复合材料学报 第20卷 第5期 10月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 5 October 2003

文章编号: 1000-3851(2003)05-0130-05

考虑界面过渡层的编织 CMC 裂尖混合度的研究

陶 亮, 矫桂琼, 王 波
(西北工业大学 工程力学系, 西安 710072)

摘 要: 对于界面断裂的三维编织 CMC, 其断裂混合度 J 对材料的断裂韧性影响显著。尽管由于一个不确定的参量——断裂特征长度, 界面断裂混合度几乎难以确定, 但是与界面断裂混合度相关的裂纹尖端断裂混合度 J_{tip} 可以唯一确定。这样, 就可以用裂纹尖端断裂混合度 J_{tip} 研究三维编织 CMC 的断裂韧性。本文通过数值方法分析了倾斜角度、界面层厚度与混合度的关系, 进一步研究了三维编织 CMC 的裂纹扩展路径对于裂尖混合度的影响, 为材料断裂韧性的优化设计提供了依据。

关键词: 断裂韧性; 编织角; 界面相; 裂尖混合度; 三维编织 CMC
中图分类号: TB330.1 **文献标识码:** A

FRACTURE MODE MIXING AT THE TIP OF CRACKS OF 3D BRAIDED CMC ON THE INTERPHASE

TAO Liang, JIAO Guiqiong, WANG Bo
(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Poly-technical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For 3D braided CMC owing to interfacial fracture, it is remarkable that interfacial fracture mode mixing J works on the material fracture toughness. Although the interfacial fracture mode mixing can hardly be determined because its expression involves an uncertain parameter-fracture length eigenvalue, the fracture mode mixing at the tip of crack J_{tip}, which correlates with J, can be decided uniquely. So the fracture toughness of 3D braided CMC material can be researched on interfacial cracks with J_{tip}. By numerical simulation, this paper analyses the relation of the mixing J_{tip} with the declining angle and interfacial thickness, further researches the influence of the 3D braided CMC's cracks path on the mixing J_{tip}, and finds a way of fracture design of 3D braided CMC.

Key words: fracture toughness; braided angle; interphase; fracture mode mixing at the tip of crack; 3D braided CMC

目前实验表明, 三维编织 CMC 的断裂是一个界面断裂问题。在复合材料的细观断裂研究中经常涉及到关于界面的断裂混合度的问题, 而界面断裂奇异场的病态特征妨碍了人们对断裂混合度的认识。Rice[1](1988) 在提出小范围接触概念的同时重新阐述了混合度的概念, 表明材料断裂混合度在断裂韧性的细观研究中的重要地位。Liechti 和 Chai[2](1992) 对环氧/玻璃界面测量的界面断裂曲线能够被广泛地引用, 也说明这个问题的重要性。

在以往的双材料界面断裂韧性的研究工作中, 将纤维与基体(C/SiC) 都设定为各向同性的均匀材料, 获得了一个表征三维编织 CMC 断裂韧性的解析表达式[3]。由于没有考虑碳纤维的各向异性和过渡层的厚度, 使得理论研究工作对于材料的设计和优化缺乏指导性意义。

本文作者对于三维编织 CMC 断裂混合度的研

收稿日期: 2002-05-27; 收修改稿日期: 2002-09-18
作者介绍: 陶 亮(1970-), 男, 博士研究生, 研究方向: 三维编织 CMC 的力学性能。
通讯作者: 陶 亮, E-mail: yao 1970@sina.com

究, 目的是构造材料优化设计与材料断裂性能的桥梁, 其中会涉及到材料设计中的编织角和界面层厚度等参数的影响因素。

1　基本理论

在 Stroh 列式[4]的基础上, 研究各向异性双材料界面断裂混合度问题, 能够在一定程度上解决上述的问题。Suo[5]采用 Stroh 列式, 通过三个解析函数 $f_j(j=1,2,3)$ 的线性组合, 推导出平面问题的位移场和任意弧线上的合力。

$$u_i = 2\mathrm{Re}\left[\sum_{j=1}^{3} A_{ij} f_j(z_j)\right]$$

$$T_i = 2\mathrm{Re}\left[\sum_{j=1}^{3} L_{ij} f_j(z_j)\right] \qquad (1)$$

其中: . , 9 是关于纤维或者基体的材料弹性常数的 3×3 矩阵, 可以组合成正定的 Hermitian 矩阵 / 和 5 。

$$B = iAL^{-1} \qquad (2)$$

$$H = B_f + \overline{B_m} \qquad (3)$$

参考 Yang 和 Shih[6]平面边界层构型的界面层断裂模型(如图 1 所示)。用这种界面层模型可以确定裂纹尖端唯一的断裂混合度

$$J_{tip} = \arg(K_{tip}) = \arg(Kh^{i\chi})k \qquad (4)$$

式中: K_{tip}和 K 分别是裂尖的和远场的应力强度因子; k 是相位角, 对于各向同性界面层可以近似[6]为

$$k \approx 0.1584T + 0.0630U - 0.5\arctan\frac{2X}{m} \qquad (5)$$

这里的 m 代表材料过渡函数的形状(假设过渡函数线性变化, 则 m= 1) ; X是界面应力振荡指数; T 和 U是广义的 Dundurs 参数。

$$X = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{1-U}{1+U}$$

$$T = \frac{[\overline{s_{11}s_{22}}]^- - [\overline{s_{11}s_{22}}]^+}{[\overline{s_{11}s_{22}}]^- + [\overline{s_{11}s_{22}}]^+}$$

$$U = \frac{iH_{12}}{\overline{H_{11}H_{22}}} \qquad (6)$$

其中: $[\ ]^+$ 和 $[\ ]^-$ 分别代表界面上下材料的数值; H_{11}和 H_{22}是双材料的 Hermitian 矩阵中的元素[7], 对于正交各向异性的双材料, 其面内表达式的显式参见 Suo(1990) 和 Wang[8](1992)等。

$$H_{11} = [2n]^{1/4}\ [\overline{s_{11}s_{22}}]^+ + [2n]^{1/4}\ [\overline{s_{11}s_{22}}]^-$$

$$H_{22} = [2n]^{-1/4}\ [\overline{s_{11}s_{22}}]^+ + [2n]^{-1/4}\ [\overline{s_{11}s_{22}}]^-$$

$$H_{12} = i[\overline{s_{11}s_{22}} + s_{12}]^+ - i[\overline{s_{11}s_{22}} + s_{12}]^- \qquad (7)$$

这里] 和 n 的表达式为

$$] = \frac{s_{11}}{s_{22}};\quad n = \frac{1}{2} + \frac{2s_{12} + s_{66}}{4(\overline{s_{11}s_{22}})^{1/2}} \qquad (8)$$

2　数值模型与计算结果

2.1　建立数值模型

在上述的理论基础上, 利用有限元方法分析裂

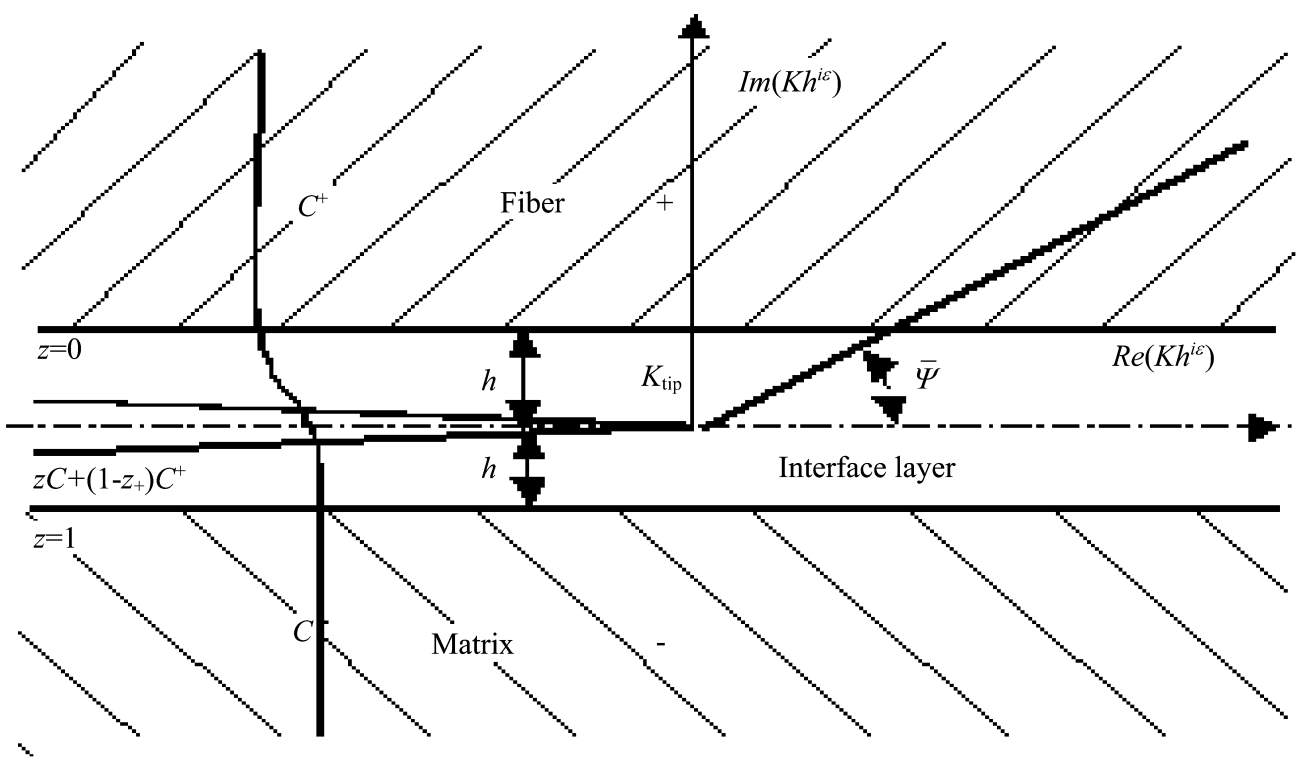

图 1　过渡界面层的断裂模型以及裂尖断裂混合度布局

Fig. 1　Fracture model of transitional interphase and layout of fracture mode mixing at the tip of crack

表 3　裂纹尖端断裂混合度与界面相厚度的关系(烩 20.0°)

Table 3　Correlation of fracture mode mixing at interfacial crack tip with interface thickness (烩 20.0°)

W/mm	0.004	0.008	0.010	0.012	0.015	0.020	0.030	0.040	0.050
J_{tip}/rad	0.063	0.054	0.049	0.046	0.036	0.033	0.014	-0.029	-0.042

表 4　裂纹尖端断裂混合度与倾斜角度的关系(燔 0.02 mm)

Table 4　Correlation of fracture mode mixing at interfacial crack tip with variable angle (燔 0.02 mm)

[/角度	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90
J_{tip}/rad	0.394	0.362	0.291	0.166	0.033	-0.129	-0.263	-0.365	-0.440	-0.482	-0.496	-0.443	-0.390	-0.311	-0.239

纹尖端的断裂混合度问题。主要研究两个内容: 编织 CMC 的编织角度和过渡界面层热解碳 C 的沉积厚度 2 h 对于断裂混合度的影响。针对三点弯曲断裂试验, 建立如图 2 所示的切口尖端数值模型。圆弧内是三维编织 CMC 的细观平面结构, 圆弧外被看作是正交各向异性的均匀材料。模型中的细观结构划分基本上遵循两个原则: (1) 细观区域包容编织 CMC 裂纹尖端的梯度较大的应力场; (2) 细观区域的形状与应力强度因子 K 控制区形状相似。

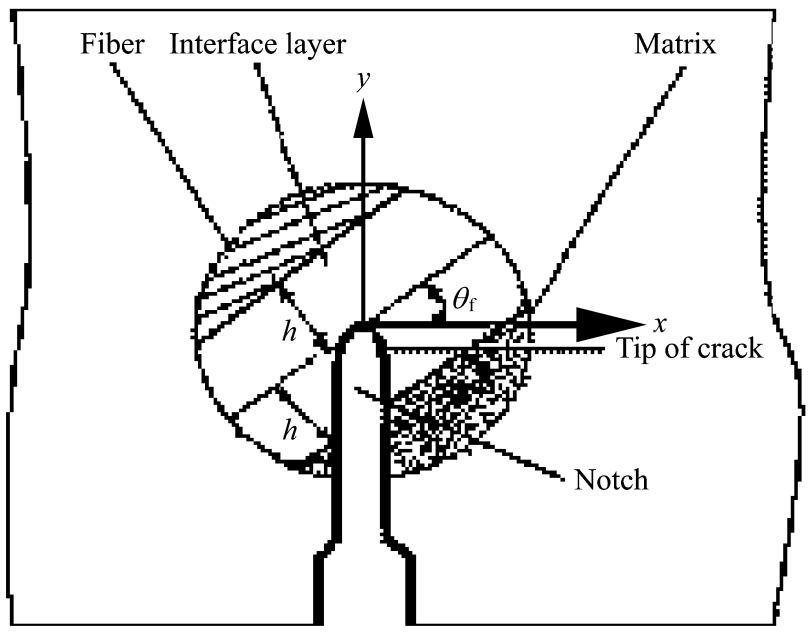

图 2　界面层断裂数值模型示意图

Fig. 2　The schematic map of numerical model with interphase fracture

在切口尖端, 裂纹以 $[_f$ 的倾斜角度扩展, 那么在这个方向的远场界面层上, 由广义界面力向量

$$t = e_{22} + iZf_{12} \tag{9}$$

可以得到数值分析的断裂混合度计算公式为

$$J_{tip} = \arctan \frac{\mathrm{Im}(Kh^{iX})}{\mathrm{Re}(Kh^{iX})} + k = \arctan \frac{Zf_{r[}}{e_{[}}\Big|_{r>h,\,[=[_f} + k \tag{10}$$

式中: Z 是界面应力分解因子, 表示为

$$Z = \overline{H_{11}/H_{22}} \tag{11}$$

2.2　数值计算和结果

表 1 列出了三维编织 CMC 的组分材料的基本力学性能参数[9]。除了碳纤维是正交各向异性材料以外, 基体和界面相都是各向同性材料。在三点弯曲断裂试件(尺寸 20 mm×5 mm, 裂纹深度 2.5 mm)上, 分别施加 10 N 的集中载荷, 建立类似于如图 2 的细观数值分析模型, 来考察裂纹尖端的断裂混合度 J_{tip}随编织角变化和过渡层厚度变化的状况。

表 1　编织 CMC 组分材料的基本性能参数

Table 1　Property parameters about ingredients of braided CMC

组分性能参量	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	泊松比 ν_{12}
碳纤维 C_f	210.0	20.5	10.0	0.30
基体 SiC_m	460.0	460.0	170.0	0.37
界面相 C	5.1	5.1	1.96	0.31

根据表 1 中的参数, 由式(5)、式(6)、式(7)、式(8)和式(11)可以算出表 2 中的参变量。

表 2　编织 CMC 界面特性的参变量

Table 2　Interfacial property variables of braided CMC

参变量	T	U	X	Z	k/rad
计算值	-0.7578	-0.2591	0.0844	0.6047	-0.2199

经过有限元计算, 得出界面上的分量 $e_{[}$ 和 $T_{r[}$, 再利用式(10)可以求得裂纹尖端的断裂混合度 J_{tip}, 并且把它与界面相厚度和倾斜角度的结果列于表 3 和表 4 中。

以不相关的两个参变量——界面相厚度 W和倾斜角度 [作自变量, 与混合度 J_{tip}构成一个空间曲面(如图 3 所示)。用图 3 的断裂混合度与倾斜角及界面厚度的三维曲面, 可以研究界面相厚度和倾斜角度对于裂纹尖端断裂混合度的影响。显然, 倾斜角 [对混合度的影响显著, 并且在区间[0, π/2]上是一个复杂函数; 而界面相厚度 W的影响较轻微, 并且在区间[0, 0.05]上单调递减。用函数的形式表示裂纹尖端断裂混合度为

$$J_{tip}([, W) = c_0 + c_1 J_{tip}(0, [) + c_2 J_{tip}(W, 0) \tag{12}$$

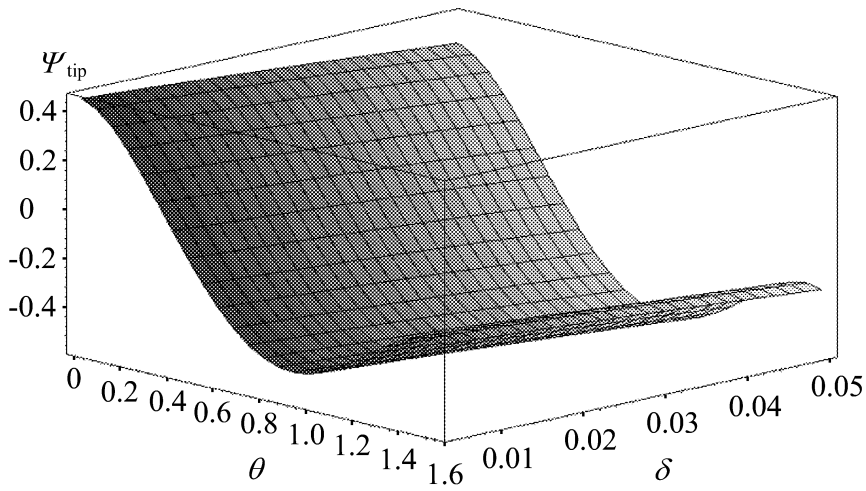

图 3　混合度与倾角、界面厚度的空间曲面

Fig. 3　The 3D graphic of fracture mode mixing with gradient angle and interfacial thickness

这里, 式(12) 右项中的两条曲线可以由表 3、表 4 的数值结果拟合, 并且退化到原点求出 c_i ($i = 0, 1, 2$) 的值。

3　断裂路径下的倾斜角

三维编织 CMC 的结构和裂纹沿界面扩展的断裂路径特性表明: 沿试件厚度方向, 在纤维束中裂纹扩展的倾斜角度基本上等于编织角 $[_f$ 或 $\pi - [_f$; 而在纤维束之间的倾斜角是过渡性的周期变化[3] 的, 只是所占的比例较小。如图 4 所示, 倾斜角以 $\pi/2$ 为轴线, 以 $\pi/2 - [_f$ 为振幅做周期性的变换。由于结构是关于 $\pi/2$ 轴线角对称的, 这里只研究在区间 $[0, \pi/2]$ 上的倾角变化规律。将纤维束之间周期变化倾角的比例与平均倾斜角度的函数表示为

$$\mathrm{rat.} = 1 - \frac{nd}{b} \tag{13}$$

$$[= (1 - \mathrm{rat.})[_f + \mathrm{rat.}\frac{\pi/2 - [_f}{2} \tag{14}$$

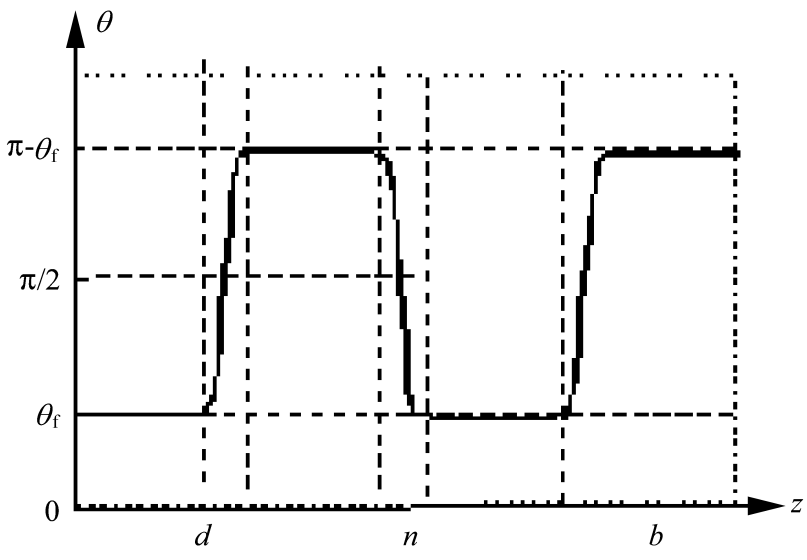

图 4　倾角在试样厚度上的变化规律

Fig. 4　A variable rule of the gradient angle along specimen thickness

式中, n 为纤维束在试件厚度方向上的根数; b 为试件的厚度; d 为纤维束的直径。

4　断裂韧性

界面相厚度 W是在工艺上通过沉积时间来控制的参数; 倾斜角是由式(13)、式(14) 计算出的平均值。由这两者可以在图 3 上唯一确定界面上的裂尖断裂混合度。在界面断裂韧性曲线的试验测量工作完成后, 可以得到类似 Liechti 和 Chai 对环氧/玻璃界面所测的界面断裂韧性曲线。根据倾斜角和界面厚度求出裂尖的断裂混合度, 在裂尖混合度与断裂韧性的关系曲线上插值, 就能够得到任意编织角和界面沉积厚度下的三维编织 CMC 的断裂韧性, 为编织 CMC 的材料设计和优化提供了一条捷径。然而, 由于实验条件目前不具备, CMC 的界面断裂韧性曲线的测量工作还没有完成。

5　结　论

本文作者通过理论和数值方法研究各向异性双材料界面断裂混合度问题, 目的是建立三维编织 CMC 的断裂韧性与裂尖混合度一一对应的关系。文中完成了断裂混合度理论工作, 分析了倾角和界面厚度变化对裂尖混合度的影响。这部分工作可以归结为以下几点:

(1) 避免了定义模糊的断裂特征长度, 使得裂尖断裂混合度可以根据界面性质唯一确定。

(2) 考虑过渡层的编织 CMC 界面裂尖混合度的数值研究结果表明: 倾斜角 [对混合度的影响显著, 而界面相厚度 W对混合度的影响较小, 并且在区间 $[0, 0.05]$ 上单调递减。

(3) 通过 Liechti 和 Chai 对环氧/玻璃界面所测的界面断裂韧性曲线, 可以表明: 材料断裂韧性对于断裂混合度十分敏感, 也说明界面断裂韧性曲线有一定的工程使用价值。

(4) 在实践中, 根据编织 CMC 的编织角 $[_f$ 和界面相厚度 W在图 3 上能够唯一确定裂纹尖端混合度。利用裂尖混合度与界面断裂韧性曲线, 可以指导三维编织 CMC 断裂韧性的设计和优化, 也便于工程上预测编织 CMC 的断裂性能。

参考文献:

[1]　Rice J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks [J]. J Appl Mech, 1988, 55: 98- 103.

[2] Liechti K M. Chai Y S. Biaxial bending experiments for determining interfacial toughness [J]. J Appl Mech, 1992, 59: 295- 304.

[3] 陶　亮, 矫桂琼, 王　波, 等. 三维编织陶瓷基复合材料的断裂韧性 [J]. 机械科学与技术, 2001(增刊), 20: 23- 26.

[4] Stroh A N. Dislocations and cracks in anisotropic elasticity [J]. Phil Mag, 1958, 3: 625- 646.

[5] Suo Z. Singularities, interfaces and cracks in dissimilar anisotropic media [J]. Proc Roy Soc Lond, Ser A, 1990, 427: 331- 356.

[6] Yang W, Shih C F. Fracture along an interlayer [J]. Int J Solids Structs, 1994, 31: 985- 1002.

[7] Ting T C T. Explicit solution and invariance of the singularities at an interface crack in anisotropic composites [J]. Int J Solids Structs, 1986, 22: 956- 983.

[8] Wang T C, Shih C F, Suo Z. Mechanics of interface crack extension and kinking in anisotropic solids [J]. Int J Solids Structs, 1992, 29: 327- 334.

[9] 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.