复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第1期 2月 2011年
Vol. 28 No. 1 February 2011

文章编号：1000-3851(2011)01-0194-05

Nomex－Kevlar 平纹织物超高速撞击本构模型开发

刘滨涛，黄 海*，贾光辉，周广东
（北京航空航天大学 宇航学院，航天器设计优化与动态模拟技术教育部重点实验室，北京 100191）

摘 要： 为了研究 Nomex－Kevlar 平纹织物对空间碎片的超高速撞击力学特性，运用 LS－DYNA 本构模型二次开发技术开发了 Nomex－Kevlar 平纹织物在超高速撞击条件下的带最大应力失效标准的线弹性正交各向异性本构模型，并定义了 Nomex－Kevlar 平纹织物在超高速撞击条件下的 Gruneison 状态方程参数。运用光滑粒子流体动力学方法和有限元方法建立了与 NASA 试验工况相同的 Al－2017－T4 球形弹丸以 6.84 km/s 速度斜向 30°撞击 Nomex－Kevlar 平纹织物的数值分析模型。仿真结果与试验结果的比较表明，本文中开发的本构模型以及建立的数值分析模型可以准确描述 Nomex－Kevlar 平纹织物的超高速撞击力学特性。

关键词： Nomex－Kevlar 平纹织物；超高速撞击；数值分析模型；本构模型；

中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Development of material constitutive model for the Nomex－Kevlar plain woven fabric

LIU Bintao, HUANG Hai*, JIA Guanghui, ZHOU Guangdong
(Ministry of Education Key Laboratory of Spacecraft Design Optimization & Dynamic Simulation, School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A linearly orthotropic constitutive model with maximum tensile stress failure criterion was developed by secondary development kit of LS－DYNA, and was coupled with Gruneison equation of state to describe the mechanic behaviors of Nomex－Kevlar plain woven fabric under the hypervelocity impact condition. A 3D numerical analysis model was created using LS－DYNA to simulate Al－2017－T4 spherical projectiles impacting Nomex－Kevlar plain woven fabric at 6.84 km/s, 30° obliquity, which condition is as same as the test's condition of NASA. Compared simulation results to test results, it shows that the developed material constitutive model and the numerical analysis model are suitable to describe the hypervelocity impact behaviors of Nomex－Kevlar plain woven fabric.

Keywords: Nomex－Kevlar plain woven fabric; hypervelocity impact; numerical analytical model; constitutive model

舱外航天服是宇航员进行舱外活动的必需装备，保护宇航员免受宇宙辐射、极端温差、空间碎片和微流星撞击的伤害，其最外层由 Nomex－Kevlar 纤维束正交编织而成，起到抵御空间碎片和微流星撞击的作用[1]。

人类数十年来的航天活动在太空中产生了大量的空间碎片，如果撞击到航天员舱外活动时穿着的航天服，将可能导致氧气泄漏或电源不足等事故，危及宇航员的生命[1]。因此，研究 Nomex－Kevlar 平纹织物的空间碎片超高速撞击力学性能具有非常重要的实际意义。

随着计算机技术的飞速发展，数学建模和数值仿真被广泛应用于空间碎片超高速撞击问题的研究。在超高速撞击的数值仿真计算中，准确定义材料的本构模型、状态方程和失效标准，是确保数值模型具有较高仿真精度的关键。

超高速撞击的仿真问题一般使用 LS－DYNA 软件进行建模和求解，LS－DYNA 软件自带的本构模型中适用于复合材料仿真计算的本构模型一共 15 个[2]，但均不能与状态方程联合使用[3]。

对于复合材料平纹织物受到冲击载荷条件下的数值建模和仿真计算问题，有研究者进行了低速条件下的力学试验与仿真[4-7]。本文中针对超高速撞击条件下，材料产生高温、高压、高应变和固-液-

收到初稿日期： 2010-06-23；**收到修改稿日期：** 2010-10-19
基金项目： 空间碎片专题研究(K0201310)
通讯作者： 黄 海，博士，教授，博士生导师 研究方向：结构优化及其程序系统开发、自适应结构控制理论与实验、飞行器结构与概念设计
E-mail：hhuang@buaa.edu.cn

气相变的特点，利用 LS－DYNA 本构模型二次开发技术[3]开发了带最大应力失效标准的线弹性正交各向异性本构模型，并与 Gruneison 状态方程[3]及有限元方法相结合建立了 Al 弹丸超高速撞击 Nomex－Kevlar 平纹织物的数值模型。

1　撞击试验

图 1 是舱外航天服的最外层 Nomex－Kevlar 平纹织物的结构示意图，每一个纤维束都是由数百根高强度的 Nomex 纤维和 Kevlar 组合而成。NASA 在 Johnson 飞行试验中心做了 Al2017－T4 质球形弹丸斜向撞击 Nomex－Kevlar 平纹织物的试验[8]，试验使用的平纹织物厚度为 0.3664 mm，面密度为 0.48 kg/m^2，弹丸直径为 0.5 mm，速度为 6.84 km/s，撞击方向为斜向 30°。

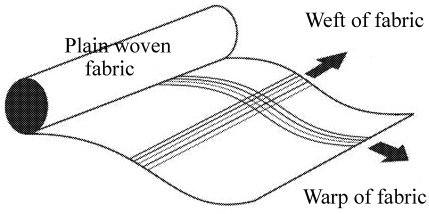


图 1　Nomex－Kevlar 平纹织物结构示意图

Fig. 1　Sketch of Nomex－Kevlar plain woven fabric

撞击试验获得 Nomex－Kevlar 平纹织物的穿孔近似于圆形(图 2)，直径约等于 1.6 mm。

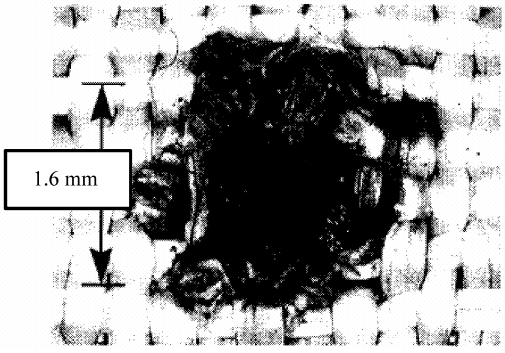


图 2　Nomex－Kevlar 平纹织物撞击试验的穿孔图

Fig. 2　Bumper hole of Nomex－Kevlar plain woven fabric in the hypervelocity impact test

2　Nomex－Kevlar 平纹织物超高速撞击力学特性的理论分析

2.1　线弹性正交各向异性本构模型

如图 3 所示，对 Nomex－Kevlar 平纹织物的每一条纤维束建立一个局部坐标系，1 轴与纤维方向

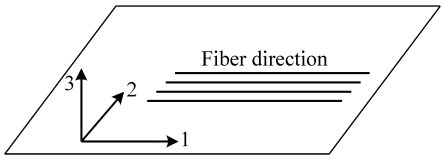


图 3　在纤维束内建立局部坐标系

Fig. 3　Direction of fiber in the local coordinate system

一致，2 轴垂直于 1 轴并与 1 轴在织物平面内，3 轴与另外 2 个轴成右手定则。

平纹织物中的每一条纤维束都可以被假定为一条弹性连续体[5-6]，沿纤维方向的弹性模量 E_1 远大于垂直于纤维方向的弹性模量 E_2、E_3 及 3 个剪切模量 G_{12}、G_{23}、G_{31}(E_1 约为 E_2、E_3 的 100 倍)[5]。表 1 给出了 Nomex－Kevlar 纤维束的本构模型参数的取值。使用线弹性正交各向异性本构模型描述 Nomex－Kevlar 纤维束应力-应变关系，其应力-应变关系可用下式表示[9]：

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} & 0 & 0 & 0\\ \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{12}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\end{bmatrix} \tag{1}$$

其中：σ_{11}、σ_{22}、σ_{33}是正应力；σ_{12}、σ_{23}、σ_{31}是剪切应力；ε_{11}、ε_{22}、ε_{33}是正应变；ε_{12}、ε_{23}、ε_{31}是剪切应变；E_i 是杨氏模量；ν_{ij}是泊松比；G_{ij}是剪切模量；i，j＝1，2，3；$\Delta=(1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13})/(E_1E_2E_3)$。

2.2　状态方程

在超高速撞击条件下，材料将发生熔化、气化等相变，需要用状态方程描述材料汽化状态时的压强与内能关系。Gruneison 状态方程常用于超高速撞击问题的数值仿真，本文中选取 Gruneison 方程来描述 Nomex－Kevlar 纤维在超高速撞击过程中的压强与内能的关系。Gruneison 状态方程可用下式表示[3]：

$$p=\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{2}$$

其中：需要定义的参数为 C、S_1、S_2、S_3、γ_0，表 1 给出了 Nomex－Kevlar 纤维束的状态方程的参数取值。

表 1　Nomex－Kevlar 纤维束的本构模型、状态方程、失效标准的参数取值

Table 1　Constitutive model parameters, EOS parameters, and failure criteria parameters of Nomex－Kevlar yarn

Parameters categories	Parameters′ symbols	Values
Basic attribute [11]	Density/(kg·m^{-3})	0.00144
Orthotropic constitutive model[6]	Young's modulus E_{11}/MPa	74000
	Young's modulus E_{22}/MPa	740
	Young's modulus E_{33}/MPa	740
	Shear modulus G_{12}/MPa	148
	Shear modulus G_{23}/MPa	148
	Shear modulus G_{31}/MPa	148
Gruneison EOS [10]	C	0.7846
	S_1	1.0
	S_2	0
	S_3	0
	γ_0	0.766
Maximum tensile stress failure criteria[11]	Tensile strength X_T/MPa	607

2.3　最大应力失效准则

Nomex－Kevlar 纤维在超高速撞击中主要的失效形式是拉伸断裂失效，本文中采用最大应力失效准则[2]定义纤维束的失效，用下式表示：

$$e_f^2=\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2-1\begin{cases}\geqslant 0 & \text{失效}\\ <0 & \text{不失效}\end{cases} \tag{3}$$

其中：σ_{11}表示纤维方向拉伸应力；X_T 为材料拉伸强度；e_f^2 为失效标志符号，当 $e_f^2\geqslant 0$ 时，材料发生拉伸断裂失效。表 1 给出了 Nomex－Kevlar 纤维束的最大拉伸应力失效准则的参数取值。

2.4　编程、编译及生成求解器

在 LS－Prepost 软件中使用关键字 * MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS[3]定义 Nomex－Kevlar 纤维束的线弹性正交各向异性本构模型各参数的取值。在 LS－DYNA 二次开发包中使用 FORTRAN 语言编写子程序 subroutine umat41()，定义线弹性正交各向异性材料的应力-应变关系及最大应力失效准则。在 Fortran IA－32 环境下编译子程序，生成 Ls971.exe 求解器。

3　Al 弹丸撞击 Nomex－Kevlar 平纹织物试验的数值建模

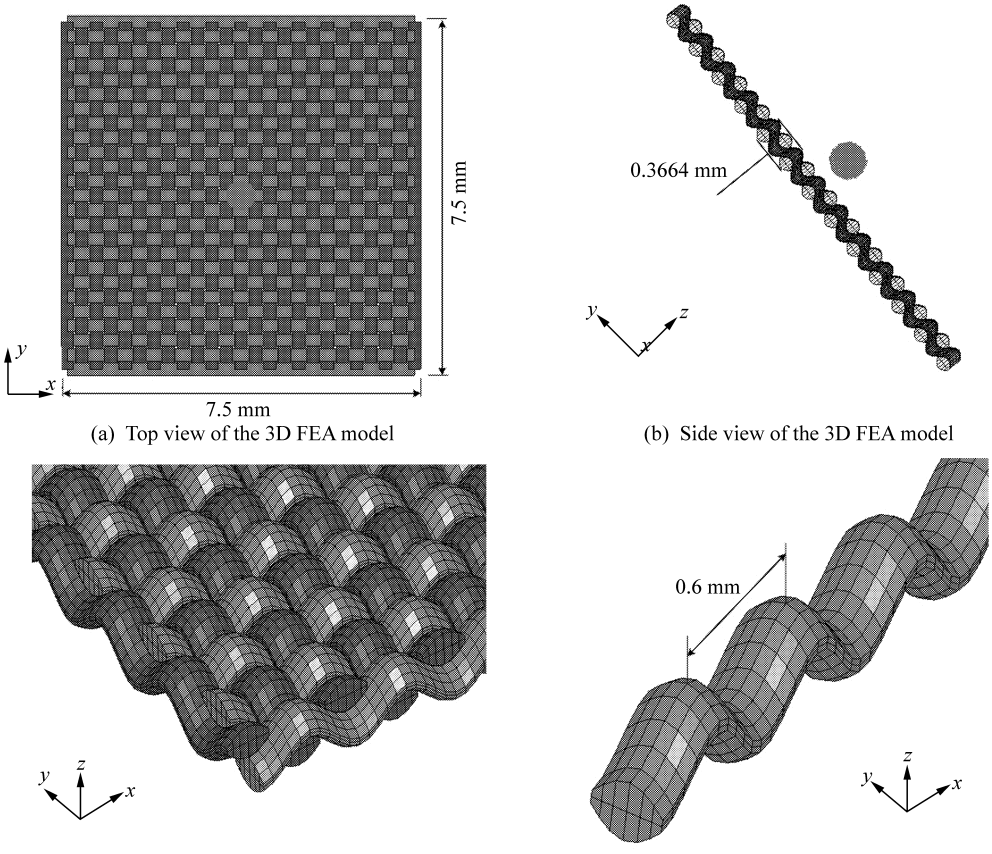
前人对金属靶板建模时，多采用光滑粒子流体动力学（Smoothed particle hydrodynamics，SPH）方法建模[3]；对非金属靶板（如混凝土层）建模时，对撞击区域使用 SPH 方法建模，对非撞击区域使用有限元方法（Finite element method，FEM）建模[3]；这 2 种方法适用于均质材料的超高速撞击仿真，不适用于各向异性复合材料的超高速撞击仿真。

本文中对 Al 弹丸超高速撞击 Nomex－Kevlar 平纹织物的仿真建模方法如下。用 Johnson－Cook 本构模型[3]和 Gruneison 状态方程建立 Al－2017－T4 弹丸的 SPH 数值模型。使用表 1 中的线弹性正交各向异性本构模型、最大应力失效标准及 Gruneison 状态方程建立 Nomex－Kevlar 平纹织物的 FEM 数值模型。Al 弹丸直径 0.5 mm，共 4224 个 SPH 单元，撞击速度 6.84 km/s，速度方向与织物平面法向夹角为 30°。Nomex－Kevlar 平纹织物尺寸为 7.5 mm×7.5 mm，厚度 0.3664 mm，经向和纬向各有 25 个纤维束，纤维束宽 0.3 mm，整个平纹织物数值模型共 73200 个 SOLID 单元。Al 弹丸与纤维束之间的摩擦力以及纤维束之间的摩擦力在 LS－DYNA 软件中定义，定义动摩擦力系数与静摩擦力系数相等，均为 0.3[6]。图 4(a)是数值模型的正视图，深灰色表示经向纤维束，浅灰色表示纬向纤维束。图 4(b)是数值模型的侧视图。图4(c)是平纹织物局部放大图，可清楚看到经向纤维和纬向纤维的编织状态。图 4(d)是一条纤维束的 3D 有限元数值模型，纤维束是一个 SOLID 单元连续体，其形状跟一条正弦曲线非常类似，相邻 2 个波峰之间的距离是 0.6 mm，其剖面由镜像对称的 2 条圆弧组成，被划分成 12 个网格。

4　数值仿真结果及分析

数值仿真终止时间设为 1 μs。图 5 分别为 Nomex－Kevlar 平纹织物的经纬向纤维束在仿真时刻为 0.21、0.23、0.25 μs 的等效应力图。可以看出，应力波沿着纤维束快速传播，纤维束吸收了大量的冲击动能，有效地抵御了 Al 弹丸的撞击。在实际的工程应用中，Nomex－Kevlar 平纹织物因具有该优良性能已被用于制造航天服，以抵御空间碎片的撞击。图 6 是 Al 弹丸击穿 Nomex－Kevlar 平纹织物，并在平纹织物后面形成碎片云，说明 Nomex－Kevlar 平纹织物能够有效破碎 Al 质弹丸。

如图 7(a)所示，Nomex－Kevlar 平纹织物的穿

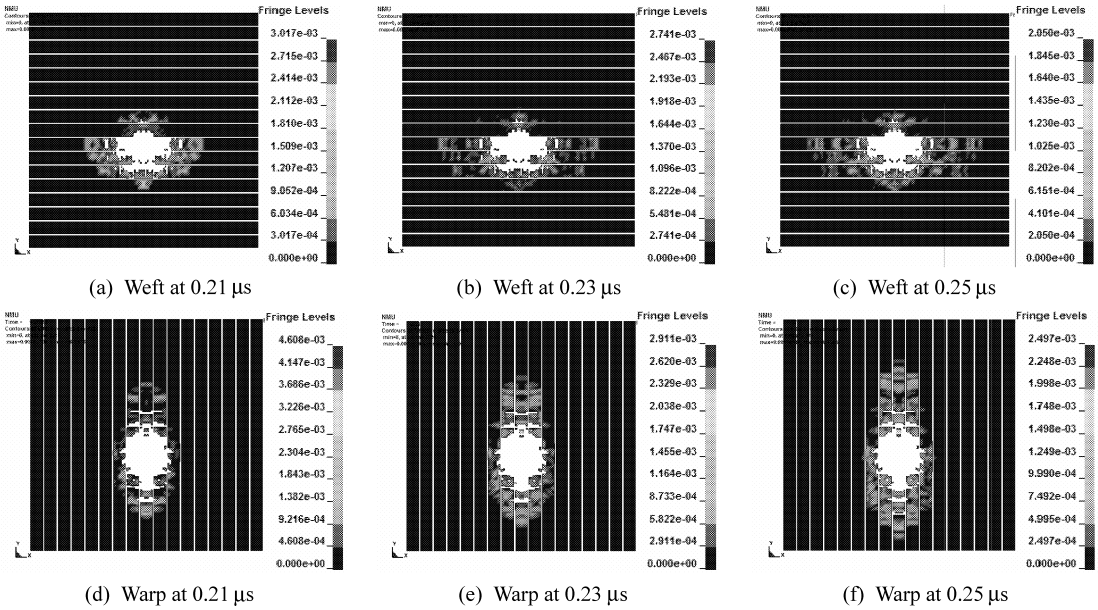


(a) Top view of the 3D FEA model　　(b) Side view of the 3D FEA model

(c) Two edges of the 3D FEA model　　(d) 3D FEA model of a Nomex-Kevlar yarn

图 4　Al 弹及 Nomex－Kevlar 平纹织物的数值模型

Fig. 4　Numerical model of Al projectile and Nomex－Kevlar plain woven fabric



(a) Weft at 0.21 μs　　(b) Weft at 0.23 μs　　(c) Weft at 0.25 μs

(d) Warp at 0.21 μs　　(e) Warp at 0.23 μs　　(f) Warp at 0.25 μs

图 5　Nomex－Kevlar 平纹织物纬向和经向纤维束在 3 个仿真时刻的等效应力

Fig. 5　Von Mises stress of plain woven fabric at three time steps

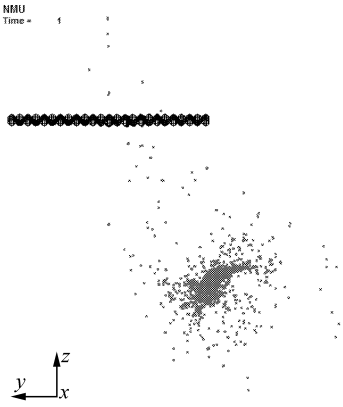


图 6　Al 弹丸击穿 Nomex－Kevlar 平纹织物并形成碎片云

Fig. 6　Al debris cloud created in the simulation

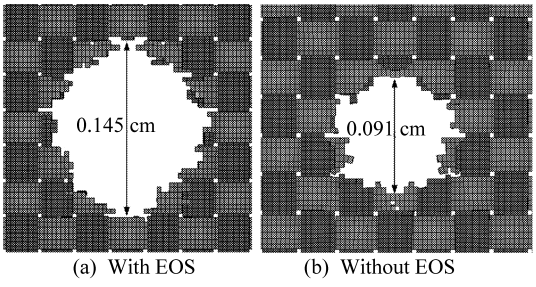


图 7　Nomex－Kevlar 平纹织物的仿真穿孔

Fig. 7　Predicted bumper hole of Nomex－Kevlar plain woven fabric

孔直径是 1.48 mm，试验穿孔直径是 1.6 mm[8]（图 2）。仿真值与试验值的相对误差为－7.5%。Nomex 纤维在环境温度高于 427 ℃时会发生分解和碳化[11]，而超高速撞击可使撞击区域局部达到上千摄氏度的高温，因此会有部分 Nomex 纤维分解和碳化，这部分的纤维失效无法通过仿真计算得出，这是本文的数值仿真结果与试验结果存在一些误差的原因。

图 7(b)是仅使用本构模型和失效标准，不使用状态方程进行仿真计算获得的 Nomex－Kevlar 平纹织物的穿孔，穿孔直径为 0.91 mm，与试验值的相对误差为－43.125%，误差很大。说明超高速撞击条件下的数值仿真必须使用状态方程，也说明了本文中利用 LS－DYNA 二次开发技术进行材料本构模型开发的必要性。

5　结　论

（1）利用 LS－DYNA 本构模型二次开发技术开发的线弹性正交各向异性本构模型（含最大应力失效标准）结合 Gruneison 状态方程可以正确描述 Nomex－Kevlar 平纹织物的超高速撞击力学性能。

（2）运用 FEM 方法生成 Nomex－Kevlar 平纹织物数值模型的建模方法可以广泛应用于纤维编织材料的数值建模。

（3）运用 LS－DYNA 本构模型二次开发技术开发含失效标准的材料本构模型，结合状态方程应用于超高速撞击问题的数值仿真，解决了 LS－DYNA 软件自带的适用于复合材料仿真的本构模型不能与状态方程联合计算的问题。

参考文献：

[1] 邓传明，于伟东，太空环境中舱外航天服的外层防护问题[J]. 东华大学学报，2004，30(4)：110-116.
Deng Chuanming，Yu Weidong. Issues on the out－layer protection of spacesuit in space environment [J]. J of Donghua University，2004，30(4)：110-116.

[2] 杨庆生，郑代华. 高等计算力学 [M]. 北京：科学出版社，2009：200-201.

[3] Hallquist J O. LS－DYNA theory manual [M]. California，USA：Livermore Software Technology Corp，2006：295-474.

[4] 邹　健，程小全，邵世纲，等. 基于 ANSYS 环境的平面编织层合板拉伸破坏数值仿真 [J]. 复合材料学报，2007，24(6)：180-184.
Zou Jian，Cheng Xiaoquan，Shao Shigang，et al. Numerical simulation for plain woven composite laminate based on ANSYS software [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(6)：180-184.

[5] Rao M P，Duan Y，Keefe M，et al. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of plain－weave fabric [J]. Composite Structures，2009，89(4)：556-566.

[6] Duan Y，Keefe M，Bogetti T A，et al. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric [J]. Int J of Mechanical Sciences，2006，48(1)：33-43.

[7] 陈　利，张一帆，孙　绯，等. 预定型平纹织物的剪切模型[J]. 复合材料学报，2010，27(2)：154-160.
Chen Li，Zhang Yifan，Sun Fei，et al. Shear model of tackkified plain fabrics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(2)：154-160.

[8] Christiansen E L，Cour-Palais B G，Friesen L J. Extravehicular activity suit penetration resistance [J]. Int J of Impact Eng，1999，23(1)：113-124.

[9] 周　履，范赋群. 复合材料力学 [M]. 北京：高等教育出版社，1991：19-28.

[10] Bohannan A，Fahrenthold E. Hypervelocity impact simulation using membrane particle－elements [J]. Int J Impact Eng，2008，35(12)：1497-1502.

[11] 沈新元. 先进高分子材料 [M]. 北京：中国纺织出版社，2009：88-91.