

### 3 种点阵金属三明治板的抗侵彻性能模拟分析<sup>1)</sup>

倪长也\* 金峰\* 卢天健\*<sup>2)</sup> 李裕春†

\* (西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 西安 710049)

† (解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

**摘要** 对 3 种不同的点阵金属芯体三明治板受钢质弹丸侵彻作用下的抗侵彻性能进行了有限元模拟研究, 包括空心金字塔三明治板、嵌入陶瓷柱金字塔三明治板和注入环氧树脂陶瓷金字塔三明治板. 随着结构、材料复杂性的递增, 以期望从中得出各子结构、各材料在三明治板抗侵彻过程中的吸能表现. 弹丸作用于板的入射速度及出射速度也是关注的重要参数, 用以量化确定三明治结构各组分对弹丸的弹道极限和抗侵彻能力的影响. 研究表明, 陶瓷材料因其具有高强度和高硬度等特点, 可以显著提高金属三明治板结构的抗侵彻能力; 环氧树脂材料可使离散的板结构保持整体性, 在三明治板受侵彻作用时, 吸收大量能量, 从而实现大幅提高结构的抗侵彻性能的目的; 因其材料/结构的完备性, 注入环氧树脂陶瓷金字塔三明治板具有最高的弹道极限速度, 抗侵彻能力也最强.

**关键词** 侵彻, 超轻结构, 三明治板, 弹道极限, 有限元模拟

**中图分类号:** O347.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)06-1125-13

## 引 言

作为当今防护武器的重要组成部分, 防弹装甲的抗弹性能已成为军事领域关注的要点. 弹道性能是防弹装甲的关键指标, 包括抗侵彻能力 (抗弹能力)、抗冲击能力和抗崩落能力等, 而这些性能与装甲的材料组成密切相关. 随着科技的发展, 对防弹装甲的要求也越来越高, “高硬度、高强度、高韧性、低密度、低成本” 成为当今装甲性能发展的趋势. 通常, 单相材料不能同时满足这些要求, 这就为复合三明治结构应用于防护装甲领域提供了广阔前景.

超轻金属材料与结构 (包括金属泡沫<sup>[1-3]</sup> 与周期性点阵结构<sup>[4-6]</sup>) 作为一种新型的多功能结构<sup>[7-13]</sup> 被广泛应用于传热<sup>[14-16]</sup>、声阻<sup>[1]</sup> 等方面, 同时也在结构载荷支撑及热量管理等方面发挥着多功能作用<sup>[14-15]</sup>. 此外, 超轻金属结构在动态冲击能量吸收领域也同样表现出了卓越的性能<sup>[17-22]</sup>. 最新研究表明, 周期性点阵金属结构对承受爆炸产生的冲击波载荷有着重要作用<sup>[20-21]</sup>; 然而, 对于其抵抗爆炸时常伴随的破片侵彻能力的研究却相对欠缺.

将铝合金泡沫嵌入装甲内层用作防护结构, 可

以有限度地提高结构的防护性能<sup>[23-24]</sup>. 超轻结构的压缩强度及能量吸收性能, 主要依赖于决定其破坏模式的结构拓扑形式、相对密度以及母体材料的强度. 周期性点阵结构 (包括蜂窝结构、桁架拓扑结构) 比具有非周期性结构的金属泡沫<sup>[1]</sup> 更具有结构扩展能力, 其选用的制作材料通常也具有更高强度, 而且其拉压变形模式比金属泡沫的弯曲变形机制优越. 因此, 在同一相对密度下, 点阵金属结构相对于金属泡沫具有更高的刚度和强度.

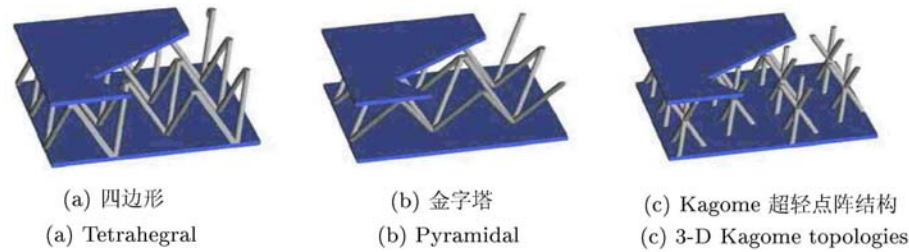
图 1 展示了超轻三明治板芯材的 3 种典型桁架点阵结构. 研究发现: 在高强度载荷作用下, 这些结构具有明显减弱脉冲传播及峰值压力传播的作用<sup>[25-26]</sup>. 然而, 对于弹丸侵彻问题, 这种桁架点阵结构及其组成的三明治结构是否具有有效的抵抗能力, 尚无明确的结论.

关于金属板类连续体装甲在弹丸垂直侵彻作用下的抗弹性能已有广泛研究, 其中板厚和板材力学性能对抗侵彻能力的影响已有相关结论<sup>[27]</sup>. Al-mohandes 等<sup>[28]</sup> 的实验研究表明, 对于两块相同面密度平板, 重新分布其中一块板的质量会小幅减弱其抗侵彻能力. Ben-Dor 等<sup>[29]</sup> 的理论研究及 Radin 等<sup>[30]</sup> 的实验研究表明, 改变两块薄板之间的排列

2009-06-29 收到第 1 稿, 2010-07-04 收到修改稿.

1) 国家重点基础研究发展计划 (2006CB601202), 国家自然科学基金 (10632060), 高等学校学科创新引智计划 (B06024), 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-08-0429) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目.

2) E-mail: tjlu@mail.xjtu.edu.cn

图 1 超轻三明治板芯材的 3 种典型桁架点阵结构<sup>[34]</sup>Fig. 1 Ultralight truss structures<sup>[34]</sup>

距离会对其各自整体结构的抗侵彻能力产生很小或者无效的影响. 此类传统结构, 其抗侵彻能力虽然尚有提高的余地, 但其质量重、体积大、可设计性差等缺点也是显而易见的. 超轻点阵金属结构的出现, 为进一步优化结构与材料的分配, 提高抗弹装甲的可设计性、易携带性提供了可能.

因其拓扑结构的特殊性, 三明治结构中的通孔桁架点阵芯材可能对弹丸的侵彻能力产生影响, 因而有望通过使弹丸偏航、桁架塑性变形/破坏以吸收能量等方面来提高结构的抗侵彻性能. 此外, 点阵结构的特殊性提供了一种实现结构多样化的捷径, 使通过在点阵结构内部填充某些材料进一步提高其抗侵彻性能成为可能, 例如, 在空隙中加入聚合物以吸收弹丸的动能<sup>[31]</sup>, 加入增强纤维以限制结构破碎<sup>[32]</sup>, 或加入陶瓷以消蚀弹丸进而阻止其侵彻<sup>[33]</sup>. 然而, 这些方法用于提高结构抗侵彻能力的优势尚不明确, 相关的用模拟方法研究此类复合点阵三明治结构受弹丸侵彻作用的文献也很缺乏.

本文利用超轻点阵结构的可设计性特点, 针对超轻点阵桁架金属结构, 在其空心部分添加不同异相材料, 构造出新型复合三明治板结构, 研究其抗弹丸侵彻方面的性能. 之前有研究<sup>[34-35]</sup>从实验方

面初步研究了多种复合超轻三明治板受球形弹丸作用时的结构抗侵彻性能, 指出: 加入陶瓷及环氧树脂的复合三明治结构具有优良的抗侵彻性能. 在上述工作基础上, 本文对球形弹丸侵彻复合结构三明治板进行了模拟分析, 量化分析各子结构、各材料组分在弹丸侵彻过程中的吸能表现, 直观表现弹丸作用过程中应力波的传播过程, 为进一步深入理解和分析超轻金属材料及其结构的抗侵彻机理奠定良好的科学基础.

## 1 研究问题描述

选取如图 2 所示的具有空心金字塔、嵌入陶瓷柱金字塔、注入环氧树脂陶瓷金字塔芯体结构的 3 种不同三明治板, 在钢质弹丸侵彻作用下, 通过有限元模拟, 分别得出这 3 种结构相对此种弹丸的弹道极限速度、局部破坏形式及能量吸收情况, 并分析结构与材料分布对此类三明治板抗弹性能的影响. 具体方案如下: 四边固支矩形板受钢质弹丸垂直中心入射, 速度范围为 150~1200m/s, 靶板长 14.5cm, 宽 10.5cm. 对不同结构、不同弹丸入射速度下的侵彻过程, 弹丸质量和力学参数均保持不变.

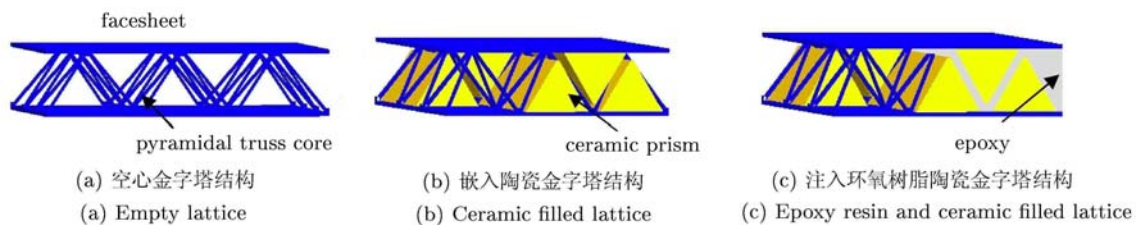


图 2 具有不同芯体结构的三明治板

Fig. 2 Three different types of sandwich plate considered

选取模型几何参数如图 3 所示. 三明治板的金字塔芯体结构排列为  $5 \times 5$  形式, 上下面板及金字塔结构材料均为 304 不锈钢, 密度为  $7900 \text{ kg/m}^3$ , 弹

丸材料为 42CrMo 钢, 密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 选用常见的 95 陶瓷, 密度为  $3650 \text{ kg/m}^3$ , 环氧树脂密度为  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

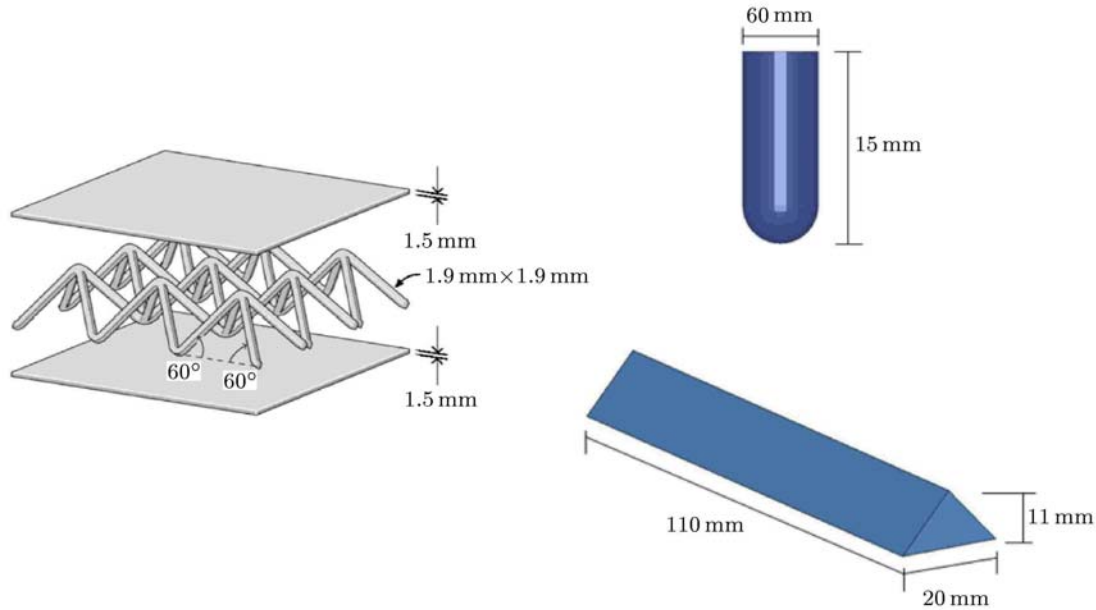


图 3 金字塔结构、弹丸和陶瓷柱几何尺寸

Fig. 3 Geometrical dimensions of pyramidal lattice, projectile and ceramic prism

模拟方法: 采用显式动力有限元软件 LS-DYNA 实现模拟, 弹丸、上下面板、金字塔结构及陶瓷均选用考虑应变率效应及材料高速冲击效应的本构模型 (Johnson-Cook 模型<sup>[36]</sup>), 单元划分采用八节点六面体单元 (solid 164), 各子结构接触面定义为侵蚀接触 (eroding); 对于环氧树脂, 考虑到其作为填充材料, 在模拟时将其处理为流体单元. 在充分考虑计算结果收敛性的基础上, 对图 2 所示的 3 种不同三明治板分别划分实体单元数目为 58450, 148450 和 832150 个.

## 2 本构模型描述

### 2.1 Johnson-Cook 本构模型<sup>[36]</sup>

Johnson 和 Cook<sup>[36]</sup> 提出了一个用于金属大变形、高应变率和高温度情况下的材料本构模型 (JC 模型). JC 模型在较低的应变率条件下, 甚至在准静态范围内仍然有效. 该模型的典型应用包括金属爆炸成型、弹道侵彻和冲击等.

考虑到本文所研究对象的实际情况, 对于弹丸、三明治结构中的上下面板及金字塔超轻结构, 模拟时均选用 JC 本构模型来描述其在高速侵彻过

程中的力学行为.

#### (1) 屈服准则

对 Mises 屈服应力模型, Johnson 和 Cook 把材料的屈服应力表示为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中,  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  和  $m$  均为材料常数 ( $A$  为屈服应力,  $B$  和  $n$  代表应变硬化的影响), 由实验确定;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变.

#### (2) 破坏准则

该破坏准则采用一个与应变、应变率、温度和压力相关的常数值来表明不同参数的相对影响, 同时它也通过累积损伤考虑了变形过程中的路径相关.

针对一个单元的损伤定义为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (2)$$

式中,  $\Delta \varepsilon$  为一个积分循环中的等效塑性应变增量;  $\varepsilon^f$  为在当前应变率、温度、压力和等效应力条件下断裂时的等效应变, 当  $D = 1.0$  时, 出现断裂.

#### (3) Gruneisen 状态方程 (压力 - 比容关系)

JC 模型通常需要与状态方程连用, 本文采用 Gruneisen 状态方程, 其定义压缩材料的压力为

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (3)$$

定义膨胀材料的压力为

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (4)$$

式中,  $\mu = 1/V - 1$ ,  $V$  为当前体积;  $c$  为冲击波速度  $\mu_s$  与质点速度  $\mu_p$  曲线的截距;  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  为  $\mu_s - \mu_p$  曲线的斜率;  $\gamma_0$  为 Gruneisen 伽马;  $\alpha$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正;  $E$  为材料内能.

## 2.2 JH-2 本构模型 [36-37]

Johnson 和 Holmquist 提出了适合于描述脆性材料力学性能的 JH-1 本构模型. 在 JH-1 模型中, 假定材料的强度与其所承受的压力、应变率和损伤相关, 损伤定义为材料的累计应变和断裂应变之比, 压力-比容关系考虑了材料的体积效应. 此后, Johnson 和 Holmquist 在 JH-1 模型的基础上进行了修改完善, 得到 JH-2 模型 [38]. 该模型采用 MTS 单轴、多轴压缩实验、SHPB 压缩实验、一维

应变平板冲击实验以及 DOP (depth of penetration) 实验来获得相关材料数据.

JH-2 本构模型中定义材料的强度关系为 [38]

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (5)$$

式中,  $\sigma_i^*$  为未损伤材料的无量纲有效应力;  $\sigma_f^*$  为完全损伤时材料的无量纲有效应力;  $D$  为损伤参量. 无量纲有效应力 ( $\sigma^*$ ,  $\sigma_i^*$ ,  $\sigma_f^*$ ) 的一般表达式为

$$\sigma^* = \sigma_{\text{ef}} / \sigma_{\text{ef(HEL)}} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_{\text{ef}}$  为材料所产生的有效应力;  $\sigma_{\text{ef(HEL)}}$  为 Hugoniot 弹性极限 (Hugoniot elastic limit, HEL) 材料的有效应力.

JH-2 模型将陶瓷类脆性材料的损伤演化定义为

$$D = \sum \Delta \varepsilon_p / \varepsilon_p^f \quad (7)$$

式中,  $\Delta \varepsilon_p$  为材料塑性应变的一个积分循环;  $\varepsilon_p^f$  为一定压力下材料的断裂应变.

对于金字塔层芯中嵌入的陶瓷棒, 本文在计算中采用 JH-2 本构模型进行模拟. 表 1 给出了 3 种不同金字塔点阵结构三明治板中各类材料的模拟参数, 其中 Johnson-Cook 本构模型所选参数参考有限元软件 Autodyn 模型材料参数库对应材料的参数.

表 1 金字塔点阵结构三明治板各类材料的模拟参数

Table 1 Material properties used for numerical simulation of pyramidal lattice sandwich plates

	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$G / 10^2 \text{ GPa}$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$K_1 / 10^2 \text{ GPa}$	$FS$	$A$	$B$	$D_1$	$m$	$n$
304 stainless-steel (Johnson-Cook)	7.9	0.8	—	0.3	—	—	—	—	—	—	—
42CrMo steel (Johnson-Cook)	7.9	0.8	—	0.3	—	—	—	—	—	—	—
plain carbon steel (Johnson-Cook)	7.83	0.75	—	0.3	—	—	—	—	—	—	—
ceramic(JH-2)[39]	3.65	1.52	—	—	2.31	0.8	0.93	0.3	0.005	0.6	0.6
epoxy[39]	1.2	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—

## 3 有限元模型验证

为了验证本文数值模拟方法的有效性, 选取通过实验研究超轻金字塔点阵结构三明治板抗球形弹丸侵彻性能的结果 [35] 作为例子, 采用本文的模拟方法对相同结构进行模拟, 并将模拟与实验结论进行对比.

问题描述: 以 304 不锈钢制备的点阵金属结构三明治板, 四边固支, 受直径为 12.5 mm, 质量为 8g 的钢质圆球垂直中心入射, 靶板长 12.7 cm, 宽

12 cm, 厚 1.5 mm, 圆球材料为普通碳钢, 两种结构材料均采用 Johnson-Cook 本构模型进行模拟, 各类材料的模拟参数参见表 1. 选用八节点六面体单元 (solid164) 对模型进行划分, 各子结构接触面定义为侵蚀接触 (eroding), 在充分考虑计算结果收敛性的基础上共划分实体单元 82360 个, 节点数为 117393 个.

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了有限元模拟采用的全尺寸模型以及计算获得的侵彻过程截图 (弹丸

入射速度为 1206 m/s), 模拟得到的弹丸入射、出射速度与实验结果 [35] 的对比见图 5. 有限元预测比实验结果高出 0.4%~9%, 总体趋势相近; 此外, 对比图 4(b) 和文献 [35] 的结果发现, 模拟得到的侵彻过程破坏形式与实验过程相近 (包括杆件的屈服和弯曲), 如图 6 所示.

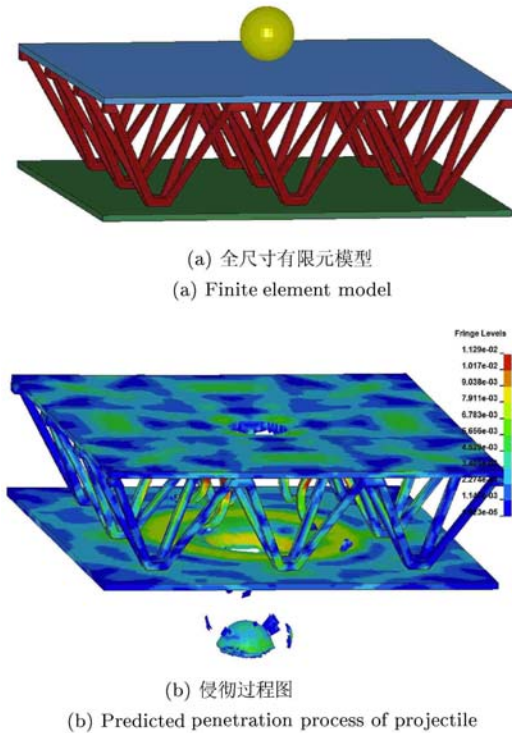


图 4 弹丸冲击下金字塔空心点阵三明治板

Fig. 4 Pyramidal truss-cored sandwich plate under impact

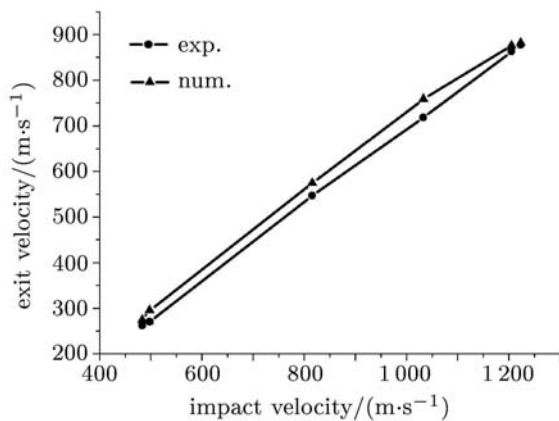


图 5 模拟结果与实验结果对比图

Fig. 5 Comparison of experimental measurement and numerical prediction for pyramidal truss-cored sandwich

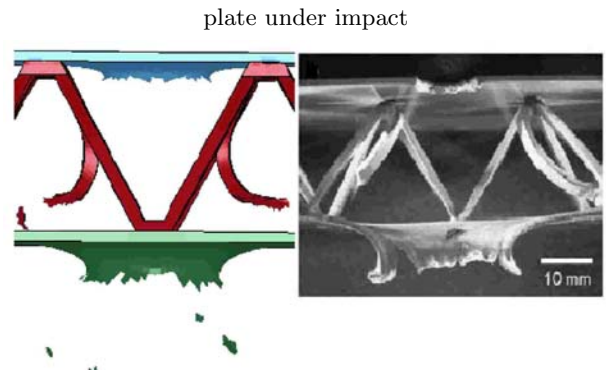


图 6 模拟与实验结果局部破坏形式比较

Fig. 6 Comparison of experimental measured and numerically predicted local damage of pyramidal truss-cored sandwich plate after penetration

## 4 结果与讨论

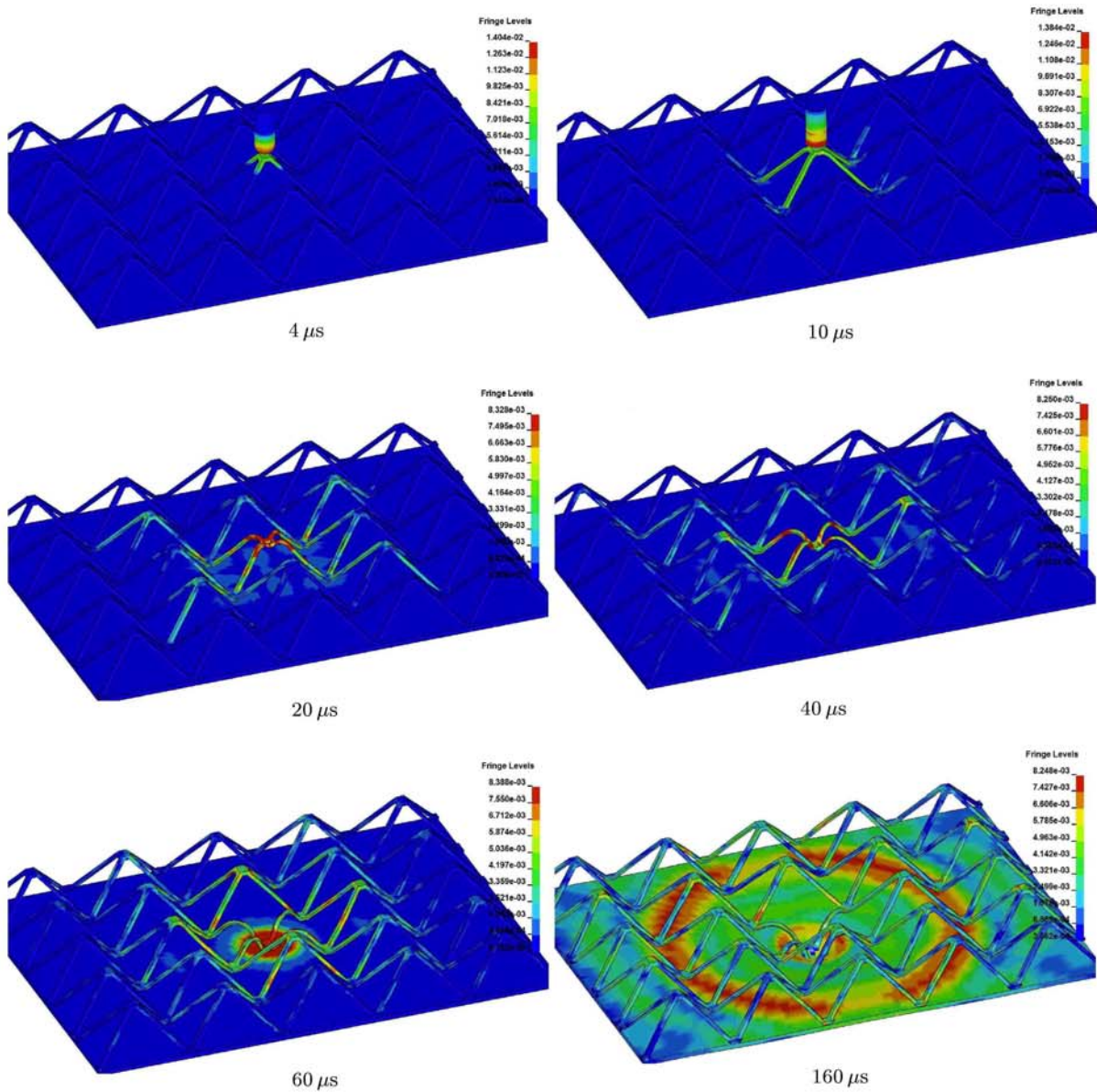
在成功验证本文有限元模型的基础上, 对图 2 所示的 3 种不同点阵金属结构在钢质弹丸侵彻作用下的性能进行了系统的数值模拟研究.

### 4.1 空心金字塔结构三明治板的抗侵彻性能分析

图 7(a) 比较全面地再现了弹丸侵彻空心金字塔结构的全过程, 以及在此作用过程中冲击诱发应力波在结构内部的产生、反射、叠加情况. 应力波的传播使弹丸对三明治板的侵彻作用由局部扩展到整个结构, 加剧了弹丸的破坏能力. 因此, 应力波与结构的相互作用, 对于侵彻条件下结构的破坏有着很大的影响.

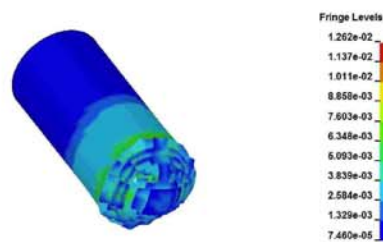
对于空心金字塔结构, 模拟结果表明, 其相对于此种弹丸的弹道极限速度约为 425 m/s, 并可以保证在 425~435 m/s 速度范围内不被穿透.

分析发现, 在空心金字塔结构受弹丸侵彻过程中, 弹丸在 0~22  $\mu\text{s}$  与 56~130  $\mu\text{s}$  分别与上、下面板作用时, 其速度下降最为明显 (图 8), 其中下面板吸收的能量最高 (图 9), 可见整个结构主要以材料的塑性变形来吸收弹丸的动能. 位于中间夹芯的金字塔点阵结构由于质量轻和杆系结构等原因, 产生的塑性变形能最小, 而弹丸接触上面板时, 由于弹头形态完整、速度高, 作用时间短, 所以产生的变形能也较小. 当弹丸到达下面板时, 由于在前述过程中产生了明显的弹丸消蚀和墩粗现象 (图 7(b)), 速度下降明显, 故与下面板作用的时间最长, 下面板的塑性变形最大, 吸收能量也最多.



(a) 总结构受侵彻过程 (除去上面板)

(a) Sequence of penetration of sandwich structure (excluding the front plate)



(b) 弹丸侵彻过程中 160 μs 时 von Mises 应力图

(b) Distribution of von Mises stress on projectile at 160 μs

图 7 空心金字塔结构三明治板受弹丸 450 m/s 速度侵彻作用时, 三明治结构与弹丸的 Mises 应力分布图  
 Fig. 7 Distribution of Mises stress in sandwich structure (empty lattice) and projectile at impact velocity of 450 m/s

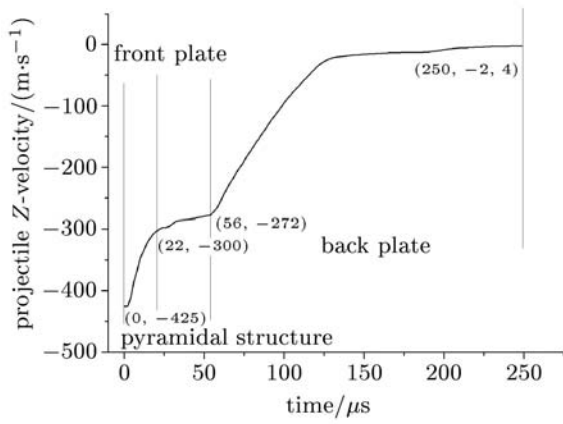


图 8 弹丸 425 m/s 速度侵彻空心金字塔结构时的速度衰减图

Fig. 8 Evolution of projectile Z-velocity at impact velocity of 425 m/s for empty pyramidal lattice-cored sandwich structure

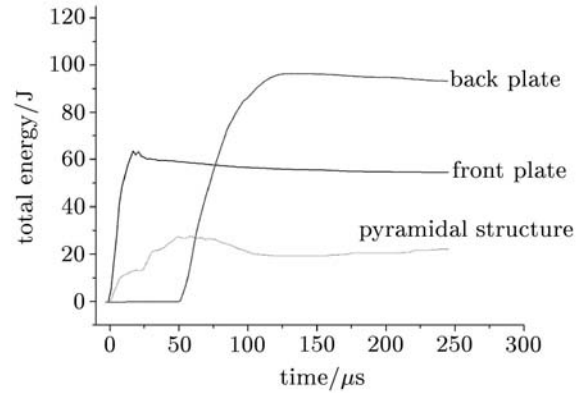


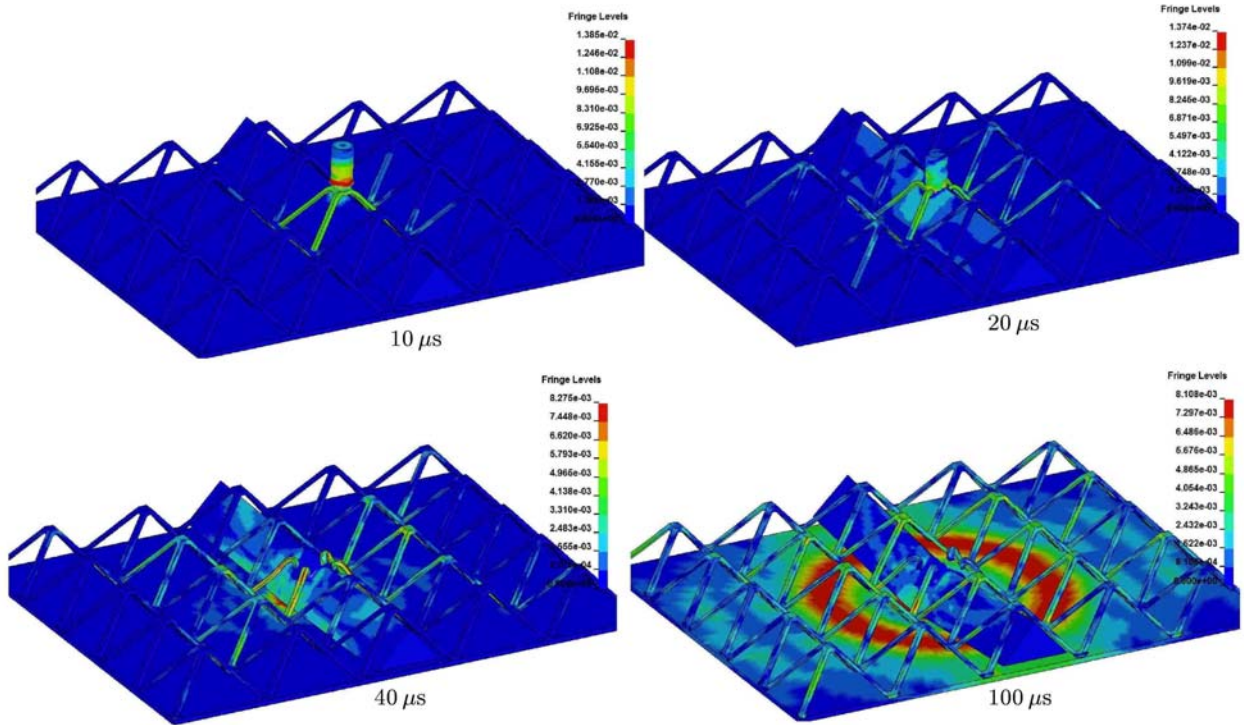
图 9 空心金字塔结构受弹丸 425 m/s 速度侵彻作用下各子结构的能量吸收图

Fig. 9 Energy absorption by sub-structures of empty pyramidal lattice-cored sandwich at impact velocity of 425 m/s

### 4.2 嵌入陶瓷柱金字塔结构三明治板的抗侵彻性能分析

对于嵌入陶瓷柱金字塔结构, 经过模拟分析 (图 10) 得出其相对于此种弹丸的弹道极限速度约

为 600 m/s, 能保证在 600~630 m/s 速度范围内不被穿透, 且在高速情况下 (1400 m/s) 弹丸出现明显偏航情况. 此外, 由图 10(b) 可见, 在弹丸侵彻作用下, 结构的局部破坏较为严重, 下面板中心的局部变形



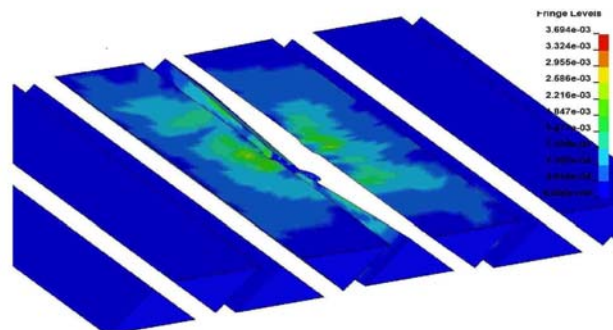
(a) 总结构受侵彻过程 (除去上面板)  
(a) Sequence of penetration across sandwich structure (excluding the front plate)

图 10 嵌入陶瓷柱金字塔结构三明治板受弹丸 600 m/s 速度侵彻作用时, 三明治结构与弹丸的 von Mises 应力分布图  
Fig. 10 Distribution of von Mises stress in sandwich structure (ceramic filled lattice) and projectile at impact velocity of 600 m/s



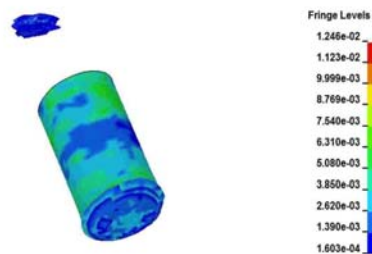
(b) 总结构在受侵彻  $100 \mu\text{s}$  时中心局部 von Mises 应力分布图 (焊点处剖面图)

(b) Local distribution of von Mises stress in the central portion (section view at welding point) of sandwich at  $100 \mu\text{s}$



(c) 陶瓷柱受侵彻过程中  $100 \mu\text{s}$  时 von Mises 应力分布图

(c) Distribution of von Mises stress in ceramic prisms at  $100 \mu\text{s}$



(d) 弹丸侵彻过程中  $100 \mu\text{s}$  时的 von Mises 应力分布图

(d) Distribution of von Mises stress in projectile at  $100 \mu\text{s}$

图 10 嵌入陶瓷柱金字塔结构三明治板受弹丸  $600 \text{ m/s}$  速度侵彻作用时, 三明治结构与弹丸的 von Mises 应力分布图 (续)  
Fig. 10 Distribution of von Mises stress in sandwich structure (ceramic filled lattice) and projectile at impact velocity of  $600 \text{ m/s}$  (continued)

较大, 在中心单胞两边焊点处可见脱落, 这一点与文献 [34] 的实验结果吻合. 可知该金字塔结构在高速侵彻作用下的变形具有局部效应的特点, 邻近区域受影响程度较小.

对图 11 所示结果进行分析发现, 弹丸在  $16 \sim 58 \mu\text{s}$  时段与陶瓷柱作用时, 其速度下降最快, 弹丸与陶瓷之间产生高速作用, 陶瓷柱吸收到最多能量 (图 12). 图 10(a) 完整再现了陶瓷在侵彻过程中形

成陶瓷锥的过程, 陶瓷出现破碎, 将吸收的弹丸动能转化为陶瓷碎片的机械能. 此外, 由于陶瓷材料的高强度、高硬度特性, 对弹丸的消蚀作用更为明显, 其在抗击弹丸侵彻作用时相对于其他材料组分更具优势. 但由于陶瓷柱在金字塔点阵结构内为分散排列, 陶瓷所体现出的抗弹性能主要来自于中心处的陶瓷柱, 并未发挥出所有陶瓷柱的整体吸能效果 (图 10(c)), 弹丸侵彻过程的局部化特征明显.



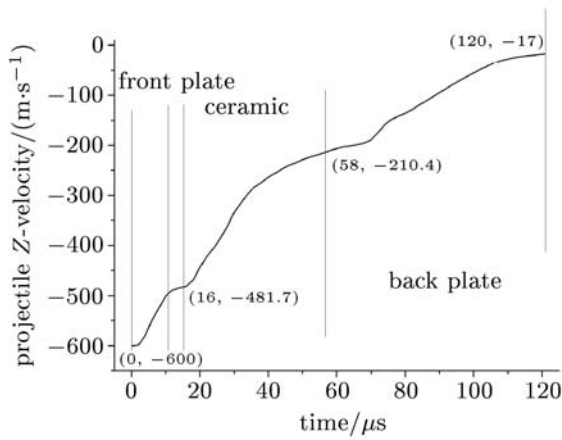


图 11 弹丸 600 m/s 速度侵彻嵌入陶瓷柱金字塔结构时的速度衰减图

Fig. 11 Z-velocity of projectile plotted as a function of time for ceramic filled sandwich plate having pyramidal lattice core at impact velocity of 600 m/s

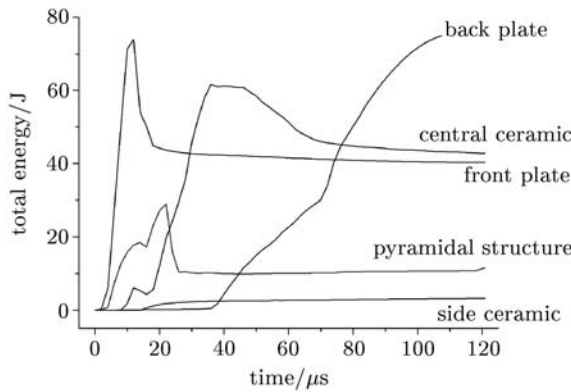


图 12 嵌入陶瓷柱金字塔结构受弹丸 600 m/s 速度侵彻作用下各子结构的能量吸收图

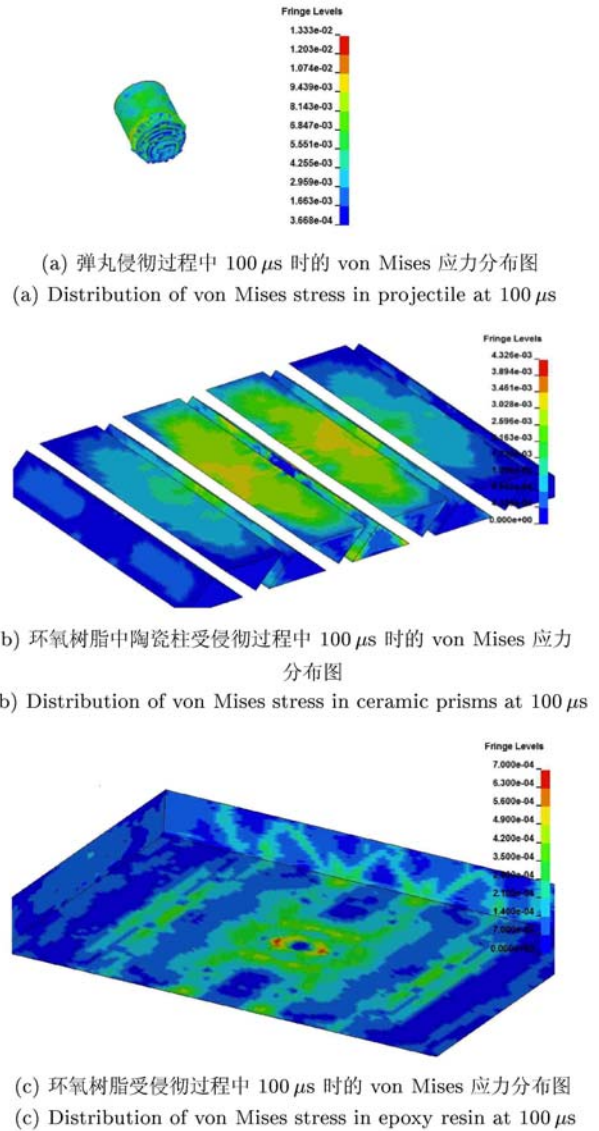
Fig. 12 Energy absorption in each sub-structure of ceramic filled sandwich plate having pyramidal lattice core at impact velocity of 600 m/s

### 4.3 注入环氧树脂陶瓷金字塔结构三明治板的抗侵彻性能分析

针对注入环氧树脂陶瓷金字塔结构，计算结果表明其相对于此种弹丸的弹道极限速度大约为 900 m/s，可保证在 900~950 m/s 速度范围内不被穿透，在高速情况下 (1 400 m/s) 则出现弹丸的明显偏航。分析发现，在结构受侵彻过程中，在 12 μs 左右时环氧树脂与下面板之间出现底部局部开裂，这一点与文献 [34] 中的实验结果相符。从图 13(b) 与 13(c) 中还可发现，环氧树脂的加入改善了结构各组分之间的松散型连接，结构应力传递的整体性得

以大幅提高；弹丸侵彻过程虽然仍体现出局部化特征，但有所改善，因为远离中心部位的陶瓷柱也发挥了一定的吸能作用。

分析图 13~15 中的结果发现，采用注入环氧树脂陶瓷金字塔结构后获得的弹丸弹道极限速度与前两种结构相比有了大幅度的提高。在三明治板受弹丸侵彻过程中，环氧树脂能够保证结构的整体性，发挥作用时间最长，使应力在弹丸侵彻过程中最大限度地传递至各子结构中。而环氧树脂因其材料的



(a) 弹丸侵彻过程中 100 μs 时的 von Mises 应力分布图

(a) Distribution of von Mises stress in projectile at 100 μs

(b) 环氧树脂中陶瓷柱受侵彻过程中 100 μs 时的 von Mises 应力分布图

(b) Distribution of von Mises stress in ceramic prisms at 100 μs

(c) 环氧树脂受侵彻过程中 100 μs 时的 von Mises 应力分布图

(c) Distribution of von Mises stress in epoxy resin at 100 μs

图 13 注入环氧树脂陶瓷柱金字塔结构受弹丸 900 m/s 速度侵彻作用时，三明治结构与弹丸的 von Mises 应力分布图

Fig. 13 Distribution of von Mises stress in sandwich structure (epoxy resin and ceramic filled lattice) and projectile at impact velocity of 900 m/s

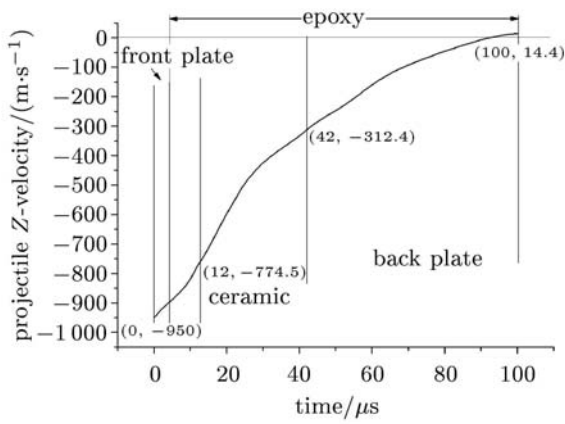


图 14 弹丸 900 m/s 速度侵入注入环氧树脂陶瓷金字塔结构时的速度衰减图

Fig. 14 Z-velocity of projectile at impact velocity of 900 m/s plotted as a function of time for epoxy-ceramic filled sandwich plate having pyramidal lattice core

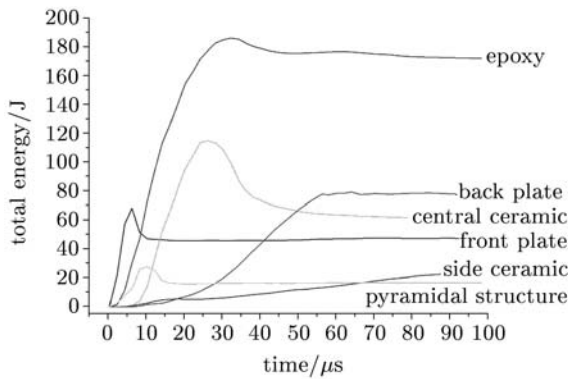


图 15 注入环氧树脂陶瓷金字塔结构受弹丸 900 m/s 速度侵入作用下各子结构的能量吸收图

Fig.15 Energy absorption of each sub-structure epoxy-ceramic filled sandwich plate having pyramidal lattice core at impact velocity of 900 m/s

特殊性, 占有总结构最大的体积比, 在保证金字塔结构与陶瓷受弹丸冲击后不离散的前提下, 吸收能量也是各子结构中最多的. 另外, 由图 13(a) 还可见, 弹丸在此结构中消蚀程度进一步加深, 环氧树脂的注入使此种三明治板的抗侵彻性能有了明显提高.

图 16 所示结果表明, 注入环氧树脂三明治板较前两种结构其抗侵彻能力显著提升. 另外, 图中曲线显示了高速侵彻情况下, 弹丸侵彻能力增强的特点, 其速度衰减程度明显减弱, 这一特点应成为日后针对高速侵彻防护结构设计研究的重要考虑因素.

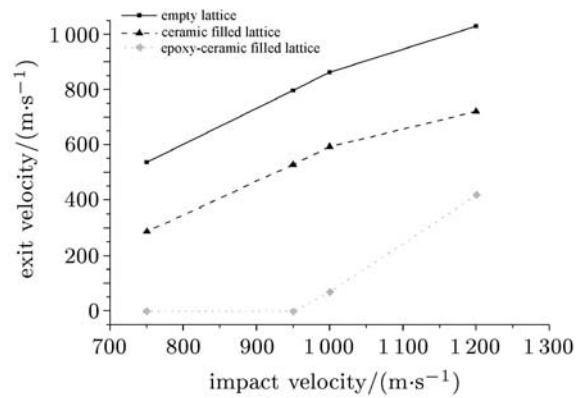


图 16 不同入射速度下出射速度比较图

Fig.16 Exit velocity plotted as a function of impact velocity

针对上述 3 种结构, 考虑其质量递增变化与抗侵彻性能提高之间的关系 (图 17 和 18), 可以发现, 结构 2 的面密度较结构 1 大  $24.24 \text{ kg/m}^2$ , 其抗弹极限速度提高  $175 \text{ m/s}$ , 结构 3 较结构 2 面密度大  $9.57 \text{ kg/m}^2$ , 而其抗弹极限速度提高  $300 \text{ m/s}$ ; 从能量吸收的角度来看, 结构 2 较结构 1 增加质量  $369 \text{ g}$ , 吸收能量提高  $25 \text{ J}$ , 结构 3 较结构 2 增加质量  $146 \text{ g}$ , 吸收能量提高  $219 \text{ J}$ . 可见, 选用环氧树脂材料填充三明治板, 可达到单位密度下显著提升结构的抗侵彻能力的目的, 其在复杂离散结构中所发挥的粘结与吸能作用对提高结构整体防护性能具有重要意义. 对于这 3 种不同点阵结构的三明治板, 因其结构、材料特殊性所表现出的较好抗侵彻能力, 还将在后期工作中对其进行实验分析, 以期与本文的模拟结果进行比对, 从实验和模拟两方面较为完整地研究点阵结构三明治板的抗侵彻能力.

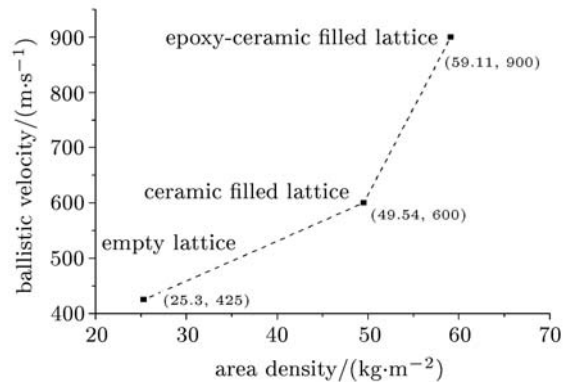


图 17 3 种三明治结构面密度与极限速度比较图

Fig.17 Ballistic velocity plotted as a function of area density for three sandwich structures

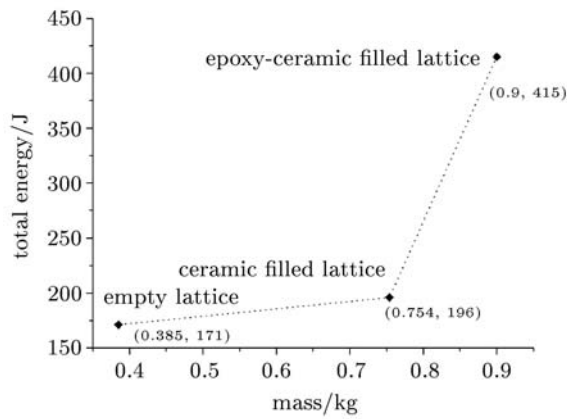


图 18 3 种三明治结构受弹丸极限速度侵彻作用下质量与整板能量吸收比较图

Fig.18 Total energy absorption plotted as a function of sandwich mass at ballistic velocity of projectile

## 5 结论

本文应用数值模拟方法, 分析了 3 种不同超轻金字塔结构三明治板的抗侵彻性能, 得出各子结构与材料在侵彻过程中的吸能表现以及 3 种结构相对于此种弹丸的弹道极限速度范围。结果表明, 环氧树脂的加入有效地提高了三明治板结构的整体性; 金字塔结构和陶瓷柱形状的特殊性及陶瓷材料的高强度、高硬度特点加剧了结构对弹丸的消蚀和偏航作用, 这些因素都对提高三明治板的整体抗侵彻性能有着重要作用; 对于抗侵彻结构而言, 其结构的特殊性、整体性和材料的复合性均会对其抗侵彻能力有较大影响, 而第 3 种结构 (注入环氧树脂陶瓷金字塔结构) 综合了前两种结构的优势, 将入射弹丸的弹道极限速度提升至 900~950m/s。此外, 从弹丸侵彻三明治板的过程可看出, 弹丸能量的消耗主要依靠钢结构弹着区域的塑性大变形和剪切扩孔、固态树脂和陶瓷的断裂破坏及整板宏观弯曲变形, 这些吸能因素的比重与弹头形状、弹头质量、弹丸长径比、抗弹结构材料及质量分布有关。

第 3 种结构对于入射弹丸虽然已经可以表现出较为可观的抗弹能力, 但其中的结构形式与材料的分配和选择均有进一步优化的余地。另外, 本文采用的结构设计及材料选择并未充分考虑阻止应力波在侵彻过程中的有效传播这一因素, 陶瓷柱体形状虽对弹丸消蚀及偏航有很大作用, 但其体积较小, 起主要抗侵彻作用的中心陶瓷柱略显单薄。随着对结构与材料的进一步优化, 此类超轻结构三明治板的抗侵彻吸能性能及对弹丸的消蚀、偏航能力

将会更显突出。

## 参 考 文 献

- 1 Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, et al. *Metal Foams: A Design Guide*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000
- 2 Kepets M, Lu TJ, Dowling AP. Mechanical characterization of the role of defects in sintered FeCrAlY foams. *Acta Mechanica Sinica*, 2007, 23(4): 383-398
- 3 Kepets M, Lu TJ, Dowling AP. Modeling of the role of defects in sintered FeCrAlY foams. *Acta Mechanica Sinica*, 2007, 23(5): 511-529
- 4 张钱诚, 韩云杰, 陈常青等. X 型点阵结构芯体 (I): 概念的提出、材料制备及实验. *中国科学 E 辑 (技术科学)*, 2009, 39(6): 1039-1046 (Zhang Qiancheng, Han Yunjie, Chen Changqing, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure (I): concept, fabrication and experimental characterization. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 39(6): 1039-1046 (in Chinese))
- 5 张钱诚, 陈爱萍, 陈常青等. X 型点阵结构芯体 (II): 细观力学建模与结构分析. *中国科学 E 辑 (技术科学)*, 2009, 39(7): 1216-1227 (Zhang Qiancheng, Chen Aiping, Cheng Changqing, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure(II): micro-mechanics modeling and finite element analysis. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 39(7): 1216-1227 (in Chinese))
- 6 Wadley H. Cellular metals manufacturing. *Adv Eng Mat*, 2002, 4(10): 726-733
- 7 卢天健, 何德坪, 陈常青等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用. *力学进展*, 2006, 36(4): 517-535 (Lu Tianjian, He Deping, Chen Changqing, et al. The multi-functionality of unltra-light porous metals and their applications. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(4): 517-535 (in Chinese))
- 8 Queheillat D T, Wadley HNG. Cellular metal lattices with hollow trusses. *Acta Mater*, 2005, 53(2): 303-313
- 9 Rathbun HJ, Wei Z, He MY, et al. Measurement and simulation of the performance of a lightweight metallic sandwich structure with a tetrahedral truss core. *J Appl Mech*, 2004, 71(3): 368-374
- 10 Kooistra GW, Deshpande VS, Wadley H. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminum. *Acta Mater*, 2004, 52: 4237-4299
- 11 Wang J, Evans AG, Dharmasena K, et al. On the performance of truss panels with Kagomé cores. *Int J Solids Struct*, 2003, 40(25): 6981-6988
- 12 Donev A, Torquato S. Energy-efficient actuation in infinite lattice structures. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51(8): 1459-1475
- 13 Hutchinson RG, Wicks N, Evans AG, et al. Kagomé plate structures for actuation. *Int J Solids Struct*, 2003, 40(25): 6969-6980
- 14 Tian J, Kim T, Lu TJ, et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular cooper structures. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004, 47(14-16): 317-3186

- 15 Gu S, Lu TJ, Evans AG. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44: 2163–2175
- 16 Kim T, Hodson HP, Lu TJ. Fluid-flow and endwall heat-transfer characteristics of an ultra light lattice-frame material. *Int J Heat Mass Transf*, 2004, 47(6-7): 1129–1140
- 17 赵桂平, 卢天健. 多孔金属夹层板在冲击载荷作用下的动态响应. *力学学报*, 2008, 40(2): 194–206 (Zhao Guiping, Lu Tianjian. Dynamic response of cellular metallic sandwich plates under impact loading. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(2): 194–206 (in Chinese))
- 18 黄桥平, 赵桂平, 卢天健. 考虑应变率效应的复合材料层合板冲击动态响应. *西安交通大学学报*, 2009, 43(1): 72–76 (Huang Qiaoping, Zhao Guiping, Lu Tianjian. Dynamic response with strain rate dependence of composite laminates. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2009, 43(1): 72–76 (in Chinese))
- 19 Hanssen AG, Enstock L, Langseth M. Close-range blast loading of aluminum foam panels. *Int J Impact Eng*, 2002, 27(6): 593–618
- 20 Radford DD, Fleck NA, Deshpande VS. The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading. *Int J Impact Eng*, 2006, 32(6): 968–987
- 21 Rathburn HJ, Radford DD, Xue Z, et al. Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading. *Int J Solids Struct*, 2006, 43(6): 1746~1763
- 22 Radford DD, McShane GJ, Deshpande VS, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading. *Int J Solids Struct*, 2006, 43(7-8): 2243–2259
- 23 Gama BA, Bogetti TA, Fink BK, et al. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Compos Struct*, 2001, 52(3-4): 381–395
- 24 Wicks N, Hutchinson JW. Optimal truss plates. *Int J Solids Struct*, 2001, 38(30-31): 5165–5183
- 25 Wadley H, Dharmasena K, Chen Y, et al. Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading. *Int J Impact Eng*, 2008, 35(9): 1102–1114
- 26 Wei Z, Dharmasena KP, Wadley H, et al. Analysis and interpretation of a test for characterizing the response of sandwich panels to water blast. *Int J Impact Eng*, 2007, 34(10): 1602–1618
- 27 Backman ME, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int J Eng Sci*, 1978, 16(1): 1–99
- 28 Almohandes AA, Abdel-Kader MS, Eleiche AM. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminar plates. *Composites B*, 1996, 27(5): 447–458
- 29 Ben-Dor G, Dubinsky A, Elperin T. On the ballistic resistance of multi-layered targets with air gaps. *Int J Solids Struct*, 1998, 35(23): 3097–3103
- 30 Radin J, Goldsmith W. Normal projectile penetration and perforation of layered targets. *Int J Impact Eng*, 1988, 7(2): 229–259
- 31 Yadav S, Ravichandran G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. *Int J Impact Eng*, 2003, 28(5): 557–574
- 32 Naik NK, Shrirao P. Composite structures under ballistic impact. *Compos Struct*, 2004, 66(1-4): 579–590
- 33 Subramanian R, Bless SJ. Penetration of semi-infinite AD995 alumina targets by tungsten long rod penetrators from 1.5 to 3.5 km/s. *Int J Impact Eng*, 1995, 17(4-6): 807–816
- 34 Yungwirth CJ, Radford DD, Aronson Mark, et al. Experiment assessment of the ballistic response of composite pyramidal lattice truss structures. *Composites B*, 2008, 39(3): 556–569
- 35 Yungwirth CJ, Wadley H, O'Connor JH, et al. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core. *Int J Impact Eng*, 2008, 35(8): 920–936
- 36 LSTC. LS-DYNA keyword user's manual, Version 970, USA: Livermore Software Technology Corporation. 2003
- 37 常敬臻, 李英华, 刘占芳等. 冲击压缩下氧化铝陶瓷动态强度研究进展. *重庆交通学院学报*, 2007, 26(3): 153–158 (Chang Jingzhen, Li Yinghua, Liu Zhanfang, et al. Study progress of the dynamic strength of alumina under shock-loaded. *Journal of Chong Qing Jiao Tong University*, 2007, 26(3): 153–158 (in Chinese))
- 38 Johnson GR, Holmquist TJ. Shock Wave and High Strain Rates and High Pressures. New York: Marcel Dekker Inc. 1992
- 39 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. *兵工自动化*, 2006, 25(12): 35–37 (He Huang, Zhang Ming, Zeng Shouyi. Effect of target condition on the anti-penetration property of ceramic composite armour. *Ordnance Industry Automation*, 2006, 25(12): 35–37 (in Chinese))

(责任编辑: 陶彩军)

# PENETRATION AND PERFORATION PERFORMANCE OF THREE PYRAMIDAL LATTICE-CORED SANDWICH PLATES: NUMERICAL SIMULATIONS<sup>1)</sup>

Ni Changye\* Jin Feng\* Lu Tianjian\*,<sup>2)</sup> Li Yuchun<sup>†</sup>

*\*(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)*

*†(Engineering Institute of Engineering Corps; PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)*

**Abstract** The ballistic performances of three different kinds of sandwich plates with pyramidal lattice cores are numerically evaluated with the method of finite elements, including empty lattice-cored sandwich without any insertion, ceramic filled sandwich, and ceramic and epoxy resin filled sandwich. As the complexity of the sandwich structure and material composition increase, the energy absorption performance of the sub-structures and the sandwich plate as a whole is quantified. Both the incidence and exit velocities of the projectile are considered to establish the ballistic limit as well as the ballistic performance of the sandwich plates. Obtained results reveal that ceramic insertions lead to enhanced penetration resistance of the sandwich due to their high-strength and high-hardness characteristics, whereas the use of epoxy resin improves the integrity of the sandwich so that more energy of the projectile can be absorbed. Therefore, the third type of sandwich (ceramic and epoxy resin filled) achieves the highest ballistic limit velocity and the best ballistic performance mainly due to its structural integrity.

**Key words** penetration and perforation, pyramidal lattice sandwich, ballistic limit, finite element

---

Received 29 June 2009, revised 4 July 2010.

1) The project supported by the National Basic Research Program of China (2006CB601202), the National Natural Science Foundation of China (10632060), the National 111 Project (B06024), the Program for New Century Excellent Talents in Universities (NCET-08-0429) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

2) E-mail: tjlu@mail.xjtu.edu.cn