

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0047

# 爆炸荷载下泡沫混凝土分配层最小厚度的计算方法\*

杨亚, 孔祥振, 方秦, 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:** 为了研究爆炸荷载下泡沫混凝土分配层的设计厚度, 采用 LS-DYNA 软件建立了一维爆炸波在泡沫混凝土杆中传播衰减的数值模型并经过了实验验证, 分析了半无限长和有限长泡沫混凝土杆中爆炸波的传播衰减规律及荷载增强效应产生机理。数值模拟结果表明: 三角形爆炸荷载经过足够长的泡沫混凝土杆会衰减为幅值与其平台应力相当的梯形荷载, 而当泡沫混凝土杆长度较小时, 固定端在更强的反射波作用下将产生荷载增强效应。基于泡沫混凝土杆中的压实情况, 将杆分为 5 个区域, 即压实区 1、平台区 1、弹性区、平台区 2 和压实区 2, 其中弹性区的范围随着杆长减小而逐渐缩短; 为避免荷载增强效应产生且最大程度降低作用于主体结构上的荷载, 定义了平台区 1、弹性区和平台区 2 范围为零时对应的杆长为泡沫混凝土分配层的最小厚度。对爆炸荷载和泡沫混凝土密度的参数敏感性分析表明, 最小厚度随爆炸荷载峰值的增大和作用时间的延长而增大, 而同一爆炸荷载下低密度泡沫混凝土的最小厚度大于高密度泡沫混凝土的最小厚度。基于数值模拟结果, 进一步提出了最小厚度的计算公式。

**关键词:** 泡沫混凝土; 分配层; 一维爆炸波; 最小厚度

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

## A calculation method for the minimum thickness of a foam concrete distribution layer under blast load

YANG Ya, KONG Xiangzhen, FANG Qin, GAO Chu

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

**Abstract:** In order to study the design thickness of the foam concrete distribution layer under blast load, the numerical model of one-dimensional blast wave propagation in foam concrete was established based on the LS-DYNA software, which was verified by comparing it with the corresponding experimental data, and then the propagation and attenuation of the blast wave in the foam concrete bars with semi-infinite and finite thicknesses were analyzed in detail based on the simplified stress-strain curve of foam concrete. The numerical results demonstrate that the triangular-shaped blast load will be attenuated into a trapezoidal-shaped load with the same amplitude as the yield strength of foam concrete when its thickness is enough, while the so-called load enhancement effect will occur at the fixed end due to the action of the stronger reflected wave when its thickness is small. Based on the compaction of foam concrete, the foam concrete with sufficient length can be divided into five regions, i.e., the compaction zone 1, the plateau zone 1, the elastic zone, the plateau zone 2, and the compaction zone 2, where the range of the elastic zone is gradually shortened as the pole length decreases. To avoid the load enhancement effect and minimize the load on the protected structures, the minimum thickness of the distribution layer of foam concrete was defined corresponding to that when the elastic area and two plateau areas disappeared. The sensitivity analysis of blast load and density of foam concrete on the minimum thickness of foam concrete shows that for the blast load concerned, the minimum thickness increases with the peak and duration time of blast load, but is less affected by the rise time of blast load. Furthermore, the minimum thickness of

\* 收稿日期: 2023-02-18; 修回日期: 2023-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(52178515)

第一作者: 杨亚(1997—), 男, 博士研究生, 787997691@qq.com

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

low-density foam concrete is larger than that of high-density foam concrete under the same blast load. Based on the numerical results, a formula for minimum thickness was proposed.

**Keywords:** foam concrete; distribution layer; one-dimensional blast wave; minimum thickness

泡沫混凝土材料是通过一定发泡工艺制备形成的内部含有大量孔隙的人工材料<sup>[1]</sup>, 比普通混凝土, 其密度、弹性模量和强度均相对较小, 因此具有优异的隔音降噪、保温隔热性能<sup>[2-4]</sup>, 被广泛应用于民用建筑中<sup>[5-9]</sup>。另外, 由于泡沫混凝土材料具有波阻抗低、屈服平台长和孔隙率高等特点, 能够显著衰减爆炸波, 应用于抗爆结构可大幅降低作用于防护结构上的爆炸荷载<sup>[10-12]</sup>。工程实际中, 可将泡沫混凝土直接铺设于结构表面用于衰减爆炸荷载, 通过牺牲泡沫混凝土材料达到防护主体结构的目的<sup>[13-14]</sup>; 也可将泡沫混凝土用于夹芯结构的中间层, 组合形成典型的硬-软-硬结构, 通过第 1 层硬材料与泡沫混凝土间的波阻抗失配及其优异的消波性能降低作用于结构上的爆炸荷载。基于该思想, 已有研究探讨将泡沫混凝土用于成层式结构中的分配层。

泡沫混凝土应用于成层式结构中的分配层时, 迎爆面近区处于高围压的侧限状态, 应力状态接近于一维应变状态。董永香等<sup>[15]</sup>进行了花岗岩+泡沫混凝土+纤维混凝土成层式试件一维应变下的轻气炮冲击实验, 实验数据和数值模拟分析表明, 含泡沫混凝土组合试件具有良好的消波能力, 主要原因在于泡沫混凝土夹层的低波阻抗引起应力波传播在各层介质中能量与动量分配的改变。赵凯<sup>[16]</sup>和 Shen 等<sup>[17]</sup>进行了混凝土+泡沫混凝土(或黄土和干砂)+混凝土成层式试件在一维应变下的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)冲击实验, 通过测量杆中的入射荷载和透射荷载发现泡沫混凝土的消波性能明显优于黄土和干砂的。基于平面装药模拟核爆荷载技术, 李砚召等<sup>[18]</sup>进行了遮弹层+不同分配层的缩比模型实验, 实验数据表明以泡沫混凝土为代表的软材料分配层对核爆炸荷载具有很好的消波作用。张景飞等<sup>[19]</sup>、高全臣等<sup>[20]</sup>和杜玉兰等<sup>[21]</sup>进行了小比例尺混凝土+泡沫混凝土+混凝土成层式结构在接触爆炸和浅埋爆炸下的实验研究, 结果表明由于泡沫混凝土的低波阻抗性质, 成层式结构的能量分布上移, 使得作用于结构上的荷载和能量大幅减小; 王代华等<sup>[22]</sup>和唐德高等<sup>[23]</sup>通过数值模拟也验证了这个结论。

可以看出, 已有一维应变下成层式试件的冲击实验表明泡沫混凝土分配层较其他材料分配层有明显的优势, 小比例尺缩比爆炸实验和数值模拟研究均表明以泡沫混凝土为分配层的成层式结构具有良好的抗爆性能。但是, 已有爆炸波在泡沫聚合物和泡沫铝的传播实验表明, 在特定情况下泡沫混凝土材料可能不起消波作用, 反而出现荷载增强效应, 即通过泡沫材料传入结构中的压力比泡沫材料加载端的压力高<sup>[24-25]</sup>。周宏元等<sup>[26]</sup>认为泡沫混凝土作为地下结构的防护层使用时, 需综合考虑泡沫混凝土的材料属性、厚度及荷载特征等。基于激波管装置, Nian 等<sup>[27]</sup>对一维应变下爆炸波在泡沫混凝土中的传播衰减规律及通过泡沫混凝土作用在结构上的荷载(结构用铝材代替)进行了实验研究, 发现存在一个与泡沫混凝土密度和爆炸波相关的临界长度, 当厚度小于该临界长度时, 反而增强作用在结构上的荷载。基于一维弹簧质量块模型, Li 等<sup>[28]</sup>指出冲击波作用下多孔材料可能出现荷载增强效应, 并基于数值求解和无量纲分析, 给出了产生荷载增强效应的无量纲材料特性和荷载条件。

综上所述, 当泡沫混凝土用于成层式防护结构的分配层时, 需合理确定其厚度, 当分配层厚度小于一临界值时(定义为最小厚度), 会出现上述的荷载增强效应, 达不到降低作用于主体结构上荷载的目的。目前, 针对该最小厚度的研究仅局限于验证和定性分析, 未能给出设计计算方法。本文中, 首先建立一维爆炸波在泡沫混凝土杆中传播衰减的数值模型, 在经过已有实验验证的基础上, 进一步分析半无限长和有限长泡沫混凝土杆中爆炸波的传播衰减规律以及压缩变形特性, 以明确荷载增强效应的产生机理; 然后, 基于数值模拟结果, 提出泡沫混凝土分配层的最小厚度设计准则, 分析爆炸荷载与泡沫混凝土密度对最小厚度的影响规律并给出最小厚度的计算公式。

## 1 泡沫混凝土的荷载增强效应

对 Nian 等<sup>[27]</sup>开展的一维爆炸波在泡沫混凝土中传播实验进行数值模拟, 以明晰爆炸荷载在泡沫混凝土的荷载增强效应。

### 1.1 数值模型

Nian 等<sup>[27]</sup>为研究组合结构中泡沫混凝土的荷载增强效应, 基于激波管装置, 开展了一维爆炸波在密度为 480 kg/m<sup>3</sup> 的 3 种不同长度(分别为 184、127 和 76 mm)泡沫混凝土杆中传播的实验研究, 实验装置如图 1 所示。由激波管产生一维波, 通过泡沫混凝土作用于结构上(用铝杆代替), 其中泡沫混凝土试件外有钢套管约束以确保一维应变状态。实验中, 埋设了相关传感器(图 1<sup>[27]</sup>中的压力传感器 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 以及应变片), 测得了进入泡沫混凝土试件的荷载时程曲线(图 2<sup>[27]</sup>)以及作用于结构上的荷载。

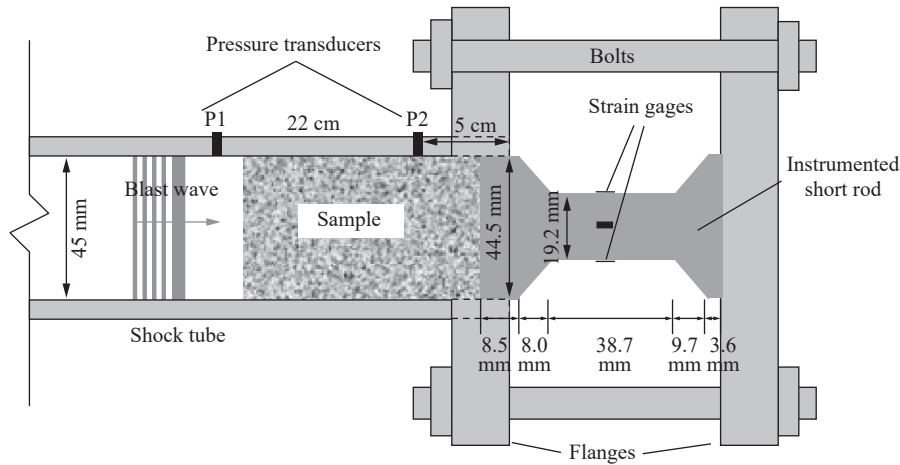


图 1 激波管装置<sup>[27]</sup>

Fig. 1 A shock-tube device<sup>[27]</sup>

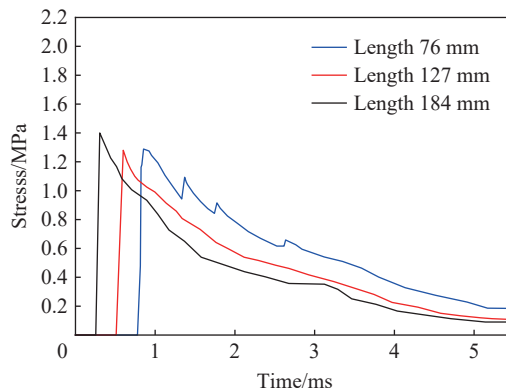


图 2 荷载时程曲线<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Incident load-time history curves<sup>[27]</sup>

建立与实验<sup>[27]</sup>相对应的有限元模型, 如图 3 所示。有限元模型主要包括 3 部分, 即泡沫混凝土试件(直径为 44 mm)、钢套管(壁厚 2 mm)和铝底座, 均采用六面体网格离散, 网格尺寸为 2 mm。试件与套管和底座之间采用自动面面接触, 底座采用固定约束, 并将图 2 所示的实验测得入射荷载作为边界条件施加于泡沫混凝土试件表面。

对钢套管和铝底座均采用理想弹塑性模型描述, 铝材料的弹性模量、屈服强度和泊松比分别为 69 GPa、0.276 GPa 和 0.3, 钢材料的弹性模量、屈服强度和泊松比分别为 206 GPa、0.235 GPa、0.3。对泡沫混凝土采用 LS-DYNA 中的 Soil and Foam 模型描述<sup>[29]</sup>, 其屈服准则描述为:

$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \tag{1}$$

式中:  $a_0$ 、 $a_1$  和  $a_2$  为材料参数, 且当  $a_1$  和  $a_2$  为 0 时, 屈服准则退化为 von Mises 准则。为便于分析, 采用

von Mises 准则, 即  $a_1=0, a_2=0$ 。状态方程如图 4<sup>[29]</sup> 所示, 可通过 10 组体积应变和压力数据定义。基于 Nian 等<sup>[27]</sup> 开展的相应泡沫混凝土一维应变压缩实验, 可方便地标定状态方程参数。基于上述标定参数, 对一维应变压缩实验进行了数值模拟, 图 5 给出了数值模拟(单元模型)得到的应力-应变曲线与实验数据的对比, 可以看出数值模拟结果和实验结果吻合很好, 这验证了材料模型参数取值的合理性。

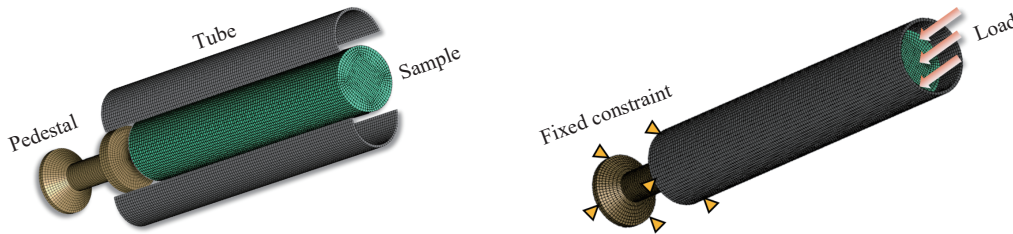


图 3 一维波在泡沫混凝土中传播的有限元模型

Fig. 3 The finite element model of one-dimensional wave propagation in a foam concrete bar

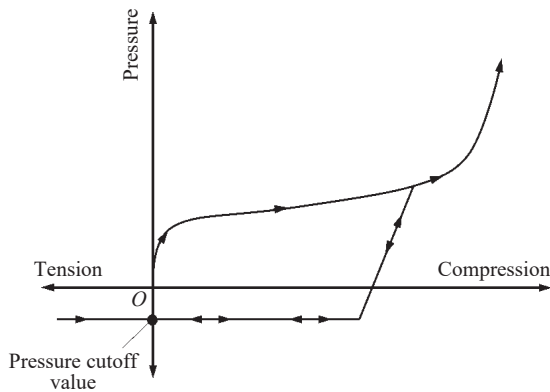


图 4 Soil and Foam 模型的状态方程<sup>[29]</sup>

Fig. 4 Equation of state for the soil and foam model<sup>[29]</sup>

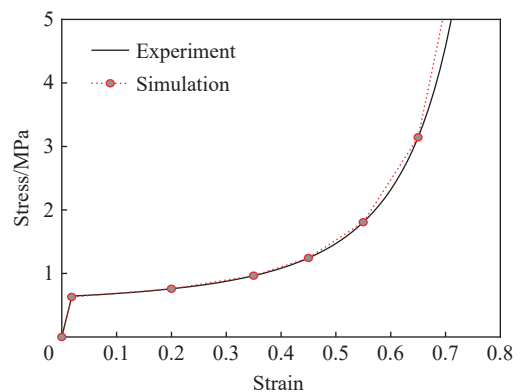


图 5 一维应变下泡沫混凝土的应力-应变曲线<sup>[27]</sup>

Fig. 5 One-dimensional stress-strain curves of foam concrete<sup>[27]</sup>

### 1.2 数值模型的验证

图 6 分别给出了数值模拟得到的经过 3 种不同长度泡沫混凝土试件作用于结构上的荷载与相应实验数据的对比, 可以看出数值模拟结果与实验结果吻合较好。3 组施加于泡沫混凝土试件表面的荷载基本一致(图 2<sup>[27]</sup>, 平均峰值约为 1.3 MPa), 但由于泡沫混凝土试件长度不同, 作用在泡沫混凝土底部结构上的荷载存在显著差别。对于长试件(184 mm), 作用在结构上的荷载为梯形波, 其幅值与泡沫混凝土的屈服强度相当(图 5<sup>[27]</sup>, 屈服强度约为 0.63 MPa); 随着试件长度变短, 作用在结构上的荷载逐渐出现增强

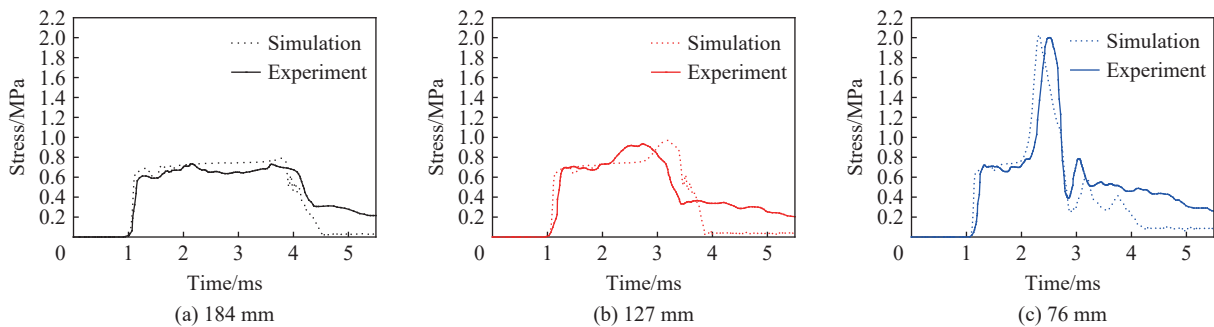


图 6 经过 3 种不同长度泡沫混凝土试件作用于结构上的荷载随时间的变化

Fig. 6 Variation of stress exerted by three foam concrete specimens with different lengths on structure with time

现象; 而对于短试件(76 mm), 作用于结构上的荷载峰值远大于施加荷载峰值, 增强现象显著, 数值模拟结果很好地再现了这一现象。因此, 在一定的荷载作用下, 泡沫混凝土分配层存在一个临界厚度(即最小厚度)恰好将施加爆炸荷载衰减至泡沫混凝土的屈服强度, 当泡沫混凝土的厚度小于该最小厚度时将出现不同程度的荷载增强现象。

## 2 一维爆炸波在泡沫混凝土杆中的传播衰减规律

为了揭示爆炸荷载作用下泡沫混凝土的荷载增强机理, 以上述实验中的泡沫混凝土(密度 480 kg/m<sup>3</sup>)为研究对象, 对一维爆炸波在泡沫混凝土杆中的传播进行数值模拟, 通过一维爆炸波的传播衰减规律及泡沫混凝土材料的压实变形情况解释了荷载增强机理。需要指出的是, 为便于分析, 将爆炸荷载简化为三角形荷载(荷载峰值 1.3 MPa, 升压时间 0.05 ms, 持续时间 4 ms), 且对泡沫混凝土应力-应变曲线进行了如下简化。

### 2.1 应力-应变曲线简化

一维应变下泡沫混凝土的应力-应变曲线一般具有 3 个典型阶段<sup>[30]</sup>, 即弹性变形阶段、压密阶段和密实阶段。通常压密阶段和密实阶段界限不明显, 为便于分析一维爆炸波的传播过程, 将实测应力-应变曲线(图 5<sup>[27]</sup>)简化为 Gibson 等<sup>[31]</sup>提出的三段式应力-应变曲线, 如图 7 所示。

其中, 弹性阶段的应力( $\sigma$ )-应变( $\varepsilon$ )关系为:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \varepsilon < \varepsilon_y, E = C_E\rho^2 \quad (2)$$

平台阶段的应力-应变关系为:

$$\sigma = \sigma_y \quad \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_1 \quad (3)$$

密实阶段的应力-应变关系为:

$$\sigma = \sigma_y + K(\varepsilon - \varepsilon_1)/(1 - \varepsilon)^2 \quad \varepsilon \geq \varepsilon_1, \varepsilon_1 = (1 - \rho/\rho_s)(1 - D^{-1/m}) \quad (4)$$

式中:  $E$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\sigma_y$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $\rho$  和  $\rho_s$  分别为弹性模量、屈服应变、平台应力、密实应变(平台阶段和密实阶段的转折应变)、泡沫混凝土密度和基体材料密度,  $K$ 、 $D$  和  $m$  为密实阶段的硬化参数,  $C_E$  为弹性模量与密度的相关参数。泡沫混凝土的基体密度  $\rho_s$  一般可取为 2 000 kg/m<sup>3</sup>, 硬化参数  $K$  建议取值为 0.97 MPa, 参数  $D$ 、 $m$  和  $C_E$  可根据实验标定, 本文中根据实验<sup>[27]</sup>取  $D=1.73$ ,  $m=1$ ,  $C_E=0.14$  kPa·m<sup>3</sup>/kg。图 8 给出了简化的三段式应力-应变曲线与实际应力-应变曲线的对比, 可以看出两者吻合较好。进一步将简化应力-应变曲线用于 Soil and Foam 材料模型, 对第 1 节中的长试件和短试件实验进行了数值模拟, 发现虽然对作用于结构上荷载的预测精度有所下降, 但整体预测结果与实验结果吻合较好, 验证了上述简化应力-应变曲线的可靠性(图 9)。

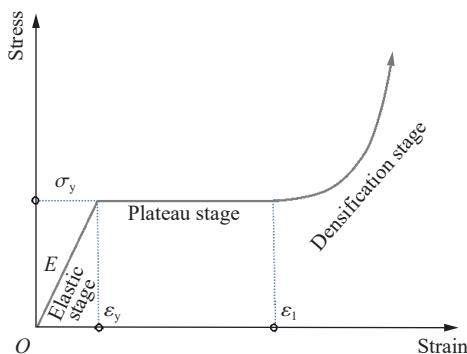


图 7 简化的三段式应力-应变曲线

Fig. 7 A simplified three-stage stress-strain curve

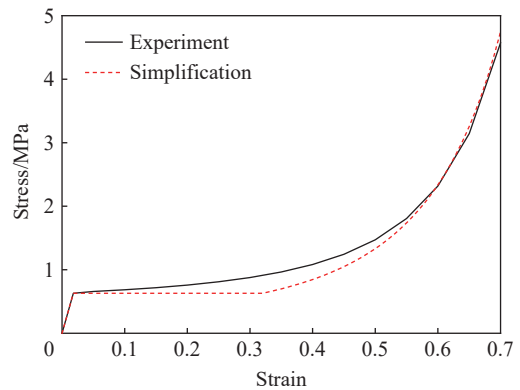


图 8 简化的应力-应变曲线与实验数据对比

Fig. 8 Comparison of the simplified stress-strain curve with the experimental one

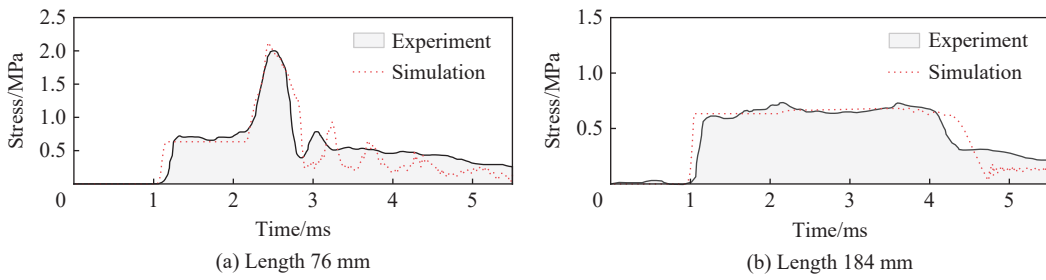


图 9 基于简化应力-应变曲线模拟得到的荷载与实验数据的对比

Fig. 9 Comparison of the simulated load-time curves based on the simplified stress-strain curve with the experimental ones

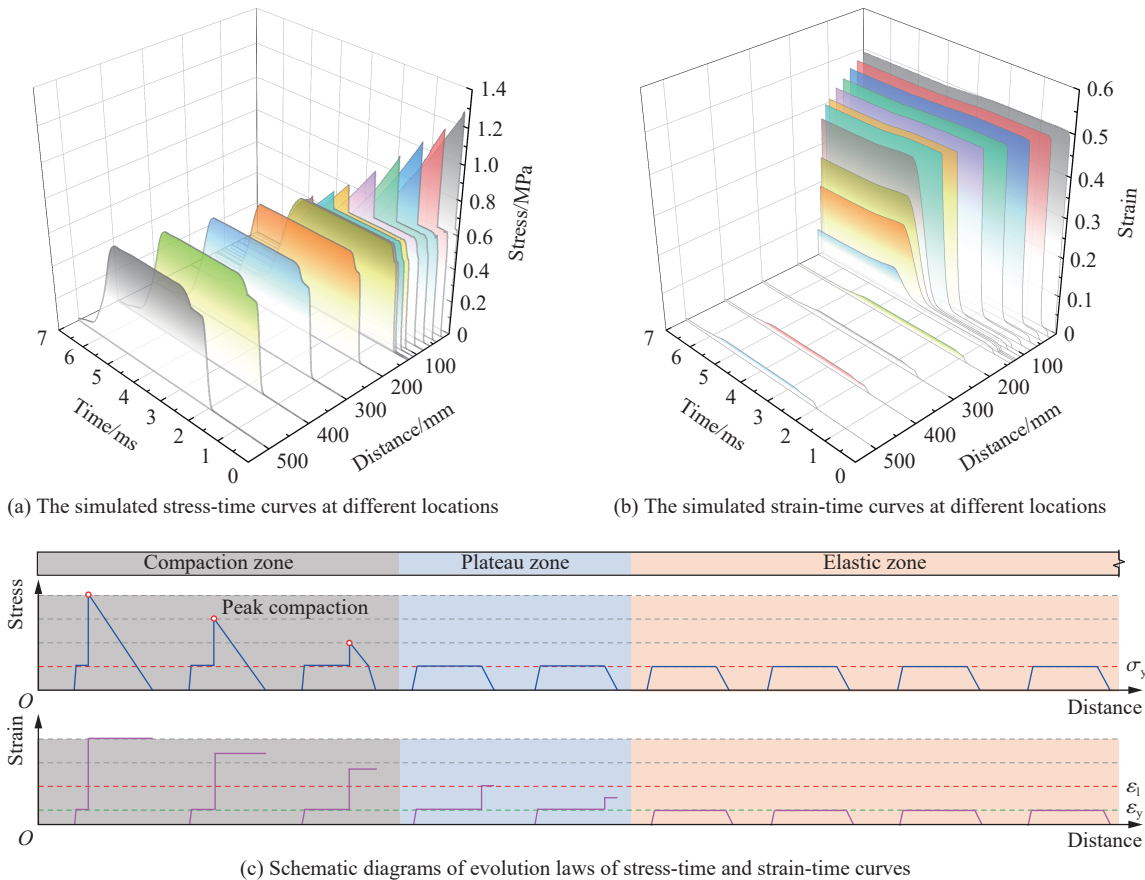
## 2.2 传播衰减规律

为了揭示爆炸荷载作用下泡沫混凝土的荷载增强机理, 首先详细分析了一维爆炸波在半无限长泡沫混凝土杆中的传播衰减规律, 然后将泡沫混凝土层下部的结构层简化为固定端, 进而给出了一维爆炸波在有限长泡沫混凝土杆中的传播衰减规律。值得指出的是, 泡沫混凝土材料采用上述简化的应力应变关系(图 8), 一维爆炸波仍采用上述简化的三角形波, 有限元模型与图 4 相同, 仅改变了泡沫混凝土杆的长度。

### 2.2.1 半无限长泡沫混凝土杆

首先对一维爆炸波在半无限长泡沫混凝土杆中的传播衰减规律进行研究, 然后分析底部为固定的有限长泡沫混凝土杆。

图 10 给出了沿着杆长度方向不同位置处的应力和应变时程曲线。结合上述简化的泡沫混凝土应力-应变关系(图 8), 可以发现杆中存在 2 种典型波: 弹性波和压实波。首先产生的弹性前驱波以弹性波



(c) Schematic diagrams of evolution laws of stress-time and strain-time curves

图 10 一维爆炸波在半无限长泡沫混凝土杆中的传播衰减

Fig. 10 Propagation of one-dimensional blast wave in a foam concrete bar with semi-infinite length

速先前传播, 波速较慢的压实波紧随其后, 使得泡沫混凝土产生不可逆的塑性变形, 直到压实波被完全卸载。

因此加载端近区的应力时程曲线存在一个平台段( $\sigma_y$ )和压实峰值(图 10(c) 中的红点), 对应的应变时程曲线存在 2 个平台, 第 1 个平台表示泡沫混凝土达到屈服应变( $\varepsilon_y$ ), 第 2 个平台表示泡沫混凝土进入密实阶段, 其幅值大于密实应变( $\varepsilon_1$ ); 随着传播过程中能量的消耗, 压实峰值逐渐衰减至平台应力( $\sigma_y$ ), 应力时程曲线演变为梯形, 应变时程曲线第 2 个平台的幅值逐渐衰减; 当第 2 个应变平台幅值进一步衰减至屈服应变( $\varepsilon_y$ ), 应力和应变时程曲线均演化为梯形的弹性波。因此, 可以将一维爆炸波作用下的半无限长泡沫混凝土杆的变形分为 3 个区, 即密实区、平台区和弹性区(图 10(c))。

图 11 给出了泡沫混凝土杆中 3 个分区的应力和应变峰值分布。可以看出, 密实区范围为 0~130 mm, 该区域内泡沫混凝土均达到密实阶段, 沿杆长度方向应力和应变峰值逐渐降至材料的平台应力(0.63 MPa)和密实应变(0.32); 平台区范围为 130~175 mm, 该区域内泡沫混凝土处于平台阶段, 应力峰值保持平台应力不变, 而应变峰值迅速降至屈服应变(0.018); 剩余区域均为弹性区, 该区域内应力峰值和应变峰值分别为平台应力和屈服应变。

### 2.2.2 有限长泡沫混凝土杆

下面对一维爆炸波在有限长泡沫混凝土杆中的传播衰减规律进行研究, 鉴于成层式防护结构中泡沫混凝土分配层的波阻抗远小于主体结构层的波阻抗, 所以将结构简化为固定端。图 12 给出了 500 mm 长泡沫混凝土杆不同位置处的应力和应变时程曲线。

通过对比半无限长杆中不同位置处的应力和应变时程曲线, 发现加载端近区的应力和应变时程曲线与半无限长泡沫混凝土杆呈现相同的规律, 随着后续压实波能量的耗散, 泡沫混凝土杆中间区域的应力和应变时程曲线演化为梯形波, 应力峰值和应变峰值分别衰减至平台应力( $\sigma_y$ )和屈服应变( $\varepsilon_y$ )。

由于一维爆炸波在固定端发生反射, 所以固定端附近位置的应变时程曲线存在 2 个平台, 第 1 个平台表示泡沫混凝土在入射荷载作用下达到屈服应变( $\varepsilon_y$ ), 第 2 个平台表示泡沫混凝土在反射荷载作用下进一步被压缩。由于材料的平台阶段具有一定的缓冲作用, 所以该区域的应力时程曲线形状仍然为梯形, 其幅值大致等于平台应力( $\sigma_y$ )。因此, 可以将一维爆炸波作用下的有限长泡沫混凝土杆分为 5 个区: 密实区 1、平台区 1、弹性区、平台区 2 和密实区 2(图 12(c))。

图 13 给出了泡沫混凝土杆中 5 个分区的应力和应变峰值分布。对于 500 mm 长杆, 一维爆炸波作用下加载端近区分区与无限长泡沫混凝土杆一致, 依次为密实区(0~130 mm)、平台区 1(130~175 mm)和弹性区(175~400 mm)。平台区 2 的范围为 400~450 mm, 应变峰值处于屈服应变(0.018)与密实应变(0.32)之间。密实区 2 的范围为 460~500 mm, 该区域内的泡沫混凝土恰好被压实(应变等于为密实应变), 应力峰值为平台应力(0.63 MPa)。

为了进一步分析试件长度对各分区的影响, 图 14 给出了一维爆炸波作用下 3 种长度(300、200 和 100 mm)泡沫混凝土杆中的应力、应变峰值分布情况。可以看出, 随着泡沫混凝土杆长度的减小, 弹性区的范围逐渐缩短。300 mm 长泡沫混凝土杆的弹性区范围缩减至 100 mm, 而 200 mm 长泡沫混凝土杆的弹性区和平台区则完全消失, 而且固定端的应力峰值(0.76 MPa)略高于平台应力(0.63 MPa); 对于 100 mm 长的泡沫混凝土杆, 整个区域的泡沫混凝土均处于密实阶段, 固定端的应力峰值(2.4 MPa)超过施加荷载峰值(1.3 MPa), 即出现荷载增强现象。

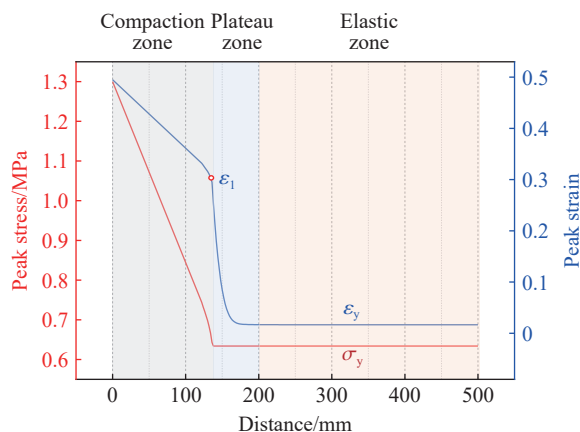


图 11 半无限长泡沫混凝土杆的应力和应变峰值分布

Fig. 11 Distribution of stress and strain peaks in a foam concrete bar with semi-infinite length

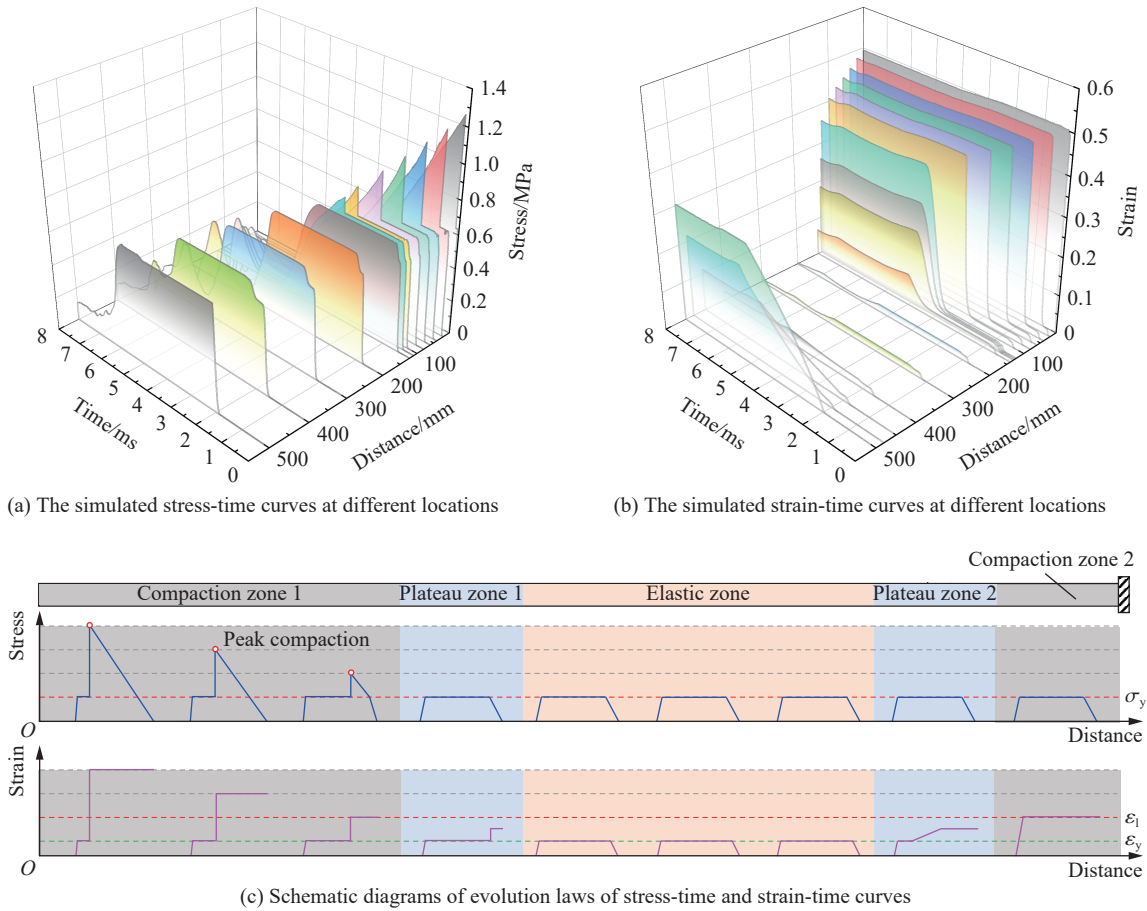


图 12 一维爆炸波在 500 mm 长泡沫混凝土杆中的传播衰减

Fig. 12 Propagation of one-dimensional blast wave in a foam concrete bar with the length of 500 mm

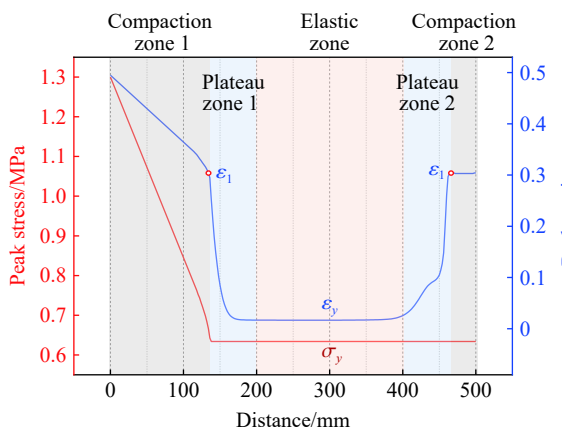


图 13 300 mm 长泡沫混凝土杆的应力和应变峰值分布  
Fig. 13 Stress and strain peak distribution in a foam concrete bar with the length of 300 mm

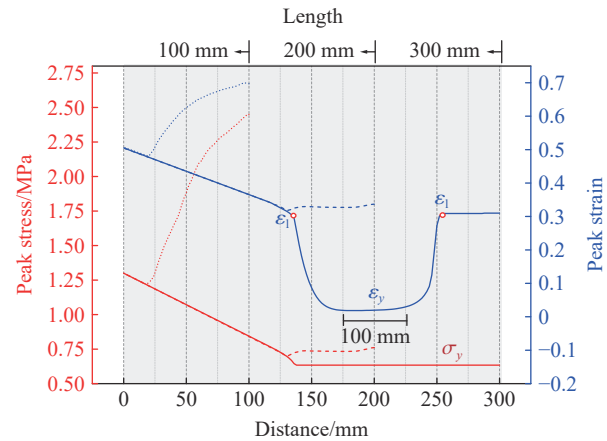


图 14 不同长度泡沫混凝土杆的应力和应变峰值分布  
Fig. 14 Stress and strain peak distribution in foam concrete bars with different lengths

为了进一步分析荷载增强机理, 图 15 给出了 100 mm 长泡沫混凝土杆中的应力和应变时程曲线。可以看出, 100 mm 长泡沫混凝土杆中的爆炸波衰减较小, 在抵达固定端后产生更强的反射波, 因此出现了明显的荷载增强现象。随着反射波继续传播, 其传播路径上的泡沫混凝土也进入压实状态, 对应的应力时程曲线出现第 2 个峰值, 应变时程曲线则出现了第 3 个平台(图 15(c))。综上所述, 一维爆炸波作用下较短的泡沫混凝土杆将完全进入密实阶段, 弹性区和平台区完全消失。



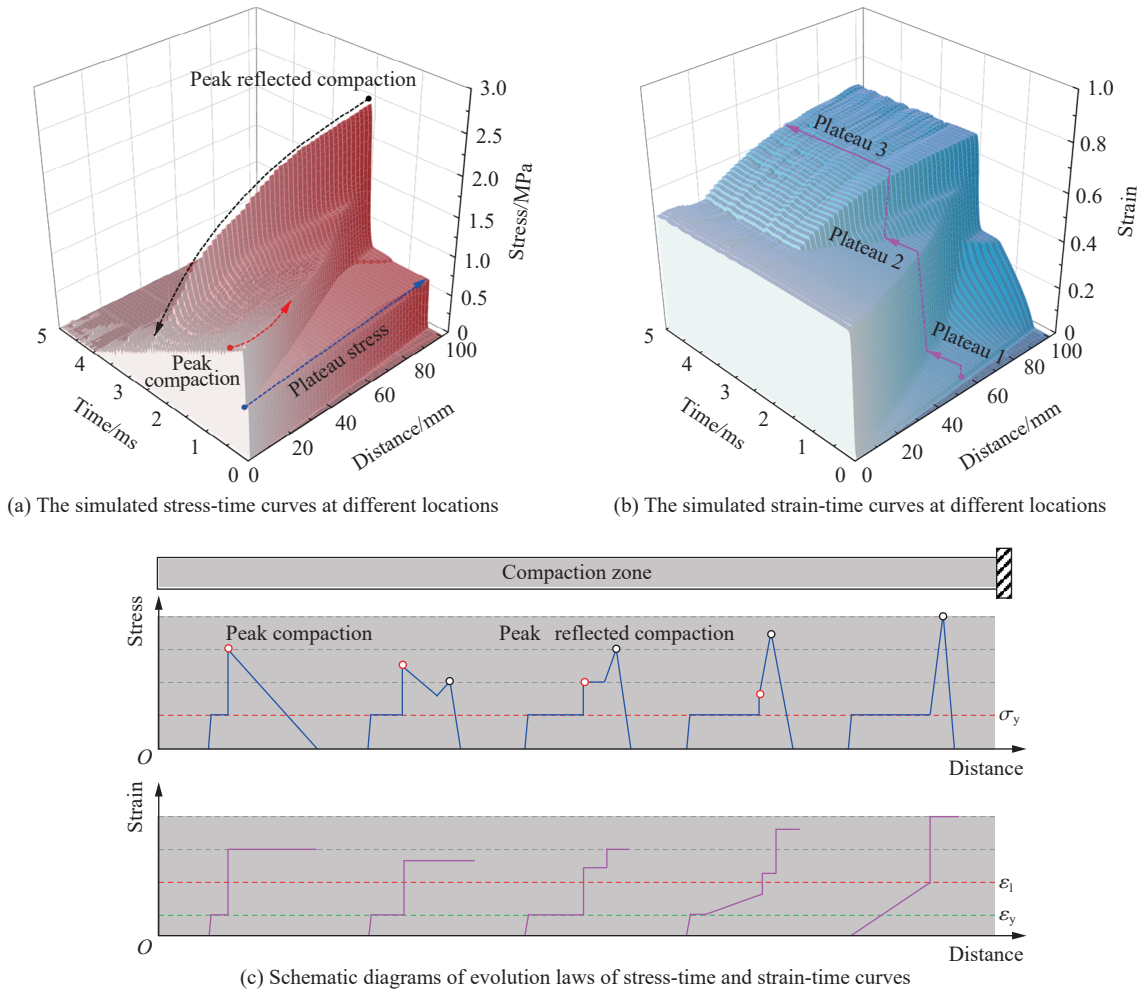


图 15 一维爆炸波在 100 mm 长泡沫混凝土杆中的传播衰减  
 Fig. 15 Propagation of one-dimensional blast wave in a foam concrete bar with the length of 100 mm

### 3 最小厚度的设计准则

通过以上分析可知, 足够长的泡沫混凝土杆可有效降低爆炸荷载(针对幅值大于材料屈服强度的爆炸荷载), 三角形爆炸荷载经泡沫混凝土杆后变为幅值与泡沫混凝土平台应力相当的梯形荷载。但当泡沫混凝土杆的长度不足以将爆炸荷载衰减为弹性波时, 结构端(近似为固定端)近区泡沫混凝土在反射波作用下会被压密进入应力-应变曲线的密实阶段, 出现荷载增强效应, 即经过泡沫混凝土分配层传递至主体结构层的荷载超过入射的爆炸荷载。为了最大限度发挥泡沫混凝土分配层的吸能作用并避免在主体结构上产生荷载增强效应, 可根据爆炸荷载下泡沫混凝土杆中的分区来定义其最小厚度, 如图 16 所示。如果泡沫混凝土杆中的平台区 1、弹性区和平台区 2 的范围恰好为零, 此时杆底部的应变

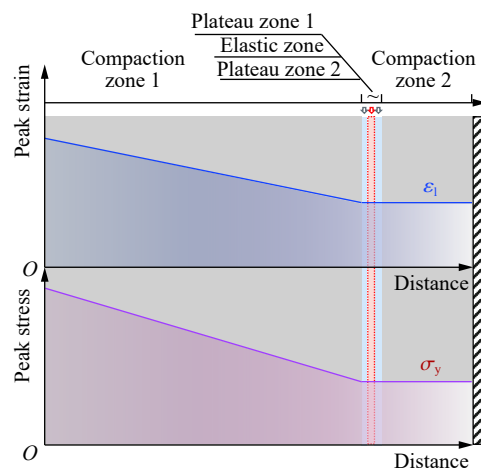


图 16 泡沫混凝土层最小厚度设计准则  
 Fig. 16 Design criteria for the minimum thickness of a foam concrete layer

峰值刚刚达到密实应变, 即达到了避免发生荷载增强效应的临界状态, 这种状态对应的杆长定义为泡沫混凝土分配层的最小厚度。

在最小厚度情况下, 固定端泡沫混凝土的应力和应变峰值恰为其平台应力( $\sigma_y$ )和密实应变( $\epsilon_1$ ), 此时通过泡沫混凝土层作用于主体结构爆炸荷载是可设计的, 即可通过设计泡沫混凝土层密度(或强度)和厚度, 使得作用于结构上爆炸荷载峰值为该泡沫混凝土材料的平台应力。

### 4 泡沫混凝土分配层的最小厚度

在上述确定的最小厚度设计准则基础上, 开展大量数值模拟, 通过参数敏感性分析拟合得到最小厚度的计算公式, 可直接应用于工程设计。数值模拟中的一维杆有限元模型与第 2 节中的相同。

#### 4.1 爆炸荷载及泡沫混凝土材料性能

爆炸荷载和泡沫混凝土材料性能是影响最小厚度的 2 个关键因素, 为了便于研究两者对最小厚度的影响规律, 以下对爆炸荷载和泡沫混凝土力学性能进行合理简化。

##### 4.1.1 爆炸荷载

如图 17 所示, 通常钻地弹爆炸荷载可简化为有升压时间的三角形荷载, 主要有 3 个参数, 即荷载峰值  $p_0$ 、升压时间  $t_0$  以及作用时间  $t_1$ 。采用 2 个无量纲量  $\alpha$  和  $\beta$  描述上述荷载特征, 即荷载系数  $\alpha=p_0/\sigma_y$  和时间系数  $\beta=t_1/t_0$ , 其中  $t_0$  不等于 0。

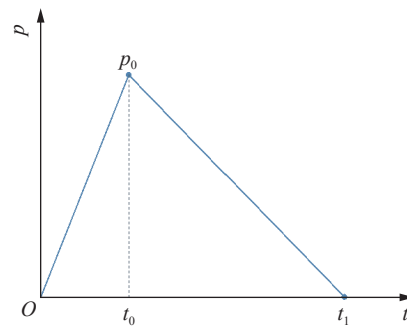


图 17 简化的爆炸荷载

Fig. 17 Simplified blast load

##### 4.1.2 泡沫混凝土材料的力学性能

如图 7 所示, 泡沫混凝土力学性能主要包括平台应力  $\sigma_y$ 、弹性模量  $E$ 、屈服应变  $\epsilon_y$ 、密实应变  $\epsilon_1$  和基体材料密度  $\rho_s$ 。通常基体材料密度为  $2000 \text{ kg/m}^3$ , 而弹性模量  $E=C_E\rho^2$ , 屈服应变  $\epsilon_y=\sigma_y/E$ , 平台应力  $\sigma_y$  与其密度相关, 因此泡沫混凝土材料性质力学性能仅与其密度相关。

JG/T 266—2011《泡沫混凝土》<sup>[32]</sup> 中按泡沫混凝土的密度划分了 11 个等级, 分别用符号 A03、A04、A05、A06、A07、A08、A09、A10、A12、A14 和 A16 表示, 图 18 给出了上述密度等级对应的平台应力区间。

取图 18 中的平台应力中值进行拟合, 可得到平台应力  $\sigma_y$  (MPa) 与密度  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) 的关系如下:

$$\sigma_y = -0.022 + 3 \times 10^{-6}\rho^2 + 1/(15 - 3.5\rho^{0.2}) \tag{5}$$

基于式 (5) 及 Gibson 模型<sup>[31]</sup> 即可得到 11 个密度等级的泡沫混凝土应力-应变简化曲线, 图 19 给出

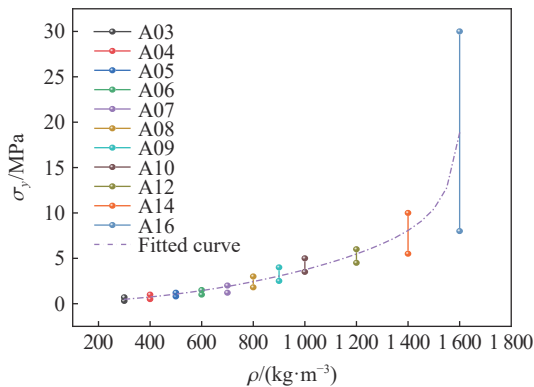


图 18 泡沫混凝土不同密度等级对应的平台应力区间

Fig. 18 Plateau stress ranges of foam concrete with different densities

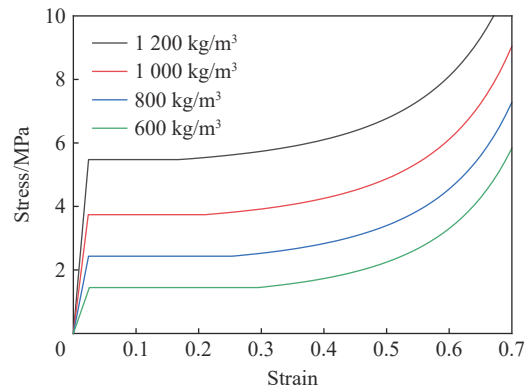


图 19 4 种典型密度泡沫混凝土的应力-应变简化曲线

Fig. 19 Simplified stress-strain curves of foam concrete with four typical densities

了 4 种典型密度(600、800、1000 和 1200 kg/m<sup>3</sup>)泡沫混凝土的应力-应变简化曲线,对应的平台应力分别为 1.5、2.5、3.8 和 5.5 MPa, 密实应变分别为 0.29、0.25、0.21 和 0.17。

### 4.2 参数敏感性分析

基于上述爆炸荷载的简化曲线以及 4 种典型密度泡沫混凝土的应力-应变曲线,分析了爆炸荷载和泡沫混凝土密度对泡沫混凝土层最小厚度的影响。

#### 4.2.1 爆炸荷载升压时间

为了得到爆炸荷载升压时间  $t_0$  对最小厚度的影响,选取密度为 1200 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫混凝土为研究对象,其平台应力  $\sigma_y$  为 5.5 MPa,取荷载系数  $\alpha$  为 1.5,荷载作用时间为 1.2 ms,升压时间考虑了 0.05、0.1、0.2 和 0.3 ms 等 4 种典型工况,开展数值模拟得到不同升压时间  $t_0$  下的最小厚度,计算结果如图 20 所示。

从图 20 可看出,在保持荷载峰值及作用时间不变的情况下,针对本文中所关注的爆炸荷载,升压时间  $t_0$  对泡沫混凝土层最小厚度的影响可以忽略,所以后续分析时可选取固定的升压时间  $t_0$ 。其原因是,对于常见的钻地弹爆炸荷载,其升压时间较短,主要起作用的是荷载峰值以及作用时间。

#### 4.2.2 爆炸荷载特征系数

为了得到爆炸荷载特征系数  $\alpha$  和  $\beta$  对泡沫混凝土层最小厚度的影响,仍选取密度为 1200 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫混凝土为研究对象,并取升压时间  $t_0=0.1$  ms,在此基础上取 5 个荷载系数( $\alpha=1.5, 2, 3, 4, 5$ )和 5 个时间系数( $\beta=4, 6, 8, 10, 12$ )进行数值模拟(共 25 种工况),得到不同荷载下的泡沫混凝土层最小厚度,如图 21 所示。

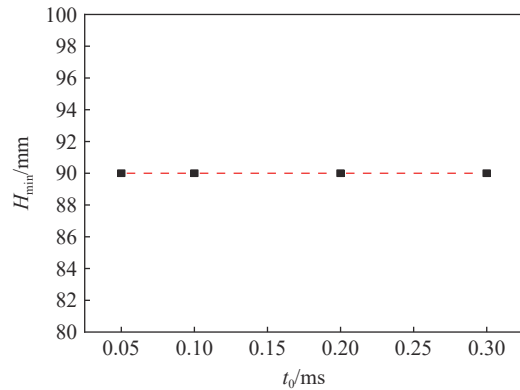


图 20 爆炸荷载升压时间对泡沫混凝土层最小厚度的影响

Fig. 20 Influence of rise time of blast load on the minimum thickness of a foam concrete layer

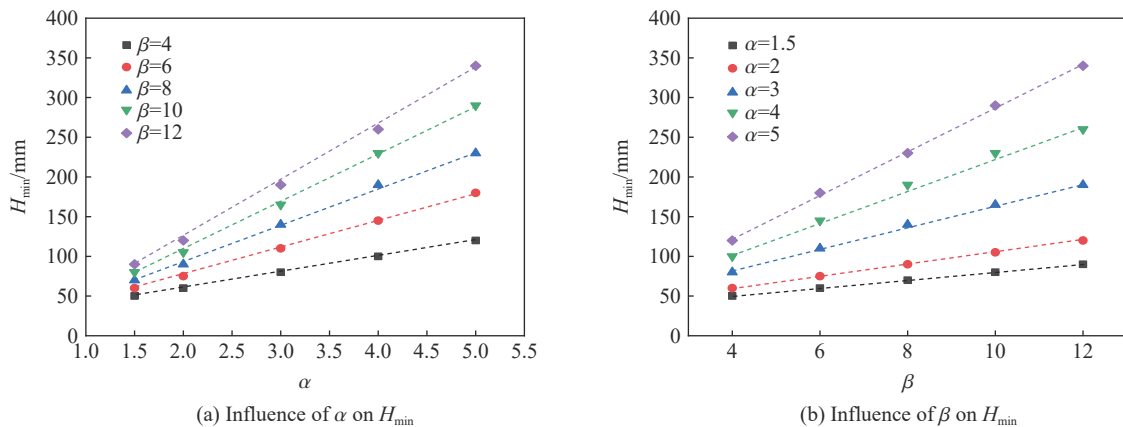


图 21 爆炸荷载特征系数对泡沫混凝土层最小厚度的影响

Fig. 21 Influences of blast load characteristic coefficients on the minimum thickness of a foam concrete layer

从图 21 可以看出,荷载系数  $\alpha$  和时间系数  $\beta$  越大,最小厚度  $H_{min}$  也越大;当时间系数  $\beta$  不变时,最小厚度  $H_{min}$  与荷载系数  $\alpha$  近似呈线性关系,其斜率随时间系数  $\beta$  的增大而增大;而当荷载系数  $\alpha$  不变时,最小厚度  $H_{min}$  与时间系数  $\beta$  也近似呈线性关系,其斜率随荷载系数  $\alpha$  的增大而增大。

基于上述结果,可拟合得到密度为 1200 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫混凝土的最小厚度  $H_{min}$ (mm) 与荷载系数  $\alpha$  和时间系数  $\beta$  的关系:

$$H_{\min} = 36 + \frac{2\,392}{(1 + 33/\alpha^{1.72})(1 + 64/\beta^{1.49})} \quad (6)$$

### 4.2.3 泡沫混凝土密度

为明确泡沫混凝土密度对最小厚度的影响, 选取 4 种典型密度泡沫混凝土为研究对象, 升压时间  $t_0$  取为 0.1 ms, 作用时间  $t_1$  取为 0.4 ms, 采用 3 个不同峰值 ( $p_0=8.2, 11.0, 13.7$  MPa, 分别对应密度为  $1\,200\text{ kg/m}^3$  的泡沫混凝土的 1.5、2 和 2.5 倍平台应力) 的爆炸荷载对 4 种密度泡沫混凝土的最小厚度进行模拟, 得到最小厚度和密度的关系如图 22 所示。从图 22 可以看出, 对于给定的爆炸荷载, 低密度泡沫混凝土的最小厚度大于高密度泡沫混凝土的最小厚度, 可拟合得到 3 种给定爆炸荷载下最小厚度  $H_{\min}$  (mm) 与密度  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) 的关系分别为:

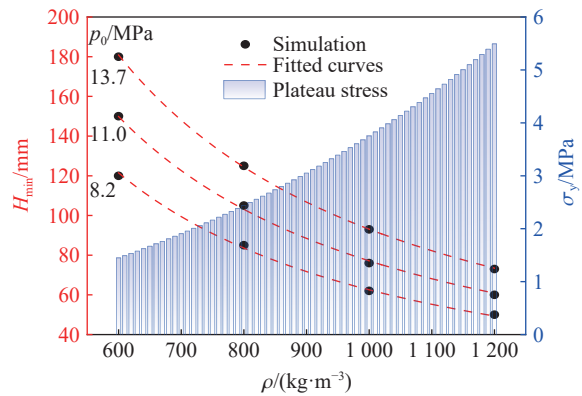


图 22 泡沫混凝土密度对最小厚度的影响  
Fig. 22 Influence of density of foam concrete on the minimum thickness

$$H_{\min} = \begin{cases} 496\,763\rho^{-1.3} & p_0 = 8.2\text{ MPa} \\ 612\,736\rho^{-1.3} & p_0 = 11.0\text{ MPa} \\ 739\,450\rho^{-1.3} & p_0 = 13.7\text{ MPa} \end{cases} \quad (7)$$

### 4.3 最小厚度的计算公式

由图 20 可知, 升压时间  $t_0$  对最小厚度的影响较小, 将  $t_0=0.1\text{ ms}$  和平台应力  $\sigma_y=5.5\text{ MPa}$  代入式 (6) 得到密度为  $1\,200\text{ kg/m}^3$  的泡沫混凝土在不同爆炸荷载下的最小厚度  $H_{\min}$  (mm) 为:

$$H_{\min} = 36 + \frac{2\,392}{(1 + 619/p_0^{1.72})(1 + 2/t_1^{1.49})} \quad (8)$$

式中:  $p_0 \geq 5.5\text{ MPa}$ ,  $t_1$  单位为 ms。

由最小厚度与密度的拟合公式 (7) 可知, 对于相同的爆炸荷载, 可以基于密度  $1\,200\text{ kg/m}^3$  泡沫混凝土的最小厚度求得其他密度泡沫混凝土的最小厚度, 所以将密度  $1\,200\text{ kg/m}^3$  泡沫混凝土的最小厚度 ( $H_{\min}$  (mm)) 计算式 (8) 推广至任意密度泡沫混凝土:

$$H_{\min} = \left[ 36 + \frac{2\,392}{(1 + 619/p_0^{1.72})(1 + 2/t_1^{1.49})} \right] \left( \frac{\rho}{1\,200} \right)^{-1.3} \quad (9)$$

式中:  $p_0 \geq 5.5\text{ MPa}$ ,  $t_1$  单位为 ms,  $\rho$  单位为  $\text{kg/m}^3$ 。

当泡沫混凝土用于成层式防护结构时, 其密度的选取需综合考虑最小厚度以及平台应力 (即作用于结构上的峰值荷载)。为了便于工程设计, 可结合式 (5) 和 (9) 快速得到任意爆炸荷载下不同密度泡沫混凝土的最小厚度。以爆炸荷载作用时间  $t_1=0.25\text{ ms}$  为例, 图 23 给出了不同爆炸荷载下不同密度泡沫混凝土的最小厚度。

通过图 23 可以看出, 爆炸荷载下成层式结构采用高密度泡沫混凝土层时, 可大幅度降低其厚度, 但由于平台应力较大, 作用于主体结构上的荷载峰值较高; 当采用低密度泡沫混凝土层时, 虽然作用于结构上荷载峰值较低, 但是其需

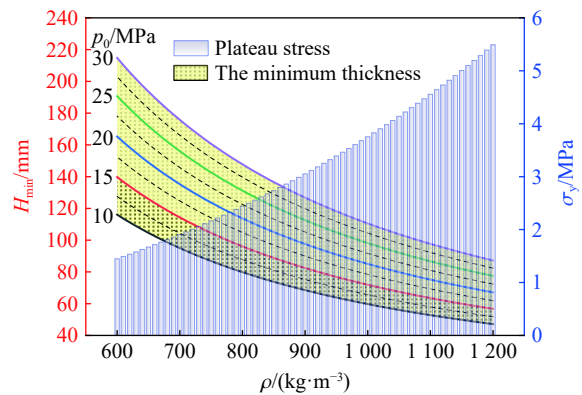


图 23  $t_1=0.25\text{ ms}$  时不同密度泡沫混凝土的最小厚度及平台应力  
Fig. 23 The minimum thickness and plateau stress of foamed concrete with different densities when  $t_1=0.25\text{ ms}$

要的最小厚度却较大。所以基于式 (5) 和 (9), 在已知荷载峰值和持续时间的情况下可优选泡沫混凝土密度并快速得到最小设计厚度。

## 5 结 论

为了得到成层式防护结构中泡沫混凝土分配层的设计厚度, 首先建立了一维爆炸波在泡沫混凝土杆中传播衰减的数值模型并经过了实验验证; 然后在此基础上, 分析了半无限长和有限长泡沫混凝土杆中爆炸波的传播衰减规律以及压缩变形情况, 阐明了荷载增强效应机理并提出泡沫混凝土分配层最小厚度的设计准则; 最后, 基于大量数值计算, 分析了爆炸荷载和泡沫混凝土密度对最小厚度的影响规律, 并给出了最小厚度的计算公式, 得到的具体结论如下。

(1) 足够长的泡沫混凝土杆可有效衰减爆炸荷载(针对幅值大于材料屈服强度的爆炸荷载), 此时三角形爆炸荷载经泡沫混凝土杆后衰减为幅值与其平台应力相当的梯形荷载; 但当其长度不足以将爆炸荷载衰减为弹性波时, 主体结构端(固定端)近区泡沫混凝土在反射波作用下被压密至应力-应变曲线的密实阶段, 出现荷载增强效应, 即经过泡沫混凝土层传递至主体结构的荷载超过施加的爆炸荷载。

(2) 根据不同部位泡沫混凝土的压实情况, 可将足够长的泡沫混凝土杆分为 5 个区, 分别为密实区 1、平台区 1、弹性区、平台区 2 和密实区 2; 但随着杆长度的减小, 弹性区的范围逐渐缩短。为了避免荷载增强效应产生且最大程度降低作用于主体结构上的荷载, 提出了爆炸荷载作用下泡沫混凝土分配层最小厚度的设计准则, 对应于泡沫混凝土中的平台区 1、弹性区和平台区 2 的范围为零。

(3) 参数敏感性分析表明, 泡沫混凝土最小厚度随爆炸荷载峰值的增大和作用时间的延长而增大, 对于所关注的爆炸荷载, 其升压时间对最小厚度的影响可以忽略; 同一爆炸荷载下, 低密度泡沫混凝土的最小厚度大于高密度泡沫混凝土的最小厚度。进一步, 基于大量数值模拟结果提出了爆炸荷载作用下泡沫混凝土分配层最小厚度的计算公式, 可直接用于工程设计。

(4) 需要指出的是, 忽略了泡沫混凝土材料的应变率效应, 应变率效应可能造成应力-应变曲线关系的升高, 从而导致最小厚度计算结果的改变; 也有可能导致最小厚度与荷载升压时间的关系变得敏感, 该内容值得进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 龙文武. 泡沫混凝土力学性能及其数值模拟 [D]. 湖南衡阳: 南华大学, 2016: 10-21.  
LONG W W. Mechanical properties of foamed concrete and its numerical simulation [D]. Hengyang, Hunan, China: University of South China, 2016: 10-21.
- [2] 谷亚新, 王延钊, 王小萌. 不同工艺泡沫混凝土的研究进展 [J]. *混凝土*, 2013(12): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2013.12.042.  
GU Y X, WANG Y Z, WANG X M. Research progress of foam concrete in different process [J]. *Concrete*, 2013(12): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2013.12.042.
- [3] 熊耀清, 姚谦峰. 轻质多孔混凝土受压应力-应变全曲线试验研究 [J]. *四川建筑科学研究*, 2010, 36(2): 228-232. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2010.02.059.  
XIONG Y Q, YAO Q F. Experimental study on the total stress-strain curve of porous lightweight concrete [J]. *Sichuan Building Science*, 2010, 36(2): 228-232. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2010.02.059.
- [4] 龚独明. 轻质高强泡沫混凝土的制备与性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013: 11-35.  
GONG D M. Study on preparation and performance of the light-weight and high-strength foamed concrete [D]. Changsha, Hunan, China: Changsha University of Science and Technology, 2013: 11-35.
- [5] 周明杰, 王娜娜, 赵晓艳, 等. 泡沫混凝土的研究和应用最新进展 [J]. *混凝土*, 2009(4): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.04.031.  
ZHOU M J, WANG N N, ZHAO X Y, et al. Latest development of research and application on foam concrete [J]. *Concrete*, 2009(4): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.04.031.

- [6] 扈士凯, 李应权, 徐洛屹, 等. 国外泡沫混凝土工程应用进展 [J]. *混凝土世界*, 2010(4): 48–50. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7011.2010.04.012.  
HU S K, LI Y Q, XU L Y, et al. Foam concrete engineering application development abroad [J]. *China Concrete*, 2010(4): 48–50. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7011.2010.04.012.
- [7] 周小华. 承重保温型复合墙体的设计与研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 8–25.  
ZHOU X H. Design and research on load-bearing and thermal insulation sandwich composite wall [D]. Guangzhou, Guangdong, China: South China University of Technology, 2011: 8–25.
- [8] 丁曼. 防水性泡沫混凝土研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011: 10–14.  
DING M. A study on the property of foam concrete with water repellents [D]. Changsha, Hunan, China: Hunan University, 2011: 10–14.
- [9] 吴江龙, 周新刚. 钢丝网泡沫混凝土轻质墙板 [J]. *新型建筑材料*, 1998, 25(5): 36–37.  
WU J L, ZHOU X G. Steel mesh foam concrete lightweight wallboard [J]. *New Building Material*, 1998, 25(5): 36–37.
- [10] 何书明. 泡沫混凝土本构关系的研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014: 5–10.  
HE S M. Study on the constitutive relationship of foam concrete [D]. Changchun, Jilin, China: Jilin Jianzhu University, 2014: 5–10.
- [11] 刘子全, 王波, 李兆海, 等. 泡沫混凝土的研究开发进展 [J]. *混凝土*, 2008(12): 24–26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.12.008.  
LIU Z Q, WANG B, LI Z H, et al. Research and development progress on foamed concrete [J]. *Concrete*, 2008(12): 24–26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.12.008.
- [12] 郭宁. 新型泡沫混凝土复合砌块的应用研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013: 6–8.  
GUO N. A research on the use of new form of mixed sandwich foam concrete block [D]. Changsha, Hunan, China: Changsha University of Science and Technology, 2013: 6–8.
- [13] ZHAO H L, YU H T, YUAN Y, et al. Blast mitigation effect of the foamed cement-base sacrificial cladding for tunnel structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94: 710–718. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.076.
- [14] WU C Q, SHEIKH H. A finite element modelling to investigate the mitigation of blast effects on reinforced concrete panel using foam cladding [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 55: 24–33. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.11.006.
- [15] 董永香, 黄晨光, 段祝平. 多层介质对应力波传播特性影响分析 [J]. *高压物理学报*, 2005, 19(1): 59–65. DOI: 10.11858/gywlxb.2005.01.011.  
DONG Y X, HUANG C G, DUAN Z P. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(1): 59–65. DOI: 10.11858/gywlxb.2005.01.011.
- [16] 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: 2–8.  
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: 2–8.
- [17] 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: 10.3969/j.issn.1672-002X.2013.02.007.
- [18] 李砚召, 王肖钧, 吴祥云, 等. 分配层分层结构对核爆炸荷载的防护效果试验研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(9): 931–935.  
LI Y Z, WANG X J, WU X Y, et al. Test study on layered structure's defense effect of distribution layer against nuclear explosive loadings [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(9): 931–935.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 唐德高, 王昆明, 贺虎成, 等. 泡沫混凝土回填层在坑道中的耗能作用 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 7(4): 365–370. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2006.04.013.  
TANG D G, WANG K M, HE H C, et al. Energy dissipation mechanism of foamed concrete backfill layers in underground tunnels [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2006, 7(4): 365–370. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2006.04.013.
- [24] SKEWS B W, ATKINS M D, SEITZ M W. The impact of a shock wave on porous compressible foams [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 253: 245–265. DOI: 10.1017/S0022112093001788.
- [25] HANSSEN A G, ENSTOCK L, LANGSETH M. Close-range blast loading of aluminium foam panels [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(6): 593–618. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00155-5.
- [26] 周宏元, 李永胜, 王小娟, 等. 地冲击作用下基于泡沫混凝土的地下结构柔性防护 [J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(6): 533–539. DOI: 10.11936/bjutxb2020010013.  
ZHOU H Y, LI Y S, WANG X J, et al. Flexible protection of underground structures with foam concrete subjected to ground shocks [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(6): 533–539. DOI: 10.11936/bjutxb2020010013.
- [27] NIAN W M, SUBRAMANIAM K V L, ANDREOPOULOS Y. Experimental investigation on blast response of cellular concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 105–115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.021.
- [28] LI Q M, MENG H. Attenuation or enhancement—a one-dimensional analysis on shock transmission in the solid phase of a cellular material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(10): 1049–1065. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00016-7.
- [29] HALLQUIST J. LS-DYNA keyword user's manual, version: 970 [M]. Livermore, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [30] LEE M Y, BRONOWSKI D R, HARDY R D. Laboratory constitutive characterization of cellular concrete: SAND2004-1030 [R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 2004. DOI: 10.2172/918757.
- [31] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997: 110–122. DOI: 10.1017/CBO9781139878326.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泡沫混凝土: JG/T 266–2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 2–11.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Foamed concrete: JG/T 266–2011 [S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011: 2–11.

(责任编辑 张凌云)