

文章编号: 1006-9941(2024)02-0152-10

基于细观参数的 HTPB 推进剂粘接界面损伤演化数值模拟

裴书帝, 强洪夫, 王学仁, 王哲君

(火箭军工程大学智剑实验室, 陕西 西安 710025)

摘要: 为了研究加载角度对三组元端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂粘接界面细观失效机理的影响,使用微CT对单轴拉伸过程中的粘接界面进行原位扫描与重构,表征其损伤演化过程,然后将细观结构参数与损伤变量引入内聚力模型,得到不同加载角度下粘接界面的细观损伤演化过程。结果表明,粘接界面高氯酸铵(AP)颗粒的初始脱湿主要从靠近界面的弱界面层开始,方向沿界面的剪切分力方向。界面破坏形式与剪切角度有关,合力与界面的角度越小,裂纹越容易扩展至推进剂/衬层界面,反之裂纹扩展更容易发生在AP颗粒间。通过与CT试验结果对比,从失效模式与载荷位移关系验证了计算结果的准确性,揭示了不同加载角度下推进剂粘接界面结构的损伤演化规律。

关键词: 固体推进剂;粘接界面;多角度加载;微CT;细观形貌;损伤演化

中图分类号: TJ55;V435;O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2023231

0 引言

推进剂/衬层界面的脱粘是固体火箭发动机一种常见的失效模式,尤其在长期贮存过程中,对于发动机的不同部位,粘接界面所承载荷方向不同,需要承受拉伸、剪切或混合应力状态,对界面的力学性能提出更高要求。为弥补检测设备和理论分析的不足,国内外普遍采用有限元数值模拟的方法研究固体推进剂粘接界面的损伤演化及断裂^[1]。蒙上阳^[2]通过在推进剂/衬层以及绝热层/发动机壳体界面预设不同长度的裂纹,以裂纹的应力强度因子变化规律来分析裂纹扩展的形式以及稳定性。姜爱民^[3]基于界面粘接模型假设,以无预制裂纹的矩形粘接为研究对象,分析了粘接系统中各部分材料的性能和结构参数对粘接界面力学性能的影响,认为中间相(衬层)的模量和厚度对粘接性能有重要影响。吴丰军^[4]通过试验发现对于推进剂/衬层粘接界面,界面的模量按照衬层到推进剂的方向呈现

先增大后减小的特性。宏观条件下对粘接界面的研究主要集中在不同环境下裂纹的扩展问题,通过定义强度因子表征界面各部分的力学性能变化。但是宏观裂纹都是从细观损伤演化开始,且从已有研究可以发现,粘接界面附近材料的性能与结构变化较大,需要从细观角度考虑结构的性能变化和裂纹萌生。

在研究界面脱粘、断裂中有一种常用的损伤力学理论,称为内聚力方法^[5]。该模型由Barenblatt^[6]和Dugdale^[7]在计算材料断裂时提出,由粘接材料的具体力学性能来制定不同的断裂准则,在众多领域都有使用。在研究界面脱粘问题时,内聚力模型假设界面由一层单元组成,单元受到的力与变形位移通过不同形式的模型来定义。当拉力达到界面单元能承受的最大拉力后,单元开始产生损伤,承载力下降,位移到达界面失效位移后完全破坏,称为牵引分离法则。

近年来微细观测手段的蓬勃发展,开拓了航空航天研究领域的新视界,应用先进的有限元方法在模拟粘接界面的细观损伤演化中发挥了重要的作用。李高春^[8]通过试验表证得到的细观参数建立了粘接界面的相关数字模型,引入界面单元,对界面在拉伸载荷下的变形和破坏过程进行了研究,表明所建立的模型能够反映粘接界面在拉伸载荷下的细观损伤萌生。但目前对于粘接界面的细观损伤演化机制尚未研究清楚,

收稿日期: 2023-11-01; 修回日期: 2023-11-08

网络出版日期: 2023-12-06

作者简介: 裴书帝(1996-),男,博士研究生,主要从事固体推进剂细观损伤与失效机理研究。e-mail: 18742011305@163.com

通信联系人: 强洪夫(1965-),男,教授,主要从事固体发动机结构完整性研究。e-mail: Qiang@263.net

引用本文: 裴书帝, 强洪夫, 王学仁, 等. 基于细观参数的 HTPB 推进剂粘接界面损伤演化数值模拟[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 152-161.

PEI Shu-di, QIANG Hong-fu, WANG Xue-ren, et al. Numerical Simulation of Bonding Interface Damage Evolution of HTPB Propellant Based on Mesoscopic Parameters[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(2): 152-161.

且未考虑加载角度对其细观失效机理的影响。因此,有必要基于细观参数建立相关计算模型并与试验数据进行对比,从而预测推进剂/衬层界面的粘接失效与力学性能变化。

为了能够真实表达粘接界面在不同加载条件下的细观损伤演化过程,本研究通过微CT对推进剂/衬层界面的内部组分及损伤进行表征,基于细观参数与随机填充算法,在推进剂/衬层界面附近添加弱界面层,建立不同加载角度下的有限元模型,将细观损伤变量引入内聚力模型,得到不同加载角度下粘接界面的细观损伤演化过程。通过与试验结果对比,在失效模式与载荷位移关系上验证了计算结果的准确性,揭示了不同加载角度下推进剂粘接界面结构的损伤演化规律,为固体推进剂粘接界面细观模型的建立提供了一种新思路。

1 试验部分

1.1 试验设备

试验部分采用Skyscan 1172型微CT设备进行,如图1所示。该设备是一种多量程纳米三维X射线显

微CT,拥有独特的X射线源和探测器几何构造,可以精确螺旋重建,有效消除锥束CT伪影,生成更清晰的高精度图像。试验采用CT自带力学试验台,通过特制夹具将粘接界面样品放置于玻璃罩内,上端固定,下面有微型传感器,通过电脑软件控制其加载位移,进行原位拉伸扫描。设备通过射线源发射X射线穿透试样来获取投影图像,扫描原理如图1所示。

设备工作时,设定样品台以一定步长旋转一周,在每一个步长下都会拍摄一组曝光后的投影图像,一系列的X射线影像则组成一个数据组。利用相应的重构算法对数据进行处理就生成试件的截面信息,将一层层截面堆积起来就成了一张二维的灰度影像,重构过程如图2所示。

1.2 试验件与试验参数

为保证界面试件的力学性能与实际相符,如图3所示,试验所用装药粘接界面从标准矩形试件上切取,其中推进剂为三组元HTPB推进剂。为保证样品制备后尺寸均匀且初始损伤较少,对制备试件进行了筛选测量。首先经过游标卡尺测量,初步筛选出大小为4 mm×4 mm×3 mm的试件,保证在宏观条件下都能达

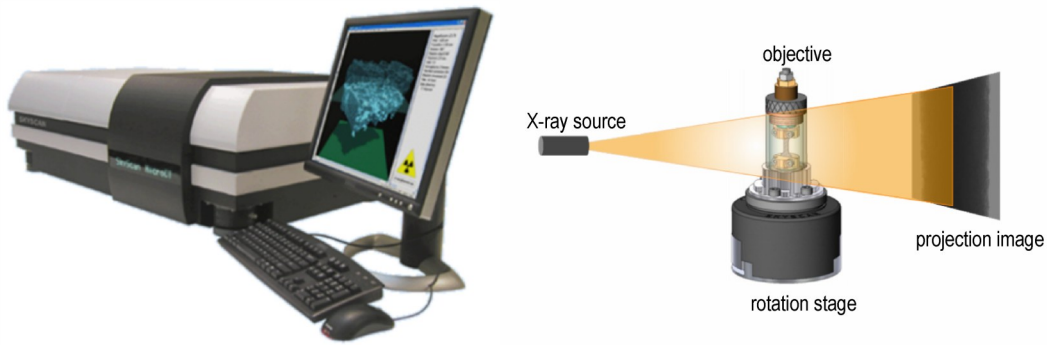


图1 Skyscan 1172型微CT检测系统及扫描原理

Fig.1 Skyscan 1172 micro-CT detection system and scanning principle

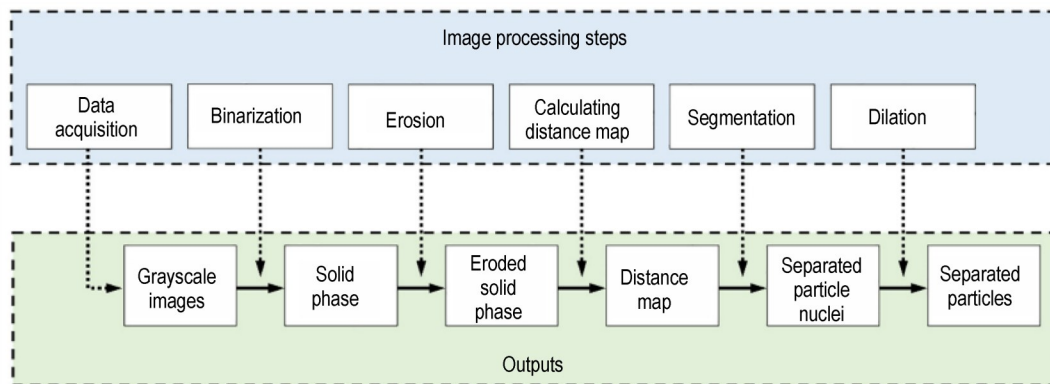


图2 图像处理步骤和输出的流程图

Fig.2 Flow chart of image processing steps and output

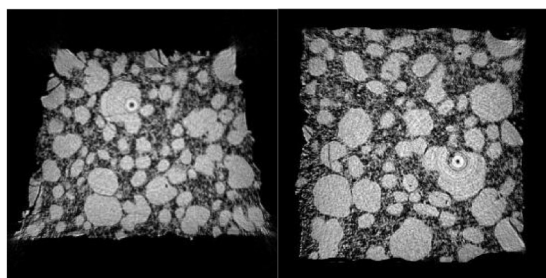


图3 标准HTPB推进剂矩形试件

Fig.3 Standard HTPB propellant rectangular specimen

到精度要求。其次将试件在微CT上进行扫描和重构处理,选取预制损伤较小的试件进行后续试验。如图4所示,左侧试件(图4a)在制备过程中边缘已有裂纹或颗粒脱湿存在,对后续试验有较大影响,需要对该类试件进行剔除,右侧试件(图4b)则较初始损伤少,符合试验要求。最终得到尺寸如图5所示的微型粘接界面试件。

试验条件为室温,通过微CT内自带微型力学试验台,通过控制应变的加载方式,把微型试件上端固定在测试台,下端通过微型电机以 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度向下拉伸。对装药粘接界面进行了单轴拉伸试验,分辨率为 $1.2 \mu\text{m}$ 。试件随测试台旋转一周即完成一次扫描。试验共扫描 $\varepsilon=0, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%$ 等6个应变状态下试样的细观结构情况,最终在推进剂/衬层界面位置发生混合破坏,如图5所示。



a. failed specimens b. qualified specimens

图4 典型试件的二维切片对比

Fig.4 Comparison of 2D sections of typical specimens

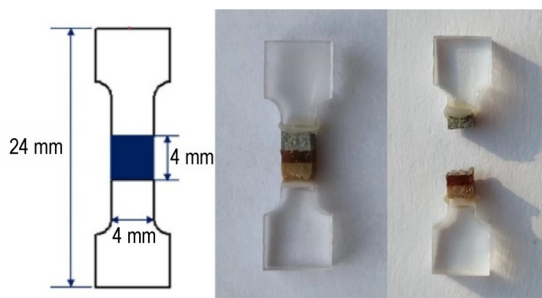


图5 微型粘接界面试件示意图与实物图

Fig.5 Micro adhesive interface interview piece

2 试验结果分析

2.1 单轴拉伸条件下推进剂粘接界面失效模式分析

通过微CT内的高清摄像机,拍摄到推进剂粘接界面在原位拉伸下的宏观破坏过程,如图6所示。在拉伸过程中,绝热层形变较小,衬层部分发生明显的颈缩现象。加载到15%应变,推进剂/衬层界面边缘位置有明显裂纹产生,继续加载,在界面边缘部分出现不同程度的开裂现象。此时颗粒/基体界面因为脱粘被损坏,但未完全断裂,表明基体还具有一定承载能力。在应变达到25%后,推进剂/衬层界面加速脱粘,界面位置发生宏观断裂。

为表征粘接界面内部的损伤演化过程,选取单轴拉伸过程中粘接界面的加载中心位置的二维重构图像,如图7所示。在界面结构拉伸过程中,衬层形变明显,损伤首先在弱界面层内AP颗粒与基体界面产生,如图7c所示,推进剂/衬层界面附近推进剂侧发生明显的局部“脱湿”现象。当应变达到20%,微裂纹已经十分明显,界面的边缘部分出现不同程度的开裂现象,推进剂内部开始出现大量损伤,孔隙汇聚生成裂纹,在

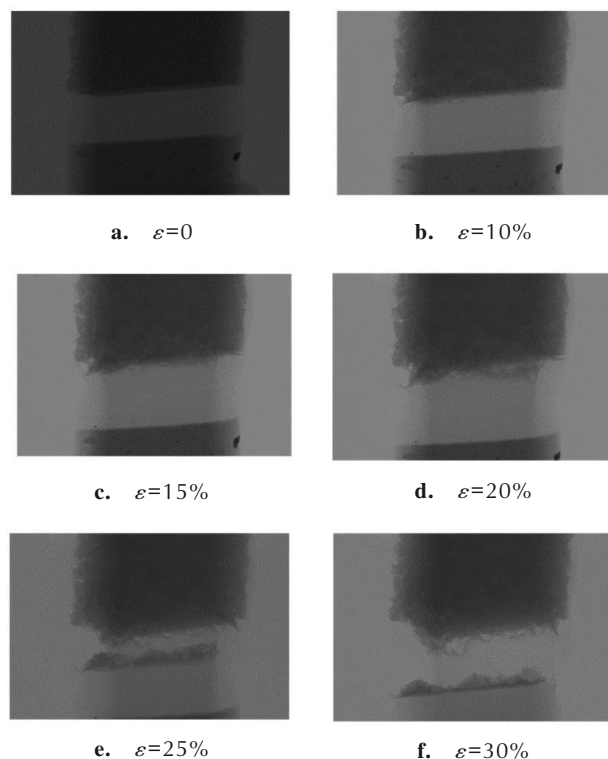


图6 不同应变下粘接界面的微CT扫描图像

Fig.6 Micro-CT images of adhesive interface under different strains

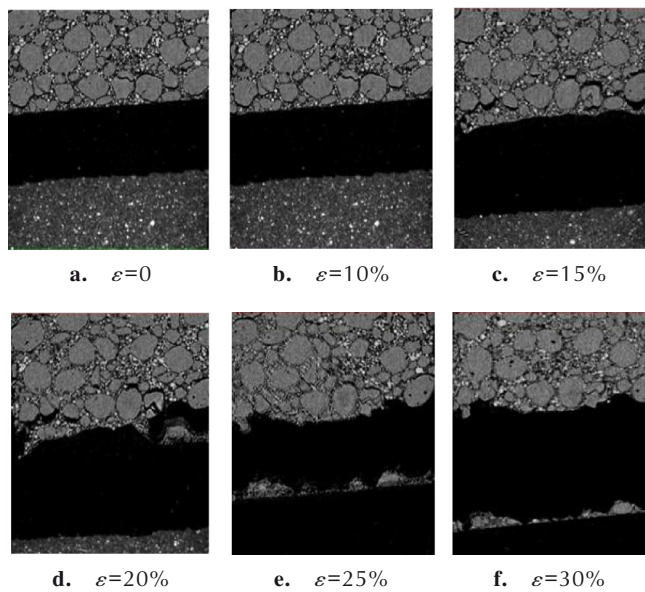


图7 不同拉伸应变下粘接界面的二维细观损伤演化过程
Fig.7 Two-dimensional microscopic damage evolution of the adhesive interface under different tensile strains

载荷的持续作用下裂纹不断扩展,并出现部分裂纹融合的现象,如图7d所示。继续加载,脱湿现象会持续发生,界面处已经发生明显断裂,界面被完全破坏,如图7e所示。由于衬层结构粘性较高,在推进剂断裂失效后,部分推进剂会残留在衬层表面,推进剂断裂失效主要还是由其内部粘结剂与颗粒间的裂纹扩展导致的。

3 基于细观参数的损伤演化过程模拟

3.1 粘接界面有限元模型的建立与验证

因为推进剂及其复杂的细观结构,导致数值仿真过程中真实模型的建立、相关力学参数的测定都具有一定的困难。为了计算能够收敛,所建立的细观数值模型往往对真实情况进行了简化处理,AP颗粒的脱湿是影响推进剂粘接界面力学性能的主要因素,而Al粉等小组分对推进剂的力学性能影响很小,常通过Mori-Tanaka方法^[9]更改基体材料属性,以实现把Al粉对推进剂性能影响均匀化到基体材料中。基于已有文献[10]中AP颗粒的数量、尺寸与面积占比的数据,将AP颗粒分为不同直径的3类。因为真实结构中AP颗粒并非规则球体,二维切片中也是如此,在颗粒填充过程中椭球度设定为1.3,经切片统计平均AP颗粒面积百分比为50.2%。在该条件下,采用随机填充算法在推进剂侧填充大小形状随机的椭圆形颗粒。在绝热层中也有少量颗粒,但是拉伸过程

对实际影响较小,因此衬层与绝热层内不做添加。填充AP颗粒数量与实际统计值对比如表1所示。代表性体积单元的尺寸与本试验所选的观察区域尺寸相同,即3000 μm×1500 μm,所建立数值计算模型如图8。通过对比发现:基于随机填充算法,生成的AP颗粒在推进剂侧随机填充,尺寸分布均匀,形貌并非绝对球形,与推进剂实际制作工艺相同,证明所建立数值模型的准确性较好。

表1 AP颗粒级配参数

Table 1 AP particle grading parameters

particle size range /μm	slice image information		finite element model information	
	area ratio	quantity	area ratio	quantity
200-350	0.066	5	0.066	4
100-200	0.37	39	0.37	36
25-100	0.066	45	0.066	46

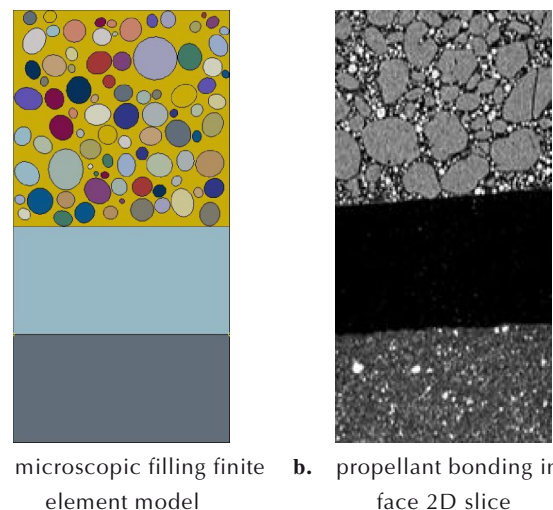


图8 二维数字模型与试验切片对比
Fig.8 Comparison of the results from the two-dimensional digital model and experimental slice

3.2 细观模型仿真参数的获取

内聚力方法的原理是将材料中的界面部分看作具有一定强度的粘单元,把界面单元当成一种新材料,定义牵引力和位移的关系来描述界面的性能。双线性内聚力模型由于形式简单,在粘接界面力学行为的数值模拟中受到了广泛的应用^[11],典型的双线性内聚力模型如图9所示。

双线性内聚力模型满足的牵引分离法则^[11]为:

$$T = \begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-D)k_n & 0 \\ 0 & (1-D)k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

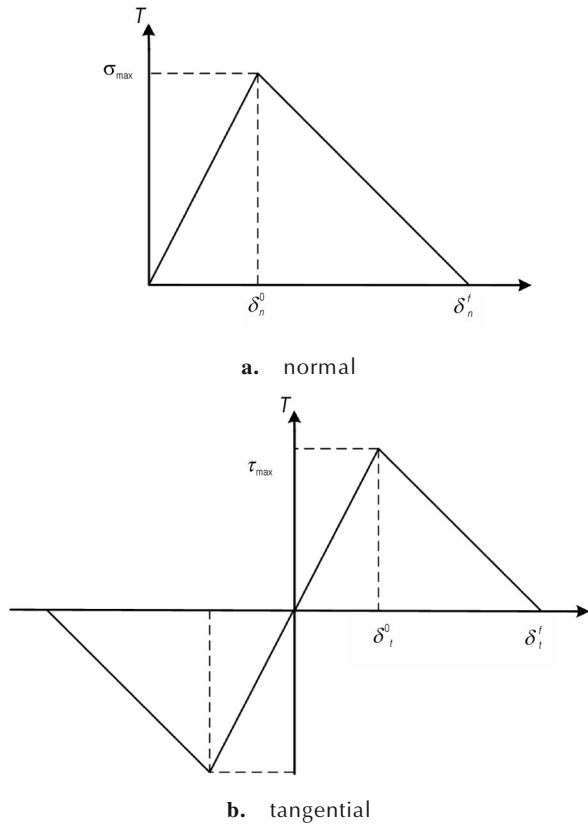


图9 双线性内聚力模型

Fig.9 Bilinear cohesion model

式中, σ 和 τ 分别代表界面的法向和切向应力, MPa; k_n 和 k_t 分别代表界面的法向和切向刚度, $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$; δ_n 和 δ_t 是界面法向和切向张开位移, mm。 D 为损伤变量, 表征材料的损伤程度, 定义为:

$$D = \begin{cases} 0 & (\delta \leq \delta^0) \\ \frac{\delta^f(\delta - \delta^0)}{\delta(\delta^f - \delta^0)} & (\delta > \delta^0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, δ^0 为界面损伤起始位移, mm; δ^f 为界面失效位移, mm。

双线性内聚力模型的控制参数有 3 个: 初始刚度, 粘接强度以及临界失效位移。根据界面的牵引分离法则可以看出, 受载过程中界面的力学行为主要经历弹性段、损伤段和失效段 3 个阶段。当界面受力较小时, Cohesive 单元处于弹性段, 界面的力与张开位移成线性变化; 随着载荷的增大, 界面的张开位移也逐渐增大, 当达到临界位移 δ^0 时, 界面开始损伤, 界面的承载能力也随之下降, 界面的应力逐渐减小; 载荷的进一步增加使得界面的张开位移继续增大, 当达到失效位移 δ^f 时, 界面完全失去承载能力。当 $D=0$ 时, 界面还未发生损伤; $D=1$ 时, 界面完全损伤。

在单一的载荷下, 通过判定张开位移与临界位移的值即可确定界面是否达到损伤的条件, 但是在实际加载过程中, 至少存在法向和切向 2 个方向上的载荷, 因此, 需要更加合适的准则来确定损伤起始的判据。常用的损伤起始准则有最大应力/应变准则、二次应力/应变准则以及二次能量释放率准则等^[5]。

由于 AP 颗粒的界面脱湿是在法向应力与剪切应力共同作用下的结果, 可能在应力小于界面强度时就已经出现损伤, 因此采用二次应力准则作为界面损伤起始的判定条件, 其表达式为:

$$\left(\frac{\sigma}{T}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

式中, T , S 分别为粘接界面的最大拉伸强度和剪切强度, MPa。对于界面失效时的位移 δ , 也可以通过法向和切向的变形来表示:

$$\delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_t^2} \quad (4)$$

式中, δ_n 和 δ_t 为加载过程中界面单元法向和切向的位移, mm。当 $\delta > \delta^f$ 时, 界面完全失效。

为直观表征添加弱界面层对计算结果的影响, 设置未添加弱界面层与正常加入弱界面层参数两者进行对比计算。对于弱界面层, 厚度为 $150 \mu\text{m}$ ^[12]。数值仿真计算需要输入的参数有 AP 颗粒、复合基体、衬层与绝热层的材料参数以及 AP 颗粒/基体界面、推进剂/衬层界面的力学参数和基体的断裂参数。

由于 AP 颗粒的弹性模量远大于基体的弹性模量, 可将其假设为弹性体, 弹性模量 $E=32447 \text{ MPa}$, $\nu=0.1433$ 。同时将推进剂基体也假设为线弹性材料, 在经过大量计算的基础上, 基体的弹性模量确定为 1.2 MPa , 泊松比为 0.495 。因为绝热层不是主要研究对象, 看作线弹性, 弹性模量为 $E=40 \text{ MPa}$, $\nu=0.495$ 。衬层可看做一种超弹性材料, 其本构关系采用 Ogden 模型下的应变能函数表示^[13]:

$$W = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\alpha_n^2} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2n} \quad (5)$$

式中, μ_n, α_n 为材料参数, J 为材料变形前后的体积比, 剩下各项系数如表 2 所示。根据应变能函数 W 与 Green 应变不变量 I_i 和主伸长比 λ_i 在单轴加载条件下的基本关系, 可得应力与应变关系为:

$$\sigma_l = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \left[(1 + \varepsilon)^{\alpha_n - 1} - (1 + \varepsilon)^{-\alpha_n/2 - 1} \right] \quad (6)$$

对于 AP 颗粒/基体界面、推进剂/衬层界面的失效以及基体的断裂都通过在单元之间插入内聚力单元实

现。如前文所述,内聚力模型有 3 个独立参数,即初始刚度、粘接强度以及失效位移。参考 Shudi Pei^[12]文献中的损伤演化方程相关结果,用二次名义应力以及失效位移作为界面粘接单元损伤萌生和演化的判据。目前推进剂细观界面力学参数并没有一个标准的值,因此本研究以近似的界面参数对固体推进剂的细观损伤进行计算,根据多次数值实验,得到较为合适的界面参数最终如表 3 所示。

表 2 衬层力学参数

Table 2 Liner mechanical parameters

i	μ_i	α_i
1	3.659	0.06723
2	0.07665	2.901
3	8.386	0.06708

Note: i represents the order of ogden model. μ_i and α_i are material parameters, which need to be obtained by non-linear least square fitting. According to equation (6), the least square fitting of the uniaxial tensile test data was carried out, and the fitting accuracy of the hyperelastic constitutive model with different orders was obtained by taking the correction determinative coefficient R^2 as the index. The fitting coefficients obtained were μ_i and α_i .

表 3 界力学参数

Table 3 Interface mechanical parameter

interface type	initial stiffness / MPa·mm ⁻¹	bond strength / MPa	failure displacement / mm
particle/matrix interface	100	0.5	0.02
weak interface layer	80	0.4	0.015
particle/matrix interface	80	0.6	0.035
propellant/liner interface	100	0.6	0.02

为模拟单轴拉伸载荷,计算中认为装药界面横向是固定的,推进剂侧受垂直于装药界面的均布位移载荷。AP 颗粒的网格设置为四节点平面应变单元 CPE4。而推进剂基体、衬层和绝热层,采用三节点平面应变杂交单元 CPE3H。表征 AP 颗粒/基体界面与基体断裂的 Cohesive 单元类型则为四节点平面粘接单元 COH2D4。计算模型的单元数目如表 4 所示,网格划分与边界条件如图 10。通过正常计算与加入弱界面层参数两者进行对比试验。对于弱界面层,厚度为 150 μm ,添加位置如图 10a 所示。图 10a 中红色网格为衬层部分,推进剂/衬层界面位于红色与蓝色网格交界位置。

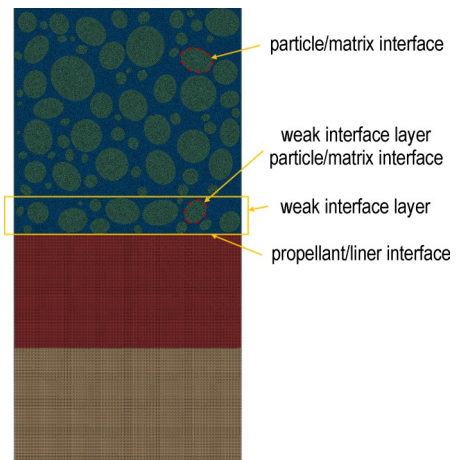
3.3 单轴拉伸下模拟结果分析

定义加载位移与模型边长之比为拉伸应变,图 11

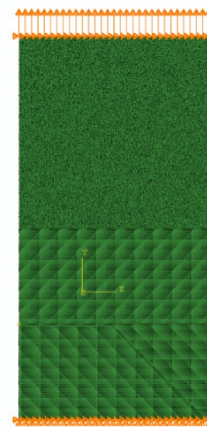
表 4 各组分网格参数

Table 4 Mesh parameters of each component

mesostructure	mesh type	number of grids
AP particle	CPE3	77203
HTPB matrix	CPE3H	76846
liner	CPE3H	10000
heat insulating layer	CPE3H	10000
particle/matrix interface bonding unit	COH2D4	11384
matrix interface bonding unit	COH2D4	80896
propellant/liner bonding unit	COH2D4	400



a. microscopic model of bonding interface of HTPB propellant



b. boundary condition setting

图 10 计算模型及边界条件

Fig.10 Computational model and boundary conditions

为不同拉伸应变下复合固体推进剂粘接界面细观结构的应力云图,其中 a 到 f 为未添加弱界面层时 HTPB 推进剂装药结构粘接界面损伤演化过程的细观结构应力云图,j 到 l 在推进剂/衬层界面向上 150 μm 以内位置添加了弱界面层,即对该区域内 AP 颗粒与基体界面的

内聚力单元赋予新的属性,具体参数如表2所示。从图11中可以看出,在5%应变条件下,结构内部还没有新生缺陷,可以看到AP颗粒上沿合力方向有条状应力带,此时主要由AP颗粒承担应力。推进剂内部基体因为模量较低,与颗粒变形不统一,所以颗粒/基体界面是发生破坏的重点部位之一。除此之外,在模型左右边缘部分,因为填充颗粒较少,起不到模量增强作用,由推进剂/衬层界面边缘部位承担主要应力,该位置也是薄弱位置。当应变达到10%时,内部AP颗粒

开始脱湿,起始脱湿位置在推进剂内部随机出现,且距离界面位置较远。随着应变进一步增加,AP颗粒的脱湿尺寸增大,同时其它颗粒/基体界面的损伤程度也加大,颗粒与基体界面之间出现微裂纹,如图11c、11d所示。随着应变进一步增大,之前由于脱湿产生的微裂纹沿垂直于受力方向朝基体内部扩展,与其它脱湿形成的微裂纹汇合,在推进剂内部形成一条损伤带,最终导致结构失效,如图11e、11f所示。推进剂/衬层界面内聚力单元只是发生变形,未达到破坏位移。从应

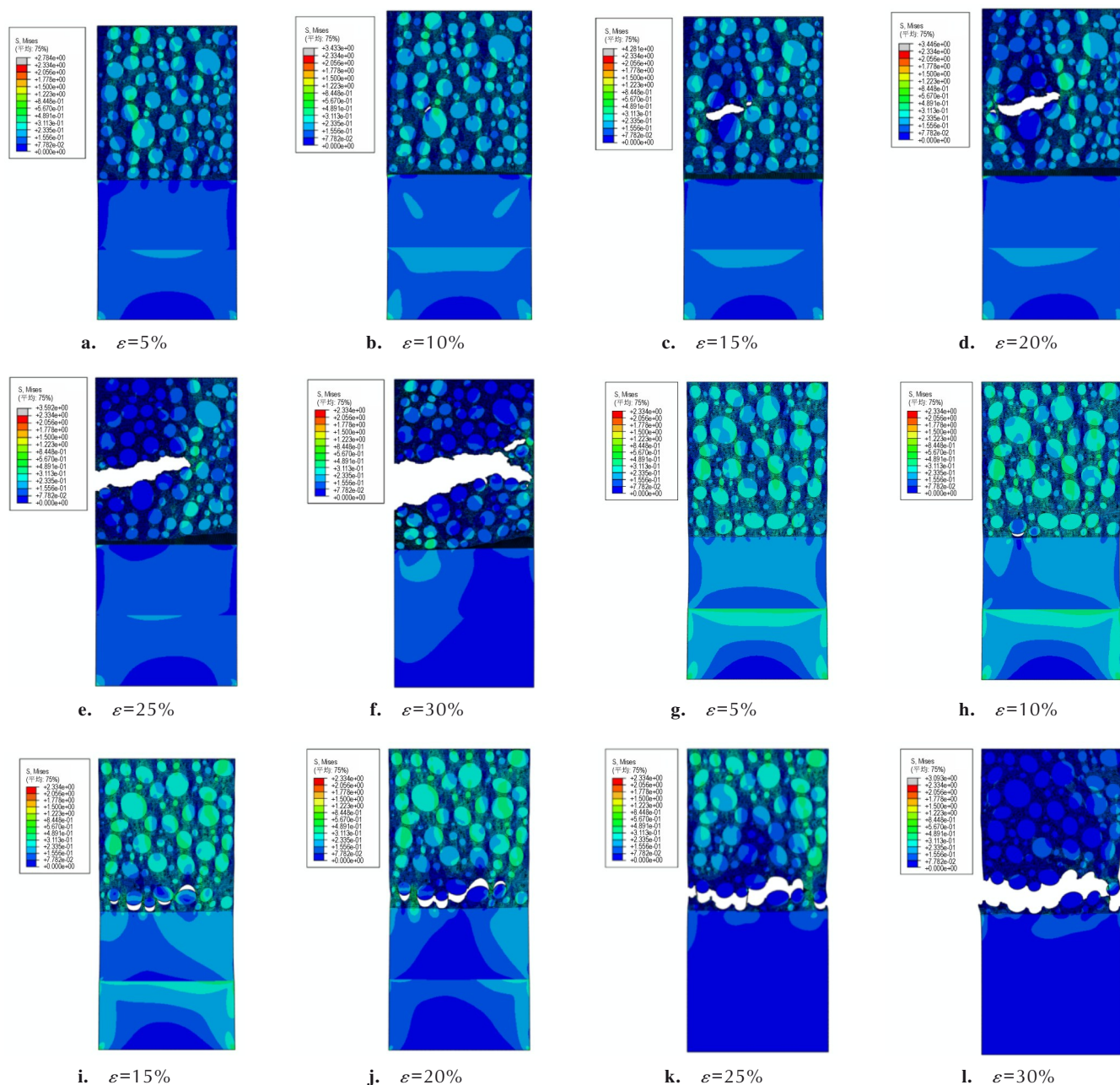


图11 不同应变下推进剂粘接界面应力云图

Fig.11 Stress nephogram of propellant bonding interface under different strains

力云图 11h 可以看出,添加弱界面层后粘接界面的主要破坏形式为混合破坏,既有因为 AP 颗粒与基体粘接力不足引起的内聚破坏,也有沿着推进剂/衬层界面发生裂纹扩展的界面破坏。在受到拉伸载荷作用后,首

为验证该模型和参数的准确性,将仿真结果与实际试验结果的载荷位移曲线进行比较,如图 12 所示。黑色曲线为试验所得,在微 CT 扫描过程中因为加载力

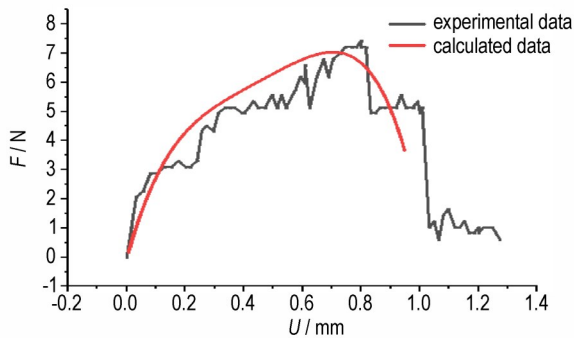


图 12 单轴拉伸条件下粘接界面的试验与仿真载荷位移曲线对比

Fig.12 Comparison of experimental and simulated load displacement curves of the adhesive interface under uniaxial tensile conditions

先在弱界面层内的大 AP 颗粒周围发生“脱湿”损伤,损伤不断演化成裂纹,裂纹扩展再汇聚到宏观破坏。证明加入界面损伤模型后效果明显,与图 7 中试验的失效模式相同,验证了模型的准确性。

过小,力传感器过于敏感以及推进剂松弛现象的影响,测量应力会有一定程度的上下波动。图 12 中红色曲线是添加弱界面层后的计算结果。从图 12 中可以看出计算曲线和试验结果在整体趋势上有较好的相关度,证明所建模型可以较为准确的表征损伤演化对推进剂粘接界面力学性能的影响。

3.4 多角度拉剪下模拟结果分析

为了探索不同应力状态下粘接界面的损伤演化形式,以单轴拉伸试件参数为基础,设计了如图 13 所示的拉剪组合构型进行仿真计算,从 0°到 90°之间,每隔 15°设计其他 5 个角度。随着倾斜角变大,剪切分量增加,对于 90°测试,加载方向平行于界面,此时,强度值由破坏界面的剪切强度所决定。不同加载角度下对应的拉伸与剪切力大小计算公式为:

$$F_s = F \cdot \cos \theta \tag{7}$$

$$T = F \cdot \sin \theta$$

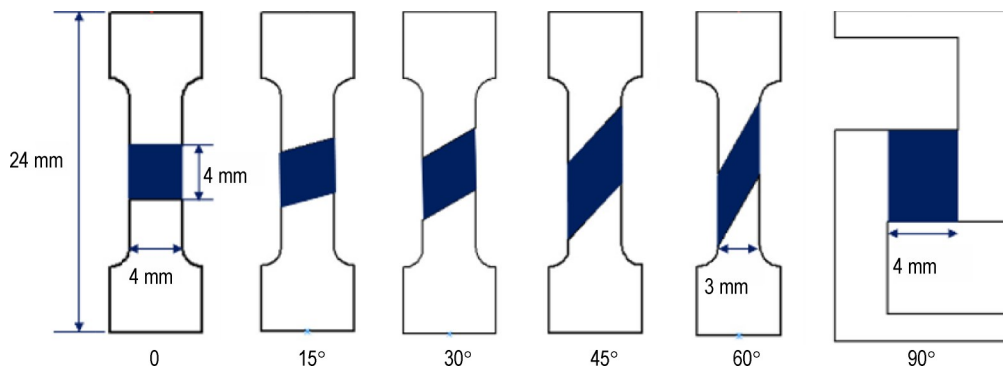


图 13 不同应力状态下粘接界面的计算构型

Fig.13 Calculated configurations of adhesive interfaces under different stress states

对 HTPB 推进剂粘接界面在 15°, 30°, 45°, 60° 和 90° 5 种拉剪角度下的装药界面开展仿真计算,模型参数与单轴拉伸相同。发生大面积脱湿与界面已经破坏时的应力云图如图 14 所示。从图 14d、14f、14h 和 14j 可以发现,超过 30°以后,脱湿主要从靠近弱界面层的 AP 颗粒开始发生,方向沿界面的剪切分力方向。在角度较低时,比如 0°与 15°时没有这种规律,但所有试验的脱湿方向都沿合力方向。随着剪切分量增加,模型的极限破坏载荷降低,越容易发生破坏,破坏位置越来越接近推进剂/衬层界面,更容易从推进剂/衬层界面发生破坏。初始缺陷对界面损伤位置与演化方向影响较大,但不管哪种破坏形式,都发生在弱界面层内,且

与最底层 AP 颗粒的粘接力有关。加载角度对损伤演化过程有影响,角度越大,越容易发生界面破坏,角度越小,越容易在推进剂侧发生内聚破坏。

从细观角度来看,粘接系统在拉伸载荷的作用下内部结构会发生变化,如推进剂颗粒“脱湿”、微裂纹产生、基体断裂、界面脱粘、粘接界面的孔洞的扩大或者汇合等现象,宏观上表现为粘接系统的粘接性能下降,即为损伤。损伤继续演化导致宏观裂纹的产生,不同的裂纹扩展路径从而导致粘接系统不同的破坏模式。可见,粘接界面的破坏过程是一个由损伤产生、演化到宏观裂纹、裂纹扩展、破坏的连续过程。

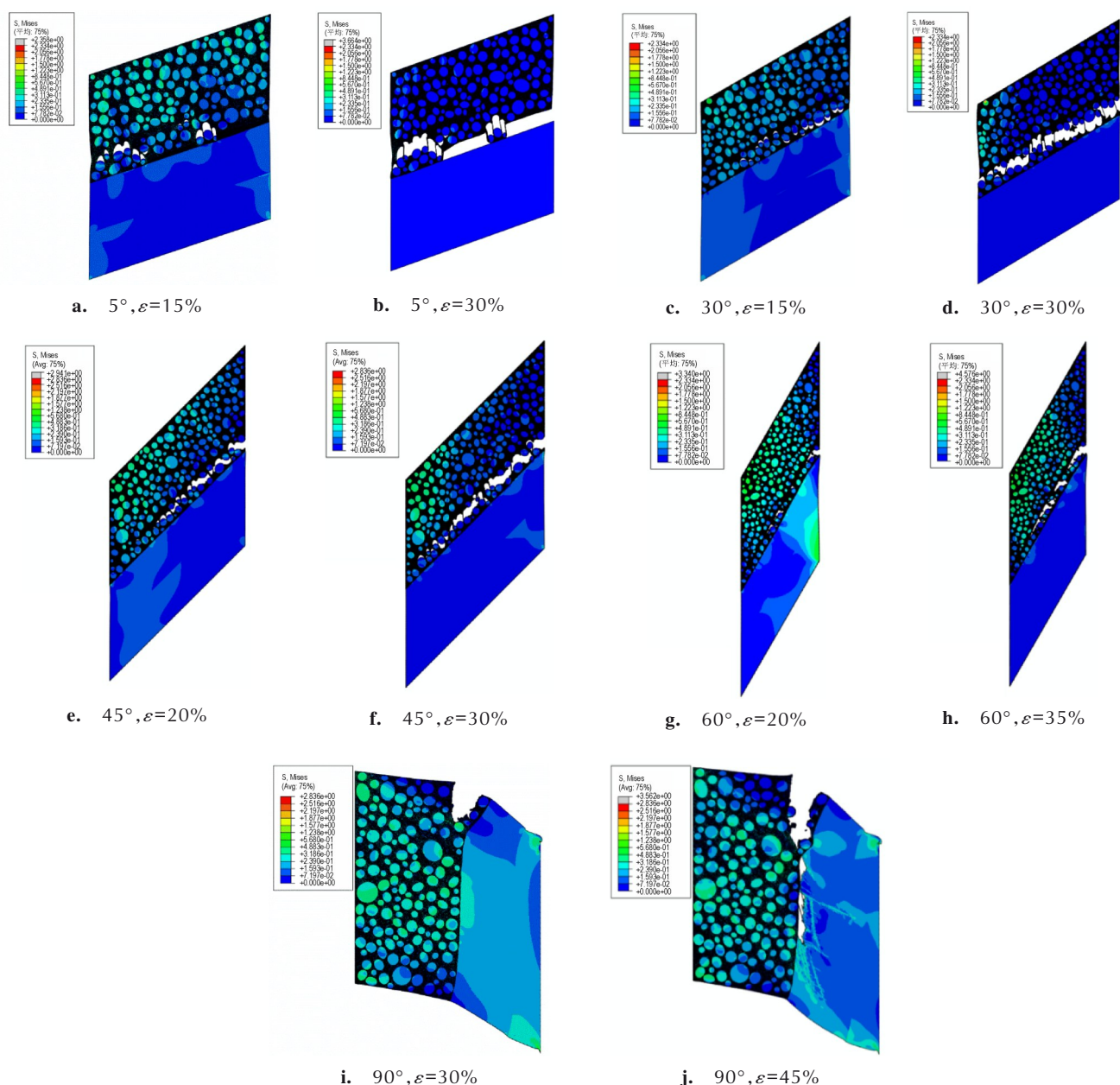


图 14 多角度加载下有限元模型应力云图

Fig.14 Stress nephogram of finite element model under multi-angle loading

5 结论

通过微 CT 对 HTPB 推进剂粘接界面进行了单轴拉伸下的原位加载试验, 利用所得细观参数建立了推进剂粘接界面的二维细观有限元模型, 在 ABAQUS 中将得到的细观损伤引入内聚力模型, 建立弱界面层, 并与试验结果进行了对比验证。主要结论如下:

(1) 单轴拉伸条件下粘接界面的细观损伤演化进行了定性表征和失效机理分析。在拉伸过程中, 衬层因为弹性模量较小, 率先发生弹性应变, 达到一定应力

后, 衬层不再变形, 推进剂内大颗粒附近沿拉伸方向发生脱湿, 小孔隙与脱湿裂缝汇聚。达到推进剂弱界面层的极限应力后, 弱界面层附近开始破坏, 裂缝往推进剂/衬层界面延伸成宏观裂纹。界面破坏经历了初始孔隙变大、颗粒“脱湿”加剧、裂纹贯通等 3 个阶段, 最终的破坏形式为混合破坏。

(2) 在细观试验参数的基础上, 通过随机填充算法导入的 AP 颗粒信息可以更好地表征粘接界面的细观结构。在脱湿之前, 颗粒/基体界面是应力集中的主要位置, 此时主要由 AP 颗粒承担应力, 推进剂内部基

体因为模量较低,与颗粒变形不统一。所以颗粒/基体界面是发生破坏的重点部位,脱湿也从该位置率先发生。数值仿真结果验证了弱界面层的存在。

(3) 将弱界面层属性添加到不同角度拉剪的仿真计算中,发现界面破坏形式与剪切角度有关,初始脱湿主要从靠近弱界面层AP颗粒开始发生,方向沿界面的剪切分力方向。合力与界面的角度越小,越容易从推进剂/衬层界面发生破坏,反之更容易在推进剂侧发生破坏。该方法为固体推进剂粘接界面细观模型的建立提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] LEI Ming, REN Shuai-long, CHEN Er-hao. Correlation between solid propellant failure and interface debonding in solid rocket motors[J]. *Polymer Testing*, 2022, 115: 107755.
- [2] 蒙上阳, 唐国金, 雷勇军. 固体发动机包覆层与推进剂界面脱粘裂纹稳定性分析[J]. *固体火箭技术*, 2004, 27(1): 46-49.
MENG Shang-yang, TANG Guo-jin, LEI Yong-jun. Stability analysis of interface debonding crack between solid motor coating and propellant [J]. *Solid Rocket Technology*, 2004, 27(1): 46-49.
- [3] 姜爱民, 李高春, 黄卫东. 固体火箭发动机粘接界面力学性能的有限元计算及参数分析[J]. *火炸药学报*, 2012, (4): 54-57, 78.
JIANG Ai-min, LI Gao-chun, HUANG Wei-dong. Finite element calculation and parameter analysis of mechanical properties of solid rocket motor bonding interface[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, (4): 54-57, 78.
- [4] 吴丰军, 彭松, 池旭辉. NEPE推进剂/衬层粘接界面厚度表征方法研究[J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(6): 650-652.
WU Feng-jun, PENG Song, CHI Xu-hui. Study on the thickness characterization method of NEPE propellant/liner bonding interface layer[J]. *Solid rocket technology*, 2008, 31(6): 650-652.
- [5] CHOUPANI N. Interfacial mixed-mode fracture characteriza-
tion of adhesively bonded joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008, 28(6): 267-282.
- [6] BARENBLATT G I. Equilibrium cracks formed during brittle fracture rectilinear cracks in plane plates[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959, 23(4): 1009-1029.
- [7] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [8] 李高春, 邢耀国, 戢治洪. 复合固体推进剂细观界面脱粘有限元分析[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(3): 229-235.
LI Gao-chun, XING Yao-guo, JI Zhi-hong. Finite element analysis of composite solid propellant meso-interface debonding [J]. *Journal of composite materials*, 2011, 28(3): 229-235.
- [9] 韩佳. 基于Mori-Tanaka方法的颗粒增强弹塑性基体复合材料力学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
HAN Jia. Study on mechanical properties of particle reinforced elastoplastic matrix composites based on Mori-Tanaka method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [10] 李世奇, 王广, 强洪夫. HTPB复合固体推进剂细观结构微CT试验研究[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(3): 387-393.
LI Shi-qi, WANG Guang, QIANG Hong-fu. MicroCT study on microstructure of HTPB composite solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3): 387-393.
- [11] 周储伟, 杨卫, 方岱宁. 内聚力界面单元与复合材料的界面损伤分析[J]. *力学学报*, 1999, (3): 117-122.
ZHOU Chu-wei, YANG Wei, FANG Dai-ning. Cohesive interface element and interfacial damage analysis of composites[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1999, (3): 117-122.
- [12] PEI Shudi, QIANG Hongfu, WANG Xueren. Micromechanical behavior of HTPB propellant bonding interface under uniaxial tensile loading [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(10): 1-11.
- [13] 张志成, 戴开达, 陈静静. 固体推进剂/衬层粘接界面脱粘失效的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 1671-1815.
ZHANG Zhi-cheng, DAI Kai-da, CHEN Jing-jing. Numerical simulation of debonding failure at solid propellant/liner bonding interface[J]. *Science, Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 1671-1815.

Numerical Simulation of Bonding Interface Damage Evolution of HTPB Propellant Based on Mesoscopic Parameters

PEI Shu-di, QIANG Hong-fu, WANG Xue-ren, WANG Zhe-jun

(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to study the effect of loading Angle on the failure mechanism of HTPB propellant bonding interface, microCT was used to scan and reconstruct the bonding interface in-situ during uniaxial tensile process, and the damage evolution process was characterized. Then, the meso-structural parameters and damage variables were introduced into the cohesive force model, and the meso-damage evolution process of the adhesive interface under different loading angles was obtained. The results show that the initial dehumidification of AP particles at the bonding interface mainly starts from the weak interface layer near the interface, and the direction is along the shear component direction of the interface. The fracture pattern of the interface is related to the shear Angle. The smaller the resultant force and the Angle of the interface, the easier the crack propagation to the propellant/liner interface, whereas the crack propagation is more likely to occur between AP particles. Finally, compared with the experimental results, the accuracy of the calculated results is verified, and the damage evolution law of the propellant bonding interface structure under different loading angles is revealed.

Key words: solid propellant; bonding interface; multi-angle loading; micro-CT; micromorphology; damage evolution

CLC number: TJ55; V435; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023231

(责编: 王馨逸)