第13卷 第4期 复 合 材 料 学 报 Vol. 13 No. 4
1996年 10月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1996

界面相性态对纤维增强复合材料内应力传递的影响

罗海安 陈炳进 刘 冲
(上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘 要 本文用有限元法研究了具有基体裂纹的纤维增强复合材料内的应力传递问题。假设纤维与基体的界面为非理想的, 文中运用 "弹簧层"模型首先分析了在不同的组分弹性模量比、纤维体积含量与边界约束条件下, 界面相性态对复合材料内的应力传递的影响, 然后进一步考察了在几种典型的损伤模式下界面附近的应力分布情况。
关键词 复合材料, 纤维, 基体, 界面相, 应力传递

界面设计的合理与否与复合材料的整体性能的优劣有十分密切的关系。这是因为界面承担了在复合材料的不同相之间传递应力的作用。另一方面, 由于界面两侧材料弹性常数的不连续性, 界面极易产生应力集中, 因此界面的周围又往往是复合材料内部损伤与缺陷的多发区。细观力学实验证明, 在界面处形成环状基体裂纹后出现的局部纤维拔出现象是复合材料的一个典型的微观作用机制。研究在这种情况下界面的应力传递机理是复合材料界面力学的一个具有实际意义的课题。

然而, 如何描述界面却是一个值得探讨的问题。Kelly[1] 与 Aveston 等人[2] 假设界面是理想的几何面, 在这个几何面上仅作用有剪应力, 它们或者是基体的流动应力, 或者是脱粘后的界面摩擦力, 纤维与基体之间完全依靠剪应力传递载荷。这种所谓 "剪滞模型"方法简单, 但由于没有考虑变形的协调性和界面的本构特性, 因而存在不足。实验分析表明, 界面事实上是一个过渡层或界面相。有两种方法被用来模拟界面相。第一种把界面相看成是一种极薄的、力学性能不同于纤维和基体的弹性层。这样在二维问题中, 界面层至少要有三个参量来表征, 即层的厚度、弹性模量及泊松比, 这些参数一般很难测得, 问题的求解也比较复杂。第二种方法是由 Lene 和 Leguillon[3] 首先提出的, 是前一种方法的简化。他们认为, 可以沿界面厚度对界面相的弹性性质作某种平均, 从而使界面相的物理和几何性质可以用两个 "弹簧常数"来综合表示。弹簧常数较易用间接的方法测量[4], 而且这种模型既可以用以描述连续的界面相, 也可用以描述含有微裂纹、微孔洞以及非平整的界面相的平均效应, 同时还能够避免由理想界面模型带来的界面裂纹尖端应力的不合理的振荡奇异性, 因而近年来得到广泛的注意[4~7]。

本文将采用以上所述的 "弹簧层"界面模型, 利用有限元方法对具有基体裂纹的纤维增强复合材料的应力作数值上的分析和研究。

1 计算模型

图 1 给出了具有基体裂纹的纤维增强复合材料受纵向拉伸时的计算模型。在该图中当基

本文于1996年1月29日收到修改稿, 1995年4月5日收到初稿
国家自然科学基金与上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室开放课题资助项目
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

体外表面无切向和法向载荷时, 它代表了某些单丝拔出实验的模型, 当基体外表面受径向的刚性约束时, 它比较接近于在纤维增强复合材料的横截面上纤维呈规则密排的情况。实际的模型往往介于这两者之间。图中 $_0$ 为单位面积的外载荷, a 为纤维半径, b 为基体外半径, l 为纤维的长度。对于连续纤维增强的复合材料 l a。

界面相用 "弹簧层" 来模拟, 在柱坐标下该界面的连接条件为

$$ {}^{m}_{r} = {}^{f}_{r} = k_n(u^m_r - u^f_r) \quad , \qquad {}^{m}_{rz} = {}^{f}_{rz} = k_t(u^m_z - u^f_z) \tag{1} $$

其中: ${}^{m}_{r}$、${}^{f}_{r}$ 为界面处基体侧与纤维侧的径向应力, ${}^{m}_{rz}$、${}^{m}_{rz}$ 为界面基体侧与纤维侧的切向应力, 而 u^m_r、u^f_r 与 u^m_z、u^f_z 分别为界面处基体侧与纤维侧的径向与轴向位移。弹簧常数 k_n 和 k_t 表征了界面沿法向与切向的刚度。当 $k_n \to \infty$, $k_t \to \infty$ 时, 便有 $u^m_r = u^f_r$, $u^m_z = u^f_z$, 界面相退化为理想界面; 而当 $k_n = k_t = 0$ 时, ${}^{m}_{r} = {}^{f}_{r} = 0$, ${}^{m}_{rz} = {}^{f}_{rz} = 0$, 界面发生脱粘。对于脆性的基体, 可以认为起裂受最大主应力所控制, 即假设起裂条件为 $_{max} > _{cr}$。而对于界面, 我们利用文献[5] 的能量密度准则作为界面脱粘的控制条件, 即认为当界面的应变能密度 $U > U_{cr}$ 时界面开始破坏, 产生脱粘。界面应变能密度定义为

$$ U = {}^{2}_{r}/2k_n + {}^{2}_{rz}/2k_t \tag{2} $$

这里假定压应力不导致界面相的破坏, 即当 $_r > 0$ 时, 取因子 $= 1$; 当 $_r < 0$ 时, 取 $= 0$。

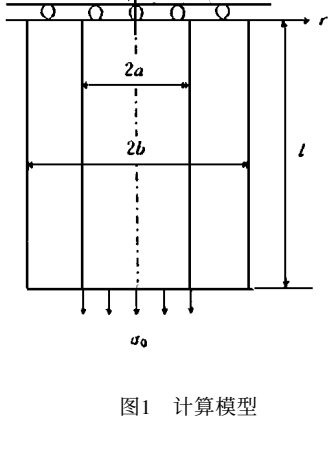

图1 计算模型

对上述计算模型, 我们编制了相应有限元计算程序, 其中在纤维与基体内采用常规的八节点等参单元而非理想界面上则采用六结点界面等参单元, 其单元刚度矩阵可通过应力应变关系式(1) 及虚位移原理导得。

2 计算结果

假设纤维与基体的杨氏模量为 E_f 与 E_m, 泊松比为 $_f$ 与 $_m$, 纤维的积极含量与纤维与基体的外半径的关系为

$$ V_f = (a/b)^2 \tag{3} $$

引入界面的无量纲弹簧刚度

$$ \bar{k}_n = k_n a/{}_m, \quad \bar{k}_t = k_t a/{}_m \tag{4} $$

其中 $_m$ 为基体的剪切刚度。这样无量纲的界面能量密度为

$$ \bar{U} = U {}_m/{}^{2}_{0}a = {}^{-2}_{r}/2\bar{k}_n + {}^{-2}_{rz}/2\bar{k}_t \tag{5} $$

式中: ${}^{-}_{r} = {}_r/{}_0$, ${}^{-}_{rz} = {}_{rz}/{}_0$ 为无量纲的应力分量。

在具体计算中我们发现, 本问题的计算结果与界面的切向弹簧刚度 k_t 关系密切, 而法向弹簧刚度 k_n 的作用则并不明显。为方便起见, 本文中我们取 $\bar{k}_n = \bar{k}_t = \bar{k}$。另外如无特别的说明, 计算中假设外边界 $r = b$ 自由。

2.1 界面完好的情况

2.1.1 纤维与基体的弹性模量之比对应力传递的影响

取 $V_f = 0.4$, $_f = {}_m = 0.25$, 考察模量比 E_f/E_m 的效应。图2 给出当 $\bar{k} = 100$ 时, 紧邻界面的基体上的应力 ${}^{-}_{z}$ 随 z 的变化情况。由图可见界面所传递的应力的量值与该模量比关系密切, 两者模量愈接近, 应力传递愈有效。在一般情况下, 随着 z 的增大, ${}^{-}_{z}$ 最终达到其渐近值与

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

最大值, 但当模量比接近于 1, 同时 $\bar{k}$ 值又相当大(如 $\bar{k} \geq 100$) 时, $\bar{}_z$ 可能在某个 z 值处取得极大值, 这是因为这时应力场与布希涅斯克问题的解比较接近的缘故。在以下的讨论中我们将取

$$E_f = 1.28 \times 10^{10}\text{Pa}, \qquad _f = 0.22$$

$$E_m = 0.6 \times 10^{10}\text{Pa}, \qquad _m = 0.22$$

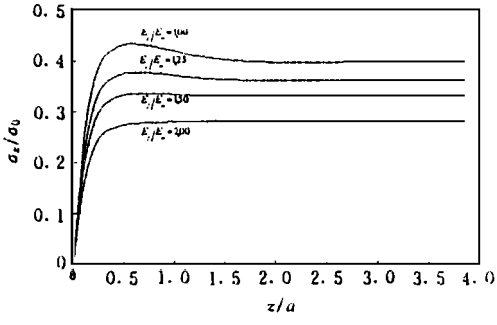

图2　模量比对界面的基体侧的 $_z$ 分布的影响

2.1.2　界面刚度对应力分布的影响

取 $V_f = 0.4$, $\bar{k}$ 分别为 0.1, 0.5 和 10, 讨论界面刚度的效应。图 3 给出了靠近界面的基体侧及纤维内 $\bar{}_z$ 随 z 的变化情况, 这里纤维内的 $\bar{}_z$ 系取其横截面的平均值。容易发现, $\bar{k}$ 越大, $\bar{}_z$ 变化越剧。这说明, 界面的刚度越大, 应力 $_z$ 的传递就越有效, 当 z 增加到一定的长度 $z = l_t$ 时, $\bar{}_z$ 便趋于一定值。l_t 就是所谓的 "载荷传递长度"。由图由见, "载荷传递长度"随 $\bar{k}$ 的增大而减小。图 4 给出了界面内剪应力 $\bar{}_{rz}$ 沿 z 方向的变化。可以看到, 剪应力 $\bar{}_{rz}$ 由零急剧变化到一最大值。然后又渐渐下降为零, $\bar{k}$ 越大, $\bar{}_{rz}$ 趋向于零的速度也越快。图 5 给出了界面应变能密度 $\bar{U}$ 沿 z 方向的变化。在外力作用处附近 $\bar{U}$ 最大, 然后趋于零, $\bar{k}$ 越小, $\bar{U}$ 的最大值越大, 并且趋于零的速度越慢。

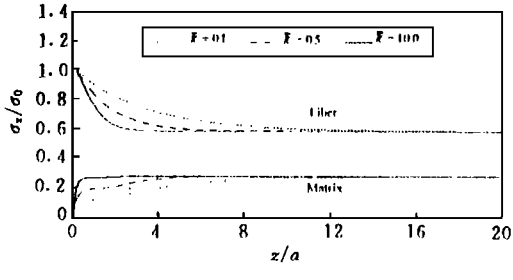

图3　$\bar{k}$ 对界面的基体侧与纤维内的 $_z$ 分布的影响

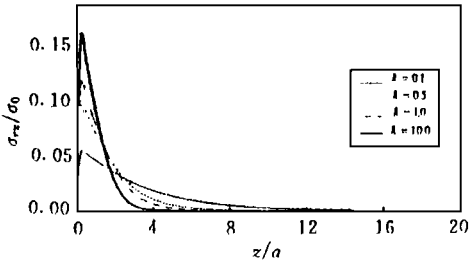

图 4　$\bar{k}$ 对界面基体侧剪应力 $_{rz}$ 分布的影响

2.1.3　纤维含量对应力分布的影响

从计算结果知道, 纤维含量的效应主要表现在应力值的大小上, 并没有改变传递的规律。例如, 界面上的剪应力 $\bar{}_{rz}$ 的峰值随 V_f 的增大而降低, 但其变化趋势仍如图 4 所示。

2.1.4　约束情况对应力分布的影响

这里取 $V_f = 0.4$, $\bar{k} = 1.0$, 以基体外表面自由和受径向刚性约束为例讨论边界约束的效应。图 6 给出界面上无量纲径向应力 $\bar{}_r = _r / _0$ 随 z 的变化。从图中可以看到, 约束对 $\bar{}_r$ 的影响很大。在此模型中, 若基体外侧自由, 则 $\bar{}_r$ 由某一正值迅速下降为零, 然后再趋于某个负值, 但若基体外侧受径向约束, 则 $\bar{}_r$ 先降低, 然后再趋于某个正值, 在这个过程中没有符号上的改变。计算还表明, 约束对 $\bar{}_z$ 和 $\bar{}_{rz}$ 的影响很小, 这里不再罗列。

2.2　损伤的发展

从图 3 可见, 对一定的 V_f 和 $\bar{k}$, 在靠近界面的基体内 $\bar{}_z$ 在某个位置处达到最大值, 该处也是基体上主应力达到最大值的位置, 因此基体可能于此开裂。同时由于在该处 $_z$ 的值远大于 $_{rz}$ 与 $_r$, 故基体开裂的方向基本上垂直于纤维的轴线。另一方面, 由图 5 可知界面应变能密度

© 1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

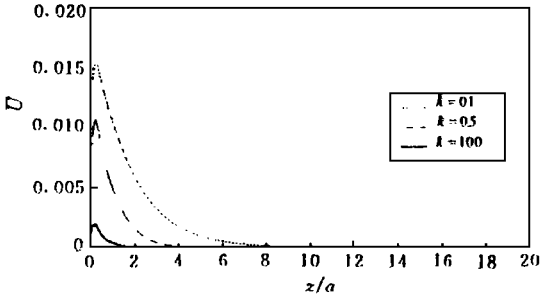

图5 $\bar{k}$ 对界面应变能密度分布的影响

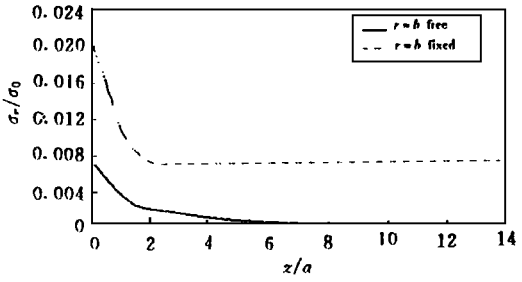

图 6 边界约束对界面的基体侧 $_z$ 分布的影响

总是在$z = 0$附近最大,在该处 $_r$ 又满足 $_r > 0$,可见界面也有可能在$z = 0$处脱粘。假若下一步的损伤在上述位置产生,那么伴随着载荷的增大,它或将稳定或将失稳扩展。本文作者在文献[8] 中曾利用奇异积分方程的方法研究了在基体裂纹的尖端$z = 0$处发生界面脱粘后,脱粘长度、应力场与载荷大小及界面结合强度的非线性关系,求解比较复杂。本文作者则试图从另一个角度研究这一问题,即考察在基体引入第二裂纹或者在界面上引入脱粘区之后复合材料内应力分布有什么改变,特别是弄清在同样载荷下裂纹或脱粘区前沿以及其它高应力区内的应力值与引入的裂纹或脱粘区长度有什么关系,这样的处理既使问题的分析较为简单,又能为我们提供下一步损伤扩展方向的信息。

2.2.1 基体先萌生第二裂纹

例如基体较弱,则基体起裂将先于界面脱粘。设在载荷传递长度位置$z = l_t$ 处先萌生了$a \leq r \leq c$的圆片状基体裂纹。图7是在靠近界面的基体内 $_z$ 对应于裂纹的径向尺度$(c - a)/a$的变化情况。由图可见,裂纹尺度对 $\bar{}_z$ 影响主要集中在裂口附近,起裂后该处的 $\bar{}_z$ 迅速下降。

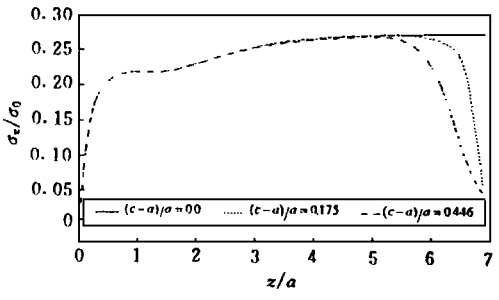

图7 基体裂纹长度对界面的基体侧 $_z$ 分布的影响

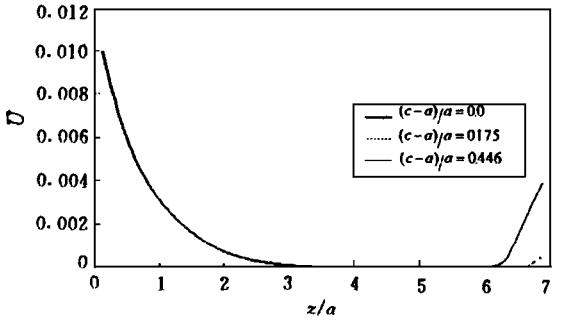

图8 基体裂纹长度对界面应变能密度分布的影响

接下来的问题是:基体起裂后,是裂纹继续扩展,还是界面开始脱粘?计算表明,随着裂纹长度的增大,裂纹尖端的应力强度因子也将增大。从图 8 可以看出,裂纹长度$(c - a)/a$ 对应变能密度的影响主要表现在该裂纹的裂口附近,其值远小于$z = 0$处的值。计算还发现,随着$\bar{k}$ 增大,应变能密度也变大。因此在 $\bar{k}$ 不很大的情况下,新萌生的基体裂纹将不断扩展,直至基体断裂;而若在裂口处 $\bar{k}$ 值局部很大,同时该界面的结合强度又较弱时,也可能在新裂口处形成脱

此为试读,需要完整PDF请访问: http://www.ertongbook.com

粘。

2.2.2　界面先脱粘

假设先在 $z = 0$ 处的界面上形成深度为 d 的环形脱粘区, 图 9 给出靠近界面的基体内 $\bar{\tau}_z$ 随 d/a 的变化曲线。由图可见, 界面脱粘只是在脱粘附近处对 $\bar{\tau}_z$ 有影响, 而对 $\bar{\tau}_z$ 的最大值并无多大贡献, 另一方面计算又表明, 随着脱粘长度的增大脱粘处的应变能密度也逐渐增大。所以在这种情况下一旦界面发生脱粘, 则脱粘将易于继续扩展。

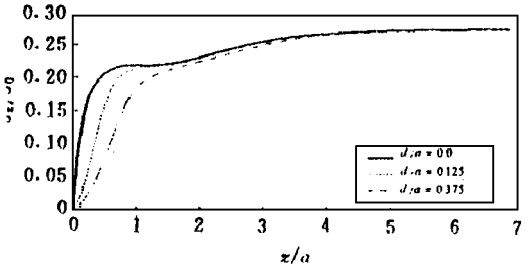

图9　界面开裂长度对界面的基体侧 $\bar{\tau}_z$ 分布的影响

上面从几个不同角度考察了界面相性态的影响。Mccartney[9]曾用解析方法求解了具有理想界面(相当于 $k \to \infty$)、含基体裂纹的纤维增强复合材料内的应力传递问题, 给出的各应力分量沿轴向的变化规律, 其趋势与本文的结果一致。有关短纤维增强复合材料内的应力传递及计及残余应力与界面摩擦影响的情况我们将在以后的文章中作进一步的讨论。

参 考 文 献

1　Kelly A. Interface effects and the work of fracture of a fibrous composite. Proc R Soc Lond, 1970, A319: 95
2　Aveston J, Cooper G A, Kelly A. The properties of fibre composite. In: Conference Proceedings, National Physical Laboratory. IPC Science and Technology Press, 1971. 15
3　Lene F, Leguillon D. Homogenized constitutive law for a partially cohesive composite material. Int J Solids Struct, 1982, 18: 443
4　Hashin Z. Thermoelastic properties of fiber composites with imperfect interface. Mech Mater, 1990, 8: 333
5　Zhu H, Achenbach J D. Radial matrix cracking and interphase failure in transversely loaded fiber composites. Mech Mater, 1991, 11: 347
6　伍章健. 纤维增强复合材料界面的理论与实验研究: [博士学位论文], 上海: 上海交通大学, 1991
7　罗海安, 宋华茂. 具有非理想界面的椭球形夹杂. 见: 复合材料进展. 北京: 航空工业出版社, 1994, 800
8　罗海安, 王奇山. 弱界面复合材料中的基体裂纹. 力学学报, 1996(已录用)
9　McCartney L N. New theoretical model of stress transfer between fibre and matrix in a uniaxially fiber-reinforced composite. Proc R Soc Lond, A425: 215

EFFECTS OF INTERPHASE PROPERTIES ON THE STRESS TRANSFER IN COMPOSITE MATERIALS

Luo Haian　Chen Bingjin　Liu Chong
(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract　Using finite element method, the stress transfer in a matrix-cracked fiber-reinforced composite is studied. The interface between fiber and matrix is assumed to be non-ideal and is simulated by a spring-like layer. The effects of interphase properties on the stress transfer are analyzed for different ratios of elastic moduli, volume fractions of fibers and for various boundary conditions. The stress distributions near the interphase are also investigated under several typical modes of damage.

Key words　composite; fiber; matrix; interphase; stress transfer

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww