第6卷第3期　　复合材料学报　　Vol.6 No.3

1989年9月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　September 1989

预报三向碳碳材料在大偏轴角拉伸时的切口强度模型

顾震隆　陈剑峰　张蔚波

（哈尔滨工业大学　复合材料研究室）

摘　要

三向碳碳材料在大偏轴角拉伸时，用纤维束的剪切强度来确定其切口强度，不会招致太大误差。先测定纤维束的剪切强度和基体碳的剪切强度，然后把3D C/C看成为正交异性均匀材料作平面力分析求得离切口较远处的位移场，以此为边界条件，求切口尖端附近的三维应力场。用Zweben的统计准则求出三向碳碳材料在大偏轴角拉伸下的切口强度，并用实验验证。

一、引　言

三向碳碳材料在制造过程中，往往会造成先天性的缺欠，有时无损探伤会发现大样中含有裂纹，于是需要决定该大样是否还可以继续使用。前文[1]对在简单拉伸下预报三向碳碳材料的切口强度模型作了研究，本文研究在偏轴拉伸下的切口强度的预报模型。

首先通过不同偏轴角的拉伸试验来观察带有切口的3D C/C材料的断裂形状，发现随着偏轴角θ从零增加时，断裂模式发生变化。当偏轴角较大，在θ～90°-θ之间时，断裂呈剪切模式。为了预报这种大偏轴角拉伸下的3D C/C材料的切口强度，先设计专用夹具来测定纤维束和基体碳的剪切强度，然后用有限元方法求出切口尖端的应力场，用Zweben统计准则来预报3D C/C材料的切口强度。实验结果证明与之吻合良好。

二、实　验

1.观察不同偏轴角对应的破坏模式

材料是2-2-3 3D C/C材料。2-2-3是指三个正交方向里的纤维根数之比，因为材料十分

本文1988年1月14日收到

昂贵，所以作为观察用的试件，用边脚料制成。试件长度为70～90mm，宽度为11.1～17mm，厚度为1.9～5.9mm。偏轴角从4°变到15°，切口长度与宽度之比为0.2～0.47。所有切口均垂直于其中一组纤维束拉伸试验在岛津试验机上进行。加载速度为0.3mm/min无论是什么破坏模式，只要一根纤维束断裂就可导致试件的彻底破坏。都是灾难性的，图1表示不同偏轴角拉伸时的破坏模式，当偏轴角较小时，切口先在其平面内扩展，然后沿纤维束（或垂直纤维束）方向剪断，当偏轴角大于某一角度（对本材料是15°）后，断裂都是沿纤维束（或垂直纤维束）方向剪坏的。本文只研究大偏轴角拉伸时的3D C/C材料的切口强度的预报模型。小偏轴角拉伸下切口强度的预报模型留待另一篇文章来研究。

在进一步讨论之前，先要澄清一下．3D C/C内部各单层的破坏模式是否与表面的模式相一致。为此，逐层磨去之后在显微镜下观察，发现凡纤维束方向相同的各层的破坏模式相

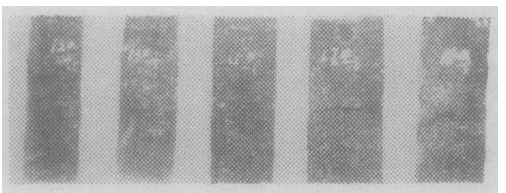


图1 不同偏轴角对应的不同的破坏模式

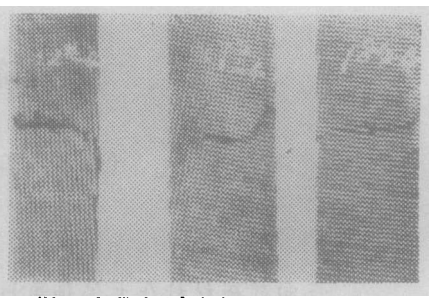


图2 上面三层磨去之后所看到的破坏模式

同，而纤维束方向互相垂直的单层之间，破坏模型是一致的，即穿透裂纹不同纤维束走向不同而有改变。换言之，有些单层中，裂纹沿纤维束扩展，在另一些单层中，裂纹沿垂直纤维束方向扩展，这种破坏模式的机理有待后面通过应力分析来说明。

2.纤维束的剪切强度测量

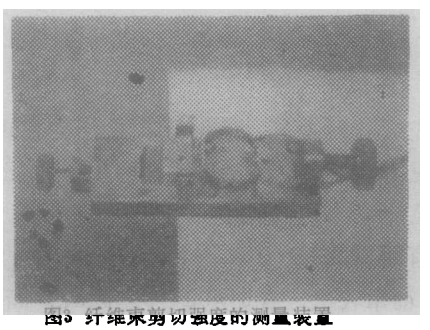


图3 纤维束剪切强度的测量装置

纤维束试件的制备如文[1]所述。图3表示自制的纤维束剪切强度的专用测量装置。

1.固定纤维束的螺丝；2.纤维束试件的夹具；3.工作台；4.竖直方向固定的纤维束试件；5.导轨；6.应变片；7.测力器；8.施力螺丝；9.应变片导线；10.滑块；11.向试件传递力的顶针。

为了消除磨擦力，工作台上撒有铅粉。在试件感到外力作用之前的磨擦力读数，应从强度读数中扣除，一共测定35根纤维束的剪切强度。假设它服从Weibull分布函数：

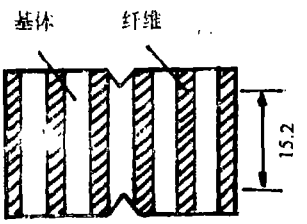


图4 剪切强度试件

$$G(\tau)=1-\exp[1-(\tau/\alpha)^{\beta}] \qquad (1)$$

其中τ为无量纲化的剪应力，用Menon公式(1)可以求出参数α、β为：

$$\alpha=9.57;\ \beta=5.58$$

3.基本碳的剪切强度测定

图4表示测定基体碳的剪切强度的试件。

实际上，在剪切截面上，除基体碳外，还有垂直试件平面方向的横向纤维束，纤维束的长度等于试件的厚度。所以用单层试件测定其剪切强度，其试验值肯定偏小，而且在制备试件过程中，特别是在用锉刀加工90°切口时，试件内产生额外损伤。虽然十分小心，但实际的剪切强度肯定比试验结果还要高些。一共用51根试件，用Arcon夹具装夹试件，用法码加载。

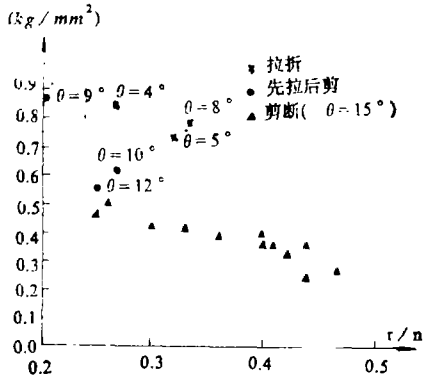


图5 不同r/n值对应的3D C/C的偏轴拉伸强度

结果基体碳测得的强度值与纤维束剪切强度之比为1:5.1。

4.为了最后验证理论预报的正确性，用26根直边试件，其长度L=60mm，宽度W=16.8mm，厚度t=2.5mm，中心裂纹长度用被切断纤维束数r度量，分别为5、9和12。偏轴角θ=15°。试验在instron试验机上进行，加载速度为0.5mm/min、试验结果表示在图5上，其中n是试件宽度的纤维束总数。

三、应力分析

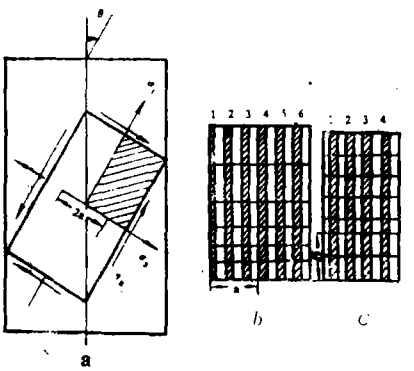
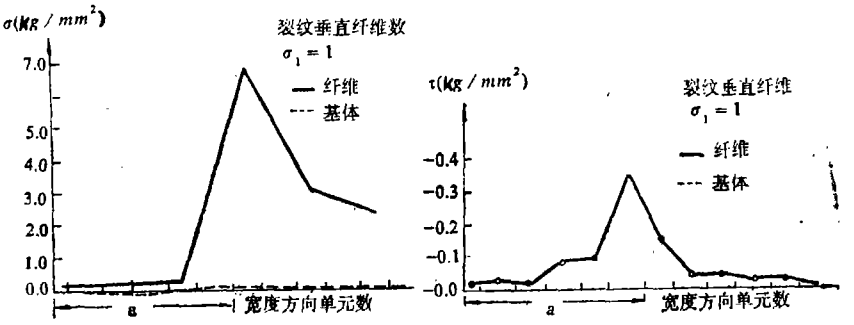


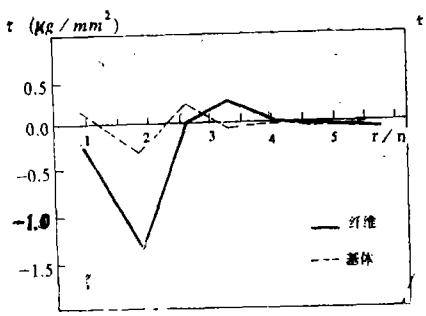
图6 单层3D C/C的取法和有限元网格

1.单层的有限元应力分析

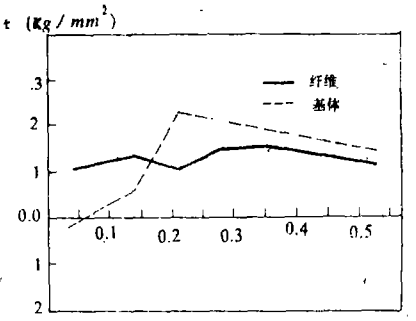
图6a中虚线表示从试件中截取单层3D C/C的方式。图中还表示它所受到的复杂应力状态。图6b和6c分别表示纤维束平行切口和垂直切口的两类不同的单层情况。考虑到3D C/C的泊桑比很小，所以在弹性分析时，层间应力影响可以不予考虑。用SAP V计算程序分析σ_1、σ_2和τ_{12}分别作用下的单层应力，其目的是想说明大偏轴角拉伸时的破坏机理。有限元网格也表示在图6b和6c上。计算结果表示在图7a～7f上。



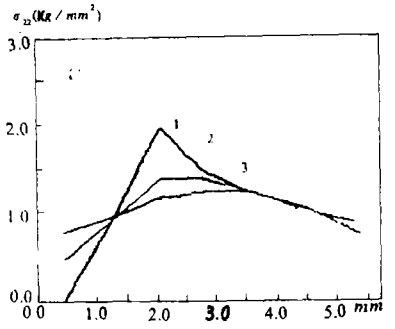
(a) σ_1作用下的纤维束和基体内的拉应力　　(b) σ_1作用下的纤维束和基体内的剪应力



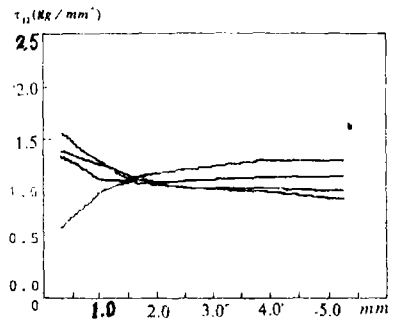
(c) σ_2作用下的离切口最近的纤维束和基体内的剪应力



(d) σ_2作用下的与切口邻近的纤维束的横向正应力



(e) τ_{12}作用下的离切口最近的纤维束和基体内剪应力



(f) τ_{12}作用下的切口尖端前方的基体内的剪应力

图7 σ_1、σ_2和τ_{12}分别作用下的单层3D C-C内的有限元分析结果

注意：图7c和7d中的σ_2和7a和7b中的σ_1实际上相同的方向里的作用应力。只是它们属于不同3D C/C的单层，它们的纤维束方向互相垂直。

从图7中可以得出如下结论：

(1) 在纤维束与切口垂直的单层内，在σ_1作用下（图7a、b），纤维束内最大正应力σ_{max}和基体内最大剪应力τ_{max}之比是19.04，而相应的强度之比约为50[3]。可见早在纤维束拉断之前，基体已被剪裂。基体不能向纤维束传递更高的应力，所以尖端前方的奇异性不易出现。另外基体中的正应力很小，说明剪滞注的假设是合理的；

(2) 在纤维束平行切口的单层内，在σ_2作用下，纤维束内最大剪应力$\tau_{max(f)}$和基体的最大剪应力$\tau_{max(m)}$之比为4.97，略小于相应的强度之比15.1。但$\tau_{max(f)}$落在纤维束的剪切强度数据的分散带内，而且基体强度的试验值明显偏低。所以可以认为，在σ_2单独作用下，在这类单层内，纤维束被剪断是不足为怪的。另外，从图7d中可以看到σ_{22}很大，相应的强度又很低[3]，所以纤维束会发生横向劈裂；

(3) 在τ_{12}作用下，纤维束平行切口的单层内，基体内剪应力反而比纤维束内的剪应力还要高。这是因为在计算时假定单层四周的位移无约束的缘故。实际上所研究的那一部分单层四周是受约束的（图6a）。而且损伤之后，邻层也将限制其变形。所以纤维束内剪应力与基体内剪应力之比应该不同于现在的比例。图7f表示的纤维束垂直切口的单层内，切口尖端附近的基体内剪应力看来是符合规律的。

综上所述，如果在σ_1、σ_2和τ_{12}的联合作用下，在纤维束垂直切口的单层内，切口尖端沿纤维束方向剪裂。而在纤维束平行切口的单层内，切口尖端沿着垂直纤维的方向剪裂。因

为纤维束的剪切强度比基体的剪切强度高，所以可以认为在大偏轴角拉伸的3D C/C的切口强度是由纤维束的剪切强度所决定。至少试验观察支持这种判断。

2、3D C/C的有限元应力分析

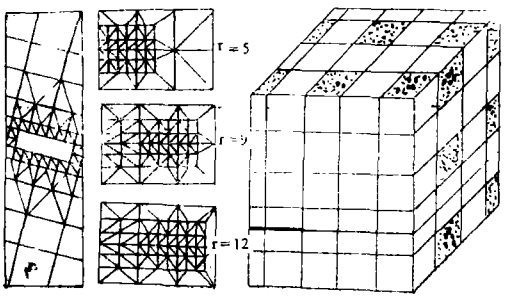


图8 3D C/C材料的平面应力分析和三维分析的有限元网格

为了求得切口尖端的应力，而不致花费太多机时，首先计算离切口尖端稍远处（图8a、b、c、d）的位移分布。然后以此位移为边界条件，计算尖端的应力。有限元划分网格如图所示。按理用有限元计算应力集中区内应力分布时，会随网格粗细而变，所以在预报强度时，必须用平均应力或点应力准则。这里所谓纤维束强度是指纤维束横截面上的名义剪应力，所以用纤维束和基体尺寸为有限元尺寸（图8c）。纤维束和基体的数据引自文[4]，用SAP的八节点等于已维单元的中心应力作为切口尖端前方最近的纤维束中的平均应力，再在厚度方向里（图8c中纤维束e_1和e_2）平均一次，所得结果表示在表1上。

表1 切口尖端前方最近纤维束中的应力

与作用应力之比	r:5	r:9	r:12
$k:\tau_{max}/\sigma$	1.16	1.51	2.21
σ_f/σ	0.123	0.217	0.264

受剪的纤维束同时还受拉伸时，其强度要有所下降。但表1说明$\theta=15°$时，其拉伸应力很小，可以忽略不计其影响。

四、切口强度预报

按Zweben统计强度准则，假定至少一束纤维束被剪断的概率就是3D C/C在大偏轴角拉伸下切口所引起整体破坏的概率，统计强度可以从下式计算出来：

$$P(\sigma)=1-[1-G(\tau)^M]^2, \quad (M是层数) \tag{2}$$

将式（1）代入式（2），可得：

$$P(\sigma)=1-\exp\left[2M\left(\frac{k\sigma}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{3}$$

由此可得平均强度为：

$$\sigma_c=\frac{\alpha}{k}\left(\frac{1}{2M}\right)^{\frac{1}{\beta}}\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{4}$$

如果必须考虑纤维束同时受拉剪时的剪切强度的下降的话，必须用实验确定剪切强度随拉应力增大而降低的规律，这正是下一篇文章需要解决的问题。在本文所研究的大偏轴角拉伸的情况下，如果发现受剪的纤维束同时还受到不可忽略的拉应力，则可按直线规律来降低纤维束剪切强度。因为纤维束的拉伸强度是剪切强度的11.5倍，所以不会招致太大误差，按式

（4）预报的三种切口尺寸的3D C/C强度表示在表2上。

表2 在偏轴角θ=15°时的3D C/C切口强度

切口处纤维束数	实验结果$\sigma_{实}$	预报结果σ_c
r=12	2.763	2.80
r=9	4.296	4.245
r=5	5.817	5.528

五、结束语

（1）带切口的3D C/C的破坏模式随偏轴角变化而变化，当偏轴角θ较大时，破坏呈剪切模式；

（2）3D C/C的单层在σ_1、σ_2和τ_{12}分别作用下的有限元应力分析结果，支持本文所采用的预报切口强度的模型；

（3）本文所用的微结构力学的有限元分析是合适的；

（4）在切口尖端至少一束纤维束剪断的Zweben统计强度准则能给出满意的预报结果。

参 考 文 献

〔1〕孟兰，预报三向碳碳材料在简单拉伸下的切口强度的模型，硕士学位论文（哈尔滨工业大学）1986.

〔2〕M.V.Menon, Estimation of the shape and scale scale Parameters of Weibull Distribution Technometries, Vol.5, No.2, May 1963

〔3〕Tso, F.K., and Loomics, W.C., Micromechanical Modelling of 3D Composite with Interface Failure Computers and structures, Vol.14, 1985

〔4〕吕文涛，多向碳碳材料弹性常数的预报，硕士学位论文（哈尔滨工业大学）1986

MODELLING OF NOTCHED FAILURE OF 3D CARBON CARBON UNDER TENSION WITH LARGE OFF–AXIS ANGLE

Zhenlong Gu, Jianfeng Chen and Weibo Zhang

Research Laboratory of Composite Materials,
Harbin Institute of Technology, Harbin, China

ABSTRACT

When a notched 3D carbon carbon specimen is subjected to tension, the failure mode will change with the change of off–axis angle. If the off–axis angle is sufficiertly large, the notched specimen will break along the fiber bundle nearest to the notch tip or perpendicular to the fiber bundle depending on which layer was concerned. Only one fiber bundle is sufficient to cause total rupture, catastrophic regardless of the failure modes. Finite element analysis was performed to find the real failure mechanism for the case of tension with large off–axis angle. The analysis leads to the conclusion that the failure of that case is dominated by the shear strength of the fiber bundle. The shear strengths of fiber bundle and matrix were measured with specially designed setups.

Tofind the stresses in the fiber bundle immediatelv in front of the notch tip, the FEM plane stress analysis was conducted with 3D carbon carbon taken as homogeneous anisotropic material to find the displacements around the notch. With these displacements as boundary conditions, the three dimensional FEM analysis of tip stresses were completed with the local region taken as heterogeneous material. Similar to the average stress criterion, a portion of fiber bundle was taken as element and the stress at the center of 8–node isoparametric element was used to predict the notched strength of 3D C/C. Assuming the probability of at least one breakage of fiber bundles is egual to the failure probability of whole 3D C/C, Zweben's statistical strength criterion was employed to predict the strength. To compare with the experimental results, 26 straight specimens were tested. The comparison justifies the modelling used in this paper.