

文章编号:1006-9941(2025)08-0860-07

基于原位显微CT的粘接界面细观损伤演化及变形场分析

王玉峰¹,李高春¹,李金飞¹,竺子翔²,袁茂德¹,李旭³,李永强⁴

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000; 2. 92706 部队, 浙江 宁波 315000; 3. 91115 部队, 浙江 舟山 316000; 4. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 固体火箭发动机粘接界面是其薄弱部位,会发生界面脱湿和内聚破坏等,分析粘接界面细观损伤演化过程是开展发动机失效评估的基础。利用原位加载装置和高分辨显微CT系统,开展了绝热层/衬层/推进剂粘接界面的原位扫描成像试验,获得了其内部三维显微数字图像,分析了细观损伤模式和演化过程,采用数字体图像相关方法(DVC)对原位拉伸条件下的粘接界面变形场进行了计算。结果表明,在外部载荷作用下,粘接界面中衬层/推进剂附近的变形较其他位置大,当外界应变为6%时,由于颗粒和基体变形的不均匀,导致颗粒与基体界面发生脱湿,产生微孔洞;当外界应变达到20%时,微孔洞聚合导致界面的损伤破坏。DVC方法实现了粘接界面内部位移场和应变场的计算,给出了拉伸过程中粘接界面变形特点和应变分布,衬层/推进剂附近是拉伸过程中的应变集中区,也是损伤破坏发生的部位。

关键词: 显微CT;粘接界面;细观损伤演化;DVC方法**中图分类号:** TJ55;TJ76**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2025074

0 引言

贴壁浇铸的固体火箭发动机是通过药浆浇铸于发动机燃烧室中固化获得,一般采用壳体/绝热层/衬层/推进剂四层粘接界面形式。自制造之日起发动机将会经历各种环境载荷的考验,使得发动机药柱和粘接界面内部产生应力和应变,造成变形和损伤,甚至致其结构完整性破坏^[1]。因此,损伤演化分析是固体火箭发动机粘接界面研究的热点。

显微CT(Computed Tomography, CT)技术作为一种材料内部结构性能检测方法,能够获得复杂的内部三维结构^[2],并通过搭配原位加载装置,实现内部损伤演化过程的动态观察和损伤演化分析,为材料损伤分析提供新的试验手段^[3-4]。郭翔等^[5]采用显微CT开展了绝热层/衬层/硝酸酯增塑聚醚推进剂(NEPE)界面

细观结构研究,发现显微CT图像可明显区分界面各相以及各相的基体与填充物,可识别不同的固体填充物;绝热层/衬层界面存在有锯齿状的镶嵌结构的扩散层。李世奇等^[6]采用孔隙率对NEPE推进剂细观损伤的变化规律进行了定量分析。邹子杰等^[7]开展了3种温度环境下推进剂的原位显微CT细观结构表征实验,分析温度对推进剂损伤演化的影响。王龙等^[8]开展了固体推进剂的细观损伤及其演化行为的可视化表征研究,认为推进剂细观损伤首先表现为初始的界面脱湿形成的孔隙,在拉伸载荷较小时,推进剂的损伤形式主要表现为较大的AP颗粒脱湿形成的孔隙;在拉伸载荷较大时,除AP颗粒脱湿外可以观察到Al颗粒的脱湿,大量的AP颗粒脱湿后形成的孔隙相互融合,最终导致固体推进剂宏观断裂。Pei等^[9]采用显微CT对不同加载角度的粘接界面试样进行了扫描和图像重构,获得内部组成的大小、形状、体积分数和内部孔隙等变化数据,并分析其细观损伤演化机理。显微CT技术与加载装置相结合可以提供材料受载情况下力学响应与细观结构演变等重要信息,已经成为细观结构演化分析的重要手段^[10-11]。

数字体图像相关(Digital Volume Correlation,

收稿日期: 2025-04-20; **修回日期:** 2025-07-08**网络出版日期:** 2025-08-13**作者简介:** 王玉峰(1978-),男,副教授,主要从事固体火箭发动机使用工程研究。e-mail:wyf96102@126.com**通信联系人:** 李高春(1978-),男,教授,主要从事固体火箭发动机使用工程研究。e-mail:leespringhjhy@sina.com**引用本文:**王玉峰,李高春,李金飞,等. 基于原位显微CT的粘接界面细观损伤演化及变形场分析[J]. 含能材料, 2025, 33(8):860-866.

WANG Yu-feng, LI Gao-chun, LI Jin-fei, et al. Analysis of Meso-damage Evolution and Deformation Fields at Adhesive Interfaces Based on In-situ Micro-CT[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(8):860-866.

DVC)方法是表征非均质材料内部变形场的重要手段,随着显微CT三维成像技术的发展,DVC与显微CT结合越来越受到重视,并得到广泛地应用^[12-13]。王延珩等^[14]采用DVC方法分析了PBX炸药单轴压缩过程中的三维CT图像,直观显示了试件内部应变局部化区域。程相伟等^[15]开展了平纹SiC_f/SiC复合材料X射线CT原位压缩试验,得到了材料加载过程中CT原位图像数据;采用DVC方法获得了材料的位移场和应变场,揭示了陶瓷基复合材料的损伤演化及失效机理。DVC方法在PBX炸药和复合材料等领域已得到应用,但在固体火箭发动机粘接界面内部应变场的应用还鲜见报道。

本研究以绝热层/衬层/推进剂粘接界面为研究对象,利用原位加载装置和高分辨显微CT系统,开展不同拉伸应变条件下粘接界面扫描成像试验,获得其内部三维CT扫描图像,实现细观损伤演化过程的动态观察和损伤演化分析。采用DVC方法对原位拉伸条件下的粘接界面变形场进行计算,并进行应变场三维可视化显示,从而揭示粘接界面内部细观损伤演化过程,为固体火箭发动机粘接界面失效分析提供试验依据。

1 试验部分

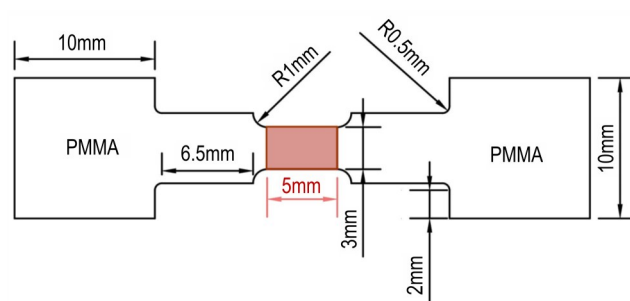
1.1 试验设备与样品试件

原位拉伸试验基于XLAB-2000型高精度、高效率显微CT和XFOR系列原位拉伸平台开展。显微CT扫描工作电压为100 kV,空间分辨率为2 μm ,工作电流为170 μA ,采用Air滤波片,扫描360°,扫描角度差为0.225°。

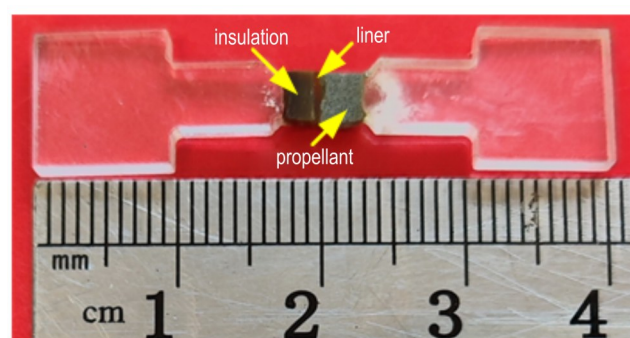
为获得高分辨率的粘接界面显微图像,根据原位加载装置结构,设计制作小粘接界面试件,试件中部为5 mm×3 mm×3 mm的绝热层/衬层/推进剂的粘接界面,两侧粘接切割成型的亚克力板,如图1所示,该试件保证能够与显微CT的原位加载装置配合,便于在加载过程中施加载荷,也有利于设备观察界面细观损伤的整个过程。试件绝热层为三元乙丙橡胶(EPDM);衬层为端羟基聚丁二烯(HTPB)/异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI);推进剂以HTPB为粘合剂,高氯酸铵(AP)为氧化剂,铝(Al)粉为助燃剂,甲苯二异氰酸酯(TDI)为固化剂。

1.2 试验方法

将试件固定在拉伸夹具上,上端置于夹具槽内,下端通过加载夹具向下运动,为分析粘接界面各阶段细



a. CAD model



b. specimen photograph

图1 试件结构

Fig.1 Specimen structure and photograph

观损伤演化过程,并保证成像质量,采用分段扫描成像方式。由于显微CT实现粘接界面内部成像,在扫描时,需要保证粘接界面试件不发生变形,在原位加载试验时,先将试件加载到指定位移后保持位移不变,再进行显微CT扫描,完成一个阶段扫描后,将试件拉伸至下一个位移,再次进行显微CT扫描,直到粘接试件发生断裂,通过显微CT获取材料内部三维细观结构和损伤形貌。为获得不同阶段粘接界面细观结构图像,选择7个外界应变0,3%,6%,9%,12%,16%和20%时的粘接界面分别进行扫描。

2 数字体图像相关(DVC)方法

DVC方法优势在于直接分析由三维逆向重建所获得的材料变形前后的数字体图像信息,利用图像处理技术等手段来计算出内部的变形场,助力表征内部变形过程研究。粘接界面内部不同密度的颗粒在CT图像中呈现不同的灰度值,可以作为DVC分析的天然散斑。根据显微CT原位扫描试验获得的图像序列,进行DVC分析,实现粘接界面内部变形场的测量,获取粘接界面位移以及应变场的变化规律。

DVC方法是跟踪匹配物体变形前后的相关区域

来确定位移矢量,单位体素(voxel)是数字图像数据在三维空间的最小单位,基于三维图像的 $(2M+1) \times (2M+1) \times (2M+1)$ voxel子块,在DVC计算中对比原始图像灰度 $R(X,Y,Z)$ 与形变图像灰度 $R'(X,Y,Z)$,如图2所示,并以相关函数^[16]表征形变前后相似程度,实现位移场的测量,最后通过合适的差分算法从位移场中提取对应的应变场,然后根据得到的数据以三维彩色视图的形式将计算结果可视化显示。

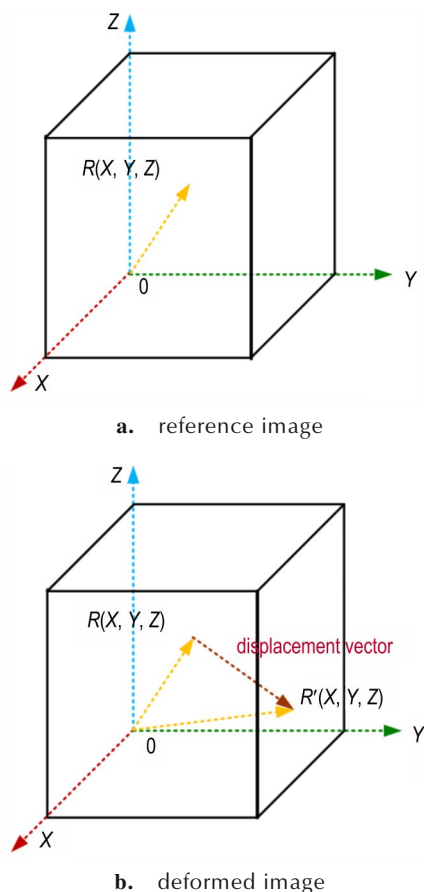


图2 DVC示意图

Fig.2 Diagram of DVC

3 结果与讨论

3.1 原位显微CT扫描试验结果分析

为探究粘接界面内部结构的细观损伤演变状况,对粘接界面扫描部位进行三维重构。借助于三维重构软件,经预处理、模型重建、后处理生成三维图像。对试样在X、Y、Z三个轴上沿轴向进行切片,可以得到试样内部结构剖面图。图3为初始状态断层扫描成像,左图为切片方式展示,右图为XZ轴截面图像。

从图3中可以看出,在初始状态下,由于组成结构

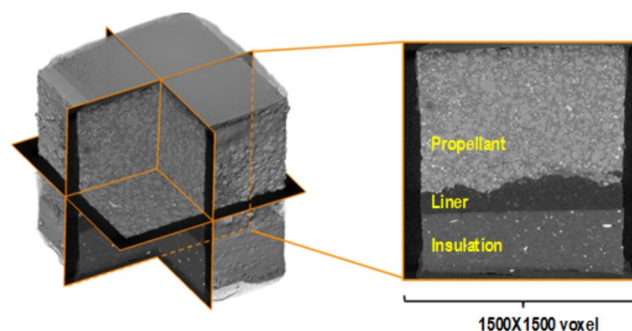


图3 $\varepsilon=0$ 时XZ轴截面图像

Fig.3 XZ-axis cross-sectional image at $\varepsilon=0$

的差异造成图像灰度值不同,显微CT图像能够清晰分辨绝热层、衬层以及推进剂等结构,衬层与推进剂的表面不是平整的,这是由于粘接界面制作过程中衬层表面与推进剂表面因为相互接触而形成相互嵌入的咬合结构,从而实现有效界面粘接,推进剂内部结构紧凑,填充不同组分的颗粒,由于Al密度大,吸收X射线强,在图像中显示白色。

选取不同拉伸状态下粘接界面的三维图像内部切片,分析粘接界面不同层之间结构的差异,确定内部的变形情况和损伤类型。图4为不同外界拉伸应变下的XZ轴中间截面CT图像。当外界应变达到3%时,由于外部载荷的作用,颗粒与基体没有脱湿,粘接界面试件整体产生变形,推进剂、衬层变形较其他位置大,如图4a所示。外界应变达到6%时,由于颗粒与基体变形不协调,AP颗粒与基体界面出现了少量微裂纹,其余区域并未出现明显的颗粒脱湿,如图4b所示。外界应变达到9%时,AP颗粒与基体的脱湿损伤程度继续增大,由于Al颗粒尺寸相对较小,不发生脱湿,如图4c所示。外界应变达到12%时,多处AP颗粒与基体之间出现脱湿,区域不断增多,由于拉伸作用,在粘接界面衬层附近开始产生类似于金属材料拉伸的“颈缩”现象,如图4d所示。外界应变达到16%时,内部结构出现大量的脱湿形成的微孔洞,较多AP颗粒与基体发生脱湿,AP颗粒与基体形成的微孔洞较前一阶段继续扩展,如图4e所示。外界应变达到20%时,位于推进剂与衬层附近AP颗粒与基体之间微孔洞进一步扩张,部分微孔洞聚合,整个粘接界面即将发生断裂,如图4f所示。

综上所述,在外力应变不断增大的情况下,AP颗粒和基体脱湿产生的微孔洞不断扩大,逐渐汇合,最后聚集形成断裂表面。另外,在拉伸过程中,内部颗粒的模量较大,变形量较小,未出现拉伸过程中颗粒断裂的现象。

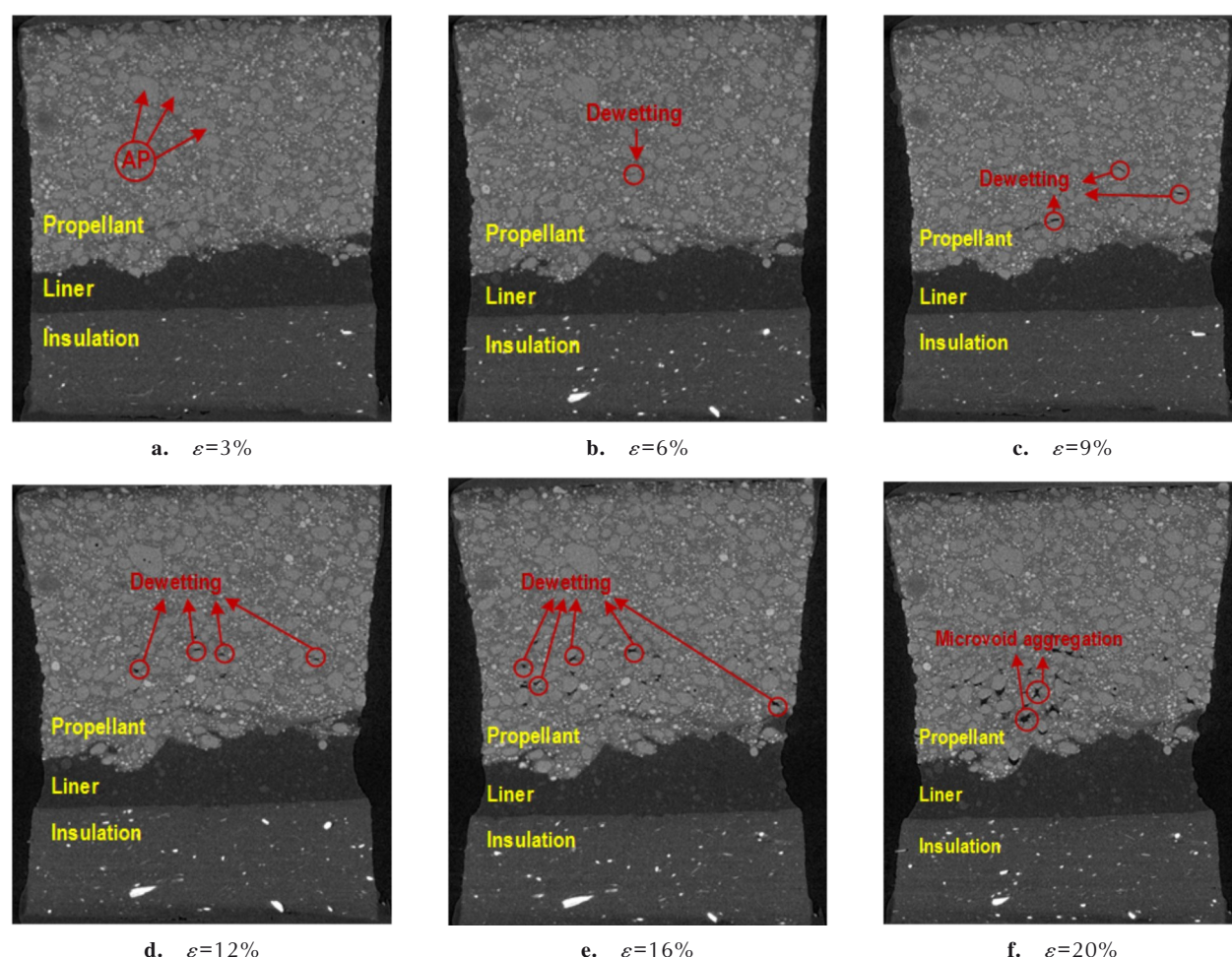


图4 不同应变时XZ轴截面图像

Fig.4 XZ-axis cross-sectional images at different strains

3.2 DVC 计算结果分析

为更加直观分析原位拉伸试验过程中不同阶段试件的变形状态,分析粘接界面内部细观损伤演化过程和原因,采用DVC方法对获得的显微CT图像序列进行计算。针对粘接界面损伤的特点,结合DVC计算资源要求,计算时截取粘接界面附近 $140(w) \times 140(h) \times 140(z)$ voxel的长方体作为计算对象,获得不同拉伸过程中粘接界面内部典型阶段位移矢量图和应变场。

(1) 位移矢量图

不同阶段粘接界面试件的位移矢量图如图5所示。位移矢量能够直观给出粘接界面试件变形特点,给出粘接界面试件在拉伸过程的各区域变形大小和方向。位移箭头的颜色将跟随绝对位移大小变化,位移数值越大,图中位移箭头的颜色越偏红色,位移数值越小,位移箭头的颜色越偏向蓝色。

图5a为3%拉伸应变状态相对于初始状态位移矢量图,可以看出,在绝热层底部与上部为深蓝色位移箭

头,且长度几乎为0,说明在该阶段绝热层位移量小,也就是绝热层在拉伸情况下,变形量较小,而在推进剂、衬层处从上至下颜色由黄色逐步变化到绿色,位移较大,在保持均匀向上趋势的同时还呈现出向内偏斜的趋势,说明在拉伸过程中,横向出现压缩变形。

图5b为12%拉伸应变相对于9%拉伸应变的位移矢量图,可以看出,随着外界应变的增加,位移矢量图的整体分布基本不变,但数值变大;推进剂的位移均匀增加,向内偏斜更为明显;整体上推进剂、衬层的位移大于绝热层处的位移,说明此时的位移主要来自于推进剂、衬层的形变。

图5c为20%拉伸应变相对于16%拉伸应变的位移矢量图,可以看出,位移矢量图的整体分布基本不变,但在推进剂上端出现了位移矢量偏斜的情况,说明此时内部出现了脱湿情况,导致变形不再均匀,但位移总体上还保持着向上的趋势。

综上所述,粘接界面试件在不同拉伸阶段变形形

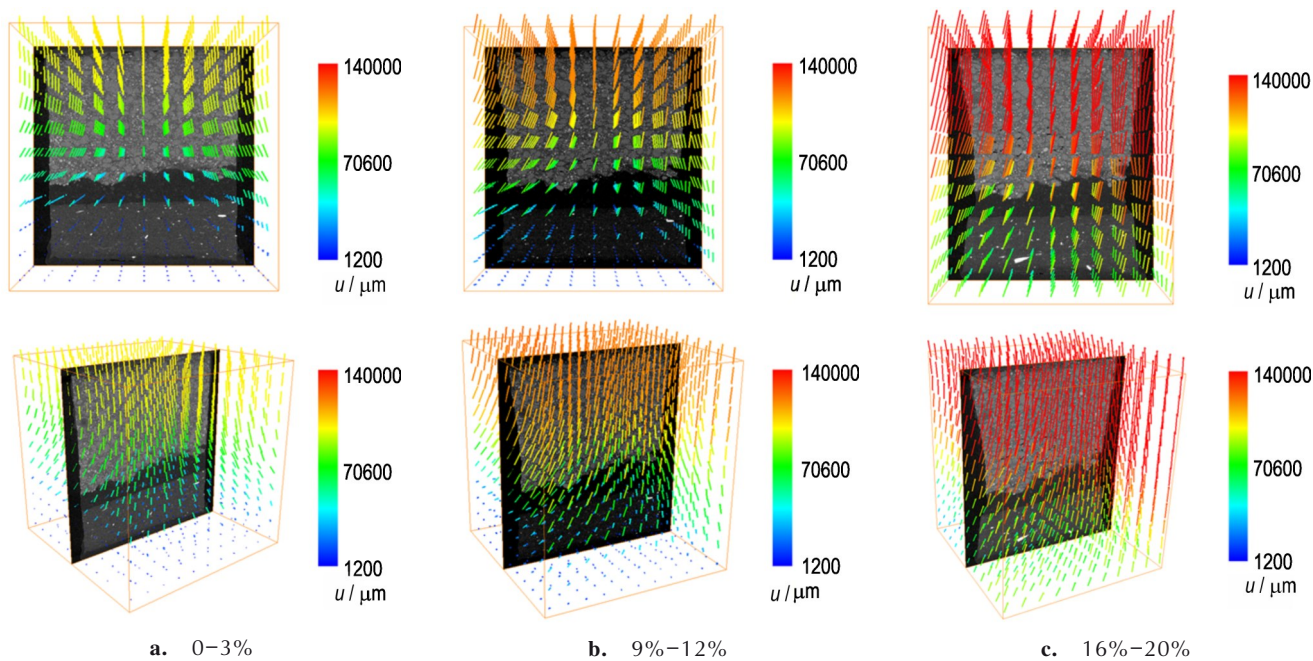


图5 不同拉伸应变阶段粘接界面试件的位移矢量图

Fig.5 Displacement vector diagrams of adhesive specimens at different tensile strain stages

式基本不变,位移较大的区域普遍集中于推进剂、衬层,同时,在试件拉伸伸长的过程中,横向出现压缩变形;当试件内部出现脱湿情况时,将影响其内部位移矢量的分布。

(2)应变场

由位移场数据得到了粘接界面试件拉伸方向应变场云图,如图6所示,其中各图中左边是该拉伸阶段下

试样整体3D形态图,右边为试样整体应变场云图。

图6a为3%拉伸应变状态相对于初始状态的3D形态图及应变场云图,可以看出,推进剂粘接界面试件的较大的应变出现在试样表层和衬层外部表面,说明自由表面较内部容易变形,衬层由于模量小较其他材料易发生变形;由于推进剂为非均质材料,内部应变也不均匀,但推进剂内部应变相对较小。

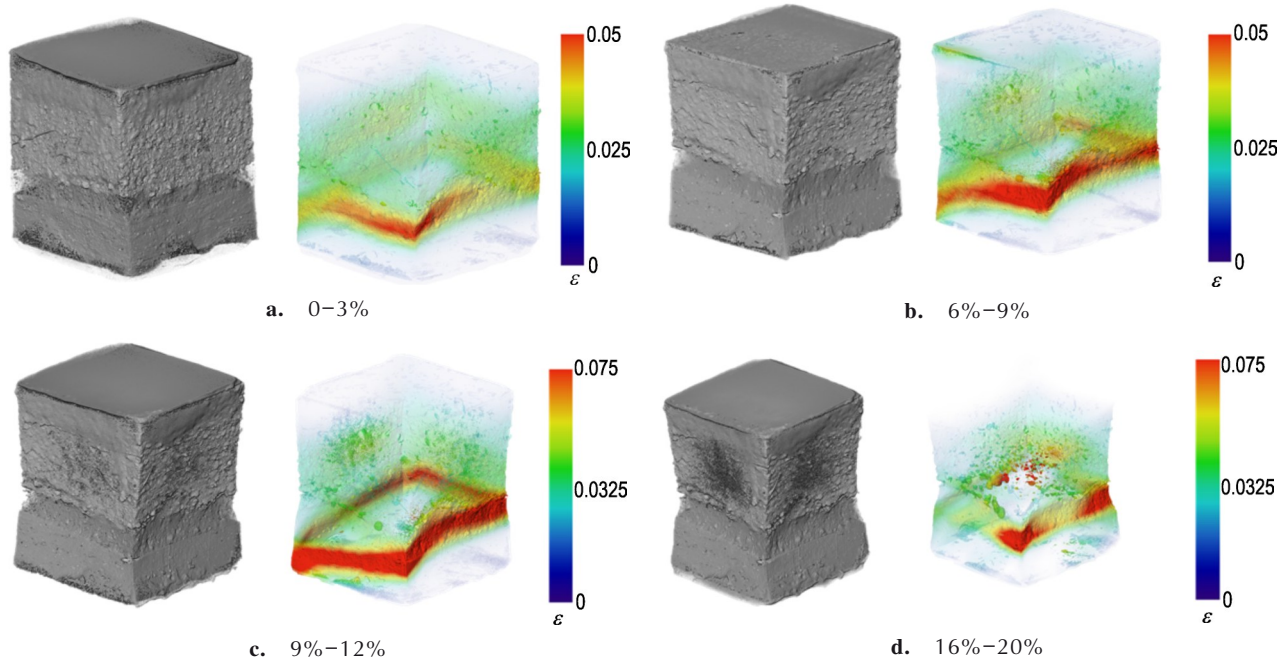


图6 不同拉伸应变阶段粘接界面试件的3D形态图及应变场云图

Fig.6 3D shape diagram and strain field contour of adhesive specimens at different tensile strain stages

图6b为9%拉伸应变相对于6%拉伸应变的3D形态图及应变场云图,可以看出,应变分布形式基本不变,位于衬层的高应变区基本连通,高应变区主要集中在推进剂和衬层附近,由于衬层自身强度高,一般不会发生断裂,而位于衬层附近的推进剂由于受高应变的作用,推进剂颗粒与基体将发生脱湿。

图6c为12%拉伸应变相对于9%拉伸应变的3D形态图及应变场云图,可以看出,位于推进剂/衬层界面高应变带颜色进一步加深,形成一个带状高应变区域,推进剂内部应变分布不均匀。

图6d为20%拉伸应变相对于16%拉伸应变的3D形态图及应变场云图,可以看出,此时推进剂内部产生了高应变区,对比图4,可以更清楚的看到,高应变区集中在试样内部微孔洞产生的地方,大量微孔洞连通形成裂纹,试样将在此处发生断裂。

总之,DVC方法可以获得不同状态下试件内部应变分布,由于粘接界面试件材料属性不同,内部应变产生不均匀,在拉伸过程中,高应变区域主要集中在推进剂和衬层附近处,应变集中会造成推进剂内部颗粒和基体的脱湿,产生微孔洞,从而造成上述区域的拉伸损伤破坏。

4 结论

以绝热层/衬层/推进剂粘接界面为研究对象,利用原位加载装置和显微CT系统,开展了粘接界面原位扫描成像试验,获得了三维图像,分析了粘接试件在原位拉伸加载下其内部细观损伤演化行为,通过DVC方法对原位拉伸条件下的粘接界面变形场进行了计算,得到以下结论:

(1)显微CT图像显示推进剂与衬层表面相互渗透而形成咬合结构,实现界面有效粘接;当外界应变为6%时,位于衬层/推进剂界面的AP颗粒会率先开始脱湿,产生微孔洞;随着外界应变的增加,微孔洞继续增多,当外界应变达到20%时,微孔洞聚合导致界面的损伤破坏。拉伸过程中颗粒本身并未出现断裂,主要表现为颗粒与基体的脱湿。

(2)DVC方法有效获取粘接界面的变形场,从位移矢量图来看,位移较大的区域普遍集中于推进剂、衬层,位移矢量图直观显示了粘接界面拉伸以及横向收缩过程。在拉伸初期阶段,高应变区域集中在推进剂和衬层附近处,由于应变集中造成颗粒和基体的脱湿,在推进剂内部形成了高应变区,最终造成上述区域的拉伸损伤破坏。

参考文献:

- [1] 侯晓,张旭,刘向阳,等. 固体火箭发动机药柱结构完整性研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 566-579.
HOU Xiao, ZHANG Xu, LIU Xiang-yang, et al. Research progress on structural integrity of solid rocket motor grain[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(4): 566-579.
- [2] 李永强,李高春,林明亮. 基于原位拉伸的HTPB推进剂多尺度损伤演化分析[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 124-132.
LI Yong-qiang, LI Gao-chun, LIN Ming-liang. Multi-scale damage evolution analysis of HTPB propellant based on in-situ stretching[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2): 124-132.
- [3] BRUNNER R. Methods and instruments X-Ray computed tomography[M]. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2nd Edition, 2025, 230-242.
- [4] VASARHELYI L, KONYA Z, KUKOVECZ A, et.al. Microcomputed tomography based characterization of advanced materials: A review [J]. *Materials Today Advances*, 2020 (8): 100084
- [5] 郭翔,张清杰,翟鹏程,等. 基于Micro-CT的NEPE推进剂装药界面细观结构[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 194-198.
GUO Xiang, ZHANG Qing-jie, ZHAI Peng-cheng, et al. Mesoscopic structure of NEPE propellant grain interface based on micro-CT technique [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(2): 194-198.
- [6] 李世奇,强洪夫,陈铁铸,等. 单轴拉伸下NEPE固体推进剂细观结构演化行为研究[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 175-182.
LI Shi-qi, QIANG Hong-fu, CHEN Tie-zhu, et al. Mesoscale structure evolution behavior of NEPE solid propellant under uniaxial tension [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2): 175-182.
- [7] 邹子杰,强洪夫,王哲君,等. 不同温度条件下三组元HTPB推进剂细观脱湿行为实验及数值模拟[J]. 含能材料, 2025, 33(1): 13-23.
ZOU Zi-jie, QIANG Hong-fu, WANG Zhe-jun, et al. Experimental study and numerical simulation of mesoscale dewetting behavior of HTPB tripropellant under different temperature conditions [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(1): 13-23.
- [8] 王龙,刘岳勋,吴圣川,等. 基于原位X射线成像的推进剂损伤演化表征[J]. 航空学报, 2023, 44(7): 427022.
WANG Long, LIU Yue-xun, WU Sheng-chuan, et al. In-situ X-ray tomography based characterization of propellant damage evolution [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(7): 427022
- [9] PEI S D, QIANG H F, WANG X R, et.al. Mesoscopic failure behavior of HTPB propellant bonding interface under multi-angle pull and shear loading [J]. *Polymer Testing*, 2024, 132:108365.
- [10] LAI G D, SANG L P, BIAN Y L, et.al. Interfacial debonding and cracking in a solid propellant composite under uniaxial tension: An in situ synchrotron X-ray tomography study [J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 256: 110743.
- [11] LIU Y X, QIAN W J, WANG L, et.al. In situ X-ray tomography study on internal damage evolution of solid propellant for carrier rockets [J]. *Materials Science & Engineering A*, 882(2023): 145451.
- [12] 毛灵涛,毕玉洁,刘海洲,等. 基于CT成像和数字体图像相关

- 法的岩石内部变形场量测方法的研究进展[J]. 科学通报, 2023, 68: 380–398.
- MAO Ling-tao, BI Yu-jie, LIU Hai-zhou, et al. Progress of internal deformation measurement of rock by using CT and digital volume correlation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68: 380–398.
- [13] PAN B, WANG B. Some recent advances in digital volume correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 135(2020): 106189.
- [14] 王延珩, 邹翔, 潘兵, 等. 基于数字体图像相关法的TATB基PBX材料内部变形测量[J]. 含能材料, 2022, 30(12): 1272–1281.
- WANG Yan-jun, ZOU Xiang, PAN Bing, et al. 3D Deformation measurement in TATB based PBX based on digital volume correlation with μ -computed tomography [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30 (12): 1272–1281.
- [15] 程相伟, 张大旭, 杜永龙, 等. 基于X射线CT原位试验的平纹SiC_f/SiC压缩损伤演化机理[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(2): 232–241.
- CHENG Xiang-wei, ZHANG Da-xu, DU Yong-long, et al. In-situ X-ray CT characterization of damage mechanism of plain weave SiC_f/SiC composites under compression [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(2): 232–241.
- [16] BULJAC A, JAILIN C, MENDOZA A, et al. Digital volume correlation: review of progress and challenges [J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(5): 661–708.

Analysis of Meso-damage Evolution and Deformation Fields at Adhesive Interfaces Based on In-situ Micro-CT

WANG Yu-feng¹, LI Gao-chun¹, LI Jin-fei¹, ZHU Zi-xiang², YUAN Mao-de¹, LI Xu³, LI Yong-qiang⁴

(1. Naval Aviation University, Yantai 264000, China; 2. Unit 92706 of PLA, Ningbo 315000, China; 3. Unit 91115 of PLA, Zhoushan 316000, China; 4. Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, China)

Abstract: The adhesive interface of solid rocket motors is a weak zone prone to interfacial debonding and cohesive failure. Analyzing the meso-scale damage evolution process of adhesive interfaces is fundamental for motor failure assessment. Using an in-situ loading device and a high-resolution micro-CT system, in-situ scanning imaging tests were conducted on the adhesive interface of insulation layer/liner/propellant. The internal three-dimensional micro-digital images were obtained, and the meso-damage modes and evolution processes were analyzed. The digital volume correlation (DVC) method was employed to calculate the deformation fields of the adhesive interface under in-situ tensile conditions. The results show that under external loading, the deformation near the liner/propellant interface is greater than that in other regions. When the external strain reaches 6%, microvoids form due to uneven deformation between particles and the matrix, leading to particle-matrix debonding. At an external strain of 20%, microvoids coalescence causes interfacial damage and failure. The DVC method enabled the calculation of internal displacement and strain fields of the adhesive interface, revealing the deformation characteristics and strain distribution in the tensile process. The area near the liner/propellant interface is identified as the strain concentration zone in the tensile process and the primary site of damage initiation.

Key words: micro-CT; adhesive interface; meso-damage evolution; DVC method

CLC number: TJ55; TJ76

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025074

(责编: 姜梅)