



爆炸载荷下泡沫混凝土动态响应及吸能特性研究

高一轩^{1,2}, 祖旭东^{1*}, 黄正祥¹, 黄灿灿³

(1.南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;2.中国兵器工业集团 航空弹药研究院有限公司,黑龙江 哈尔滨 150036;
3.九江国科远大机电有限公司,江西 九江 332100)

摘要:为了研究爆炸载荷冲击下厚度对于泡沫混凝土动态响应及吸能特性的影响,以不同厚度的泡沫混凝土为研究对象,利用有限元软件,开展了 $0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距下,平面尺寸 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、 $0 \sim 30 \text{ mm}$ 泡沫混凝土厚度条件下的抗爆数值计算。随后,开展了其中 0 mm 、 10 mm 、 20 mm 和 30 mm 4 种厚度条件下的泡沫混凝土抗爆试验,验证了数值计算的准确性。通过数值计算,研究了泡沫混凝土在爆炸载荷冲击下的破坏形式及耗能机理,量化分析了泡沫混凝土吸收爆炸波能量的能力,得到了泡沫混凝土的吸能特性及背部铝合金板的变形响应随泡沫混凝土厚度变化的影响规律,推导了相应的工程计算模型。结果表明:随着厚度的增加,泡沫混凝土的破碎区尺寸逐渐减小,当厚度为 30 mm 时,泡沫混凝土的破碎区仅占总体积的 2.9% ;泡沫混凝土可以有效地吸收并耗散爆炸波的能量,其吸能能力随着厚度的增加而增加,厚度为 $5 \sim 30 \text{ mm}$ 的泡沫混凝土分别可以吸收 $42.8\% \sim 91.9\%$ 的爆炸波能量;随着厚度的增大,背部铝合金板的位移响应逐渐减小,当厚度为 30 mm 时,铝合金背板中心的位移响应下降至 23.2 mm ,仅为不覆盖泡沫混凝土时的 12.6% 。

关键词:爆炸载荷;泡沫混凝土;抗爆试验;动态响应;吸能特性;工程计算模型

中图分类号: O383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2025)01-0085-08

Dynamic Response and Energy Absorption Characteristics of Foam Concrete Under Blast Loads

GAO Yixuan^{1,2}, ZU Xudong^{1*}, HUANG Zhengxiang¹, HUANG Cancan³

(1.School of Mechanical Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China;
2.China Ordnance Industry Group Aviation Ammunition Research Institute Co.,Ltd,Harbin 150036,China;
3.Jiujiang Guoke Yuanda Electromechanical Co.,Ltd,Jiujiang 332100,China)

Abstract: To study the influence of thickness on dynamic response and energy-absorption characteristics of foamed concrete (FC) under explosion-load impact, the numerical calculation of anti-explosion of FC under $0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ ratio-detonation-distance and $0 \sim 30 \text{ mm}$ thickness was carried out by using finite element software. Subsequently, the anti-explosion tests of FC with thickness of 0 mm , 10 mm , 20 mm and 30 mm , were carried out to verify the accuracy of the numerical calculation. Through numerical calculation, the damage form and energy-dissipation mechanism of FC under the impact of explosion-load were studied, and the ability of FC to absorb explosion-wave energy was quantitatively analyzed, and the law of the energy absorption characteristics of FC and the deformation response of aluminum alloy plate on the back influenced by the change of thickness of FC was obtained, and the corresponding engineering-calculation-model was derived. The results show that, the size of the FC crushing zone gradually shrinks with the increase of thickness. The FC crushing-zone only accounts for 2.9% of the overall volume when the thickness is 30 mm . FC can effectively absorb and dissipate the energy of explosion wave, and its energy-absorption capacity increases with the increase of thickness. The foam concrete with thickness of $5 \sim 30 \text{ mm}$ can absorb $42.8\% \sim 91.9\%$ of explosion wave energy respectively. The displacement response of

aluminum alloy backplane steadily shrinks as FC thickness increases. While the thickness of FC is 30 mm, the displacement response of the center of the aluminum alloy backplane drops to 3.2 mm, which is only 12.6% of that without FC.

Key words: explosion load; foam concrete; anti-explosion test; dynamic response; energy-absorption characteristic; engineering calculation model

泡沫混凝土(foam concrete, FC)又称发泡水泥,含有大量细小的封闭气孔,并具有一定的强度,是一种轻质、保温、隔热耐火、隔音和抗冻的混凝土材料。已有许多建筑或设施采用泡沫混凝土,其显著降低了建筑物的整体自重,增加了建筑的保温隔热、隔音、耐火性能,提高了经济效益。此外,由于泡沫混凝土多孔性,其对爆炸波具有良好的吸收作用,因此已在吸能防爆领域被广泛应用。

近年来,专家学者对泡沫混凝土做了大量的研究。SU等^[1]通过一系列单轴和三轴试验,分析了泡沫混凝土的力学性能,提出了一种考虑密度的屈服准则。KIM等^[2]通过微观CT图像,获得了泡沫混凝土的微观结构,并与从实验和模拟中获得的力学性能相关联,评估了微结构的力学响应,并确定模拟所需的输入材料参数。ZHANG^[3]通过试验研究,得到了聚合物泡沫混凝土的力学、隔热、热阻和吸声性能。文献[4]采用扩展有限元法,建立了LAFC三点弯曲(3-p-b)断裂性能仿真模型,得到了轻骨料泡沫混凝土的裂纹扩展模式和加载力变化规律。MYDIN等^[5]通过压缩试验,研究了钢板-泡沫混凝土-钢板夹层结构(LFC)在轴压下的结构性能,结果表明LFC可以有效抑制钢板的向内屈曲。GUO等^[6]进行了泡沫混凝土的冲击试验,并基于试验建立SPH模型,模拟了冲击试验过程,研究了泡沫混凝土在低速冲击下的动力响应,得到了冲击损伤机理。SHEN等^[7]通过SHPB试验,对材料为泡沫混凝土、黄土或砂土的夹层结构进行了冲击试验,得到了不同材料的应力峰值衰减、能量衰减和波形色散特性。MONIR等^[8]概述了混凝土构件在爆炸荷载作用下的性能。对传统和现代混凝土材料的防爆性能进行了讨论,并概述了有效的改造和加强技术。HANSEN等^[9]通过爆炸试验与弹道摆装置,研究泡沫铝板在爆炸载荷作用下的性能,提出了一种基于冲击波理论的一维泡沫杆在线性衰减爆炸载荷作用下的变形行为解析解。NIAN等^[10]通过激波管试验,研究了泡沫混凝土在爆炸载荷作用下的应力响应,发现泡沫混凝土存在临界厚度现象。TIAN

等^[11]通过爆破试验,得到了泡沫混凝土能有效地衰减爆破荷载,减小结构变形的结论。SHANG等^[12]通过爆破试验、数值模拟和冲击波理论,研究了泡沫混凝土涂层厚度对钢筋混凝土墙体抗爆性能的影响,结果表明泡沫混凝土涂层可以有效提高RC墙的抗爆性能,但过薄的涂层厚度会降低RC墙的抗爆性能。CHEN^[13]通过试验发现,在约束条件下泡沫混凝土的耗能效果更好。YANG^[14]提出了泡沫混凝土牺牲层临界厚度的概念,通过差分模型开展数值分析,得到了临界厚度的经验计算公式。

综合上述研究成果可知,前人多集中关注泡沫混凝土对其他结构的吸能防护效果,而忽略了泡沫混凝土自身的动态响应带来的影响。此外,由于泡沫混凝土内部结构复杂且随机,无论在理论分析或试验测试方面,关于其吸能能力的量化表征研究仍留有空白。因此,本文以不同厚度的泡沫混凝土为研究对象,开展了在0.8 m/kg^{1/3}比例爆距下,多种泡沫混凝土厚度条件下的静爆数值计算。随后,开展其中4种厚度条件下的静爆试验,以验证数值计算的有效性。在此基础上,基于数值计算的结果,分析了爆炸载荷冲击下泡沫混凝土的破坏、耗能机理,量化了泡沫混凝土吸收爆炸波能量的能力,研究了泡沫混凝土厚度变化对其毁伤破坏特征和吸能特性的影响规律,并提出了泡沫混凝土的吸能特性及铝合金背板的变形响应随泡沫混凝土厚度变化的工程计算模型。

1 泡沫混凝土抗爆数值计算

1.1 数值计算条件分析

当泡沫混凝土受到底部建筑约束时,其运动可以用Winkler弹性基础板运动方程描述^[15]:

$$D\nabla^4 w(x, y, t) + \rho T \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = p(x, y, t) - kw(x, y, t) \quad (1)$$

式中: ρ 为泡沫混凝土密度; T 为厚度;泡沫混凝土抗弯强度 $D = \frac{ET^3}{12(1-\nu^2)}$, E 为弹性模量, ν 为泊松比; $p(x, y, t)$ 为加载于泡沫混凝土各位置处的爆炸载

荷; w 为泡沫混凝土板变形挠度; k 为底部材料的弹性系数^[16]。

根据修正的 Friedlander 公式^[16], 板表面任意点上的爆炸载荷可表示为

$$p(x,y,t)=\frac{3\gamma-1}{\gamma-1}p_{\text{pos}}\frac{H}{R}\left(1-\frac{t}{t_{\text{pos}}}\right)\exp\left(-\beta\frac{t}{t_{\text{pos}}}\right) \quad (2)$$

式中: γ 为空气的绝热系数, 取为 1.4; $R(x,y)=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+H^2}$, (x_0,y_0) 为爆炸中心在泡沫混凝土板上的投影, H 为炸高; p_{pos} , t_{pos} 和 β 为爆炸波的超压、持续时间和衰减参数, 可通过 Kinney-Graham 公式确定^[17]。

边长为 a 、厚度为 T 的泡沫混凝土在四边固支下的边界条件可表示为

$$\begin{cases} w(0,y,T)=w(a,y,T)=w(x,0,T)=w(x,a,T)=0 \\ \frac{\partial w}{\partial x}(0,y,T)=\frac{\partial w}{\partial x}(a,y,T)=\frac{\partial w}{\partial y}(x,0,T)=\frac{\partial w}{\partial y}(x,a,T)=0 \end{cases} \quad (3)$$

由上述分析可知, 当炸药当量、泡沫混凝土材料、炸高及约束条件确定时, 泡沫混凝土板的变形挠度仅与板厚有关, 因此, 在数值计算中设计泡沫混凝土的厚度为变量, 设定其范围为 0~30 mm。

1.2 有限元模型及材料参数

有限元模型如图 1 所示。采用 TNT 装药, 尺寸为 $\Phi 40\text{ mm}\times 26\text{ mm}$, 装药质量为 50 g, 炸高 300 mm。在实际应用中, 泡沫混凝土会在底部建筑的约束下发生毁伤破坏, 因此, 为模拟其实际的毁伤破坏过程, 根据应力波理论, 选择与混凝土波阻抗相差较小(阻抗比约为 1.69)的 2A12 铝合金作为底部约束材料, 其尺寸为 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 3 mm。泡沫混凝土的平面尺寸为 300 mm $\times$ 300 mm, 厚度分别设置为 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 及 30 mm 7 种。靶板通过上下两块空心钢板夹具固定, 并在空心钢板上下表面设置位移约束, 以实现对标板的四边固支。空气域尺寸为 400 mm $\times$ 400 mm $\times$ 500 mm。通过开展网格尺寸 0~10 mm 的网格收敛性分析, 选择空气域及泡沫混凝土网格尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5 mm, 2A12 铝合金板网格尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 3 mm。为了减小求解规模, 采用 1/4 模型建模, 分别在对称面设置 x 轴、 y 轴方向的对称约束, 并在非对称面设置非反射边界。

空气采用理想气体状态模型, 炸药使用 JWL 状

态方程来表示。铝合金板采用 Johnson_Cook 模型, 密度为 2.77 g/cm³, 弹性模量为 35.2 GPa。泡沫混凝土采用 Crushable_Foam 模型, 密度为 0.82 g/cm³, 其力学性能参数通过单轴压缩试验获得, 弹性模量为 0.88 GPa, 抗压强度为 4.4 MPa, 应力-应变曲线参数如表 1 所示。在计算中, 采用多物质流固耦合方法, 空气与炸药采用 Euler 描述法, 泡沫混凝土及铝合金板采用 Lagrange 描述法。添加 * Mat_Add_Erosion 选项, 模拟泡沫混凝土结构的毁伤破坏, 其中受压和受拉的最大主应变失效参数分别取 0.045 和 0.015^[17]。

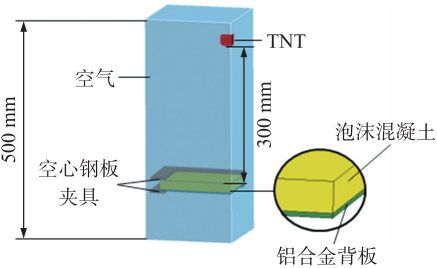


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

表 1 泡沫混凝土应力-应变曲线参数

Table 1 Parameters of stress-strain curve of foam concrete

应变	应力/MPa	应变	应力/MPa
0.006	5.28	0.6	4.99
0.009	3.44	0.68	9.99
0.53	3.44	-	-

1.3 泡沫混凝土的动态响应结果

在爆炸载荷冲击下, 20 mm 厚度泡沫混凝土的动态响应过程如图 2 所示。

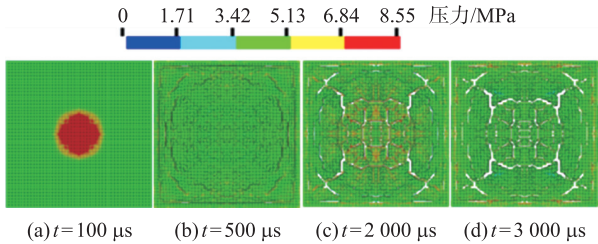


图 2 厚度 20 mm 泡沫混凝土的动态响应过程

Fig. 2 Dynamic response process of 20 mm foam concrete

当 $t=100\text{ }\mu\text{s}$ 时, 爆炸冲击波加载于泡沫混凝土表面, 应力峰值达到 8.4 MPa, 结构中心开始被压碎。随后, 冲击波在泡沫混凝土中传播, 当 $t=500\text{ }\mu\text{s}$ 时, 结构中心凹陷, 破坏程度加剧, 沿空心钢板内边处产生剪切, 四周产生环向裂纹。当 $t=2\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$ 时, 中心裂纹延展相连, 形成破碎区, 并伴有径向裂纹及环向裂纹产生。当 $t=3\text{ }000\text{ }\mu\text{s}$ 时, 泡沫混凝土的裂纹不再扩展延伸。

爆炸载荷冲击下多种厚度泡沫混凝土的响应结果如图3所示。

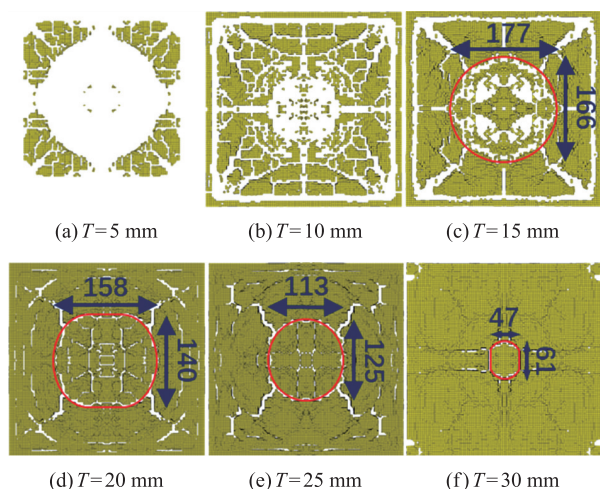


图3 不同厚度泡沫混凝土的响应结果

Fig. 3 Response results of foam concrete with different thicknesses

当泡沫混凝土厚度小于10 mm时,整体强度较低,在爆炸载荷的冲击下,泡沫混凝土产生了整体破碎,形成碎屑、碎块,并随着铝合金板的振动向外飞散。随着厚度的增加,泡沫混凝土由整体破碎转变为区域破碎,且中心破碎区的尺寸逐渐减小。当泡沫混凝土厚度为15 mm时,破碎区尺寸为177 mm×166 mm×15 mm,占总体积的32.6%。在破碎区中,泡沫混凝土呈碎屑状向外飞溅。在破碎区周围,存在向四边延伸的径向裂纹和围绕破碎区的环向裂纹。当泡沫混凝土厚度为20 mm时,破碎区尺寸为158 mm×140 mm×20 mm,占总体积的24.5%,破碎区中的泡沫混凝土由碎屑状变为碎块状,四周的径向及环向裂纹数量减少,裂纹宽度降低。当泡沫混凝土厚度达到25 mm时,破碎区尺寸为113 mm×125 mm×25 mm,占总体积的15.7%,破碎区中的碎块尺寸变大,裂纹的数量进一步减少。随着厚度的进一步增加,当泡沫混凝土厚度达到30 mm时,破碎区尺寸开始显著下降,仅为47 mm×61 mm×30 mm,占总体积的2.9%。

1.4 铝合金背板的变形响应结果

泡沫混凝土厚度的变化影响着铝合金背板的变形响应情况。图4展示了在爆炸载荷冲击下,不同厚度泡沫混凝土覆盖时铝合金背板的变形响应结果。当未覆盖泡沫混凝土时,铝合金板的中心位移量为25.4 mm。当覆盖泡沫混凝土后,铝合金背板的中心位移量逐渐减小,覆盖5~30 mm泡沫混凝土

时铝合金背板的中心位移量分别为20.6 mm、16.6 mm、14.4 mm、7.0 mm、5.8 mm、3.3 mm,相比无泡沫混凝土覆盖时分别下降了18.9%、34.6%、43.3%、72.4%、77.2%、87.4%。

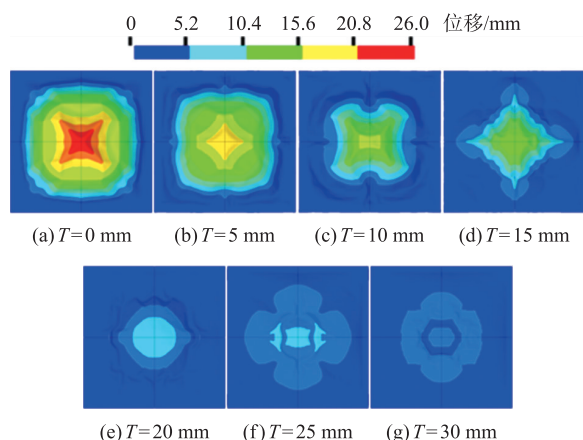


图4 不同厚度泡沫混凝土覆盖时铝合金背板的变形响应

Fig. 4 Deformation response of aluminum alloy sheet covered with foam concrete of different thicknesses

2 泡沫混凝土抗爆试验

2.1 试验布置及方案设计

为了验证数值计算的准确性,开展了其中4种厚度条件下的静爆试验。静爆试验采用TNT药柱,质量50 g,尺寸 $\Phi 40$ mm×26 mm,炸高300 mm。铝合金背板的尺寸为300 mm×300 mm×3 mm,泡沫混凝土的平面尺寸为300 mm×300 mm。靶板被夹在两空心钢板夹具中,通过螺栓上下链接,实现对靶板的四边固支。试验布置如图5所示。4次试验中,前3次泡沫混凝土厚度分别设置为10 mm、20 mm、30 mm,最后一次试验中不覆盖泡沫混凝土。

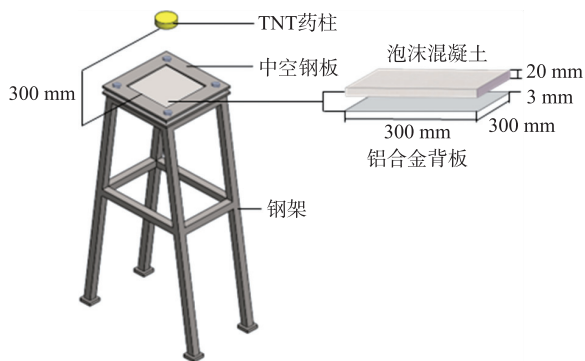


图5 试验布置示意图

Fig. 5 Test layout diagram

2.2 泡沫混凝土的动态响应结果

试验1、试验2、试验3中泡沫混凝土的响应结果如图6所示。

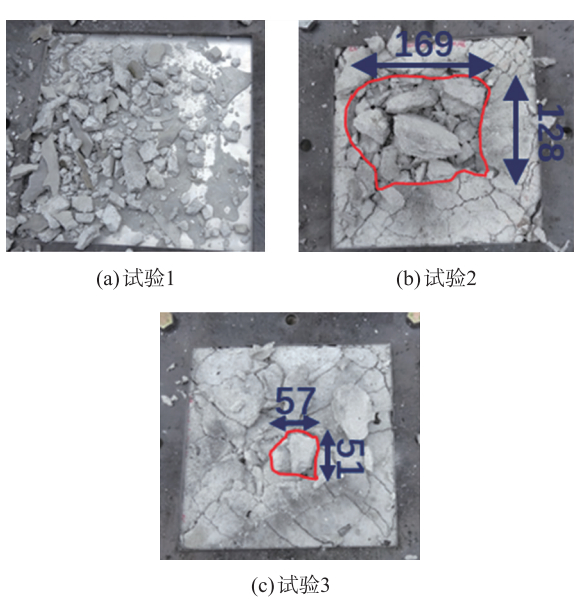


图 6 泡沫混凝土响应结果

Fig. 6 Response results of foam concrete

由于泡沫混凝土材料脆性大、强度低,其主要的响应模式为破碎。当厚度为 10 mm 时,泡沫混凝土在爆炸载荷的冲击下全部破碎,产生大量的碎屑、碎块,并向周围飞散,仅有少部分留在板上。当厚度增加到 20 mm 后,泡沫混凝土的强度增大,由整体破碎转变为区域破碎,在中心区域可以观察到破碎区,尺寸为 169 mm×128 mm×20 mm。在破碎区周围,存在着向四边延伸的径向裂纹和围绕破碎区的环向裂纹。相比于试验 1,试验 2 破碎区中的泡沫混凝土碎屑减少,碎块尺寸增大。当泡沫混凝土厚度增加到 30mm 时,其中心已不存在明显的破碎区,破碎区尺寸仅为 57 mm×51 mm×30 mm,碎块数量减少,主要以延伸相连的裂纹为主,存在与试验 2 中相似的径向裂纹及环向裂纹。

2.3 铝合金背板的变形响应结果

试验 2、试验 4 中铝合金背板的变形响应结果如图 7 所示。2A12 铝合金材料延展性较好,在爆炸载荷的冲击下,其主要的响应模式为弯曲变形。在试验 4 中未覆盖泡沫混凝土时,铝合金背板的中心位移约为 24 mm,当在试验 2 中覆盖了 20 mm 厚的泡沫混凝土后,铝合金背板的中心位移下降至 8 mm 左右。

3 数值计算准确性验证

通过将数值计算结果与试验结果开展对比,验证数值计算结果的准确性。图 8 对比了静爆试验与数值计算中泡沫混凝土的响应结果。

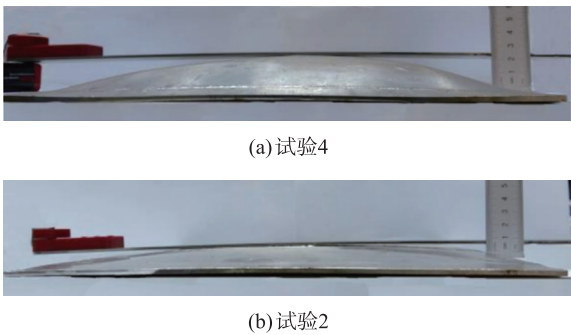


图 7 铝合金背板响应结果

Fig. 7 Response of aluminum alloy plate

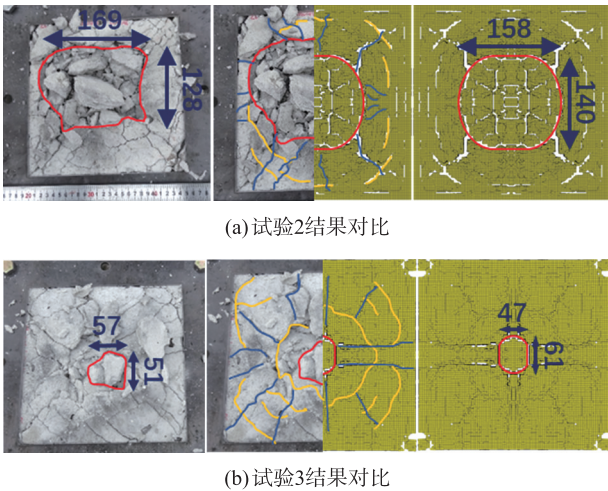


图 8 泡沫混凝土响应结果对比

Fig. 8 Comparison of numerical calculation and experiment

当泡沫混凝土厚度为 10 mm 时,数值计算结果与试验结果中的泡沫混凝土均全部破碎,二者中都能观察到碎屑、碎块的产生,但试验中由于碎屑、碎块的飞溅,无法观察到裂纹的延伸相连。当泡沫混凝土厚度为 20 mm 时,沿空心钢板内边处发生剪切,中心产生破碎区。数值计算中的破碎区尺寸为 169 mm×128 mm×20 mm,试验结果中的破碎区尺寸为 158 mm×140 mm×20 mm,相对误差为 2.2%。当泡沫混凝土厚度为 30 mm 时,数值计算中的破碎区尺寸为 47 mm×61 mm×30 mm,试验结果中的破碎区尺寸为 57 mm×51 mm×30 mm,相对误差为 1.3%。在试验 2、试验 3 中,破碎区周围均存在径向裂纹及环向裂纹,这在数值计算中也有所体现。

图 9 对比了静爆试验与数值计算中铝合金背板的变形响应结果。当试验 4 中未覆盖泡沫混凝土时,数值计算中铝合金背板的中心位移量为 25.4 mm,试验结果为 24 mm,相对误差为 5.8%。当试验 2 中覆盖了 20 mm 泡沫混凝土后,数值计算中

铝合金背板的中心位移量为 7 mm, 试验结果为 8 mm, 相对误差为 12.5%。

数值计算与试验结果对比如表 2 所示。试验结果与数值计算结果尚有差异, 数值计算中, 泡沫混凝土裂纹的位置分布、数量特征, 以及碎块尺寸的模拟结果与实际情况存在些许偏差。这是由于泡沫混凝土通过特殊的制备方式, 形成内部多孔结构, 内部材质不均匀且随机, 因此裂纹的延伸会具有一定的随机性。除此之外, 考虑到求解规模, 数值计算对于泡沫混凝土的飞溅、崩落的模拟不够完全, 仅体现了飞溅过程中的最初一段时间。

表 2 数值模拟与试验结果对比
Table 2 Size of foam concrete damage zone

FC 厚度 /mm	破碎区尺寸		尺寸相对 误差/%	铝合金背板中心位移/mm		位移相对 误差/%
	数值计算	试验		数值计算	试验	
10	300 mm×300 mm×10 mm	300 mm×300 mm×10 mm	0	—	—	—
20	158 mm×140 mm×20 mm	169 mm×128 mm×20 mm	2.2	7.0	8.0	12.5
30	47 mm×61 mm×30 mm	57 mm×51 mm×30 mm	1.3	—	—	—
0	—	—	—	25.4	24.0	5.8

4 数值计算结果分析

泡沫混凝土在受到爆炸载荷冲击时, 通过破碎行为吸收并耗散冲击波能量, 破碎导致泡沫混凝土结构出现裂纹, 裂纹延伸相连, 形成破碎区。当炸药起爆后, 爆轰波从药柱底部向靶板表面中心传播, 当爆轰波阵面与靶板接触时, 立即在接触面上产生一个反射冲击波, 进入爆轰产物, 同时有一个强冲击压缩波透射进靶板内部, 并以弹塑性应力波的形式传播。当冲击波的强度大于泡沫混凝土结构的抗压强度时, 结构中心区域被压碎。泡沫混凝土结构吸收爆炸冲击波的能量, 并通过变形、破碎等行为将其耗散, 使最初的强冲击压缩波衰减为应力波。之后, 应力波继续在结构中沿径向传播, 在波后, 沿传播方向存在压应力, 继续压碎泡沫混凝土结构, 形成径向裂纹。传播方向切向存在拉应力, 由于泡沫混凝土为脆性材料, 其韧性低、塑性低, 抗拉强度远远低于抗压强度, 结构被拉碎, 形成环向裂纹。然后, 随之而来的爆轰产物促进了裂纹的形成与延伸。最后, 当应力波及爆轰产物衰减到一定程度, 泡沫混凝土结构的破碎行为停止。

图 10 反映了泡沫混凝土破碎区尺寸随厚度的变化。泡沫混凝土厚度的变化显著影响着其破碎区的尺寸, 随着厚度的增加, 破碎区尺寸先增大, 后减小。当泡沫混凝土厚度较小(小于 10 mm)时, 其整

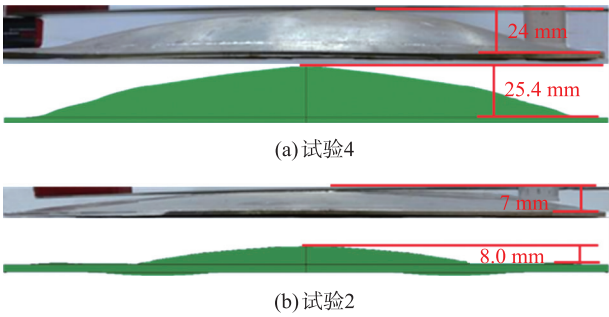


图 9 铝合金背板变形响应结果对比
Fig. 9 Comparison of deformation response results of aluminum alloy plate

体强度较低, 在爆炸载荷的冲击下, 泡沫混凝土整体全部破碎, 破碎区体积随其自身体积的增大而增大, 并在厚度达到 10 mm 时, 破碎区体积达到最大。随着泡沫混凝土厚度的继续增加, 破碎区尺寸开始逐渐减小。当泡沫混凝土的厚度由 15 mm 增加至 30 mm 时, 其由整体破碎转变为区域破碎, 破碎区尺寸由 177 mm×166 mm×15 mm, 逐渐降低至 61 mm×47 mm×30 mm, 仅占总体积的 2.9%。

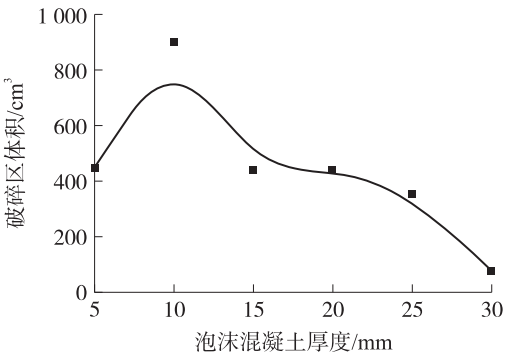


图 10 破碎区尺寸随泡沫混凝土厚度的变化
Fig. 10 The variation of crushing size with the thickness of foamed concrete

泡沫混凝土的吸能特性如图 11 所示。图 11(a) 为不同厚度泡沫混凝土覆盖时铝合金背板的能量-时程曲线。

爆炸能量的消耗, 除了用于产生空气冲击波, 主要是应力波对泡沫混凝土的破碎作用及对爆轰产物

的抛掷作用。当冲击波传播到泡沫混凝土板后,其能量依次被泡沫混凝土及背部铝合金板吸收。在冲击波的作用下,泡沫混凝土结构受到强烈压缩,冲击波的部分能量转变为泡沫混凝土的弹性变形能,随后,泡沫混凝土中积蓄的弹性变形能通过孔壁的坍塌、破碎、变形等行为被耗散,冲击波被衰减为应力波。之后,应力波继续在泡沫混凝土结构中传播,泡沫混凝土继续产生变形、破碎,耗散应力波的能量。在入射爆炸波能量不变的前提下,随着泡沫混凝土厚度的增加,铝合金背板的能量峰值逐渐降低,当泡沫混凝土厚度为 30mm 时,铝合金背板的能量峰值仅为不覆盖泡沫混凝土时的 8.1%,这表明泡沫混凝土能够有效吸收并耗散爆炸冲击波的能量,且其吸能能力随厚度的增加而增加。图 11(b)为泡沫混凝土吸收能随厚度的变化情况。5~30 mm 厚的泡沫混凝土分别吸收了 42.8%, 58.6%, 70.5%, 81.0%, 87.4%, 91.9% 的爆炸波能量。通过拟合可以得到,在 $0.8\text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距下,平面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的泡沫混凝土吸收能与其厚度间的关系为

$$E=-0.94T^2+51.08T+44.87\tag{4}$$

式中: E 为泡沫混凝土吸收能; T 为泡沫混凝土厚度。泡沫混凝土吸收能与其厚度间的相关系数为 0.979 7。

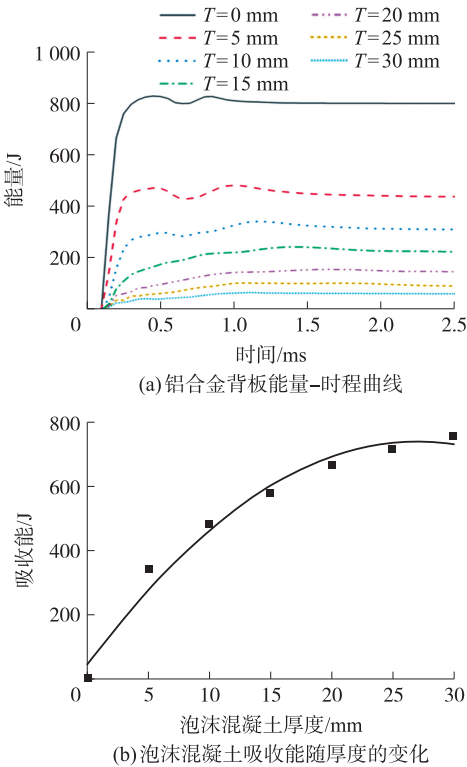


图 11 泡沫混凝土的吸能特性

Fig. 11 Energy absorption characteristics of foam concrete

图 12 为铝合金背板的变形响应图。不同厚度泡沫混凝土覆盖时铝合金背板的中心位移-时程曲线如图 12(a) 所示。

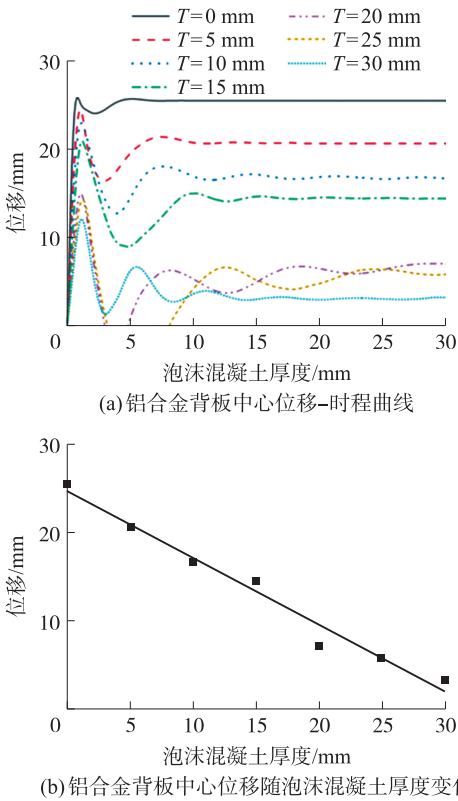


图 12 铝合金背板的变形响应

Fig. 12 Deformation response of aluminum alloy plane

铝合金背板的主要响应模式为弯曲变形,其变形量与输入爆炸波的强弱相关。在变形的初始阶段,铝合金板在受到爆炸载荷加载后,板中心受迫振动产生位移,随后由于惯性,铝合金板位移继续增大。当变形量增加到一定程度后,靠近四边固支处的铝合金板由于形变较小,存在一定的弹性变形,铝合金板开始回弹,并随后逐渐趋于稳定。图 12(b)为铝合金背板中心位移随泡沫混凝土厚度的变化情况。随着泡沫混凝土厚度的增加,被耗散的爆炸冲击波能量增多,输入铝合金板的应力波减弱,铝合金背板的中心位移随之减小。当覆盖 30 mm 泡沫混凝土后,中心位移量由不覆盖时的 25.4 mm,下降至 3.3 mm,仅占比 13.0%。通过拟合可以得到,在 $0.8\text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距下,覆盖泡沫混凝土平面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 时,铝合金背板的中心位移量与泡沫混凝土厚度的关系为 $s=-0.075T+2.463$ 。铝合金背板中心位移量与泡沫混凝土厚度的相关系数为 0.976。

5 结束语

本文基于数值计算,分析了爆炸载荷冲击下泡沫混凝土的破坏、耗能机理,量化了泡沫混凝土吸收爆炸波能量的能力,研究了泡沫混凝土厚度变化对其毁伤破坏特征和吸能特性的影响规律,并提出了泡沫混凝土的吸能特性及铝合金背板的变形响应随泡沫混凝土厚度变化的工程计算模型。得到了以下结论:

①泡沫混凝土厚度影响破碎区的尺寸。当泡沫混凝土厚度小于 10 mm 时,结构强度较低,泡沫混凝土整体全部破碎,无法观察到结构裂纹的延展相连及破碎区的形成。当泡沫混凝土厚度增加至 15~30 mm 时,泡沫混凝土由整体破碎转变为区域破碎,破碎区尺寸随厚度的增加而减小。15~30 mm 厚的泡沫混凝土的破碎区分别占总体积的 32.6%, 24.5%, 15.7% 和 2.9%。

②泡沫混凝土能够有效吸收并耗散爆炸冲击波的能量,且其吸能能力随厚度的增加而增加。5~30 mm 厚的泡沫混凝土分别可以吸收 42.8%, 58.6%, 70.5%, 81.0%, 87.4%, 91.9% 的爆炸波能量,在 $0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距下,平面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的泡沫混凝土吸收爆炸波的能量与其厚度间的关系为 $E = -0.94T^2 + 51.08T + 44.87$ 。

③在爆炸载荷冲击下,铝合金板的主要响应模式为弯曲变形,其变形量与输入爆炸波的强弱相关。随着泡沫混凝土厚度的增加,铝合金背板的中心位移随之减小。5~30 mm 厚的泡沫混凝土可以分别使铝合金背板中心位移下降 18.9%, 34.6%, 43.3%, 72.4%, 77.2% 和 87.0%,在 $0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距下,覆盖泡沫混凝土平面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 时,铝合金背板的中心位移量与泡沫混凝土厚度间的关系为 $s = -0.075T + 2.463$ 。

参考文献

- [1] SU B, ZHOU Z. Experimental investigation on the mechanical behavior of foamed concrete under uniaxial and triaxial loading[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 41–51.
- [2] KIM J S, CHUNG S Y. Correlation between microstructural characteristics from micro-CT of foamed concrete and mechanical behaviors evaluated by experiments and simulations[J]. Cement & concrete composites, 2020, 112: 103657.
- [3] ZHANG Z. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymers foam concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 97–105.
- [4] LU Y. Simulation and experimental study on fracture properties of lightweight aggregate foam concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 371: 022093–022093.
- [5] MYDIN O A M, WANG Y. Structural performance of lightweight steel-foamed concrete-steel composite walling system under compression[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 49(1): 66–76.
- [6] GUO Q. Dynamic response of foam concrete under low-velocity impact: experiments and numerical simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103693.
- [7] SHEN J, REN X. Experimental investigation on transmission of stress waves in sandwich samples made of foam concrete[J]. Defence Technology, 2013, 9(2): 110–114.
- [8] ALHADID A M M, SOLIMAN M A, NEHDI L M, et al. Critical overview of blast resistance of different concrete types[J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(2): 72–81.
- [9] HANSSEN A, ENSTOCK L, LANGSETH M. Close-range blast loading of aluminium foam panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(6): 593–618.
- [10] NIAN W, SUBRAMANIAM V K. Experimental investigation on blast response of cellular concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 96: 105–115.
- [11] TIAN X, LI Q, LU Z, et al. Experimental study of blast mitigation by foamed concrete[J]. International Journal of Protective Structures, 2016, 7(2): 179–192.
- [12] SHANG W, HUANG Z, ZU X, et al. Influence mechanism of foamed concrete coating thickness on the blast resistance of RC walls[J]. Materials, 2022, 15(16): 5473–5473.
- [13] CHEN Y. Polyurea coating for foamed concrete panel: An efficient way to resist explosion[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 136–149.
- [14] YANG Y. Non-dimensional analysis on blast wave propagation in foam concrete: minimum thickness to avoid stress enhancement[J]. Defence Technology, 2024, 36(6): 30–46.
- [15] 王芳,冯顺山. 爆炸冲击波作用下靶板的塑性大变形响应研究[J]. 中国安全科学学报, 2003(3): 61–64.
WANG Fang, FENG Shunshan. Study on large plastic deformation response of target plate under explosion shock wave[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2003(3): 61–64. (in Chinese)
- [16] WANG H Y, THAM G L, CHEUNG K Y. Beams and plates on elastic foundations: A review[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, 7(4): 174–182.
- [17] KINNEY G F, GRAHM K J. Explosive shocks in air[M]. New York: Springer, 1962: 88–106.
- [18] 付跃升,张庆明. 爆炸荷载作用下弹性薄板的动态响应[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(7): 572–575.
FU Yuesheng, ZHANG Qingming. Dynamic response of elastic thin plate under explosion load[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(7): 572–575. (in Chinese)
- [19] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
SU Buyun. Mechanical properties and elastoplastic damage constitutive model for foamed concrete[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)