复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 28 卷 第 2 期 4 月 2011 年
Vol. 28 No. 2 April 2011

文章编号：1000-3851(2011)02-0211-06

平流层浮空器用柔性复合材料的断裂性能

王兆希*[1,2]，窦宝峰[1,3]，逄型台[4]

（1. 清华大学 工程力学系，北京 100084；2. 苏州热工研究院，苏州 215004；
3. 山东省临沂市建设安全工程质量监督管理处，临沂 276000；4. 北京住总集团有限责任公司，北京 100022）

摘 要： 对某浮空器蒙皮用柔性复合材料的撕裂性能和顶破性能进行了实验研究和数值分析。通过不同切口宽度和总宽度试样的撕裂实验，发现撕裂过程为典型的脆性断裂特征，根据线弹性断裂模型对撕裂过程进行数值模拟得到与实验结果一致的断裂过程，通过数值计算得到扩展过程中裂纹尖端的应力强度因子，计算得到的撕裂承载能力随相对切口宽度增加而降低，与实验结果一致。对不同直径试样进行顶破实验，并以断裂应变为裂纹临界扩展的断裂模型进行数值分析，得到顶破模拟结果与实验结果一致：使顶破位置达到相同的断裂应变值，大直径试样需要较大的位移值，失效时圆心位置的应力水平保持不变使得最大顶破承载水平保持不变。

关键词： 柔性复合材料；撕裂性能；顶破性能；应力强度因子；断裂模型

中图分类号： TB330.1；V250.2 **文献标志码：** A

Fracture properties of flexible composites from aerostat

WANG Zhaoxi*[1,2], DOU Baofeng[1,3], PANG Xingzhao[4]

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China;
3. Linyi Construction Bureau, Linyi 276000, China;
4. Beijing Uni-Construction Group Co., LTD., Beijing 100022, China)

Abstract: The tearing properties and the punch properties were investigated on the flexible composites from the aerostat by experiments and numerical simulations. For tearing tests of specimens with different quench width and total width, the typical brittle fracture is displayed in the crack propagation process. The tearing fracture process from the numerical simulations with linear fracture model is consistent with the experimental results. With the stress intensity factor calculated, the maximum loading level for the tearing tests reduce with the increment of the quench width ratio which agree well with the experimental results. The FEA simulations with the fracture strain as the crack propagation criteria rebuilt the experimental results of the punch tests. Larger displacement is needed for the specimens with larger diameter to perform the same fracture strain at the punch center while the maximum loading level is the same for different specimens for the stress at the punch center.

Keywords: flexible composites; tearing properties; punch properties; stress intensity factor; fracture model

二维平纹织物复合材料具有制造工艺自动化水平高、纤维弯曲扭曲程度小、纤维性能保持率高等优点，成为工程应用较多的复合材料之一[1]；其抗冲击性能好、比强度高、有较好的稳定性和耐久性，被广泛应用于航空航天、国防工业等领域[2]。浮空器用柔性复合材料是以起增强作用的各类纺织物作为增强骨架材料，起防护作用的热塑性聚合物作为基体的一种膜结构织物。两相材料性能差异很大并有互补性，具有较好的材料性能[3]。

轻质高性能材料与结构是研制临近空间浮空器的关键技术问题。欧美发达国家的高空飞艇HAA(High-Altitude Airship)等浮空器为满足较高的抗风撕裂性能、抗紫外线辐射性能、抗热疲劳性能以及低的泄漏率等材料性能要求，均采用在普通柔性编织复合材料基础上处理得到的高性能复合材料，其拉伸、撕裂和顶破等力学性能的研

收到初稿日期： 2010-02-24；**收到修改稿日期：** 2010-05-26
基金项目： 中国博士后科学基金资助项目(20090450161)
通讯作者： 王兆希，博士，助理研究员，从事复杂环境下核电关键设备材料损伤力学研究 E-mail：wangzx03@mails.tsinghua.edu.cn

究对浮空器的寿命评估和结构完整性评估有重要意义。

编织复合材料的细观结构较为复杂，其力学行为和破坏形式研究[4]主要集中在实验研究和基于细观几何模型的理论及数值研究，通过建立不同细观结构的单元胞体模型[5]对三维编织复合材料的强度和损伤进行预测[6-7]。对于柔性复合材料的准静态力学性能，一些研究者测试了柔性复合材料的拉伸、撕裂等力学性能[8-9]，并研究了影响柔性复合材料撕裂性能的因素[10]；对涂层织物撕裂破坏机制进行了研究，并建立多轴经向增强编织物柔性复合材料的撕裂力学模型[11-12]。

本文中对美国某浮空器外蒙皮用柔性复合材料进行断裂特性研究，主要通过实验研究不同切口相对宽度试样的抗撕裂断裂力学特性和不同直径试样的顶破性能；并采用线弹性断裂力学裂纹扩展模型进行数值模拟，与实验结果进行对比，为柔性复合材料结构的抗损伤能和损伤容限研究提供数据支持，保证其在不同使用条件和环境下的安全性。

1　实验材料及基本力学性能

本研究中采用的美国某浮空器外蒙皮用柔性复合材料，为 Kevlar 机织物(杜邦芳纶)和聚四氟乙烯基体采用压延方式外加贴膜形成。机织物为普通平纹组织结构，经纱与纬纱垂直相交，经纱与纬纱的间距均为 2 mm，经纱和纬纱纤维束的截面尺寸略有不同；贴膜为丙烯酸化合物，具有良好的弹性性能；复合材料的厚度为 0.15 mm、面密度为 0.0263 g/cm^2。

根据 BS3424 method 6A[13]和 DIN53354[14]进行该柔性复合材料的准静态单轴拉伸试验，得到的典型载荷-位移曲线如图 1 所示。纱线和基体被拉伸到一定程度后呈现典型的线弹性特征，拉伸破坏断口与拉伸受力方向约成 45°夹角，为最大剪应力破坏形式。通过单轴拉伸试验得到纬纱的弹性模量 9.10267 GPa、纬纱的抗拉强度 231.24456 MPa、泊松比 0.25；经纱的弹性模量 9.89183 GPa、经纱的抗拉强度 304.55389 MPa、泊松比 0.23；不同宽度的经向或纬向拉伸试样得到的结果基本相同。作为准各向同性的二维编织复合材料，其力学性能是由面内 2 个主方向的力学性能参数确定的。

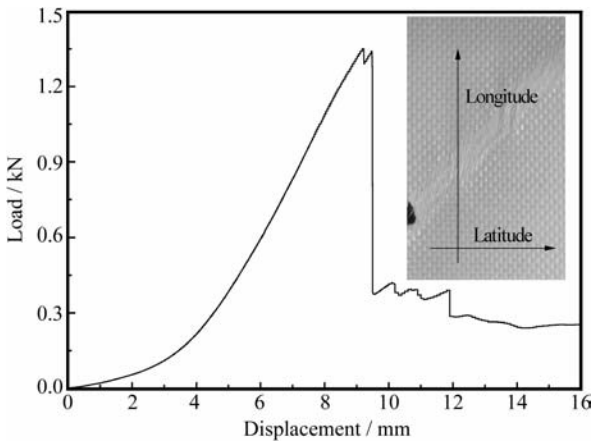

图 1　柔性复合材料单轴拉伸载荷-位移曲线

Fig. 1　Load-displacement curve of uni-axial tension for felxible composite

2　材料撕裂力学性能

表征柔性复合材料坚韧性和耐用性的撕裂性能是柔性复合材料的一个重要指标，目前常用的撕裂方法有单缝撕裂法、双缝(舌形)撕裂法和梯形撕裂法等。本文中采用德国标准 DIN 53363—1969[15]和美国 ASTM D 751—00[16]标准中梯形撕裂法的撕裂模式，采用 Zwick - Z005 拉伸试验机进行撕裂试验，加载速率控制在 0.5 mm/min，试验在室温下进行，测试时相对湿度为 60%，试验过程中记录试验的载荷-位移数据，并同步采集损伤和裂纹扩展图像。

2.1　材料撕裂实验结果

为研究试样沿经向的抗撕裂性能，测试撕裂性能采用的试样长度为 120 mm，夹持线方向与受力方向成直角，如图 3 所示。试样中间预制切口，采用不同切口宽度 a 和不同的剩余韧带宽度 b 的试样进行试验，如表 1 所示。根据断裂力学研究不同的切口长度对试样撕裂性能的影响。

表 1　柔性复合材料撕裂实验试样几何尺寸

Table 1　Felxible composite specimen geometries for the tearing tests

a/mm	5	10	12.5	15	15	15	15	15	20	25	30
b/mm	55	50	48.5	15	25	45	60	70	40	35	30

a: Quench width; b: Residual ligament width.

切口宽度 a=15、总宽度(a+b)改变的试样撕裂实验典型载荷-位移曲线如图 2 所示，对应的撕裂过程中的裂纹扩展过程如图 3 所示。随着撕裂位移的增加，裂纹尖端逐渐出现一定程度的钝化，裂纹尖端区域出现损伤；在加载过程中，所有纱线均

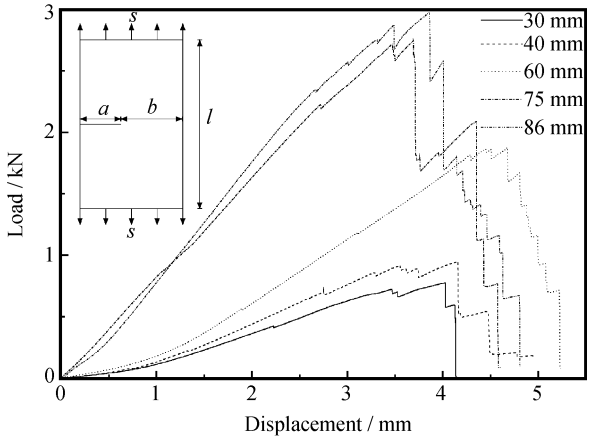

图 2 柔性复合材料撕裂实验载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of tearing test for felxible composite

受拉力而伸长，第 1 根纱线断裂时，撕裂力还远远未达到最大值，在少量几根纱线断裂后对应的载荷-位移曲线出现最大值；随着裂纹尖端沿着裂纹扩展方向前移，切口前端经向纱线逐根迅速断裂，撕裂载荷急剧下降，此时只有贴膜和基体承受载荷，整个撕裂过程是由经纱的正应力拉伸断裂引起的。

2.2 材料撕裂实验数值模拟结果

通过数值模拟的方法研究编织复合材料的弹性断裂性能已经取得一定的成果，例如通过弹性模量衰减方法研究复合材料的损伤破坏行为[11]。本文中通过数值模拟的方法研究撕裂过程中复合材料的断裂过程及断裂性能。撕裂实验的载荷-位移曲线表现出脆性断裂失稳的特征，而裂纹扩展图片中裂纹起裂后迅速扩展，裂尖的钝化过程较短，并且未发现裂纹尖端区域的明显大塑性变形，因此将撕裂过程近似为脆性断裂过程。

建立几何模型，采用的材料模型简化为均匀正交各向异性材料，用 2 个正交方向的平均性能来表示材料的刚度、强度特征，数值计算中采用实验得到的裂纹扩展长度数据信息作为断裂模型分析试样在撕裂过程中的各种力学性质，得到的裂纹扩展过程如图 4 所示，与图 3 所示的实验结果较为符合。裂纹扩展过程中有较大的裂纹尖端张开位移，裂纹前端塑性变形区域很小。

对 $a=15$、$b=60$ 的几何模型计算得到的载荷-位移数据如图 5 所示，与撕裂实验得到的载荷-位移数据结果基本相同。裂纹扩展时局部断裂的纱线不均匀性导致实验结果的离散，与模拟结果略有不同。对不同切口宽度和总宽度试样的撕裂过程进行数值计算，并对裂纹尖端的应力强度因子进行计算

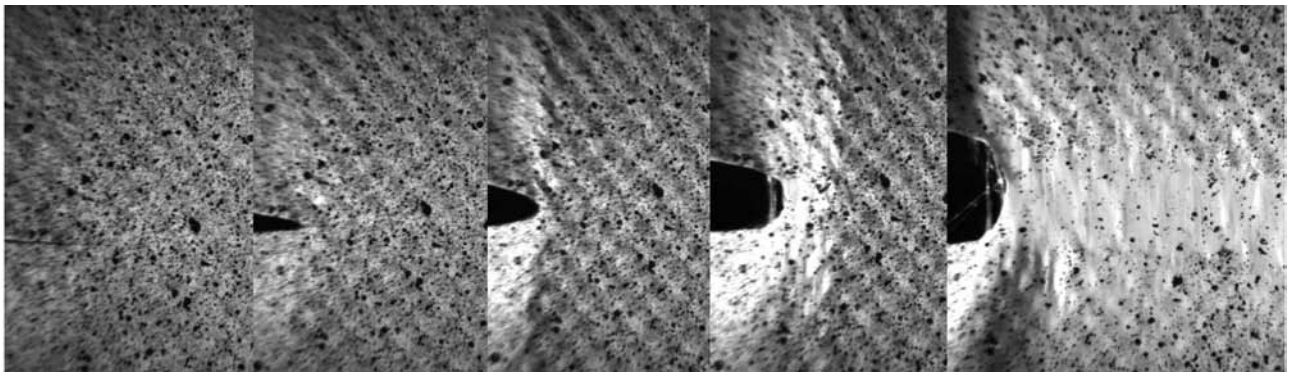

图 3 柔性复合材料试样撕裂实验的裂纹扩展过程

Fig. 3 Felxible composite crack propagation process for the tearing tests

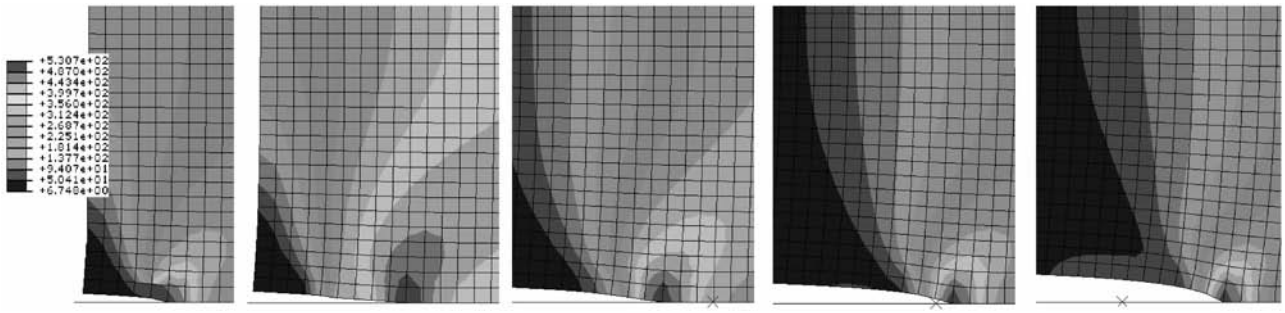

图 4 试样撕裂数值模拟的裂纹扩展过程

Fig. 4 Simulation results of fracture process for felxible composite tearing test

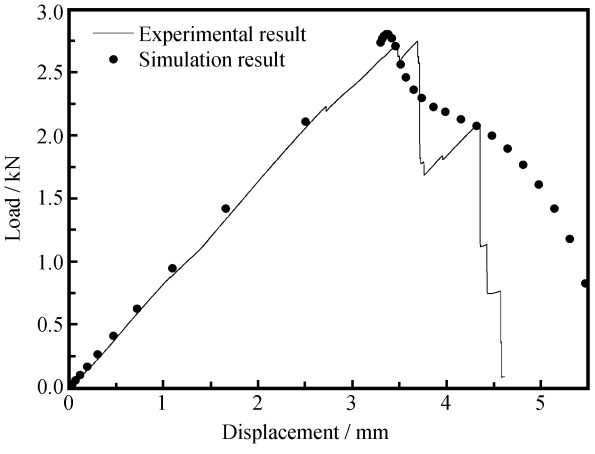

图 5　柔性复合材料撕裂载荷-位移曲线

Fig. 5　Load-displacement curves of tearing for felxible composite

平均后得到经纱纱线的 $K=367\ \mathrm{N/mm^{1/2}}$。该线弹性断裂过程中 K 为主导因素。

根据计算得到的裂纹尖端应力强度因子预测不同切口宽度和不同总宽度几何形状试样的极限载荷[17]：

$$F=\frac{tbK}{\alpha\sqrt{\pi a}} \tag{1}$$

$$\alpha=1.12-0.23\frac{a}{a+b}+10.6\left(\frac{a}{a+b}\right)^2-21.7\left(\frac{a}{a+b}\right)^3+30.4\left(\frac{a}{a+b}\right)^4 \tag{2}$$

其中：K 为试样裂纹尖端应力强度因子；α 为几何因子；F 为极限载荷；a、b 和 t 分别为切口宽度、剩余韧带宽度和试样厚度。根据不同切口宽度和总宽度几何形状试样计算得到的极限载荷如图 6 所示。计算得到的极限载荷与实验得到的极限载荷变化趋势相同；随着相对切口宽度 $a/(a+b)$ 的增加，极限载荷降低，计算得到的极限载荷与实验得到的极限载荷结果接近。数值计算得到的裂纹尖端应力强度因子，即经纱材料的断裂韧性值 $K=367\ \mathrm{N/mm^{1/2}}$ 是准确的。

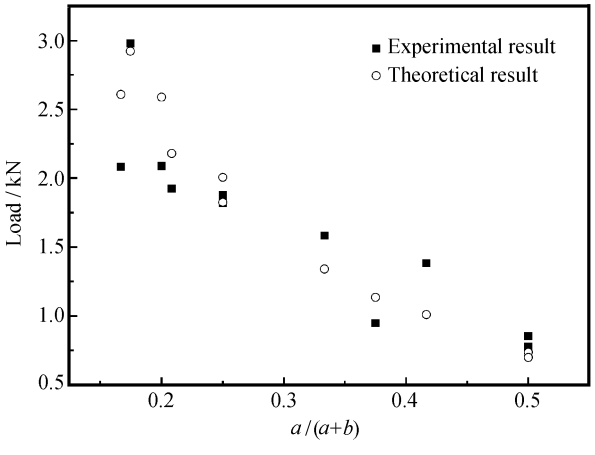

图 6　柔性复合材料撕裂的极限载荷

Fig. 6　Maximum loading level of tearing for felxible composite

3　材料顶破力学性能

由于实验条件的限制，目前对柔性复合材料双向拉伸和多向拉伸力学性能的研究比较少。而在实际的应用中，柔性复合材料经常会受到多个方向拉力的作用，顶破是一种常见的破坏形式。顶破过程中，柔性复合材料的 2 个主方向都受到载荷的作用。

对直径为 60 mm、120 mm 和 180 mm 的试样进行顶破实验，顶杆直径为 12.5 mm，顶破试验压入速度采用 0.5 mm/s，得到的载荷-位移曲线如图 7 所示。实验过程中，经纱方向上，在中心点及距离中心点 20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 和 60 mm 处贴应变片测量变形过程中的应变值。本实验中的柔性复合材料采用平纹织物压延而成，表面较光滑，当受到顶破外力作用时基体材料先开始破坏，然后纤维开始断裂，最后压延层被顶破；当中心纱线断裂以后，顶杆很容易穿透压延层部分，导致承载的迅速下降。

取直径为 180 mm 试样的顶破实验进行数值模拟，根据 2.2 节模拟计算得到 2 个主方向的临界断裂应变值作为判断试样失效的断裂准则，模拟得到顶入过程中载荷-位移曲线如图 8 所示，与实验结果一致。变形过程中经纱不同位置处测量得到的应

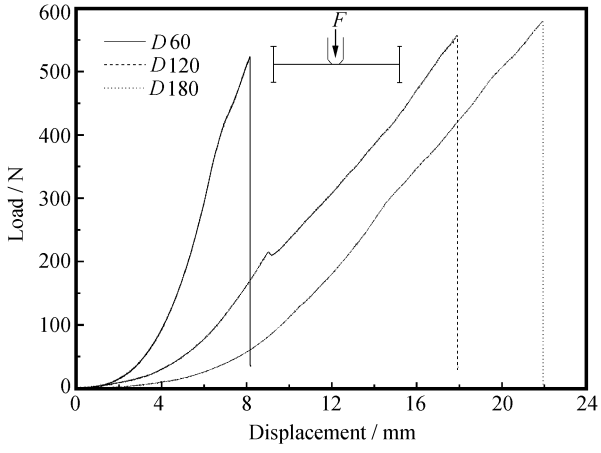

图 7　柔性复合材料不同直径试样顶破实验

Fig. 7　Punch results for felxible composite with different diameters

变值以及模拟计算得到的应变值如图 9 所示，实验结果与模拟结果基本相同。

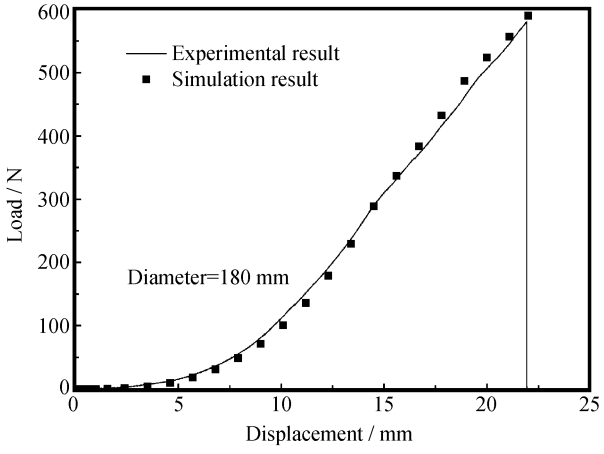

图 8　柔性复合材料顶破模拟结果

Fig. 8　Simulation result of punch for felxible composite

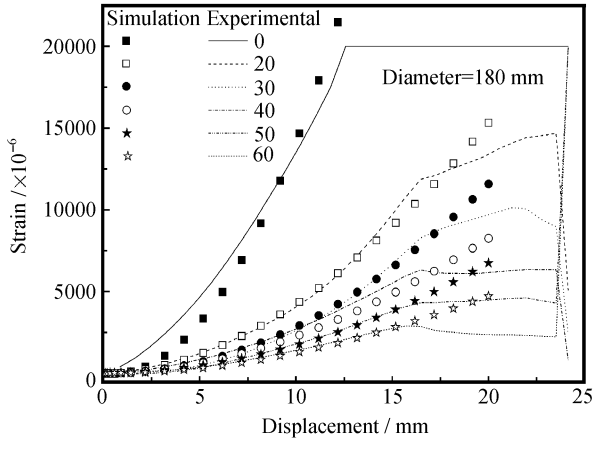

图 9　柔性复合材料顶破应变实验模拟结果

Fig. 9　Strain results during punch of felxible composite for different positions

沿顶破试样经纱方向，从圆心位置往外，顶破时的应变分布基本成指数下降，顶入圆心位置的应变值最大。不同尺寸的试样，采用相同的断裂准则得到与实验结果相同的变化趋势：尺寸增大时最大位移值变大，使顶破位置达到相同的断裂应变值，大直径试样需要较大的位移值；而不同尺寸试样顶破时最大载荷基本保持不变，顶破时的临界应力值也基本保持不变，应力分布如图 10 所示。

对于该蒙皮柔性复合材料，采用线弹性的断裂力学模型可以较好地模拟研究顶入过程中的构件的断裂失效过程。

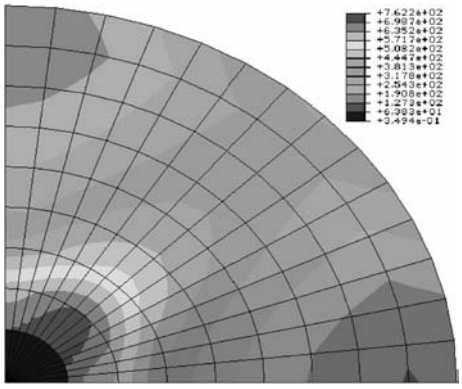

图 10　柔性复合材料顶破应力分布模拟结果

Fig. 10　Stress distribution of punch for felxible composite

4　结　论

（1）对浮空器用柔性复合材料的撕裂性能和顶破力学性能进行了实验研究和数值分析，该复合材料主要以聚合物为基体，由经向和纬向纤维平铺机织而成，表现出典型的线弹性断裂特征。

（2）对不同的切口宽度和总宽度的试样进行撕裂实验，根据单轴拉伸试验结果得到的 2 个主方向的材料特性进行数值模拟，得到与实验结果相同的裂纹扩展过程，根据裂纹前端的应力分布得到裂纹扩展时的应力强度因子，由裂纹扩展时的应力强度因子计算得到不同切口宽度和总宽度试样的最大承载随相对切口宽度的增加而降低，与实验结果基本相同。

（3）对不同直径的圆形试样进行顶破实验，以 2 个主方向的临界断裂应变值作为判断试样失效的断裂准则进行数值模拟，得到使顶破位置达到相同的断裂应变值，不同尺寸试样的最大位移值随尺寸变大而变大；而圆心位置顶破时的临界应力值基本保持不变。

（4）采用线弹性的断裂模型可以模似出与实验结果较为符合的撕裂及顶破的断裂过程。

参考文献：

[1] Nakai A, Ohki T, Takeda N. Mechanical properties and micro-fracture behaviors of flat braided composites with a circular hole [J]. Composite Structures, 2001, 52(3): 315-322.

[2] 徐　焜，许希武，汪　海. 三维六向编织复合材料力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报，2005，22(6)：144-149.
Xu Kun, Xu Xiwu, Wang Hai. Experimental investigation of the mechanical properties of 3D 6-directional braided composites [J].

Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 144-149.

[3] Byun J H. The analytical characterization of 2D braided textile composites [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(5): 705-716.

[4] 周 平，吴承伟，于 平. 平纹织物复合材料横向力学性能研究 [J]. 复合材料学报，2006，23(3)：170-175.
Zhou Ping, Wu Chengwei, Yu Ping. Transverse mechanical properties of plain woven fabric composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(3): 170-175.

[5] Wang Y Q, Wang A S D. Microstructure/property relationships in three-dimensionally braided fiber composites [J]. Composites Science and Technology, 1995, 53(2): 213-232.

[6] 卢子兴，刘振国，麦汉超. 三维编织复合材料强度的数值预报 [J]. 北京航空航天大学学报，2002，28(5)：563-565.
Lu Zixing, Liu Zhenguo, Mai Hanchao. Numerical prediction of strength for 3D braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 563-565.

[7] 杨振宇，卢子兴，刘振国，李仲平. 三维四向编织复合材料力学性能的有限元分析 [J]. 复合材料学报，2005，22(5)：155-161.
Yang Zhenyu, Lu Zixing, Liu Zhenguo, Li Zhongping. Finite element analysis of the mechanical properties of 3D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 155-161.

[8] 王立朋，燕 瑛. 编织复合材料弹性性能的细观分析及试验研究 [J]. 复合材料学报，2004，21(4)：152-156.
Wang Lipeng, Yan Ying. Micro analysis and experimental study of the elastic properties of braided composites structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(4): 152-156.

[9] 何 琼，陈南梁，席时平，胡 淳. 机织物增强压延柔性复合材料的撕裂和剥离性能 [J]. 东华大学学报：自然科学版，2007，33(1)：130-134.
He Qiong, Chen Nanliang, Xi Shiping, Hu Chun. Tearing and peeling performances of calendered flexible composites reinforced with weaving fabrics [J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2007, 33(1): 130-134.

[10] 邹 健，程小全，邵世纲，范金娟，张卫芳. 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, Fan Jinjuan, Zhang Weifang. Numerical simulation for plain woven composite laminate based on ANSYS software [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 180-184.

[11] 卢子兴，杨振宇，李仲平. 等. 三维编织复合材料力学行为研究进展 [J]. 复合材料学报，2004，21(2)：1-7.
Lu Zixing, Yang Zhenyu, Li Zhongping, et al. Development of investigation into mechanical behaviour of three dimensional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 1-7.

[12] 宁 煜，陈南梁. 涤纶多轴向经编织物增强柔性复合材料拉伸性能的研究 [J]. 产业用纺织品，2005，23(8)：19-22.
Ning Yu, Chen Nanliang. Research on the tensile properties of the composite reinforced with multi-axialwarp-knitted fabrics of the PET fibers [J]. Technical Textiles, 2005, 23(8): 19-22.

[13] British Standards. BS3424—4 Testing coated fabrics method 6, method for determination of breaking strength and elongation at break [S]. British: British Standards Institution, 1983: 1-16.

[14] German National Standard. DIN 53354—1981 Testing of artificial leather, tensile test [S]. Deutsches Institute Fur Normung: German National Standard, 1981: 1-3.

[15] German National Standard. DIN 53363—1969 Testing of plastic films tear propagation test on trapezoidal speciens with a slit [S]. Deutsches Institute Fur Normung: German National Standard, 2003: 1-4.

[16] American Standard of Testing Method. ASTMD751—00 Standard test methods for coated fabrics [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2000.

[17] 仇仲冀. 应力强度因子手册 [M]. 北京：科学出版社，1993：323-324.