

# 复合材料层合板的抗弹性能模拟分析

贾宝华<sup>1</sup>, 刘翔<sup>1</sup>, 顾永强<sup>1</sup>, 徐振洋<sup>2</sup>, 郭连军<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:**采用有限元软件 ABAQUS 模拟圆锥头弹体正冲击纤维增强复合材料层合板,分析了不同层数层合板在不同冲击速度下,子弹初始速度和剩余速度的关系以及层合板的等效应力云图和破坏特征云图。结果表明:在保持单层板厚度不变时,增大层合板层数可显著增强层合板的抗弹性能;子弹的剩余速度与初始速度关系曲线变化特征为先突变后平缓变化再呈线性关系;层合板的等效应力的最大值由接触点扩展到四周固定边界,最后到击穿区域周围局部单元;复合材料层合板在高速冲击下直接发生剪切破坏,而在低速冲击下先达到一定挠度然后发生破坏,为纤维拉伸破坏。

**关键词:**数值模拟;复合材料层合板;抗弹性能;破坏机制

**本文引用格式:**贾宝华,刘翔,顾永强,等. 复合材料层合板的抗弹性能模拟分析[J]. 兵器装备工程学报,2017(8): 147-152.

**Citation format:** JIA Baohua, LIU Xiang, GU Yongqiang, et al. Numerical Simulation of the Anti-Bullet Property for Composite Laminated Plates[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(8): 147-152.

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)08-0147-06

## Numerical Simulation of the Anti-Bullet Property for Composite Laminated Plates

JIA Baohua<sup>1</sup>, LIU Xiang<sup>1</sup>, GU Yongqiang<sup>1</sup>, XU Zhenyang<sup>2</sup>, GUO Lianjun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** The finite element software ABAQUS is used to simulate the impact of fiber reinforced composite laminated plates. Equivalent stress nephogram of laminated plates with different layers, failure characteristics of laminated plates and bullet velocity diagram are analyzed at different speeds. The results show thickness of laminates can significantly affect the elastic properties of composite laminated plates. The characters of relationship between the residual velocity and the initial velocity for bullets are the first sudden change, and then have gentle change and have linear relation finally. When the composite laminated plates is under the bullet impact, the maximum value of the equivalent stress carry from the contact point to the fixed boundary around, and then spread to the local element around the breakdown area. The composite laminated plates are directly destroyed of shear failure under high velocity impact; the failure of composite laminated plates under low velocity impact is the tensile failure.

**Key words:** numerical simulation; composite laminated plates; anti-bullet property; damage mechanism

收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51504129); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2016MS0112); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16156); 内蒙古科技大学创新基金项目(2016QDL-B11); 辽宁省金属矿产资源绿色开采工程研究中心开放课题基金项目(USTLKFJ201605)

作者简介: 贾宝华(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击动力学和固体材料力学性能研究。

通讯作者: 徐振洋(1982—), 男, 博士, 副教授。

纤维增强型复合材料具有较高的比强度、比刚度和良好的吸能特性,被广泛应用于飞机、舰船和车辆的防护等方面,一些纤维复合材料被用来制作防弹衣,因此其抗弹性能引起广大研究者的兴趣并成为冲击动力学领域的一个热点。层合板是复合材料经过铺层设计后,在实际工程中使用的重要形式。Lopez-Puente 等<sup>[1,2]</sup>分别通过实验和有限元软件研究了碳纤维层合板在正冲击和斜冲击下的侵彻问题,得到了冲击速度和弹道极限速度之间的关系。层合板的厚度是影响其抗冲击性能的重要因素<sup>[3-4]</sup>。M J N Jacobs 等研究表明石墨/环氧树脂层合板破坏压力阈值与厚度呈线性关系<sup>[5]</sup>。Espinosa H D 等研究表明,碳/环氧树脂复合材料层合板的最大压力与侵彻阈值随着厚度的增加而增加<sup>[6]</sup>。Wu E 等研究了复合板的低速冲击响应<sup>[7]</sup>,表明基质内多壁碳纳米管的存在能显著提高复合板的吸能特性和刚度。Wilde A F 等研究得出了编织碳/环氧纳米黏土复合材料层合板的冲击损伤小于普通碳/环氧复合材料层合板的结论<sup>[8]</sup>。本文在前人关于复合材料层合板抗冲击研究的基础上<sup>[9-11]</sup>,利用大型有限元软件 ABAQUS 建立子弹冲击复合材料层合板的有限元模型,分析不同速度下子弹冲击不同层数层合板的过程,寻找子弹的初速度与剩余速度的关系,分析在不同冲击速度下不同层数层合板的等效应力云图、层合板的破坏特征图和子弹初始速度与剩余速度的关系,研究层合板的抗弹性能规律,揭示其破坏机制,为复合材料层合板的设计和优化提供参考。

## 1 有限元建模和验证

### 1.1 有限元建模

1) 层合板模型的建立:本文所用复合材料层合板采用单层纤维薄片正交叠层铺设,通过粘结和热力层压加工而成。层合板的平面尺寸为 200 mm × 200 mm,单层板厚度为 0.7 mm。层合板由单层板叠加而成,叠加铺层方式为 [0/90°] 铺陈,层合板的材料参数如表 1 所示,其失效采用 Hashin 准则。在 Abaqus 软件中建立的层合板模型如图 1 所示。

表 1 层合板材料参数<sup>[12]</sup>

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_1 / \text{GPa}$	$E_2 / \text{GPa}$	$E_3 / \text{GPa}$	$G_{12} / \text{GPa}$
970	24.9	24.9	3.6	1.08
$G_{13} / \text{GPa}$	$G_{23} / \text{GPa}$	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$
1.73	1.73	0.046	0.046	0.046
$X^T / \text{MPa}$	$X^C / \text{MPa}$	$Y^T / \text{MPa}$	$Y^C / \text{MPa}$	$S^L / \text{MPa}$
530	64.3	530	64.3	77
$G_{\beta} /$	$G_{\beta c} /$	$G_{m} /$	$G_{m c} /$	
$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	
91.6	79.9	0.22	1.1	

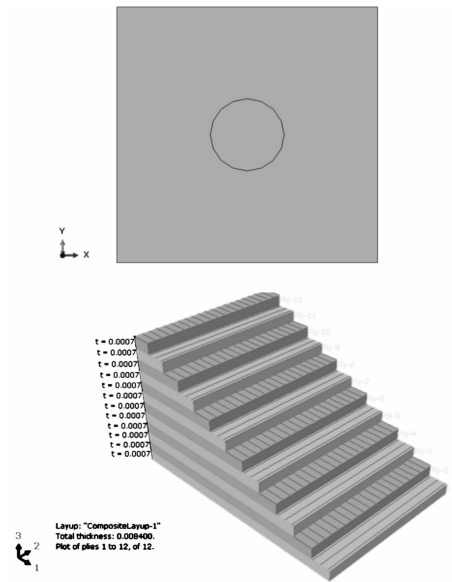


图 1 层合板模型

2) 子弹模型的建立:子弹的直径为 7.62 mm,长径比为 2.26,子弹头为 90°的锥形弹。密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。模型如图 2 所示。

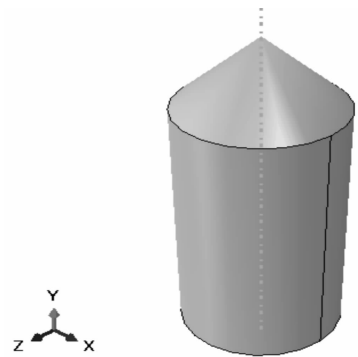


图 2 子弹的几何模型

3) 部件装配:进行部件创建和属性定义后,对部件进行装配,然后采用动力显示分析。子弹的运动分为两段,一段是子弹运动到接触层合板的过程,一段是子弹撞击层合板的过程;给定运动的总时间。对于整个模型,定义场输出量有应力、应变、位移、速度等变量。另外还设置了历程输出变量,对子弹建立集合,输出其整个过程中 Z 方向的速度和加速度随时间变化图。定义子弹和板的接触类型为面面接触。对层合板的四边进行全约束,使其在三个方向上的位移和转角都为零,即完全固定。对于子弹,定义其在 Z 方向上的速度,其余方向的速度均不考虑,因此对子弹进行约束,使其 V1, V2, VR1, VR2, VR3 均为零,部件装备如图 3 所示。

4) 网格划分:层合板为薄壁结构,采用 S4R 壳单元,为增加模拟结果的精度,对冲击区域进行加密处理,得到层合板的网格划分模型如图 4(a)所示。子弹采用 C3D8R 实体单元,共划分 820 个单元,其网格划分模型如图 4(b)所示。



图3 部件装配结构

5) 提交计算:进入作业创建界面,创建作业名,提交作业,进行计算。

1.2 模型验证

分别建立 10 层和 20 层的纤维层合板受冲击时的计算模型。为了和文献[12]模拟条件一致,采用不同厚度的单层板进行铺陈,保持 10 层和 20 层板的总厚度相同,均为 7 mm。铺层方式保持一致,为[0/90°]铺陈。采用不同的冲击速度冲击层合板。为了验证模拟方法的合理性,给予弹施加 150 m/s至 300 m/s 的初速度,得到不同冲击速度下子弹的剩余速度,与文献[12]中的剩余速度进行对比如表 2 所示,误差均在 5% 以内,而文献[12]的模拟结果与已有实验结果和理论计算结果吻合较好。可见本文建立的计算模型正确,分析方法可靠,故可进行不同速度弹体正冲击复合材料层合板的模拟分析。

2 模拟结果分析

2.1 初始速度与剩余速度的关系

在单层板厚度相同时,分别进行了 12、14、16、18 层层合板受冲击时的模拟,得到初始速度和剩余速度的关系如图 5 所示。

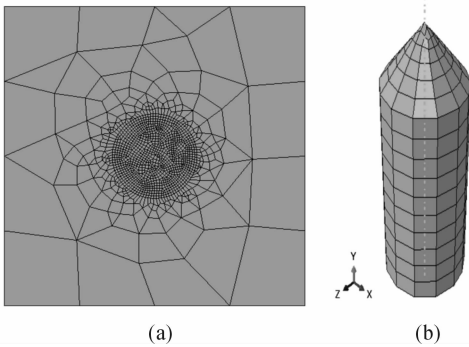


图4 层合板和子弹网格划分模型

表2 剩余速度值对比

初速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	10 层板 剩余速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	文献[12]中 10 层 板剩余速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	20 层板 剩余速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	文献[12]中 20 层 板剩余速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	10 层板的 对比误差/ %	20 层板的 对比误差/ %
150	-8.87	-8.45	-28.78	-28.83	4.95	0.19
165	24.37	25.38	4.36	4.38	3.98	0.45
175	46.72	46.45	26.06	26.21	2.14	0.56
190	70.58	72.56	69.67	70.20	2.73	0.76
210	97.80	100.34	98.27	100.23	2.60	1.95
230	118.65	122.45	130.60	133.12	3.11	1.92
250	145.27	149.32	143.59	146.21	2.78	1.82
290	187.10	190.34	188.62	190.20	1.73	0.82

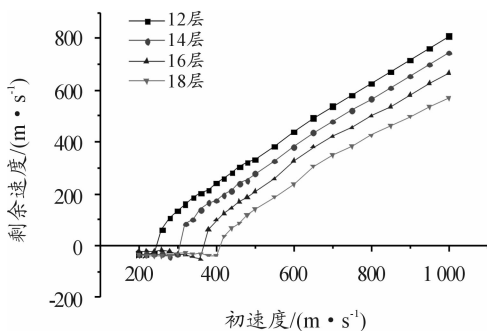


图5 层数不同时初速度与剩余速度关系

在 12 层板时,初始速度在 240 m/s 之前,剩余速度基本不变,在 240 m/s 至 260 m/s 之间剩余速度发生突变,在 260 m/s 至 650 m/s 之间剩余速度平缓变化,在 650 m/s 之后初速度与剩余速度基本呈线性变化。

在 14 层板时,初始速度在 300 m/s 之前,剩余速度基本不变,在 300 m/s 至 320 m/s 之间剩余速度发生突变,在 320 m/s 至 700 m/s 之间剩余速度平缓变化,在 700 m/s 之后初速度与剩余速度基本呈线性变化。

在 16 层板时,初始速度在 360 m/s 之前,剩余速度基本不变,在 360 m/s 至 380 m/s 之间剩余速度发生突变,在 380

m/s 至 800 m/s 之间,剩余速度平缓变化,在 800 m/s 之后初速度与剩余速度呈线性变化。

在 18 层板时,初速度在 400 m/s 之前,剩余速度基本不变,在 400 m/s 至 420 m/s 剩余速度发生突变,在 420 m/s 至 900 m/s 之间,剩余速度平缓变化,在 900 m/s 之后初速度与剩余速度基本呈线性变化。

由此可见,单层板厚度保持不变,虽然层数不同,但随着初始速度增加,剩余速度在层合板被击穿前基本不变,在被击穿后剩余速度逐渐平缓增大,到达某一速度后,初始速度与剩余速度呈线性关系。随着层数的增加,层合板的抗侵彻性能逐渐增强。当保持单层板厚度不变时,增加层数,即使是在高速下冲击,复合材料的抗弹性能依然能提高。

## 2.2 等效应力云图

12 层板总厚度为 8.4 mm,为了得到 12 层板的击穿临界速度,分别模拟初始速度从 200 m/s 到 1 000 m/s 下子弹对层合板的冲击,得到此时临界速度为 260 m/s,取接近临界速度冲击后层合板的应力云图(如图 6),从图 6 可以看出:随着时间的增加,层合板的等效应力最大值由开始的接触点逐渐扩展到四周的固定边界处,最后扩展到击穿区域的几个单元。随着子弹与层合板的接触和分离,最大等效应力的位置

发生相应变化。这是因为材料在承受冲击荷载时,接触处承受集中力,此时由于在接触处接触面积很小,趋近于零,在复合材料层合板的中央接触点位置处产生很大的等效应力。随着冲击的发展,子弹与板的接触面积增加,等效应力减小。随着时间的推移,由接触面承受的力逐渐转为整个复合材料层合板承受相应的力,所以此时力会向固定边界传播。随着时间增加,层合板的破坏区域也是逐渐增大,破坏区域的能量逐渐向四周传播,子弹对层合板的作用逐渐减小,击穿区域的力逐渐变小。但子弹在逐渐穿过复合材料层合板的过程中,子弹表面与层合板发生摩擦,使局部某几个单元等效应力最大。

18 层板总厚度为 12.6 mm,为了得到 18 层板的击穿临界速度,分别模拟初始速度从 200 m/s 到 1 000 m/s 速度下子弹对层合板的冲击,得到此时临界速度为 420 m/s,取临界速度冲击下层合板的等效应力云图(图 7),从图中可以看出:18 层板的等效应力传播方式与 12 层板相同,随着时间的增加,最大等效应力在 13 帧时完全传播到四周,使四周的应力大于击穿区域。从 13 帧后四周等效应力值趋于平缓减小,此时最大等效应力值出现在击穿区域的某几个单元。

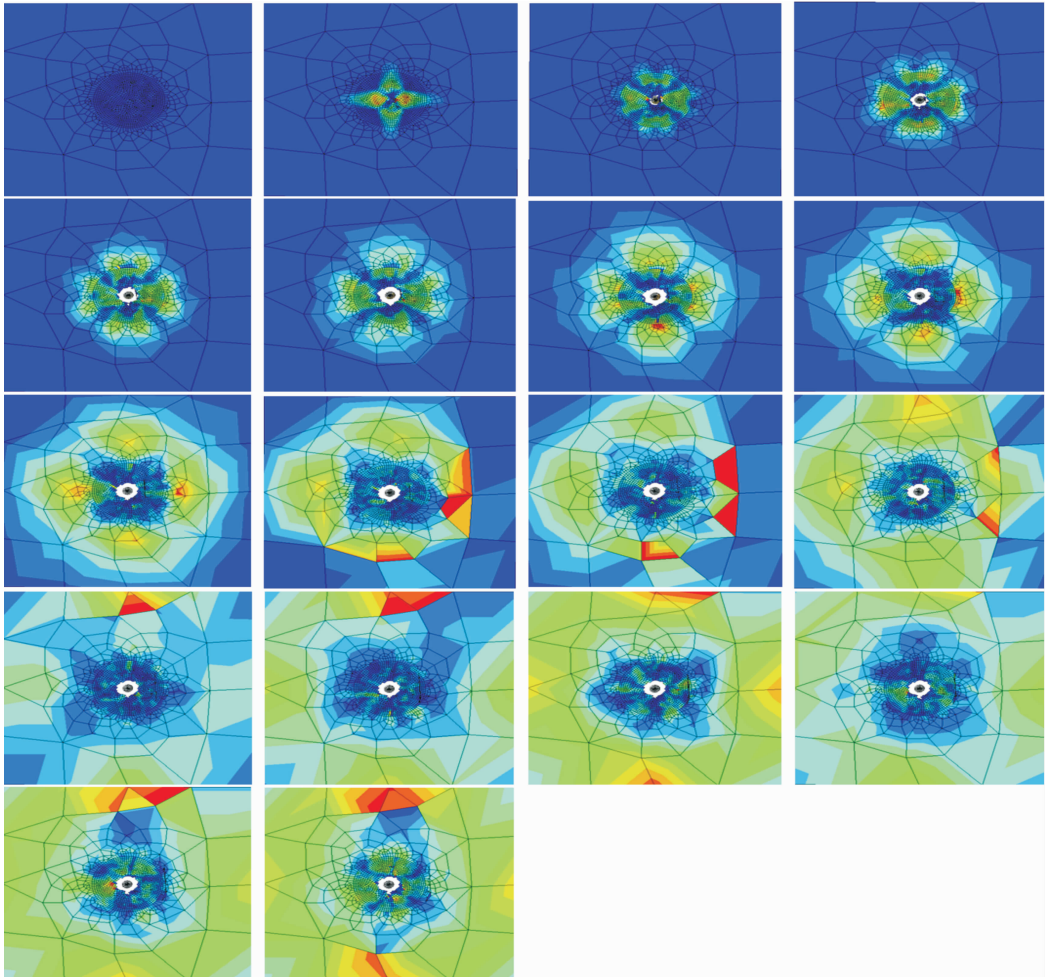


图 6 12 层板等效应力云图

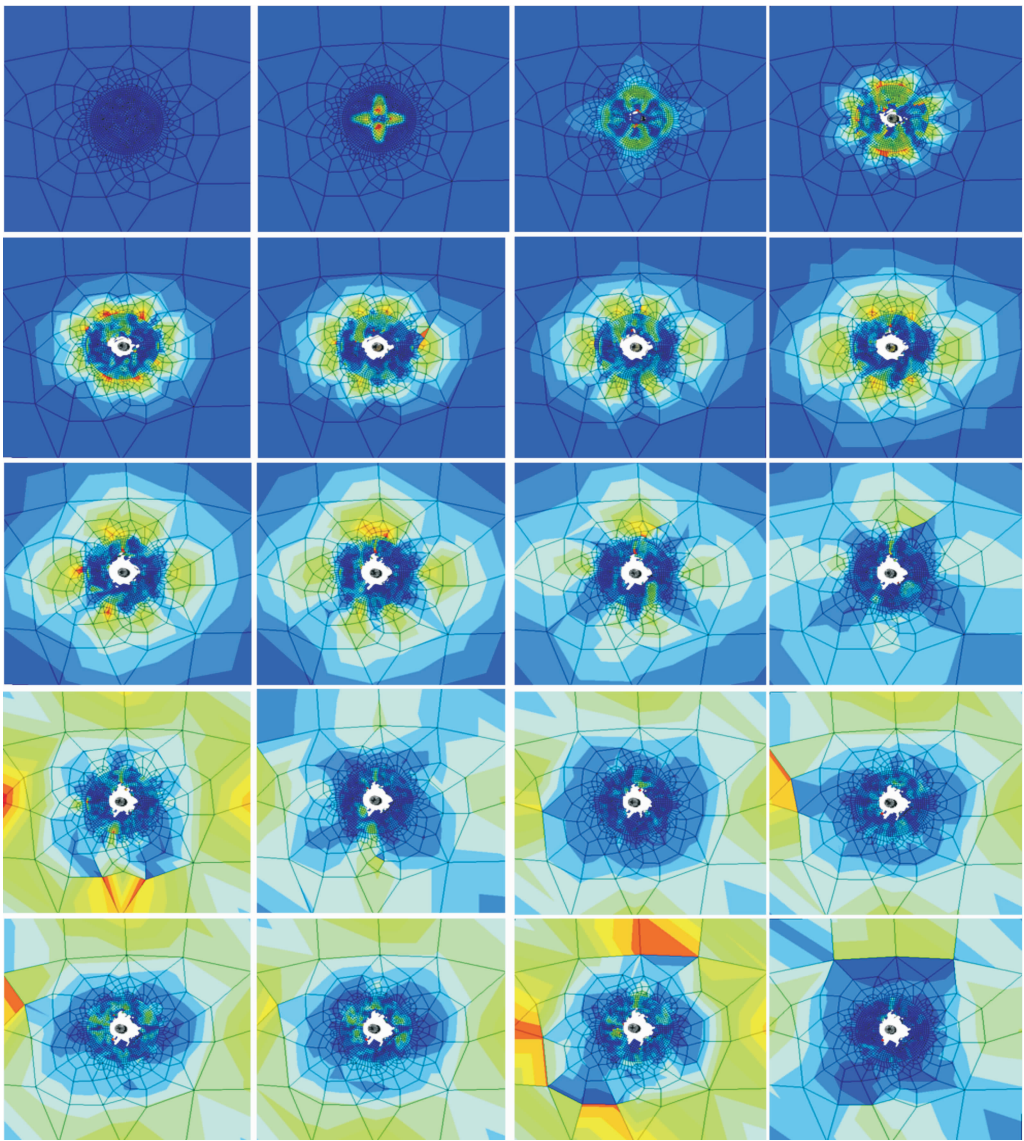


图7 18层层合板等效应力云图

### 2.3 层合板破坏特征

子弹击穿复合材料层合板后,层合板的中央区域会发生明显破坏。分别取 260 m/s 和 1 000 m/s 条件下前几帧等效应力云图进行对比,如图 8(a)和图 8(b)所示:子弹在低速下冲击层合板,使层合板背面发生拉伸破坏。即子弹冲击层合板时,使层合板产生相应挠度,由于层合板四周固定,层合板发生受拉破坏。子弹在高速状态下冲击复合材料层合板时为直接穿透,使单层板在面内剪应力作用下产生平行断口,导致层合板发生面内剪切破坏。

为了进一步研究 18 层层合板的破坏特征,分别取 420 m/s 和 1 000 m/s 下前几帧等效应力云图进行对比,如图 9(a)和图 9(b)所示:在 1 000 m/s 时,复合材料层合板直接被击穿,而在 420 m/s 时,复合材料层合板先产生隆起,后发生破坏,所以相比 12 层板,两者在低速冲击下复合材料层

合板发生的都是受拉破坏。

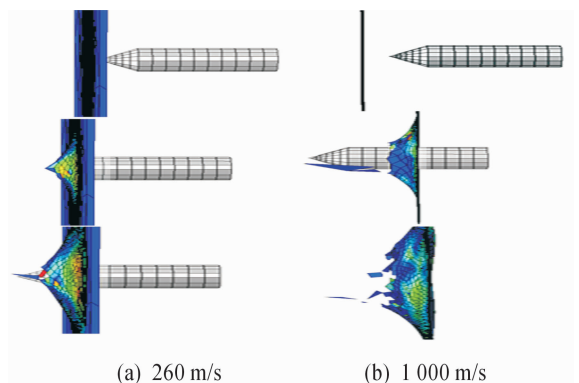


图8 不同冲击速度下12层板前三帧等效应力云图



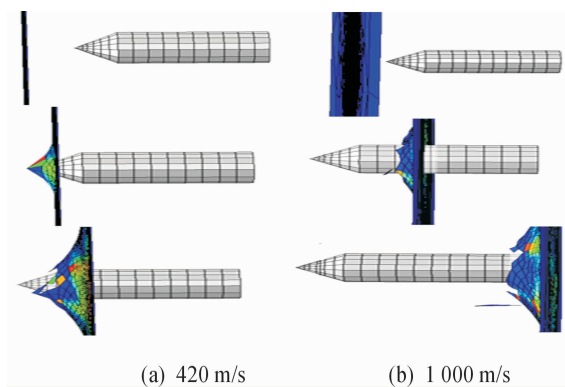


图9 不同冲击速度下18层板前三帧等效应力云图

## 4 结论

1) 当单层板厚度保持不变,对于不同铺陈层数的复合材料层合板,随着子弹初始速度增加,剩余速度在层合板被击穿前基本不变,在被击穿后剩余速度逐渐平缓增大,到达某一速度后,初始速度与剩余速度呈线性关系。

2) 随着层数的增加,层合板的抗侵彻性能逐渐增强。

3) 子弹冲击复合材料层合板时,等效应力的最大值由接触点传到四周固定边界,再传到击穿区域周围局部单元。

4) 复合材料层合板在高速冲击下发生剪切破坏,在低速冲击下先达到一定挠度后发生破坏,为纤维拉伸破坏。

## 参考文献:

- [1] LOPEZ-PUENTE J,ZAERA R,NAVARRO C. Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2008, 39: 374-387.
- [2] LOPEZ-PUENTE J,ZAERA R,NAVARRO C. The effect of low temperature on the intermediate and high velocity im-

pact response of CFRPs[J]. Composites Part B-Engineering, 2002, 33: 559-566.

- [3] MEI Zhiyuan. Study on the mechanism of protective action of war ships light composite armor system[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2004.
- [4] JENQ S T, WANG S B. A model for predicting the residual strength of GFRP laminates subject to ballistic impact[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1992, 2(4): 1127 - 1141.
- [5] JACOBS M J N, VAN DINGENEN J L J. Ballistic protection mechanisms in personal armour[J]. Journal of Material Science, 2001, 36(5): 3137 - 3142.
- [6] ESPINOSA H D, LU H C, ZAVATTIERI P D, et al. A 3-DFiniteDeformationAnisotropic Visco-Plasticity Model for Fiber Composites[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 35(5): 369 - 410.
- [7] WU E, CHANG L C. Woven glass/epoxy laminates subject to projectile impact[J]. International Journal of impact Engineering, 1995, 16(4): 607-619.
- [8] WLIDE A F, ROYLANCE D K, ROGERS M. Photographic in vestie gation of high speed missile impact upon nylon fabric[J]. Textile Research Journal, 1973, 43(11): 753 - 765.
- [9] 王云聪,何煌,曾首义. Kevlar 纤维层合板抗弹性能的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(3): 17-20.
- [10] 古兴瑾. 复合材料层合板冲击损伤近场力学模型与分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [11] 夏清波,晏麓晖,冯兴民. UHMWPE 纤维层合板抗弹侵彻数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(2): 119-121.
- [12] 秦建兵,韩志军,刘云雁,等. 复合材料层合板侵彻行为的研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 122-126.

(责任编辑 唐定国)