复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 30 卷 第 3 期 6 月 2013 年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0087-06

含孔和切口 C/C 编织复合材料静态拉伸下的力学性能

唐玉玲[1,2]，泮世东[1]，周振功*[1]，杨银环[1]
（1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所，哈尔滨 150080；2. 黑龙江工程学院，哈尔滨 150050）

摘 要： 通过对中心开孔、双边半圆切口和双边 V 型切口三种结构的静态拉伸测试及有限元模拟分析，比较了不同开孔/切口形式 C/C 编织复合材料的破坏行为。结果表明：三种开孔/切口形式的 C/C 试件在拉伸破坏中均表现为较强线性的应力-应变关系，且开孔/切口附近有明显的应力集中；板宽不变时，缺口强度对开孔/切口尺寸不敏感，而对其端部的曲率半径较敏感；孔端部材料不满足线弹性的破坏机制，发生了大规模的应力松弛，其尺寸随开孔/切口曲率半径的增大而增大，而对开孔/切口位置不敏感。

关键词： C/C 复合材料；缺口强度；3D 编织；拉伸破坏；强度分析
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Mechanical properties analysis of 3D C/C braided composite opening structures under static tension

TANG Yuling[1,2], PAN Shidong[1], ZHOU Zhengong*[1], YANG Yinhuan[1]
(1. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

Abstract: The tensile fracture of the 3D C/C braided composite structures was studied through the static tensile test and finite element simulation analysis. Three modeling structures including circularly holed, double-edge-semicircle and double-edge-V-shaped specimens were considered for the investigation. The results show that the three open structures in the tensile failure have a strong linear stress-strain relationship and locality stress concentration. At the fixing width of the C/C specimens, the tensile notched strength is not sensitive to size, but it is sensitive to the radius of the notch-tips. The linear elastic failure mechanism can not be applied to the damaged zone of the material, which suggest that a large-scale stress relaxation should exist. The size of the damaged zone increases when the radius of the notch-tips increases, while the size is insensitive to the location of the openings.

Keywords: carbon/carbon composites; notched strength; 3D braided; tensile fracture; strength analysis

碳/碳(C/C)复合材料是一种具有重要应用潜能的新型材料。由于其具有高比刚度、高比强度，以及良好的热稳定性[1]等特点，被广泛应用于航天、航空、核能等领域。

C/C 复合材料复杂多样的结构类型，决定了其各项力学性能的复杂性。目前，国内外学者对 C/C 复合材料的力学性能和破坏机制进行了大量的研究工作，主要集中在不同结构类型(如层板、编织)的拉伸、压缩、剪切等各项力学性能研究和 C/C 复合材料层合板不同形式切口结构的力学性能的研究[2-8]。C/C 编织复合材料克服了层板结构分层和开裂的缺点，因此连接中切口结构采用 C/C 编织复合材料将是重要的应用方向。但因其空间拓扑结构复杂，制造成本较高，研究成果尚不成熟[4]，对切口 C/C 编织复合材料结构的力学性能的研究较少。

为了解切口 C/C 编织复合材料结构在拉伸破坏过程中的破坏行为，本文中通过数值模拟和拉伸实验测试几种不同形式的切口 C/C 编织复合材料结构的拉伸力学性能，分析其破坏行为及破坏应力与切口形状间的关系。

1 有限元模型

中心开孔(CH)、双边半圆切口(DEH)和双边 V 型切口(DV)三种切口三维 C/C 编织复合材料试

收到初稿日期： 2012-05-15；**收到修改稿日期：** 2012-08-29；**网络出版时间：** 2013-01-11 10:37:40
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130111.1037.010.html
基金项目： 国家自然科学基金(11272105)；高等学校博士学科专项科研基金(20092302110006)
通讯作者： 周振功，教授，博士生导师，研究方向为复合材料及其结构的研究与设计 zhouzhg@hit.edu.cn

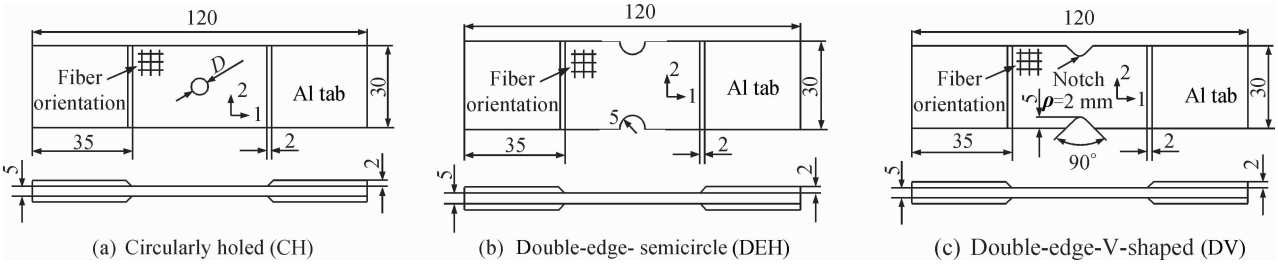

图 1　不同结构 C/C 编织复合材料静态拉伸测试试件　　Unit：mm

Fig. 1　Sketch map of 3D C/C braided composite specimens with different structures for static tension test

件的几何尺寸如图 1 所示，利用有限元软件 ABAQUS 进行拉伸试件的数值模拟分析。考虑结构切口与试件宏观几何尺寸属同一数量级，建立宏观结构模型，假设复合材料为宏观均匀且正交各向异性材料，其弹性常数见表 1，拉伸强度 X_1 为 286 MPa。选用三维实体单元 C3D20R，利用对称性选取试件 1/4 建模，切口附近网格细化，图 2 为中心开孔(CH)试件网格划分。

表 1　三维 C/C 编织复合材料力学性能

Table 1　Properties of 3D C/C braided composites

Young's modulus/GPa		Shear modulus/GPa	Poisson's ratio	
$E_1=E_2$	E_3	$G_{12}=G_{13}=G_{23}$	ν_{12}	$\nu_{13}=\nu_{23}$
84.5	83.4	2.5	0.035	0.032

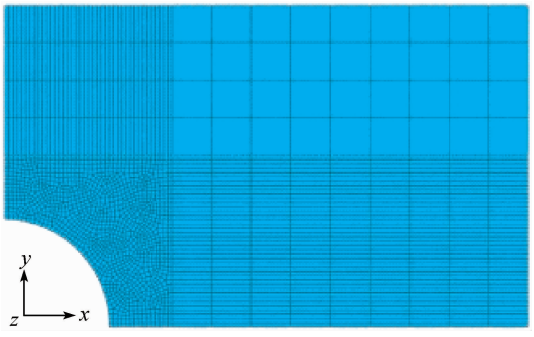

图 2　C/C 编织复合材料试件 1/4 模型网格划分图

Fig. 2　Mesh of 1/4 test specimens of C/C braided composite

点应力准则(PSC)是由 Whitney and Nuismer 首次提出[5]，它是基于无缺口强度(σ_0)和特征尺寸(d_0)的两参数模型，如图 3 所示。该模型认为当距开孔(或缺口)边缘 d_0 处的点达到无缺口强度(σ_0)时，破坏发生，文献[7]给出了点应力准则的计算公式：

$$\sigma_x(R+d_0,\ 0)=\sigma_0 \tag{1}$$

σ_x 为试件开孔处横截面的应力分布，可由下式

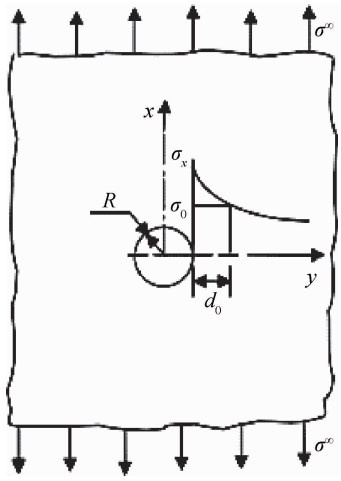

图 3　开孔板的点应力准则[7]

Fig. 3　Point stress criterion for a plate with circular hole[7]

近似得到：

$$\frac{\sigma_x(y,\ 0)}{\sigma_x^{\infty}}=\frac{1}{2}\left[2+\alpha^2+3\alpha^4-(K_T^{\infty}-3)(5\alpha^6-7\alpha^8)\right] \tag{2}$$

式中：σ_x^{∞} 为远场拉伸应力；$\alpha=R/y$，$y>R$，y 为与载荷垂直方向的坐标，R 为中央开孔的半径；K_{T}^{∞} 为应力集中系数，其值可通过下式计算：

$$K_{\mathrm{T}}^{\infty}=1+\sqrt{2\left(\sqrt{E_x/E_y}-\nu_{xy}+E_x/(2G_{xy})\right)} \tag{3}$$

式中：E_x、E_y 为杨氏模量；G_{xy} 为剪切模量；ν_{xy} 为泊松比。由上式可得到缺口强度与无缺口强度比值如下：

$$\frac{\sigma_{\mathrm{N}}^{\infty}}{\sigma_0}=\frac{2}{\left[2+\beta^2+3\beta^4-(K_T^{\infty}-3)(5\beta^6-7\beta^8)\right]} \tag{4}$$

式中：$\beta=R/(R+d_0)$。

尽管对特征尺寸(d_0)尚无明确的物理解释，但 d_0 是一个与破坏区域相关的几何量，可通过有限元计算及试验得到。

该模型是一种简单有效的预测方法，对二维 C/C 切口复合材料层合板试件的预测结果较好[3]。本

文中将采用点应力准则预报试件拉伸时的破坏应力，并确定切口边缘的破坏区域尺寸，比较 CH、DEH 和 DV 三种试件开孔附近应力松弛区域的几何尺寸。

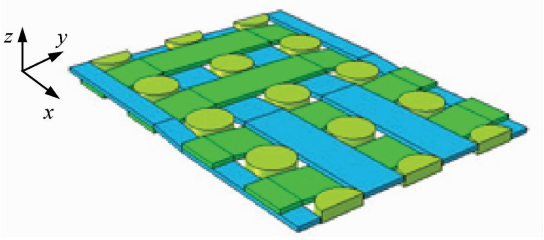

图 4　3D C/C 编织复合材料增强体结构

Fig. 4　Fabric reinforcing structure of 3D C/C braided composites

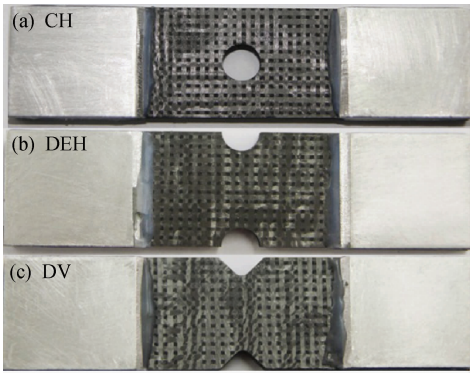

图 5　C/C 编织复合材料部分切口拉伸试件

Fig. 5　Tensile test specimens of C/C braided composite

2　拉伸实验

为了验证数值模拟的有效性，对三维 C/C 编织切口复合材料进行拉伸测试，并将实验结果与模拟结果进行对比。复合材料增强体的结构示意图如图 4 所示，测试试件体积密度为 1.95 g/cm^3，体积分数为 48%。三类测试试件如图 5 所示，其中中心开孔试件开孔直径有 6、8、10 mm 三种，分别记为 CH6、CH8、CH10。试件夹持区两侧贴有铝板作为加强片。所有测试均在常温下进行，应用INSTRON 5569 电子拉伸机施加位移载荷，沿图 1 中所示的方向 1 以 0.5 mm/min 的速率加载。

3　结果分析

采用 OLYMPUS(SZX12)体式显微镜观察含切口试件断口形貌，如图 6 所示。可见，试件均沿缺口处横截面发生脆性断裂，断口表面呈现出与荷载方向垂直的纤维束断裂面较为平整，而平行于载荷方向的纤维束断面参差不齐，且伴有少量纤维拔出现象。

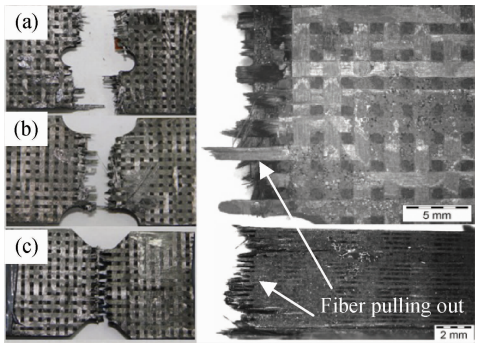

图 6　C/C 编织复合材料拉伸试件断口形貌

Fig. 6　Fracture macrographs of 3D C/C braided composites tensile specimens

图 7 给出了三种切口类型最终破坏的平均缺口强度及破坏载荷。破坏载荷随切口直径的增大而减小，切口尺寸相同时，中心开孔(CH)试件与双边半圆切口(DEH)试件的破坏载荷接近，且均高于双边 V 型切口(DV)试件。图 7 中缺口抗拉强度 σ_N 由下式计算得到：

$$\sigma_N = F/A_{Net} \tag{5}$$

式中：F 为破坏载荷；A_{Net} 为试件缺口处最小横截面面积。

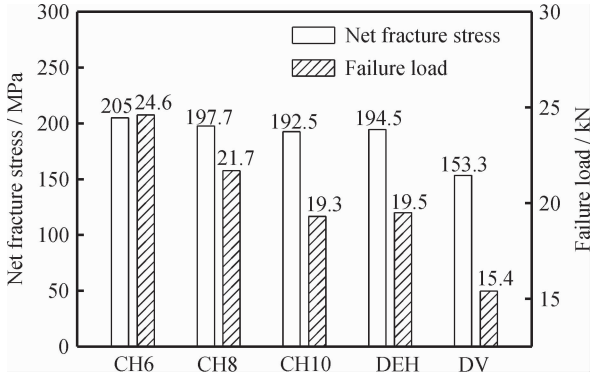

图 7　C/C 编织复合材料切口试件拉伸破坏时的平均缺口强度和破坏载荷

Fig. 7　Average value of tensile fracture stress and load of C/C braided composites

图 8 为三种 C/C 编织切口试件的拉伸应力-应变曲线。可知，三种切口 C/C 编织复合材料试件的拉伸应力-应变曲线均呈线性关系直至最终破坏，最终破坏应变为 0.2%～0.5%。

4　讨　论

4.1　仿真结果分析

图 9 给出了由点应力准则预报的 CH、DEH 和 DV 三种试件的缺口强度，并与实验结果进行了对

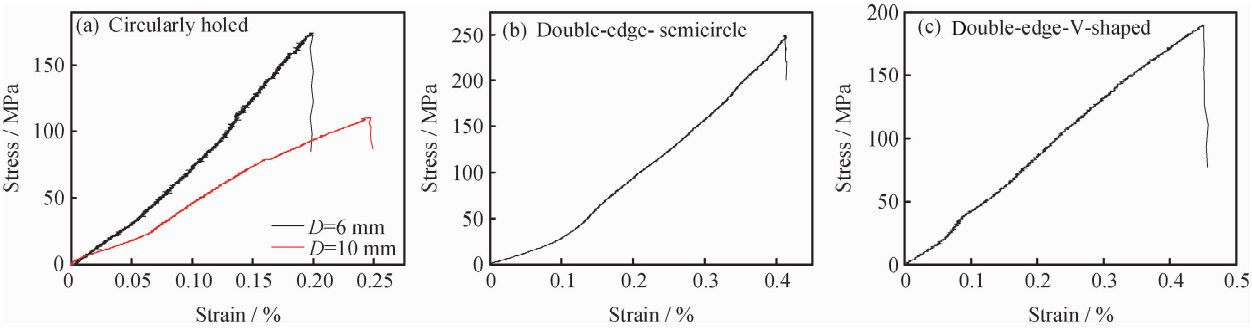

图 8　三维 C/C 编织复合材料试件拉伸应力-应变曲线

Fig. 8　Stress－strain relation of 3D C/C braided composite specimens for tensile tests

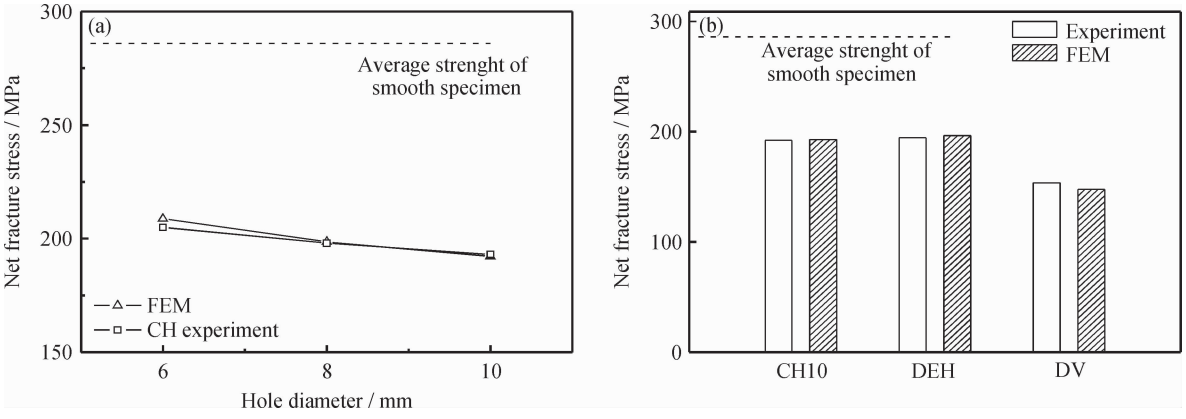

图 9　三维 C/C 编织复合材料试件拉伸时的缺口强度

Fig. 9　Notched strength of 3D C/C braided composite specimens in tensile test

比，误差在 5%以内。

图 9(a)为 CH 试件在板宽为 30 mm 时，不同切口尺寸的缺口强度。可见，其值随开孔尺寸的增大而减小；而且板中央开孔直径每增大 2 mm，强度降幅均不超过 3%。

图 9(b)将 CH、DEH、DV 三种试件在切口尺寸相同时的缺口强度进行比较，发现 CH 和 DEH 两种试件的切口尺寸、切口形状(曲率半径)相同，虽切口位置不同，但其缺口强度(分别为 192.5 MPa 和 194.5 MPa)较为接近，比 DV 试件的缺口强度(153.5 MPa)分别高 25.41%和 26.71%。可见，切口尺寸一定时，破坏应力随切口曲率半径的减小而降低。

图 10 给出了切口试件的特征尺寸(d_0)与切口端部曲率半径的关系。发现 d_0 随切口端部的曲率半径的增大而增大，当端部曲率半径由 2 mm 增至 5 mm 时，d_0 由 1.2 mm 增至 2.6 mm，表明破坏区域尺寸与试件几何尺寸为同数量级，且增幅近 120%，与文献[3]中给出的 C/C 层板切口结构对切口端部曲率半径不敏感的结论不同。同时观察 d_0 对切口位置敏感性，CH 和 DEH 两种对称结构试件的 d_0 相同，而破坏应力相差 2%，由此可推断 d_0 对切口位置不敏感。

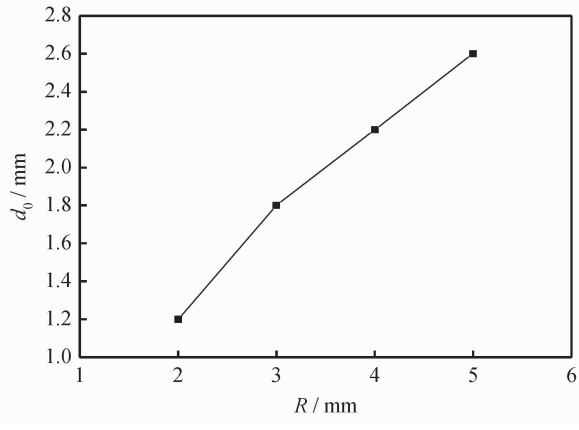

图 10　C/C 编织复合材料试件特征尺寸(d_0)与切口端部曲率半径(R)的关系

Fig. 10　Relationship of characteristic dimension (d_0) and radius (R) of C/C braided composite specimens

4.2 参数讨论

从以上的仿真与实验结果的对比看，采用点应力准则预报 C/C 三维编织复合材料不失为一种简单而有效的方法。图 11(a)、11(b)中的破坏应力 σ_G 由下式计算得到：

$$\sigma_G = F/A_{Gross} \tag{6}$$

式中：F 为破坏载荷；A_{Gross} 为试件无缺口处横截面面积。

图 11(a)为 CH 和 DV(V 型口端部曲率半径为 2 mm)两种试件切口尺寸对破坏应力 σ_G 的影响。两种试件在板宽一定时，破坏应力均随切口尺寸的增大而减小；DV 试件的开孔曲率半径小于 CH 试件。因此，在相同开孔尺寸下 DV 的破坏应力较 CH 试件小。

图 11(b)为 DV 试件几何尺寸对拉伸破坏时破坏应力的影响。当切口尺寸(a)与板宽(W)比值一定时，V 型口端部的曲率半径越大，破坏应力越大，即破坏载荷越大，但随着板宽的增加，即切口间韧带区域尺寸的增加，该影响逐渐减弱。当端部曲率半径为 2 mm 时，随着 $2a/W$ 增大，毛面积的破坏应力(破坏载荷)逐渐减小，文献[3]中针对 C/C 复合材料层板的研究也得到了同样的结论，而该影响随韧带区尺寸的增加而减小。

图 11(c)为 DV 试件缺口抗拉强度 σ_N 的预报结果。$2a/W$ 值一定时，缺口强度随切口尺寸的增加而降低。当切口尺寸(a)一定时，σ_N 随 $2a/W$ 的增加而增加。而在板宽较小的时候出现了反常的结果，缺口强度比无缺口试件的抗拉强度高，在文献[3]对二维 C/C 复合材料层合板缺口强度进行的研究中，得到了与本文中三维 C/C 复合材料一致的结论。

4.3 破坏机制

脆性材料最终断裂一般由两个因素控制：(1)局部的损伤；(2)损伤造成的应力重分布。试件切口附近在破坏过程中存在应力集中，造成局部的应力松弛，且在该区域内应力重新分配。

由于开孔端部应力松弛区域范围较大，使局部的破坏不满足线弹性的破坏机制。为了进一步分析切口 C/C 编织复合材料试件拉伸破坏过程中的局部强度增强的机制，计算 C/C 复合材料中纤维强度的使用效率，定义纤维强度效率(Y_σ)如下式：

$$Y_\sigma = \frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{fiber} \times V_f^*} \times 100\% \tag{7}$$

式中：Y_σ 为纤维的强度效率；σ_{exp}(MPa)为拉伸实验测得的试件强度；σ_{fiber}(MPa)为纤维强度；V_f^* 为拉伸方向碳纤维体积分数。

含缺口的 C/C 复合材料拉伸过程中，缺口周围通常表现为三种损伤机制：基体开裂、纤维断裂、基体开裂引起的剪切损伤。图 12 为 C/C 复合材料纤维强度效率。发现，3D C/C 复合材料纤维的强度效率为25%～38%，说明 C/C 复合材料的强度主要由基体破坏应变和界面强度决定。在切口试件破坏过程中，破坏初期切口端部应力集中使基体内产生微裂纹，基体内部裂纹扩展方向随纤维方向改变并继续发展至相邻的层内。裂纹发展过程中，路径的复杂曲折增加了能量的吸收，起到了一定的增韧效果，因此最终破坏表现出一定的“假塑性”。

界面释放部分对纤维的约束，局部的纤维强度能够进一步发挥，即表现为当板宽较小时缺口强度提高，并有少量的纤维拔出。当两个缺口间的韧带区域尺寸较小时，两个缺口端部的应力松弛区域连接在一起，基体对纤维的约束释放，从而提高了局部的强度。

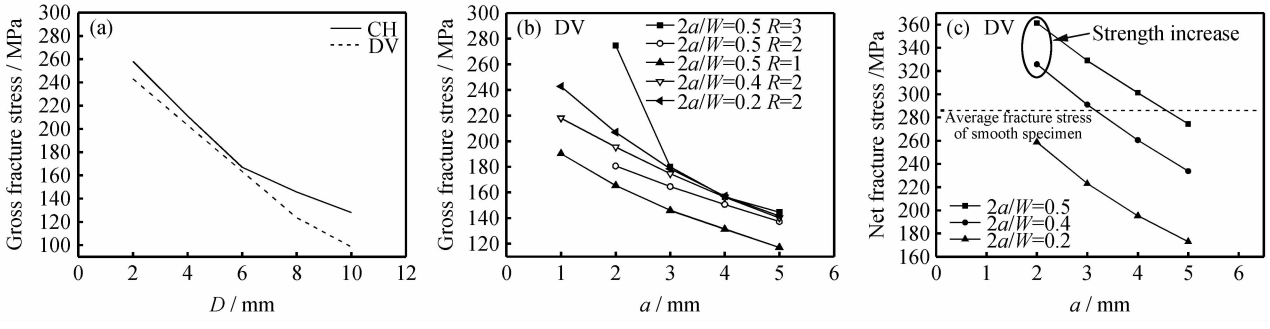

图 11 C/C 编织复合材料试件切口尺寸对破坏应力的影响

Fig. 11 Effect of notch size on fracture stress of C/C braided composite specimens

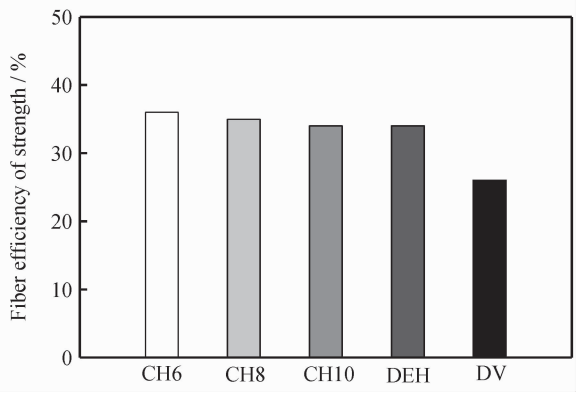

图 12　C/C 复合材料纤维的强度效率

Fig. 12　Efficiency of the fiber strength in C/C composites

5　结　论

(1) 中心开孔(CH)、双边半圆切口(DEH)和双边 V 型切口(DV)三种结构的 C/C 编织复合材料试件在拉伸载荷下均表现为脆性断裂破坏。

(2) 固定板宽时，最终破坏应力随开孔直径增加而下降；切口尺寸不变时，最终破坏应力随缺口端部的曲率半径增加而增加，对开孔位置不敏感。

(3) CH、DEH 和 DV 三种试件开孔边缘附近均有大规模的应力松弛现象发生，且应力松弛区域尺寸对切口端部的曲率半径敏感，对切口位置不敏感。

(4) 应力集中使缺口端部的基体及界面产生微裂纹，从而释放对纤维的约束，应力重新分配后可提高局部的强度。

参考文献：

[1] Yasuo K, Kikkawa A, Saito W, et al. Comparative study on tensile fracture behavior of monofilament and bundle C/C composites [J]. Composites: Part A, 2006, 37: 2241-2247.

[2] Hiroshi H, Keisuke T, Kogo Y. Compressive strength of three-dimensionally reinforced carbon - carbon composite [J]. Carbon, 2005, 43: 351-358.

[3] Kogo Y, Hatta H. Effect of stress concentration on tensile fracture behavior of C - C composites [J]. Journal of Composite Materials, 1998, 32(13): 1273-1294.

[4] 曾　涛，姜黎黎. 三维编织复合材料力学性能研究展[J]. 哈尔滨理工大学学报，2011，16(1)：34-41.
Zeng Tao, Jiang Lili. Development of investigation into mechanical properties of 3D braided composites [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1): 34-41.

[5] Whitney J M, Nuismer R J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentration [J]. J Compos Mater, 1974, 10: 253-265.

[6] Kweon J H, Ahn H S, Choi J H. A new method to determine the characteristic lengths of composite joints without testing [J]. Composite Structures, 2004, 66: 305-315.

[7] Ahmed K S, Naidu S V. Elastic properties, notched strength and fracture criterion in untreated woven jute - glass fabric reinforced polyester hybrid composites [J]. Materials and Design, 2007, 28: 2287-2294.

[8] 孔宪仁，黄玉东，范洪涛，等. 细编穿刺 C/C 复合材料不同层次界面剪切强度的测试分析[J]. 复合材料学报，2001，18(2)：57-60.
Kong Xianren, Huang Yudong, Fan Hongtao, et al. Test and analysis of interfacial shearing strengths of different levels for fine weave and piercen carbon/carbon composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18 (2): 57-60.