

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0166

# 泡沫混凝土弹塑性损伤模型在组合式 防护结构中的应用\*

时述峰, 孔祥振, 方秦, 杨亚, 高矗

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007)

**摘要:** 为了将新型泡沫混凝土动态弹塑性损伤模型应用到防护结构中, 首先开展组合式防护结构预制孔装药爆炸试验; 随后利用新泡沫混凝土材料模型对试验进行数值模拟验证, 并将新模型的模拟结果与 LS-DYNA 中 Soil and Foam 模型的模拟结果进行对比; 最后, 基于验证的数值模型, 开展以梯度泡沫混凝土作为分配层的组合式防护结构预制孔装药爆炸的数值模拟, 探讨梯度泡沫混凝土层界面层数和排列方式对组合式防护结构抗爆性能的影响。结果表明, 新泡沫混凝土材料模型的模拟结果与试验结果吻合良好, 与 Soil and Foam 模型相比, 新模型在应力波传播和损伤破坏方面预测更好, 泡沫混凝土层界面层数和排列方式对作用在主体结构上的应力以及分配层的损伤破坏情况有一定的影响。

**关键词:** 泡沫混凝土; 弹塑性损伤模型; 组合式防护结构; 梯度分配层

中图分类号: O382 国标学科代码: 1303520 文献标志码: A

## Application of plastic-damage material model for foam concrete in composite protective structure

SHI Shufeng, KONG Xiangzhen, FANG Qin, YANG Ya, GAO Chu

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,  
Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** An appropriate material model can accurately predict the mechanical behavior and damage mode of foam concrete subjected to blast loadings, and it has great significance on the design of composite protective structure. The purpose of this paper is to apply the new dynamic plastic-damage model for foam concrete presented by author to protective structures. Firstly, the new foam concrete model was briefly introduced. The model includes the definition of plasticity by introducing a yield function, flow rule and hardening law, the introduction of strain-rate effect and the definition of damage using plastic strain or related quantities. Subsequently, in order to validate the new model, the blast tests on the composite protective structure sandwiched by foam concrete with different strength were conducted and the stress waves at specific location and damage in foam concrete were recorded. Furthermore, the numerical results predicted by the new foam concrete model were compared to those predicted by the Soil and Foam model in the LS-DYNA. Finally, blast response of composite protective structure sandwiched by gradient foam concrete was numerically investigated based on the validated numerical model. The influences of arrangement and layers in gradient foam concrete layer on the anti-blast capability of composite protective structure were discussed by various working conditions. The results indicate that the numerical predictions excellently agreed with corresponding test data, demonstrating the accuracy of material model for foam concrete under blast loadings. Compared with the Soil and Foam model, the new model predicted better in terms of amplitude and duration of load on the structural layer, as

\* 收稿日期: 2023-05-03; 修回日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(52178515)

第一作者: 时述峰(1997—), 男, 博士研究生, [shishuf1997@163.com](mailto:shishuf1997@163.com)

通信作者: 孔祥振(1988—), 男, 博士, 副教授, [ouckxz@163.com](mailto:ouckxz@163.com)

well as the damage and failure in foam concrete layer. The gradient foam concrete numerical result showed that the arrangement and layers of foam concrete with different strength had an effect on the stress duration acting on the structure layer and the damage of the distribution layer. The new dynamic plastic-damage model for foam concrete has a broad application prospect in the research of protective structures

**Keywords:** foam concrete; plastic-damage model; composite protective structure; gradient distribution layer

成层式防护结构通常由遮弹层、分配层和主体结构层组成, 现已被广泛应用于地面、浅埋以及坑道口部的防御工事<sup>[1]</sup>。传统成层式结构分配层一般采用粗砂、中砂等松散材料, 主要用于分散弹药爆炸产生的荷载, 使爆炸荷载分布在更大范围。泡沫混凝土具有低波阻抗、高孔隙率等特点, 对爆炸波削减效果优异<sup>[2-3]</sup>, 且具备造价低廉、施工方便等优点, 已被逐渐用于成层式防护结构的分配层<sup>[4]</sup>。以泡沫混凝土为夹层的成层式防护结构(以下简称组合式防护结构)的抗爆机制主要在于泡沫混凝土与遮弹层之间的强波阻抗失配关系, 使得爆炸能量大部分耗散在遮弹层中, 大幅减小经泡沫混凝土层到达主体结构层上的荷载, 同时由于泡沫混凝土层内部分布有无数孔隙, 应力波会在孔隙内的自由面上发生多次反射、绕射和折射, 延长了应力波的传播路径<sup>[1]</sup>。

在对组合式防护结构进行研究时, 受测试技术限制, 获得可靠的应力波数据(如作用于结构上的荷载)以及内部损伤破坏模式较为困难, 高精度数值模拟提供了另外一种可靠的研究手段。而其中作为夹层的泡沫混凝土材料模型是准确模拟爆炸波在组合式防护结构中传播衰减规律及内部破坏模式的基础。泡沫混凝土内部包含大量的孔隙, 通常将其看作泡沫类材料, 强度一般在兆帕量级。在常用的显式动力学有限元软件 LS-DYNA 中并没有专门针对泡沫混凝土的材料模型, 已有研究通常采用泡沫类材料模型来替代<sup>[5-6]</sup>。常采用的泡沫类材料模型包括适用于土壤、混凝土或可压碎泡沫的 Soil and Foam 模型, 该模型将应力球量和偏量分开处理, 采用二次函数形式的屈服准则, 通过对数坐标系定义球应力和体积应变之间的关系, 一般应用于土或泡沫材料被限制在结构中或有几何边界存在的情况下, 因此在已有研究中用于模拟防护结构中的泡沫混凝土夹层<sup>[5]</sup>, 但该模型没有考虑材料的应变率效应、剪胀以及损伤软化等特点。另外还有很多用于泡沫金属和泡沫塑料的模型, 例如: 适用于具有正交各向异性行为的蜂窝和泡沫材料的 Honeycomb 模型<sup>[7]</sup>, 该模型通过定义各个方向的正应力、剪应力与体积应变的关系来描述材料的非线性弹塑性行为, 各个方向间完全独立不耦合; 适用于高度可压缩的低密度泡沫的 Low Density Foam 模型<sup>[7]</sup>, 此模型在单轴压缩下的名义应力-应变曲线中考虑了热效应, 拉伸时到达抗拉强度后发生应力截断, 即应力直接下降到零, 卸载后变形完全恢复, 并考虑了多种卸载方式; 适用于聚苯乙烯泡沫塑料等材料的 Crushable Foam 模型, 其通过定义名义屈服应力和体积应变的关系来描述材料受压时的力学行为, 拉伸时到达抗拉强度后表现为理想弹塑性, 卸载后变形完全恢复, 并考虑了应变率效应<sup>[7]</sup>。然而泡沫混凝土材料的力学性能与泡沫金属和泡沫塑料相比存在较大差别, 已有的混凝土+泡沫混凝土+混凝土组合式防护结构爆炸试验<sup>[8-10]</sup>以及泡沫混凝土材料的静动态力学性能<sup>[11-16]</sup>表明, 除压缩引起的孔隙压实外, 泡沫混凝土还存在着剪切膨胀的破坏模式, 且孔隙压实和剪胀相互竞争作用是泡沫混凝土显著的破坏特征; 此外, 试验也表明泡沫混凝土还存在着应变软化行为。因此上述模型无法描述泡沫混凝土在爆炸荷载作用下复杂的力学行为以及破坏模式。

本文中拟构建一种基于文献 [17] 中适用于泡沫混凝土的帽盖损伤塑性模型, 对组合式防护结构预制孔装药爆炸试验进行数值模拟, 并与常用的 Soil and Foam 模型进行对比分析, 验证该模型对于组合式防护结构抗爆模拟的优越性。在此基础上, 基于验证的数值模型, 探讨梯度泡沫混凝土界面层数和排列方式对组合式防护结构抗爆性能的影响规律。

## 1 泡沫混凝土材料的帽盖损伤塑性模型

适用于冲击爆炸荷载作用下的泡沫混凝土帽盖损伤塑性材料模型基于经典弹塑性损伤模型的理论框架<sup>[17]</sup>, 该模型通过屈服准则、流动法则和硬化法则来定义塑性, 并考虑了应变率效应, 损伤则通过塑性应变或相关量来定义。

## 1.1 塑性模型

屈服函数定义为:

$$f(\sigma_{ij}, k) = J_2 - r'^2 F_f^2 F_c(I_1, k) \quad (1)$$

式中:  $I_1$  为第一应力不变量,  $J_2$  为第二应力不变量;  $r'$  为当前子午线与压缩子午线的比率, 用来考虑罗德角效应。硬化参数  $k$  为内变量。

断裂函数  $F_f$  和帽盖函数  $F_c$  分别用来表征泡沫混凝土中的微裂缝和孔隙。断裂函数  $F_f$  定义了不包含孔隙时材料的剪切强度极限, 对 Kong-Fang 模型<sup>[18]</sup> 的最大强度面进行修改, 得到以下形式:

$$F_f = \begin{cases} \sqrt{3} \left( \frac{I_1}{3} + T \right) & I_1 \leq 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2\psi} \left( \frac{I_1}{3} + T \right) & 0 \leq I_1 \leq f_c \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \left( f_c + \frac{I_1 - f_c}{3(a_1 + a_2 I_1/3)} \right) & I_1 \geq f_c \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f_c$  和  $T$  分别为无侧限单轴抗压和单轴抗拉强度。

帽盖函数  $F_c$  通过乘在断裂函数  $F_f$  上形成闭口的屈服面, 用来考虑由于材料内部孔隙塌陷导致的力学性能退化, 表达式如下<sup>[17, 19-20]</sup>:

$$F_c(I_1, k) = \begin{cases} 1 & I_1 < k \\ 1 - \left( \frac{I_1 - k}{X - k} \right)^2 & I_1 \geq k \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $X$  与  $k$  的关系表示为  $X = k + RF_f(k)$ ,  $R$  为形函数,  $F_f(k)$  可由剪切函数经过换算得到。

与混凝土的破坏类似, 泡沫混凝土在压缩过程中会发生体积膨胀(通常称为剪胀)。已有研究表明, 完全关联流动法则会高估剪胀大小<sup>[21]</sup>。为解决上述问题, 本模型采用了部分关联的流动法则, 将塑性势函数定义为:

$$g(\sigma_{ij}, k) = J_2 - \omega r'^2 F_f^2 F_c(I_1, k) \quad (4)$$

式中:  $\omega$  控制剪胀的大小,  $\omega = 1$  代表完全关联流动;  $\omega = 0$  代表非关联流动, 不发生剪胀;  $0 < \omega < 1$  代表部分关联流动。流动法则为:

$$d\varepsilon_{ij}^p = du \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $du$  为一致性参数, 控制塑性应变增量的大小, 塑性势函数  $g$  控制塑性应变增量的方向。

本模型提出了新的硬化法则, 该硬化法则首先确定几个关键点处的体积应变  $\mu$ 、压力  $p$ 、卸载模量  $K$ , 然后在 2 个相邻点间进行线性插值来计算压力-体积应变曲线上任意位置处的塑性体积应变, 即:

$$\varepsilon_v^p = \mu_n + (X(k)/3 - p_n)(\mu_{n+1} - \mu_n)/(p_{n+1} - p_n) - X(k)/\{3 [K_n + (X(k)/3 - p_n)(K_{n+1} - K_n)/(p_{n+1} - p_n)]\} \quad (6)$$

式中: 下标  $n$  表示关键点的标号。在本模型中使用 10 对  $\mu$ 、 $p$ 、 $K$ , 因此  $n$  在 1~10 之间变化。

已有的泡沫混凝土材料动态力学性能试验表明, 泡沫混凝土材料具有明显的应变率效应<sup>[22-24]</sup>。本模型采用径向增强法描述应变率效应, 这里不再赘述。

## 1.2 损伤模型

本模型考虑了泡沫混凝土材料的 3 种损伤机制, 即由微裂缝扩展引起的剪切损伤、由材料拉伸断裂引起的拉伸损伤和由孔隙压实引起的静水压缩损伤。为方便定义上述 3 种损伤, 模型中体积应变增量  $d\varepsilon_v$  分解为:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^{pd} \quad (7)$$

式中: 微裂缝扩展引起的塑性体积膨胀  $d\varepsilon_v^{pd}$  用于描述剪切和拉伸损伤, 孔隙压实引起塑性体积压缩  $d\varepsilon_v^p$

来描述静水压缩损伤。

剪切和拉伸损伤通过修正的塑性体积应变  $\lambda_s$  (表征剪切损伤) 和  $\lambda_t$  (表征拉伸损伤) 定义, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} \lambda_s = \sum \frac{d\varepsilon_v^{pd}}{\zeta_1(1+I_1/(3f_c))^{\zeta_2}} & I_1 > 0 \\ \lambda_t = \sum \frac{d\varepsilon_v^{pd}}{\zeta_3(1-I_1/(3T))^{\zeta_4}} & I_1 \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ 、 $\zeta_4$  是与损伤有关的材料参数。剪切损伤  $D_s$  定义为:

$$D_s = \frac{\alpha\lambda_s}{\lambda_s + 1} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  是用于控制应变软化梯度的参数。拉伸损伤  $D_t$  定义为:

$$D_t = \frac{\lambda_t}{\lambda_t + 1} \quad (10)$$

静水压缩损伤  $D_h$  用于描述泡沫混凝土孔隙压实导致材料强度和刚度的退化<sup>[25]</sup>。其与孔隙塌陷引起的塑性体积应变  $d\varepsilon_v^p$  有关, 具体定义为:

$$D_h = \chi \left( \frac{\sum d\varepsilon_v^p}{\mu_1 - p_1/K_1} \right) \quad (11)$$

式中:  $\chi$  是控制静水压缩损伤累积速率的材料参数,  $\mu_1$  是泡沫混凝土中孔隙完全塌陷时的体积应变,  $p_1$  和  $K_1$  分别为体积应变  $\mu_1$  对应的压力和卸载模量。

总损伤  $D$  定义为:

$$D = 1 - (1 - D_s)(1 - \delta_t D_t)(1 - \delta_h D_h) \quad (12)$$

式中:  $\delta_t$  和  $\delta_h$  在文献 [26] 中有详细描述, 在此不再赘述。

总损伤将应力张量  $\sigma_{ij}^{(n+1)}$  更新为:

$$\sigma_{ij}^{(n+1)} = \sigma_{ijp}^{(n+1)}(1 - D) \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{ijp}^{(n+1)}$  为塑性模型更新出的应力张量, 上标  $n+1$  代表当前状态。

### 1.3 参数标定

提出的材料模型包含 3 类参数: 基本材料性能参数, 塑性模型参数和损伤模型参数。第 1 类基本材料性能参数包括泡沫混凝土的初始密度  $\rho_0$ 、基体密度  $\rho_g$ 、抗压强度  $f_c$ 、抗拉强度  $T$ 、体积模量  $K = E/3(1 - 2\nu)$  和剪切模量  $G = E/2(1 + \nu)$ ; 第 2 类是塑性模型的参数, 包括断裂面参数  $a_1$  和  $a_2$ , 帽盖面参数  $k_0$ 、 $X_0$  和  $R$ , 硬化法则参数  $n$ 、 $\mu_1 \sim \mu_{10}$ 、 $P_1 \sim P_{10}$  和  $K_1 \sim K_{10}$ , 流动法则参数  $\omega$ , 应变率效应参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ ; 第 3 类是损伤参数包括  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ 、 $\zeta_4$  和  $\alpha$ 。上述参数的具体标定方法文献 [17] 中已有详细说明, 此处不再赘述, 表 1 >~2 列出了本文中用到的不同标号的泡沫混凝土材料模型参数。

表 1 C5 泡沫混凝土材料模型参数

Table 1 Parameters of C5 foam concrete material model

参数	取值	参数	取值
抗压强度 $f_c$	5 MPa	帽盖面参数 $R$	6
抗拉强度 $T$	0.5 MPa	硬化法则参数 $n$	1000
弹性模量 $E$	203.9 MPa	流动法则参数 $\omega$	0.5
泊松比 $\nu$	0.15	损伤参数 $\zeta_1$	0.001
基体密度 $\rho_g$	1400 kg/m <sup>3</sup>	损伤参数 $\zeta_2$	3.0
断裂面参数 $a_1$	1.47	损伤参数 $\zeta_3$	10 <sup>-5</sup>
断裂面参数 $a_2$	0.058/ $f_c$	损伤参数 $\zeta_4$	1.5
帽盖面参数 $k_0$	3.2 MPa	损伤参数 $\alpha$	0.4
帽盖面参数 $X_0$	15 MPa	损伤参数 $\chi$	1

表 2 C10 泡沫混凝土材料模型参数  
Table 2 Parameters of C10 foam concrete material model

参数	取值	参数	取值
抗压强度 $f_c$	10 MPa	帽盖面参数 $R$	6
抗拉强度 $T$	1.0 MPa	硬化法则参数 $n$	1000
弹性模量 $E$	308.4 MPa	流动法则参数 $\omega$	0.5
泊松比 $\nu$	0.15	损伤参数 $\zeta_1$	0.001
基体密度 $\rho_g$	1400 kg/m <sup>3</sup>	损伤参数 $\zeta_2$	3.0
断裂面参数 $a_1$	1.47	损伤参数 $\zeta_3$	10 <sup>-5</sup>
断裂面参数 $a_2$	0.058/ $f_c$	损伤参数 $\zeta_4$	1.5
帽盖面参数 $k_0$	7 MPa	损伤参数 $\alpha$	0.4
帽盖面参数 $X_0$	30 MPa	损伤参数 $\chi$	1

## 2 组合式防护结构预制孔装药爆炸试验与数值模型验证

为了验证上述材料模型,开展了组合式防护结构预制孔装药爆炸试验,对组合式防护结构预制孔装药爆炸试验进行数值模拟,通过对比试验和数值模拟得到的应力时程曲线和泡沫混凝土层的损伤破坏形态,验证了材料模型的准确性。并将上述泡沫混凝土材料模型的预测结果与 LS-DYNA 中 Soil and Foam 模型的预测结果进行对比分析。

### 2.1 试验简介

图 1 给出了组合式防护结构预制孔装药爆炸试验示意图。圆柱形组合式防护结构靶体直径为 2.1 m, 外围采用 16 mm 厚的 Q235 钢箍约束,并在顶部和中间位置进行局部加强。防护结构第 1 层为 1.4 m 厚 CF120 超高性能混凝土(简称 CF120)遮弹层,上表面中心用 PVC 圆管预留直径 105 mm、深 860 mm 的圆柱形预制孔用以填充 TNT 炸药;第 2 层为 0.5 m 厚的设计抗压强度为 5 MPa/10 MPa 的泡沫混凝土(简称 C5/C10)分配层;第 3 层为 0.5 m 厚 C40 混凝土(简称 C40)主体结构层。TNT 药柱质量为 6.4 kg,直径为 98 mm,长度为 554 mm,密度为 1530 kg/m<sup>3</sup>,采用尾部中心点起爆的起爆方式。爆炸波传播情况通过埋置 PVDF 传感器测得,其中一个传感器位于遮弹层中的预制孔底部中心正下方 0.4 m 处。另一个传感器位于 C40 混凝土层顶面中心处,用来记录爆炸波经过泡沫混凝土层后传递到主体结构层上的应力。

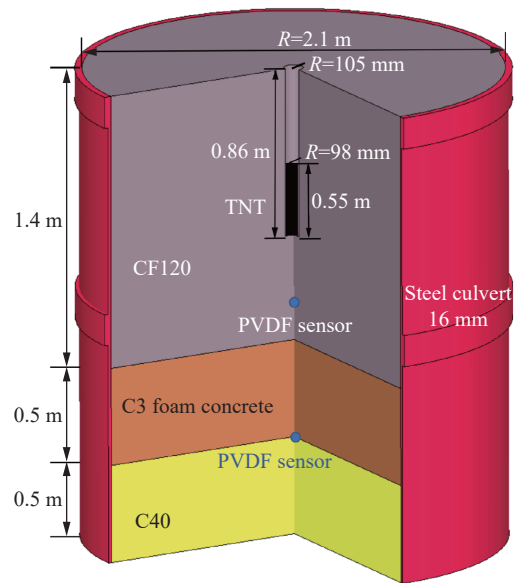


图 1 组合式防护结构预制孔装药爆炸试验示意图  
Fig. 1 Schematic of blast test on composite protective structure

### 2.2 数值模型

防护结构预制孔装药爆炸试验的数值模型如图 2 所示,采用三维全模型方式建模。CF120 混凝土遮弹层、C5/C10 泡沫混凝土分配层、C40 混凝土主体结构层以及钢箍等固体采用光滑粒子伽辽金(smoothed particle Galerkin, SPG)算法描述。炸药和空气等流体采用结构化任意拉格朗日欧拉



(structured arbitrary Lagrangian Eulerian, S-ALE) 网格建模, 网格域尺寸为  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 外围设置无反射边界。S-ALE 网格和 SPG 的网格尺寸均为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 流体和固体间通过流-固耦合方法相互作用。CF120 混凝土遮弹层与泡沫混凝土层、泡沫混凝土与 C40 混凝土、靶体与钢箍间的接触均为面面接触。数值模型的几何尺寸、边界条件等均与试验保持一致。

CF120 超高性能混凝土和 C40 混凝土由 Kong-Fang 混凝土材料模型描述, 模型参数已在文献 [27] 中进行了详细标定, 主要关注泡沫混凝土材料, 因此对于混凝土材料不多赘述。TNT 采用 JWL 状态方程描述, 即:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (14)$$

式中:  $p$  为压力,  $V$  为比容,  $A=3.712 \times 10^8\text{ kPa}$ ,  $B=3.231 \times 10^6\text{ kPa}$ ,  $R_1=4.15$ ,  $R_2=0.9$ ,  $\omega=0.35$ [27] 为常数, 空气采用理想气体状态方程描述, 即:

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (15)$$

式中: 绝热系数  $\gamma=1.4$ , 密度  $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ , 比内能  $e=206.8\text{ kJ/g}$ 。钢箍采用理想弹塑性材料描述, 密度为  $7800\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量取  $210\text{ GPa}$ , 泊松比取  $0.3$ , 屈服应力为  $235\text{ MPa}$ 。

C5/C10 泡沫混凝土采用新提出的材料模型进行描述, 具体参数见表 1。此外, 为了验证新模型相比于其他泡沫类材料模型的优势, 本节将新模型的计算结果与常用的 Soil and Foam 模型计算结果进行对比。Soil and Foam 材料模型通常应用于土或泡沫材料被限制在结构中或有几何边界存在的条件下, 本试验中泡沫混凝土层作为防护结构中的分配层并且外侧有钢箍约束, 因此选择该模型进行对比。与新提出的模型相比, Soil and Foam 模型属于流体弹性模型, 主要包括屈服函数(用于描述应力变量和应变偏量)和状态方程(用于描述球应力和体积应变), 流动法则为  $J_2$  流动, 没有考虑到剪胀效应且模型也不能考虑损伤。其屈服函数定义为:

$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad (16)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$  和  $a_2$  为材料参数, 当  $a_1$  和  $a_2$  取 0 时退化为 von Mises 屈服准则。模型的体积应变是相对体积的自然对数, 相对体积为当前体积与初始体积之比, 其压力与体积应变关系如图 3 所示, C5/C10 的 Soil and Foam 模型参数详见文献 [5]。

### 2.3 数值模拟与试验对比分析

由于 2 类模型的计算效率基本相同, 计算时间基本相等。图 4 给出了数值模拟预测的遮弹层中测点应力时程曲线与试验结果的对比。可以看出, 测点的峰值和正压持时 2 种模型的数值预测结果均与试验数据均吻合良好。图 5 对比了 C40 混凝土主体结构层上 PVDF 传感器测得的试验数据与该测点处



图 2 组合式防护结构预制孔装药爆炸试验数值模型  
Fig. 2 Numerical model of blast test on composite protective structure

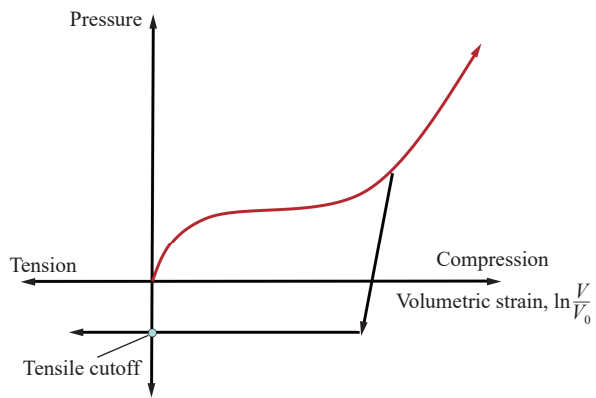


图 3 压力与体积应变关系[7]  
Fig. 3 Relation between pressure and volume strain[7]

2 种材料模型模拟得到的应力时程曲线。可以观察到, 新模型与 Soil and Foam 模型相比, 由于考虑了剪胀效应荷载持时更短, 考虑了损伤导致荷载峰值更低。新模型预测的应力峰值和持时与 PVDF 传感器测得的试验数据吻合更好。

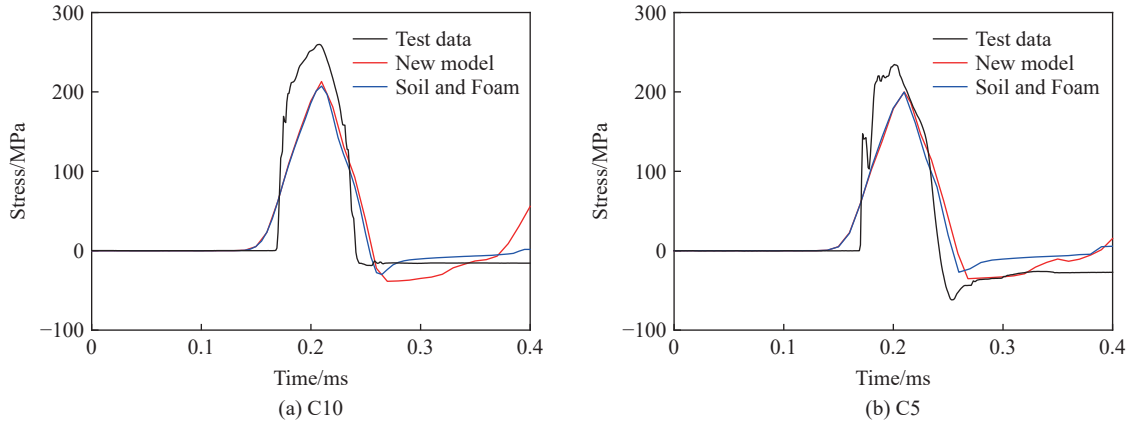


图 4 遮弹层中的测点应力时程曲线

Fig. 4 Stress-time curves in the bursting layer

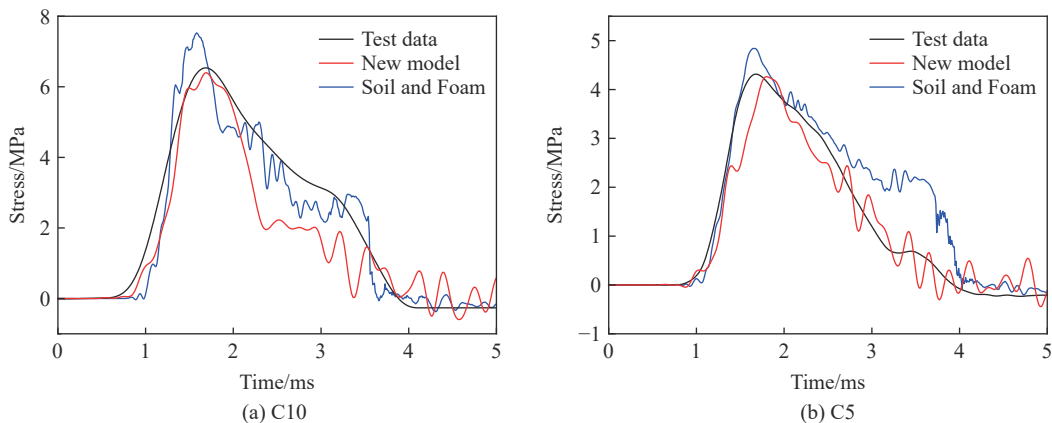


图 5 主体结构上的测点应力时程曲线

Fig. 5 Stress-time curves at the structure layer

从试验和数值模拟的结果来看, 随着泡沫混凝土强度降低, 作用在主体结构上的应力峰值逐渐降低, 且峰值与泡沫混凝土平台应力相当, 应力持时随泡沫混凝土强度降低而增加。试验和数值模拟结果表明 C5 泡沫混凝土分配层比 C10 泡沫混凝土分配层对爆炸波有更好的衰减和弥散作用。

图 6 给出了新模型预测的泡沫混凝土层损伤云图。可以看出损伤主要集中在泡沫混凝土层上表面中心处, 因为此处距起爆点近、荷载大。此外, 还可以观察到泡沫混凝土层边缘处损伤比较严重, 这是由于外侧钢箍约束作用造成的。数值模拟结果与试验后切割得到的泡沫混凝土层剖面的破坏模式基本一致。

通过比较不同强度的泡沫混凝土层损伤破坏情况, 可以看出泡沫混凝土层破坏程度随着强度的降低而减小, 这主要是由于随着泡沫混凝土强度降低, 材料的波阻抗也随着降低, 其与 CF120 混凝土遮弹层的波阻抗失配程度增加, 更多爆炸能量以拉伸波的形式反射回 CF120 混凝土层中, 通过试验结果可以明显看出 C5 泡沫混凝土分配层对应的遮弹层破坏情况更加严重。

综上, 通过防护结构预制孔装药爆炸试验和数值模拟的对比结果验证了新泡沫混凝土材料模型的准确性和优越性。本节所采用的材料模型和数值模拟方法是有效的, 可用于后续梯度泡沫混凝土在组合式防护结构中应用的数值模拟研究。

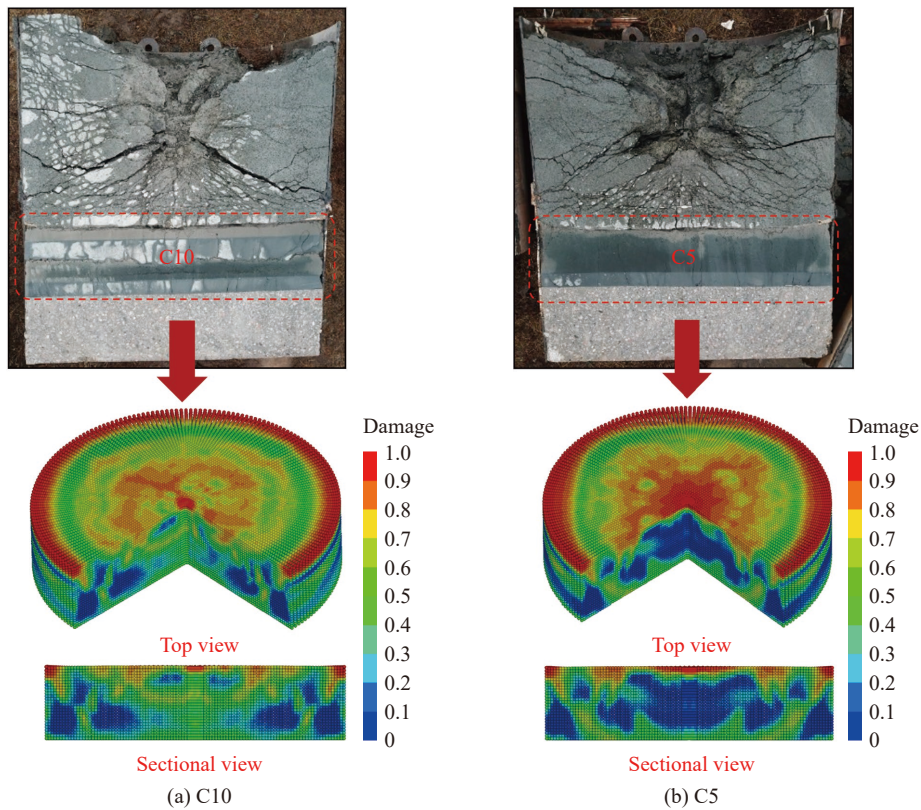


图 6 泡沫混凝土层损伤云图

Fig. 6 Damage contour of foam concrete layer

### 3 梯度泡沫混凝土在组合式防护结构中应用的数值模拟

已有研究<sup>[28-30]</sup>表明,与均匀密度材料相比,梯度多孔材料对爆炸波的衰减和弥散效果更好。采用上述经过验证的数值模型,探究组合式防护结构中梯度泡沫混凝土层界面层数和排列方式对作用到主体结构层上的荷载以及泡沫混凝土层损伤破坏情况的影响规律,以期为后续工程应用提供参考。

#### 3.1 数值模型

图 7 给出了单层泡沫混凝土分配层以及梯度泡沫混凝土分配层的组合式防护结构预制孔装药爆炸的示意图,顶层为 CF120 混凝土遮弹层,中间为单层,双层或 3 层泡沫混凝土层,整个分配层的厚度为 0.6 m,其中双层或 3 层梯度泡沫混凝土分配层采用不同强度的泡沫混凝土,底层为 C40 混凝土主体结构层,防护结构外侧采用钢箍约束。不同强度泡沫混凝土层之间的接触为面面接触,材料模型参数和数值模拟方法与前文相同。在每层泡沫混凝土中心位置处和主体结构层上表面设置测点,具体位置如图 7 所示。为了探究梯度泡沫混凝土层界面层数以及排列方式的影响,共设计了 8 种数值模拟工况,其中包括 2 种单层泡沫混凝土分配层工况作为对照组,以及 6 种双层或 3 层梯度泡沫混凝土分配层工况,具体工况设计如表 3 所示。

表 3 数值计算工况

Table 3 Working conditions for numerical simulation

工况	层数	防护结构
1	1	CF120+C5+C40
2	1	CF120+C10+C40
3	2	CF120+C5+C10+C40
4	2	CF120+C10+C5+C40
5	3	CF120+C3+C5+C10+C40
6	3	CF120+C3+C10+C5+C40
7	3	CF120+C5+C3+C10+C40
8	3	CF120+C10+C5+C3+C40



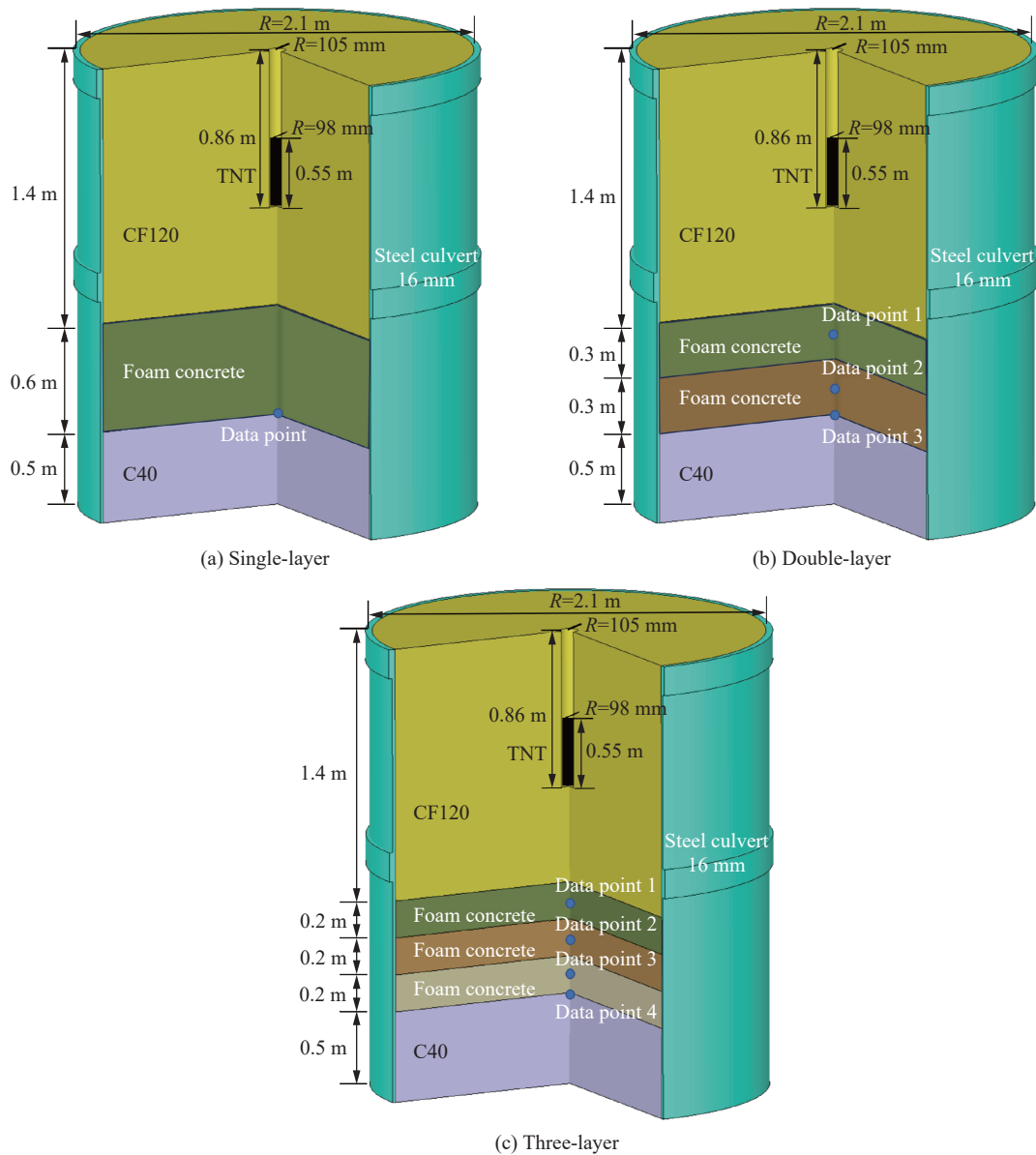


图 7 梯度泡沫混凝土组合式防护结构预制孔装药爆炸的数值模型

Fig. 7 Numerical model of blast test on composite protective structure sandwiched by gradient foam concrete

### 3.2 数值模拟结果及分析

#### 3.2.1 应力时程曲线

图 8 给出了 3 层梯度泡沫混凝土组合式防护结构在上述不同排列方式下各泡沫混凝土层中间测点处的应力时程曲线, 可以看出, 不同强度泡沫混凝土排列方式对应力波的传播有影响。第 1 层泡沫混凝土与 CF120 混凝土遮弹层之间形成波阻抗的强失配, 泡沫混凝土强度越大, 波阻抗越大, 波阻抗失配程度越低, 荷载的峰值越高。当应力波到达第 2 层泡沫混凝土时, 波阻抗的差异已经不明显, 但由于界面的存在, 应力峰值整体降低, 持时延长。当应力波到达最下层泡沫混凝土时, 4 种工况下(工况 5~8)的应力峰值基本一致, 都在 2 MPa 附近, 但应力持时各不相同, 主要是由于排列方式改变了相邻两层泡沫混凝土间界面的性质, 界面间透射反射会对应力波的传播造成影响。

进一步对比了泡沫混凝土层界面层数以及排列方式对作用在主体结构层顶部测点处应力的影响。从图 9(a)中可以看出, 结构层顶部测点处的应力峰值随着泡沫混凝土层界面层数的增加而减小, 界面的存在增加了爆炸波的透反射次数, 使更多的能量留在了分配层的顶部, 从而减小了到达主体结构层的应

力。另外,从图 9(b)中可以看出,梯度泡沫混凝土层不同排列方式下作用在主体结构层上的应力峰值基本一致,但应力持时稍有差异。因此,通过上述数值模拟结果可以得出结论:泡沫混凝土层界面层数对作用在主体结构上的应力有很大影响;但梯度泡沫混凝土层排列方式对作用在主体结构上的应力持时和应力峰值影响不大。

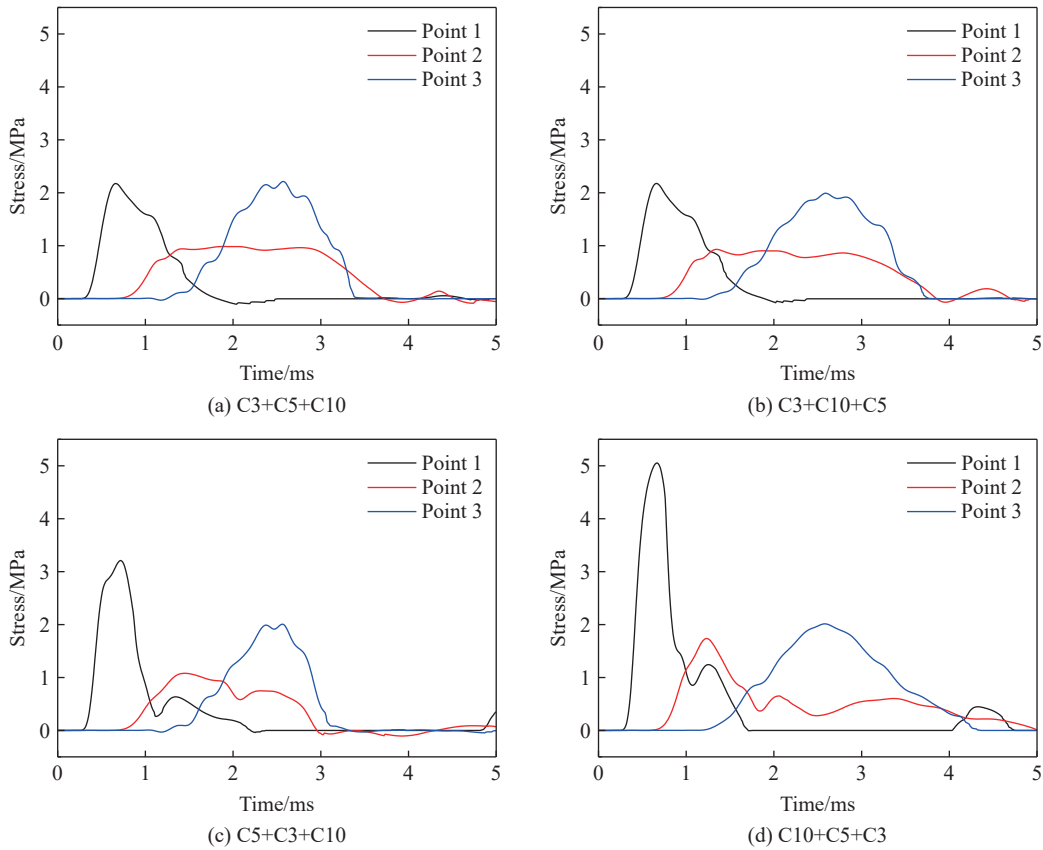


图 8 泡沫混凝土层中间测点应力时程曲线

Fig. 8 Stress-time curves in gradient foam concrete layer

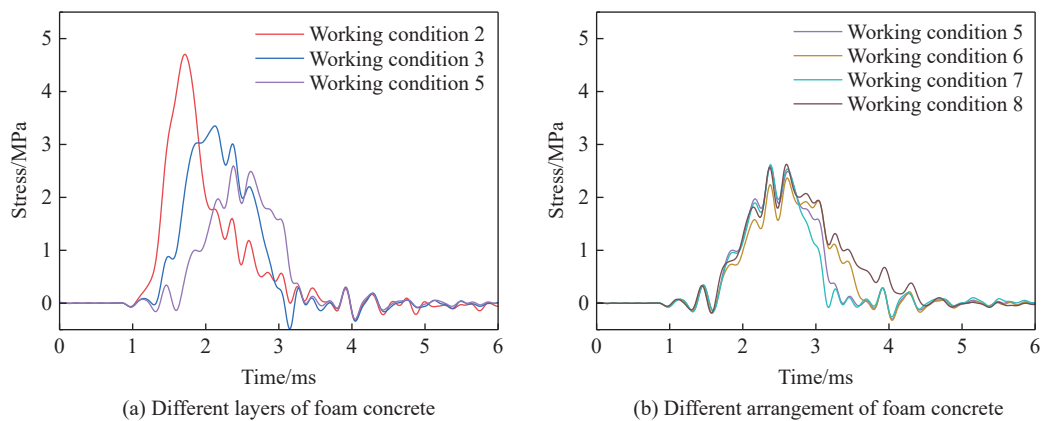


图 9 主体结构上的应力时程曲线

Fig. 9 Stress-time curves at the main structure

### 3.2.2 泡沫混凝土层损伤破坏

图 10 给出了不同界面层数的泡沫混凝土分配层损伤破坏情况,通过对比损伤云图可以看出,泡沫

混凝土层的损伤主要集中在相邻 2 层界面位置处。由于界面的存在使得整个分配层损伤整体上移, 且随着界面层数的增加, 泡沫混凝土分配层底部损伤更小, 主要原因仍在于泡沫混凝土间界面的透射反射会对应力波传播造成影响, 随着界面层数的增加, 透反射次数增加, 更多能量留在了分配层顶部。从图 11

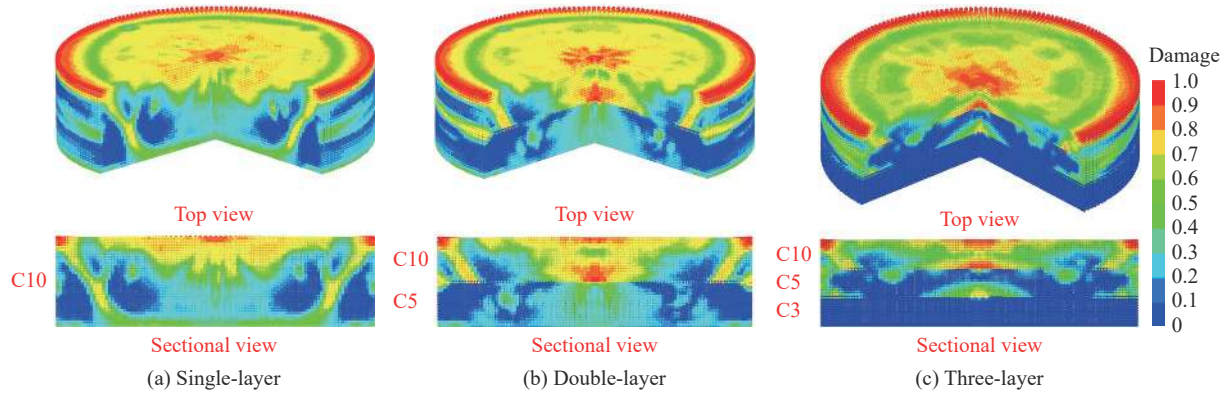


图 10 不同界面层数的泡沫混凝土损伤云图

Fig. 10 Damage contour in the gradient foam concrete layer

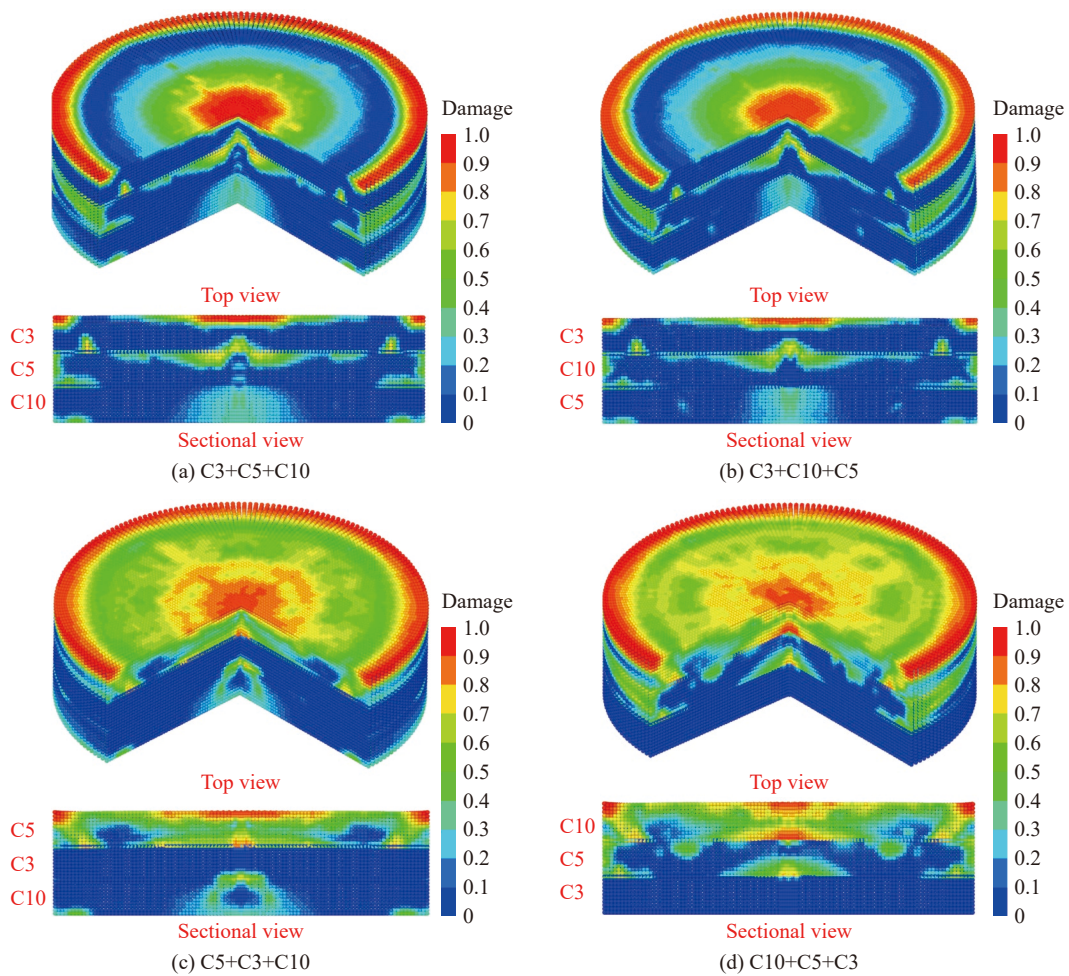


图 11 梯度泡沫混凝土的损伤云图

Fig. 11 Damage contours in the gradient foam concrete layer

不同排列方式下的 3 层梯度泡沫混凝土层损伤破坏情况来看, 不同强度泡沫混凝土层的排列方式对损伤分布有一定影响, 逆梯度(C10+C5+C3)下泡沫混凝土层底部损伤更小。

图 12 从能量的角度对上述泡沫混凝土分配层损伤破坏情况进行了进一步的量化对比。图 12(a)与图 10 损伤云图相对应, 可以看出随着界面层数的增加, 泡沫混凝土层的整体能量越来越小, 与之对应的损伤破坏范围也越来越小。图 12(b)与图 11 的损伤云图相对应, 不同排列方式下泡沫混凝土层的整体能量会有差别, 逆梯度(C10+C5+C3)下泡沫混凝土层的能量更大。结合图 11 的损伤破坏可知, 虽然逆梯度的泡沫混凝土层吸收能量大, 但其损伤破坏主要集中于上层。

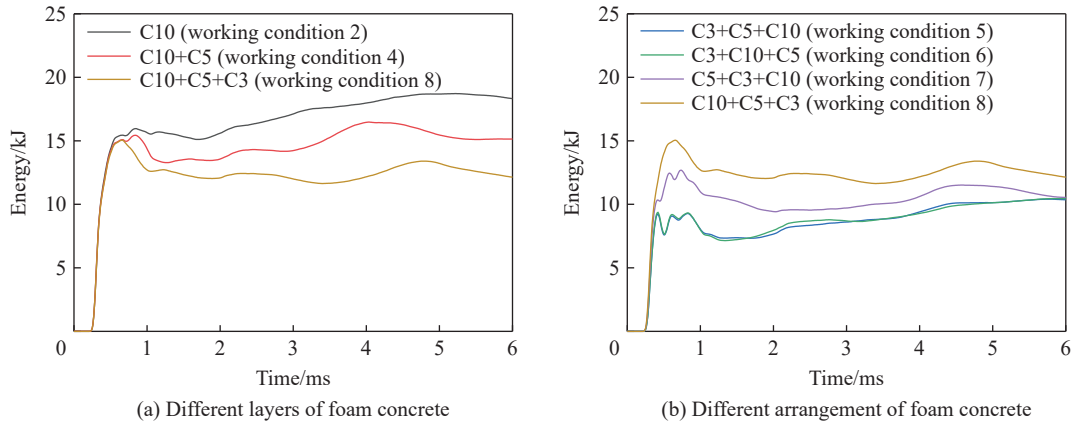


图 12 泡沫混凝土层能量时程曲线  
Fig. 12 Energy-time curves at the foam concrete

### 3.2.3 作用在主体结构层的能量

图 13 给出了主体结构上的能量曲线, 通过图 13(a)可以看出, 随着界面层数的增加, 作用在主体结构上的能量减小, 尤其是 3 层泡沫混凝土分配层与 2 层相比, 能量显著减小; 通过图 13(b)可以看出, 不同泡沫混凝土层排列方式下, 作用在主体结构上的能量区别不大。注意到虽然不同排列方式对泡沫混凝土层中的能量有影响(图 12), 但对结构上的能量影响不大, 从能量守恒角度考虑, 排列方式对遮弹层中的能量也有影响。尽管梯度的引入给防护结构的设计带来了更大的灵活性, 但最优排列组合方式有待进一步研究。

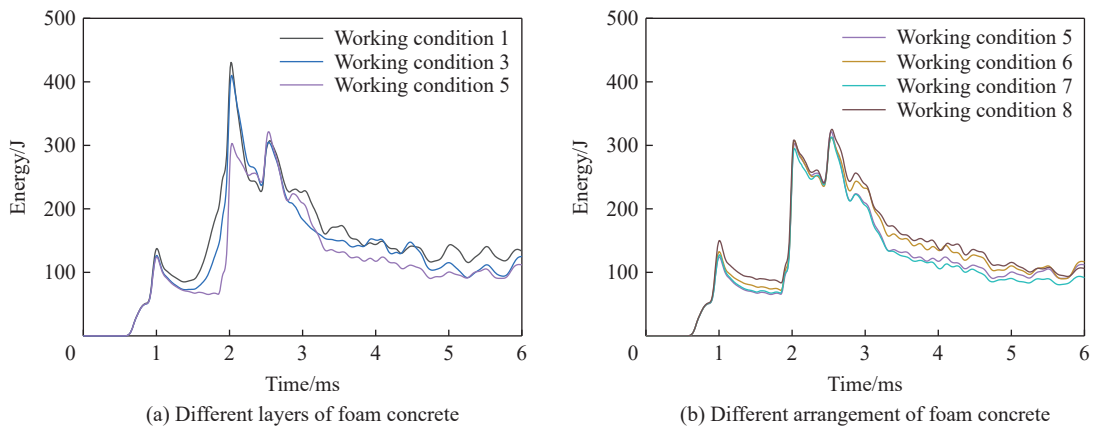


图 13 主体结构上的能量时程曲线  
Fig. 13 Energy-time curves at the main structure



## 4 结 论

本文将泡沫混凝土的动态弹塑性损伤模型应用于组合式防护结构中, 通过开展组合式防护结构预制孔装药爆炸的试验对模型进行验证, 并与常用的 Soil and Foam 模型进行了对比分析, 验证了模型的优越性。最后探讨了梯度泡沫混凝土层界面层数和排列方式对组合式防护结构抗爆性能的影响。主要结论如下。

(1) 开展了组合式防护结构预制孔装药爆炸试验, 结合数值模拟验证了新提出的泡沫混凝土材料模型的准确性; 试验和数值模拟结果表明, 与 C10 泡沫混凝土分配层相比, C5 泡沫混凝土分配层对爆炸波有更好的衰减和弥散效果, 作用在主体结构上的应力峰值降低, 应力持时升高, 且相对应的遮弹层破坏情况更加严重。

(2) 将上述泡沫混凝土材料模型的预测结果与 LS-DYNA 中 Soil and Foam 模型的预测结果进行对比, 证实了新模型对应力波传播预测更加准确, 并且通过新模型中自带的损伤能够很好地模拟出泡沫混凝土层的破坏情况, 验证了新模型的优越性。

(3) 对分层梯度泡沫混凝土组合式防护结构进行预制孔装药爆炸的数值模拟研究, 探讨了梯度泡沫混凝土层界面层数和排列方式对组合式防护结构抗爆性能的影响。结果表明: 泡沫混凝土层界面层数越多, 组合式防护结构抗爆性能越好; 相同界面层数下, 不同强度的泡沫混凝土层的排列方式会改变作用在主体结构上的荷载持时以及整体分配层损伤的空间分布, 但对作用在主体结构层上的能量影响不大, 梯度泡沫混凝土层最优排列组合方式有待进一步研究。

注意到该泡沫混凝土模型与 LS-DYNA 中的混凝土帽盖模型(CSC 模型)有许多相似之处, 根据普通混凝土的试验参数对该模型进行全面的标定后, 完全可以用于普通混凝土材料的数值模拟中, 下一步考虑将该模型应用于混凝土结构。

## 参考文献:

- [1] 周辉, 任辉启, 吴祥云, 等. 成层式防护结构中分散层研究综述 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(11): 111101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0280.  
ZHOU H, REN H Q, WU X Y, et al. A review of sacrificial claddings in multilayer protective structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(11): 111101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0280.
- [2] SHEN J, REN X J. Experimental investigation on transmission of stress waves in sandwich samples made of foam concrete [J]. *Defence Technology*, 2013, 9(2): 110–114. DOI: 10.1016/j.dt.2013.06.002.
- [3] FENG S W, ZHOU Y, LI Q M. Damage behavior and energy absorption characteristics of foamed concrete under dynamic load [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 990–1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129340.
- [4] 赵凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
ZHAO K. The attenuation and dispersion effects on explosive wave of layered protective engineering [D]. Hefei, Anhui, China: University of Science and Technology of China, 2007.
- [5] 杨亚, 孔祥振, 方秦, 等. 爆炸荷载下泡沫混凝土分配层最小厚度的计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(11): 114201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0047.  
YANG Y, KONG X Z, FANG Q, et al. Calculation method for minimum thickness of foam concrete distribution layer under blast load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(11): 114201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0047.
- [6] 王代华, 刘殿书, 杜玉兰, 等. 含泡沫吸能层防护结构爆炸能量分布的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6): 562–567. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0562-06.  
WANG D H, LIU D S, DU Y L, et al. Numerical simulation of anti-blasting mechanism and energy distribution of composite protective structure with foam concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6): 562–567. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0562-06.
- [7] HALLQUIST J. LS-DYNA keyword user's manual, version: 970 [M]. Livermore, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2003: 179–182.

- [8] 张景飞, 冯明德, 陈金刚. 泡沫混凝土抗爆性能的试验研究 [J]. *混凝土*, 2010, 10: 10–12. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2010.10.004.  
ZHANG J F, FENG M D, CHEN J G. Study on the knock characteristic of foam concrete [J]. *Concrete*, 2010, 10: 10–12. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2010.10.004.
- [9] 高全臣, 刘殿书, 王代华, 等. 泡沫混凝土复合防护结构的抗爆性能试验研究 [C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2007: 120–123.  
GAO Q C, LIU D S, WANG D H, et al. Experimental study on anti-knock performance of foam concrete composite protective structure [C]//Proceedings of the 6th National Academic Conference on Safety Protection of Engineering Structures. Beijing, China: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2007: 120–123.
- [10] 杜玉兰, 王代华, 刘殿书, 等. 含泡沫混凝土层复合结构抗爆性能试验研究 [C]//首届全国水工抗震防灾学术会议论文集. 北京: 中国水力发电工程学会, 2006: 85–89.  
DU Y L, WANG D H, LIU D S, et al. Experimental research on the characteristics of anti-blast compound structures including foam concrete [C]//Proceedings of the First National Academic Conference on Earthquake Resistance and Disaster Prevention of Hydraulic Engineering. Beijing: China Society for Hydropower Engineering, 2006: 85–89.
- [11] GUO H, GUO W, SHI Y. Computational modeling of the mechanical response of lightweight foamed concrete over a wide range of temperatures and strain rates [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 622–631. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.064.
- [12] SU B Y, ZHOU Z W, LI Z Q, et al. Experimental investigation on the mechanical behavior of foamed concrete under uniaxial and triaxial loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209(6): 41–51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.097.
- [13] HARDY R D, LEE M Y, BRONOWSKI D R. Laboratory constitutive characterization of cellular concrete: SAND2004-1030 [R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 2004. DOI: 10.2172/918757.
- [14] LIU C Y, HOU J, HAO Y F, et al. Effect of high strain rate and confinement on the compressive properties of autoclaved aerated concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156: 103943. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103943.
- [15] 赵凯, 王肖钧, 刘飞, 等. 多孔材料中应力波的传播 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(1): 107–112. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0107-06.  
ZHAO K, WANG X J, LIU F, et al. Propagation of stress wave in porous material [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(1): 107–112. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)01-0107-06.
- [16] TAN X J, CHEN W Z, LIU H Y. Stress-strain characteristics of foamed concrete subjected to large deformation under uniaxial and triaxial compressive loading [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(6): 04018095.1–04018095.10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002311.
- [17] SHI S F, KONG X Z, FANG Q. A plastic-damage material model for foam concrete under blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 177: 104596. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104596.
- [18] KONG X, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 60–78. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.006.
- [19] HUANG X P, KONG X Z, CHEN Z Y, et al. A plastic-damage model for rock-like materials focused on damage mechanisms under high pressure [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104263. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104263.
- [20] FOSSUM A F, BRANNON R M. On a viscoplastic model for rocks with mechanism-dependent characteristic times [J]. *Acta Geotechnica*, 2006, 1(2): 89–106. DOI: 10.1007/s11440-006-0010-z.
- [21] KONG X Z, FANG Q, LI Q M, et al. Modified K&C model for cratering and scabbing of concrete slabs under projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 217–228. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.016.
- [22] 袁璞, 马芹永, 张海东. 轻质泡沫混凝土 SHPB 试验与分析 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(17): 116–119. DOI: 10.13465/j.cnki.Jvs.2014.17.021.  
YUAN P, MA Q Y, ZHANG H D. SHPB tests for light weight foam concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17): 116–119. DOI: 10.13465/j.cnki.Jvs.2014.17.021.
- [23] 韩李斌, 杨黎明. 泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式 [J]. *宁波大学学报 (理工版)*, 2017, 30(1): 68–72. DOI: 1001-5132(2017)01-0068-05.  
HAN L B, YANG L M. Dynamic properties and failure types of foamed concrete [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2017, 30(1): 68–72. DOI: 1001-5132(2017)01-0068-05.

- [24] 黄海健, 宫能平, 穆朝民, 等. 泡沫混凝土动态力学性能及本构关系 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 466–472. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.033.  
HUANG H J, GONG N P, MU C M, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive relation of foam concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 466–472. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.033.
- [25] CUI J, HAO H, SHI Y C, et al. Experimental study of concrete damage under high hydrostatic pressure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100: 140–152. DOI: 10.1177/2041419616633323.
- [26] WANG Y, KONG X Z, FANG Q. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150: 103815. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103815.
- [27] GAO C, KONG X Z, FANG Q. Experimental and numerical investigation on the attenuation of blast waves in concrete induced by cylindrical charge explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 174(4): 104491. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104491.
- [28] ZHANG J X, ZHOU R F, WANG M S, et al. Dynamic response of double-layer rectangular sandwich plates with metal foam cores subjected to blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122(10): 265–275. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.016.
- [29] ZHANG J H, CHEN L, WU H, et al. Experimental and mesoscopic investigation of double-layer aluminum foam under impact loading [J]. *Composite Structures*, 2020, 241(6): 110859. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.04.031.
- [30] ZHANG J H, ZHANG Y D, FAN J Y, et al. Mesoscopic investigation of layered graded metallic foams under dynamic compaction [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(14): 2081–2098. DOI: 10.1177/1369433218766941.

(责任编辑 王易难)