

橡胶—钢双材料界面断裂的非线性有限元分析

高剑虹¹, 杨晓翔², 李晓芳¹, 郭金泉²

(1 福州大学化学化工学院, 福建 福州 350002; 2 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 采用双剪切试件对橡胶—钢双材料的断裂问题进行有限元分析, 得到的试件变形与实验结果吻合较好, 同时分析了其界面应力, 计算出了不同裂纹深度、不同载荷下的撕裂能, 并得出了撕裂能随裂纹深度和载荷的变化关系。

关键词: 橡胶; 断裂; 撕裂能; 非线性有限元

中图分类号: O343.5

文献标识码: A

Non-linear finite element analysis of interface fracture in rubber-steel bimaterials

GAO Jian-hong¹, YANG Xiao-xiang², LI Xiao-fang¹, GUO Jin-quan²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

2. College of Mechanical Engineering and Automation Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract An non-linear finite element analysis of interface crack in double shear testpiece of rubber-steel materials has been finished. The numerical results of displacements of testpiece are in close agreement with experimental values. The interface stresses have been discussed. Calculations of tearing energy of different crack depths and different loads have been done for interface cracks in double shear testpiece. At last, the relationship between tearing energy and crack depth are given, so are the relationship between tearing energy and load.

Keywords rubber; fracture; tearing energy; non-linear finite element

橡胶与钢双材料的零部件在工业上被广泛应用, 如油井防喷器胶芯、螺杆泵橡胶定子、汽车发动机减振垫等^[1, 2]。由于机械载荷的作用及外部环境的影响, 在应用过程中不可避免地要受到破坏产生某种缺陷。橡胶钢双材料零部件的破坏受许多因素的影响, 比如材料的配方, 钢板表面喷砂处理的质量和界面粘合剂的选择等。但破坏形式主要有 2 种^[3]: 一种是沿着橡胶和钢之间的界面破坏, 也就是界面裂纹在剪切载荷的作用下沿着界面方向向前扩展; 另一种是橡胶被撕裂, 也就是界面裂纹在剪切载荷作用下向橡胶内部扩展。由此可见, 如果钢表面质量较高, 粘合剂选择合理且涂层均匀就能确保橡胶和钢之间的界面强度, 那么最终并不一定在界面上破坏。因此研究橡胶钢双材料零部件界面断裂问题具有很大的理论价值和工程应用前景。

本文利用 Ansys 有限元分析软件对橡胶钢双材料的界面断裂进行有限元分析, 并计算出不同载荷以及不同裂纹深度的撕裂能。

1 断裂撕裂能法

撕裂能法作为断裂力学的重要方法在橡胶断裂研究中有着广泛应用^[4, 5], 最早由 Rivlin 和 Thomas 提出, 它的判据^[6]认为: 当含裂纹橡胶板内的弹性势能释放率达到其撕裂能的临界值 G_c 时, 裂纹则开

收稿日期: 2005-12-05

作者简介: 高剑虹 (1982-), 女, 硕士研究生; 通讯联系人: 杨晓翔, 男, 教授。

始扩展. G_c 包括整个断裂面上的键发生断裂所消耗的能量和因滞后损失所消耗的能量. 通常认为 G_c 是常数, 但实际上确切地说临界应变能释放率 G_c 还与裂纹扩展速率, 温度和总应变有关, 可以通过实验的方法确定^[7].

撕裂能也称应变能释放率 (G), 既裂纹扩展单位面积时, 储存在含裂纹橡胶体内弹性总势能的下降率. 裂纹扩展时, 外力做功的增量 dU , 一方面使系统内势能增加 dU_e , 另一方面用来使裂纹扩展而消耗, 应变能释放率以及材料的断裂判据可以表示为^[8]:

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial a} (U - U_e) \geq G_c \tag{1}$$

式中: B 为试件厚度; a 为裂纹长度; G_c 为临界应变能释放率.

2 有限元分析

橡胶钢界面断裂性能测定的试件采用双剪切试件, 其形状和几何尺寸如图 1 所示^[3], 它是由 3 块钢板与丁腈类橡胶片粘接而成, 初始裂纹为橡胶钢界面处穿透性边缘裂纹, 图 1 中 L 、 a 分别为橡胶片长度和裂纹长度, 其中橡胶片厚 6 mm, 长 35 mm, 宽 25 mm. 橡胶的本构关系采用 Mooney-Rilin 模型^[6]:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \tag{2}$$

式中: I_1 和 I_2 分别为第一、第二应变不变量; 材料常数 $C_1 = 1.03 \text{ MPa}$, $C_2 = 0.21 \text{ MPa}$, 钢板的弹性模量为 $E = 200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$.

2.1 有限元模型

由于双剪切橡胶钢试样存在 2 个纵向对称面, 故取橡胶钢试样的 1/4 进行有限元分析. 采用三维实体单元对 1/4 双剪切橡胶钢试样进行网格划分, 用八节点超弹性 HYPER58 实体单元划分橡胶, 用八节点实体单元 SOLID45 划分钢板. 对图 1 中试样的右端面 AB 加 x 、 y 、 z 3 个方向的约束, 在结构的对称面上施加对称约束. 在试样左端面 CD 施加拉伸载荷 F . 通过放松裂纹前沿上的节点约束, 一次放松一个单元来模拟裂纹的扩展.

为了更好地反映应力集中, 在网格划分时做了如下处理: 对橡胶与钢板的粘接区域以及模型的边缘区域进行网格细化; 对于存在初始裂纹的模型, 对裂尖附近区域网格加密. 图 2 为存在初始裂纹, 且无量纲深度为 0.4 时的橡胶层有限元网格划分图 (定义裂纹的无量纲深度等于裂纹长度 a 与橡胶片长度 L 之比). 表 1 给出裂纹深度为 0.4 的试件在拉伸载荷为 1 kN, 且远离裂尖的网格尺寸固定时, 变化裂尖附近网格大小来反应裂尖附近网格的疏密对橡胶层上靠近裂尖某一点 (离裂尖 0.5 mm) 位移结果的影响. 从表 1 可以看出, 除了网格尺寸比为 1 的情况外, 其余随着网格尺寸比的增大, 计算得出的位移值相差很小, 这说明对于橡胶材料, 裂尖附近的网格疏密对计算结果的影响较小, 当网格尺寸比达到 1/2 时, 计算结果趋于稳定. 因此, 为了提高计算效率, 选用网格尺寸比为 1/2 进行有限元计算. 图 2 对橡胶层共划分了 4 543 个节点以及 3 300 个单元.

2.2 有限元分析结果及讨论

2.2.1 双剪切试件变形分析

无初始裂纹, 载荷为 1.5 kN 时双剪切试件变形如图 3(a) 所示; 初始无量纲裂纹深度为 0.2, 载荷为 3 kN 时的变形如图 3(b) 所示. 对于不同的初始界面裂纹深度, 在启裂载荷 (P_c)^[3] 作用下, 试件位移的实测值^[3] 与有限元计算数据见表 2. 从表 2 可以看出, 启裂位移 (δ_c) 的计算值和实验值比较一致.

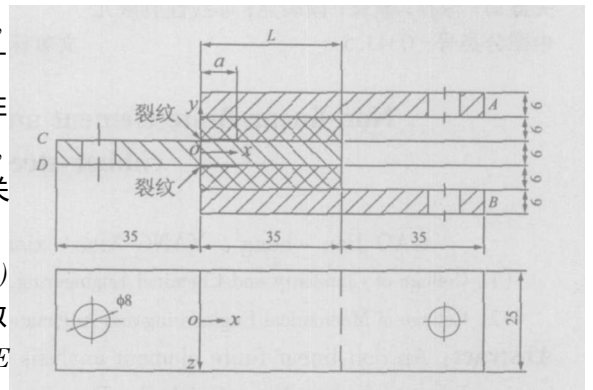


图 1 双剪切橡胶钢试件 (单位: mm)

Fig 1 The double shear specimen made of steel and rubber (unit mm)

对于不同界面裂纹深度, 在不同载荷作用下, 载荷—试件位移如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 载荷和位移都随着裂纹的深度增加而减少, 这与实验结果^[3]和理论分析吻合, 同时通过实验还可以得到试件的最终拉断载荷和拉断时的位移量随着裂纹深度的增加而下降, 这是由于裂纹越深, 韧带宽度越小(图 1 中的 $L - a$), 因此拉断试件所吸收的能量越少^[3].

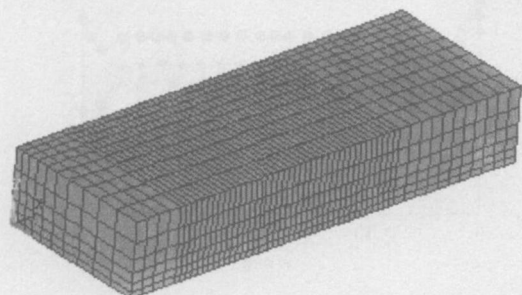


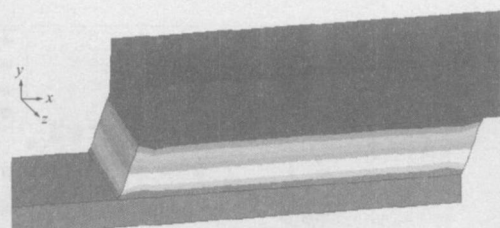
图 2 橡胶层网格划分图

Fig. 2 The mesh of the rubber part

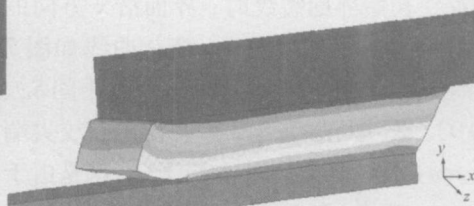
表 1 裂尖附近网格疏密对有限元计算结果影响

Tab. 1 The effect of mesh density near the crack tip on the results of FEM

裂尖附近网格尺寸/ 远离裂尖网格尺寸	靠近裂尖某点位移 δ / mm
1/1	1.86
1/2	1.76
1/4	1.71
1/5	1.73



(a) 无初始裂纹



(b) 存在初始裂纹

图 3 试件变形图

Fig. 3 The deformation of specimen

表 2 不同裂纹深度下的试件位移数据

Tab. 2 The critical displacement of the specimen with different deep crack

a/L	P_c / N	δ_c / mm	
		实验值 ^[3]	计算值
0.2	3 700	5.30	6.00
0.3	1 850	3.60	3.36
0.4	1 600	3.40	2.97
0.5	1 000	2.72	2.10
0.6	600	2.17	1.58
0.7	500	2.03	1.48
0.8	300	1.65	1.17

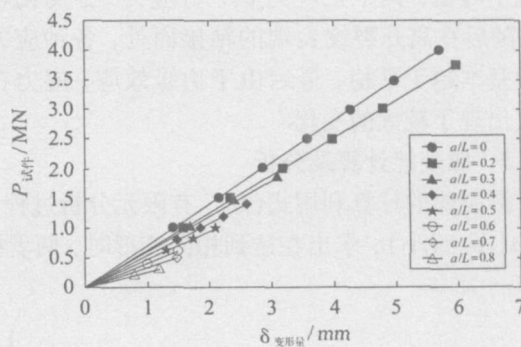


图 4 试件的载荷—位移曲线

Fig. 4 The variation of tensile load with the displacement of specimen

2.2.2 界面应力分析

如图 3(a)所示, 在无初始裂纹、载荷为 1.5 kN 情况下, 橡胶在 $x = 0$ 自由面沿 y 方向的正应力 S_x 、 S_y 、 S_z 、剪应力 S_{xy} 变化曲线如图 5 所示(边缘存在很小的剪应力 S_{yz} 、 S_{xz} , 试件中间 S_{yz} 、 S_{xz} 值基本为 0)。从图 5 可以看出, 橡胶片与钢粘接界面 $y = 3 \text{mm}$ 处比 $y = 9 \text{mm}$ 处的粘接界面所受的应力大, 且在 $y = 3 \text{mm}$ 界面处受到了 y 方向的拉应力, 而在 $y = 9 \text{mm}$ 处受到的是 y 方向的压应力, 所以图 3(a)中下界面比上界面更容易启裂. 在图 3(a)所示的下界面处, 沿 x 方向的应力曲线如图 6 所示(边缘存在很小

的剪应力 S_{yz} 、 S_{xz} ，试件中间 S_{yz} 、 S_{xz} 值基本为 0)。从图中可以看出橡胶片 $x = 0$ 处受到的应力最大。综合上面两图，可知橡胶与钢粘接的下界面 $x = 0$ 处是薄弱部位，当试件受到拉伸载荷时，该处是最先启裂的。

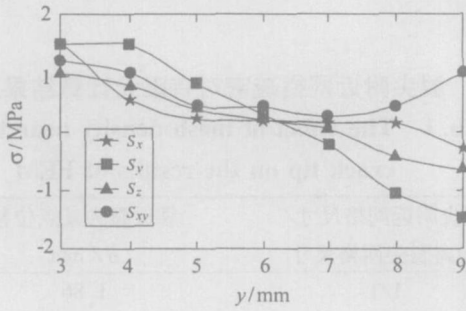


图 5 橡胶自由面 ($x = 0$) 沿 y 向应力曲线
Fig. 5 The change of stresses along y -direction at free surface ($x = 0$)

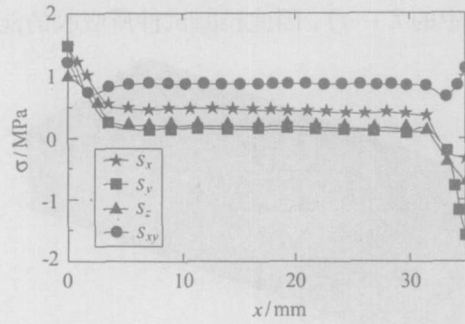


图 6 橡胶钢粘接界面 ($y = 3$) 沿 x 向的应力曲线
Fig. 6 The change of stresses along x -direction at bonded interface ($y = 3$)

橡胶钢存在初始界面裂纹时，界面沿 x 方向的橡胶正应力 S_x 、 S_y 、 S_z 、剪应力 S_{xy} 变化曲线如图 7 所示 (边缘存在很小的剪应力 S_{yz} 、 S_{xz} ，试件中间 S_{yz} 、 S_{xz} 值基本为 0)。图 7 可以看出，橡胶在离裂纹尖端稍远 ($x < 3$ mm) 处各种应力基本趋于 0 这是由于裂纹的存在， $x < 7$ mm 的这段界面相当于自由面。随着 x 的增大，剪应力 S_{xy} 逐渐增大，而 x 、 y 、 z 3 个方向正应力 S_x 、 S_y 、 S_z 则出现了负值。在裂纹尖端 ($x = 7$ mm) 附近，因为存在应力集中，各种应力都出现了峰值，其中正应力 S_x 、剪应力 S_{xy} 变化较剧烈。随后在离开裂纹尖端的粘接面处，各种应力的变化基本趋于平稳，最后由于边缘效应，应力在边缘处出现了较大的变化。

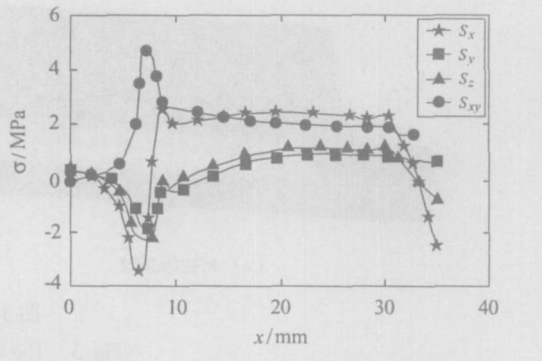


图 7 界面沿 x 向橡胶应力曲线
(裂纹深度 0.2 $P = 3$ kN)

Fig 7 The variation of stresses along x -direction at interface ($a/L = 0.2$ $P = 3$ kN)

2.2.3 撕裂能计算及分析

撕裂能的计算利用式 (1)，有限元分析过程是针对 2 个不同裂纹深度的试件，即裂纹分别为 a 和 $a + \Delta a$ (Δa 很小)，求出在达到相同变形时，两者试件内部应变能之差，单位面积应变能的变化即为撕裂能 G ：

$$G \approx \frac{1}{B} \frac{|W_{a+\Delta a} - W_a|}{\Delta a} \tag{3}$$

(3) 式中应变能 W 可以由 Ansys 分析软件计算结果直接给出。

图 8 给出了施加载荷为 200、500、800 以及 1000 N 时的撕裂能随裂纹深度的变化关系。图中可以看出从小裂纹过渡到大裂纹时，撕裂能与裂纹深度呈明显的非线性关系，而且出现了 2 个极值，分别位于裂纹深度 0.2 和 0.4 附近。撕裂能随着裂纹深度变化先增大再减小最后急剧增加。载荷大时，变化比较剧烈，随着载荷的减小，撕裂能变化缓慢且极值也变的不明显。这说明了当裂纹离开边缘开始扩展时，在橡胶和钢界面处所产生的应力集中影响是变化的。此外，裂缝相对深度为 0.4、0.5、0.7 时的撕裂能随拉伸载荷变化关系如图 9 所示，从图中可以看出，随着拉伸载荷的增加，撕裂能增加，载荷较小时增加缓慢，随着载荷的增大，撕裂能增加的幅度逐渐变大。

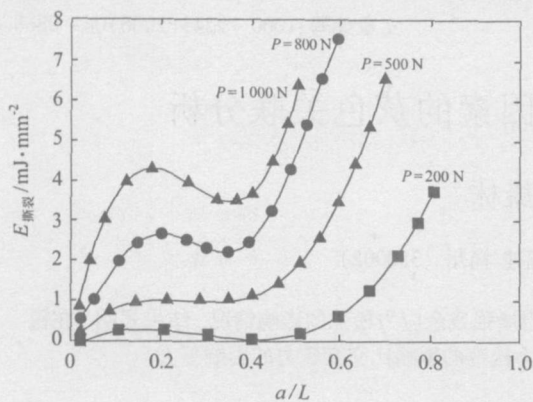


图 8 撕裂能随裂缝深度的变化关系图

Fig. 8 The variation of tearing energy with the relative depth of crack

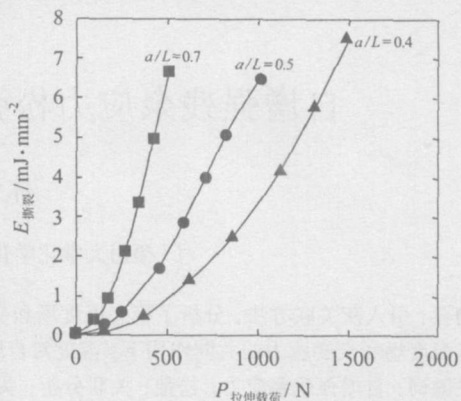


图 9 撕裂能随拉伸载荷的变化关系图

Fig. 9 The variation of tearing energy with the tensile load

参考文献:

- [1] Yeoh O H. Analysis of deformation and fracture of 'pure shear' rubber test piece [J]. *Plastic, Rubber and Composites*, 2001, 30(8): 389-397.
- [2] Chai H. Interfacial mixed-mode fracture of adhesive bonds undergoing large deformation [J]. *Solid and Structure*, 2003 (40): 6023-6042.
- [3] 杨晓翔, 张永弘, 曲宝. 橡胶钢双材料界面断裂韧性的实验测定 [J]. *大庆石油学院学报*, 1998, 22(4): 63-65.
- [4] Pilaparti R M V, Pontula G. Maximum tearing energy computation for 3D rubber fracture [J]. *Engng Fracture Mech*, 1994, 49(2): 309-316.
- [5] Mas W V, Fatemi A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(9): 949-961.
- [6] 杨晓翔. 非线性橡胶材料的有限单元法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [7] Pilaparti R M V. Finite element analysis of interface cracks in rubber materials [J]. *Engng Fracture Mech*, 1994, 47(3): 309-316.
- [8] 傅政. 橡胶材料性能与设计应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

(接第 862 页)

参考文献:

- [1] Bendsoe M P, Kuchukh i N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 1988, 71: 197-224.
- [2] Querin O M, Young V, Steven G P, et al. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 189: 559-573.
- [3] 荣见华, 姜节胜, 胡德文, 等. 基于应力及其灵敏度的结构拓扑渐进优化方法 [J]. *力学学报*, 2003, 35(5): 585-591.
- [4] 程耿东, 张东旭. 受应力约束的平面弹性体的拓扑优化 [J]. *大连理工大学学报*, 1995, 35(1): 1-9.
- [5] 崔海涛, 桑韧, 温卫东. 基于遗传算法的连续结构拓扑优化分析 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(2): 159-163.
- [6] 隋允康, 杨德庆, 王备. 多工况应力和位移约束下连续体结构拓扑优化 [J]. *力学学报*, 2000, 32(2): 171-179.
- [7] 杨德庆, 刘正兴, 隋允康. 连续体结构拓扑优化设计的 ICM 方法 [J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(6): 734-736.