

粘接界面弹塑性内聚力模型子程序开发

张 军¹, 贾 宏¹, 田 阳²

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 天津大学 化学工程学院, 天津 300072)

摘 要: 基于有限元分析软件 ABAQUS 内聚力单元, 采用自定义材料(VUMAT)编译二维平面状态下弹塑性内聚力模型子程序. 用所编写的弹塑性内聚力模型 VUMAT 子程序对薄板粘接结构的开裂进行模拟计算, 并与双线性内聚力模型、多项式内聚力模型的 VUMAT 子程序模拟结果及实验结果进行对比分析. 结果表明内聚力关系对粘接结构开裂过程的拉力变化影响较大, 对不同胶体的粘接结构应选择相应的内聚力模型.

关键词: 内聚力模型; 本构关系; 自定义材料

中图分类号: TQ340.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.018

0 引言

内聚力模型(CZM)是弹塑性断裂力学中一个被广泛应用与研究的计算模型, 近年来, 针对不同的材料性质或结构形式, 发展出各种不同形式的内聚力模型^[1], 使其广泛应用于研究裂纹尖端塑性变形、静力和疲劳条件下的蠕变开裂, 以及岩土材料及混凝土、金属与复合材料界面开裂、粘接结构开裂等问题^[2-3].

随着计算技术和计算机的快速发展, 内聚力模型被越来越多地应用于有限元计算中. 内聚力模型应用于通用有限元软件中时, 部分形式的内聚力模型已经被包含在有限元软件中, 其他形式的内聚力模型应用时必须进行有限元子程序开发. 笔者在大型有限元分析软件 ABAQUS 的平台上, 借用 ABAQUS 的 VUMAT 接口利用 FORTRAN 语言编辑了二维弹塑性内聚力模型, 并通过单元测试验证其准确性. 最后利用编辑的弹塑性内聚力模型对薄板粘接结构的开裂进行了模拟分析.

1 弹塑性内聚力模型 VUMAT 子程序开发

1.1 弹塑性内聚力模型介绍

弹塑性内聚力模型由 Tvergaard and Hutchinson^[4]提出, 模型描述了粘接界面的拉伸力与分离位移的关系, 如图 1 所示.

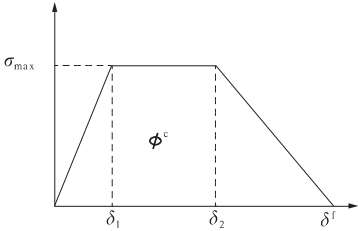


图 1 弹塑性张力-位移关系

Fig. 1 Relationship of elastic and plastic traction-displacement

其控制方程为

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta_1} \cdot \delta, & \delta < \delta_1; \\ \sigma_{\max}, & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2; \\ \frac{\sigma_{\max}}{\delta^f - \delta_2} \cdot (\delta^f - \delta), & \delta_2 \leq \delta \leq \delta^f; \\ 0, & \delta > \delta^f. \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 是粘接界面的张开应力; δ 是张开位移; σ_{\max} 是粘接界面开裂的最大应力; $\delta_1, \delta_2, \delta^f$ 分别为开裂时弹塑性关系的形状参数. 临界的断裂能值 (即张力位移曲线下包含的面积) 为

$$\phi^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (\delta^f + \delta_2 - \delta_1). \quad (2)$$

1.2 编辑张力位移关系

在 ABAQUS 中, 弹塑性内聚力模型用户材料的子程序 VUMAT 编辑, 主要解决两方面的问题:

收稿日期:2013-10-16; 修订日期:2013-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972200)

作者简介:张军(1967-), 男, 黑龙江大庆人. 郑州大学副教授, 博士, 研究方向为粘接强度与断裂损伤, E-mail: zhang_jun@zzu.edu.cn.

编译张力位移关系和单元破坏的控制^[5-6]. 对于内聚力模型的张力位移关系,应力是通过位移的增加来实现更新,内聚单元分布在上下两层实体单元之间,其中一个单元,如图 2 所示. 图中给出了内聚力单元的节点与积分点分布. 在节点 1、3 之间设置有积分点 1,节点 2、4 之间为积分点 2. 各节点的位移值为: (U_1, V_1) 、 (U_2, V_2) 、 (U_4, V_4) 、 (U_3, V_3) , U 方向为法向, V 方向为切向.

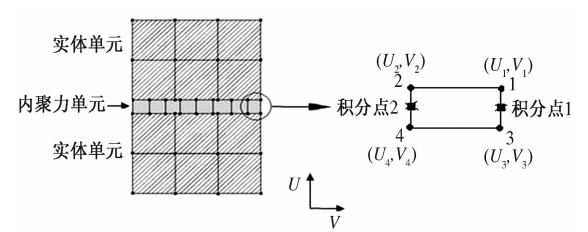


图 2 内聚力单元积分点与节点分布

Fig. 2 Integral points and nodes distribution of cohesive zone

在 VUMAT 中实现内聚力模型的张力 - 位移关系,必须由应变增量计算出界面的开裂位移值. 以积分点 1 为例,法向与切向的应变增量分别为 $(\partial \varepsilon_n, \partial \varepsilon_t)$,需要由 $(\partial \varepsilon_n, \partial \varepsilon_t)$ 计算出 $(\Delta U_{13}, \Delta V_{13})$. 根据内聚力单元应变与位移关系,在积分点的法向与切向应变计算式为

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \frac{\Delta U}{T_0}; \\ \varepsilon_t = \frac{\Delta V}{T_0}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_0 为内聚力单元的初始计算厚度.

在 VUMAT 中的第 k 增量步,该步中的各向应变增量为 $(\partial \varepsilon_n^k, \partial \varepsilon_t^k)$,而上一步得到的应变值采用状态变量存储,并传递到该分析步为 $(\varepsilon_n^{k-1}, \varepsilon_t^{k-1})$,由此计算出此时的应变值 $(\varepsilon_n^k, \varepsilon_t^k)$ 为

$$\begin{cases} \varepsilon_n^k = \varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k; \\ \varepsilon_t^k = \varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k. \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)与(4),得到积分点 1 处由应变增量,计算各向位移的表达式为

$$\begin{cases} \Delta U = (\varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k) \cdot T_0; \\ \Delta V = (\varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k) \cdot T_0. \end{cases} \quad (5)$$

由(4)式得到应变增量,来计算各向应力的计算式:

$$\begin{cases} \sigma = f[(\varepsilon_n^{k-1} + \partial \varepsilon_n^k) \cdot T_0]; \\ \tau = g[(\varepsilon_t^{k-1} + \partial \varepsilon_t^k) \cdot T_0]. \end{cases} \quad (6)$$

在 VUMAT 子程序中,可通过设置状态变量

随应力、位移以及断裂能的变化关系. 通过考察状态变量值而控制内聚力单元的损伤与破坏. 通过设置状态变量 SDV11 和 SDV12 来实现单元破坏与控制. 其中状态变量 SDV11 值是根据能量定义的粘接界面破坏扩展失效准则得到的^[7].

$$SDV11 = \frac{\phi_1}{\phi_1^c} + \frac{\phi_2}{\phi_2^c}. \quad (7)$$

状态变量 SDV12 用来控制破坏失效单元的删除,其初始值为 1,当 SDV11 值增加到 1 时,SDV12 值由 1 变为 0,同时,主程序不可逆的删除破坏失效单元.

1.3 单元测试

首先在 ABAQUS/CAE 中创建 CAE 模型,上下基板 10 mm × 10 mm,为实体单元,中间设置一层内聚力单元,厚 1 mm. 如图 3 所示.



图 3 单元测试模型

Fig. 3 Geometry of element test

对下基板底部进行完全固定. 在上基板端部施加 7 mm 的位移载荷,进行纯拉伸测试;在上基板左端施加 4.5 mm 的位移载荷,进行纯剪切测试.

在拉伸测试和剪切测试的计算结果中,选择粘接区域任意一个单元,输出该单元上的张力与位移的关系;状态变量 SDV11、SDV12 与位移的关系如图 4 和 5 所示.

从图上可以看出,张力 - 位移关系 VUMAT 计算值与弹塑性模型解析值完全重合,由此说明 VUMAT 子程序完全复现了弹塑性内聚力模型的张力位移关系. 随着位移值的增加,表征单元破坏程度的状态变量 SDV11 由 0 逐渐增加,当其值增加为 1 时,控制单元删除的变量 SDV12 值由 1 变为 0,可实现单元删除功能.

2 薄板粘结结构开裂模拟计算

在 ABAQUS/CAE 创建薄板粘结结构模型,模型结构参照 Chen Jun 等^[8]的实验模型,为简化计算模型,本研究粘接结构只采用二维的模型. 边

界条件如图 6 所示。

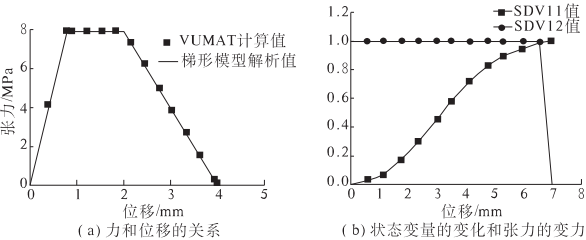


图 4 拉伸单元测试结果

Fig. 4 Result of the tensile element test

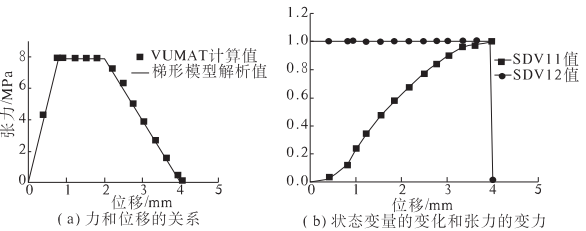


图 5 剪切单元测试结果

Fig. 5 Result of the shear element test



图 6 薄板粘接结构

Fig. 6 Structure of thin plate bonded

结构尺寸为上下基板长 100 mm,厚 0.59 mm. 粘接区域的厚度为 0.03 mm,在结构左端部上下两块基板各施加 11 mm 的位移,右端进行完全固定. 基板及粘接结构材料性质如下.

基板:弹性模量 202.3 GPa,泊松比 0.3;粘接材料:纯法向剥离最大应力 2.1 MPa,两个切向纯剪切的最大应力 7.9 MPa;断裂能为 840 J.

为了研究不同内聚力模型对基板上下拉力的影响,笔者分别采用弹塑性内聚力模型、双线性内聚力模型及多项式内聚力模型的 VUMAT 子程序对该薄板粘接结构的开裂进行模拟计算并与实验结果进行了对比. 三种内聚力模型界面本构关系的参数设置满足断裂能相等原则,具体参数设置如表 1~3 所示.

裂纹尖端的应力分布如图 7 所示. 3 种内聚力模型模拟结果及实验结果的比较,如图 8 所示.

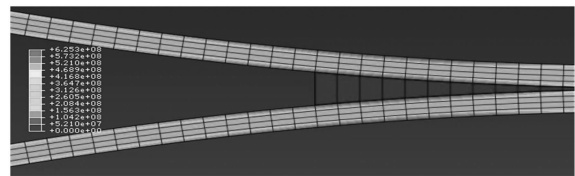


图 7 弹塑性模型模拟的裂纹尖端应力图

Fig. 7 Scheme of crack tip stress of elastic-plastic model simulation

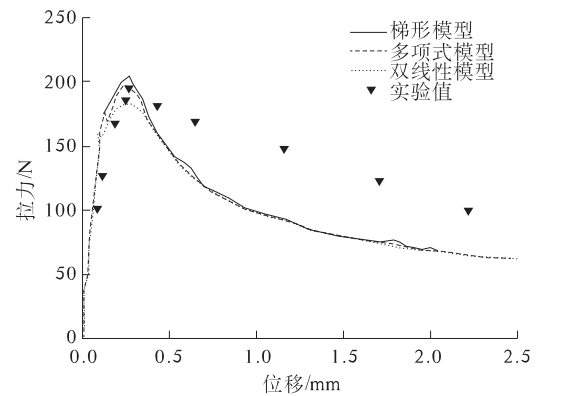


图 8 不同内聚力模型模拟的拉力 - 位移与实验结果对比

Fig. 8 Comparison of the different ZCMs simulation traction-displacement with test result

图中给出了模型计算过程中基板末端的拉力值随基板末端位移的变化. 通过该图可以看出,拉力值随位移变化的规律基本一致. 在最初的裂纹萌生阶段,拉力值随着末端位移的增加而增加,在裂纹增长阶段,随着裂纹的增长拉力进入持续卸载阶段. 这主要是由于随着开裂位移的持续加大裂纹增长,上下基板弯曲程度加大,通过裂纹尖端的应力云图可以看出,裂纹尖端基板上最大应力约为 630 MPa,远大于粘接材料开裂最大应力值 2.1 MPa,促进粘接材料的开裂,从而使拉力进入卸载阶段.

表 1 多项式模型参数

Tab. 1 Parameter of polynomial model

σ_{\max}/MPa	δ_n/mm	a
2.1	0.71	1.00

表 2 双线性模型参数

Tab. 2 Parameter of bilinear model

σ_{\max}/MPa	δ_n/mm	δ_{nt}/mm	τ_{\max}/MPa	δ_t/mm	δ_{tt}/mm
2.10	0.15	0.80	7.90	0.04	0.21

在拉力上升阶段,3 种内聚力模型子程序计算结果与实验测试值吻合良好;主要区别在于不同内聚力模型给出的最大拉力值不同:其中双线性内聚力模型计算的拉力最大值为 187 N,比实验值小,弹塑性内聚力模型计算的拉力最大值为 204.5 N,多项式内聚力模型计算的拉力最大值为 198 N,均比实验值得 191.9 N 值大. 在拉力卸载阶段,3 种内聚力模型子程序计算结果中拉力随位移的卸载曲线基本重合,但拉力随末端位移卸载速率均比实验值大,初步认为是程序所选取的单元失效判据造成的.

表 3 弹塑性模型参数
Tab. 3 Parameter of elastic-plastic model

σ_{\max}/MPa	δ_{n1}/mm	δ_{n2}/mm	δ_{n3}/mm	τ_{\max}/MPa	δ_{t1}/mm	δ_{t2}/mm	δ_{t3}/mm
2.1	0.15	0.30	0.65	7.9	0.04	0.00	0.17

通过上述分析可知,在相同断裂能的原则下,不同张力位移关系对粘接结构脱粘过程中拉力变化的宏观力学现象影响较大,主要表现为最大拉力值的不同.为了利用内聚力模型模拟粘接界面的微观力学行为来反应粘接结构脱粘过程中拉力变化的宏观力学现象,内聚力模型的选取是十分必要的.在此基础上,才能够准确地反应其宏观力学变化,准确预测粘接结构的破坏.

3 结论

笔者借助于 ABAQUS 软件,采用 VUMAT 子程序编辑了弹塑性内聚力模型的子程序,并对编辑的二维平面下的弹塑性内聚力模型子程序进行了单元测试.结果表明,内聚力模型的张力位移关系与内聚力单元相结合的方式,在 ABAQUS 中能够实现准确的模型计算.通过对薄板粘接结构的模拟计算,表明不同内聚力模型对预测粘接结构脱粘过程的影响较大,以此说明选取恰当的内聚力模型对准确计算粘接结构的开裂过程的重要性.

参考文献:

[1] 张军.界面应力及内聚力模型研究[M].郑州:郑州

大学出版社,2011.

[2] 康颖安.断裂力学的发展与研究现状[J].湖南工程学院学报,2006,16(1):39-42.
[3] 贾宏,黄刘刚,孙维威,等.各向异性导电胶膜损伤破坏试验与数值分析[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(2):31-34.
[4] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1992, 40: 1377-1397.
[5] 杨曼娟. ABAQUS 用户材料子程序开发及应用[D].湖北:华中科技大学桥梁与隧道工程,2005.
[6] 黄刘刚.内聚力模型的分析及有限元子程序开发[D].郑州:郑州大学化工与能源学院,2010.
[7] NEEDLEMAN A. Micromechanical modeling of interfacial decohesion[J]. Ultramicroscopy, 1992, 40: 203-214.
[8] WANG Yong, CHEN Jun, TANG Bing-tao. Finite element analysis for delamination of laminated vibration damping steel sheet[J]. Trans Nonferrous Met. Soc. China, 2007, 17: 455-460.

Development of Subroutine for Elastic-plastic Cohesive Zone
Model of Bonded Interface

ZHANG Jun¹, JIA Hong¹, TIAN Yang²

(1. School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper proposes a way to compile a 2D elastic-plastic cohesive zone model based on the cohesive zone element through user-defined material subroutine (VUMAT) in ABAQUS. The delamination of thin plates is studied using the VUMAT subroutine of elastic-plastic cohesive zone model (CZM). The simulation results are compared with the result of the Bilinear CZM, the Polynomial CZM and the experiments. The results show that the cohesive zone models have great influence on the tensile forces in the progress of delamination, and to choose suitable CZMs for the various adhesives bonded joints.

Key words: cohesive zone model; constitutive relation; VUMAT