

文章编号:1671-6833(2017)01-0022-05

# 五层粘接结构的断裂行为模拟研究

张 军, 李志宏, 贾 宏

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 粘接技术已被广泛应用, 断层及开裂失效是粘接结构常见的失效类型. 建立了五层粘接结构模型, 分别是被粘物体、粘接界面和粘接材料. 分别对搭接结构和对接结构的不同断裂形式进行了模拟计算. 结果表明, 粘接界面内聚力强度小于或大于粘接材料强度, 断裂出现在较弱粘接面上; 粘接界面内聚力强度等于粘接材料层强度, 粘接材料层与粘接界面均出现破坏; 搭接结构的断裂方式与对接结构的断裂方式相同. 本研究结果可用于工程实际的粘接强度分析.

**关键词:** 胶黏剂; 粘接界面层; 粘接层; 断裂; 内聚力模型

**中图分类号:** TQ340.1      **文献标志码:** A      doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.001

## 0 引言

胶接结构被广泛应用于飞机、汽车、建筑结构、微电子封装等重要领域, 断层及开裂失效是结构型胶黏剂的主要失效形式<sup>[1-2]</sup>. 粘接结构的局部破坏将影响粘接结构整体承载能力, 降低粘接结构的许用强度, 因此, 研究粘接结构由于界面强度和粘接材料层强度不同对其断裂的影响具有重要的理论意义以及实际工程价值.

内聚力模型 (cohesive zone model) 已经被广泛应用于分析粘接结构的断裂过程. 内聚力模型由 Barenblatt 等<sup>[3]</sup> 首先提出, 始于 20 世纪 60 年代. 随后, Needleman 等<sup>[4]</sup> 提出了非线性的多项式和指数形式内聚力模型. Hutchinson 等<sup>[5]</sup> 建立了梯形的界面内聚力模型, 内聚力模型能很好地描述粘接结构断裂的拉力-位移本构关系. Reed 等<sup>[6]</sup> 提出了双线性内聚力模型描述界面的拉力-位移关系, 已被商用有限元软件 ABAQUS 采用, 可利用粘接单元对粘接结构进行强度分析. 内聚力模型应用的范围很广泛, 它可以描述金属、陶瓷、聚合物及复合材料的断裂与失效, 粘接结构的界面失效及双材料中界面开裂等<sup>[7]</sup>. 然而, 很少有文献对粘接结构的断裂裂纹的走向及其原因进行深入研究.

笔者对不同粘接结构断裂形式采用用户材料

单元与基于粘接行为的接触界面单元, 建立基于被粘物体、粘接界面和粘接材料的五层粘接结构模型. 为了分析粘接结构断裂与粘接层和界面层强度之间的关系, 界面强度和粘接材料笔者在界面与粘接材料间分别采用 3 种粘接形式, 即界面强度大于粘接材料层强度, 界面强度小于粘接材料层强度, 界面强度等于粘接材料层强度. 对接结构的拉伸及剪切以及搭接结构的拉伸强度进行了数值计算. 通过不同粘接结构和不同的断裂形式的结果分析, 了解不同断裂形式对粘接强度的影响.

## 1 内聚力单元及粘接材料层子程序

### 1.1 内聚力单元

在有限元商用软件中粘接单元提供的内聚力模型张力-位移关系, 如图 1 中所示.

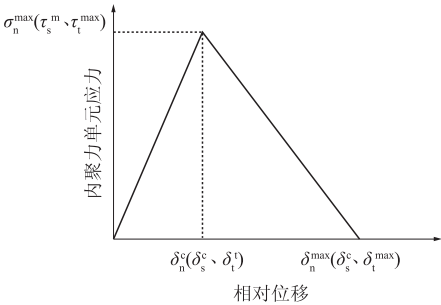


图 1 内聚力模型张力位移法图

Fig. 1 Traction-separation law of the cohesive model

收稿日期:2016-10-30; 修订日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972200); 河南省国际合作项目(144300510008)

作者简介:张军(1967—), 男, 黑龙江大庆人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事粘接结构力学行为研究, E-mail: zhang\_jun@zzu.edu.cn.

在初始阶段,内聚单元应力随着相对位移的增加而线性增加,当相对法向位移为  $\delta_n^c$  (两个切向位移为  $\delta_s^c$ 、 $\delta_t^c$ ) 时,法向应力(两个切向应力)将分别达到最高点  $\sigma_n^{\max}$  ( $\tau_s^{\max}$ 、 $\tau_t^{\max}$ )。在后阶段,随着开裂位移的扩大,应力线性下降,直至界面开裂。内聚力单元最终失效时法向临界位移为  $\delta_n^{\max}$ ,两个切向临界位移为  $\delta_s^{\max}$  和  $\delta_t^{\max}$ 。内聚力模型的拉伸力-界面张开位移关系的控制方程为:

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_n^{\max}}{\delta_n^c} \delta, & (\delta \geq \delta_n^c) \\ \frac{\delta_n^{\max} - \delta}{\delta_n^{\max} - \delta_n^c} \sigma_n^{\max}, & (\delta < \delta_n^c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_n$  为法向的拉伸力; $\delta$  为法向张开位移。

粘接单元的损伤变化是基于能量变化,粘接单元失效通过比较断裂能是否达到临界值作为粘接单元达到最终破坏值的判断依据。能量准则:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}}\right)^\alpha = 1. \quad (2)$$

应用内聚力界面接触单元可对粘接界面层赋予粘接断裂行为属性。

1.2 粘接材料层的子程序

采用材料子程序对双线性内聚力模型进行程序编辑,由 Abaqus Command 分析步中的命令窗口调用并进行有限元数值分析。子程序中材料属性赋予粘接材料层,断裂裂纹扩展符合给定的子程序内聚力本构关系。子程序中的应力矩阵是 StressNew( \*) 与 StressOld( \*) 的更新,状态变量矩阵是 StateNew( \*) 与 StateOld( \*) 的更新。其中,前者为应力矩阵与状态变量矩阵的更新量,而后者为上一步计算中得到的应力矩阵与状态矩阵的原始变量。当单元达到更新变量的条件后,该单元将进行不可逆的删除。例如在第  $n$  个增量步中,则有

StressOld( $n,i$ ) = StressNew( $n-1,i$ ); (3)

StateOld( $n,i$ ) = StateNew( $n-1,i$ ). (4)

在第  $n$  增量步的计算中,由新的应力矩阵与状态变量矩阵 StressNew( $n,i$ ) 和 StateNew( $n,i$ ) 得到第  $n+1$  增量,则有

StressNew( $n,i$ ) = StressOld( $n+1,i$ ), (5)

StateNew( $n,i$ ) = StateOld( $n+1,i$ ), (6)

子程序通过这个过程更新上下增量的应力及状态变量值。

2 拉伸和剪切断裂结果分析

2.1 模型建立

粘接界面采用基于粘接行为的界面接触单元,粘接层采用材料子程序单元,被粘物采用弹性材料单元,建立如图 2(a) 所示五层粘接结构的几何模型。界面强度与粘接材料层粘接强度的设置分为 3 种情况,分别对其粘接结构的断裂形式进行分析:①粘接材料层强度小于界面强度;②粘接材料层强度大于界面强度;③粘接层强度等于界面强度。

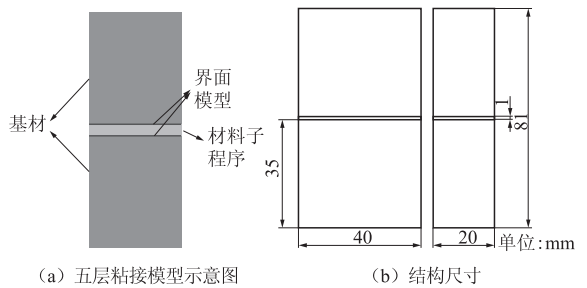


图 2 模型结构  
Fig. 2 Model structure

对接结构的尺寸如图 2(b) 所示。上下部分被粘基材为铝,材料的弹性模量为  $E = 7 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.3,密度为  $2.5 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。粘接层采用子程序编译的双线性内聚力模型的粘接单元,粘接材料层与基材通过粘接界面单元连接。模拟时主要参数如表 1 所示。其中  $\sigma^{\max}$  为粘接单元的峰值应力, $\delta^{\text{init}}$  为双线性内聚力模型达到峰值应力时的界面张开位移, $\delta^{\text{fail}}$  为断裂失效位移,单位均为 mm; $u$ 、 $s$ 、 $t$  分别表示为法向方向与两个切向方向。粘接界面单元参数设置如表 2 所示。其中  $K$  为弹性模量,有限元计算采用动态显式分析方法。分析时采用位移控制,对接结构的加载位置垂直被粘物上下端;粘接材料层采用六面体网格,网格类型为 COH3D8。粘接结构网格总数量为 2 600。

表 1 材料子程序参数设置

Tab. 1 Parameters of material subroutine

$\sigma_u^{\max}$ /MPa	$\delta_u^{\text{init}}$ /mm	$\delta_u^{\text{fail}}$ /mm	$\sigma_s^{\max}$ /MPa	$\delta_s^{\text{init}}$ /mm	$\delta_s^{\text{fail}}$ /mm	$\sigma_t^{\max}$ /MPa	$\delta_t^{\text{init}}$ /mm	$\delta_t^{\text{fail}}$ /mm	$T_0$ /mm
0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	1.0

表 2 界面层参数设置

Tab.2 Parameters of interface layer

不同情况	$K_{uu}/\text{MPa}$	$K_{ss}/\text{MPa}$	$K_{tt}/\text{MPa}$	$\delta_u^{\text{init}}/\text{mm}$	$\delta_s^{\text{init}}/\text{mm}$	$\delta_t^{\text{init}}/\text{mm}$	$\delta^f/\text{mm}$
界面强度小于粘接层强度	2.4	2.4	2.4	0.05	0.05	0.05	0.05
界面强度大于粘接层强度	4.0	4.0	4.0	0.08	0.08	0.08	0.08
界面强度等于粘接层强度	4.0	4.0	4.0	0.05	0.05	0.05	0.05

2.2 模拟结果分析

1)界面强度小于粘接层强度. 界面损伤由裂纹萌生状态来显示, 始值为 0, 当该值达到 1 时, 裂纹并扩展. 在粘接界面强度大于粘接层强度情况下(界面强度为 160 N, 粘接层强度为 200 N), 选取粘接层上 4 个节点的裂纹萌生状态值, 图 3 和图 4 分别表示拉伸和剪切粘接层上不同位置的状态参数与时间的关系. 从图 4 和图 5 中可以发现, 节点 1、23、24、45、116 变化规律近似, 4 个节点的裂纹萌生状态值均未达到 1, 结果显示, 在界

面强度大于粘接材料层强度并且在拉伸和剪切情况下, 粘接材料层未达到裂纹萌生, 断裂失效发生在界面层.

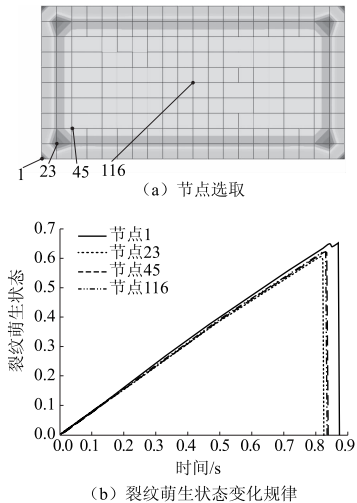


图 3 拉伸加载粘接层模拟结果

Fig.3 Simulated result of cohesive layer

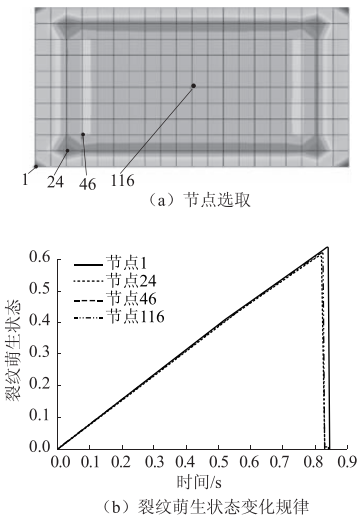


图 4 剪切粘接界面结果分析

Fig.4 The results analysis of cohesive surfaces

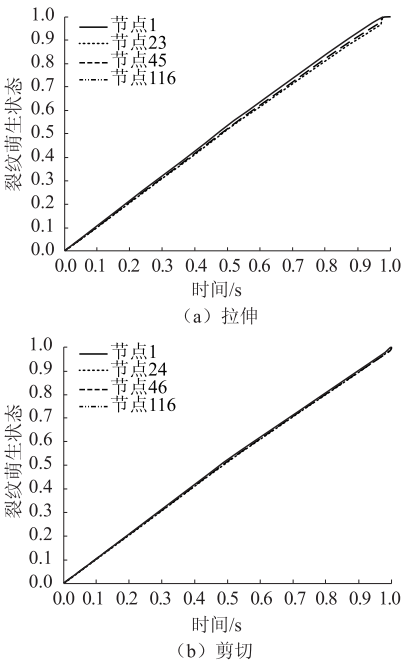


图 5 裂纹萌生状态变化规律

Fig.5 Change rule of crack initiation state

2)界面强度大于粘接层强度. 在粘接材料层强度小于界面强度情况下(粘接层强度为 160 N, 界面强度为 200 N), 从计算结果获得粘接层节点 1、23、24、45 和 116 的裂纹萌生状态值随时间变化曲线, 节点的裂纹萌生状态值均达到了 1, 如图 5 所示. 结果显示拉伸和剪切断裂时粘接材料层出现损伤, 此结构断裂发生在粘接材料层, 界面层未遭到破坏.

3)界面强度等于粘接层强度. 界面强度等于粘接层强度情况下(界面强度和粘接层强度都为 160 N), 同样, 拉伸和剪切时, 粘接层上的节点 1、23、24、45 和 116 的裂纹萌生状态值随时间变化曲线, 如图 6 所示. 从图 6 可以发现, 节点 24 与节点 45 的裂纹萌生状态值达到了 1, 说明节点 24 与节点 45 处粘接层单元发生了失效. 节点 1 与节点 116 均小于 1, 表明粘接材料层没有断裂. 结果说明, 粘接层强度与界面强度相等时, 对接结构失效发生在粘接层以及界面层的部分位置.

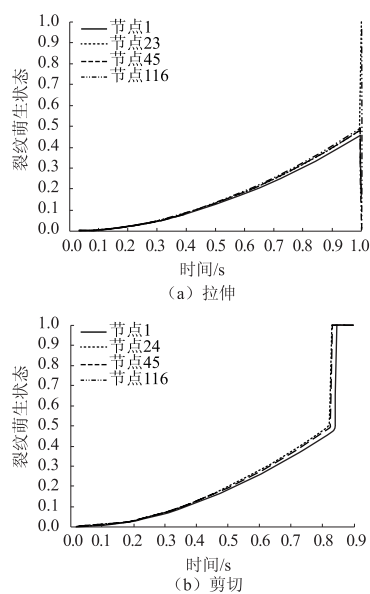


图 6 裂纹萌生状态变化规律  
Fig. 6 Changing rule of crack initiation state

3 搭接结构断裂结果与分析

3.1 几何模型建立

粘接结构的几何模型和几何尺寸,如图 7 所示. 计算时分别采用界面强度大于粘接层强度(界面层强度为 36 N,粘接层强度为 20 N),界面强度小于粘接层强度(界面层强度为 20 N,粘接层强度为 36 N)和界面强度等于粘接层强度(界面层强度和粘接层强度都为 36 N)3 种情况. 粘接界面采用基于粘接行为的界面接触单元,粘接层采用 VU-MAT 材料单元,模型上端施加位移控制载荷,下端完全固定,被粘物采用六面体结构化网格,网格类型为 COH3D8,网格数量为 2 100.

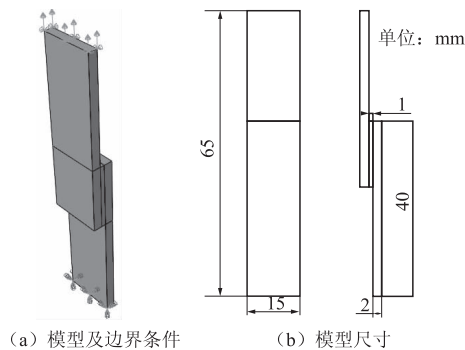


图 7 模型建立  
Fig. 7 Model building

3.2 模拟结果分析

1) 粘接层强度小于界面强度. 粘接材料层强度小于界面强度时,选取粘接层上 3 个节点 215、241 以及 306,获得节点裂纹萌生状态值随时间变

化,如图 8 所示. 可以发现,粘接层上的节点 215、241 以及 306 的裂纹萌生状态值都达到 1,说明断裂出现在粘接层.

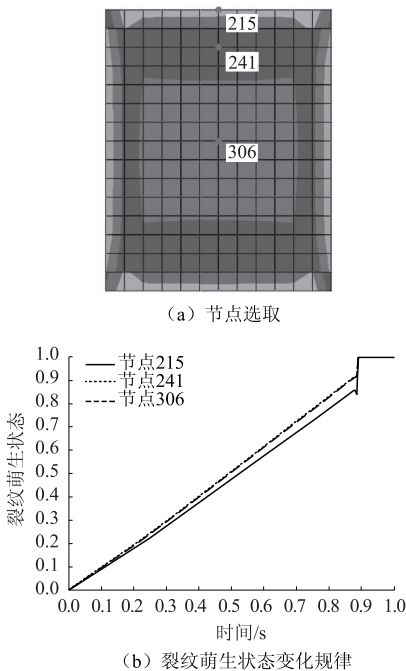


图 8 粘接界面结果分析  
Fig. 8 Results analysis of cohesive surfaces

2) 界面强度小于粘接层强度. 在界面强度小于粘接层强度情况下,节点 215、241 以及 306 的裂纹萌生状态最大分别为 0.681 3、0.619 2 以及 0.624 8,均未达到 1,如图 9 所示. 说明此结构的断裂发生在粘接界面层,粘接材料层未受到破坏.

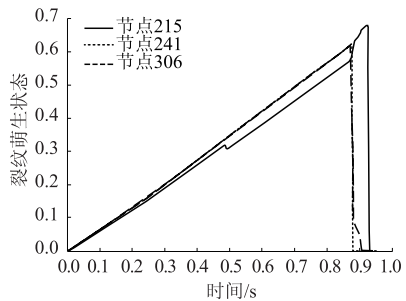


图 9 裂纹萌生状态变化规律  
Fig. 9 Change rule of crack initiation state

3) 粘接层强度等于界面强度. 界面强度与粘接材料层强度相等,裂纹萌生状态值变化规律,如图 10 所示.

节点 215 与节点 306 的裂纹萌生状态值达到了 1,而节点 241 值未达到 1. 说明节点 241 处粘接层单元未达到破坏要求. 所以,界面强度与粘接层强度相等时,结构的粘接层以及界面层均发生失效.

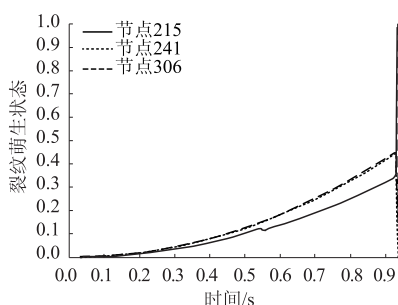


图 10 裂纹萌生状态变化规律

Fig. 10 Change rule of crack initiation state

#### 4 结论

笔者建立了五层粘接结构的几何模型,分别对接结构和搭接结构进行了拉伸以及剪切断裂分析,用来研究材料层的粘接强度与界面层的强度变化对粘接结构的断裂行为的影响.粘接层强度和界面强度变化采用3种粘接情况:界面强度大于粘接层强度;界面强度小于粘接层强度和界面强度等于粘接层强度.结果发现,对于粘接层强度和界面层强度不同的情况,两种结构的断裂都出现在较弱粘接强度层,分别为粘接材料断裂和界面层断裂两种情况.而对于粘接界面强度等于粘接层强度情况,对接结构及搭接结构,粘接材料层与粘接界面均出现了裂纹,表现为混合断裂.此研究结果对粘接结构的断裂和裂纹走向的研究

有一定的意义.

#### 参考文献:

- [1] 郑锐,林建平,吴倩倩,等. 结构胶胶接汽车车身金属接头抗环境腐蚀性能研究进展[J]. 材料工程, 2015, 34(3): 98-105.
- [2] 叶斐,杨世文. 碳纤维复合材料胶接单搭接接头的力学研究[J]. 汽车实用技术, 2015, 33(2): 68-70.
- [3] BARENBLATT G I. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture: general ideas and hypotheses, axially symmetric crack[J]. Applied mathematics and mechanics, 1959, 23: 622-636.
- [4] NEEDLEMAN A. An analysis of decohesion along an imperfect interface [J]. International journal of fracture, 1990, 40: 21-40.
- [5] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. Journal of mechanics and physics of solids, 1992, 40: 1377-1397.
- [6] REEDY E D, MELLO F J, GUESS TR. Modelling the initiation and growth of delaminations in composite structures[J]. Journal of composite material, 1997, 31: 812-831.
- [7] 刘湘云,陈普会,马维,等. 复合材料-金属毛化接头的失效预测模型[J]. 固体力学学报, 2015, 36(1): 55-62.

### Simulation Investigation on Five Adhesive Layers Fracture Characteristic of Adhesively Bonded Joints

ZHANG Jun, LI Zhihong, JIA Hong

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The adhesively bonding technology has been widely used. The delamination and cracking failure is main failure form of adhesive structure. This paper used the VUMAT subroutine and bonding structure models based on the bond behavior of the contact interface to establish the adhesive structure of five layers. The different crack processes of butt joint and lap joint were simulated. The results showed that the adhesive structure failures was consistent with the predicted under the bonding strength of interface less than or greater than the adhesive layer. The fracture occur on the weak bonding layer. The adhesive layer and the bonding interface occur failure simultaneously under the bonding strength of interface equal to the adhesive layer. The fracture mechanisms of lap joint are the same with the butt joints. These findings can be useful in practical engineering analysis of the bonding strength.

**Key words:** adhesive; bonding interface; adhesive layer; fracture; cohesive model