

引用格式: 赵著杰, 侯海量, 李典. 填充多胞元抗冲击防护结构动力学特性及防护性能研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(3): 96–111.
ZHAO Z J, HOU H L, LI D. Research progress on dynamic characteristics and protective performance of multicellular filled impact resistant protective structure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(3): 96–111.

填充多胞元抗冲击防护结构动力学特性及防护性能研究进展



赵著杰, 侯海量*, 李典

海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

摘 要: 随着结构防护设计理念的发展, 众多新兴的填充多胞元抗冲击防护结构不断涌现。国内外的研究表明, 填充多胞元抗冲击防护结构的综合特性相对传统结构有较大改善, 其结构的整体优化方向也由传统的线性设计方法衍生出各类非线性及多材料复合设计方法。针对各类填充多胞元结构, 从力学性能、破坏模式与防护特性等方面进行论述, 归纳各类填充多胞元结构的基础力学理论计算方法和结构响应特性, 并对填充多胞元抗冲击防护结构的发展予以展望。所做研究可为填充多胞元抗冲击防护结构的结构形式、优化设计与应用方向等提供参考。

关键词: 填充多胞元结构; 抗冲击防护结构; 力学特性; 吸能特性; 防护性能

中图分类号: U663.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02053

Research progress on dynamic characteristics and protective performance of multicellular filled impact resistant protective structure

ZHAO Zhuojie, HOU Hailiang*, LI dian

College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: With the development of structural protection design concepts, numerous multicellular filled impact resistant protection structures have gradually emerged. As many studies at home and abroad show, great progress has been made in the strength and vibration characteristics of multicellular filled impact resistant protective structures compared with traditional structures. Meanwhile, the overall optimization direction of such structures has also progressed from traditional linear studies to various nonlinear and multi-material design methods. In this paper, the exposition of various multicellular filled impact resistant protective structures is carried out in terms of mechanical properties, failure modes and protection characteristics. By generalizing the theoretical calculation methods and response characteristics of various multicellular filled impact resistant protective structures, this paper puts forward the development prospects of such structures for use as references in the study of structural forms, optimal design and application directions.

Key words: multicellular filled structure; impact resistant protective structure; mechanical characteristics; energy absorption characteristics; protection performance

0 引 言

抵御冲击载荷的防护思想主要包括 2 个方面^[1-2]: 一是载荷耗散, 即从空间和时间上降低载荷的集中程度, 空间上, 将点分布集中的冲击载荷

耗散为面分布冲击载荷, 降低载荷的集中程度, 时间上, 将作用峰值大、作用时间短的强瞬态冲击载荷耗散为峰值相对较小、作用时间相对较长的冲击载荷或准静态载荷; 二是能量吸收, 即将冲击载荷的能量转化为结构的变形能。

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-10-21 网络首发时间: 2021-05-08 17:03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979277)
作者简介: 赵著杰, 男, 1997 年生, 硕士生。研究方向: 舰船防护结构研究。E-mail: zhaozhujie@163.com
侯海量, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 舰船抗爆抗冲击。E-mail: hou9611104@163.com
李典, 男, 1990 年生, 博士, 讲师。研究方向: 舰船抗爆抗冲击。E-mail: lidian916@163.com

*通信作者: 侯海量

凭借良好的结构特性和多样的组合方法, 各类多胞元结构逐渐受到重视。在此基础上, 利用多胞元结构中弹塑性波的传播特性和压缩坍塌变形吸能特性, 结合梯度功能^[3]、负泊松比^[4]、多功能材料^[5]等新兴设计理念, 对传统的板壳防护结构进行区域优化及合理填充, 可以得到理想的整体静、动力学性能的填充多胞元抗冲击防护结构, 并实现结构的轻质化设计。

由于胞元基材和填充物质的多样化, 以及各级胞元布置方法的差异化, 各种填充胞元的模量、强度、泊松比、相对密度等力学、物理性能有所区别, 各类填充多胞元抗冲击防护结构在不同速度尺度和边界条件下的变形及吸能机理不尽相同, 其冲击动力学特性差异较大^[6-7], 以此组成的填充多胞元抗冲击防护结构的防护性能也各不相同, 有着很好的可设计性, 可以按照不同的冲击载荷特性和防护需求对胞元结构、填充材料、填充方式等进行合理设计, 从而达到理想的防护性能。

本文拟选取 3 类典型的胞元结构, 对其填充类别、静/动力学性能、破坏模式、应变率效应以及波的传播特性等进行综述, 论述爆炸冲击波、高速破片及其联合载荷作用下填充多胞元结构的防护性能, 总结给出填充多胞元防护结构的几个发展方向。

1 基础力学性能

由于填充多胞元抗冲击防护结构大都可以视为诸多单胞元的有机组合, 故其基础力学性能存在着一定的一般性规律。在此基础上, 针对该类结构的诸多理论分析方法得以提出和运用。

1.1 宏观性能

在低速和高速冲击时, 相对密度是影响填充多胞元结构密实应变的重要指标^[8]。对于宏观填充多胞元结构, 相对密度一般为结构截面积与结构外轮廓截面积的比值。Gibson 等^[9]对宏观填充多胞元结构的相对密度 $\bar{\rho}$ 定义如下:

$$\bar{\rho} = \rho^* / \rho_s = \sum_{i=1}^N \frac{l_i t_i}{L_1 L_2} \tag{1}$$

式中: ρ^* 为多孔材料的密度; ρ_s 为制造其固体材料的密度; l_i , t_i 分别为相应胞元壁的长度和厚度; L_1 , L_2 分别为结构整体的宽度和高度。

当结构由不同类的宏观填充多胞元结构复合而成时, 可以参考张新春等^[10]提出的三角形和六角形多部分填充复合结构材料相对密度 $\Delta\rho_C$ 的计算方法:

$$\Delta\rho_C = n_T \Delta\rho_T + n_H \Delta\rho_H \tag{2}$$

式中: $\Delta\rho_T$, $\Delta\rho_H$ 分别为三角形和六角形填充多胞元结构的相对密度; n_T , n_H 分别为三角形和六角形填充多胞元结构填充层的面积比。

对于多重填充多胞元结构, 填充物和胞元壁的种类不一, 其相对密度一般根据实际填充方法进行计算。对于胞元壁复合填充结构, 可取胞元的微小段并参照等效密度计算方法^[11]进行计算; 对于胞元芯层复合填充结构或细观多胞元填充结构, 则一般不考虑整体相对密度, 只考虑细观填充物密度的影响。

单胞元和整体结构的负泊松比效应也是填充多胞元结构力学性能的一个研究要点。负泊松比材料早在 19 世纪便被提出^[12], 该材料在受拉伸和压缩时会分别发生横向膨胀与回缩。Lakes^[13]提出将负泊松比材料宏观化为负泊松比效应的设计方法, 通过类似的概念, 可以设计出具有负泊松比效应的单胞元结构, 或对多胞元结构进行负泊松比优化。众多的研究表明^[4, 14-15], 负泊松比效应带来的较好应力扩散使结构的力学性能有了大幅提高。此外, 秦浩星等^[16]还提出了功能基元拓扑优化法, 该方法将单胞元与整体结构泊松比进行双向关联, 为填充多胞元结构的负泊松比设计提供了新的思路。

1.2 静态力学性能

弹性模量、泊松比、剪切模量等是填充多胞元结构强度设计的重要参数。由于填充多胞元结构的复合性, 需要使用等效弹性参数这一概念来描述其类似的性能。对于六角形蜂窝单胞元结构, Gibson 等^[17]提出通过胞元的长度、厚度和内角等来表示二维等效弹性参数。

然而, 对于宏观填充时结构中的每个单胞元来说, 其外侧胞元壁的伸缩刚度不可忽略。富明慧等^[18]针对该问题对 Gibson 公式进行精确化, 提高了理论计算时芯层弹性矩阵的稳定性。朱秀芳等^[19]使用修正后的 Gibson 公式得到了负泊松比单胞元的等效弹性参数。

针对宏观填充多胞元结构等效参数的研究大多以单胞元理论为基础, 然后在宏观层面进行欧拉-伯努利梁简化。Kim 等^[20]在此基础上提出了适用于不均匀支撑状态的蜂窝胞元力学模型, 减小了不同计算方向上因胞元壁厚不一致所带来的误差。梁森等^[21]进一步通过数值模拟, 对 Gibson 等^[17]提出的等效弹性参数进行了简化, 结果显示, 胞元的材料刚度直接影响了结构面内刚度,

但结构面内等效泊松比则只与填充胞元的规格参数有关;而对于细观和多重填充多胞元结构,由于填充物的不均匀性,其整体结构等效弹性参数计算较为复杂。*Silva*等^[22]提出了适用于非周期性不均匀填充多胞元结构的结构特性方程,为解决该类问题提供了一大方案。

此外,平台应力对结构的吸能特性分析来说也尤为重要。填充多胞元结构的本构关系可等效为如图1所示,其曲线分为3个区域:线弹性区、应力平台区和密实区。在应力平台区,结构内各层胞元会相互挤压变形,随后,完成压实、应力急剧上升直至结构破坏。

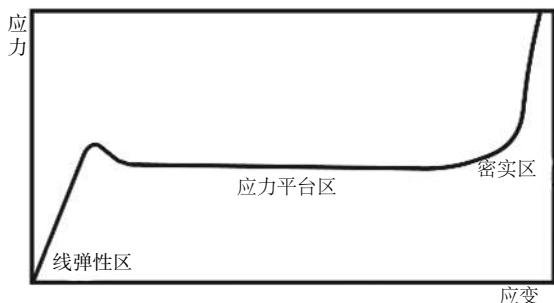


图1 填充多胞元结构应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship of multicellular filled structure

各类填充多胞元结构的平台应力通常由对等效应力-应变曲线的积分获得^[23]。此外,*Gibson*等^[9]通过对蜂窝结构的多次试验并结合 *Mises* 屈服准则,推导出了铝蜂窝受异面准静态压缩时平台应力 σ_m 的半经验公式:

$$\sigma_m = 6.6\sigma_0 \left(\frac{t}{l} \right)^{5/3} \quad (3)$$

式中: l , t 分别为相应胞元壁的棱边长度和厚度; σ_0 为基材屈服极限。

罗昌杰等^[24]采用 *Tresca* 屈服准则,推导出了 l/t 较大时较为适用的蜂窝材料受准静态压缩时的平台应力:

$$\sigma_m = 3.628\sigma_0 \left(\frac{t}{l} \right)^{3/2} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4)可以看出,由2种屈服准则求出的平台应力的自变量是相同的,进一步结合文献[7, 25]可以看出,一般的传统蜂窝结构的准静态平台应力均与其微拓扑结构的壁厚和壁长有关。

采用塑性耗散理论求解平台应力的方法较为常见。乔锦秀^[26]使用该理论获得了双箭矢蜂窝准静态平台应力的理论解,同时揭示了受均匀力时结构中塑性铰的形成过程(图2)。

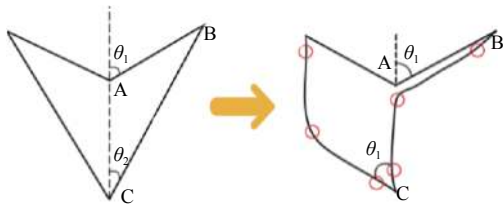


图2 塑性耗散理论求解平台应力^[26]

Fig. 2 Solving platform stress by plastic dissipation theory^[26]

如图2,可获得准静态作用下的平台应力 σ_m :

$$\sigma_m = \frac{2M_p \theta_1}{b l_{AB}^2} \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2) - \sin \theta_1 + \sin \theta_2} \quad (5)$$

式中: M_p 为塑性铰的塑性弯矩; b 为结构面外的宽度; l_{AB} 为A点与B点之间的水平距离; θ_1 , θ_2 分别为中轴线与蜂窝胞元上、下边间的夹角。

由式(5)可以看出,胞元的规格参数 θ_1 和 θ_2 直接影响了整体结构的平台应力,这在负泊松比胞元结构中已得到证实^[4]。而对于多重填充多胞元结构,由于细观密实填充物的存在,其结构受力更加均匀并有着更高的平台应力^[27]。此外,有实验证明,胞元梯度^[28]、并联联结^[23]等结构设计方法也对平台应力的提升有所帮助。

1.3 动态力学性能

1.3.1 应变率效应

区别于准静态载荷,在填充多胞元结构动态力学行为研究中,材料的应变率效应较为突出。结构的应变率效应一般分为2个部分:一是基材本身的应变率效应,即随着应变率的提高,材料会从韧性破坏变为脆性破坏,从而提升结构的抗冲击强度^[29];二是对于整体结构来说,随着动载荷下应变率的增加,其平台应力和能量吸收量会有所提高^[30-31]。研究发现^[30, 32-34],环境温度、单胞元结构参数、相对密度、冲击速度、结构梯度设置等都会对应变率效应产生影响。

基于一维波理论,*Reid*等^[35]建立了蜂窝材料的平台应力与冲击速度间的关系:

$$\sigma_p = \sigma_{cr} + \frac{\Delta \rho \rho_s}{\varepsilon_d} v^2 \quad (6)$$

式中: σ_p 为动态平台应力; σ_{cr} 为准静态塑性坍塌应力; v 为冲击速度; $\Delta \rho$ 为相对密度; ρ_s 为胞元壁材料密度; ε_d 为应变率。

式(6)是基于结构失稳破坏的角度,适用于一些薄壁结构。而对于屈服破坏占主导的破坏模式,*Qiu*等^[36]根据一维冲击波理论,得出由不同微结构组成的填充多胞元结构平台应力与冲击速度间的关系为

$$\sigma_p = A\sigma_y\Delta\rho^2 + \frac{\Delta\rho\rho_s v^2}{1 - B\Delta\rho}$$

(7)

式中: A, B 为由多胞元结构性质决定的拟合系数; σ_y 为基体材料的屈服应力。

此外, 胞元规格尺寸与应变率效应也存在直接关系。Ruan 等^[7] 得出了正六边形蜂窝体在高速冲击速度下的平台应力与胞壁厚长比、冲击速度间的关系式。

在应变率效应的影响下, 动态载荷作用下的多胞元结构抗压强度也更高^[37]。对于填充多胞元结构的材料力学性能, 采用 Cowper-Symonds 模型进行求解的方法较为常见^[38]:

$$\sigma_p = \sigma_m \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_d}{D} \right)^{1/n} \right]$$

(8)

式中: σ_m 为静态屈服强度; D 和 n 为由试验确定的材料应变率敏感系数。

罗昌杰等^[24] 证实了该模型的正确性。Tao 等^[39] 通过改进速率无关冲击理论, 将 Cowper-Symonds 模型引入冲击理论中, 提出了速率依赖冲击理论模型, 并将动载荷作用下填充多胞元结构的平台应力分为了静态项、应变率项和惯性项 3 个部分, 其后续的实验结果显示, 应变率效应对平台应力的影响是随着速度的增加而逐渐减弱的, 进一步揭示了应变率效应的作用机理。

1.3.2 动强度特性

当结构惯性不能忽略时, 填充多胞元结构在高应变率加载下的响应与静载荷作用下相比差异较大, 因此, 针对其动强度, 特别是固有频率问题的研究尤为重要。

Lim^[40] 和 Scarpa 等^[41] 分别利用一阶变形理论研究板壳结构的固有频率问题后发现, 单胞元的几何单元参数与结构频率有着匹配关系, 可通过改变单胞元的几何参数来改善结构的振动特性。但由于类似的低阶理论多采用小挠度理论, 即垂直于中面的直线在变形中保持不变形^[42], 而对于胞元内填充柔性填充物的多胞元结构来说其变形又不可忽略, 因此, 对于此情况应采用高阶理论来进行分析。Reddy^[43] 基于 Rayleigh-Ritz 法与 Navier 法提出了三阶剪切变形理论。鄢馥等^[42] 在此基础上将芯层等效为正交异性层进行分析后认为, 固有频率参数与边界条件亦有关。朱秀芳等^[19] 结合 Hamilton 原理推导出了四边简支的负泊松比多胞元夹层板的偏微分运动方程, 发现负泊松比蜂窝夹芯板的固有频率要小于正泊松比蜂窝夹芯板。董宝娟等^[44] 考虑了蜂窝芯层梯度沿面内方向变化时多胞元夹层板的振动特性, 比较了各类梯

度填充多胞元结构的振动特性。
综上所述可以看出, 填充多胞元结构的动强度特性主要与其单胞元构型、梯度设置和边界条件有关。同时, 固有模态、频率等动强度参数分析也是证明各类填充多胞元结构优良结构特性的一个较好方法。

1.3.3 波的传播与振动特性

衰减入射应力波是填充多胞元结构的一大防护思想。由于多胞元壁面和填充物材质的区别, 应力波在每个突变面都会发生反射和透射, 并且在特定的频段内会因无法传播而形成阻带(带隙), 而通过结构设计对阻带进行调整可以达到削减应力波、保护结构的目的。

阻带的形成受胞元材料、构型、排列方式、约束模式等多因素的影响, 其机理研究主要可以分为局域共振理论和布拉格散射理论^[45], 即分别通过周期结构和散射体对入射应力波进行衰减。负昊等^[46] 通过带隙研究证实了负泊松比结构优良的阻带特性。孙修展^[47] 和陈绍婷^[48] 分别从应力波传播及阻带形成机理方面研究了点阵结构和蜂窝结构内应力波的频散特性, 发现胞元规格和相对密度对阻带的产生具有重要作用。Ruzzene 等^[49] 发现周期性放置在板上的不同形状的负泊松比型材会引入适当的阻抗失配, 可阻止波在指定频段以及特定方向上的传播。Liu 等^[50] 讨论了面板厚度和材料性能以及芯中夹杂物的填充率对阻带的影响。孟俊苗^[51] 则发现结构频率是随着边界条件约束的增强而增高的。

另外, 一维应力波理论、波阵面上的质量守恒及动量守恒定律也是研究填充多胞元结构应力波传播特性的常用方法。Lim 等^[52] 针对波纹夹芯板中应力波的传播及振动模态进行了理论分析。赵转等^[53] 以一维应力波传播理论为基础, 运用动量守恒定律提出了刚性质量块撞击固定泡沫圆杆的理论模型, 求得了各界面速度随时间变化的规律的数值解。

2 填充多胞元抗冲击防护结构

在冲击防护领域, 填充多胞元抗冲击防护结构一般由外侧板壳类壁板以及内部芯层的诸多胞元组成, 其胞元种类繁多且分类方法较多。从固体力学研究的角度出发, 填充多胞元抗冲击防护结构可以分为宏观填充多胞元结构、细观填充多胞元结构和多重填充多胞元结构 3 类。

2.1 宏观填充多胞元结构

对于宏观填充多胞元结构, 其内部胞元的构

型及排布较为明显和直观。从厘米到米的宏观尺度上来看,其内部填充芯层一般由以各类金属、塑料或复合材料为基材的板壳面、桁架、节点等组成(图 3),代表的结构类型有各类夹层结构、类蜂窝结构及点阵结构。

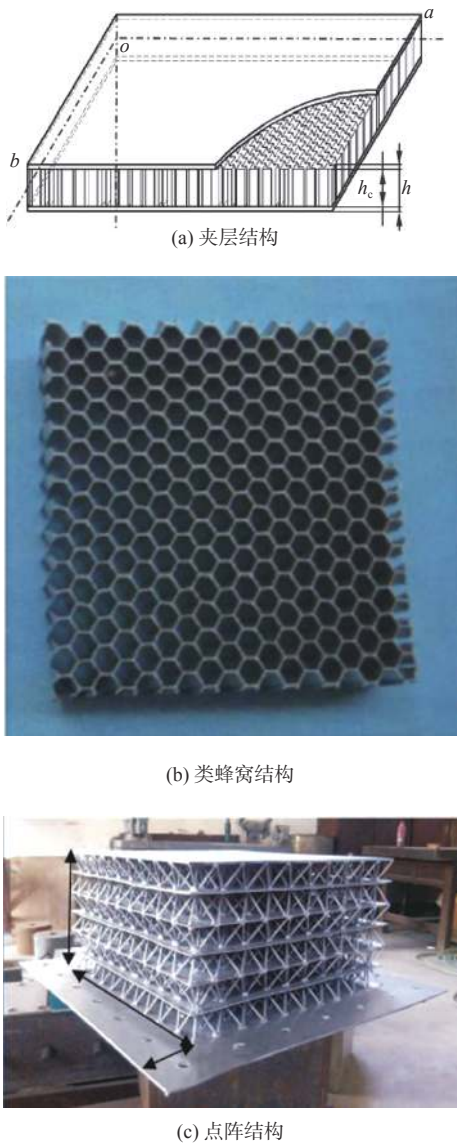


图 3 宏观填充多胞元结构^[19,38]

Fig. 3 Macroscopic multicellular filled structures^[19,38]

夹层结构的芯层填充部分主要由板材构成,其整体性质受芯层的材料、形状、结构参数,以及其与外侧面板的联结方式等因素影响。Dayyani 等^[54]针对该类夹层结构的力学性质及应用进行了综述。相对于传统结构,由于有着天然的空隙分布和定向刚度优势,夹层结构在特定方向上有着更好的抗压、抗弯和减振性能。

类蜂窝结构的芯层主要由种类众多且性质各异 的类蜂窝单胞元组成。从局部单胞元看,同材料不同几何构型,如常规构型^[55]、负泊松比构型^[16]、手型构型^[56]、拉胀构型^[57]等结构的性质不一^[58],而

同材料同几何构型的蜂窝单胞元的特性则会受壁厚、角度、比例长度等参数的影响^[59]。从整体结构看,胞元的组合方式对多胞元类蜂窝结构的整体性质也有着较大影响,其排列设置以胞元壁厚、胞元体高度、比例距离等规格参数变化^[44, 60]或胞元材料屈服强度、基材复合配置等力学性质变化^[61]为主。另外,对称布置概念^[6]和梯度复合布置概念^[62]在多胞元类蜂窝结构中的运用也较为广泛。

此外,胞元缺陷或随机无序填充对整体结构的力学行为也有一定影响。Guo 等^[63]和 Silva 等^[64]研究发现,蜂窝结构的弹性和屈服特性以及失效模式等与初始缺陷的位置、密度和排列有关。Chen 等^[65]分析了胞元壁缺陷对屈服强度的量化影响,发现缺陷的增加会降低整体强度。同时,也有研究^[66-67]发现,无序填充多胞元结构各向异性变形形态会随着不规则性的增加而减弱,缺陷分布不均匀性也会随着缺陷量的增加而弱化,从而提高结构的能量吸收能力。所以,胞元空缺和不均匀排列带来的性能影响存在着边界,应根据实际工况分析。

相比传统结构,点阵结构在保持刚度和强度的同时还大大减小了质量。从结构特点上来说,点阵夹芯结构芯层中桁架和点的构造是对波纹夹层结构芯层面的简化,这在该类结构的嵌锁制备方法(图 4)中有所体现,其胞元轮廓构型特点与蜂窝结构相似,区别在于胞元构型的组合趋于多

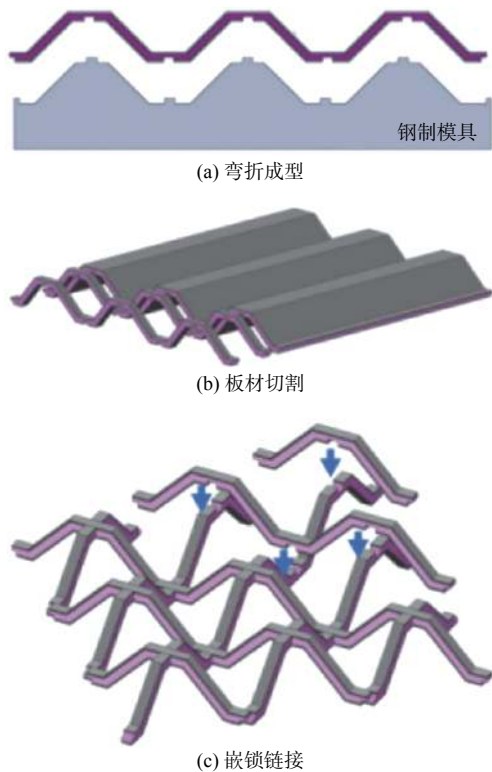


图 4 嵌锁制备方法^[68]

Fig. 4 Manufacture method of embedded lock^[68]

方向和多维度, 组合方式也更为多样^[69]。随着 3D 打印等技术的发展, 复杂点阵结构的制备更加便捷, 相应的模块点阵优化方法也不断出现^[70]。然而, 受制备水平的限制, 复杂点阵结构的缺陷变得更突出, 有必要予以重视。

2.2 细观填充多胞元结构

在结构内填充各类泡沫、陶瓷、混凝土等物质, 即形成细观填充多胞元结构。从微米到毫米级的细观尺度上看, 这一类填充物由多个胞元组成(图 5), 并可简化形成相应的多胞有限元模型^[71-72]。细观填充多胞元结构的力学特性主要受填充材料性质的影响, 根据防护机理, 填充材料可以分为刚性和柔性 2 类。

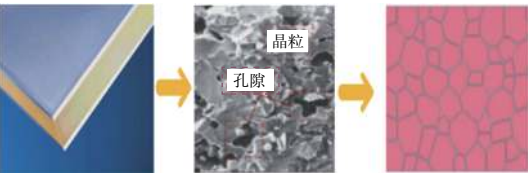


图 5 细观填充物的有限元模型^[71]
Fig. 5 Finite element model of mesoscopic filler^[71]

刚性填充材料, 如金属泡沫、陶瓷、混凝土等^[73-75]的刚度和硬度较大, 在受到外部冲击时可以通过撞击破碎来减小冲击物的动能, 从而对结构进行保护。Santosa 等^[74]研究发现, 在等质量条件下, 结构填充泡沫铝与增加壁厚相比有着更好的抗冲击能力。但该类填充材料受冲击时易与外侧壁板产生滑移失效, 故填充物的选择需结合外侧壁板综合予以考虑, 并适当加入黏结层进行联结。陈智勇等^[75]提出, 当填充陶瓷材料时, 纤维材料壁板与填充物间有着较传统金属壁板更好的粘结强度。何煌等^[76]针对黏结层对结构抗弹性能的影响做了进一步研究。

柔性填充材料为刚度较小的聚氨酯、聚脲弹性体等^[77-79]。由于自身良好的韧性和应力扩散性质, 通过该类材料优化后的结构能量吸收值和比吸能值得到了有效提高^[77]。薛启超^[78]和翟文等^[79]分别讨论了该类弹性填充物对准静态载荷作用下外侧壁板塑性开裂的约束作用, 和冲击载荷下结构扩孔效应的弱化作用, 结果证明, 该类填充多胞元结构具有良好的静、动态力学特性。

2.3 多重填充多胞元结构

多重填充多胞元结构(图 6, 图中数值的单位为 mm)是指在宏观填充多胞元结构的基础上, 对其内部空隙适当填入细观填充多胞元材料的结构, 其综合了两类结构的特点, 整体性质受填充

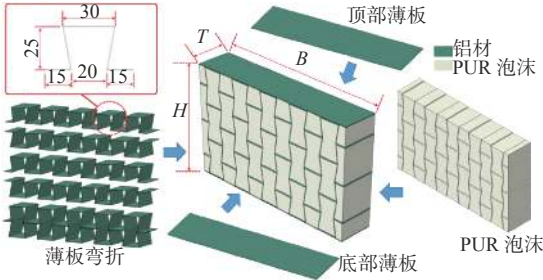


图 6 多重填充多胞元结构^[77]
Fig. 6 Multiple filling multicellular structure^[77]

物类别和填充方式的影响较大。

从填充物类别来看, 对于刚性材料填充的多重填充多胞元结构, 周宏元等^[80]和 Wadley 等^[81]分别证实了混凝土填充材料的强化能量吸收能力和陶瓷填充材料的弱化冲塞剪切效应; 对于柔性材料填充的多重填充多胞元结构, 聚氨酯泡沫、聚脲弹性体、橡胶、粘弹性阻尼材料等物质均展现出了良好的填充优化性能^[77, 82-83], 使填充多胞元结构的综合防护性能得到了有效提高。

从填充方法来看, 多重填充多胞元结构的填充方法可以分为均匀填充法、不均匀填充法和随机填充法 3 种。其中均匀填充法是指对结构的特定面进行均匀划分后对划分区域进行选择填充^[84-85]; 不均匀填充法一般是对结构的轮廓面进行不规则划分并进行选择性填充, 其在不规则轮廓结构设计及结构力学响应针对性设计中使用较多^[86-87]; 随机填充法则是进行经验性或随机数式的区域填充设计, 这一类方法引入了线性同余等随机算法, 已被证实拥有较好的填充效果^[88]。填充方法的选择与填充材料的性质关系很大^[86], 需要根据具体的防护方向进行恰当选择。

通过合理的设计, 使结构各部分间相互取长补短, 从而既能在受冲击时有效消耗冲击动能, 又能在受冲击后具有一定的强度恢复能力, 是目前填充多胞元结构研究的热点方向。而针对填充多胞元结构各项性质的研究是指导结构设计的先决条件, 这将在下文详细论述。

3 破坏模式和吸能特性

诸多实验研究^[89-92]表明, 填充多胞元结构的破坏模式与能量吸收特性相互联系且受多种因素的共同影响。唐爽^[30]在铝蜂窝压缩实验中发现, 平台应力发展阶段是主要的耗能阶段, 在这一阶段, 多胞元结构壁的屈曲折叠变形将外力功转化为塑性变形能, 在胞元壁屈曲至开始互相接触后, 结构进入致密化阶段, 此时, 能量吸收率会有所下降直至结构破坏。

针对填充多胞元结构,学者们提出了多种理论模型。乔锦秀^[26]针对6种常见的理论模型进行了综合分析。结果表明,各类多胞元结构的理论变形模式与理论模型密切相关,而各个理论模型的侧重点也有所不同,故在使用时应注意其适用范围。

不同方向加载时,填充多胞元结构的破坏与吸能模式不同。对于面内方向加载,Hönig等^[93-94]的研究发现,在低速冲击作用下,初始变形带出现的位置主要与初始缺陷数量和布局有关,而当冲击速度进一步上升时,变形带开始出现在冲击远端区域。Ruan等^[7]提出了受到面内方向载荷时常见填充多胞元结构的3种变形模式(图7):X型、V型和I型。其中,X型和V型主要在中、低速压缩时出现,而随着速度的增加,会出现局部化的I型变形。此外,不同构型、规格的填充多胞元结构的破坏模式也存在着差异^[4],其机制在于由不同单胞结构对应组成的整体结构其相对密度有所不同,从而导致耗能特性也有所差别。

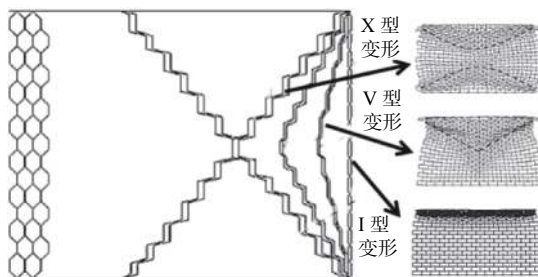


图7 3类破坏模式^[7]

Fig. 7 Three kinds of failure mode^[7]

胞元的排列布置方式也会对破坏模式造成影响。刘颖等^[55]研究发现,胞元交错排列布置会使试件出现明显的颈缩现象。邓锦郅^[6]发现,合理的高度和密度梯度设计可以减小结构的初始应力峰值并使平台应力保持在低值,从而使冲击以更缓和的方式进行。何强等^[61]对正、负两种屈服强度梯度布置方式进行了研究,结果显示:正梯度布置(自冲击端到固定端材料的屈服强度值逐步增加)时其结构变形模式与无梯度布置时相似,能量以后程吸收为主;负梯度布置时固定端先发生塑性坍塌,整体则出现倒置的V型变形并随冲击速度的增加回到正向V型和I型变形,能量主要以前程吸收为主。源于这一发现,负梯度以其前程吸能特性作为防护装置时可以对其后方置物起到良好的保护作用。

多重填充多胞元结构的变形模式与宏观填充多胞元结构有所区别,这主要与细观填充物的性质有关。Liu等^[82]在以泡沫为细观填充物的多重

填充多胞元结构受压研究中发现,受益于细观填充物的协同优化性,填充泡沫的多胞元结构没有出现类似于宏观填充多胞元结构X型变形带的不稳定弯曲,其能量吸收量大于宏观填充多胞元结构和纯泡沫的能量吸收总和。王二恒等^[95]在硅橡胶填充多胞元结构静态压缩的研究中发现,硅橡胶的弹性性质增大了胞元壁的拉伸变形,从而使得应力平台增长并提高了吸能性能。此外,由于细观填充材料的回弹性,使得结构在卸载后可以恢复一定的强度进而继续承受载荷,这是宏观填充多胞元结构所不具备的一大特点。

多重夹杂填充多胞元结构的破坏模式更为特殊。Prakash等^[96]提出了随机夹杂物填充法,其研究发现,当结构的未填充细观填充物部分逐步致密化时,在相邻的填充部分连线之间的区域几乎未变形。Nakamoto等^[88]在随机填充刚性夹杂物的多胞元结构受压实验中发现,随着夹杂物的添加,X型变形带的形成会受到夹杂物的影响从而使得蜂窝较难塌陷,故致密化应变也相应降低。

$$\frac{\varepsilon_D(\varphi)}{\varepsilon_{D0}} = -2.3\varphi + 1.0, \quad 0 \leq \varphi \leq 0.4 \quad (9)$$

式中: ε_D 为含有不同密度夹杂物结构的致密化应变; ε_{D0} 为不含夹杂物结构的致密化应变。可以看出,细观填充物的比例 φ 直接影响了归一化致密化应变 $\varepsilon_D(\varphi)/\varepsilon_{D0}$ 。

对抵抗面外载荷的填充多胞元结构的研究主要针对板和管类结构展开。一般胞元壁的面外方向易于失稳,所以受面外载荷时填充多胞元结构易发生壁面的屈曲破坏。井玉安等^[97]将该类破坏模式划分为初始-屈服-平台-密实化4个阶段,通过胞元壁厚度与边长的比值确定了屈曲破坏的边界,实验证明,泡沫铝^[74]、聚氨酯^[79]等物质都可以有效缓解面外压缩屈曲破坏。在耗能方面,王行宁^[98]在单层和多层填充多胞元结构的面外压缩实验中发现,结构主要是通过侧壁面分段重叠和压缩所形成的塑性铰来消耗能量,这与面内压缩耗能方式类似。此外,有关填充多胞元结构的面外动响应在防护领域使用亦较多,下文将进一步予以论述。

4 结构防护性能

4.1 爆炸冲击波载荷作用

爆炸冲击波作用下填充多胞元抗冲击防护结构的动力学特性是防护工程领域的一大研究重点。肖峰等^[99]从研究方法和内容的角度对该类结

构在爆炸载荷下的动力学响应进行了综述,李典等^[100]针对填充多胞元结构的抗爆性能及研究设计进行了总结和展望。

由于构型及填充模式的复杂性,填充多胞元结构的动响应机理较为特殊。Fleck 等^[101]针对宏观填充多胞元结构,提出其动力学响应可以分为 3 个阶段,即流固相互作用阶段、芯层压缩阶段及整体结构变形阶段。

单胞元结构构型和多胞元布置方式均会对结构动响应产生影响。张亭亭等^[102]比较了 3 类不同胞元构型的宏观填充多胞元结构在爆炸冲击波下的吸能特性。王果等^[103]在针对 Y 型宏观填充多胞元构型的研究中发现,其两端夹层板厚度、芯层壁厚的增加可以有效提高抗爆特性,而芯层高度的影响却不大。杨森等^[104]则提出了不同的观点:芯层高度的增加可以消耗更多的压缩能;胞元的相对密度一定时,胞元构型对最终吸能的影响不大,说明胞元构型参数对结构整体动响应特性的影响存在相对作用范围。李世强等^[105]对胞元布置进行了研究,结果显示宏观填充多胞元结构的破坏特性主要分为整体结构形变和局部贯穿破坏,合适的梯度布置有利于在减小结构质量的同时优化其吸能特性。

结构的边界条件和距爆心的距离也是重要的影响因素。由于结构两侧的面板很难做到完全固定,故在受冲击时会产生各位置不等的位移和形变,因此产生的稀疏波会与入射波、反射波共同对结构产生作用^[106]。有研究发现^[107],在爆炸载荷下,宏观填充多胞元结构靠近冲击端和固定端芯层的能量吸收量要比中间段的大,这也与应力波的复杂传播特性有关。

对于细观和多重填充多胞元结构,由于单胞元尺寸的缩小会导致同等体积下胞元数的激增,故应力波会在结构内进行更复杂的散射并延长响应时间,从而使爆炸载荷在结构芯层中进一步均匀扩散。另一方面,诸多细观填充材料还可以通过其超弹性特性延长响应时间间隔^[108],从而提高填充物的有效吸收能量并降低受保护部件的动力响应。

细观和多重填充多胞元结构在爆炸载荷作用下的破坏模式及吸能方式与宏观填充多胞元结构类似,即会发生整体形变并伴随有局部的剪切破坏,较高密度的胞元排布区域可以吸收更多的能量,合理的密度梯度和外侧面板厚度配置也可以对结构起到更好的防护作用。顾文彬等^[109]分析了多层混合泡沫铝结构的抗爆特性,证明冲击端到固定端的密度递减模式可以获得更好的结构抗

爆能力。Cai 等^[110]发现不同顺序样式的夹层布置形式会带来不同的防护效益。赵延杰等^[111]和朱易等^[112]则分别证实两侧外面板与胞元的匹配设置和内部胞元的排布设置对结构抗爆有着重要影响。

4.2 弹体侵彻作用

当防护对象为人员或精密仪器时,针对弹体和破片侵彻作用下的结构防护也相应地变得比较重要。苏罗川等^[113]对 4 类胞内填充物和 2 类常见抗侵彻结构的抗侵彻特性进行了论述。弹体侵彻宏观填充多胞元结构的过程可以分为 3 个阶段:第 1 个阶段为穿透冲击近端面板阶段,在该阶段,侵彻体与一端外面板接触会导致速度迅速下降;第 2 个阶段为填充层接触阶段,在该阶段,填充层胞元将受侵彻体冲切和压缩且持续时间较长;第 3 个阶段为穿出冲击远端面板阶段,由于多胞元填充层的挤压和堆积效应,在这一阶段侵彻体的速度将大幅削减。

影响侵彻破坏发生模式和结构防护特性的因素有很多:首先,由单胞元性质来看,Chang 等^[114]和蒋欣程^[115]针对不同胞元构型对面内侵彻破坏模式的影响予以了研究,即矩形胞元结构主要受剪切载荷作用(图 8(a)),六角形(图 8(b))和负泊松比(图 8(c))胞元结构则主要受拉伸荷载作用,这一影响性质在面外弹体侵彻作用中也得到证实^[116];其次,弹体种类和弹体的侵彻初速、侵彻角度、着弹点位置等也会对侵彻效应产生影响^[117]。此外,板材种类也是不可忽略的一大因素。毕广剑等^[118]在双层填充多胞元结构抗侵彻能力研究中发现,当相同速度的弹体侵彻时,规格一致的分层板和单层板相比有着更好的抗侵彻特性。

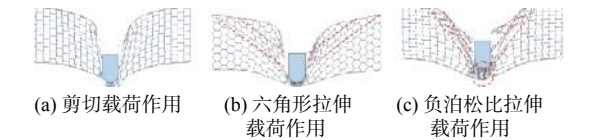


图 8 填充多胞元结构弹体侵彻破坏形态^[114]
Fig. 8 Failure mode of multicellular filled structure under action of projectile penetration^[114]

多重填充多胞元结构亦有着优良的抗侵彻特性,其不同弹速作用下的破坏模式、耗能模式、背板破坏与失效模式也有所不同。从作用机理的角度看,各类细观填充材料做了主要贡献。一方面,对于柔性填充材料,在弹体侵彻过程中,应力波会发生较大程度的弥散,导致其能量衰减^[119];另一方面,对于刚性填充材料,弹体在侵彻过程中会产生较大的墩粗变形,其动能的较大部分将

转化为填充材料的断裂能。徐国军^[120]通过实验证实了复合填充多胞元结构在侵彻防护方面的独特优势。

4.3 高速破片与冲击波联合作用

在实际防护中,结构往往受到高速破片与冲击波的联合作用。由于存在多破片的集群毁伤增强效应和破片群-冲击波的耦合毁伤增强效应,这种联合作用对结构的毁伤效果往往强于单一作用^[121]。一方面,多破片载荷在防护结构上独自作用产生的应力波会相互叠加从而产生叠加的破坏效应^[122];另一方面,相对于单一破片侵彻作用,联合作用中的冲击波会使结构作用面产生初始挠度并提高其动能,使之成为结构相对薄弱的最终破坏区域^[123],同时,高速破片群也会造成破孔处动态应力的局部增高,并与冲击破进一步耦合而使防护端出现巨大的变形,从而增强破坏效果^[124]。

针对联合作用的不同冲击模式,填充多胞元抗冲击防护结构的防护思想可以划分为前文所述的2类模式:能量吸收模式和载荷耗散模式。能量吸收模式在宏观填充多胞元结构和柔性细观填充结构吸能过程中表现得较为明显。段新峰等^[125]在I型多胞元结构的毁伤特性分析中发现,两侧外部面板的挠曲变形较大并吸收了大部分能量,这一耗能机理在柔性细观填充多胞元防护结构中也有所体现^[126],即通过夹层的形变消耗能量来达到防护目的。载荷耗散模式则在含刚性填充物的结构设计中运用较多。蔡林刚等^[127]的实验显示,填充的泡沫铝材料被破片剪切为充塞块并与之一起作用于保护端壁面,这与弹体侵彻陶瓷结构形成大面积碎片的破坏模式类似,即通过碎化冲击体并增大防护侧壁面受力范围来弱化毁伤作用。

在此基础上,由一系列多材质复合制成的综合防护结构逐渐被提出。其中,较为有效的一类是以陶瓷、纤维增强复合材料作为芯层、不等厚度钢作为外侧面板的夹层结构^[2],该结构综合了两类耗能设计思想,有着较好的抗联合作用能力。

5 总结与展望

相对于传统的防护结构,填充多胞元抗冲击防护结构有着多方面的性能优势,其作用机理也更为复杂,本文结合了各种基础理论,对各类填充多胞元抗冲击防护结构的综合力学性能予以了分析,并针对该方面的研究状况进行如下展望:

1) 拓宽填充多胞元抗冲击防护结构填充物的研究类型。目前,针对填充多胞元结构的填充

物主要为固态,相比之下,液态等其他类别的填充物则使用较少。因液体填充需考虑液体流动、流固耦合、充液量等方面的问题,故该类结构的作用和失效机理相对于一般的固态填充会有所区别,数值仿真和实验设计也势必更加复杂,需要结合流体力学等学科做进一步的探讨。

2) 优化填充多胞元抗冲击防护结构的排列设计方法。目前,针对填充多胞元抗冲击防护结构的设计方法主要是采用梯度填充或选择性填充等单方向进行,交叉概念性设计较少,因此可以以结构分层理论、梯度材料理论、宏观力学性能、选择性填充等思路为基础并加以融合设计,以在提高填充多胞元结构力学性能和减少整体结构质量的同时更好地保护理想对象。

3) 探索大尺度新型填充多胞元抗冲击防护结构的力学实验和实际应用。相对于缩比结构,大尺度填充多胞元抗冲击防护结构受板材粘结和焊接、填充物惯性、边界条件、环境温度和湿度等诸多因素的影响,其力学性能和破坏模式可能会发生变化,又因尺寸变大,其数值仿真和实际开展实验的制约因素也会较多,这就需要多方面的通力合作以开展相应的大型填充多胞元抗冲击防护结构实验,从而尽快将一些新型填充多胞元结构运用到实际的防护工程中。

参考文献:

- [1] LI D, HOU H L, CHEN C H, et al. Experimental study on the combined damage of multi-layered composite structures subjected to close-range explosion of simulated warheads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 114: 133-146.
- [2] 侯海量, 张成亮, 李茂, 等. 冲击波和高速破片联合作用下夹芯复合舱壁结构的毁伤特性[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 116-123.
HOU H L, ZHANG C L, LI M, et al. Damage characteristics of sandwich bulkhead under the impact of shock and high-velocity fragments[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 116-123 (in Chinese).
- [3] 王晓凯. 梯度多胞金属材料的动态力学行为和多功能优化设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
WANG X K. Dynamic mechanical behavior and multi-functional optimal design of graded cellular metals[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 (in Chinese).
- [4] 张新春, 刘颖, 李娜. 具有负泊松比效应蜂窝材料的面内冲击动力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 475-482.
ZHANG X C, LIU Y, LI N. In-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio ef-

fects[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 475–482 (in Chinese).

[5] 赵钱. 多功能铝蜂窝夹芯结构疲劳特性仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

ZHAO Q. Simulation study on fatigue characteristics of multifunctional aluminum honeycomb sandwich structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).

[6] 邓锦郅. 分层功能梯度蜂窝结构冲击动力学响应的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.

DENG J Z. A research on impact dynamic response of layered functionally gradient honeycomb[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese).

[7] RUAN D, LU G X, WANG B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs-a finite element study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 161–182.

[8] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 01310-1–01310-11.

HAN H L, ZHANG X C, WANG P. Dynamic responses and energy absorption properties of honeycombs with negative Poisson's ratio[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1): 01310-1–01310-11 (in Chinese).

[9] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1997.

[10] 张新春, 沈振峰, 吴鹤翔, 等. 多段填充复合蜂窝结构的动态响应特性研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(4): 67–75.

ZHANG X C, SHEN Z F, WU H X, et al. Study on dynamic response characteristics of multi-segment filled composite honeycombs[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(4): 67–75 (in Chinese).

[11] XIE S C, WANG H, YANG C X, et al. Mechanical properties of combined structures of stacked multilayer Nomex® honeycombs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106729.

[12] LOVE A E H. A Treatise on the mathematical theory of elasticity[M]. 4th ed. New York: Dover Publications, 2011.

[13] LAKES R. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects[J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(9): 2287–2292.

[14] 张一帆. 两种负泊松比蜂窝结构的数值分析及实验研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2015.

ZHANG Y F. Numerical analysis and experimental study of two kinds of honeycomb structures with negative Poisson's ratio[D]. Guangzhou: Jinan University, 2015 (in Chinese).

[15] 高强, 王良模, 钟弘, 等. 负泊松比结构的三点弯曲性能研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43(2): 141–146.

GAO Q, WANG L M, ZHONG H, et al. Research of structure with negative Poisson's ratio under three-point bending[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(2): 141–146 (in Chinese).

[16] 秦浩星, 杨德庆. 任意负泊松比超材料结构设计的功能基元拓扑优化法 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(4): 1014–1023.

QIN H X, YANG D Q. Functional element topology optimal method of metamaterial design with arbitrary negative Poisson's ratio[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 1014–1023 (in Chinese).

[17] GIBSON L J, ASHBY M F, SCHAJER G S, et al. The mechanics of two-dimensional cellular materials[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1982, 382(1782): 43–59.

[18] 富明慧, 尹久仁. 蜂窝芯层的等效弹性参数 [J]. *力学学报*, 1999, 31(1): 113–118.

FU M H, YIN J R. Equivalent elastic parameters of the honeycomb core[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 31(1): 113–118 (in Chinese).

[19] 朱秀芳, 张君华. 负泊松比蜂窝夹层板的振动特性研究 [J]. *应用力学学报*, 2018, 35(2): 309–315.

ZHU X F, ZHANG J H. Vibration analysis of honeycomb sandwich plate with negative Poisson's ratio[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(2): 309–315 (in Chinese).

[20] KIM H S, AL-HASSANI S T S. A morphological elastic model of general hexagonal columnar structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(4): 1027–1060.

[21] 梁森, 陈花玲, 陈天宁, 等. 蜂窝夹芯结构面内等效弹性参数的分析研究 [J]. *航空材料学报*, 2004, 24(3): 26–31.

LIANG S, CHEN H L, CHEN T N, et al. Analytical study of the equivalent elastic parameters for a honeycomb core[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(3): 26–31 (in Chinese).

[22] SILVA M J, HAYES W C, GIBSON L J. The effects of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, 37(11): 1161–1177.

[23] 李振, 丁洋, 王陶, 等. 新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(1): 155–163.

LI Z, DING Y, WANG T, et al. In-plane crushing behaviors of honeycombs with a novel parallel graded design[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 155–163 (in Chinese).

[24] 罗昌杰, 周安亮, 刘荣强, 等. 金属蜂窝异面压缩下平

- 均压缩应力的理论模型[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 52–59.
- LUO C J, ZHOU A L, LIU R Q, et al. Average compressive stress constitutive equation of honeycomb metal under out-of-plane compression[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 52–59 (in Chinese).
- [25] LIU Y, ZHANG X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 98–109.
- [26] 乔锦秀. 新型周期多孔材料的准静态和冲击特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- QIAO J X. The quasi-static and impact crushing of periodic cellular structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [27] YU R, LUO W, YUAN H, et al. Experimental and numerical research on foam filled re-entrant cellular structure with negative Poisson's ratio[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 153: 106679.
- [28] 樊喜刚, 尹西岳, 陶勇, 等. 梯度蜂窝面外动态压缩力学行为与吸能特性研究[J]. *固体力学学报*, 2015, 36(2): 114–122.
- FAN X G, YIN X Y, TAO Y, et al. Mechanical behavior and energy absorption of graded honeycomb materials under out-of-plane dynamic compression[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36(2): 114–122 (in Chinese).
- [29] 孙杰, 王欢, 彭华新. 金属基复合材料动态力学性能研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(4): 664–671.
- SUN J, WANG H, PENG H X. Dynamic mechanical properties of metal matrix composites: a mini review[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2019, 37(4): 664–671 (in Chinese).
- [30] 唐爽. 铝蜂窝静态压缩行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- TANG S. The behavior of aluminum honeycomb under static and dynamic compression[D]. Changsha: Central South University, 2014 (in Chinese).
- [31] 曹雯议. 蜂窝材料结构的静动力学性能数值仿真[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- CAO W Y. Numerical study of static and dynamic behavior of honeycomb material-based structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese).
- [32] SHEN C J, LU G, YU T X, et al. Dynamic behavior of graded honeycombs—a finite element study[J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 282–293.
- [33] 唐长国, 朱金华, 周惠久. 金属材料屈服强度的应变率效应和热激活理论[J]. *金属学报*, 1995, 31(6): 248–253.
- TANG C G, ZHU J H, ZHOU H J. Correlation between yield stress and strain rate for metallic materials and thermal activation approach[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1995, 31(6): 248–253 (in Chinese).
- [34] 王鹏飞, 徐松林, 李志斌, 等. 微结构对多孔材料应变率效应影响的机理研究[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 285–291.
- WANG P F, XU S L, LI Z B, et al. Effect of micro-structure on the strain rate of cellular materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(3): 285–291 (in Chinese).
- [35] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 531–570.
- [36] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of periodic planar lattices under uniaxial compression. Part II: dynamic crushing based on finite element simulation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(10/11): 1231–1241.
- [37] WU E, JIANG W S. Axial crush of metallic honeycombs[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 439–456.
- [38] NIA A A, SADEGHI M Z. An experimental investigation on the effect of strain rate on the behaviour of bare and foam-filled aluminium honeycombs[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2013, 52: 748–756.
- [39] TAO Y, CHEN M J, PEI Y M, et al. Strain rate effect on mechanical behavior of metallic honeycombs under out-of-plane dynamic compression[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2015, 82(2): 021007.
- [40] LIM T C. Auxetic materials and structures[M]. Singapore: Springer, 2015.
- [41] SCARPA F, TOMLINSON G. Theoretical characteristics of the vibration of sandwich plates with in-plane negative Poisson's ratio values[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 230(1): 45–67.
- [42] 邸旭, 茅献彪. 对边简支负泊松比蜂窝夹层板的弯曲自由振动[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(4): 910–920.
- DI K, MAO X B. Free flexural vibration of honeycomb sandwich plate with negative Poisson's ratio simply supported on opposite edges[J]. *Acta Materialia Sinica*, 2016, 33(4): 910–920 (in Chinese).
- [43] REDDY J N. Analysis of functionally graded plates[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2015, 47(1/2/3): 663–684.
- [44] 董宝娟, 张君华. 功能梯度负泊松比蜂窝夹层板的振动特性[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(21): 110–116.
- DONG B J, ZHANG J H. Vibrations of functional graded honeycomb sandwich plate with negative Poisson's ratio[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(21): 110–116 (in Chinese).
- [45] 苏家煜. 二维多孔材料声学性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- SU J Y. Investigation of acoustical properties of two-dimensional porous materials[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008 (in Chinese).

[46] 负昊, 邓子辰, 朱志韦. 弹性波在星形节点周期结构蜂窝材料中的传播特性研究 [J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(8): 814–820.
YUN H, DENG Z C, ZHU Z W. Bandgap properties of periodic 4-point star-shaped honeycomb materials with negative Poisson's ratios[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(8): 814–820 (in Chinese).

[47] 孙修展. 点阵材料中应力波的频散特性分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
SUN X Z. Dispersion properties of stress waves in lattice materials[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013 (in Chinese).

[48] 陈绍婷. Kagome 蜂窝中应力波的频散特性分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
CHEN S T. Dispersion properties of stress waves in Kagome honeycomb[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012 (in Chinese).

[49] RUZZENE M, MAZZARELLA L, TSOPELAS P, et al. Wave propagation in sandwich plates with periodic auxetic core[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(9): 587–597.

[50] LIU X F, WANG Y F, WANG Y S, et al. Wave propagation in a sandwich plate with a periodic composite core[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2014, 16(3): 319–338.

[51] 孟俊苗. 蜂窝材料弹性波频散关系分析及带隙特性微结构设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
MENG J M. Analysis on the elastic wave dispersions and micro-structural design of cellular materials[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016 (in Chinese).

[52] LIM J Y, BART-SMITH H. Theoretical approach on the dynamic global buckling response of metallic corrugated core sandwich columns[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, 65: 14–31.

[53] 赵转, 李世强, 刘志芳. 冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 064102-1–064102-6.
ZHAO Z, LI S Q, LIU Z F. Stress waves propagation in layered graded cellular materials under dynamic crush loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 064102-1–064102-6 (in Chinese).

[54] DAYYANI I, SHAW A D, FLORESC E I S, et al. The mechanics of composite corrugated structures: a review with applications in morphing aircraft[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 358–380.

[55] 刘颖, 张新春. 胞元微拓扑结构对蜂窝材料面内冲击性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(6): 494–502.
LIU Y, ZHANG X C. Influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic properties of honeycombs[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(6): 494–502 (in Chinese).

[56] 张新春, 祝晓燕, 李娜. 六韧带手性蜂窝结构的动力学响应特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(8): 1–7, 26.
ZHANG X C, ZHU X Y, LI N. A study of the dynamic response characteristics of hexagonal chiral honeycombs[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(8): 1–7, 26 (in Chinese).

[57] 卢子兴, 王欢, 杨振宇, 等. 星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1893–1900.
LU Z X, WANG H, YANG Z Y, et al. In-plane dynamic crushing of star-arrowhead honeycomb structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1893–1900 (in Chinese).

[58] 胡玲玲, 蒋玲. 胞孔构型对金属蜂窝动态力学性能的影响机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(1): 41–46.
HU L L, JIANG L. Mechanism of cell configuration affecting dynamic mechanical properties of metal honeycombs[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(1): 41–46 (in Chinese).

[59] 刘叶花, 谢桂兰, 曹尉南, 等. 铝蜂窝胞元结构参数对其宏观等效表征性能的影响 [J]. *材料工程*, 2011(11): 29–34.
LIU Y H, XIE G L, CAO W N, et al. Effects of aluminum honeycomb cell structural parameters on its macro-equivalent characteristic properties[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(11): 29–34 (in Chinese).

[60] 刘勇鑫, 秦睿贤, 陈秉智, 等. 不同厚跨比铝蜂窝吸能特性数值分析及优化 [J]. *大连交通大学学报*, 2020, 41(2): 56–60.
LIU Y X, QIN R X, CHEN B Z, et al. Numerical analysis and optimization of aluminum honeycomb with different thickness to length ratio[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2020, 41(2): 56–60 (in Chinese).

[61] 何强, 马大为, 张震东, 等. 功能梯度蜂窝材料的面内冲击性能研究 [J]. *工程力学*, 2016, 33(2): 172–178.
HE Q, MA D W, ZHANG Z D, et al. Research on the in-plane dynamic crushing of functionally graded honeycombs[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(2): 172–178 (in Chinese).

[62] ZHU G H, LI S F, SUN G Y, et al. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 109: 377–389.

[63] GUO X E, GIBSON L J. Behavior of intact and damaged honeycombs: a finite element study[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41(1): 85–105.

[64] SILVA M J, GIBSON L J. The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39(5): 549–563.

[65] CHEN C, LU T J, FLECK N A. Effect of imperfec-

- tions on the yielding of two-dimensional foams[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1999, 47(11): 2235–2272.
- [66] ZHENG Z J, YU J L, LI J R. Dynamic crushing of 2D cellular structures: a finite element study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 650–664.
- [67] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 集中缺陷对蜂窝材料面内动力学性能的影响[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 239–244.
- ZHANG X C, LIU Y, ZHANG Z M. Effects of concentrated defects on the in-plane dynamic properties of honeycombs[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 239–244 (in Chinese).
- [68] YIN S, WU L Z, NUTT S. Stretch-bend-hybrid hierarchical composite pyramidal lattice cores[J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 153–159.
- [69] 易长炎, 柏龙, 陈晓红, 等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应用现状综述[J]. *功能材料*, 2017, 48(10): 10055–10065.
- YI C Y, BAI L, CHEN X H, et al. Review on the metal three-dimensional lattice topology configurations research and application status[J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(10): 10055–10065 (in Chinese).
- [70] 万礼赞. 密度驱动的非均匀点阵填充建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- WAN L Z. Research on the density-driven inhomogeneous lattice filling modeling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 (in Chinese).
- [71] 冯晓伟, 李俊承, 常敬臻, 等. 氧化铝陶瓷受冲击压缩破坏的微观机理研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2472–2479.
- FENG X W, LI J C, CHANG J Z, et al. Investigation on mesoscale failure mechanism of alumina under shock compression[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12): 2472–2479 (in Chinese).
- [72] 程振, 方秦, 张锦华, 等. 闭孔泡沫金属三维细观模型建模方法[J]. *工程力学*, 2017, 34(8): 212–221.
- CHENG Z, FANG Q, ZHANG J H, et al. Mesoscopic methodology for the three-dimensional modelling of closed-cell metallic foam[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 212–221 (in Chinese).
- [73] 夏志成, 张建亮, 王曦浩, 等. 钢板夹芯防爆墙防护效应的影响因素[J]. *工程爆破*, 2016, 22(6): 1–7.
- XIA Z C, ZHANG J L, WANG X H, et al. Influencing factors of protective effect of steel plate sandwich explosion proof wall[J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(6): 1–7 (in Chinese).
- [74] SANTOSA S, WIERZBICKI T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam[J]. *Computers & Structures*, 1998, 68(4): 343–367.
- [75] 陈智勇, 程广伟, 徐颖强, 等. 防弹车辆用陶瓷复合装甲研究[J]. *中国陶瓷*, 2018, 54(11): 1–8.
- CHEN Z Y, CHENG G W, XU Y Q, et al. Study on ceramic composite armors for bullet proof vehicle[J]. *China Ceramics*, 2018, 54(11): 1–8 (in Chinese).
- [76] 何煌, 张明, 曾首义. 连结状况对陶瓷复合装甲抗弹性能的影响[J]. *兵工自动化*, 2006, 25(12): 35–37.
- HE H, ZHANG M, ZENG S Y. Effect of target insulation condition on the anti-penetration property of ceramic composite armour[J]. *Ordinance Industry Automation*, 2006, 25(12): 35–37 (in Chinese).
- [77] HUSSEIN R D, RUAN D, LU G X, et al. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 110: 140–154.
- [78] 薛启超. 聚氨酯弹性体钢夹层板的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- XUE Q C. Mechanical properties study for sandwich plate system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013 (in Chinese).
- [79] 翟文, 戴平仁, 何金迎, 等. 聚脲-钢板夹层结构抗爆性能研究[J]. *兵工自动化*, 2018, 37(10): 65–69.
- ZHAI W, DAI P R, HE J Y, et al. Study on anti-detonation performance of polyurea steel sandwich structure[J]. *Ordinance Industry Automation*, 2018, 37(10): 65–69 (in Chinese).
- [80] 周宏元, 贾昆程, 王小娟, 等. 负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 2005–2014.
- ZHOU H Y, JIA K C, WANG X J, et al. In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 2005–2014 (in Chinese).
- [81] WADLEY H N G, DHARMASENA K P, O'MASTA M R, et al. Impact response of aluminum corrugated core sandwich panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 62: 114–128.
- [82] LIU Q, FU J, WANG J S, et al. Axial and lateral crushing responses of aluminum honeycombs filled with EPP foam[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 130: 236–247.
- [83] ZHOU X Q, WANG L, YU D Y, et al. Dynamic effective equivalent stiffness analysis on the periodical honeycomb reinforced composite laminated structure filled with viscoelastic damping material[J]. *Composite Structures*, 2018, 193: 306–320.
- [84] NAKAMOTO H, ADACHI T, ARAKI W. In-plane impact behavior of honeycomb structures filled with linearly arranged inclusions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(8): 1019–1026.
- [85] CHEN W G, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption[J]. *Thin-Walled Structures*,

2001, 39(4): 287–306.

[86] 闫晓刚, 张勇, 林继铭, 等. 新颖圆形多胞复合填充结构的耐撞性 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2166–2176.

YAN X G, ZHANG Y, LIN J M, et al. Crashworthiness for novel circular multi-cell composite filling structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(8): 2166–2176 (in Chinese).

[87] ZHOU X Q, WANG L. Low-velocity impact response of viscoelastic material filled FG honeycomb reinforced laminate plate in hygrothermal environments[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 255–271.

[88] NAKAMOTO H, ADACHI T, ARAKI W. In-plane impact behavior of honeycomb structures randomly filled with rigid inclusions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 73–80.

[89] ALKHADER M, ABUZAIID W, ELYOUSSEF M, et al. Localized strain fields in honeycomb materials with convex and concaved cells[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2020, 80: 103890.

[90] 李开妍, 王晗, 郝海. 蜂窝铝材料的铸造工艺和压缩性能研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40(8): 772–777.

LI K Y, WANG H, HAO H. Study on casting process and compressive property for aluminum honeycomb[J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(8): 772–777 (in Chinese).

[91] 张安宁, 童小燕, 刘效云, 等. 不同速率下蜂窝纸板静态压缩特性的试验研究 [J]. 包装工程, 2004, 25(3): 19–20.

ZHANG A N, TONG X Y, LIU X Y, et al. The research on static compression properties of honeycomb paperboard at different compression rates[J]. *Packaging Engineering*, 2004, 25(3): 19–20 (in Chinese).

[92] 张梗林. 宏观负泊松比效应蜂窝基座及防护结构减振与抗爆性能设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

ZHANG G L. Vibration isolation and anti-blast analysis and design of re-entrant honeycomb structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (in Chinese).

[93] HÖNIG A, STRONGE W J. In-plane dynamic crushing of honeycomb. Part I: crush band initiation and wave trapping[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(8): 1665–1696.

[94] HÖNIG A, STRONGE W J. In-plane dynamic crushing of honeycomb. Part II: application to impact[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(8): 1697–1714.

[95] 王二恒, 李剑荣, 虞吉林, 等. 硅橡胶填充多孔金属材料静态压缩力学行为研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(5): 575–580.

WANG E H, LI J R, YU J L, et al. Investigation of static compression behavior of cellular materials with silicate rubber filler[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2004, 34(5): 575–580 (in Chinese).

[96] PRAKASH O, BICHEBOIS P, BRECHET Y, et al. A note on the deformation behaviour of two-dimensional model cellular structures[J]. *Philosophical Magazine A*, 1996, 73(3): 739–751.

[97] 井玉安, 韩静涛, 果世驹, 等. 普碳钢蜂窝夹芯板的面外压缩性能 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1234–1240.

JING Y A, HAN J T, GUO S J, et al. Out-of-plane compressive characteristics of brazing mild steel honeycomb structures[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(12): 1234–1240 (in Chinese).

[98] 王行宁. 纸夹芯-聚乙烯泡沫复合层状结构的面外压缩本构模型研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

WANG X N. Constitutive model for composite layered structures with paper sandwich core and polyethylene foam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019 (in Chinese).

[99] 肖锋, 谌勇, 章振华, 等. 三明治结构爆炸冲击动力学研究综述 [J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(6): 1–7.

XIAO F, CHEN Y, ZHANG Z H, et al. Review of research of blast impact of sandwich structures[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32(6): 1–7 (in Chinese).

[100] 李典, 郑羽, 陈长海, 等. 空爆载荷下舰船典型结构损伤研究进展 [J]. 船舶力学, 2020, 24(4): 543–557.

LI D, ZHENG Y, CHEN C H, et al. Review on damage of typical ship protective structures under explosion load[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(4): 543–557 (in Chinese).

[101] FLECK N A, DESHPANDE V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(3): 386–401.

[102] 张亭亭, 田正东, 陈莹玉. 近场水下爆炸作用下金属夹芯结构的动响应分析 [J]. 船舶, 2016, 27(3): 45–52.

ZHANG T T, TIAN Z D, CHEN Y Y. Dynamic response of metal sandwich structure under near-field water-blast loading[J]. *Ship & Boat*, 2016, 27(3): 45–52 (in Chinese).

[103] 王果, 张延昌. Y 型激光焊接夹层板抗爆性能分析 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34(9): 68–75.

WANG G, ZHANG Y C. Analysis of the anti-shock capacity of laser-welded corrugated-Y type-core sandwich panels[J]. *Ship Science and Technology*, 2012, 34(9): 68–75 (in Chinese).

[104] 杨森, 冯淞, 王顺尧, 等. 爆炸冲击作用下铝蜂窝板失稳研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 193–201.

YANG S, FENG S, WANG S Y, et al. Instability of aluminum honeycomb sandwich panel under blast loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017,

- 31(2): 193–201 (in Chinese).
- [105] 李世强, 李鑫, 吴桂英, 等. 梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载作用下的动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 333–339.
- LI S Q, LI X, WU G Y, et al. Dynamic response of functionally graded honeycomb sandwich plates under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 333–339 (in Chinese).
- [106] 周昊, 郭锐, 刘荣忠. 碳纤维增强复合材料方形蜂窝夹层结构水中冲击波作用下的能量特性数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(增刊 1): 84–90.
- ZHOU H, GUO R, LIU R Z. Numerical simulation on energy absorbing properties of carbon fiber reinforced composite sandwich plates with square honeycomb cores subjected to underwater shock waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(Supp 1): 84–90 (in Chinese).
- [107] 张振华, 牛闯, 钱海峰, 等. 六层金字塔点阵夹芯板结构在水下近距爆炸载荷下的冲击实验 [J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(4): 51–58, 66.
- ZHANG Z H, NIU C, QIAN H F, et al. Impact experiment of six-layer pyramidal lattices sandwich panels subjected to near field underwater explosion[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(4): 51–58, 66 (in Chinese).
- [108] 陈攀. 填充超弹性材料夹层板的抗爆性能研究 [J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(9): 24–30.
- CHEN P. The research on anti-shock capability of sandwich plate with hyperelastic material[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(9): 24–30 (in Chinese).
- [109] 顾文彬, 徐景林, 刘建青, 等. 多层泡沫铝夹芯板的抗爆性能 [J]. *含能材料*, 2017, 25(3): 240–247.
- GU W B, XU J L, LIU J Q, et al. Blast-resistance performances of multilayers aluminum foam sandwich panels[J]. *Chinese Journal of Energetic materials*, 2017, 25(3): 240–247 (in Chinese).
- [110] CAI S P, LIU J, ZHANG P, et al. Dynamic response of sandwich panels with multi-layered aluminum foam/UHMWPE laminate cores under air blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 138: 103475.
- [111] 赵延杰, 郝轶, 刘建湖, 等. 水下接触爆炸作用下泡沫夹芯板耗能机理研究 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 13–22.
- ZHAO Y J, HAO Y, LIU J H, et al. Energy dissipation mechanism of foam sandwich plate subjected to contact underwater explosion[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 13–22 (in Chinese).
- [112] 朱易, 黄正祥, 祖旭东, 等. 爆炸载荷下蜂窝夹层复合结构吸能特性研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(3): 194–198.
- ZHU Y, HUANG Z X, ZU X D, et al. Research on energy absorption properties of honeycomb sandwich composite structure under explosive load[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Rockets and Guidance*, 2014, 34(3): 194–198 (in Chinese).
- [113] 苏罗川, 宜晨虹, 刘文杰, 等. 轻质抗侵彻材料及结构研究现状 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(1): 157–167.
- SU L C, YI C H, LIU W J, et al. Development of lightweight ballistic armor materials and structures[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(1): 157–167 (in Chinese).
- [114] QI C, YANG S, WANG D, et al. Ballistic resistance of honeycomb sandwich panels under in-plane high-velocity impact[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 892781.
- [115] 蒋欣程. 双箭头蜂窝夹层式军车装甲的防弹分析与优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- JIANG X C. Analysis and optimization of the ballistic resistance performance of the double arrowhead sandwich military vehicle armor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [116] WANG Y L, YU Y, WANG C Y, et al. On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square, triangular and circular honeycomb panels[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 173: 105402.
- [117] 何飞翔. 多孔金属夹芯结构的抗高速侵彻数值模拟分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- HE F X. Numerical simulation on the high-speed penetration resistance of porous metal sandwich structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013 (in Chinese).
- [118] 毕广剑, 尹建平, 王志军. 混合双层蜂窝夹层结构抗侵彻性能分析 [J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(6): 73–76.
- BIG J, YIN J P, WANG Z J. Anti-penetration performance analysis of hybrid double-layer honeycomb sandwich structure[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(6): 73–76 (in Chinese).
- [119] 冯阳. 泡沫铝夹芯板细观结构及抗侵彻能力研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
- FENG Y. Research on meso-structure and anti-penetration capability of aluminum foam sandwich[D]. Taiyuan: North University of China, 2016 (in Chinese).
- [120] 徐国军. 点阵金属陶瓷复合材料抗侵彻性能研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- XU G J. Study on Anti-penetration property of the lattice metal ceramic composite[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [121] 张志倩, 赵太勇, 王昭滨, 等. 杀爆战斗部联合作用场的毁伤效能研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(1): 64–67, 82.
- ZHANG Z Q, ZHAO T Y, WANG Z B, et al. Re-

search on the damage efficiency of the joint an action field[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(1): 64–67, 82 (in Chinese).

[122] 李典, 侯海量, 朱锡, 等. 破片群侵彻纤维增强层合板破坏机理及穿甲能力等效方法 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(4): 707–716.

LI D, HOU H L, ZHU X, et al. Study of the failure mechanism of fiber reinforced composite laminates subjected to fragment cluster penetration and the equivalent method for armor piercing ability of fragment cluster[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(4): 707–716 (in Chinese).

[123] LI L, ZHANG Q C, ZHANG R, et al. A laboratory experimental technique for simulating combined blast and impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103382.

[124] 姚学锋, 方竞, 熊春阳. 爆炸应力波作用下裂纹与孔洞的动态聚焦散线分析 [J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(3): 231–236.

YAO X F, FANG J, XIONG C Y. Dynamic caustics analysis of crack and hole under the explosive stress wave[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(3): 231–236 (in Chinese).

[125] 段新峰, 程远胜, 张攀, 等. 冲击波和破片联合作用下 I 型夹层板毁伤仿真 [J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(6): 45–59.

DUAN X F, CHENG Y S, ZHANG P, et al. Numerical analysis of the damage on I-core sandwich panels subjected to combined blast and fragment loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(6): 45–59 (in Chinese).

[126] MOURITZ A P. Advances in understanding the response of fibre-based polymer composites to shock waves and explosive blasts[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125: 105502.

[127] 蔡林刚, 杜志鹏, 李晓彬, 等. 爆炸冲击波与破片联合作用下泡沫夹芯板的毁伤特性研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(2): 316–320.

CAI L G, DU Z P, LI X B, et al. Study on damage characteristic of foam sandwich panel under combined action of explosion shock wave and fragments[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(2): 316–320 (in Chinese).



(上接第 85 页)

[28] 陈利源, 刘燕红, 刘伯运, 等. 顶部开口舱室火灾特性的数值模拟研究 [J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(4): 139–143.

CHEN L Y, LIU Y H, LIU B Y, et al. Numerical analysis of fire characteristics in ship cabin with ceiling vent[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(4): 139–143 (in Chinese).

[29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249-2017[S]. Beijing: China Plans Publishing House, 2017.

[30] 潘文磊. 骨骼定量超声检测关键技术及其声学效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

PAN W L. Research on key technique of bone quantitative ultrasound measurement and its acoustic behavior[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).

[31] 刘长帅. 铁路隧道底部结构隆起变形及其工程对策研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

LIU C S. Study on the heave deformation of the bottom of railway tunnel and engineering countermeasures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016 (in Chinese).

[32] 中国船级社. 钢质海船入级规范 [S/OL]. (2012-04-14)[2020-05-25]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/font/fontAction!article.do?articleId=4028e3d67138e2fb017177c0926602af>.

China Classification Society. Code for classification of steel sea going vessels [S/OL]. (2012-04-14)[2020-05-25]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/font/fontAction!article.do?articleId=4028e3d67138e2fb017177c0926602af> (in Chinese).