



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117789879 B

(45) 授权公告日 2024.10.01

(21) 申请号 202311798529.8

G06F 113/26 (2020.01)

(22) 申请日 2023.12.26

G06F 119/14 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117789879 A

(56) 对比文件

CN 111814366 A, 2020.10.23

CN 114611423 A, 2022.06.10

(43) 申请公布日 2024.03.29

(73) 专利权人 武汉理工大学

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122号

审查员 宣建

(72) 发明人 黄治新 李营 何纤纤 曹晓飞

(74) 专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限
公司 42102

专利代理师 王杰

(51) Int. Cl.

G16C 60/00 (2019.01)

G06F 30/20 (2020.01)

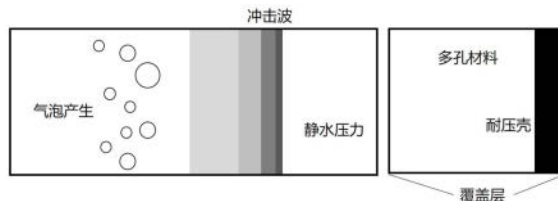
权利要求书3页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法

(57) 摘要

本发明涉及一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,建立抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷共同作用下的一维抗冲理论模型,该模型包括抗冲覆盖层在静水压力作用下的预应力及冲击载荷作用下的动态压缩过程;抗冲覆盖层与水的流固耦合作用;水中空化的发生、溃灭过程以及溃灭导致的二次加载过程;在理论模型的基础上,对抗冲覆盖层完整冲击过程进行分析,包括S1、动态压缩过程分析,S2、流固耦合分析,S3、空化发生与溃灭过程分析。本发明在理论模型的基础上,形成抗冲覆盖层在静水压力和冲击波共同作用下的理论计算方法,可用于分析覆盖层的冲击防护效果,为研究耐压抗冲覆盖层的冲击防护机理提供理论支撑。



1. 一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,其特征在于,建立抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷共同作用下的一维抗冲理论模型,该模型包括三部分:(1)抗冲覆盖层在静水压力作用下的预应力及冲击载荷作用下的动态压缩过程;(2)抗冲覆盖层与水的流固耦合作用;(3)水中空化的发生、溃灭过程以及溃灭导致的二次加载过程;

在理论模型的基础上,对抗冲覆盖层完整冲击过程进行分析,包括:

S1、动态压缩过程分析:

根据冲击波理论,冲击波载荷采用指数衰减波的形式来描述,根据动量守恒定律和质量守恒方程,获得冲击波的传播速度;根据动量守恒定律求得覆盖层的内能变化量;

覆盖层表面为塑性多孔材料时,材料内部存在强间断弹性前驱波和后续塑性冲击波,分别求其波速和波面应力;

塑性冲击波作用下产生的卸载过程,需要考虑应变硬化效应,得到卸载区的控制方程;

根据牛顿第二定律,得到耐压壳与被压溃多孔材料的运动方程;

S2、流固耦合分析:

根据入射冲击波的反射规律,求由于反射导致的反射波 p_r 和由于覆盖层变形导致的稀疏波 $-\rho_w c_w V$,其中, ρ_w 表示水介质的密度, c_w 为声波在水中的传播速度, V 为塑性冲击波波后覆盖层中的粒子速度;在静水压力和冲击波的共同作用下,求在不考虑空化和气泡溃灭情况下的覆盖层湿表面总压力:

$$p_{wet} = p_{st} + p_{in} + p_r - \rho_w c_w V \quad (23)$$

其中, p_{st} 为冲击波作用前的静水压力, p_{in} 为入射冲击波;

S3、空化发生与溃灭过程分析:

反射波和稀疏波导致水中产生空化现象,根据空化产生条件,以及水域内水粒子的压力和速度,可求得水中任一位置的空化时间,进一步得到首次发生空化的位置与时刻;结合水粒子速度表达式,可求空化位置处水粒子空化时的速度;具体的:冲击波作用到抗冲覆盖层上以后,反射波和稀疏波会沿着与入射冲击波传播方向相反的方向在水中传播,记入射冲击波传递到流固耦合面的时刻为0时刻,在 t 时刻,反射波和稀疏波传递的距离为 $c_w t$,在 $-c_w t < x < 0$ 的水域中,水粒子的压力和速度分别为:

$$\begin{cases} p_w(x, t) = p_{st} + p_{in}(x, t) + p_r(x, t) - \rho_w c_w V \\ V_w(x, t) = \frac{p_{in}(x, t)}{\rho_w c_w} - \frac{p_r(x, t)}{\rho_w c_w} + V \end{cases} \quad (24)$$

水中发生空化时,满足 $p_w(x, t) = 0$,对于水中任一位置 x ,求解该方程可以得到空化时间 t_{cav} ;

对于一系列的 (x, t_{cav}) 组合,其中 t_{cav} 取得最小值的位置即为首次发生空化的位置,记首次发生空化的位置和时刻为 (x_f, t_f) ;

将空化时间 t_{cav} 带入水粒子速度表达式并考虑 $p_w(x, t_{cav}) = 0$,得到位于 x 处水粒子空化时的速度为:

$$V_{cav}(x, t_{cav}) = \frac{2p_{in}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} \quad (25)$$

其中, $p_{in}(x, t_{cav})$ 表示 x 水粒子在 t_{cav} 时刻的入射冲击波, $p_{st}(x, t_{cav})$ 表示 x 水粒子在 t_{cav} 时刻的静水压力;

空化后产生的气泡会发生溃灭,溃灭产生的重构波处压力是重构波波前压力、重构波辐射波压力和静水压力之和;重构波波前压可由反射波和稀疏波求得;具体的:空化溃灭的传播速度为亚声速,记空化溃灭辐射的波为重构波,假设重构波波前此时处于 x_{CF} 处,沿 $-x$ 方向作用到重构波波前的压力记为 $p_{CF,in}$,其为反射波和稀疏波的和,即:

$$p_{CF,in} = p_r - \rho_w c_w V \quad (26)$$

空化溃灭在重构波波前处的辐射波压力记为 $p_{CF,out}$,于是处于重构波波前处的水粒子的压力和速度可以表示为:

$$\begin{cases} p_{CF} = p_{CF,in} + p_{CF,out} + p_{st} \\ v_{CF} = -\frac{p_{CF,in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{CF,out}}{\rho_w c_w} \end{cases} \quad (27)$$

关于辐射波压力 $p_{CF,out}$,有:

$$\begin{cases} p_{CF} = \frac{(1-\eta)\rho_w c_w \lambda^2}{2\lambda + (c_w - 2\lambda)\eta} \\ c_{CF} = -\frac{c_w \lambda}{\lambda + (c_w - \lambda)\eta} \\ p_{CF,out} = p_{CF} - p_{CF,in} - p_{st} \end{cases} \quad (31)$$

其中, p_{CF} 表示空化溃灭后空化区域 dx 处的压力, η 为 dx 厚度中空化所占的分数, c_{CF} 为重构波波前的传播速度,参量 λ 表示为:

$$\lambda = \frac{2p_{CF,in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}}{\rho_w c_w} + V_{cav} \quad (32)$$

溃灭过程会产生水粒子的压缩,根据位移连续方程,结合重构波波面的动量守恒,可求得重构波波前的传播速度、重构波处压力以及重构波辐射波压力;进而求得覆盖层的真实入射冲击波和考虑空化影响的湿表面压力;具体的:当由于空化溃灭辐射的重构波首次传递到流固耦合面时,将取代入射冲击波作用到抗冲覆盖层上,因此,真实的入射冲击波可表示为:

$$p_a = \begin{cases} p_{in}, 0 < t < t_a \\ p_{CF,out}, t \geq t_a \end{cases} \quad (33)$$

其中, t_a 为空化溃灭所辐射的波首次传递到流固耦合面的时间;

最终,考虑空化的影响,湿表面总压力的表达式可改写为:

$$p_{wet} = p_{st} + p_a + p_r - \rho_w c_w V \quad (34)$$

2. 根据权利要求1所述的气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,其特征在于,步骤S1中,冲击波的传播速度为:

$$V_s = \sqrt{\frac{\sigma^+ - \sigma^-}{\rho_R(\varepsilon^+ - \varepsilon^-)}} \quad (4)$$

式中, V_s 表示冲击波的传播速度, σ^- 为波前应力, σ^+ 为波后应力, ε^- 为波前应变, ε^+ 为波后应变, ρ_R 为塑性多孔材料的初始密度。

3. 根据权利要求2所述的气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,其特征在于,步骤S1中,冲击波波阵面处单位质量多孔材料的内能变化为:

$$E^+ - E^- = \frac{1}{2\rho_R} (\sigma^+ + \sigma^-)(\varepsilon^+ - \varepsilon^-) \quad (7)$$

式中, E^- 表示波前单位质量多孔材料中的内能, E^+ 表示波后单位质量多孔材料中的内能。

4. 根据权利要求3所述的气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法, 其特征在于, 步骤S1中, 在冲击波作用前, 抗冲覆盖层在静水压力 p_{st} 作用下处于平衡状态, 覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: p_{st} 、 ε_{st} 、0;

弹性前驱波过后, 覆盖层中的应力、应变和粒子速度记为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 , 根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$V_0 = C_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_{st}), \sigma_0 - p_{st} = \rho_R C_0 V_0 \quad (8)$$

式中, C_0 为弹性波波速, 满足 $C_0 = \sqrt{E_s/\rho_R}$, E_s 为多孔材料线弹性阶段的杨氏模量;

塑性冲击波波前粒子的状态为弹性前驱波波后的状态, 即覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 ; 记塑性冲击波波后覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_d 、 ε_d 、 V , 根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$V - V_0 = V_s (\varepsilon_d - \varepsilon_0), \sigma_d - \sigma_0 = \rho_R V_s (V - V_0) \quad (9)$$

则, 塑性冲击波阵面波后动态应力为: $\sigma_d = \sigma_0 + \rho_R \frac{(V - V_0)^2}{\varepsilon_d - \varepsilon_0}$ (10)。

5. 根据权利要求4所述的气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法, 其特征在于, 步骤S1中, 卸载区的控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial X} \\ \rho_R \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial X} \\ \bar{\sigma} = \sigma_m + E_s (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_m) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\bar{\varepsilon}$ 表示弹性卸载的应变, t 表示时间, \bar{V} 表示弹性卸载的速度, X 表示塑性多孔材料的初始横向坐标, $\bar{\sigma}$ 表示弹性卸载的应力, σ_m 和 ε_m 分别表示卸载前塑性变形所达到的应力和应变, E_s 为多孔材料线弹性阶段的杨氏模量。

6. 根据权利要求5所述的气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法, 其特征在于, 步骤S1中, 根据牛顿第二定律, 同时考虑耐压壳固定, 得到塑性多孔覆盖层在静水压力及冲击波作用下的运动方程为:

$$[m_f + \rho_0(u + h)] \frac{d^2 u}{dt^2} + \sigma_d - p_{wet} = 0 \quad (19)$$

其中, m_f 为覆盖层面板单位面积的质量; ρ_0 为塑性多孔材料的初始密度; u 为覆盖层前面板的位移; h 为被压溃部分压溃后的厚度; σ_d 为塑性冲击波波后覆盖层中的应力; p_{wet} 为湿表面总压力, 需要考虑流固耦合及空化的作用。

一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及潜艇覆盖层抗冲击计算技术领域,具体涉及一种潜艇抗冲覆盖层结构在近距离水下爆炸冲击载荷作用下的动态响应计算方法。

背景技术

[0002] 对于水下结构物来说,水下爆炸冲击载荷具有致命威胁。如何缓解水下爆炸冲击产生的破坏作用是保障水下结构物安全性的关键问题。目前,一种有效措施是在结构物表面添加抗冲击覆盖层,然而并非所有覆盖层都能缓解水下爆炸冲击。带有吸声空腔的覆盖层在爆炸冲击波作用下反而会降低结构物的抗冲击性能。抗冲击覆盖层缓解水下爆炸冲击波破坏作用的主要机理在于:对于远距离的水下爆炸载荷,覆盖层的吸能性能能够有效降低冲击波作用在结构物的峰值;对于近距离的水下爆炸载荷,抗冲击覆盖层会产生大变形压溃,并造成水中气泡效应,降低冲击波在结构物表面由于波反射、绕射产生的持续而强烈的冲击载荷。近距离的水下爆炸过程中,爆炸气泡溃灭时产生的朝向结构物的高速水射流更为致命,可能造成船体整体断裂。为分析抗冲覆盖层的冲击防护机理,提高覆盖层在近距离水下爆炸载荷下的抗冲击防护性能,有必要开展气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应的水下爆炸理论计算方法的研究。该研究过程主要存在两个技术难题:(1) 气泡载荷在柔性界面处的演化规律不清,缺少有效的载荷预测方法;(2) 强冲击载荷下的流固耦合效应,缺少有效的理论分析方法。

发明内容

[0003] 本发明要解决的技术问题在于针对上述现有技术存在的技术问题,提供一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,该方法建立潜艇覆盖层在高静水压及水下爆炸冲击波共同作用下的一维抗冲理论模型,包括覆盖层的动态压缩、流固耦合以及空化形成和溃灭过程;在理论模型的基础上,形成抗冲覆盖层在静水压力和冲击波共同作用下的理论计算方法,可用于分析覆盖层的冲击防护效果,为研究耐压抗冲覆盖层的冲击防护机理提供理论支撑。

[0004] 本发明为解决上述提出的技术问题所采用的技术方案为:

[0005] 一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,建立抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷共同作用下的一维抗冲理论模型,该模型包括三部分:(1) 抗冲覆盖层在静水压力作用下的预应力及冲击载荷作用下的动态压缩过程;(2) 抗冲覆盖层与水的流固耦合作用;(3) 水中空化的发生、溃灭过程以及溃灭导致的二次加载过程;

[0006] 在理论模型的基础上,对抗冲覆盖层完整冲击过程进行分析,包括:

[0007] S1、动态压缩过程分析:

[0008] 根据冲击波理论,冲击波载荷采用指数衰减波的形式来描述,根据动量守恒定律和质量守恒方程,获得冲击波的传播速度;根据动量守恒定律求得覆盖层的内能变化量;

[0009] 覆盖层表面为塑性多孔材料时,材料内部存在强间断弹性前驱波和后续塑性冲击

波,分别求其波速和波面应力;

[0010] 塑性冲击波作用下产生的卸载过程,需要考虑应变硬化效应,得到卸载区的控制方程;

[0011] 根据牛顿第二定律,得到耐压壳与被压溃多孔材料的运动方程;

[0012] S2、流固耦合分析:

[0013] 根据入射冲击波的反射规律,求由于反射导致的反射波和由于覆盖层变形导致的稀疏波,在静水压力和冲击波的共同作用下,求在不考虑空化和气泡溃灭情况下的流固耦合面上的总压力;

[0014] S3、空化发生与溃灭过程分析:

[0015] 反射波和稀疏波导致水中产生空化现象,根据空化产生条件,以及水域内水粒子的压力和速度,可求得水中任一位置的空化时间,进一步得到首次发生空化的位置与时刻;结合水粒子速度表达式,可求空化位置处水粒子空化时的速度;

[0016] 空化后产生的气泡会发生溃灭,溃灭产生的重构波处压力是重构波波前压力、重构波辐射波压力和静水压力之和;重构波波前压可由反射波和稀疏波求得;

[0017] 溃灭过程会产生水粒子的压缩,根据位移连续方程,结合重构波波面的动量守恒,可求得重构波波前的传播速度、重构波处压力以及重构波辐射波压力;进而求得覆盖层的真实入射冲击波和考虑空化影响的湿表面压力。

[0018] 上述方案中,步骤S1中,冲击波的传播速度为:

$$[0019] \quad V_s = \sqrt{\frac{\sigma^+ - \sigma^-}{\rho_R(\varepsilon^+ - \varepsilon^-)}} \quad (4)$$

[0020] 式中, V_s 表示冲击波的传播速度, σ^- 为波前应力, σ^+ 为波后应力, ε^- 为波前应变, ε^+ 为波后应变, ρ_R 为塑性多孔材料的初始密度。

[0021] 上述方案中,步骤S1中,冲击波波阵面处单位质量多孔材料的内能变化为:

$$[0022] \quad E^+ - E^- = \frac{1}{2\rho_R}(\sigma^+ + \sigma^-)(\varepsilon^+ - \varepsilon^-) \quad (7)$$

[0023] 式中, E^- 表示波前单位质量多孔材料中的内能, E^+ 表示波后单位质量多孔材料中的内能。

[0024] 上述方案中,步骤S1中,在冲击波作用前,抗冲覆盖层在静水压力 p_{st} 作用下处于平衡状态,覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: p_{st} 、 ε_{st} 、0;

[0025] 弹性前驱波过后,覆盖层中的应力、应变和粒子速度记为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 ,根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$[0026] \quad V_0 = C_0(\varepsilon_0 - \varepsilon_{st}), \sigma_0 - p_{st} = \rho R C_0 V_0 \quad (8)$$

[0027] 式中, C_0 为弹性波波速,满足 $C_0 = \sqrt{E_s/\rho_R}$, E_s 为多孔材料线弹性阶段的杨氏模量;

[0028] 塑性冲击波波前粒子的状态为弹性前驱波波后的状态,即覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 ;记塑性冲击波波后覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_d 、 ε_d 、 V ,根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$[0029] \quad V - V_0 = V_s(\varepsilon_d - \varepsilon_0), \sigma_d - \sigma_0 = \rho R V_s(V - V_0) \quad (9)$$

[0030] 则,塑性冲击波阵面波后动态应力为: $\sigma_d = \sigma_0 + \rho_R \frac{(V-V_0)^2}{\varepsilon_d - \varepsilon_0}$ (10)。

[0031] 上述方案中,步骤S1中,卸载区的控制方程为:

$$[0032] \begin{cases} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial X} \\ \rho_R \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial X} \\ \bar{\sigma} = \sigma_m + E_s(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_m) \end{cases} \quad (16)$$

[0033] 式中, $\bar{\varepsilon}$ 表示弹性卸载的应变,t表示时间, \bar{V} 表示弹性卸载的速度,X表示塑性多孔材料的初始横向坐标, $\bar{\sigma}$ 表示弹性卸载的应力, σ_m 和 ε_m 分别表示卸载前塑性变形所达到的应力和应变, E_s 为多孔材料线弹性阶段的杨氏模量。

[0034] 上述方案中,步骤S1中,根据牛顿第二定律,同时考虑耐压壳固定,得到塑性多孔覆盖层在静水压力及冲击波作用下的运动方程为:

$$[0035] [m_f + \rho_0(u + h)] \frac{d^2 u}{dt^2} + \sigma_d - p_{wet} = 0 \quad (19)$$

[0036] 其中, m_f 为覆盖层面板单位面积的质量; ρ_0 为塑性多孔材料的初始密度; u 为覆盖层前面板的位移; h 为被压溃部分压溃后的厚度; σ_d 为塑性冲击波后覆盖层中的应力; p_{wet} 为湿表面总压力,需要考虑流固耦合及空化的作用。

[0037] 上述方案中,步骤S2中,水下爆炸冲击波传递到流固耦合面上后发生的反射波为 p_r ;同时,覆盖层要产生大变形,形成稀疏波 $-p_{wcw}V$,其中, ρ_w 表示水介质的密度, c_w 为声波在水中的传播速度;

[0038] 在考虑静水压力和冲击波共同作用的情况下,覆盖层湿表面总压力可表示为:

$$[0039] p_{wet} = p_{st} + p_{in} + p_r - p_{wcw}V \quad (23)$$

[0040] 其中, p_{st} 为冲击波作用前的静水压力, p_{in} 为入射冲击波。

[0041] 上述方案中,步骤S3中,冲击波作用到抗冲覆盖层上以后,反射波和稀疏波会沿着与入射冲击波传播方向相反的方向在水中传播,记入射冲击波传递到流固耦合面的时刻为0时刻,在t时刻,反射波和稀疏波传递的距离为 $c_w t$,在 $-c_w t < x < 0$ 的水域中,水粒子的压力和速度分别为:

$$[0042] \begin{cases} p_w(x, t) = p_{st} + p_{in}(x, t) + p_r(x, t) - \rho_w c_w V \\ V_w(x, t) = \frac{p_{in}(x, t)}{\rho_w c_w} - \frac{p_r(x, t)}{\rho_w c_w} + V \end{cases} \quad (24)$$

[0043] 水中发生空化时,满足 $p_w(x, t) = 0$,对于水中任一位置x,求解该方程可以得到空化时间 t_{cav} ;

[0044] 对于一系列的(x, t_{cav})组合,其中 t_{cav} 取得最小值的位置即为首次发生空化的位置,记首次发生空化的位置和时刻为(x_f, t_f);

[0045] 将空化时间 t_{cav} 带入水粒子速度表达式并考虑 $p_w(x, t_{cav}) = 0$,得到位于x处水粒子空化时的速度为:

$$[0046] V_{cav}(x, t_{cav}) = \frac{2p_{in}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} \quad (25)$$

[0047] 其中, $p_{in}(x, t_{cav})$ 表示 x 处水粒子在 t_{cav} 时刻的入射冲击波, $p_{st}(x, t_{cav})$ 表示 x 处水粒子在 t_{cav} 时刻的静水压力。

[0048] 上述方案中, 步骤S3中, 空化溃灭的传播速度为亚声速, 记空化溃灭辐射的波为重构波, 假设重构波波前此时处于 x_{CF} 处, 沿 $-x$ 方向作用到重构波波前的压力记为 $p_{CF, in}$, 其为反射波和稀疏波的和, 即:

$$[0049] \quad p_{CF, in} = p_r - \rho_w c_w V \quad (26)$$

[0050] 空化溃灭在重构波波前处的辐射波压力记为 $p_{CF, out}$, 于是处于重构波波前处的水粒子的压力和速度可以表示为:

$$[0051] \quad \begin{cases} p_{CF} = p_{CF, in} + p_{CF, out} + p_{st} \\ v_{CF} = -\frac{p_{CF, in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{CF, out}}{\rho_w c_w} \end{cases} \quad (27)$$

[0052] 关于辐射波压力 $p_{CF, out}$, 有:

$$[0053] \quad \begin{cases} p_{CF} = \frac{(1-\eta)\rho_w c_w \lambda^2}{2\lambda + (c_w - 2\lambda)\eta} \\ c_{CF} = -\frac{c_w \lambda}{\lambda + (c_w - \lambda)\eta} \\ p_{CF, out} = p_{CF} - p_{CF, in} - p_{st} \end{cases} \quad (31)$$

[0054] 其中, p_{CF} 表示空化溃灭后空化区域 dx 处的压力, η 为 dx 厚度中空化所占的分数, c_{CF} 为重构波波前的传播速度, 参量 λ 可表示为:

$$[0055] \quad \lambda = \frac{2p_{CF, in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}}{\rho_w c_w} + V_{cav} \quad (32)。$$

[0056] 上述方案中, 步骤S3中,

[0057] 当由于空化溃灭辐射的重构波首次传递到流固耦合面时, 将取代入射冲击波作用到抗冲覆盖层上, 因此, 真实的入射冲击波可表示为:

$$[0058] \quad p_a = \begin{cases} p_{in}, & 0 < t < t_a \\ p_{CF, out}, & t \geq t_a \end{cases} \quad (33)$$

[0059] 其中, t_a 为空化溃灭所辐射的波首次传递到流固耦合面的时间;

[0060] 最终, 考虑空化的影响, 湿表面总压力的表达式可改写为:

$$[0061] \quad p_{wet} = p_{st} + p_a + p_r - \rho_w c_w V \quad (34)。$$

[0062] 本发明的有益效果在于:

[0063] 1. 针对气泡载荷在柔性界面处的演化规律不清, 缺少有效的载荷预测方法的技术难题, 建立了高静水压及水下爆炸冲击波共同作用下的一维抗冲理论模型, 该模型考虑了静水压力和水下爆炸冲击波的共同作用, 涵盖了整个冲击作用过程: 覆盖层动态压缩过程、流固耦合过程、流场中空化的产生和溃灭过程。在理论模型的基础上, 形成抗冲覆盖层在静水压力和冲击波共同作用下的理论计算方法, 可用于分析覆盖层的冲击防护效果, 为研究耐压抗冲覆盖层的冲击防护机理提供理论支撑。

[0064] 2. 为解决强冲击载荷下的流固耦合效应, 缺少有效的理论分析方法的技术难题, 考虑了首次发生空化的位置与湿表面间流体所携带的冲量对覆盖层的影响。该模型与自由 Taylor 板理论相比, 不仅可以考虑塑性多孔材料的作用, 同时还可以考虑首次空化位置与

湿表面间流体所携带的冲量,所估算的传递到流固耦合面上的冲量更准。

附图说明

- [0065] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:
 [0066] 图1是本发明方法的塑性多孔材料材料模型;
 [0067] 图2是本发明方法的耐压抗冲覆盖层在静水压及冲击波作用下的一维理论模型;
 [0068] 图3是本发明中冲击波在多孔材料中传播示意图;
 [0069] 图4是本发明方法的耐压抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷作用下的运动情况;
 [0070] 图5是本发明方法的空化形成过程和溃灭过程;
 [0071] 图6是采用本发明方法计算空化形成及溃灭过程以及空化粒子速度的结果;
 [0072] 图7是采用本发明方法计算湿表面真实入射压力及总压力的结果。

具体实施方式

[0073] 为了对本发明的技术特征、目的和效果有更加清楚的理解,现对照附图详细说明本发明的具体实施方式。

[0074] 由于潜艇抗冲覆盖层持续受到高静水压的作用,覆盖层材料需要具备较高的弹性模量和明显的应力平台阶段,如塑性多孔材料。塑性多孔材料材料模型可简化为等效刚塑性模型,如图1所示。等效刚塑性模型主要用两个参量来描述塑性多孔材料的应力-应变特性:平台应力(σ_{pl})和密实化应变(ϵ_D),密实化应变通常定义为吸能效率最大时的应变。对所选取的塑性多孔材料开展单轴压缩实验,得到其名义应力-应变曲线。吸能效率 E_a 定义为在名义应变为 ϵ_n 时的吸能量与该应变所对应的应力的商,即:

$$[0075] \quad E_a(\epsilon_n) = \frac{\int_0^{\epsilon_n} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon_n)}$$

[0076] 根据 $\frac{dE(\epsilon)}{d\epsilon} = 0$,确定密实化应变 ϵ_D ,根据密实化应变求得对应的平台应力 σ_{pl} 。平台应力定义为从屈服应变 ϵ_0 到密实化应变 ϵ_D 的平均应力,即:

$$[0077] \quad \sigma_{pl} = \frac{1}{\epsilon_D - \epsilon_0} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

[0078] 本发明提出一种气泡脉动与抗冲覆盖层耦合响应计算方法,以具备较高的弹性模量和明显的应力平台阶段的塑性多孔材料作为覆盖层材料,建立抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷共同作用下的一维抗冲理论模型,该模型主要包括三部分,如图2所示:(1)抗冲覆盖层在静水压力作用下的预应力及冲击载荷作用下的动态压缩过程;(2)抗冲覆盖层与水的流固耦合作用;(3)水中空化的发生、溃灭过程以及溃灭导致的二次加载过程。

[0079] 在理论模型的基础上,对抗冲覆盖层完整冲击过程进行分析,包括:

[0080] S1、抗冲覆盖层在静水压力及冲击波作用下的动态压缩过程分析:

[0081] 根据冲击波理论,冲击波载荷采用指数衰减波的形式来描述,根据动量守恒定律和质量守恒方程,获得冲击波的传播速度;根据动量守恒定律求得覆盖层的内能变化量。覆

盖层表面为塑性多孔材料时,材料内部存在强间断弹性前驱波和后续塑性冲击波,分别求其波速和波面应力。塑性冲击波作用下产生的卸载过程,需要考虑应变硬化效应,得到卸载区的控制方程。根据牛顿第二定律,得到耐压壳与被压溃多孔材料的运动方程。

[0082] 具体分析过程如下:

[0083] S1.1、冲击波传播控制方程

[0084] 远场水下爆炸冲击波可用指数衰减波的形式来描述,塑性多孔材料在该载荷作用下是一个具有强间断的卸载过程,可以采用冲击波理论进行描述。当冲击波作用到多孔材料上以后,且冲击波强度大于多孔材料的屈服强度时,多孔材料会发生塑性坍塌。对于塑性多孔材料,有两种波在多孔材料中同时传播:一种为弹性前驱波,以弹性波波速传播;一种为塑性冲击波。

[0085] 无论是弹性前驱波还是塑性冲击波,其传播过程中在波阵面处均满足质量连续和动量守恒方程,该推导过程与作用在耐压抗冲覆盖层上的载荷的具体形式无关,只要输入为强间断卸载载荷即可。设波前状态为:波前应力 σ^- 、波前应变 ε^- 、波前速度 V^- 、波前密度 ρ^- ;波后状态为:波后应力 σ^+ 、波后应变 ε^+ 、波后速度 V^+ 、波后密度 ρ^+ ,材料的初始密度为 ρ_R 。冲击波在塑性多孔材料中传播过程如图3所示。

[0086] 冲击波的传播速度为: $V_s = \frac{dX}{dt} = \frac{1}{1-\varepsilon^-} \frac{dx}{dt}$ (1),其中,t表示时间,x表示波前塑性多孔材料的横坐标,X表示塑性多孔材料的初始横向坐标(以冲击波加载方向为正方向,以流固耦合接触面为原点)。

[0087] 波阵面上满足质量守恒: $\rho^- dx = \rho^+ [dx - (V^+ dt - V^- dt)]$ (2)

[0088] 密度与应变的关系: $\rho_R = \rho^+ (1 - \varepsilon^+) = \rho^- (1 - \varepsilon^-)$ (3)

[0089] 波阵面上厚度为dx的微元满足动量守恒:

[0090] $(\sigma^+ - \sigma^-) dt = \rho^- dx (V^+ - V^-)$

[0091] 联立质量守恒方程和动量守恒方程,得到冲击波的传播速度为:

[0092] $V_s = \sqrt{\frac{\sigma^+ - \sigma^-}{\rho_R(\varepsilon^+ - \varepsilon^-)}} \quad (4)$

[0093] 根据能量守恒条件,外力所做的功与系统内能和动能的变化平衡,设E为单位质量多孔材料中的内能,有:

[0094] $\sigma^+ V^+ dt - \sigma^- V^- dt = (E^+ - E^-) \rho^- dx + \frac{1}{2} [(V^+)^2 - (V^-)^2] \rho^- dx \quad (5)$

[0095] 式中, E^- 表示波前单位质量多孔材料中的内能, E^+ 表示波后单位质量多孔材料中的内能。

[0096] 将质量和动量守恒方程带入上式有:

[0097] $\rho_R V_s (E^+ - E^-) = \sigma^+ V^+ - \sigma^- V^- - \frac{1}{2} \rho_R V_s [(V^+)^2 - (V^-)^2]$
 $= \frac{1}{2} (\sigma^+ + \sigma^-) (V^+ - V^-) = \frac{1}{2} V_s (\sigma^+ + \sigma^-) (\varepsilon^+ - \varepsilon^-) \quad (6)$

[0098] 冲击波波阵面处单位质量多孔材料的内能变化为:

[0099] $E^+ - E^- = \frac{1}{2\rho_R} (\sigma^+ + \sigma^-) (\varepsilon^+ - \varepsilon^-) \quad (7)$

[0100] 对于塑性多孔材料,其属于递增硬化材料,在冲击波作用下具有双波:强间断弹性前驱波和后续冲击波。一般后续冲击波的传播速度要远小于前驱弹性波的传播速度。下面分别描述塑性多孔材料中这两种波的传播情况。

[0101] 弹性前驱波:在冲击波作用前,抗冲覆盖层在静水压力 p_{st} 作用下处于平衡状态,覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: p_{st} 、 ε_{st} 、0;弹性前驱波过后,覆盖层中的应力、应变和粒子速度记为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 。根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$[0102] \quad V_0 = C_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_{st}), \sigma_0 - p_{st} = \rho R C_0 V_0 \quad (8)$$

[0103] 式中, C_0 为弹性波波速,满足 $C_0 = \sqrt{E_s / \rho_R}$, E_s 为多孔材料线弹性阶段的杨氏模量。

[0104] 塑性冲击波:塑性冲击波波前粒子的状态为弹性前驱波波后的状态,即覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_0 、 ε_0 、 V_0 ;记塑性冲击波波后覆盖层中的应力、应变和粒子速度分别为: σ_d 、 ε_d 、 V ,根据质量守恒和动量守恒方程有:

$$[0105] \quad V - V_0 = V_s (\varepsilon_d - \varepsilon_0), \sigma_d - \sigma_0 = \rho R V_s (V - V_0) \quad (9)$$

$$[0106] \quad \text{则,塑性冲击波阵面波后动态应力为:} \sigma_d = \sigma_0 + \rho_R \frac{(V - V_0)^2}{\varepsilon_d - \varepsilon_0} \quad (10)。$$

[0107] S1.2、卸载波控制方程

[0108] 远场水下爆炸冲击波是指数衰减波,因此,多孔材料在指数衰减冲击波作用下的塑性波是具有强间断特性的卸载波。其卸载过程与加载过程遵循不同的应力-应变关系,有不同的控制方程。若卸载前塑性变形达到应力 σ_m ,则不论卸载后是否又重新加载,只要应力不再超过 σ_m ,则应力应变之间有线性关系,且其斜率等于加载曲线弹性部分的初始斜率。显然,从卸载后重新加载发生塑性变形,其屈服极限就提高到了 σ_m ,这就是所谓的加工硬化或应变硬化效应。

[0109] 一维应力下,弹性卸载的应力应变关系为: $\bar{\sigma} = \sigma_m + E_s (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_m)$ (11),式中, $\bar{\sigma}$ 表示弹性卸载的应力, $\bar{\varepsilon}$ 表示弹性卸载的应变。

[0110] 卸载过程的控制方程和加载时一样,仍然包括运动学方程(质量守恒)、动力学方程(动量守恒)和本构方程组成。

[0111] 卸载过程应变和速度为: $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial X}$, $V = \frac{\partial u}{\partial t}$ (12),式中, ε 表示卸载过程应变, u 表示覆盖层前面板的位移, X 表示塑性多孔材料的初始横向坐标(以冲击波加载方向为正方向,以流固耦合接触面为原点)。

$$[0112] \quad \text{相容性方程即连续方程(质量守恒方程)为:} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial X} \quad (13)$$

[0113] 动量守恒有: $\rho_0 A_0 dX \frac{\partial V}{\partial t} = P(X) - P(X + dX) = -\frac{\partial P}{\partial X} dX$ (14),其中, ρ_0 表示塑性多孔材料的初始密度, A_0 表示覆盖层初始横截面积, $P(X)$ 为覆盖层 X 位置处所受压力, $P(X+dX)$ 表示为覆盖层 $X+dX$ 位置处所受压力。

$$[0114] \quad \text{又知,}\sigma = P/A_0, \text{于是有} \rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma}{\partial X} \quad (15), \text{其中,}\sigma \text{表示应力。}$$

[0115] 卸载区的控制方程为:

$$[0116] \quad \begin{cases} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \\ \rho_R \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial x} \\ \bar{\sigma} = \sigma_m + E_s(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_m) \end{cases} \quad (16)$$

[0117] 式中, $\bar{\varepsilon}$ 表示弹性卸载的应变, \bar{v} 表示弹性卸载的速度, $\bar{\sigma}$ 表示弹性卸载的应力, σ_m 和 ε_m 分别表示卸载前塑性变形所达到的应力和应变。

[0118] 对于塑性多孔材料,弹性应变相对于塑性应变很小可以忽略。因此, $\bar{\varepsilon}$ 与 t 无关,于是有 $\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = 0$ (17);

[0119] 则在多孔材料中塑性强间断卸载波传递过的地方的速度与塑性波波前粒子的速度保持一致,即塑性波传递过后的区域做刚体运动,有 $V(X, t) = V(t)$ (18)。

[0120] S1.3、抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷作用下的运动方程

[0121] 在静水压和冲击波共同作用下,覆盖层被压溃部分的多孔材料与覆盖层前面板一起做刚体运动。根据牛顿第二定律,同时考虑耐压壳固定,塑性多孔覆盖层在静水压力及冲击波作用下的运动方程表示为:

$$[0122] \quad [m_f + \rho_0(u + h)] \frac{d^2 u}{dt^2} + \sigma_d - p_{wet} = 0 \quad (19)$$

[0123] 其中, m_f 为覆盖层面板单位面积的质量; ρ_0 为塑性多孔材料的初始密度; h 为被压溃部分压溃后的厚度; σ_d 为塑性冲击波后覆盖层中的应力; p_{wet} 为湿表面总压力,需要考虑流固耦合及空化的作用。耐压抗冲覆盖层在静水压力及冲击载荷作用下的运动情况如图4所示。

[0124] S2、对于抗冲覆盖层与水的流固耦合分析:

[0125] 根据入射冲击波的反射规律,求由于反射导致的反射波和由于覆盖层变形导致的稀疏波,在静水压力和冲击波的共同作用下,求在不考虑空化和气泡溃灭情况下的流固耦合面上的总压力。

[0126] 具体分析过程如下:

[0127] 对于水下爆炸问题,作用在耐压抗冲覆盖层上的载荷并不是事先已知的,该载荷与流体和耐压抗冲覆盖层的耦合运动相关。根据Cole《水下爆炸》一书中的描述,对于远场冲击波,可以描述为以声速传播的指数衰减波,即:

$$[0128] \quad p_{in}(x, t) = p_0 e^{-(t-x/c_w)/\theta}。$$

[0129] 其中, c_w 为声波在水中的传播速度, p_0 为入射冲击波的峰值, θ 为衰减系数,可表示为炸药重量与爆距的函数:

$$[0130] \quad p_0 = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1} \quad (\text{MPa}) \quad (21)$$

$$[0131] \quad \theta = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2} \quad (\text{ms}) \quad (22)$$

[0132] 其中, W 是炸药的重量(kg), R 是爆距(m), K_1 、 K_2 、 A_1 、 A_2 是与炸药类型有关的常数,对于TNT炸药来说,这些常数为: $K_1=53.4$, $K_2=0.0925$, $A_1=1.13$, $A_2=-0.22$ 。

[0133] 当水下爆炸冲击波传递到流固耦合面上以后,要发生反射,记反射波为 p_r ;同时,覆盖层要产生大变形,形成稀疏波 $-p_{wcw}V$,其中, ρ_w 表示水介质的密度, c_w 为声波在水中的传播速度。

[0134] 在考虑静水压力和冲击波共同作用的情况下,湿表面总压力可表示为:

$$[0135] \quad p_{wet} = p_{st} + p_{in} + p_r - p_{wcw}V \quad (23)$$

[0136] 其中, p_{st} 为冲击波作用前的静水压力, p_{in} 为入射冲击波。

[0137] 该公式在空化发生以前成立,在稀疏波 $-p_{wcw}V$ 作用下,由于水不能承受拉应力,要发生空化。空化的发生会阻断入射冲击波 p_{in} 的传播,但是由于耐压抗冲覆盖层的作用,空化会发生溃灭。在空化溃灭过程中,会辐射新的冲击波作用在耐压抗冲覆盖层上,该过程在S3中进一步描述。

[0138] S3、空化发生与溃灭过程分析:

[0139] 反射波和稀疏波导致水中产生空化现象,根据空化产生条件,以及水域内水粒子的压力和速度,可求得水中任一位置的空化时间,进一步得到首次发生空化的位置与时刻;结合水粒子速度表达式,可求空化位置处水粒子空化时的速度。空化后产生的气泡会发生溃灭,溃灭产生的重构波处压力是重构波波前压力、重构波辐射波压力和静水压力之和;重构波波前压可由反射波和稀疏波求得。溃灭过程会产生水粒子的压缩,根据位移连续方程,结合重构波波面的动量守恒,可求得重构波波前的传播速度、重构波处压力以及重构波辐射波压力;进而求得覆盖层的真实入射冲击波和考虑空化影响的湿表面压力。

[0140] 具体分析过程如下:

[0141] S3.1、空化形成过程

[0142] 冲击波作用到抗冲覆盖层上以后,反射波和稀疏波会沿着与入射冲击波传播方向相反的方向在水中传播,记入射冲击波传递到流固耦合面的时刻为0时刻,在 t 时刻,反射波和稀疏波传递的距离为 $c_w t$,在 $-c_w t < x < 0$ 的水域中,水粒子的压力和速度分别为:

$$[0143] \quad \begin{cases} p_w(x, t) = p_{st} + p_{in}(x, t) + p_r(x, t) - \rho_w c_w V \\ V_w(x, t) = \frac{p_{in}(x, t)}{\rho_w c_w} - \frac{p_r(x, t)}{\rho_w c_w} + V \end{cases} \quad (24)$$

[0144] 水中发生空化时,满足 $p_w(x, t) = 0$,对于水中任一位置 x ,求解该方程可以得到空化时间 t_{cav} 。对于一系列的 (x, t_{cav}) 组合,其中 t_{cav} 取得最小值的位置即为首次发生空化的位置,记首次发生空化的位置和时刻为 (x_f, t_f) 。对于自由的Taylor板,空化首次发生的位置在流固耦合面上,而对于耐压抗冲覆盖层,空化首先发生的位置在离耐压抗冲覆盖层一定距离的水中。

[0145] 将空化时间 t_{cav} 带入水粒子速度表达式并考虑 $p_w(x, t_{cav}) = 0$,得到位于 x 处水粒子空化时的速度为:

$$[0146] \quad V_{cav}(x, t_{cav}) = \frac{2p_{in}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}(x, t_{cav})}{\rho_w c_w} \quad (25)$$

[0147] 其中, $p_{in}(x, t_{cav})$ 表示 x 处水粒子在 t_{cav} 时刻的入射冲击波, $p_{st}(x, t_{cav})$ 表示 x 处水粒子在 t_{cav} 时刻的静水压力。

[0148] 空化发生后朝着湿表面和远离湿表面两个方向以超声速传播。其中, x_{BF} 为空化波前所处的位置。

[0149] S3.2、空化溃灭过程

[0150] 空化溃灭的传播速度为亚声速, 记空化溃灭辐射的波为重构波, 如图5所示。假设重构波波前此时处于 x_{CF} 处, 沿 $-x$ 方向作用到重构波波前的压力记为 $p_{CF, in}$, 其为反射波和稀疏波的和, 即:

$$[0151] \quad p_{CF, in} = p_r - \rho_w c_w V \quad (26)$$

[0152] 空化溃灭在重构波波前处的辐射波压力记为 $p_{CF, out}$, 于是处于重构波波前处的水粒子的压力和速度可以表示为:

$$[0153] \quad \begin{cases} p_{CF} = p_{CF, in} + p_{CF, out} + p_{st} \\ v_{CF} = -\frac{p_{CF, in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{CF, out}}{\rho_w c_w} \end{cases} \quad (27)$$

[0154] 假设在 t 时刻, 重构波波前位于 x_{BF} 处, 在 dt 时间内, 重构波波前传递 dx 的距离, 即有 dx 的空化区域溃灭。重构波未传递过来之前, 该区域的压力为空化的临界压力, 记为 0 , 粒子速度为空化发生时的速度 V_{cav} ; 空化溃灭后, 该处压力为 p_{CF} , 粒子速度为 v_{CF} 。重构波前处 dx 的压缩量为 $(V_{cav} - v_{CF}) dt$ 。该压缩量由两部分组成, 一部分为压力从 0 变为 p_{CF} 所导致的压缩量, 一部分为空化部分的溃灭, 即:

$$[0155] \quad -\frac{p_{CF}}{\rho_w c_w^2} (1 - \eta) dx - \eta dx \quad (28)$$

[0156] 位移连续方程可表示为:

$$[0157] \quad \rho_w c_w^2 (v_{CF} - V_{cav}) = [\rho_w c_w^2 \eta + p_{CF} (1 - \eta)] c_{CF} \quad (29)$$

[0158] 其中, η 为 dx 厚度中空化所占的分数, $\eta = \int_{t_{cav}}^t \frac{\partial V_{cav}}{\partial x} d\tau$, c_{CF} 为重构波波前的传播速度, 满足 $c_{CF} = dx/dt$ 。

[0159] 重构波波阵面上同时还满足动量守恒:

$$[0160] \quad -\rho_w (1 - \eta) dx (v_{CF} - V_{cav}) = -p_{CF} dt \quad (30)$$

[0161] 整合方程后可以求得:

$$[0162] \quad \begin{cases} p_{CF} = \frac{(1 - \eta) \rho_w c_w \lambda^2}{2\lambda + (c_w - 2\lambda)\eta} \\ c_{CF} = -\frac{c_w \lambda}{\lambda + (c_w - \lambda)\eta} \\ p_{CF, out} = p_{CF} - p_{CF, in} - p_{st} \end{cases} \quad (31)$$

[0163] 其中, 参量 λ 可表示为:

$$[0164] \quad \lambda = \frac{2p_{CF, in}}{\rho_w c_w} + \frac{p_{st}}{\rho_w c_w} + V_{cav} \quad (32)$$

[0165] 当由于空化溃灭辐射的重构波首次传递到流固耦合面时, 将取代入射冲击波作用到抗冲覆盖层上, 因此, 真实的入射冲击波可表示为:

$$[0166] \quad p_a = \begin{cases} p_{in}, & 0 < t < t_a \\ p_{CF, out}, & t \geq t_a \end{cases} \quad (33)$$

[0167] 其中, t_a 为空化溃灭所辐射的波首次传递到流固耦合面的时间;

[0168] 最终, 考虑空化的影响, 湿表面总压力的表达式可改写为:

[0169] $p_{wet} = p_{st} + p_a + p_r - \rho_w c_w V$ (34)。

[0170] 在本发明的一个实施例中, 根据在高静水压及水下爆炸冲击波共同作用下的一维抗冲理论模型, 潜艇覆盖层选用塑性聚氨酯泡沫材料, 简化为刚塑性模型, 可计算得到静水压力为 1MPa, 冲击波载荷为 $p_0 = 15.4\text{MPa}$, $\theta = 1.178\text{ms}$ 时, 流体中空化形成及溃灭过程以及空化粒子速度 (图6), 也可计算得到湿表面真实入射压力及总压力结果 (图7), 理论结果与有限元结果吻合很好, 可验证一维抗冲理论模型的准确性。

[0171] 上面结合附图对本发明的实施例进行了描述, 但是本发明并不局限于上述的具体实施方式, 上述的具体实施方式仅仅是示意性的, 而不是限制性的, 本领域的普通技术人员在本发明的启示下, 在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下, 还可做出很多形式, 这些均属于本发明的保护之内。

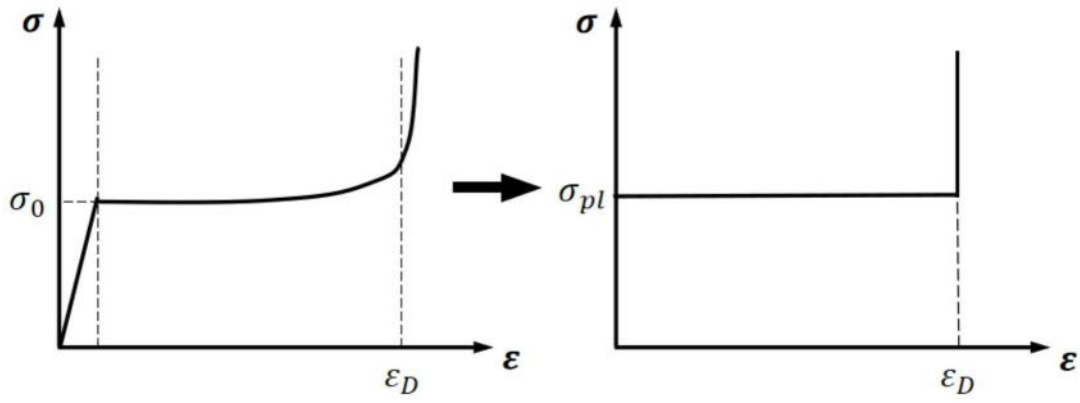


图1

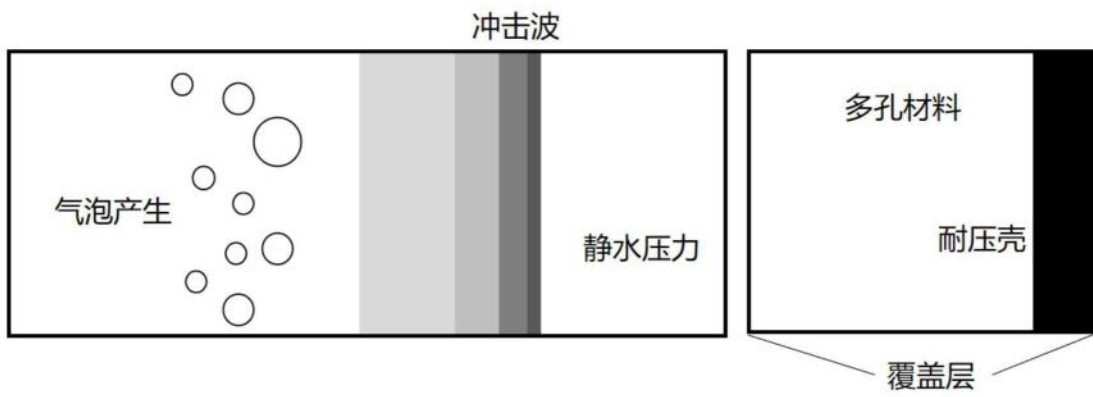


图2

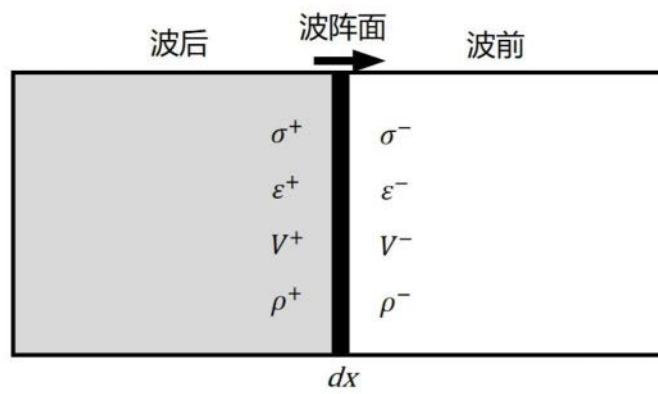


图3

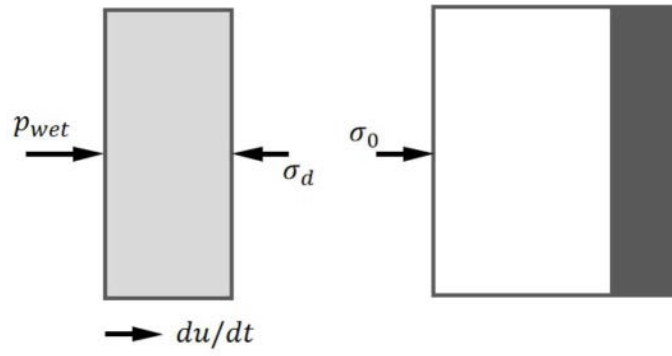


图4

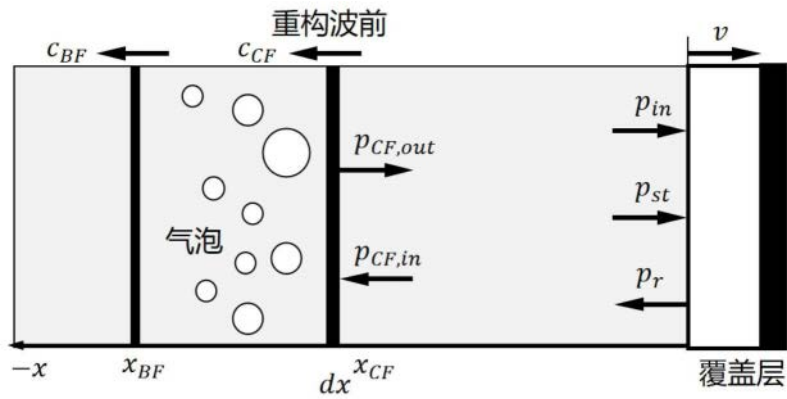


图5

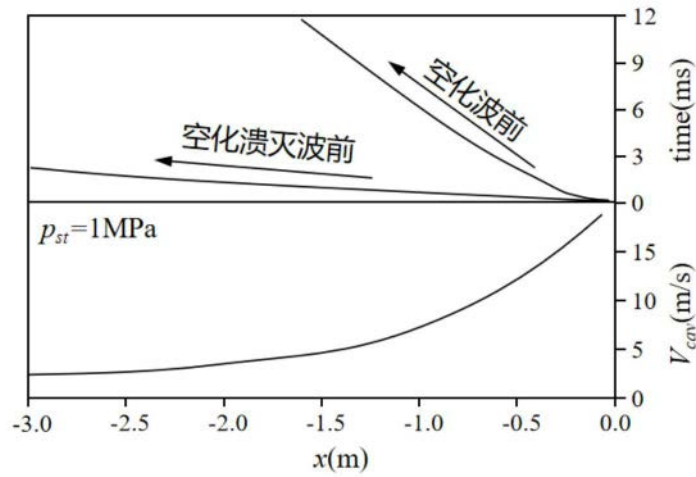


图6

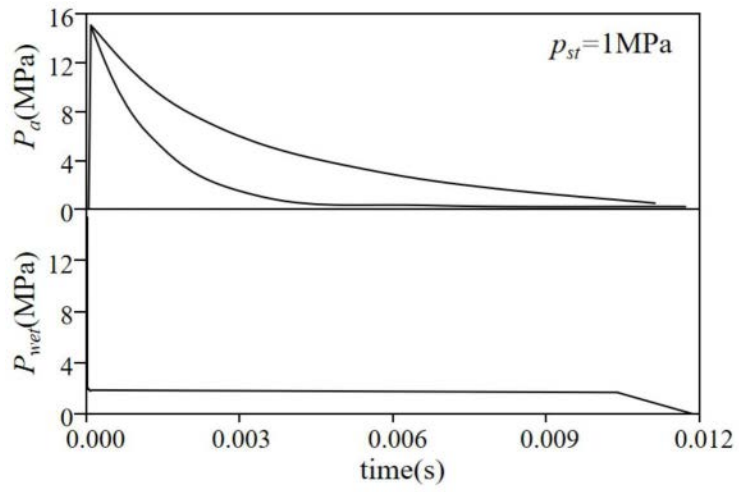


图7