行了详细的研究,但对蓄液结构所受压力载荷的作用过程及机理研究很少。本文中,采用瞬态非线性有限元,从载荷作用过程、前后板载荷特性及强度等对蓄液结构载荷特性进行分析,并根据其特性对前后板进行分区,建立每个分区的简化计算模型,研究初速度和水域尺度对载荷强度影响,还进行回归分析,力图揭示蓄液结构承受的冲击载荷特性,为高速弹体侵彻下蓄液结构的防护方法提供参考。

1 有限元模拟

利用有限元软件 LS-DYNA,建立高速弹体侵彻蓄液结构数值模拟。箱型蓄液结构尺寸为 400 mm×400 mm×100 mm,分为 3 个部分,即前板、后板、侧板,厚度分别为 2、6、10 mm(见图 1),材料采用 Q235 钢。弹丸采用圆柱形,弹径为 14.5 mm,长度为 18 mm,质量为 24.5 g。材料为 45 钢,弹体和面板采用 8 节点拉格朗日实体单元。为缩短计算时间,建立 1/2 对称模型。在撞击点区域网格加密处理,远离撞击区域网格逐步稀疏过渡。液体选用水,水域和空气域选用 8 节点实体单元,单元算法采用单点

* **收稿日期**: 2014-07-14; **修回日期**: 2015-02-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51179200,51209211)
第一作者: 李 典(1990—),男,硕士研究生; **通讯作者**: 侯海量,hou9611104@163.com。

Euler/ALE 多物质单元算法。并将空气域网格和水域网格共节点,以允许水介质的流动(见图 2)。弹体与水、板与水通过欧拉-拉格朗日罚函数耦合算法将结构与流体耦合。弹体采用 Johnson-Cook 本构模型,蓄液结构采用 Cowper-Symonds 本构模型,水采用 Grüneisen 状态方程,气体状态方程为线性多项式。其中相关参数与文献[8]相同。

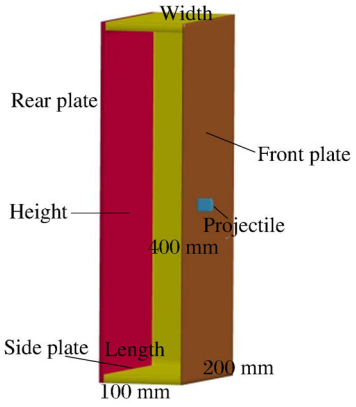

图 1 1/2 蓄液结构计算模型示意图

Fig. 1 Sketch of finite element model for half liquid-filled structure

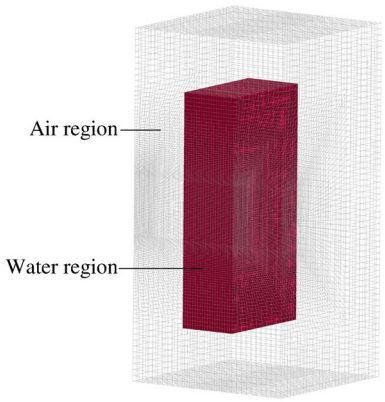

图 2 水域和空气域网格示意图

Fig. 2 Mesh of the water and air

2 结果及分析

2.1 载荷作用过程

首先,弹体以初速 v_0 穿透前板侵入液体、形成以撞击点为中心、向外传播的球型入射冲击波,如图 3(a)所示;侵入液体运动过程中,弹体首部与液体产生强烈的挤压作用,形成局部高压区(弹体前激波),并与弹体以相同速度向前运动。冲击波在水中传播速度 $c=1\ 500$ m/s,由于 $v_0<c$,冲击波与局部高压区开始发生分离。由于弹体在液体运动过程中不停地振荡,因而形成一系列入射冲击波阵面,这与文献[3-4]一致,如图 3(b)所示;紧接着,入射冲击波传播至后板,沿着后板表面继续向两边传播,并同时形成反射波,如图 3(c)所示;随后,局部高压区运动至后板附近,对后板中心区域产生较大的局部压力载荷作用,如图 3(d)所示;然后,反射波作用于前板,并沿着前板表面继续向板两边传播,如图 3(e)所示;随着弹体继续向前运动,空化区域不断增加,而激波的传播也使液体远离弹体运动,空泡得以不断膨胀扩张,使液体内压力增加,对前后板不断挤压,前后板受到持续压力载荷作用,称为空化压力载荷。液体只对前后板真空区域附近产生局部的空化压力作用,液体的动能逐步转化为板的变形能,如图 3(f)所示;此阶段为空化压力载荷作用的主要阶段,一直持续至达到最大空泡尺寸时。之后,空泡开始逐步收缩,空化压力载荷作用迅速衰减。

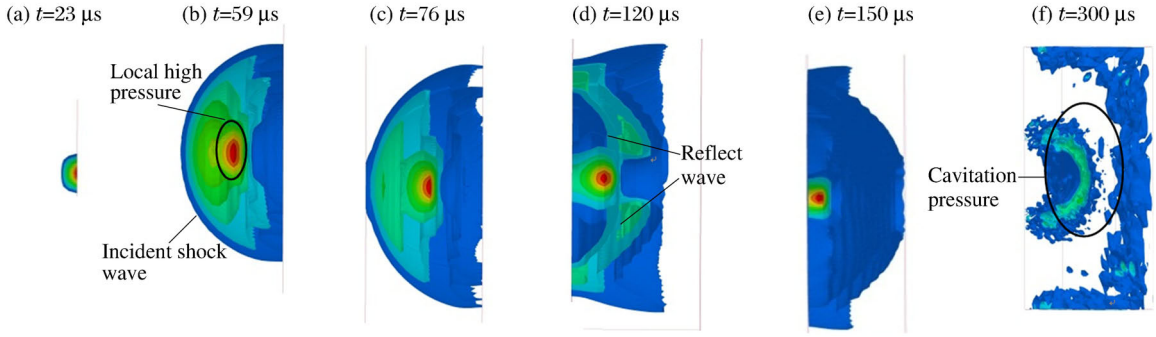

图 3 弹体侵彻蓄液结构载荷作用过程($v_0=1\ 000$ m/s)

Fig. 3 Load process of the liquid-filled structure subjected to projectile penetration

另外，随着初速度 v_0 的增加，载荷作用过程基本相似。不同的是，入射冲击波与局部高压区分离时间延长。当 1 500 m/s＜v_0＜2 000 m/s 时，局部高压将与入射冲击波先一同运动，当弹体速度衰减至波速 c 以下时，发生分离。当 v_0＞2 000 m/s 时，局部高压区与入射冲击波将在蓄水结构中无法分离，两者将一齐作用于后板，破坏能力大大增强。

2.2　载荷特性

由上可知，冲击波和空化压力等冲击载荷作用前后板时，作用面积均为环形，因而按照所受载荷特性的不同，将前后板分别划分为 3 个区域，如图 4 所示。其中，x 为前后板中线处坐标，x＝0 为撞击点。

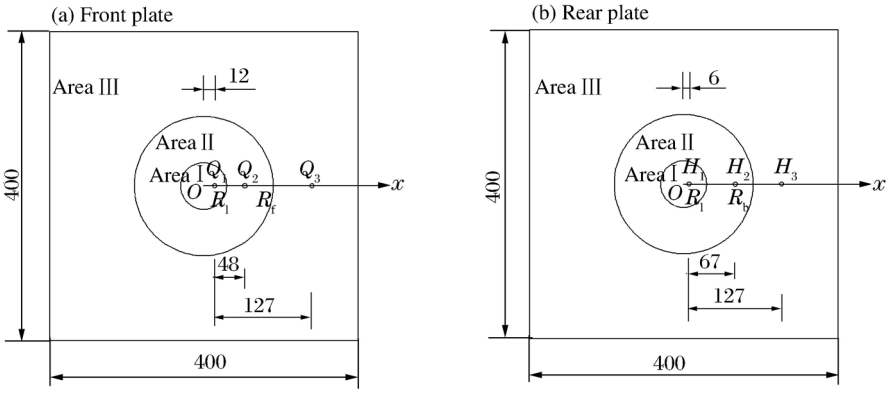

图 4　前后板区域划分示意图

Fig. 4　Sketch of division of the front and rear plates

2.2.1　前板

前板所受冲击载荷主要为入射冲击波作用、反射波作用、空化压力作用，压力峰值分别为 p_f、p_r 与 p_c。其中，空化压力峰值 p_c 取整个过程平均值。区域Ⅰ，范围为 x＜R_1，主要集中在撞击点附近，受到巨大的入射冲击波作用。由于区域Ⅰ在反射波作用前板前，已快速形成真空区，因而不承受反射波载荷作用。同时，由于空化压力载荷作用远小于入射冲击波强度并持续时间极短，因而忽略空化压力载荷作用，认为区域Ⅰ主要承受入射冲击波载荷作用，可以简化为三角形脉冲载荷，如图 5(a)所示。区域Ⅱ，范围为 R_1＜x＜ R_f，R_f 为前板最大空化半径。所受上述 3 种冲击载荷作用，但随着空泡径向尺寸的扩张，该区域进入真空区以后，不再承受空化压力作用，空化压力载荷作用时间较短，空化压力峰值 p_c 相比于 p_f、p_r 也较小，因而区域Ⅱ可以简化为双三角形脉冲载荷，如图 5(b)所示。区域Ⅲ，范围为 x＞R_f，也主要受到 3 种冲击载荷作用。与区域Ⅱ不同的是，由于区域Ⅲ在最大真空区以外，因而整个过程一直受到长时间的空化压力载荷作用，因而可以简化为双三角形脉冲载荷加矩形脉冲载荷，如图 5(c)所示。同时，区域Ⅲ与前板撞击点 x＝0 距离较远，入射冲击波压力峰值 p_f 已衰减至较小值，p_f、p_r 与 p_c 相差不大，但 p_f、p_r 作用时间极短，因而区域Ⅲ可进一步简化为长矩形脉冲载荷。

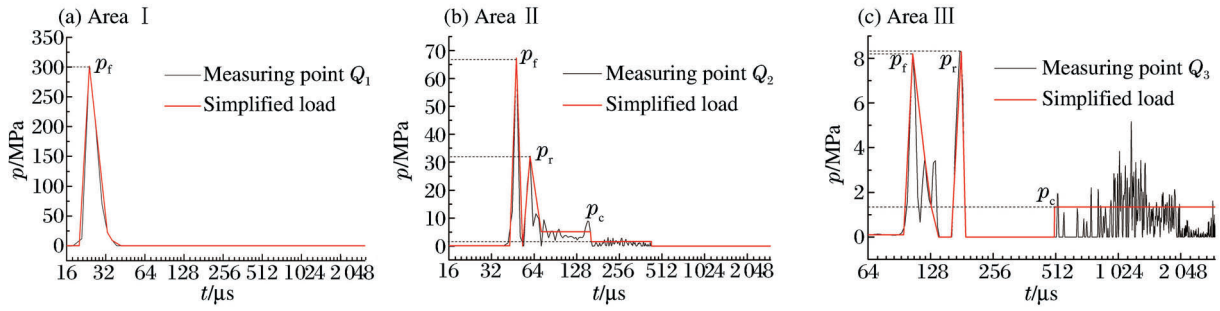

图 5　前板各区域载荷特性

Fig. 5　Load characteristics of each division of the front plate

2.2.2 后板

后板所受冲击载荷主要分为 3 种，入射冲击波作用、局部高压作用、空化压力作用，压力峰值分别为 p_b、p_j与 p_c。区域Ⅰ，范围为 $x< R_1$，由于空化作用持续时间大致与入射冲击波、局部高压作用时间相同，时间极短，而压力峰值 p_b、p_j是 p_c的约 40 倍，因而忽略空化压力载荷作用，认为区域Ⅰ主要承受两个部分压力载荷作用，即入射冲击波作用和局部高压作用，可以简化为双三角形脉冲载荷，如图 6(a)所示。区域Ⅱ，承受 3 种压力载荷作用，即入射冲击波、局部高压、空化压力载荷作用，范围 $R_1<x< R_b$，R_b为后板最大空化半径。随着 x 的增加，p_j迅速衰减至零，与前板区域Ⅱ类似，该区域进入真空区后，不再承受空化压力作用，因而，此区域主要承受入射冲击波载荷作用，可以简化为三角形脉冲载荷，如图 6(b)所示。区域Ⅲ，承受两种压力载荷作用，即入射冲击波作用、空化压力作用，范围为 $x>R_b$。区域Ⅲ与后板撞击点 $x=0$ 距离较远，入射冲击波已迅速衰减，其压力峰值 p_b与空化压力峰值 p_c相差不大，因而区域Ⅲ主要受到空化压力载荷作用。可以简化为三角形脉冲载荷加矩形脉冲载荷，如图 6(c)所示。与前板区域Ⅲ类似，后板区域Ⅲ可进一步简化为长矩形脉冲载荷。

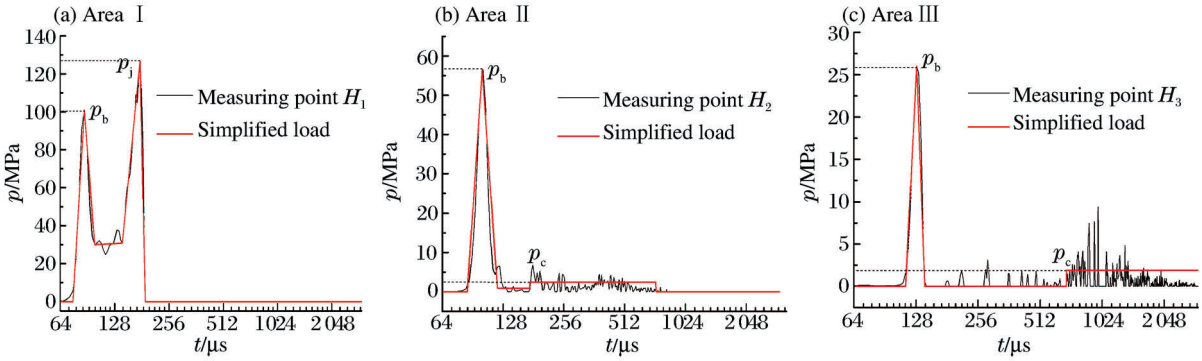

图 6 后板各区域载荷特性

Fig. 6 Load characteristics of each division of the rear plate

2.3 载荷强度及影响因素

2.3.1 载荷强度

图 7 为 $v_0=1\ 000$ m/s、$L=100$ mm 时作用前板载荷产生比冲量 I 及压力峰值 p_m变化关系曲线。由图可知：随着 x 的增加，入射冲击波压力峰值及作用比冲量不断减小。反射波压力峰值和比冲量基本保持不变。由于区域Ⅰ在反射波作用前板前已形成真空区，反射波载荷对区域Ⅰ作用比冲量为零。空化压力载荷压力峰值 p_c在整个过程中基本维持不变，但随着 x 的增加，其持续作用时间不断增长，因而比冲量迅速增大。另外，由于入射冲击波强度随着 x 的增加衰减速度远大于反射波，在 $x\approx110$ mm 处，反射波压力峰值大于入射冲击波压力峰值，反射波作用比冲量也大于入射冲击波。通过比较比冲量可知，区域Ⅰ和Ⅱ入射冲击波及反射波载荷比冲量远大于空化压力载荷，因而主要承受入射冲击波及反射波载荷作用。区域Ⅲ空化压力载荷作用比冲量最大，入射冲击波及反射波比冲量较小，主要承受空化压力载荷作用。这与在前板载荷特性分析中得到的结论是一致的。

图 8 为作用后板载荷产生比冲量 I 及压力峰值 p_m变化关系曲线。由图可知：随着 x 的增加，入射冲击波和局部高压载荷压力峰值及作用比冲量不断减小。并且，局部高压比入射冲击波强度衰减更迅速，在 $x\approx20$ mm 处时，其压力峰值小于入射冲击波。空化压力载荷压力峰值基本保持不变，但随着 x 的增加，载荷作用时间不断增加，比冲量不断增大。比较比冲量值可知，区域Ⅰ处入射冲击波和局部高压载荷作用比冲量巨大，因而主要承受入射冲击波及反射波载荷作用，他们使该区域预加巨大应力，极易产生穿甲破口，是蓄液结构后板破坏的主要载荷。区域Ⅱ局部高压作用比冲量已迅速衰减，但入射冲击波比冲量仍然较大，因而主要承受入射冲击波载荷作用。后板区域Ⅲ与前板区域Ⅲ相同，主要承受空化压力载荷作用。这与在后板载荷特性分析中得到的结论是一致的。

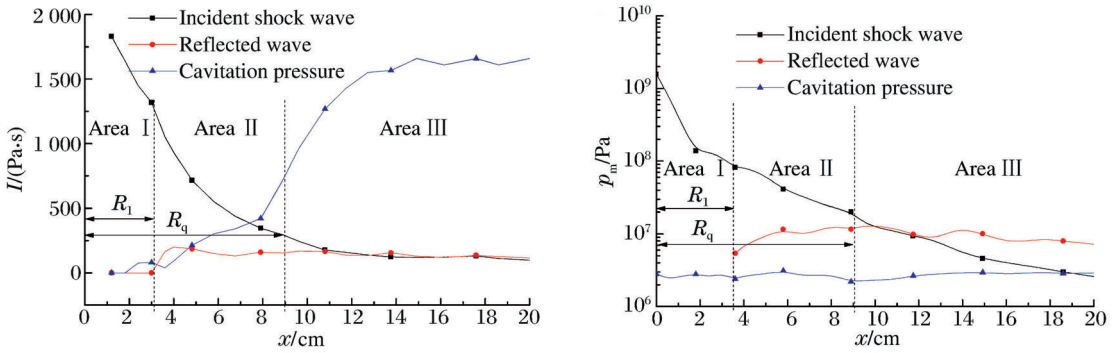

图 7　前板的比冲量及压力峰值(v_0=1 000 m/s，L=100 mm)

Fig. 7　Specific impulses and peak pressures of the front plate

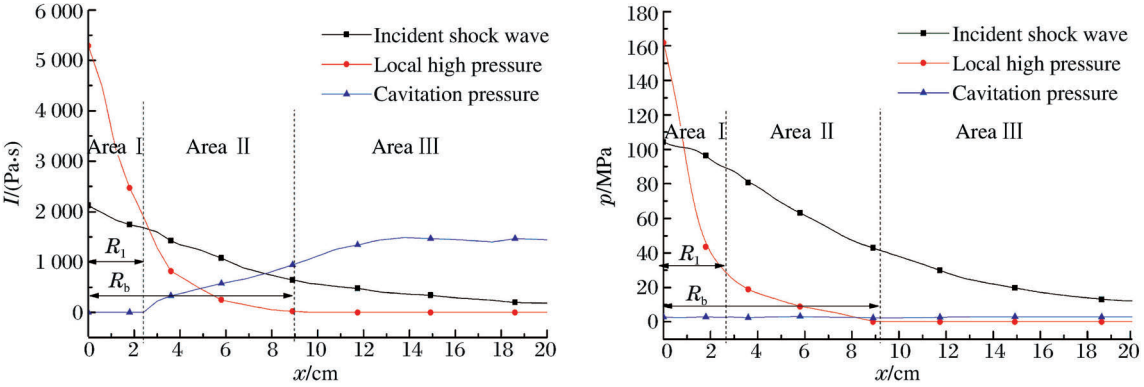

图 8　后板的比冲量及压力峰值(v_0=1 000 m/s，L=100 mm)

Fig. 8　Specific impulses and peak pressures of the rear plate

2.3.2　初速度影响因素

图 9 为不同初速下作用前板载荷产生比冲量 I 及压力峰值 p_m 变化关系曲线，图 10 为不同初速下作用后板载荷产生比冲量及压力峰值变化关系曲线。结合两图可知：随着初速度的增加，前后板所受入射冲击波压力峰值及比冲量不断增加。反射波压力峰值及作用前板比冲量也是不断增大的。另外，随着初速度的增加，弹体在运动至后板时剩余速度也不断增大，因而局部高压压力峰值及作用后板比冲量也不断增大。空泡扩张随着初速度的增加而加快，因而空化压力载荷压力峰值略有增加。随着初速增加，最大空化半径 R_f 增幅不大，各区域划分面积基本不变。区域Ⅰ和Ⅱ由于迅速进入真空区，空化压力载荷持续作用时间减小，因而比冲量也不断减小。而区域Ⅲ由于在最大真空区以外，空化压力载荷作用比冲量不断增加。

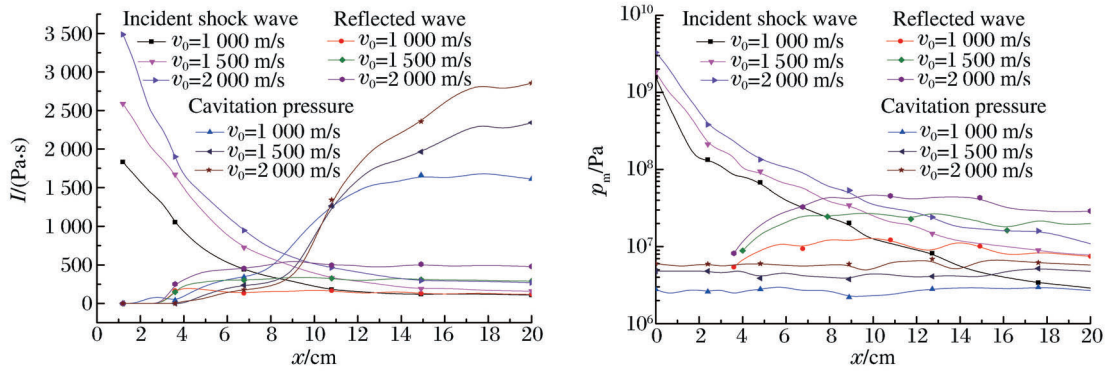

图 9　不同初速下前板的比冲量及压力峰值

Fig. 9　Specific impulses and peak pressures of the front plate at different initial velocities

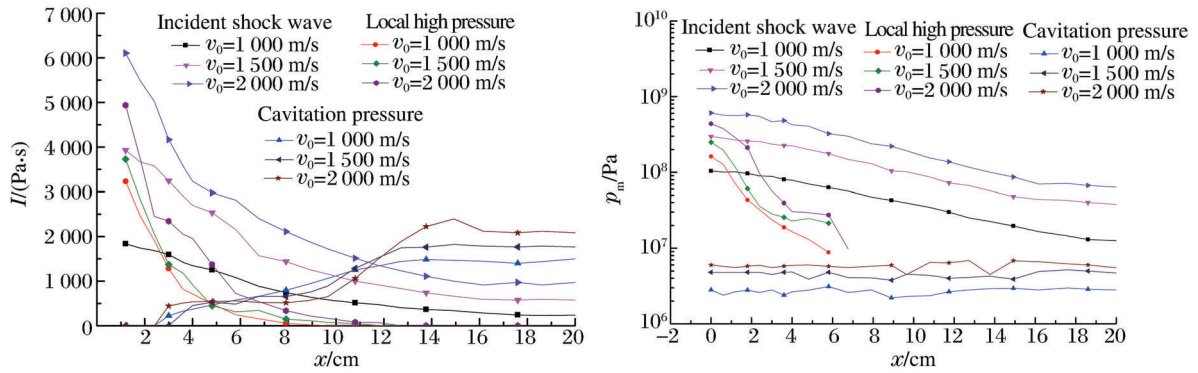

图 10 不同初速下后板的比冲量及压力峰值

Fig. 10 Specific impulses and peak pressures of the rear plate at different initial velocities

综上可知，随着速度的增加，前后板载荷压力峰值及比冲量均不断增大，入射冲击波和局部高压载荷的增加尤其显著，这更进一步加剧了蓄液结构后板的破坏。另外，当弹体速度足够高时，局部高压与入射冲击波载荷在蓄液结构中无法分离，二者同时作用于后板，使其预加巨大应力，破坏能力大大增强。

2.3.3 水域尺度影响因素

图 11 为不同水域长度 L 下作用前板载荷产生比冲量 I 及压力峰值 p_m 变化关系曲线。由图可知：随着水域长度的增加，入射冲击波压力峰值及作用前板比冲量基本不变。随着在液体中传播距离的增加，反射波强度迅速衰减，因而压力峰值及比冲量大大减小。当 L=300 mm 时，反射波压力峰值与空化压力载荷峰值基本相同，在 2 MPa 左右。另外，随着水域长度的增加，空化载荷压力峰值基本保持不变，但弹体在水中运动开坑空化作用时间增加，因而空化压力载荷作用比冲量不断增加。

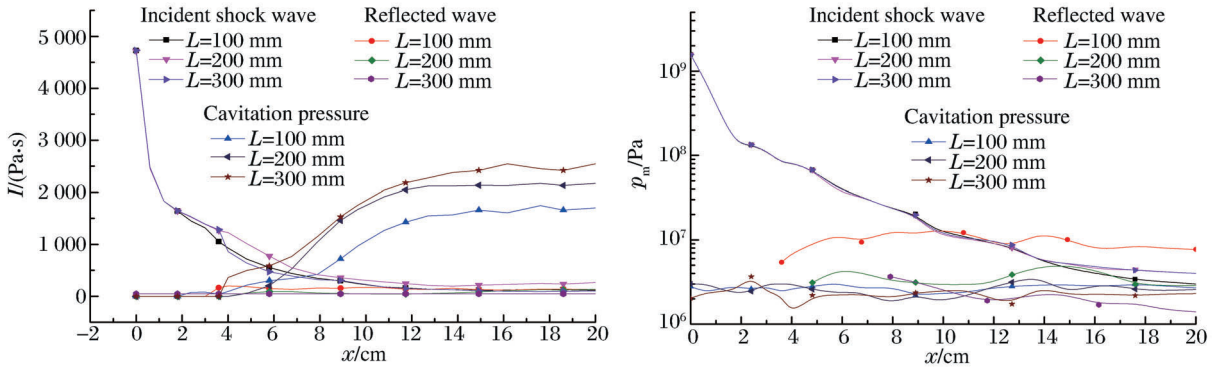

图 11 不同水域长度下前板的比冲量及压力峰值

Fig. 11 Specific impulses and peak pressures on the front plate at different lengths of waters

图 12 为不同水域长度下作用后板载荷产生比冲量 I 及压力峰值 p_m 变化关系曲线。由图可知：随着水域长度 L 的增加，即入射冲击波在液体中传播距离的增加，其压力峰值迅速降低，因而作用于后板的比冲量也不断减小。同时，随着在液体中侵彻距离的增加，弹体运动至后板附近时剩余速度减小，因而局部高压压力峰值及比冲量不断减小。另外，随着水域长度 L 的增加，R_b 基本呈线性不断减小。因而，后板真空区域大大减小。区域Ⅰ和Ⅱ范围大大减小，区域Ⅲ范围大大增加，空化压力载荷作用面积大幅增加，比冲量迅速增加。

综合可知：随着水域长度的增加，入射冲击波载荷、局部高压载荷压力峰值和比冲量迅速减小，而空化压力载荷作用比冲量不断增加，蓄液结构的抗侵彻能力和吸能能力得到了增强。水域宽度和高度方向对冲击波载荷特性影响不大，但空化压力载荷作用得到了增强。这是因为，随着蓄液结构宽度和高度方向的增加，前后板空化半径不断增加。因此，空泡膨胀至最大尺寸时间增加，即空化作用时间增加，空化压力载荷作用比冲量不断增加。

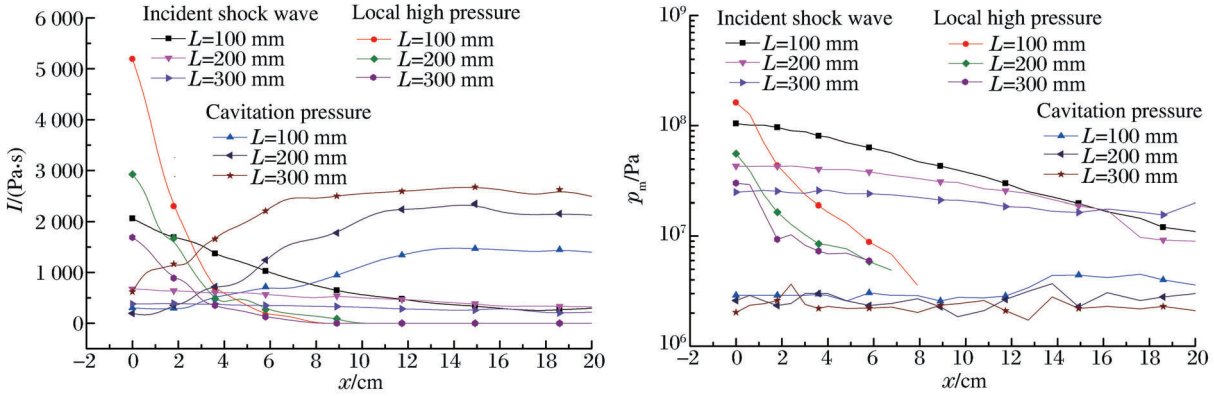

图 12　不同水域长度下后板的比冲量及压力峰值

Fig. 12　Specific impulses and peak pressures on the rear plate at different lengths of waters

2.3.4　压力峰值回归分析

以上探究了初速和水域尺度因素对前后板载荷强度的影响,并进行了定性的分析。若要对载荷强度进行定量研究,直接运用波动理论比较困难,因而可进行回归分析。入射冲击波的压力峰值为 p,弹体初速为 v_0,传播距离为 r。随着入射冲击波的传播,波阵面的面积不断扩大,这就导致了冲击波的几何弥散现象,从而引起压力峰值的下降,可以考虑形式为 $p=k\dfrac{v_0^2+bv_0+c}{r^a}$。对于前、后板,传播距离分别为 $r=x$、$r=\sqrt{L^2+x^2}$,前、后板所受入射冲击波压力峰值 p_f(Pa)关于传播距离 r(m)、初速 v_0(m/s)的拟合关系式为:

$$p_f=\frac{0.32v_0^2+735.44v_0-412\,983.27}{x^{1.39}},\qquad p_b=\frac{3.14v_0^2-2\,283.56v_0+783\,199.1}{(\sqrt{L^2+x^2})^{1.76}}$$

弹体运动速度 v_p、局部高压 p_l 可表示为[9-10]:

$$v_p(s)=v_0e^{-3C_x\rho_l s/4d_p},\qquad p_l=\rho_l cv_p+\rho_l S_l v_p^2$$

式中:ρ_l 为液舱内液体的密度;c 为液体中声速,$c=1\,470$ m/s;S_l 为液体的 Hugoniot 系数,$S_l=1.94$;v_p 为弹体在液舱中的运动速度;C_x 为阻力系数;d_p 为弹体直径。

弹体速度 v_p 与初速 v_0、位移 s(m)的拟合关系式为:

$$v_p(s)=v_0e^{-8.90s}$$

因此,当弹体运动位移为 s 时,局部高压 p_l(Pa)关系式为:

$$p_l=\rho_l(cv_0e^{-8.90s}+S_lv_0e^{-17.8s})$$

3　结　论

(1)阐述了冲击载荷作用全过程,并按照前后板所受冲击载荷种类及过程的不同,将前后板主要分为 3 个区域,并建立了每个分区的简化计算模型。前、后板区域Ⅰ和Ⅱ主要作用载荷,分别为压力峰值高但持续时间极短的入射冲击波载荷,及入射冲击波-局部高压载荷作用,压力峰值较小但长时间的空化压力载荷为区域Ⅲ的主要作用载荷。

(2)入射冲击波和局部高压载荷压力峰值及比冲量随着初速度的增大而迅速增大,当速度足够高时,二者在蓄液结构中无法分离,将一齐作用于后板,使其预加巨大应力,极易产生破口破坏。空化压力载荷主要使液体动能逐步转换为板变形能,使其弯曲变形。

(3)水域尺度宽度和高度方向对冲击波载荷特性影响不大,但空化压力载荷作用得到了增强。水域尺度长度方向对冲击波载荷特性具有衰减作用,同时,也增强了空化压力载荷作用。

(4)针对蓄液结构防护设计时,问题的关键在于如何削弱入射冲击波和局部高压载荷作用。

参考文献:

[1] Lecysyn N, Dandrieux A, Heymes F, et al. Ballistic impact on an industrial tank: Study and modeling of consequences[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,172(2/3):587-594.

[2] Disimile P J, Toy N, Swanson L A. A large-scale shadowgraph technique applied to hydrodynamic ram[J]. Journal of Flow Visualization & Image Processing, 2009,16(4):1-30.

[3] McMillen J H. Shock wave pressures in water produced by impact of smallspheres[J]. Physical Review, 1945,68(9/10):198-209.

[4] McMillen J H, Harvey E N. A spark shadowgraphic study of body waves in water[J]. Journal of Applied Physics, 1946,17(7):541-555.

[5] Disimile P J, Davis J, Toy N, et al. Mitigation of shock waves within a liquidfilled tank[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(2):61-72.

[6] Townsend D, Park N, Devall P M. Failure of fluid filled structures due to high velocity fragment impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29:723-733.

[7] Borg J P, Cogar J R,Tredways S, et al. Damage resulting from high speed projectile liquid filled metal tanks[C]// Wassex Institute of Technologies Press. 2001:889-902.

[8] Varas D, Zaera R, Lopez-Puente J. Numerical modeling of the hydrodynamic ram phenomenon[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(3):363-374.

[9] Lecysyna N, Bony-Dandrieux A, Aprin L. Experimental study of hydraulic ram effects on a liquid storage tank: Analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1):635-643.

[10] Lecysyn N, Dandrieux A, Heymes F, et al. Preliminary study of ballistic impact on an industrial tank: Projectile velocity decay[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008,21(6):627-634.

Finite element analysis of load characteristic of liquid-filled structure subjected to high velocity long-rod projectile penetration

Li Dian, Zhu Xi, Hou Hailiang, Zhong Qiang

(*Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei*, *China*)

Abstract: To find effective protection for fluid-filled structures subjected to high-speed projectile penetration, we studied the characteristics of a structure bearing impact loads when undergoing high velocity rod projectile penetration using dynamic nonlinear finite element, and analyzed the process of the impact load, the load strength, the projectile initial velocity, and water scale, and their effects on the front and rear plates that bear the impact. Our results show that the initial penetrating effect (pit-opening) on the liquid-filled structure forms incident shock waves, which will have a high peak pressure but a short duration, and produce multiple reflections in the liquid. Along with the penetration process in the liquid, the cavitation will occur and result in a cavitation pressure load which will reach a small peak value with a long duration. Local high pressure load will be formed due to the rear plate hindering the liquid flow, and incident shock wave and local high pressure increase with the increase of the initial projectile velocity but decrease with the increase of the length of the waters. According to different characteristics of shock load borne by different parts of the structure, the front and rear plates are divided into three different areas, and a simplified model was established for each.

Key words: mechanics of explosion; load characteristic; finite element analysis; liquid-filled structure; load strength; influencing factor

(责任编辑 丁 峰)