

三元乙丙橡胶薄膜黏接界面温度 相关性力学性能

贾 登, 郑 健, 陈 雄, 余家泉
(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 采用双悬臂夹层梁(DCSB)试件对三元乙丙橡胶(EPDM)薄膜黏接界面 I 型断裂的温度相关性进行了研究;采用线弹性断裂力学(LEFM)方法获取了黏接界面断裂能,将其与单轴拉伸所得内聚强度作为双线性内聚力模型(CZM)参数,对不同温度条件下双悬臂夹层梁试件的 I 型断裂行为进行了数值仿真.结果表明:仿真与实验曲线偏差较大,偏差出现的原因主要是未经修正的线弹性断裂力学方法所求断裂能存在较大的误差,需对其进行修正.调整模型参数使仿真曲线与实验曲线重合,获取了黏接界面的准确力学性能参数,采用此参数得到的仿真结果与实验结果具有较高的吻合度,证明了模型的可适用性.

关 键 词: 三元乙丙橡胶; 黏接; 温度相关性; I 型断裂; 双悬臂夹层梁试件; 断裂能

中图分类号: V255⁺.3

文献标志码: A

Temperature dependent adhesive interfacial mechanical properties of EPDM film

JIA Deng, ZHENG Jian, CHEN Xiong, YU Jia-quan

(School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The double cantilever sandwich beam (DCSB) specimen was used to study the temperature-dependent mode I fracture behavior of the interface between the ethylene propylene diene monomer (EPDM) films, the mode I fracture energy was determined by the linear elastic fracture mechanics (LEFM) method, then used simultaneously with the cohesive strength, which was obtained by uniaxial tension test as the parameter of a bilinear cohesive zone model (CZM) to simulate the fracture behavior of the DCSB specimen under different temperatures. Results showed that, there existed a large deviation between the test and simulation results, because the fracture energy determined by the uncorrected LEFM was not accurate. At last, by the means of adjusting the parameters of the CZM to make the simulation curves match the test curves better, the accurate mechanical property parameters were obtained, and the simulation result using these accurate properties matched well with test curve, proving the usability of this model to the fracture of the interface.

Key words: ethylene propylene diene monomer (EPDM); adhesive;
temperature dependence; mode I fracture;
double cantilever sandwich beam specimen; fracture energy

收稿日期: 2015-02-28

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20140772)

作者简介: 贾登(1990—),男,重庆巫山人,硕士生,研究方向为复合材料的黏接断裂性能.

三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)具有密度低、耐热氧化能力和低温性能优秀、且与多种推进剂和复合材料具有优良的相容性等优点^[1],因此广泛应用于自由装填式固体火箭发动机中装药的包覆;固体推进剂的常用包覆工艺为在黏接剂的辅助下,将薄膜状包覆层采用多层缠绕的方式包覆药柱^[2]。三元乙丙橡胶最大的缺点在于由于其表面呈弱极性,其自黏与互黏性能极差^[3],黏接界面极易出现失效,导致火箭发动机结构完整性破坏,因此三元乙丙橡胶黏接界面性能成为影响固体火箭发动机性能的关键因素之一。

目前对三元乙丙橡胶黏接性能的研究,集中于研究影响其黏接性能的因素,比如李辉等^[4]在黏接过程中采用了不同的黏接工艺,发现合适的黏接工艺能够稳定地提高三元乙丙橡胶的黏接性能;滕雅娣等^[5]研究发现在胶黏剂中加入适量的异氰酸酯后,三元乙丙橡胶与金属的黏接强度明显提高了;黄兴等^[6]对三元乙丙橡胶第三单体、乙烯含量和门尼黏度对其与金属黏接性能的影响进行了研究。

关于橡胶黏接界面断裂的研究,杨晓翔等^[7]和王智宇等^[8]分别研究了橡胶-钢黏接界面的断裂韧性,但是这都只局限于室温下的研究;众所周知,黏接强度都具有温度相关性^[9];已有研究表明,一般情况下,随着温度升高,结构黏接剂的黏接强度表现出下降的趋势^[10]。

固体火箭发动机实际使用及贮存温度范围较广;要保证高可靠性,必须保证在任何环境条件下,其结构完整性不会被破坏,因此研究温度对三元乙丙橡胶薄膜黏接界面性能的影响对于黏接界面以及固体火箭发动机的设计都非常重要。

本文对三元乙丙橡胶薄膜黏接界面 I 型断裂的温度相关性进行了研究,采用线弹性断裂力学方法获取了界面的断裂能并使用双线性内聚力模型对界面断裂过程进行了数值仿真,通过调整模型参数使仿真与实验曲线重合的方法,获得了相对比较准确的界面力学参数。

1 实验

1.1 试件制备

裂纹体的断裂形式具有 3 种形式: I 型、II 型和 III 型断裂。I 型断裂中外载荷垂直于裂纹扩展面,上下裂纹面沿外载荷方向张开,裂纹沿裂纹面向前扩展。双悬臂梁(double cantilever beam,

DCB)试件端部受外部拉力时,其断裂形式即为 I 型断裂,因此广泛应用于 I 型断裂能获取实验。对于本文的三元乙丙橡胶薄膜来说,其刚度较小,如制备成 DCB 试件则会出现弯曲而无法实验,因此本文根据 ASTM(American Society for Testing and Materials) D3433^[11]设计了如图 1 所示双悬臂夹层梁(double cantilever sandwich beam,DCSB)试件,试件长为 150 mm,宽为 10 mm,铝板的作用在于提高试件的刚度,图中 a_0 是预制裂纹长度。

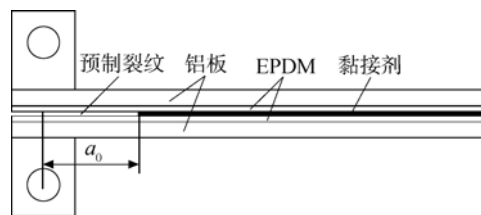


图 1 双悬臂夹层梁试件

Fig. 1 Schematic diagram of the DCSB specimen

将 0.8 mm 厚的三元乙丙橡胶薄膜和 5 mm 厚的铝板裁剪成 150 mm×10 mm 的长条状,对其黏接面进行表面处理清洗之后将三元乙丙橡胶薄膜用瞬干胶黏接在安装了加载块的铝板上作为双悬臂夹层梁试件的悬臂,加载块用于将试件装配到实验机上;将聚氨酯黏接剂均与涂抹于试件臂上三元乙丙橡胶薄膜黏接面上,为保证黏接层的厚度保持恒定,黏接试件的两悬臂时在试件两端放置几粒直径很小的钢珠,并在安装有加载块的悬臂一端放置聚四氟乙烯薄膜,目的是在上下两层包覆层薄膜之间预制 30 mm 长的预制裂纹,贴合并施加一定压力。

黏接件的另外一个断裂参数——界面内聚强度与界面断裂强度相等^[12],因此可以采用单轴拉伸实验获取,本文依据标准 ASTM D2095 设计了如图 2 所示单轴拉伸试件,试件采用铝合金加工,长为 70 mm,宽为 25 mm,厚为 10 mm。

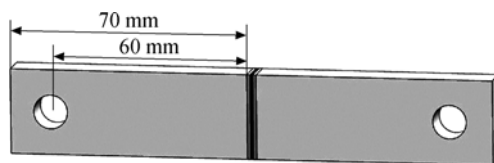


图 2 单轴拉伸实验试件

Fig. 2 Uniaxial tension test specimen

单轴拉伸实验试件与 DCSB 试件同批次制备,以保证界面性能一致。试件黏接完成之后将其置于恒温箱中固化 48 h,固化温度为 50 ℃。试件

固化完成之后,去除试件侧面多余的黏接剂。

1.2 实验方法

实验在条件为 25℃、相对湿度为 42% 的实验室内进行,采用电子万能材料实验机以 1mm/min 的恒定加载速率在不同实验温度下加载制备的 DCSB 试件,根据固体火箭发动机实际贮存工作温度范围内选取,选取实验温度点为 -40, -20, 0, 25, 50℃。

温度为 25℃ 条件下的实验直接进行,其他温度下的实验,将试件放置在高低温试验箱中加热保温 2h,保证整个试件达到预定温度之后在实验箱内进行 I 型断裂实验。

实验之前在试件侧面贴上一条有刻度的光栅,用以测量实验过程中裂纹长度,常温下的实验过程中用 CCD(charge coupled device)观察并记录裂纹尖端位置,实验机与图像采集系统同时启动,就可以求得实时裂纹长度。相关试件及设备如图 3 所示。

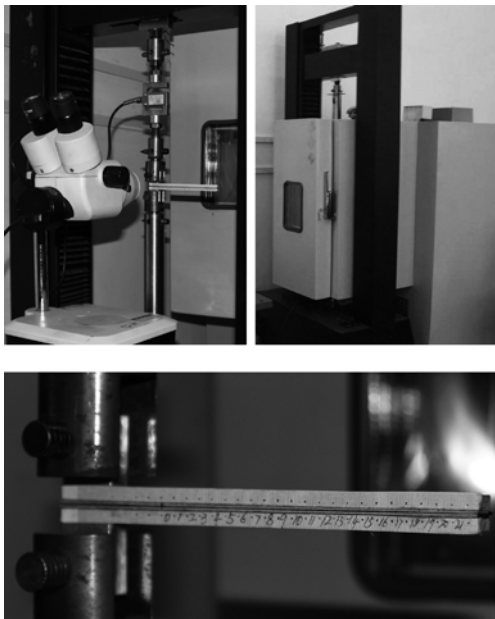


图 3 试件、实验机、高低温试验箱和 CCD

Fig. 3 Specimen, testing machine, high and low temperature test box and CCD

1.3 II 型断裂能及内聚强度获取方法

根据线弹性断裂力学中的能量平衡理论,裂纹启裂所需能量来自于外加载荷做功和试件本身的弹性能,当启裂所需能量与获取能量相等时,裂纹会处于临界状态,此时的能量释放率就称为临界断裂能,也称为断裂韧性。线弹性断裂力学中计

算断裂能的是 Irwin-Kies 公式^[13]

$$G_I = \frac{1}{2B} P^2 \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1)$$

其中 B 为试件宽度, P 是载荷, a 是裂纹长度, C 是试件柔度,定义为 $C = \delta / P$, δ 是加载点位移。

双悬臂梁试件可以看作是材料力学中两个对称的悬臂梁,因此双悬臂梁试件加载点张开位移即是悬臂梁挠度的 2 倍

$$\delta = \frac{2Pa^3}{3EI} \quad (2)$$

其中 E 是弹性模量, I 是试件截面惯矩,根据柔度的定义可推导出柔度计算公式

$$C = \frac{2a^3}{3EI} \quad (3)$$

将其代入 Irwin-Kies 公式并消去 E 和 I 可得断裂能计算公式

$$G_I = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (4)$$

黏接界面内聚强度为^[12]

$$\sigma = \frac{P_c}{A} \quad (5)$$

其中 A 是黏接面积, P_c 是单轴拉伸试件拉伸断裂的最大载荷。

2 实验结果与分析

由于高低温试验箱的尺寸限制,无法采用 CCD 观察试件裂纹扩展情况,因此只获取了高低温实验的载荷-位移曲线,实验过程中出现的现象无法用图像采集系统进行记录,不能获取实时裂纹长度。

2.1 载荷-位移曲线

不同温度下单轴拉伸实验和 DCSB 实验所得载荷-位移曲线分别如图 4 和图 5 所示,图 5(f)为 DCSB 实验各个温度(t)下的平均载荷-位移曲线,

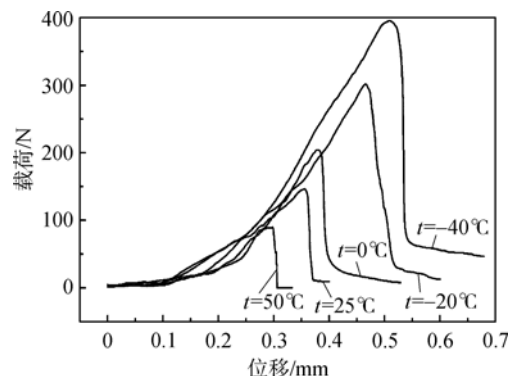


图 4 单轴拉伸实验位移-载荷曲线

Fig. 4 Displacement-load curves of uniaxial tension test

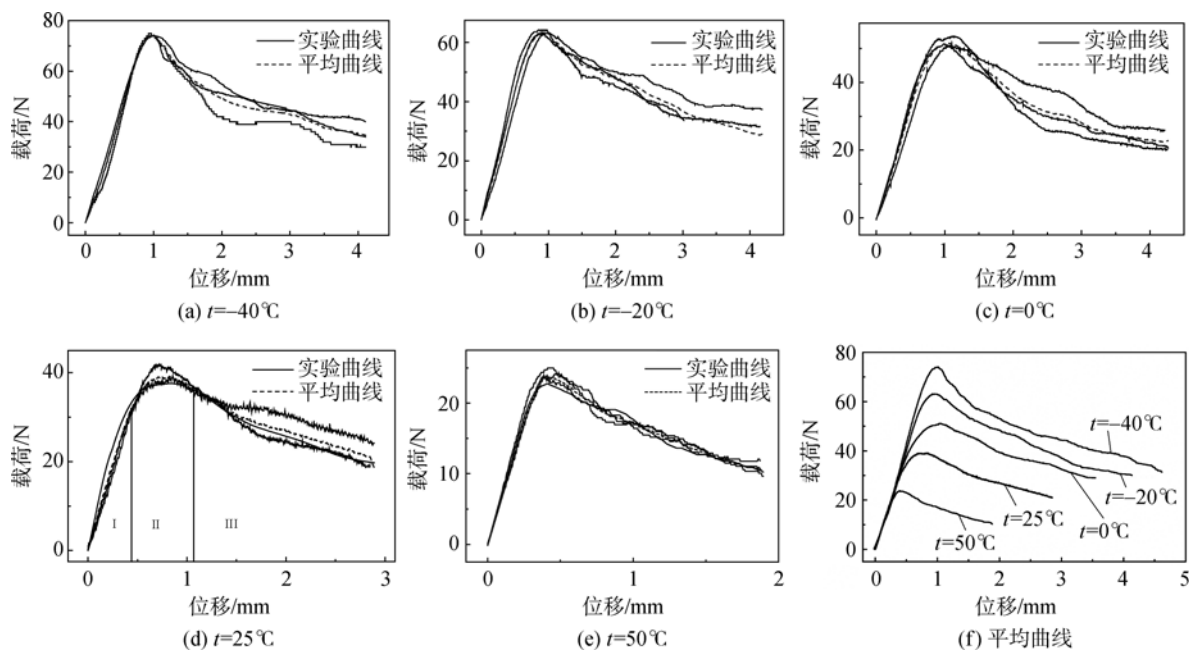


图 5 不同温度下 DCSB 实验位移-载荷曲线

Fig. 5 Displacement-load curves of DCSB test at different temperatures

观察图 4 和图 5(f)可知 DCSB 实验和单轴拉伸实验曲线具有非常强的温度依赖性,也即是表明三元乙丙橡胶薄膜黏接界面断裂参数是温度相关的。

根据 CCD 观察到的 25℃ 温度下实验中的现象,可以将载荷-位移曲线分为 3 个阶段如图 5(d)所示:第 1 阶段,线性加载段,黏接层没有明显变化,促使裂纹启裂的能量不断聚集;第 2 阶段,开始时裂纹尖端附近黏接层出现损伤或者界面出现微小损伤并不断积累,曲线开始出现非线性,此阶段结束时损伤扩张到最大,尖端处黏接断裂或者出现裂纹尖端附近界面脱黏,说明裂纹启裂;第 3 阶段为裂纹扩展阶段。

研究分析发现,裂纹的启裂并不是出现在最大载荷点处,分析原因可能是因为第 2 阶段开始时裂纹尖端出现了损伤,随着损伤增大,承载能力降低,所以在第 2 阶段内的曲线斜率不断减小,而当载荷达到最大值时,试件所聚集的能量还不够裂纹启裂所需,因此裂纹的启裂会出现在最大载荷之后。

如图 6 所示为界面破坏之后的界面形貌,由图可知,试件的其中一个悬臂上的三元乙丙橡胶薄膜表面无任何残留黏接剂,黏接界面的失效没有出现黏接层的内聚破坏,完全为界面脱黏;其他所有试件(包括单轴拉伸实验)破坏形式同为界面脱黏,界面形貌与图 6 相同,这表明在整个实验温

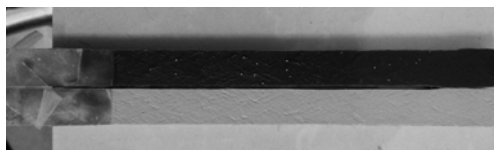


图 6 界面破坏之后的界面形貌

Fig. 6 Morphology of the debonding interface

度范围内,三元乙丙橡胶薄膜黏接强度小于黏接层的内聚强度。

2.2 I 型断裂参数

在断裂力学中,裂纹的启裂通过 3 种方式进行了定义^[14]:①开始出现非线性点(non-linear initiation point),记为 NL,即是线性加载段的结束点;②观察到裂纹开始向前扩展的点,记为 VIS;③其柔度比线性段曲线柔度大 5% 的直线与位移-载荷曲线的交点,这个交点与最大载荷点中首先到达的点为所求点,记为 MAX。

首先在位移-载荷曲线上标记出裂纹的启裂点,然后计算断裂能,由于实验是在高低温试验箱中进行的,因此无法获取得到 VIS 点。采用式(4)计算所得不同温度下的 DCSB 试件 I 型断裂能如图 7 所示。从图中可以观察到,NL 点断裂能比 MAX 点断裂能要小;随着温度升高,断裂能降低。

由式(6)计算所得界面内聚强度如表 1 所示,由表中数据可知界面内聚强度同断裂能一样,随温度升高而降低。

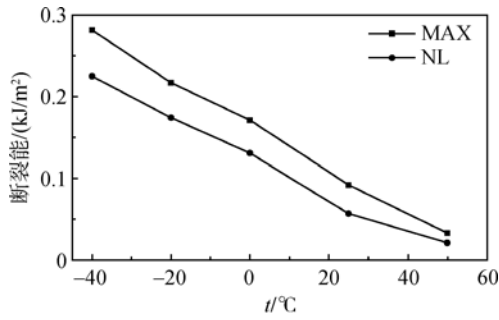


图 7 不同温度下的断裂能

Fig. 7 Fracture energy at different temperatures

表 1 不同温度下的内聚强度

Table 1 Cohesive strength with different temperatures

温度/°C	-40	-20	0	25	50
内聚强度/MPa	1.58	1.208	0.801	0.548	0.36

3 数值模拟

3.1 内聚力模型

内聚力模型 (cohesive zone model, CZM) 最早是由 Dugdale 等^[15]和 Barenblatt^[16]提出来的, 经过许多年的发展, 现在广泛应用于断裂问题的求解. 内聚力模型假设损伤发生在裂纹尖端附近一个叫做内聚区的细长区域内, 如图 8 所示, 其本质, 从微观上来讲, 就是内聚区内分子间的力与分子间距离的本构关系, 在宏观上表现为内聚力与裂纹面张开位移之间的关系, 称之为内聚法则, 用于描述内聚区内材料的力学性质. 研究者们提出了各种不同的内聚力模型来描述材料的力学性质, 其中双线性内聚力模型是最常用的模型, 如图 8 所示.

图 8 中 T 是内聚力; δ 是裂纹面张开位移; T_c

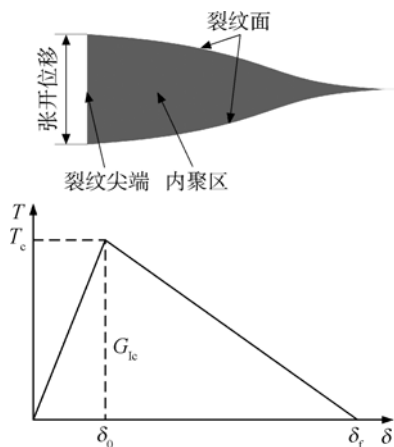


图 8 内聚力模型和双线性内聚法则

Fig. 8 Cohesive zone model and bilinear cohesive law

是最大内聚力, 称为内聚强度; δ_0 是内聚力最大时的裂纹面张开位移, 称为临界位移; δ_f 是裂纹面张开的最大位移, 称为失效位移; 内聚法则曲线下的面积 G_{ic} 是裂纹面从开始张开到失效所消耗的能量, 即是断裂能.

当外加载荷增加, 裂纹面张开位移增大, 内聚区内材料是线弹性的, 内聚力呈线性增加, 当内聚力达到内聚强度之后, 材料出现线性损伤, 内聚力又呈线性减小至零.

3.2 有限元模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 为三元乙丙橡胶薄膜与铝板所制双悬臂夹层梁试件建立二维模型并划分网格, 如图 9 所示.

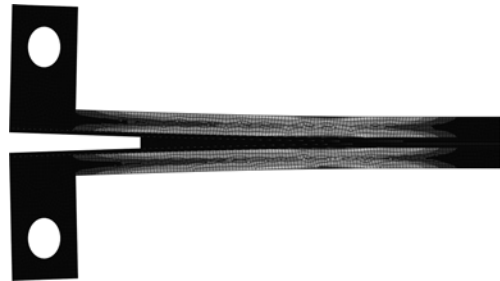


图 9 双悬臂夹层梁试件有限元模型

Fig. 9 Finite element model of the DCSB specimen

模型具体尺寸与实验所用试件完全相同, 铝板与三元乙丙橡胶薄膜、三元乙丙橡胶薄膜和黏接层之间采用绑定约束, 下层铝板左下角固支, 上层铝板左上角施加垂直向上载荷; 铝板和三元乙丙橡胶薄膜网格设为 4 节点的四边形实体单元, 黏接层网格划分为 4 节点的 COH2D4 内聚单元, 在垂直方向上只设置一层. 铝板弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.33, 三元乙丙橡胶薄膜黏超弹本构参数如表 2 所示, 其中 C_{01} , C_{02} , C_{10} , C_{20} , C_{11} 为确定材料超弹部分的相关参数, D_1 和 D_2 为确定材料黏弹部分的相关参数. 黏接层参数为前述已获断裂能和内聚强度.

表 2 三元乙丙橡胶薄膜本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of EPDM

参数	数值	参数	数值
C_{10}	24.827	C_{02}	-69.358
C_{01}	-20.18	D_1	0
C_{20}	-16.746	D_2	0
C_{11}	62.455		

3.3 仿真结果

以前面已获得的内聚参数对所建双悬臂夹层梁试件模型进行数值仿真, 所得结果如图 10 所示.

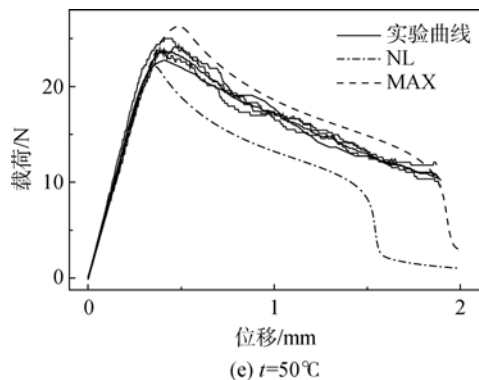
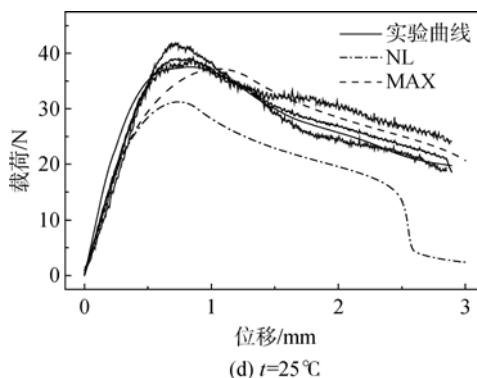
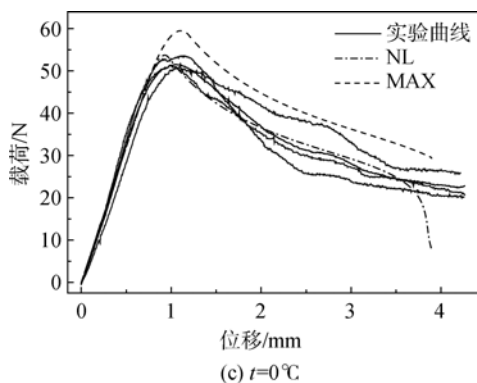
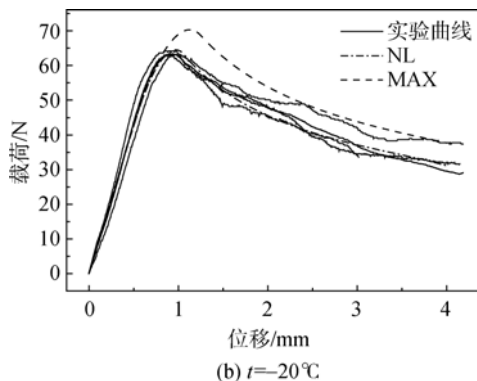
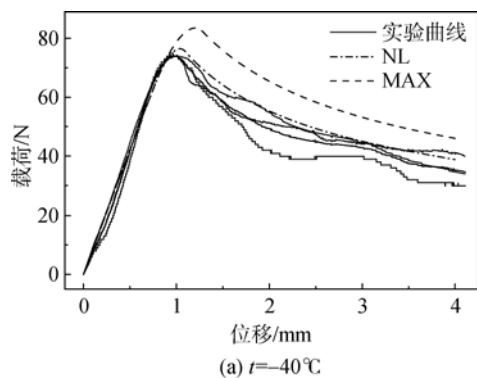


图 10 仿真结果与实验结果对比

Fig. 10 Comparison of the simulation and test curves

从图 10 中仿真结果可以观察到, 实验曲线与仿真曲线形状完全相同, 但是存在较大偏差, 这说明计算所得断裂能和内聚强度是不准确的. 分析其原因主要有

1) 双悬臂夹层梁加载点张开位移计算式(2)必须是在不考虑弯曲剪切效应的前提下才能成立, 而在实际的双悬臂夹层梁试件中是存在剪切效应的; 如图 11 所示为根据 25°C 温度下的实验数据所得不同裂纹下由柔度定义式所得真实柔度值与式(3)计算所得柔度值, 从图中可观察, 计算值 C_c 与真实值 C_r 变化趋势相同但是偏差较大, 最小偏差为 64.7%, 最大偏差为 89%, 表明本文的双悬臂夹层梁试件在 I 型断裂实验过程中的变形并不是理想的.

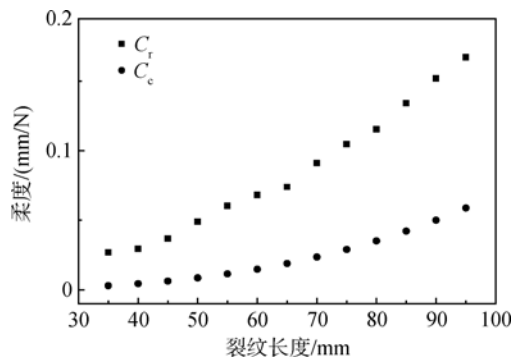


图 11 25°C 温度下不同裂纹长度下柔度值

Fig. 11 Compliance of the specimens at different crack lengths at 25°C

2) 除了剪切效应, 在试件变形过程中的大位移效应、加载块^[17]和裂纹尖端旋转^[18]对试件也存在比较大的影响, 文献[18]对这些影响因素进行了修正

$$G_1 = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \cdot \frac{F}{N} \quad (6)$$

其中 Δ , F 和 N 分别是裂纹长度、大位移效应和加载块修正因子,具体算法详见文献[17],根据这种方法计算得 25℃ 下的断裂能为 0.085 kJ/m².

3) 启裂点的选择,根据 25℃ 温度下实验中观察到的现象可知, NL 点和 MAX 点与观察到的启裂点不同,因此导致断裂能的计算值不同.

综合上述原因可知根据线弹性断裂力学计算所得断裂能与界面真实力学性能有一定差距,但还是具有一定参考意义.

调整仿真模型中的模型参数断裂能和内聚强度的数值继续仿真并比较两曲线,如存在偏差则重复此步骤,直到仿真曲线与实验曲线尽可能重合,最终得到的仿真曲线与实验曲线如图 12 所示,经计算,所有温度下的仿真曲线与实验曲线误差都在 5% 以内,因此认为此时模型参数为准确的三元乙丙橡胶薄膜黏接界面力学性能参数,其数值如表 3 所示.

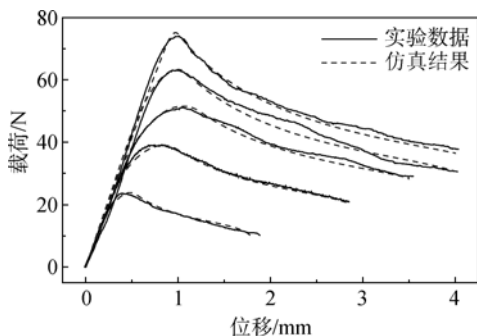


图 12 调整参数之后的仿真曲线

Fig. 12 Simulation results with adjusted parameters

表 3 断裂能和内聚强度

Table 3 Fracture energy and cohesive strength

参数	温度/℃				
	-40	-20	0	25	50
断裂能/(kJ/m ²)	0.208	0.172	0.139	0.084	0.03
内聚强度/MPa	1.68	1.02	0.64	0.44	0.3

由表 3 可知,经过修正过的断裂能计算式(式(6))与通过仿真获得的断裂能非常相近,这说明经过修正的断裂力学方法可以获得比较准确的三元乙丙橡胶薄膜黏接界面 I 型断裂能.

如图 13 所示为仿真与 25℃ 实验中观察到的裂纹长度随时间变化规律的比较曲线. 由图可知实验值与仿真结果后半段吻合程度较好,前段出现一定的偏差,分析其原因主要有两点:一是裂纹启裂后裂纹的扩展是非稳态的,如图 5(d)中其中

一条曲线的下降段开始时较陡,之后变得平缓;二是因为黏接剂是黑色的,与裂纹扩展时裂缝颜色相近,导致无法定位裂纹尖端的准确位置. 比较实验与仿真数据可知最大偏差为 12%,表明该模型能够比较准确地模拟三元乙丙橡胶黏接界面的裂纹扩展,进一步证明了模型的准确性.

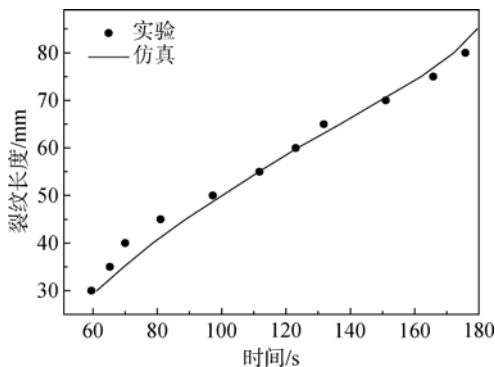


图 13 裂纹长度随时间变化关系

Fig. 13 Curves of crack length vs. time

4 结 论

本文采用双悬臂夹层梁试件对三元乙丙橡胶薄膜黏接界面断裂性能的温度相关性进行了研究,并对界面的断裂进行了数值仿真,得到以下结论:

在固体火箭发动机使用及贮存温度范围内,三元乙丙橡胶薄膜黏接界面力学性能表现出明显的温度相关性,随着温度的升高,界面力学性能降低.

在整个实验温度范围内,试件界面的破坏形式表现为界面脱黏,并没有出现黏接层的内聚破坏,说明黏接层的内聚强度要大于三元乙丙橡胶薄膜与黏接层之间的黏接强度.

未经修正过的线弹性断裂力学方法计算所得断裂能与准确值具有一定的偏差,但是随温度变化规律是相同的,具有一定的参考价值;对线弹性断裂力学方法进行修正,其准确性得到了显著性提高.

通过比较仿真结果与实验数据,可知双线性内聚力模型可以用于三元乙丙橡胶薄膜黏接界面温度相关断裂的数值仿真.

参考文献:

- [1] 汪建丽,王红丽,熊治荣,等. 三元乙丙橡胶绝热层在固体火箭发动机中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(2): 12-14.

- WANG Jianli, WANG Hongli, XIONG Zhirong, et al. EPDM rubber insulation applied in solid rocket motor[J]. Aerospace Materials and Technology, 2009, 39(2): 12-14. (in Chinese)
- [2] 詹惠安, 郑邦勇, 赵文忠, 等. 固体推进剂包覆层的研究进展[J]. 舰船防化, 2009(3): 1-5.
- ZHAN Huian, ZHENG Hanyong, ZHAO Wenzhong, et al. Research progress on inhibitor of solid propellant[J]. Chemical Defence on Ships, 2009(3): 1-5. (in Chinese)
- [3] 何永祝, 吕璐, 罗国勤. 提高 EPDM 绝热层生熟界面粘接性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2010, 19(11): 14-17.
- HE Yongzhu, LÜ Lu, LUO Guoqin. Study on improving bonding performance between uncured EPDM insulation and vulcanized EPDM insulation [J]. China Adhesives, 2010, 19(11): 14-17. (in Chinese)
- [4] 李辉, 邓德凤. 三元乙丙橡胶粘接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2011(3): 36-38.
- LI Hui, DENG Defeng. Study on bonding process of EPDM [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(3): 36-38. (in Chinese)
- [5] 滕雅娣, 张宝砚, 曲晓晔, 等. 异氰酸酯对 EPDM 橡胶与金属粘接性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(3): 423-426.
- TENG Yadi, ZHANG Baoyan, QU Xiaohua, et al. Effect of isocyanate on adhesion of EPDM rubber to metal[J]. Materials Science and Process, 2008, 16(3): 423-426. (in Chinese)
- [6] 黄兴, 王展, 谢小琴, 等. 浅析三元乙丙橡胶生胶选择对其粘接性的影响[J]. 中国橡胶, 2010, 26(22): 36-38.
- HUANG Xing, WANG Zhan, XIE Xiaoqin, et al. Analysis of selected EPDM raw rubber influence on its adhesion properties[J]. China Rubber, 2010, 26(22): 36-38. (in Chinese)
- [7] 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]. 大庆石油大学学报, 1998, 22(4): 63-65.
- YANG Xiaoxiang, ZHANG Yonghong, QU Bao. Experimental determination of the fracture toughness on interface crack of rubber-steel bimaterial[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1998, 22(4): 63-65. (in Chinese)
- [8] 王智宇, 王安稳. 橡胶-钢粘接界面断裂韧性实验研究[J]. 固体力学学报, 2010, 31(S1): 204-208.
- WANG Zhiyu, WANG Anwen. Experimental study on fracture toughness of the interface between rubber and steel[J]. Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(S1): 204-208. (in Chinese)
- [9] Banea M, Silva L, Campilho R. Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: experimental and numerical study[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31(5): 273-279.
- [10] Silva L, Adams R. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19(2): 109-141.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM D3433 Standard test method for fracture strength in cleavage of adhesives in bonded metal joints I[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1999.
- [12] ZHOU Qinchun, JU Yutao, WEI Zhen, et al. Cohesive zone modeling of propellant and insulation interface debonding [J]. Journal of Adhesion, 2014, 90(3): 230-251.
- [13] Khoshnavan M, Asgari F. Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading: experimental and numerical approaches[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 39: 8-14.
- [14] Britain Standard Institute. BS7991-2001 Fracture energy G_{IC} of structure adhesives using the double cantilever beam (DBC) and tapered double cantilever beam (TDCB) specimens[S]. London: Imperial College of Science and Technology, 2001: 3-19.
- [15] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [16] Barenblatt G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [17] Williams J G. Large Displacement and end block effects in the "DCB" interlaminar test in modes I and II[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(4): 330-347.
- [18] Blackman B, Kinloch A, Paraschi M, et al. Measuring the mode I adhesive fracture energy, G_{IC} of structural adhesive joints: the results of an international round-robin[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003, 23(4): 293-305.

(编辑: 王碧琚)