

Progress of Anti-Explosion and Anti-Impact Material Composite Structure

Yinsuo Dai, Jianhua Wu, Huadong Gong, Naishu Zhu

College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: ysdai@163.com

Received: Jun. 30th, 2016; accepted: Jul. 14th, 2016; published: Jul. 21st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on material composition structure and its effects on impact performance, the literature of anti-explosion and impact composite structure design and research is summarized. The design, technical feature and efficiency of composition structure based on cement concrete, metal and organic materials respectively are summarized, especially introducing the two-layer and three-layer structures. The paper may provide a technical reference for all kinds of studies and designs about the anti-explosion and anti-impact structure of national defense engineering, civil air defense engineering, as well as civil and industrial buildings.

Keywords

Anti-Explosion, Anti-Impact, Material Composition Structure, Progress

爆炸、冲击防护材料复合结构研究进展

戴银所, 邬建华, 龚华栋, 朱乃姝

解放军理工大学国防工程学院, 江苏 南京
Email: ysdai@163.com

收稿日期: 2016年6月30日; 录用日期: 2016年7月14日; 发布日期: 2016年7月21日

摘要

本文从材料组成结构及其对性能影响的规律出发, 总结了国内外大量关于抗爆炸、冲击材料复合结构的

设计和研究,系统介绍了由水泥混凝土、金属、有机材料等基体材料组成的复合结构的设计方法、特点和及其防护效果,重点介绍两层材料组合结构和三层材料组合结构;期望能够为有抗爆炸、抗冲击要求的各类国防工程、人防工程,以及民用和工业建筑进行防护材料和结构的研制提供参考。

关键词

抗爆炸, 抗冲击, 材料复合结构, 进展

1. 引言

在工程应用中,使用单一材料作为抗爆炸、冲击的防护结构,很难实现既减少高速冲击载荷对结构的破坏,又有效衰减冲击波的目的。通过外层采用高强材料,夹层为缓冲吸能材料的多层材料复合结构可以达到抗爆炸、冲击性能目的,即通过刚性材料和柔性材料的组合实现的抗爆炸、冲击效果[1],组合体可以发挥单体材料优势,达到取长补短,增强抗爆效果的目的。高强材料主要有各类高强度混凝土、金属板材等,夹层材料主要为多孔材料或各类柔性材料。

2. 两层材料组合结构

2.1. 钢板-钢筋混凝土组合结构

在混凝土板的后方安装一块薄钢板,由于膜力效应而明显减小其侵彻深度,尽管在混凝土内部仍有损伤破坏,但是不容易发生震塌或崩落现象。压型钢板-方钢管钢筋混凝土组合结构能够降低结构变形,防止底部混凝土过早开裂,同时具有较高的强度储备,是一种比较理想的抗爆炸防护结构[2] [3],同时可以在其箱形结构中加入橡胶等吸能材料。

2.2. 泡沫铝-钢筋混凝土板组合结构

袁林等[4]对泡沫铝-钢筋混凝土板组合结构进行抗爆炸冲击研究,结果表明随着泡沫铝防护层厚度的增加,钢筋混凝土板的挠度变形显著减小,受到的冲击加速度幅值衰减较大,泡沫铝防护层能够有效提高钢筋混凝土板的抗爆性能,且其厚度存在一个合理的设计值。

2.3. 泡沫铝和普通钢板组合结构

边小华等[5] [6]将泡沫铝和普通钢板组合起来作为一种新型防护结构,与普通钢板防护门相比,其峰值压力大幅度降低,泡沫铝能有效地降低爆炸冲击波的峰值压力。孙建华等[7]利用自行设计的瓦斯爆炸实验管道,对不同参数的金属丝网、泡沫陶瓷及二者组合体的抑爆效果分别进行了实验研究,结果表明组合体衰减爆炸超压效果优于各自单体,抑爆材料的损坏程度明显降低。

2.4. 钢管-填充组合结构

刘新让等[8]采用有限元软件分析了3种不同夹芯圆筒在不同爆炸载荷作用下的动力响应和5种不同夹芯圆筒的抗爆性能,研究结果表明夹芯圆筒都优于相同重量的实体圆筒;对于夹芯圆筒,内面板厚度应不大于外面板厚度,这样能在降低夹芯圆筒整体变形的同时发挥泡沫铝芯层的吸能优势。李顺波等[9]对不同壁厚的钢管泡沫铝填充结构进行了数值模拟,并和经验公式计算结果对比,发现水下爆炸冲击波压力值和经验公式计算值二者接近,随着壁厚的增加,钢管抗变形能力提高,泡沫铝中的压力和动能不断减小。程涛等[10]采用数值模拟方法研究了低密度泡沫铝填充薄壁方钛管和圆钛管在匀速冲击载荷作用

下的瞬态吸能特性,发现泡沫铝填充方钛管的吸能效果好于圆钛管,被泡沫铝填充的方管的屈曲波长变短,圆管则与之相反。程涛、罗昌杰等[11][12]将泡沫铝填充在多边形金属管中进行研究,发现金属壳都起主导作用,不同的几何形状和结构对填充管的能量吸收率及吸能分布有着显著的影响;随着壁厚的增加,泡沫铝吸收的能量越来越小,因此在设计钢管泡沫铝组合结构时,需要设计合理的壁厚来实现钢管和泡沫铝都发挥其最大的抗力。

甄建伟等[13]对蜂窝增强泡沫塑料进行了准静态压缩试验,计算不同参数时的应力-应变曲线,结果表明,在相同条件下,所有复合结构的应力均大于蜂窝与泡沫塑料的应力之和,随着蜂窝孔格边长的减小和试样厚度的增大,复合效应更加明显;在此基础上建立了蜂窝增强泡沫塑料复合结构的仿真模型。

2.5. 泡沫铝填充柔性材料组合结构

2.5.1. 泡沫铝填充环氧树脂

将硅橡胶改性环氧树脂填充到泡沫铝中,该复合材料具有非常好的吸能特性,可作为一种新型的高性能吸能防护材料。谢永亮等[14]通过静态压缩试验表明,此时泡沫铝的平台屈服阶段明显抬升。

2.5.2. 泡沫铝填充硅橡胶

林森等[15][16]以硅橡胶填充开孔泡沫铝,以铝管和钢管为面板制备层合管,研究发现该复合结构具有更高的屈曲褶皱载荷,并使屈曲褶皱的产生滞后,平台区更长,因而其吸能性能得到了提高,且层合钢管结构比层合铝管更明显。

2.5.3. 泡沫铝填充聚氨酯

齐明思、谢卫红等[17]-[19]发现在开孔泡沫铝中填充聚氨酯后,其屈服强度和压缩应变显著增加,而且应力应变曲线出现明显的抖动;随着应变的不断增大,应力也逐渐增加。谢卫红等[20]利用霍普金森装置进行了0.3 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa三种气压下的动态冲击实验,通过对吸能曲线和理想吸能效率曲线的分析,发现其吸能特性有了很大程度的改善。杨益等[21]发现利用聚氨酯泡沫铝、聚氨酯蜂窝纸板这样的缓冲材料作为吸能层,也可以有效防止或削弱冲击波。

3. 三层材料组合结构

夹层板结构一般由两层高强度薄面板和中间承载能力相对较弱的轻质柔性芯材通过焊接或胶接而成,面层通常采用铝、铜、钢等金属材料、陶瓷、硬塑料、玻璃钢等,芯材通常采用泡沫塑料,波纹金属薄片,蜂窝金属薄片、聚合物、石棉等[22][23]。调整上下面板的距离,可增大结构的截面惯矩,提高弯曲刚度,使面板在承受应力时能较好地保持弹性稳定性。芯材形式有泡沫、蜂窝、八面体网架、棱柱、波浪型等。其中,泡沫和蜂窝是应用最早且最广泛的两种形式,而桁架、四棱锥和折板等在轻质、导热性能上具有独特的优点,而点阵结构、六角凹孔网状蜂窝则是近年来兴起的新一代多功能材料。

3.1. 中间为多孔材料组合结构

在多孔材料两面组合高强度材料,形成复合抗爆结构,实现防冲击、防爆和衰减冲击波的功能[24],当爆炸冲击波作用到复合结构时,多孔材料产生塑性变形被压实,能够大大地削弱应力波的强度[25]。

3.1.1. 金属多孔材料

泡沫铝夹芯材料作为一种潜在的防护材料,不仅应具备高的抗冲击能力,还应具有一定的抗侵彻能力,其抗侵彻性能主要取决于面板的强度以及面板和芯材的结合强度,国内外学者对不同面板的泡沫铝夹芯材料的抗侵彻性能进行了大量的研究。寇玉亮等[26]从理论上分析泡沫铝三明治板在单位冲量下,结

构的变形量及其他相关物理量与结构几何尺寸、材料属性之间的定性关系。杨飞等[27]采用有限元软件分析了面板厚度、芯层厚度、芯层相对密度及不同子弹形状对夹芯板抗侵彻性能的影响,以及能量耗散机制。康建功等[28]采用数值模拟方法分析了面板材料分别为工业纯铝与不锈钢的泡沫铝夹芯梁在不同爆炸荷载作用下的跨中位移与芯材压缩应变的差异,发现面板材料对泡沫铝夹芯梁的压缩应变影响较小。阎石和黎伟[29]分别对不加任何保护层、仅加一层钢板保护层、加钢板和泡沫铝复合保护层三种结构在爆炸冲击荷载下的空气冲击波超压特性进行数值模拟。韩守红和吕振华[30]从变形模式、运动响应和吸能特性等方面对比研究了6种夹层结构的动态响应特性进行了有限元分析发现铝泡沫芯材密度对夹层结构的动态响应影响较大。胡亚峰等[31]采用数值计算模型研究了爆炸载荷作用下,应力波在泡沫铝夹层三明治板中的传播规律,对其缓冲吸能、衰减应力波特性进行了对比分析,发现在总体密度相同的情况下,梯度结构具有更好的缓冲效果。张培文等[32]对前、后面板厚度不同时多孔金属夹芯板在爆炸载荷作用下的动力响应进行数值分析,通过对炸药量、面板厚度及芯层厚度的不同组合,分析结构在爆炸载荷作用下的变形模式及能量吸收规律。

张明华等[33]发现在不同子弹冲击速度下铝板-泡沫铝夹芯板相对于纯铝板具有不同的破坏形态;宋延泽等[34]分析了子弹冲量、面板厚度、芯层厚度及不同芯层类型对夹芯板抗冲击性能的影响;H. Zhao等[35]进行了冲击荷载下铝板泡沫铝夹芯板初始反向贯穿试验,结果表明,泡沫铝主要承受的是局部压应力,在顶板破坏前,泡沫铝产生应变硬化。亓昌等[36]研究了铝合金面板-梯度铝泡沫芯体-装甲钢背板夹层结构的抗爆性能,发现芯体密度梯度排布的铝泡沫夹层结构的抗爆性能明显优于等质量的均匀密度铝泡沫夹层结构,多目标优化可进一步提高结构的综合抗爆性能。任新见等[37]对钢板-泡沫金属-钢板叠合成的三明治结构的抗爆机理进行分析,指出波的反射、散射、干涉所引起的边界效应、会聚效应是其抗爆性能得到提高的主要原因。

3.1.2. 水泥基多孔材料

钢板夹芯混凝土组合结构具有结构受力合理、承载力高、刚度大、抗震性能和动力性能好、截面形式灵活、施工快速方便等优点[38]。张景飞等[39]研究发现泡沫混凝土结构具有明显的吸能作用,随着密度的减小,经过该层后爆炸冲击波峰值应力、应变急剧衰减;其复合防护结构的抗爆吸能是以牺牲泡沫混凝土来保护内层结构的。

3.1.3. 聚合物多孔材料

聚合物泡沫是一种最常见的芯材,主要有聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚氨酯、聚醚酰亚胺等材料。王成国等[40]研究了用胶结方法制备的钢板-高聚物-钢板层压复合材料,结果表明,增加钢板表面的粗糙度和适当加大黏合压力,可改善层压复合材料的成型性。W.J. Cantwell等[41]用落锤冲击试验研究了低速冲击荷载下泡沫聚合物和泡沫金属夹芯材料的动态响应特性,发现泡沫聚合物夹芯结构的破坏模式包括面材剥离、局部出现剪切裂纹、夹芯破碎等几种形式。范俊奇等[42]采用钢筋混凝土及钢板混凝土结构作为上下面板,中间泡沫夹层采用硬质聚氨酯泡沫,来调整爆炸荷载在结构中的分布形式,化局部荷载为整体作用荷载,以达到消减爆炸波减轻结构破坏的目的。

3.2. 中间为蜂窝结构组合结构

蜂窝夹芯板是在两层面板之间夹一层蜂窝夹芯构成;面板一般承受弯曲变形,是主要的受力部位,芯材将两个面层连接成整体,共同承受外载。主要类型有铝面板-铝蜂窝夹芯结构、碳纤维面板-铝蜂窝夹芯结构、玻璃钢面板-玻璃钢蜂窝夹芯结构等。蜂窝纸板结构上下为两层面纸,中间是蜂巢式的空心夹层结构,再在空心夹层中填充聚氨酯泡沫,也是一种新型的复合结构缓冲材料。

Yoshiaki Yasui [43]研究了均匀型和锥型蜂窝夹芯板的动态冲击压缩行为,从吸能的角度来看,锥形板效果更好。J. P. Dear 等[44]研究了用片状模塑料、热塑性玻璃毡和蜂窝夹芯板制备的夹芯材料,认为该材料结构可吸收更高冲击能量,具有轻质、刚性高的特点。陈长海等[45]首先利用有限元软件模拟夹层板在冲击波载荷作用下的响应,然后从能量吸收的角度分析夹层板的抗爆抗冲击性能,得到一种优化的夹层板模型。Xue Zhenyu 等[46]分别对圆锥桁架、方形蜂窝和折叠平板三种夹芯平板结构的抗冲击能力进行了比较分析。杨永祥和张延昌[47]认为蜂窝式夹芯层结构在横向冲击载荷作用下具有稳定的压溃载荷、较长的有效行程,表现出优良的吸能特性;结构密度是影响结构耐撞性能的关键因素,夹芯层高度对结构的耐撞性影响不大。孙杰等[48]认为玻璃钢蜂窝夹芯复合材料是制作浅埋抗爆结构的理想材料。

3.3. 中间为异型结构的组合结构

异型夹芯材料具有可控的优化设计能力,可以设计成点阵夹芯、I型夹芯、O型夹芯、V型夹芯、波纹夹芯等结构类型。

Zenkert 和 Burman [49]对相同结构的夹芯板的比强度进行了研究,发现通过增加V型芯材的高度,在夹芯板质量增加很少的情况下,可以明显提高夹芯板的硬度和抗弯强度。D. D. Radford 等[50]对由不锈钢锥状夹芯、不锈钢波纹夹芯和泡沫铝合金组成的固定夹芯梁在冲击荷载下的响应进行了研究,试验发现锥形夹芯的夹芯梁抗冲击性能最差,但所有夹芯梁的抗冲击性能都要高于块体梁。郑华勇等[51]建立了3D-Kagome点阵夹芯板在理想冲击荷载作用下的分析模型,经优化设计后的夹芯板是一种刚度更大、抗冲击能力更强、能量吸收与耗散更多的新型轻结构。

金属夹层结构是一类由金属上、下面板以及诸如波纹型、蜂窝型、桁架型等金属夹芯,通过激光焊接技术连接成的一个整体夹层结构[52][53]。欧美等国已经在其性能、设计、制造等方面开展了大量研究工作;国内在这方面的研究工作目前还未形成体系,在理论计算、试验研究和工程应用上都还存在一定的差距。王果等[54]发现金属基折叠式夹层板具有优良的抗冲击性能,Y型激光焊接夹层板在水下爆炸冲击波载荷作用下,下面板发生膜拉伸变形,夹芯层发生压皱变形,对上面板起到缓冲作用,降低了上面板的损伤变形,改善了结构吸能效率,表现出优良的抗爆性能。Yueming Liang 等[55]进行了方形蜂窝、I-夹芯和波纹结构金属夹芯板承受水下爆炸试验,发现响应形式依赖于芯材压缩的相对时间和水中的气穴大小。易建坤等[56]分析了点阵金属夹芯结构抗爆炸冲击过程的理论分析模型、夹芯结构的变形失效形式、抗爆吸能特性和相关影响因素。

3.4. 其他夹层组合结构

吴刚等[57]提出一种FRP、轻质加气混凝土复合的新型夹层结构,结果表明该复合结构抗弯性能得到显著的提高。田志敏等[58]通过抗爆试验研究了拉筋增强夹芯复合结构的抗爆炸荷载能力和典型的破坏形态。秦花等[59]研究发现双层钢板夹心水泥纤维板的抗爆性能明显优于双层钢板夹心素混凝土板和双层钢板夹心泡沫板,迎爆面以压碎破坏为主,背爆面以拉伸破坏为主,中间层则出现了“层裂”现象。另外,空气夹层结构也是一种抗爆炸能力很强的结构,在重要建筑结构和人防结构中有着极其重要的用途[60]。

4. 多层组合结构

通过刚性材料与柔性材料的多层复合,更容易实现某种设计意图,但目前将三层以上的材料复合结构进行抗爆炸、冲击试验的研究文献较少,而主要是用于进行抗侵彻试验[61]。黄燕玲等[62]模拟了直径为8mm的圆柱形破片对钢/陶瓷/铝复合靶板的侵彻过程,分析侵彻过程中靶板的破坏机理,结果表明在

面密度一定时,减小面板厚度,增加陶瓷和铝背板厚度对复合靶板的抗弹性能有明显提高。

5. 纤维缠绕复合增强组合结构

将纤维缠绕在材料结构表面,能够改变爆炸荷载下结构的破坏模式,能够明显改善材料的动力性能。横向裹贴不仅约束内部材料结构的膨胀变形,而且其轴向承载力、抗剪切力得到很大提高,在爆炸载荷作用下会出现弯曲延性反应。Tonatiuh Rodriguez-Nikl 等[63]用准静态荷载模拟爆炸冲击作用于外包有碳纤维的钢筋混凝土柱,结果表明此时钢筋混凝土柱的破坏形式由剪切脆性破坏变为弯曲延性破坏。哈跃等[64]设计了 Whipple 防护结构,玄武岩纤维布按不同方案布置在结构中,研究发现其发生击穿破坏时,击穿孔处的纤维束产生的断裂和孔边处纤维束产生的变形消耗和吸收了撞击物的撞击能量。熊光晶等[65]进行了碳纤维布与高强玻璃纤维布复合加固混凝土梁的试验,发现 2 层高强玻璃纤维布与 1 层碳纤维布复合加固的承载力和延性要比 2 层碳纤维布加固的梁分别提高 7.8%及 10.9%,但刚度要比后者低 10%。鲍育明等[66]发现纤维布加固可以提高承载力 200%,在爆炸载荷作用下,挠度减少 40%~70%。

6. 小结

由刚性材料与柔性材料组成的多层复合材料,具有显著的技术优势,能够更容易地实现抗爆炸冲击、吸收能量、隔音、绝热等防护功能结构一体化的设计意图,但是多层复合材料结构在防护结构中的实际应用还较少,这是由于大部分夹芯材料还处于研究阶段,一些功能特性,尤其是动载作用下的响应还不是很清楚,将其应用于工程实践中存在较大的风险;另外,复合材料的性能与芯材和面板之间的连接方式有很大的关系,目前一般采用焊接和粘结的方式,由于芯材和面板材料种类不同,实现芯材和面板之间的牢固连接存在很大的困难,导致结构性能稳定性差。

基金项目

博士后科学基金项目(2014M562586);南京工业大学材料化学工程国家重点实验室开放课题基金项目(KL10-07)。

参考文献 (References)

- [1] 彭刚,王绪财,刘原栋,等. 复合材料层板的抗贯穿机理与模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 337-345.
- [2] 石少卿,张湘冀,尹平. 爆炸荷载作用下一种新型防护结构的静力分析[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 66-69.
- [3] 丁琳,刘洪波,王艳丽. 一种新型钢-混凝土组合结构的抗爆性能[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 665-668.
- [4] 袁林,龚顺风,金伟良. 含泡沫铝防护层钢筋混凝土板的抗爆性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 376-379.
- [5] 边小华,杨飞. 一种新型防护结构对爆炸冲击波的衰减研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(26): 55-56.
- [6] 边小华,石少卿,康建功,等. 泡沫铝对抗道口部爆炸冲击波的衰减特性初步研究[J]. 四川建筑科学研究院, 2006, 32(6): 31-33.
- [7] 孙建华,赵益,魏春荣,等. 金属丝网和泡沫陶瓷组合体抑制瓦斯爆炸的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1156-1161.
- [8] 刘新让,田晓耕,卢天健,等. 泡沫铝夹芯圆筒抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 166-173.
- [9] 李顺波,杨军,夏晨曦. 壁厚对泡沫铝填充钢管的抗爆性能数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 1014-1021.
- [10] 程涛,向宇,李健,等. 高速冲击泡沫铝填充管的瞬态分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 81-87.
- [11] 程涛,向宇,李健,等. 泡沫铝填充多棱管的吸能分析[J]. 振动与冲击, 2011, 3(9): 237-242.
- [12] 罗昌杰,刘荣强,邓宗全,等. 泡沫铝填充薄壁金属管塑性变形缓冲器吸能特性的试验研究[J]. 振动与冲击,

- 2009, 28(10): 26-29.
- [13] 甄建伟, 安振涛, 陈玉成, 等. 蜂窝增强泡沫塑料的静动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 223-238.
- [14] 谢永亮, 王瑞, 林振荣, 等. 泡沫铝/改性环氧树脂复合材料压缩力学性能的试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 49-51.
- [15] 林森. 硅橡胶填充泡沫铝吸能性能和层合梁抗弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 11.
- [16] Cheng, H.F. and Han, F.S. (2003) Compressive Deformation Behavior and Energy Absorbing Characteristic of Open Cell Alumium form Filled with Silicate Rubber. *Scripta Materialia*, **49**, 586-586.
[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00332-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00332-4)
- [17] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学实验[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 103-108.
- [18] Cheng, H.F., Huang, X.M., Xue, G.X., Li, J.R. and Han, F.S. (2004) Compressive Deformation Behavior and Energy Absorbing Characteristic of Open Cell Alumium form Filled with Elastic Filler. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **14**, 928-933.
- [19] 齐明思, 张晋宁, 杨卫, 等. 泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 6-9.
- [20] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 泡沫铝与聚氨酯泡沫铝吸能特性对比[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(2): 307-311.
- [21] 杨益, 李晓军, 郭彦朋. 夹芯材料发展及防护结构应用综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 91-96.
- [22] 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, 12: 1-7.
- [23] 周红. 冲击载荷下 SPS 夹层板系统损伤特性研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2013, 3.
- [24] 王宇新, 顾元宪, 孙明. 冲击载荷作用下多孔材料复合结构防爆理论计算[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 375-379.
- [25] 石少卿, 刘仁辉, 汪敏. 钢板-泡沫铝-钢板新型复合结构降低爆炸冲击波性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4): 143-147.
- [26] 寇玉亮, 陈常青, 卢天健. 泡沫铝率相关本构模型及其在三明治夹芯板冲击吸能特性的应用研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(3): 217-227.
- [27] 杨飞, 王志华, 赵隆茂. 泡沫铝夹芯板抗侵彻性能的数值研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(15): 3377-3382.
- [28] 康建功, 石少卿, 刘颖芳, 等. 不锈钢面板与铝面板泡沫铝夹芯梁的抗爆性能[J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(6): 1-5.
- [29] 阎石, 黎伟. 爆炸荷载下泡沫铝复合结构耗能性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1): 12-15.
- [30] 韩守红, 吕振华. 铝泡沫夹层结构抗爆炸性能仿真分析及优化[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1468-1474.
- [31] 胡亚峰, 顾文彬, 刘建青, 等. 应力波在泡沫铝夹层三明治板中传播规律的数值研究[J]. 爆破器材, 2014(5): 15-21.
- [32] 张培文, 李鑫, 王志华, 等. 爆炸荷载作用下不同面板厚度对泡沫铝夹芯板动力响应的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(5): 699-703.
- [33] 张明华, 赵恒义, 谌河水. 泡沫铝夹芯板动态抗侵彻性能的实验研究[J]. 力学季刊, 2008, 29(2): 241-247.
- [34] 宋延泽, 王志华, 赵隆茂, 等. 泡沫金属子弹冲击下多孔金属夹芯板动力响应研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(1): 1-7.
- [35] Zhao, H., Elnasri, I. and Girard, Y. (2007) Perforation of Aluminum Foam Core Sandwich Panels under Impact Loading—An Experimental Study. *International Journal of Impact Engineering*, **34**, 1246-1257.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.06.011>
- [36] 亓昌, 杨丽君, 杨姝. 梯度铝泡沫夹层结构抗爆性能仿真与优化[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 70-75.
- [37] 任新见, 张晓忠, 李世民. 钢板-泡沫金属-钢板叠合结构抗爆机理初探[J]. 爆破, 2009, 26(1): 25-28.
- [38] 夏培秀. 钢板夹芯混凝土组合梁力学性能与破坏机理研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012, 3.
- [39] 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, 2012(10): 10-12.
- [40] 王成国, 耿连敏, 李木森, 等. 钢板-高聚物-钢板层压复合材料的减振特性[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(2): 85-90.
- [41] Cantwell, W.J., Kiratisaevee, H. and Hazizan, A. (2005) The Low Velocity Impact Response of High-Performance Sandwich Structure. *WIT Transactions on Engineering Science*, **49**, 135-146.

- [42] 范俊奇, 辛凯, 宋红民, 等. 泡沫夹层在抗爆复合结构中作用的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 329-336.
- [43] Yasui, Y. (2000) Dynamic Axial Crushing of Multi-Layer Honeycomb Panels and Impact Tensile Behavior of the Component Members. *International Journal of Impact Engineering*, **24**, 659-671. [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00174-8)
- [44] Dear, J.P., Lee, H. and Brown, S.A. (2005) Impact Damage Processes in Composite Sheet and Sandwich Honeycomb Materials. *International Journal of Impact Engineering*, **32**, 130-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.02.005>
- [45] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 近距空爆载荷作用下双层防爆舱壁结构抗爆性能仿真分析[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 26-34.
- [46] Xue, Z. and John, W. (2004) Hutchinson. Constitutive Model for Quasi-Static Deformation of Metallic Sandwich Cores. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **61**, 2205-2238. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1142>
- [47] 杨永祥, 张延昌. 蜂窝式夹芯层结构横向耐撞性能数值仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2007, 21(4): 7-11.
- [48] 孙杰, 王飞, 谢文. 玻璃钢蜂窝夹层复合材料在抗爆结构设计中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001, 1(2): 19-21.
- [49] Zenkert, D. and Burman, M. (2011) Failure Mode Shifts during Constant Amplitude Fatigue Loading of GFRP/Foam Core Sandwich Beams. *International Journal of Fatigue*, **33**, 217-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.08.005>
- [50] Radford, D.D., Deshpande, V. and Fleek, N.A. (2005) The Use of Metal Foam Projectiles to Simulate Shock Loading on a Structure. *International Journal of Impact Engineering*, **31**, 1152-1171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.07.012>
- [51] 郑华勇, 吴林志, 马力, 等. Kagome 点阵夹芯板的抗冲击性能研究[J]. 工程力学, 2007, 24(8): 86-92.
- [52] 郑婷婷. 水下爆炸冲击波下 X 型夹层板抗爆性能分析[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2010, 27(6): 633-637.
- [53] 张东新. 新型复合泡沫铝夹层板抗爆性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011, 6.
- [54] 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): 68-65.
- [55] Liang, Y., Hayhurst, D.R., John, W., *et al.* (2007) The Response of Metallic Sandwich to Waterblast. *Journal of Applied Mechanics*, **74**, 81-89. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2178837>
- [56] 易建坤, 马翰宇, 朱建生, 等. 点阵金属夹芯结构抗爆炸冲击问题研究的综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 116-120.
- [57] 吴刚, 吴智深, 孙泽阳, 等. 新型纤维增强复合材料-轻质加气混凝土夹层结构[J]. 工业建筑, 2007(增刊): 126-130.
- [58] 田志敏, 邓亮宇, 杜宁波. 拉筋增强 SLP 夹芯复合构件及其抗爆特性研究[J]. 信息工程大学学报, 2004, 5(2): 111-114.
- [59] 秦花, 杨军, 彭先泽. 爆炸冲击载荷作用下水泥纤维组合板的抗爆性能研究[C]//中国力学学会. 全国强动载效应及防护学术会议暨复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会论文集: 2013 年卷. 北京: 高等教育出版社, 2013, 7: 224-233.
- [60] 伍建强, 钱永久, 索清辉. 空气夹层结构抗爆炸局部破坏分析[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(4): 98-101.
- [61] 王庭辉. 陶瓷和纤维复合材料的动态性能及防护分析[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009, 12.
- [62] 黄燕玲, 吴卫国, 李晓彬, 等. 爆炸破片侵彻钢/陶瓷/铝复合板的数值计算研究[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(4): 27-31.
- [63] Rodriguez-Nikl, T., Lee, C.-S., Hegemier, G. and Seible, F. (2012) Experimental Performance of Concrete Columns with Composite Jackets under Blast Loading. *Journal of Structural Engineering*, **138**, 81-89. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000444](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000444)
- [64] 哈跃, 庞宝君, 管公顺, 等. 玄武岩纤维布 Whipple 防护结构超高速撞击损伤分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(5): 779-782.
- [65] 熊光晶, 姜浩, 黄冀卓. 混杂纤维布加固混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(4): 62-67.
- [66] 鲍育明, 赵艳秋. 碳纤维布加固钢筋混凝土构件抗爆性能研究综述[J]. 建筑技术, 2006, 37(6): 428-430.