

文章编号:1006-9941(2024)04-0435-30

复合固体推进剂损伤行为的多尺度研究进展

王哲君¹,强洪夫¹,王稼祥¹,裴书帝¹,李世奇¹,耿挺京¹,韩永恒²

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025; 2. 海军装备部驻北京地区军事代表局, 北京 100071)

摘要: 从微观、细观、宏观尺度和跨尺度4个方面,对复合固体推进剂损伤行为的研究进展进行了梳理,重点综述了不同尺度下损伤的观测和表征方法、损伤阈值的确定方法、损伤演化模型的构建方法、损伤数值模拟方法及宏微观跨尺度分析方法,并在此基础上针对当前研究中存在的若干不足,展望了需进一步重点开展研究的方向:拓宽微观尺度上开展复合固体推进剂损伤行为数值模拟时考虑的影响因素的范围,并从多个方面加强与试验研究结论的验证;提高细观尺度上损伤观测试验的能力、损伤演化模型的表征水平和损伤数值模拟的计算精度;提高宏观尺度上损伤识别测试试验的检测精度、损伤阈值确定方法的精确性和损伤演化模型的预测能力;在形成微细宏观单一尺度上复合固体推进剂损伤行为研究的标准规范的基础上,进一步建立推进剂损伤行为跨尺度研究的理论方法体系。

关键词: 复合固体推进剂;损伤观测;损伤表征;损伤模型;数值模拟;多尺度

中图分类号: TJ55;V512

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024014

0 引言

固体力学范畴的损伤是指材料结构组织在外载荷作用下发生的力学性能劣化并导致体积单元破坏的现象,这种现象是材料内部大量微孔洞、微裂纹等微缺陷产生、扩展和贯通的结果,也称之为损伤发生和累积的结果^[1-2]。在生产、贮存、运输和点火发射等使役载荷下,固体推进剂药柱会承受多种类型载荷的作用而发生变形,若推进剂内部产生的应力应变超过某一临界阈值,也会导致损伤的出现,并在外载荷持续作用下发生损伤的累积,进而使得推进剂药柱力学性能下降,承载能力减弱,甚至引起固体火箭发动机(SRM)药柱结构完整性发生破坏,增大发动机出现爆炸现象的风险^[3]。因此,研究固体推进剂的损伤行为对于指导配方设计、药柱结构设计和确保SRM的正常工作等具有重要意义。

目前,复合固体推进剂在SRM装药设计中应用最为广泛^[4],该类材料是典型的高固含量的颗粒增强复合材料,在细观尺度上,是由连续相基体(例如:端羟基聚丁二烯(HTPB)、硝酸酯增塑聚醚(NEPE)、叠氮缩水甘油醚(GAP)和聚乙二醇(PEG)等)、固体填充颗粒(例如:高氯酸铵(AP)、奥克托今(HMX)、黑索金(RDX)和铝粉(Al)等)以及两者的粘接界面(本文中的粘接界面均特指固体填充颗粒/基体粘接界面,后续不再作专门强调)共同组成的多级多相分散体系。根据损伤发生的原因,可将上述推进剂的损伤形式划分为初始损伤以及在外载荷作用下出现的诱导损伤。其中,初始损伤是由于加工制造、成型工艺等原因在固体推进剂内部产生的微裂纹或微缺陷,根据复合固体推进剂的结构组成,这些微裂纹或微缺陷可能存在于连续相的黏合剂基体、固体填充颗粒或粘接界面中,也可能同时存在于上述多个部位。而在机械、温度、压强等外载荷持续作用下,复合固体推进剂内部出现的诱导损伤形式主要包括:黏合剂基体撕裂、固体填充颗粒断裂(或破碎)和粘接界面破坏(即固体填充颗粒与基体发生分离的“脱湿”现象)。上述诱导损伤形式不仅受外载荷类型的影响发生变化,同时也会随配方的不同而发生改变,而且经常不会以单一形式出现。正是由

收稿日期:2024-01-08;修回日期:2024-02-04

网络出版日期:2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金(22205259),陕西省高校科协青年人才托举项目(20190504)

通信联系人:王哲君(1988-),男,副教授,主要从事固体火箭发动机装药结构完整性和安全性研究。e-mail:qinglongzaitian888@163.com

引用本文:王哲君,强洪夫,王稼祥,等.复合固体推进剂损伤行为的多尺度研究进展[J].含能材料,2024,32(4):435-464.

WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Jia-xiang, et al. Multiscale Research Progress on Damage Behaviors of Composite Solid Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(4):435-464.

于复合固体推进剂本身结构组成形式具有多尺度特点, 决定了其内部损伤和损伤演化的多尺度特征。

为了揭示复合固体推进剂的损伤特性和在不同类型载荷下的损伤行为变化规律, 国内外研究者重点从试验观测、理论分析和数值模拟的角度开展了较为广泛的研究。但由于复合固体推进剂损伤行为的复杂性, 至今已经开展的有关研究与全面揭示不同使役载荷下推进剂的损伤机制和损伤演化规律等需求还存在较大差距。基于此, 对复合固体推进剂损伤行为的研究成果进行全面总结是十分必要的。本文首先对微观尺度($<10^{-6}$ m)、细观尺度($10^{-6}\sim 10^{-2}$ m)和宏观尺度($>10^{-2}$ m)3个单一尺度下复合固体推进剂损伤行为的研究进展进行系统梳理; 然后, 结合跨尺度分析的思想和相关理论, 重点从构效关系构建和数值模拟方法2个方面介绍复合固体推进剂损伤行为的研究进展; 最后, 针对当前研究中存在的若干不足, 对未来研究工作重点提出展望, 以期从事固体推进剂损伤研究的科研工作者提供借鉴。

1 复合固体推进剂损伤行为的微观尺度研究进展

微观力学性能聚焦于材料原子和分子尺度, 研究

材料结构中空穴、点缺陷和位错场等的分布状态、生成方式及演化机制。针对复合固体推进剂的损伤行为, 微观层次则是在原子、分子尺度上研究分子间相互作用与材料损伤演化规律之间的联系, 如图1所示。由于缺乏有效的试验装置和测试手段, Deng等^[5-6]指出, 目前在微观尺度上直接开展材料的损伤观测试验存在非常大的难度, 而1993年Cumming等^[7]在国际会议上报道的研究含能材料分子间相互作用的分子动力学(MD)方法是一种有效的手段。国内外研究者已广泛应用MD法分析讨论了固体推进剂的相容性、玻璃化转变和微观力学性质等^[5-6, 8], 针对应用MD方法在微观尺度上研究复合固体推进剂损伤行为的相关进展, 本文重点从以下2个方面进行综述。

1.1 组分对固体推进剂性能影响的数值模拟

为了探寻组分微观结构初始损伤对复合固体推进剂性能的影响, 从而指导推进剂的配方设计, 刘冬梅等^[9]应用MD方法开展了推进剂用HMX晶体力学性能的数值模拟, 计算结果表明: 纯HMX晶体、掺混质量分数5.6% RDX的HMX晶体和具有质量分数5.6%空穴缺陷的HMX晶体的模量(包括拉伸模量、剪切模量和体积模量)依次呈现降低趋势。而Xiao等^[10]通过应用MD方法模拟RDX晶体缺陷对其最大引发键长的影响表明, 晶体缺陷会对推进剂的稳定性产生一

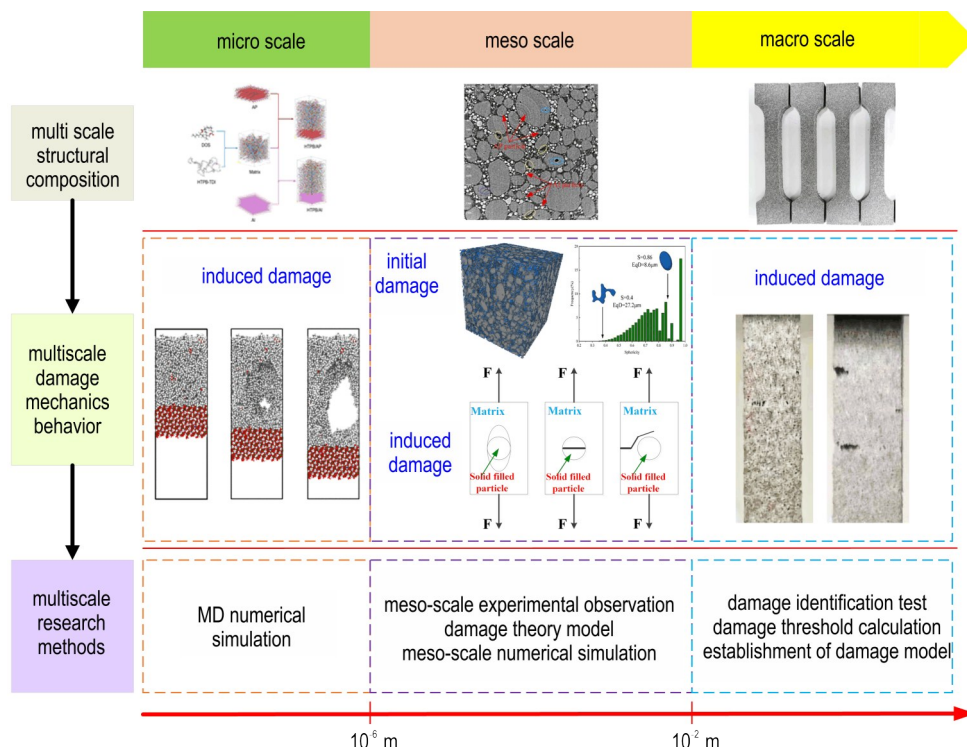


图1 复合固体推进剂损伤行为多尺度研究系统图

Fig.1 Multi-scale research system of composite solid propellant

定的影响。为了探寻黏合剂特性对复合固体推进剂诱导损伤的影响,Zhang等^[11]应用MD方法模拟了中性聚合物黏结剂(NPBA)在NEPE高能固体推进剂中的吸附行为和机理,结果表明,少量该黏结剂的添加能提高推进剂中RDX/PEG/NPBA体系的粘接界面强度,降低发生“脱湿”损伤的概率,而且粘接界面强度提高的主要原因是NPBA中的N原子和RDX中的H原子能够形成强氢键。此外,NPBA的分子结构发生改变时会影响RDX/PEG/NPBA体系的粘接界面强度和“脱湿”损伤发生的概率。而国内的张丽娜^[12]应用MD方法计算GAP-PDMH与推进剂组分RDX、HMX和AP之间的相互作用及径向分布函数时,发现GAP-PDMH与上述填充颗粒之间同样存在较强的氢键作用。

1.2 粘接界面微观损伤演化的数值模拟

Li等^[13]指出,基于MD的数值模拟方法是在微观尺度上研究复合材料变形和内部粘接界面发生失效及损伤演化的有力工具。虽然,Zhu、付一政等^[14-15]应用MD方法对黏合剂HTPB、PEG与Al之间的结合能以及AP/HMX复合材料的结合能等进行了研究,并发现了温度、应变率等因素会影响结合能,但由于缺乏有效的力场等原因,关于应用MD方法研究外载荷条件下含能固体填充颗粒与黏合剂基体的粘接界面发生局部微观变形、失效机理和力学性能的研究比较匮乏。近年来,在Lv等^[16-17]开展拉伸加载下高聚物黏结炸药(PBX)粘接界面变形、损伤等MD数值模拟研究的基础上,Zhang等^[18]提出了全原子MD模拟方法,通过植入改性聚合物一致力场来描述分子内和分子间的相互作用,讨论了加载速率、温度和含水量对AP-HTPB粘接界面强度和拉伸曲线的影响,典型结果如图2所示。

模拟结果表明:随加载速率增加,界面强度和模量呈现增加趋势,而且界面变形和损伤最初发生在HTPB基体内部,然后逐渐扩展到界面区域。

1.3 当前研究中存在的不足

在微观尺度上,针对复合固体推进剂的损伤行为研究,主要存在以下不足:

(1)数值模拟计算的研究水平还处于初步阶段,受到力场、模拟体系原子数量、计算机性能和模拟效率等多种因素的限制,计算模型、计算规模等与推进剂的实际结构和损伤行为演化情况还存在较大差距;

(2)数值模拟计算结果和相关结论,多用于从微观层面定性揭示推进剂的损伤机理和失效性能变化规律,缺乏与细观尺度和宏观尺度下性能关系以及研究结果的关联性分析,同时缺乏评估微观尺度研究结果有效性的试验验证研究。

2 复合固体推进剂损伤行为的细观尺度研究进展

细观力学主要研究肉眼不可见的材料微孔洞、微裂纹、夹杂的成核机理和演化规律。针对复合固体推进剂的细观损伤行为,是在细观结构尺度上分析推进剂内部微孔洞和微裂纹等的损伤演化规律。自20世纪60年代前后开始,国内外研究者先后应用观测试验、理论模型推导和数值模拟的方法对复合固体推进剂的细观损伤行为进行了广泛研究。

2.1 细观损伤观测试验

随着科学技术的进步,光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、微CT、同步辐射光源(SRF)等观测设备相继成为研究复合固体推进剂细观损伤行为的装置,并在

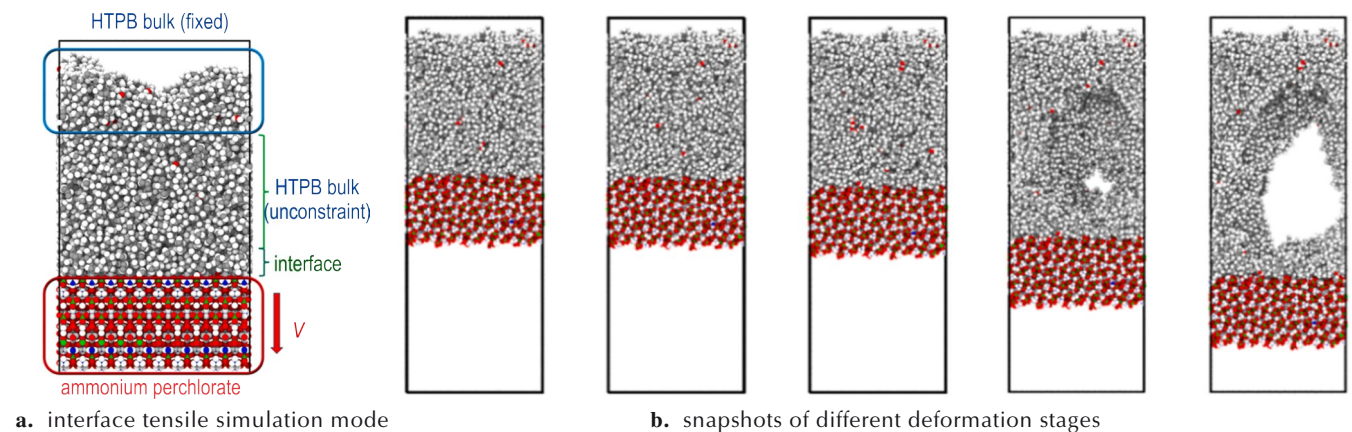


图2 10^9 s^{-1} 加载应变率条件下HTPB推进剂的粘接界面原子拉伸变形过程的快照图^[18]

Fig.2 Snapshots of the interface atomic tensile deformation process for HTPB propellant under the loading rate of 10^9 s^{-1} ^[18]

推进剂初始损伤确定和损伤演化过程获取2个方面取得了重要进展。

2.1.1 初始损伤观测试验

损伤的出现会导致复合固体推进剂的细观结构发生变化,并直接体现为推进剂表面细观形貌的改变。因此,在一定放大倍数的OM、SEM、微CT和SRF设备上对不受力的推进剂切片试验件进行观测,即可直接获得推进剂的细观结构图片,通过对图片进行判读就能确定固体推进剂的初始损伤位置和损伤大小等情况。例如,图3为周水平等^[19]利用SEM观测到的以PGAP为黏合剂的NEPE类复合固体推进剂(PE-G)与以PEG为黏合剂的NEPE类复合固体推进剂(PE-P)的形貌图,图3中红色部分为采用Image J显示的2类推进剂的初始损伤;图4为刘晋湘等^[20]利用SEM观测到的具有初始损伤和无损伤的AP颗粒的形貌图,其中具有初始损伤的AP-1颗粒表面凹凸不平,且部分呈条状和棒状,并局部有微裂纹,而无损伤的AP-2颗粒表面光滑、形状相对规则。通过对SEM观测图像进行比

较,Cerri等^[21]指出利用有效的二硝酰胺铵(ADN)稳定剂和合适的工艺技术可以降低Desmophen®-D2200基推进剂内的初始缺陷,但随老化时间增长,固体填充颗粒AP表面的条纹数量和尺寸会增加。基于吸收衬度成像机制和获得的NEPE复合固体推进剂的二维重构切片图像,王龙等^[22]判断由于受生产过程工艺及不同组分材料属性差别等的影响,推进剂细观结构的初始缺陷以AP颗粒内部的孔洞和颗粒/基体粘接界面的初始“脱湿”为主。虽然上述观测方法具有简单易行、直观等优点,但由于获得的图片属于二维形貌图,而且在推进剂切片试验件制作过程中容易引入新裂纹,因此,复合固体推进剂初始损伤信息的确定更多局限于对表面可见微裂纹、微孔洞观测结果的定性分析。为突破上述研究中存在的局限,根据微CT设备中X射线能穿透材料本体的特点,2009年前后,美国Illinois大学先进火箭仿真中心(CSAR)的Collins等^[23-24]最先利用微CT设备获得了复合固体推进剂的三维重构细观结构图。此后,国内强洪夫团队利用新

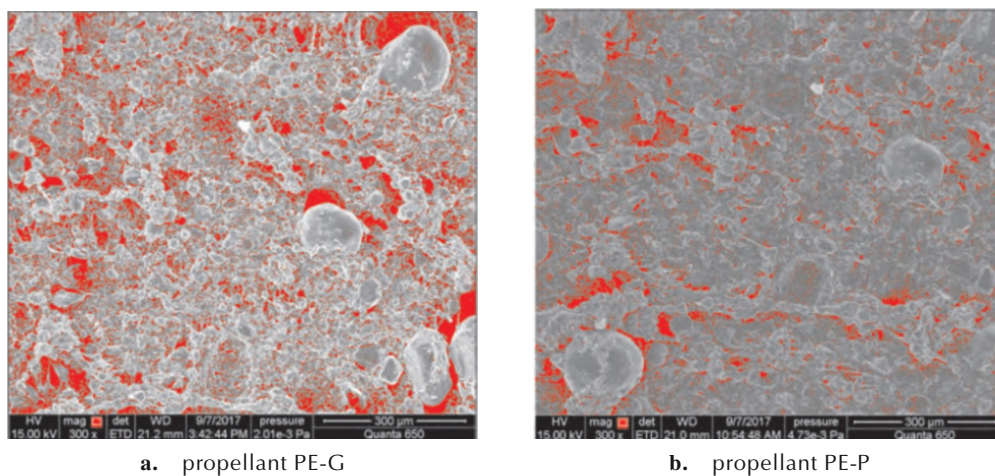


图3 推进剂PE-G与PE-P的初始损伤^[19]

Fig.3 Initial damnification of propellants PE-G and PE-P^[19]

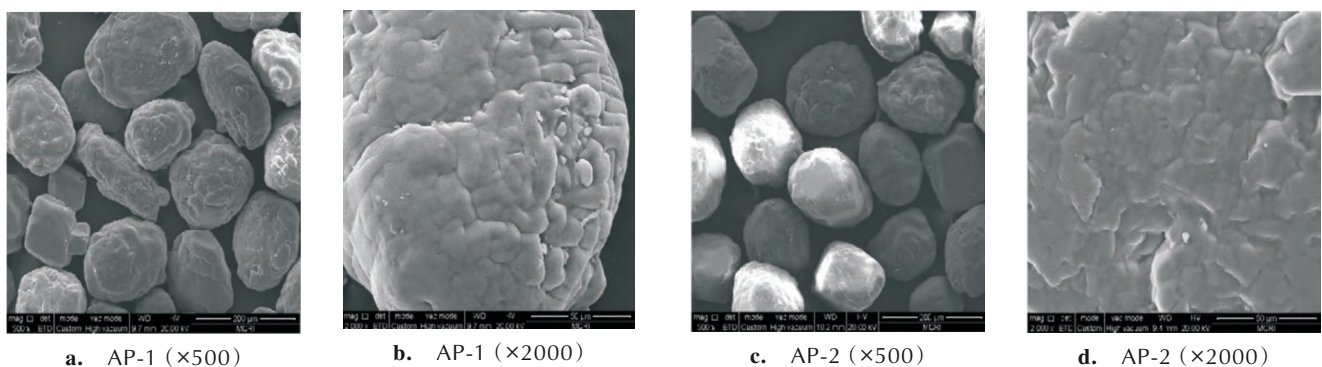


图4 AP-1和AP-2表面形貌的扫描电镜图^[20]

Fig.4 SEM images of the surface morphology of AP-1 and AP-2^[20]

一代桌面微CT设备(型号 Skyscan 1172)同样研究了不同类型复合固体推进剂的三维细观结构形态^[25-26],并根据材料中不同组分对同一波长X射线的吸收能力不同进而导致在重构图像中灰度值存在区别(即亮度不同)的原理,通过图像滤波、设定灰度值阈值进行图像阈值分割等过程提取了推进剂中的不同组分,并应用 AVIZO 19.0 等后处理软件对获得的初始缺陷(即孔隙)的空间分布、尺寸分布和形状因子分布等信息进行了三维表征,典型结果如图 5 所示。由上述观测分析的原理和步骤可知,基于微CT设备获取复合固体推进剂初始缺陷或初始损伤分布的误差,主要来源于重构图像处理效果、灰度值阈值的遴选方法和精确性以及统计分析方法等。

2.1.2 损伤演化观测试验

在细观尺度上,针对不同载荷下复合固体推进剂的损伤演化过程,国内外研究者广泛应用 SEM 和微CT设备对加载后推进剂的断面形貌进行观测的试验方法,通过将获得的形貌图片与加载前推进剂的细观结构初始形貌进行比对,反推得到了加载过程中推进剂的损伤演化机理,同时定性分析了加载速率、温度、压强、老化和预应变等因素对损伤演化的影响规律。例如,王亚平等^[27]通过研究发现,常温较低应变率加载时,HTPB 复合固体推进剂的细观损伤演化过程为“脱湿”,而应变率升高时转变为以基体撕裂为主。Wang 和 Chen 等^[28-29]的研究表明,随温度降低和应变率升高,复合固体推进剂的细观损伤演化过程以 AP 颗粒发生断裂为主。Geng 等^[30-32]通过对双轴加载和剪切加载下复合固体推进剂的细观损伤形貌进行分析发现,其损伤演化过程的变化规律与单轴加载时保持一致,仅在损伤程度上存在区别。Zhou^[33]、Wang^[34]和

Zhang^[35]等通过研究发现,老化温度和高于 9% 的预应变能够对 HTPB 复合固体推进剂的“脱湿”损伤演化过程产生明显影响,而压强却能延迟推进剂“脱湿”损伤的发生,并能抑制损伤演化过程的程度。虽然上述方法对认识不同载荷下复合固体推进剂的细观损伤行为提供了重要的技术支撑,但毕竟没有真正意义上通过观测获得加载过程中复合固体推进剂的损伤演化情况,对于推进剂损伤行为的分析和判别可能存在偏差,更无法直接应用于宏观力学响应规律的分析。针对上述不足,基于原位 SEM 设备,曾甲牙^[36]、陈煜^[37]、Marthinus^[38]和 Shi^[39]等开展了室温低速拉伸加载下 HTPB 和 NEPE 复合固体推进剂的细观损伤演化观测试验,而李高春等^[40]则采用数字图像相关法(DIC)对 SEM 原位拉伸加载下的电镜照片开展了进一步分析,获得了 HTPB 复合固体推进剂的细观表面变形场。通过对微CT设备加装原位拉伸加载台,强洪夫团队获得了室温加载过程中 HTPB 复合固体推进剂的细观损伤演化图像,进一步验证了“脱湿”损伤过程的演化机理^[41]。为了解决从准静态到较高应变率($\geq 0.1 \text{ s}^{-1}$)加载条件下复合固体推进剂的细观损伤演化原位观测问题,魏晋芳和 Liu 等^[22,42-43]应用了新一代 SRF 技术和自研原位力学试验系统,典型装置如图 6 所示。基于试验结果,不仅给出了具有初始“脱湿”损伤缺陷的 NEPE 复合固体推进剂的细观结构损伤演化过程,而且指出准静态拉伸加载时在 HTPB 复合固体推进剂内部的裂纹存在水平传播和竖合并 2 种传播模式。此外,为了与原位 SEM、微CT和 SRF 的加载台和测试空间的尺寸相匹配,上述研究者还分别通过数值仿真等手段设计了多种非标微型固体推进剂试件^[22,41,44],典型构型和尺寸如图 7 所示。

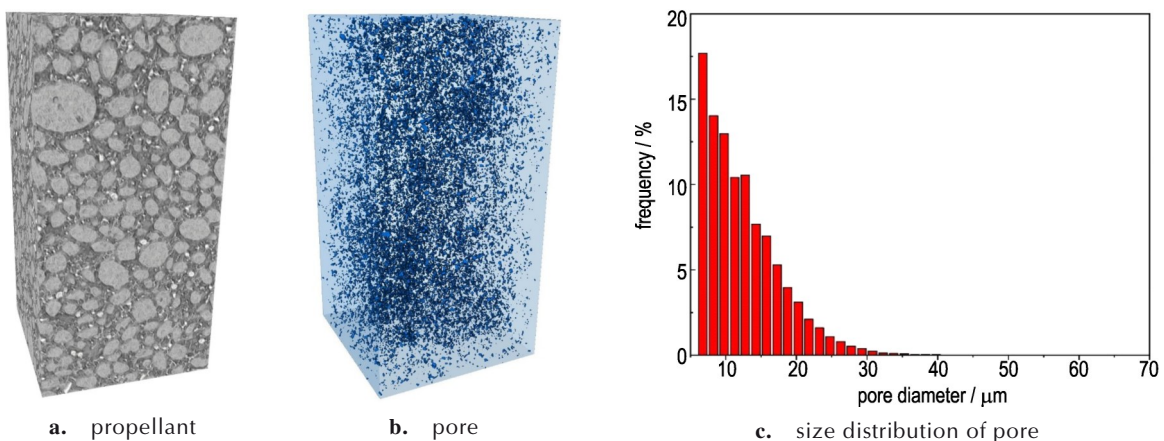


图 5 HTPB 推进剂的结构组分三维空间分布图^[26]

Fig.5 Three dimensional distribution diagram of structural components for HTPB propellant^[26]

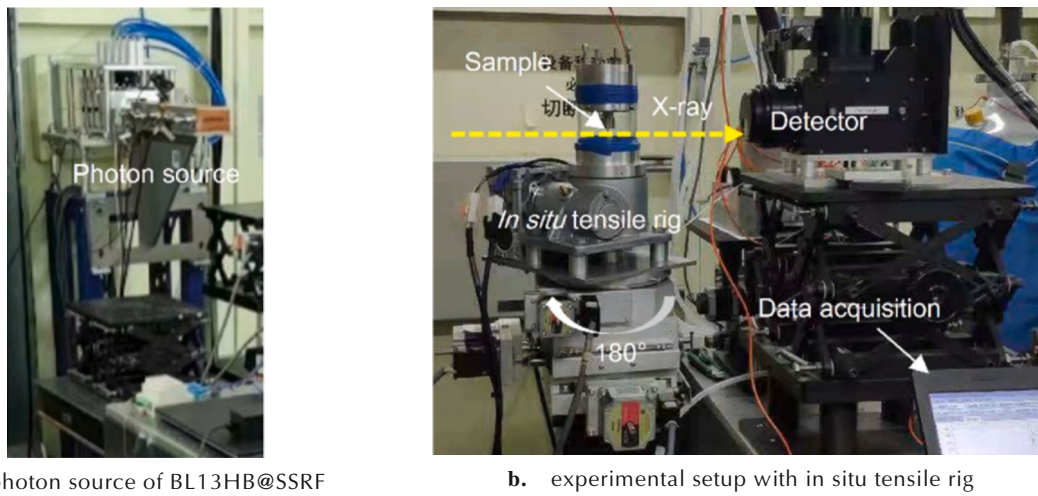


图6 基于同步辐射光源的原位拉伸试验设备^[43]

Fig.6 In situ tensile test equipment based on advanced synchrotron X-ray micro tomography^[43]

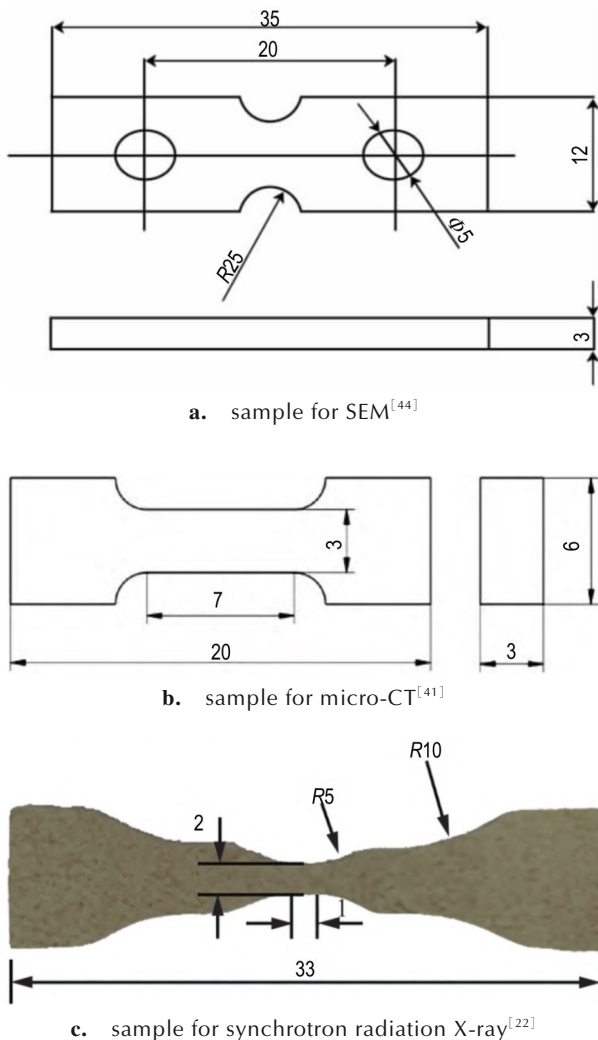


图7 原位拉伸固体推进剂试验件构型尺寸图(mm)^[22,41,44]

Fig.7 Configuration dimension diagram of solid propellant sample for in-situ tensile test (mm)^[22,41,44]

2.2 细观损伤演化模型

随着研究人员对复合固体推进剂损伤演化过程关注度的不断提升以及对推进剂性能深刻认识需求的不断提高,以数学模型定量描述不同载荷下细观损伤的演化,变得越来越重要。基于此,在细观尺度上,国内外研究者重点应用基于图像信息分析和内聚力理论的方法开展了相关研究,并取得了重要突破。

2.2.1 基于图像信息分析的损伤演化模型

由于基于分形几何和分形维数思想的分形理论可以定量描述复杂形体不规则性程度和破碎程度,而固体推进剂等材料的细观结构形貌具有粗糙性、极不规则性和复杂性等特征,相应的形貌图片被认为存在分形特征,因此,陈煜等^[37]认为可以应用分形维数作为表征参量定量描述复合固体推进剂的细观损伤。通过对原位 SEM 观测图像进行处理分析,杨秋秋等^[45-47]不仅获得了 HTPB、NEPE 和 GAP 多型复合固体推进剂在准静态单轴拉伸时的分形维数随变形程度非线性增加的变化曲线,而且讨论了键合剂等因素对该曲线的影响规律。此后,强洪夫团队^[48-49]以分形维数为表征参量分析了温度、应变率和老化时间对 HTPB 复合固体推进剂细观损伤演化的影响规律,并基于微 CT 观测图像建立了以分形维数为参量的损伤演化模型,拟合曲线如图 8a 所示。由 2.1 节研究进展可知,当复合固体推进剂细观结构发生损伤时,相应的孔洞和孔隙数量会增加。类比其它颗粒增强复合材料的分析方法, Luo 等^[50]提出可以选取细观结构重构图像中孔隙率的变化表征推进剂的细观损伤演化。李世奇等^[41]应用该方法确定了固含量 86% 的三组元 HTPB 复合固体推

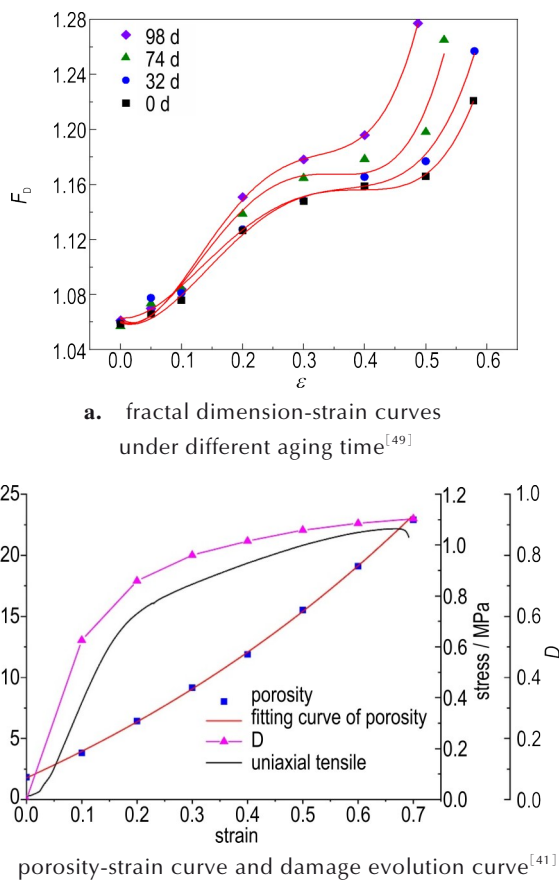


图8 复合固体推进剂的典型损伤表征参量随应变变化的曲线图^[41,49]

Fig.8 Curves of typical damage characterization parameters for composite solid propellants with strain^[41,49]

推进剂的初始孔隙率约为 1.8%，且随单轴拉伸变形程度增大，推进剂的孔隙率呈指数增加趋势(图 8b)，相应的损伤演化模型如式(1)所示。针对单轴拉伸加载下 NEPE 复合固体推进剂的细观损伤演化，魏晋芳、Liu 等^[42-43]发现其孔隙体积变化同样满足指数型增加规律，并给出了如式(2)所示的相对孔隙变化率方程。刘新国等^[48]还指出复合固体推进剂的细观形貌重构图像的灰度值与推进剂内部组分密度相关，当损伤增大时灰度值降低，因此，可利用图像灰度值的变化建立推进剂的细观损伤演化模型，模型形式为应变的多项式。

$$\begin{cases} D(\varepsilon) = 1 - f_0/f(\varepsilon) \\ f(\varepsilon) = -0.16806 + 0.18645\exp(\varepsilon/0.91462) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $D(\varepsilon)$ 为随拉伸应变 ε 变化的损伤演化函数； $f(\varepsilon)$ 为拉伸变形过程中推进剂的孔隙率； f_0 为推进剂的初始孔隙率。

$$\dot{\Phi}^r = d(V_{void}^i/V_{void}^f)/d\varepsilon \quad (2)$$

式中， Φ^r 为相对孔隙率变化率； V_{void}^i 和 V_{void}^f 分别为第 i 时刻和最终时刻的孔隙体积， μm^3 ，其数值可通过对 CT 三维重构图像进行处理统计分析得到。

2.2.2 基于内聚力理论的损伤演化模型

为研究孔洞的发展和微裂纹的形成等非线性损伤行为，19 世纪 60 年代，Dugdale^[51]和 Barenblatt^[52]提出了反映细观粘接界面损伤演化的内聚力模型 (CZM)，该模型将损伤的发展分为 4 个主要阶段，即不含损伤、损伤萌生、损伤发展和失效破坏。通常来说，损伤变量 D 的取值范围 0~1 对应内聚单元的刚度衰减数值，表示单元从没有损伤到完全损伤。根据内聚法则或曲线形式的不同，CZM 主要包括指数型、双线性、多项式型和梯形。结合数值仿真计算，Alfano 等^[53]讨论了上述基于不同内聚法则建立的 CZM 的适用性。其中，双线型和指数型 2 种 CZM 在描述固体推进剂的细观结构粘接界面“脱湿”损伤时得到了最为广泛的使用。例如，早在 1998 年，美国空军科学研究中心的 Ravi-Chandar 教授就已开始使用双线性 CZM 研究准静态条件下复合固体推进剂的开裂行为^[54]。同时，针对原始 CZM 在具体应用过程中存在的不足，国内外研究者重点从曲线形式改变和耦合率温相关性 2 个方面进行了修正或改进。例如，2017 年，针对固体推进剂材料在拉伸过程中应力先线性上升，而后加速损伤下降的特点，通过将原来的线性下降趋势变更为指数型从而优化双线性模型的软化段，封涛等^[55]建立了线性-指数型 CZM，并将其应用于 HTPB 复合固体推进剂的细观损伤演化数值模拟。此后，Hou 等^[56]利用这种分段式 CZM 描述了含 HMX 的改性双基推进剂 (CMDB) 的细观损伤演化。2020 年，为了解决内聚力法则在描述 NEPE 复合固体推进剂细观损伤时必须同时满足高断裂能和张力位移非线性变化的特点，综合 Tvergaard 等^[57]提出的梯形内聚力法则和 Needleman^[58]提出的多项式内聚力法则，侯宇菲等^[59]建立了多项式-梯形 CZM，并完成了相应模型 VUMAT 子程序的编译。Lee、Ashcroft 等^[60-61]通过研究发现，粘接界面的失效具有明显的率温相关性。目前，用于构建率温相关 CZM 的主要方法可分为两类，分别是直接与其它粘弹性本构模型相耦合的方法以及将 CZM 参数表示为率温相关函数的方法。由于标准三参量固体模型是较为简单的具有粘弹性力学特性的本构模型，因此，2012 年，Han 等^[62]通过将该模型中的应力和应变分别以指数型 CZM 的界面牵引力和界面位移替换，同时用

dT_n/du_n 替换并联弹簧的弹性模量, 然后分别以刚度系数 k_2 和内聚粘度 η^{CZ} 替换 Maxwell 模型的弹簧弹性模量和粘壶粘性系数, 构建了率相关的 HTPB 复合固体推进剂粘接界面损伤演化的改进型 CZM 模型。2019 年, 为描述粘接界面性能的松弛效应和温度相关性, Cui 等^[63] 将标准线性固体松弛模型作为松弛系数得到了临界位移、内聚强度和初始斜率参数的时变关系, 同时将时温等效因子引入到 CZM 中, 最终获得了帕克-保利诺-勒斯勒尔 (PPR) 型修正 CZM。

2.3 细观损伤数值模拟

试验研究在揭示复合固体推进剂的细观损伤行为变化规律方面发挥了重要作用, 但由于当前试验装置的局限性和推进剂细观损伤演化过程的复杂性, 基于试验的研究方法还不能有效获得所有载荷工况下复合固体推进剂的细观损伤演化过程, 而数值模拟计算是一种有力的补充。该方法遵从建立固体推进剂的细观有限元模型、赋予组分和界面本构模型以及开展数值仿真计算的步骤开展研究, 针对上述基本流程, 本文重点从以下 3 个方面进行相关研究进展的综述。

2.3.1 细观有限元模型构建

为了研究复合固体推进剂受载时真实细观结构的损伤演化情况, 必须建立可以客观反映不同配方推进剂真实构成的分析模型。对于复合固体推进剂类颗粒增强复合材料, 根据其细观结构的特点, 国内外研究者从不同理论和角度出发, 提出了较多的数值算法以生成细观颗粒填充数值模型, 主要包括: 随机填充法和细观观测与数字图像处理技术相结合的方法。

针对随机填充法, 按照在周期性代表性体积单元 (RVE) 内随机填充颗粒的顺序可大体分为以 Widom 研究为代表的串联 (或连续、顺序) 填充算法和以 MD 为代表的并联 (或并列、并行、并发等) 填充算法 2 种类型, 具体的建模思路和优缺点详见文献^[64]。由于通过试验观测发现, 细小填充颗粒 (主要是 Al 和尺寸较小的 AP) 不易发生粘接界面“脱湿”损伤现象, 更多显示出对复合固体推进剂力学性能的增强作用。因而, 上述 2 种类型方法在建立细观颗粒填充数值模型时, 均通过 Mori-Tanaka 等^[65] 方法将细小填充颗粒的体积分数归纳于黏合剂基体之中, 而将重点放在较大固体颗粒的填充上。其中, 常武军^[66] 应用串联填充算法建立了固含量体积分数约为 76% 的 HTPB 复合固体推进剂的颗粒随机堆积模型, 模型中 AP 颗粒处理为实心圆。结合串联填充算法和多向沉降算法, Shen 等^[67] 发

展了一种多级配、高颗粒含量的复合固体推进剂细观结构模型构造方法, 并引入统计分析的方法对模型的有效性进行了检验, 同时提出了基于颗粒的 Voronoi 网格剖分方法。并联填充算法虽然大致可分为蒙特卡罗算法和 MD 算法, 但由于后者算法简单, 且具有良好的适应性及模型生成能力, 得到了迅速发展, 并广泛应用于生成高密度颗粒填充复合材料的细观模型。2001 年, Knot^[68] 首次将 MD 算法应用于复合固体推进剂的细观结构模型建立, 所建三维球形颗粒填充模型考虑了推进剂配方级配情况。在对推进剂颗粒尺寸信息和细观结构统计特征进行分析的基础上, 2002 年及以后, Kochevets、Maggi 等^[69-70] 通过对 MD 算法进行进一步的优化与并行化, 使得构建多颗粒和高体积比的复合固体推进剂细观结构模型成为可能, 并大幅提升了计算效率。2008 年, Kumar 和 Collins 等^[71-72] 使用自主研发的 Rocpack 软件生成了固体推进剂的细观结构模型, 通过引入增强模拟退火对周期单元内的颗粒位置进行了优化, 并研究了有限元网格划分对数值计算结果的影响。针对具有高能量的四组元 HTPB 复合固体推进剂的细观损伤数值模拟, 2018 年, 封涛等^[73] 采用 MD 方法建立了同时包含 AP 颗粒和 RDX 颗粒的细观填充模型, 2 种颗粒均以实心圆表示。通过计算发现, 在 RDX 的质量分数处于 0~37% 范围时, 较大粒径的 AP 颗粒/基体粘接界面首先发生“脱湿”现象, 而 RDX 颗粒/基体粘接界面却始终无明显的“脱湿”行为。2018 年, 针对细观结构中存在的颗粒破碎、孔隙和粘接界面“脱湿”3 种形式的初始损伤, 封涛等^[74] 采用 MD 方法分别建立了相应的填充颗粒模型以及 3 种初始损伤同时存在的填充颗粒模型。所建模型中假设初始损伤在粘接界面内均匀随机分布, 且采用弱化的粘接界面模型进行描述, 并定义粘接界面缺陷单元数与总数之比为初始粘接界面损伤量, 该损伤量最大值为 30%。2019 年, 侯宇菲等^[75] 利用 MD 方法分别建立了考虑级配的圆形颗粒和十四边形多边形颗粒的细观填充模型, 通过对 $1\sim 500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下 5 组数值仿真结果和试验结果的对比发现, 多边形颗粒填充模型更符合 HTPB 复合固体推进剂的细观结构特点。

虽然随机填充法可在构建复合固体推进剂的细观颗粒填充模型时考虑填充比和颗粒粒径分布范围等因素, 但 Kosiba 等^[76] 认为所建模型仍与推进剂的真实细观结构形态存在一定差异, 并提出了细观观测与数字图像处理技术相结合的方法, 即充分应用 SEM、微 CT

等设备能够精确获得复合固体推进剂微观结构形貌的优势,并辅助图像二值化处理、阈值分割、特征图像识别提取和边缘处理等图像处理技术最终得到填充颗粒分布规律和形状因子等信息,从而为细观颗粒填充RVE模型的构建提供支撑。其中,分割阈值既可以基于经验人为设定,也可以根据细观结构形貌图像的灰度直方图进行选取或直接使用经典的Otsu等算法进行计算,而特征图像边缘处理可以应用最小二乘法等算法。同时,还可以采用形态学算子等方法去除二值图像中的小噪声和空洞以提高特征组识别提取的精度。基于上述思想和方法,2008年,Gallier等^[77]基于三组元复合固体推进剂的微CT照片重构了三维细观结构,并对填充颗粒的粒径和间距进行了统计分析。2011年,基于HTPB复合固体推进剂的表面形貌SEM观测图像,刘著卿等^[78]对推进剂细观颗粒的分布进行了研究,并建立了圆形和椭圆形颗粒填充的细观数值模型。2018年,基于HTPB复合固体推进剂的微CT扫描二维图像,申柳雷等^[79]采用等圆最优装载方式放置若干粒径相等的颗粒方法建立了推进剂的细观填充颗粒模型。2018年,基于微CT三维观测结果,Vijay等^[80]构建了HTPB复合固体推进剂的细观结构模型,并利用填充密度等参数比较了构建模型与真实结构之间的一致性。

2.3.2 本构模型及参数确定

针对复合固体推进剂类颗粒增强复合材料,在开展细观数值模拟计算时需对其基体材料、固体填充颗粒以及两者之间的粘接界面赋予相应的本构模型,并给出对应模型的参数确定方法。目前,针对填充颗粒,由于其弹性模量与基体和粘接界面相比非常大,可近似为刚性,因此,通常采用线弹性本构模型对其力学响应进行描述。针对粘接界面的力学响应,一般应用2.2.2节介绍的基于内聚力理论的损伤演化模型进行描述,但在具体模型形式的选择上存在区别。针对基体材料的力学响应,国内外研究者所应用的本构模型区别比较明显,主要包括弹性模型、超弹性模型和粘弹性模型。例如,侯宇菲等^[59,75]采用弹性模型描述将Al颗粒等效到基体材料后的等效基体的力学响应,而Li等^[81-82]则采用Ogden型超弹性本构模型,Cui等^[73,83]使用基于Prony级数的线粘弹性本构模型。

目前,确定基体材料、固体填充颗粒以及两者之间的粘接界面的本构模型参数值,主要采用以下4种方法:(1)查阅文献法,即通过在文献中查找相同测试工况下组分相同或相似的材料力学性能数据,从而确

定所研究材料的本构模型参数值;(2)试验测试法,即开展与本构模型所描述力学响应相对应的材料的理化性能试验和力学性能试验,通过对试验结果进行分析拟合,从而确定模型参数值。例如,应用接触角法、Washburn毛细管上升法、点滴法和Young's方程等手段,张兴高、赵玖玲等^[84-85]测量计算了HTPB黏合剂基体和AP颗粒的粘接界面粘附功,并分析了该数值随老化时间增加和温度升高的变化规律;(3)理论推导计算法,即通过对简化的细观结构模型的受载变形进行理论推导计算,并引入应用上述方法(1)和(2)确定的部分参数数值,最终得到粘接界面能或临界“脱湿”应力等参量的数值。例如,2016年,在彭威等^[86]研究结果的基础上,利用颗粒填充简化模型以及粘接界面发生“脱湿”瞬间的能量关系,强洪夫教授团队的王哲君等^[87]推导得到了单轴拉伸加载下复合固体推进剂发生“脱湿”损伤的临界应力表达式 $\sigma_d^2 = 4E^m\gamma(2 + 3f_s)/[3r(1 - f_s)]$,该表达式可以分析基体模量 E^m 、填充体积分数 f_s 和颗粒粒径 r 等因素对临界应力 σ_d 的影响关系。同年,韩龙^[88]采用类似方法推导得到了粘接界面发生粘弹性“脱湿”损伤的临界粘接能 G_c 的表达式,考虑了玻璃态剪切模量 G_0 、体积模量 K_0 、固体颗粒填充体积分数 c 等因素;(4)反演识别法,该方法是一种基于所获得的宏观试验数据,应用细观损伤数值模拟等效结果与试验结果进行反复比对,从而最终实现对尚未完全确定的本构模型参量进行反向分析及最优拟合的间接参数确定方法,基本流程图如图9所示^[89]。其中,固体填充颗粒、基体材料和粘接界面的本构模型参数值的确定,一般分别应用方法(1)、方法(2)和方法(2)~(4),也有少部分研究者采用方法(1)确定了粘接界面的本构模型参数^[90]。由于前3种方法相对比较简单,因此,本文重点对第4种方法的研究进展进行总结。

按照图9中目标函数建立方法及Hooke-Jeeves(直接搜索法)优化算法应用方式的不同,基于反演识别法确定粘接界面本构模型参数的具体思路可分为2类,分别为:整体目标优化法和局部分步优化法。由于试验和细观数值模拟是2个相互独立的过程,前者的数据点个数和间距取决于试验设定的采集频次,而后者数据点的数目和间距则决定于有限元计算的增量步输出,因此,无论是整体目标优化法,还是局部分步优化法,为了通过比对试验结果和仿真结果进而建立目标函数,都需要首先采用线性插值法对试验结果或仿真结果进行处理,即以其中一个结果曲线为基准,然后

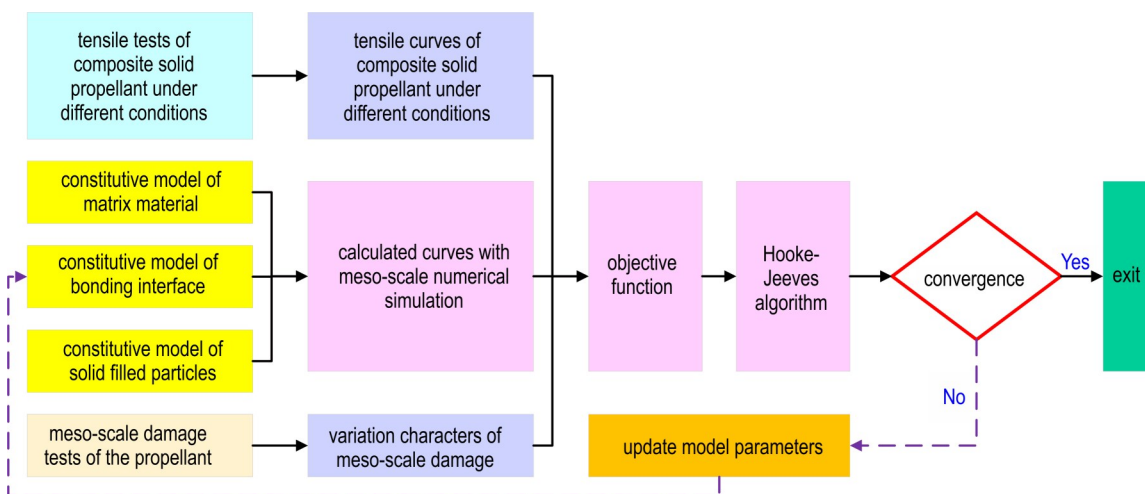


图9 固体推进剂粘接界面本构模型参数的反演流程图^[89]

Fig.9 Flow chart of interface constitutive parameters inversion process of solid propellant^[89]

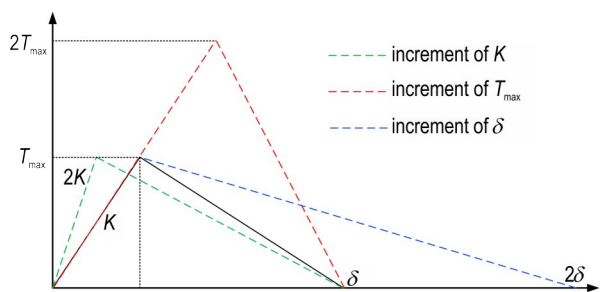
在另一个结果曲线上找到离基准点最近的最小区间,最后在区间两端点之间线性插值得到与基准数据进行比对的结果^[59,91]。通常,整体目标优化法的目标函数设定为:

$$\min R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\varepsilon_i}^s(K, T_{\max}, \delta) - \sigma_{\varepsilon_i}^e)^2 \quad (3)$$

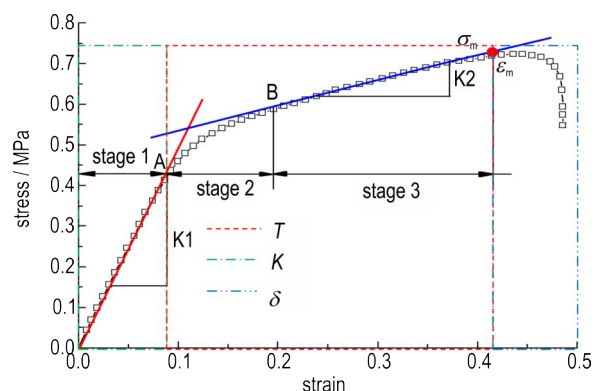
式中, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为整条曲线上选点总个数; $\sigma_{\varepsilon_i}^s$ 和 $\sigma_{\varepsilon_i}^e$ 分别为不同选点应变处 ε_i 对应的细观数值模拟应力和试验应力, MPa; K 为粘接界面 CZM 的待定初始刚度参数, $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$; T_{\max} 为粘接界面 CZM 的待定临界界面强度参数, MPa; δ 为粘接界面 CZM 的待定界面失效位移参数, mm。当满足 $\min R \leq R_{\text{lim}}$ (R_{lim} 为误差极限值) 时, 认为已经通过反演识别法得到了模型参数最优值。利用上述方法, Cui 等^[83] 计算得到了 HTPB 复合固体推进剂中 AP 颗粒与基体之间粘接界面的本构模型参数值, 而韩龙^[88] 则依次得到了 NEPE 复合固

体推进剂中 AP 颗粒、RDX 颗粒与基体之间粘接界面的本构模型参数值。

由于反演识别法需反复迭代才能获得最优值, 因此, 如果不设定所求参数的反演边界, 则整个反演过程将异常复杂。为此, Zhi 和 Chang 等^[92-93] 分析了 CZM 中 3 个模型参数变化 (图 10a) 对细观数值模拟计算结果的影响范围和程度。通过分析发现: 初始刚度 K 的变化主要影响应力-应变曲线的阶段 1 (图 10b 绿色虚框所示), 即近似线性上升段; 而临界界面强度 T_{\max} 的变化主要影响抗拉强度和“脱湿”点位置, 即主要影响应力-应变曲线的阶段 2 和 3 (图 10b 红色虚框所示); 界面失效位移 δ 的变化最终会影响最大延伸率, 即主要对阶段 3 之后的曲线下降段 (图 10b 蓝色虚框所示) 有显著影响。基于此, 职世君和封涛等^[94-95] 提出了可以提升反演识别计算效率和计算精度的局部分步优化法, 即先应用 Hooke-Jeeves 优化算法反演初始刚度 K ,



a. sketch of the damage model with different parameters



b. influence areas of different model parameters

图10 CZM 模型参数变化趋势示意图及影响区域图^[92-93]

Fig.10 Schematic diagram of the variation trend of different model parameters for CZM and the influence areas^[92-93]

然后获得临界界面强度 T_{\max} 的值,最后是界面失效位移 δ 。此外,在上述每个参数值确定过程中,分别应用图 10b 所示应力-应变曲线相应阶段的试验数据和细观数值模拟计算结果建立式(3)所示目标函数。

2.3.3 损伤演化过程数值模拟

目前,用于裂纹起裂、扩展的数值模拟方法主要包括有限元法(FEM)、扩展有限元法(XFEM)、数值流形元法(NMM)、近场动力学方法(PD)等。例如:郑健团队应用 XFEM 模拟了 CMDB 推进剂预置中心贯穿直裂纹圆盘试验件在准静态加载下的裂纹实时扩展过程^[96],陈鹏万团队使用 NMM 模拟了 PBX 的细观破坏过程^[97],唐维、龙旭等^[98-99]采用 PD 开展了 PBX 裂纹演化及其力学性能退化的研究。由于相较 XFEM、NMM 和 PD 等方法,融合 CZM 模型的细观 FEM 无需预置裂纹、能够准确计算裂纹路径已知时的裂纹萌生与扩展过程,而且模型参数与传统物性参数之间不存在转换困难等问题,因此,在开展复合固体推进剂的细观损伤演化过程研究时计算过程更简单、计算效率更高、数值更稳定,得到了国内外研究者最为广泛的应用。为此,本文重点综述基于 FEM 的细观损伤演化过程的数值模拟研究进展。

复合固体推进剂细观结构具有多颗粒、尺寸分布跨度大及随机性强等特点,因此,为了兼顾计算精度和计算效率,必须选取合适的细观结构模型有限元网格划分方法。例如,为了有效阻止大变形时发生粘接界面“脱湿”现象后在固体填充颗粒与基体之间发生相互渗透或重叠现象,封涛等^[100]提出了在界面处定义罚函数接触约束的方法。2010年,马昌兵^[101]提出了基于“力平衡”的自适应网格法,同时针对该方法需在不同区域使用不同尺寸单元的问题,推导得到了考虑填充颗粒间相互位置信息的网格尺寸函数,以及颗粒较多时采用插值方法进行计算的思想。针对粘接界面失效分析时为了保证网格独立性和计算精度而必须知道粘聚区尺度内所需最小单元数问题,2013年,常武军^[66]推导了包含刚度、泊松比、断裂韧性和界面强度的粘聚区长度表达式,并估算得到相应数值约为 $4 \mu\text{m}$ 。2018年,申柳雪^[102]提出了适于 Voronoi 单元 FEM (VCFEM)分析的网格方法,并采用一系列意外事件检测和处理策略提高了网格质量,最后应用 4 个指标对网格质量进行了评价。2020年,侯宇菲等^[59]通过比较网格尺寸变化对计算结果的影响发现,实体单元阶次对计算结果的影响随网格尺寸减小而逐渐降低,最终可确定出满足所建有限元模型计算需求的标准网格尺

寸。2020年,在复合固体推进剂三维细观结构有限元模型网格划分过程中,针对 AP 颗粒和粘接界面,张超等^[90]使用了结构化网格划分技术,单元类型分别为 C3D8R 和 COH3D8,而将自由网格划分技术应用于基体材料,并使用 C3D10 单元类型。2021年,Francqueville 等^[82]提出了复合固体推进剂的三维细观结构有限元模型网格划分方法,其中固体填充颗粒和基体的单元类型分别为 C3D10 和 C3D10H,而不再使用针对二维模型的 CPE4 和 CPE4H 单元,并应用 Netgen 周期性网格工具。

目前,将 2.2.2 节所述基于内聚力理论的损伤演化模型应用于复合固体推进剂的细观有限元数值模拟计算,其方式主要包括粘单元(Cohesive element)法和粘接接触(Surface-based cohesive)法。其中,前者一般需要在固体填充颗粒和基体之间定义一层零厚度的损伤单元,然后根据定义的损伤准则,在计算过程中通过粘单元刚度矩阵的变化来表征细观损伤的演化;而后者则无需建立损伤单元,首先在从属表面上的离散点对主控表面进行投影以确定接触点对,然后通过面与面或面与节点之间的接触定义细观损伤关系。2种方法相比较,粘接接触法不仅实现起来比较方便,而且可以避免粘单元法在计算时存在的因为单元失效、新表面产生而导致的单元扭曲问题,收敛更容易,对网格要求较低。自 2012 年开始,职世君、封涛和张亮等^[92,94-95,103]广泛应用粘接接触法开展了复合固体推进剂的细观损伤演化数值模拟计算。

近年来,在传统单轴拉伸变形数值模拟计算的基础上,针对使役复杂载荷作用下复合固体推进剂的细观结构损伤演化,国内外研究者相继开展了剪切、蠕变、双轴拉伸和围压等载荷形式下的研究。2013年,通过给图 11a 所示细观结构有限元模型的 AB 边斜坡加载向右的恒定位移,给 BC 边斜坡加载向上的恒定位移,给 AD 边斜坡加载向下的恒定位移,给 DC 边斜坡加载向左的恒定位移,常武军^[66]获得了剪切载荷下发生不同变形程度时 HTPB 复合固体推进剂的细观损伤演化结果。2017年,Shen 等^[67]采用粘弹性简化 VCFEM 预示模型(图 11b)对 HTPB 复合固体推进剂的等效蠕变力学性能与细观结构特征参数之间的关系进行了研究。2022年,通过对细观结构有限元模型施加图 11c 所示边界条件,Wang 等^[104]研究了双轴拉伸不同加载比例下 HTPB 推进剂的细观损伤变化规律。2022年,通过在细观结构有限元模型的平行于 x 轴和 y 轴的其中一条边均施加对称约束(图 11d),沿着 y 轴

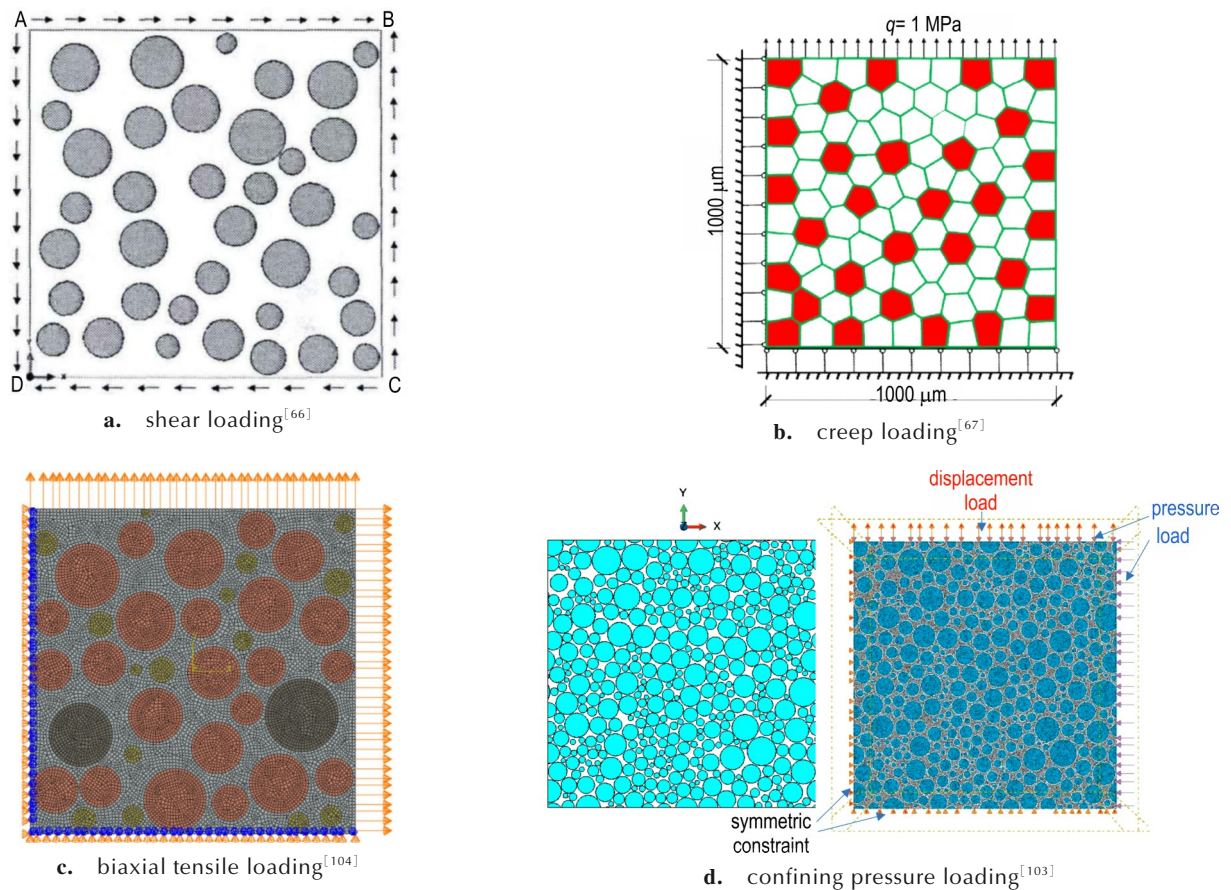


图11 不同载荷形式下微观结构有限元模型的边界条件图^[66-67,103-104]

Fig.11 Boundary conditions for microscopic structural finite element model with different loading^[66-67,103-104]

方向施加位移载荷,在另外2个未施加对称约束位移的边界施加压强载荷,张亮等^[103]开展了围压条件下HTPB复合固体推进剂细观损伤演化的数值模拟计算。此外,为了模拟加载过程中复合固体推进剂细观结构发生的基体撕裂失效破坏,赵玖玲^[105]和Hou等^[56]应用了全域CZM法,即同时在粘接界面和基体内部插入零厚度的CZM,而Wubuliaisn等^[106]则提出了适于基体破坏的临界应变能准则。为了反映初始粘接界面损伤对HTPB复合固体推进剂细观损伤演化过程的影响,通过定义形状参数,侯宇菲等^[107]提出了密度函数呈Weibull函数分布的初始缺陷模型,并基于数值模拟计算结果分析了初始损伤模型对网格的敏感性。

2.4 当前研究中存在的不足

在细观尺度上,针对复合固体推进剂的损伤行为研究,主要存在以下不足:

(1)细观损伤观测试验方面:固体推进剂的初始损伤逐渐受到国内外研究者的关注,具备了对其进行二维和三维观测的能力,基于观测结果获得了初始损

伤的具体表现形式,并在定量化表征和分析上取得了重要突破,但观测分析结果的精确性明显受到试验件加工工艺、尺寸大小、图像处理技术和统计分析方法等的影响,过程步骤有待形成标准规范。同时,由于固体推进剂的低强度、低模量、易燃易爆属性以及受限于试验装置的工作原理、加载空间大小、加载模块功能、分辨能力、图像处理能力等的限制,对固体推进剂细观损伤演化的观测还主要集中于断面分析以及准静态、单一载荷下的原位拉伸,实现复杂载荷、多载荷叠加和序贯载荷下推进剂损伤演化的动态实时观测和高精度成像仍存在较大难度;

(2)细观损伤演化模型方面:基于图像信息分析的损伤演化模型构建方法比较直观,但模型的精确性直接与细观损伤观测试验结果的准确性相关。而基于内聚力理论的损伤演化模型构建方法虽取得了许多新突破,为准确描述典型配方推进剂的细观损伤行为提供了重要支撑,但相关研究主要集中于内聚法则或曲线形式的改进,离充分反映外载荷多因素的影响还有

较大差距,而且缺乏检验所建模型有效性的方法;

(3) 细观损伤数值模拟方面: 细观有限元模型以二维为主,且固含量形状、级配和填充比仍与实际固体推进剂的细观结构组成还不完全匹配,而且确定粘接界面模型参数的方法比较复杂,缺乏统一的标准规范作为指导,损伤演化过程的数值模拟也主要集中于粘接界面“脱湿”损伤,对其它形式损伤和复杂载荷等条件下损伤演化的研究还不够充分,对计算结果有效性的检验不够全面深入。

3 复合固体推进剂损伤行为的宏观尺度研究进展

宏观损伤力学认为损伤在宏观层面上属于连续分布,并基于宏观损伤变量形式唯象表征材料的损伤特征。因此,针对复合固体推进剂的宏观损伤行为,国内外研究者应用连续损伤的相关思想和理论先后在损伤识别测试试验、临界损伤阈值确定和损伤演化模型构建方面开展了大量研究。

3.1 宏观损伤识别测试试验

目前,基于各型材料试验机、自研试验装置,同时参考 GJB 770B-2005、JANNAF 等标准,国内外研究者从单轴到多轴、单因素到多因素耦合的次序广泛开展了不同载荷条件下复合固体推进剂的力学性能试验^[108]。如能实现对上述力学性能试验过程中复合固体推进剂发生损伤时典型特征信号或参量变化的监检测,便可开展宏观尺度下复合固体推进剂的损伤识别测试试验。基于该思路,按照监检测信号或参量的属性,相关测试方法主要包括:力学信号或参量检测法、声电信号或参量检测法和图像观测分析法。

基于颗粒增强复合材料发生损伤时会引起自身体积发生变化,从而导致测试装置内流体的排开量增加的原理,20世纪60~70年代,Smith、Farris等^[109-110]先后研制了以液体和气体为介质的反映推进剂体积变化和损伤程度的膨胀计。20世纪80年代,Richter等^[111]利用液体膨胀计测量得到未损伤时固体推进剂的体积变化量较小,只有约0.15%。20世纪90年代,赵伯华等^[112]研制了基于介质油的可满足率温压耦合条件下复合固体推进剂体积变化、气孔率和模量测量的试验系统。2006年,基于气体介质的体积膨胀测试装置(图12a),通过分析测试腔室和参考腔室内的压强差,Nevière等^[113]研究了HTPB复合固体推进剂在率温条件下的体积变化规律,该方法随后被Jung等^[114]广泛

应用。2020年,张镇国等^[115]提出了在测试腔室内加装微分头、取消力传感器等进一步提升上述装置测试精度的措施,并研制了用于研究室温准静态拉伸条件下HTPB复合固体推进剂体积变化的试验系统。

在外力作用下,复合固体推进剂等材料内部的微缺陷、微裂纹状态发生变化时,以弹性波形式释放出的应变能(即声发射,AE)或通过超声波对材料进行测量时的声速、声衰减系数等参量会发生改变。基于此原理,1980年前后,Knollman等^[116]采用超声衰减技术对拉压条件下推进剂发生的“脱湿”损伤进行了测定,建立了宏观超声波参量与细观损伤参量(有效孔隙尺寸等)之间的关系。Elban等^[117]通过测试得到了压缩条件下4种推进剂的纵波声速随应变的变化曲线,结果表明随变形量增加,损伤不断加大,而声速显著减小。20世纪90年代,应用超声波测试技术和声成像方法,Liu^[118]大量开展了预置宏观裂纹的推进剂的裂尖损伤场变化规律研究。1993年,Zhou等^[119]利用AE技术研究了不同老化条件下HTPB复合固体推进剂的动态损伤破坏过程,研究发现测试信号具有颗粒增强复合材料损伤断裂过程的基本特征。2000~2011年,阳建红课题组^[120-123]广泛应用AE方法分析了单轴拉伸应变、加载速率、温度冲击、湿老化等因素对HTPB复合固体推进剂损伤演化的影响规律,并基于AE信号特征提出了区分推进剂不同损伤形式的具体流程。2002年,Bescond等^[124]对固体推进剂拉伸过程的测量表明,加载中形成的孔隙具有一定的取向性,因此在拉伸方向上弹性系数减小最大,且弹性系数的变化具有明显的率相关性。2013年,为了改善由于超声在固体推进剂内传播衰减较大而导致的检测信噪比较差的问题,Mihara等^[125]将具有超宽带频率的阶跃函数脉冲系统和叠层元件换能器2种技术应用于超声检测,从而开发出新的超声波测量系统。2022年,应用材料的不连续性和超声波之间的相互作用引起的非线性效应可检测分析缺陷损伤的特点,Pan等^[126]提出了适用于复合固体推进剂“脱湿”损伤测试的非线性超声检测方法,并通过细观数值仿真验证了该方法的可靠性。

20世纪80年代,为了测量材料的变形,美国的Peter等^[127]提出了一种基于图像分析的无损检测方法,即DIC技术。2012年,McDonnell等^[128]将上述方法用于拉伸加载下不同方向上复合固体推进剂的应变测量。2018年,基于DIC技术测试得到的加载过程中的应变值,Miller等^[129]提出了计算相应条件下复合固

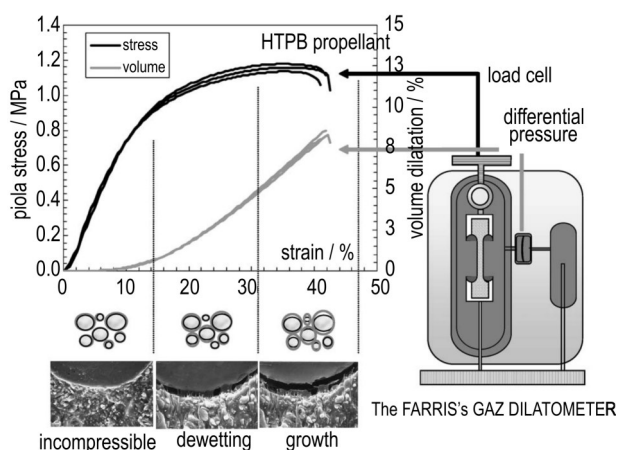
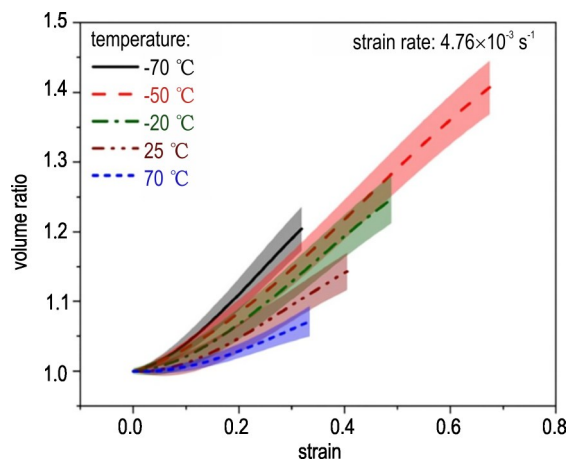
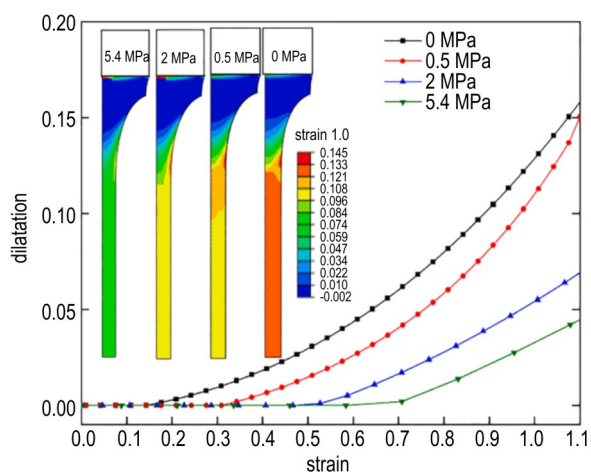
a. volume dilatation test equipment^[113]b. volume dilatation at various temperatures^[130]c. volume dilatation at various pressures^[131]

图 12 复合固体推进剂的典型体积膨胀测试装置及体积膨胀计算结果^[113, 130-131]

Fig. 12 Typical volume dilatation test equipment and volume dilatation calculated results for composite solid propellant^[113, 130-131]

体推进剂体积膨胀量的表达式,如式(4)所示。随后, Lei和Wubuliansan等^[130-131]应用该方法广泛开展了宽温、围压等条件下复合固体推进剂的体积膨胀量研究,典型结果如图12b和12c所示。此外,自20世纪80年代开始,美国持续将工业CT技术用于复合固体推进剂药柱内部裂纹、气孔、夹杂等的检测^[132],同时Ravindran等^[133]通过对检测图像数据进行重构,实现了损伤分析结果的3D可视化,而Dai等^[134]则利用小波变换技术进一步提升了工业CT检测图像分析的精度。

$$\begin{cases} D(t) = \frac{V(t) - V_0}{V_0} = \frac{V(t)}{V_0} - 1 = \frac{h(t)w(t)b(t)}{h_0w_0b_0} - 1 \\ h(t) = h_0(1 + \varepsilon_{yy}) \\ w(t) = w_0(1 + \varepsilon_{xx}) \\ b(t) = b_0(1 + \varepsilon_{zz}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, V_0 和 $V(t)$ 分别为变形前后推进剂试验件标距段的体积, mm^3 ; h_0 、 $h(t)$ 、 w_0 、 $w(t)$ 、 b_0 和 $b(t)$ 分别为变形前后推进剂试验件标距段的高度、宽度和厚度, mm ; ε_{yy} 、 ε_{xx} 和 ε_{zz} 分别为变形过程中加载方向(高度 y 方向)及另外两方向(宽度 x 方向和厚度 z 方向)的应变。

3.2 临界损伤阈值的确定方法

发生损伤是复合固体推进剂力学响应进入材料非线性变形阶段的内在原因,因此,确定临界损伤阈值对于评判推进剂的损伤力学行为和分析宏观力学性能特点等具有重要意义。为此,对国内外研究者开展临界损伤阈值确定的相关方法进行归类,并按照图像分析和试验测试法、数值计算和理论推导法的顺序对其研究进展进行总结。

3.2.1 图像分析和试验测试法

1980年前后,通过对基于超声衰减技术获得的复合固体推进剂的声衰减系数-应变曲线进行分析,Knollman等^[116]认为声衰减的演化存在某一应变阈值,低于该阈值时,声衰减基本不变化,即推进剂内部的损伤不演化。图13a为1989年Richter等^[111]利用液体体积膨胀计测量得到的加载过程中固体推进剂的典型应力-应变曲线和体积变化曲线,由图13a可知,在某一临界应变之前推进剂的体积几乎不发生变化,而在此应变之后迅速增加。由3.1节所述膨胀计的原理和图12a可知,该临界应变及对应的临界应力即为推进剂发生“脱湿”损伤的临界阈值。2000年,阳建红等^[120]认为HTPB复合固体推进剂拉伸时AE信号存在明显阈值,载荷超过该阈值后,AE信号急剧增加,且增加速率不断上升,即推进剂内部进入损伤成核、扩展和

汇合阶段。因此,该阈值可作为推进剂微裂纹损伤的门槛值。同时,基于AE试验获得的不同波形,阳建红等^[121]还讨论了波形阈值范围与复合固体推进剂内部损伤形式的对应关系。2018年,基于应用DIC技术获得的体积变化率-应变曲线,Miller^[129]首先通过作图法得到了曲线末端的切线,并将该切线与横坐标轴的交点定义为“脱湿”应变(图13b),即临界损伤阈值,同时比较了该阈值随不同推进剂配方的变化情况。2020年,通过对气体体积膨胀计测试得到的拉伸过程中HTPB复合固体推进剂的体积变化曲线的特征进行分析,张镇国等^[115]将曲线划分为3个阶段,分别对应无“脱湿”阶段、“脱湿”过渡阶段和“脱湿”稳定增长阶段。为了进一步深入研究“脱湿”损伤特点,根据Farris等^[110]的研究,张镇国等又定义了起始“脱湿”点、特征“脱湿”点和特征“脱湿”速率3个参量,并将体积变化率达到0.0015时所对应的应变点定义为起始“脱湿”点,即临界“损伤”阈值,如图13c所示。2022年,通过定义图13d所示二阶非线性超声参数迅速增大的起始

点为临界“脱湿”损伤点,Pan等^[126]获得了HTPB复合固体推进剂的损伤阈值随应变率的变化关系曲线。此外,国内外研究者还认为拉/压应力-应变曲线特性能够间接反映复合固体推进剂的损伤演化情况,因此,可利用作图法分析不同阶段曲线斜率或直接选取峰值点等方式确定损伤发生的临界阈值。例如,中国航天科技集团公司第四研究院的院标规定:曲线的“脱湿”形成阶段与发展阶段的分界点为“脱湿”临界阈值,其值为斜率下降至初始模量85%的直线L与曲线的交点,而且需根据曲线的不同形状采用不同的取值方法^[135]。其余研究者的定义方法,详见文献[108]。

为了在宏观尺度上直接给出颗粒增强复合材料发生损伤时的临界阈值,国内外研究者进行了诸多尝试。例如,2014年,参照美国行业标准ASTM中关于粘接试件拉伸断裂的标准ASTM D2095^[136],韦震等^[137]设计开展了AI/HTPB粘接件的单轴拉伸试验,通过将获得的粘接界面断裂强度数值与细观数值仿真计算结果相比对,验证了所选界面损伤临界阈值的准确性。

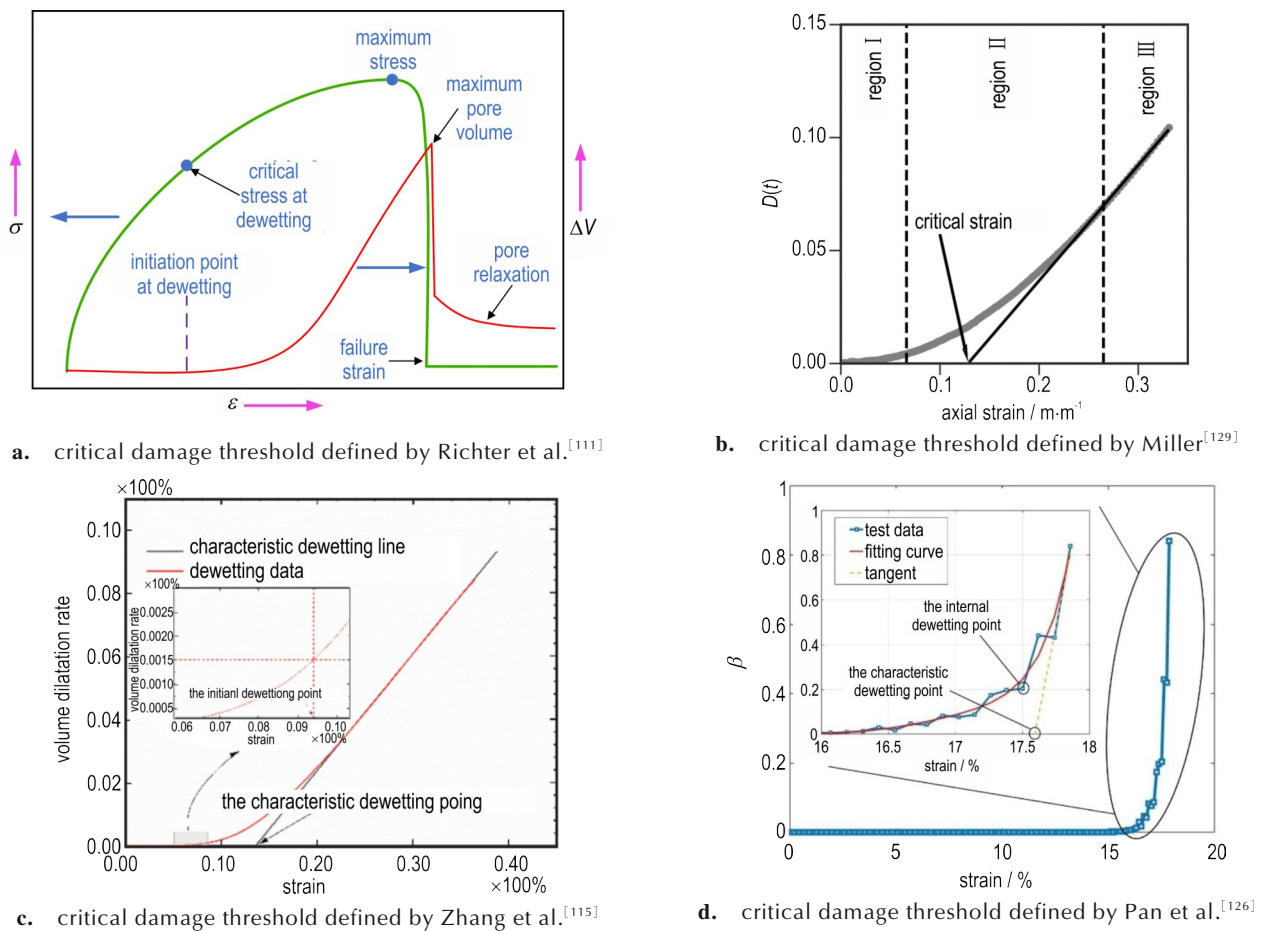


图13 复合固体推进剂临界损伤阈值的典型定义方法^[111,115,126,129]

Fig.13 Typical definition method for critical damage threshold of composite solid propellants^[111,115,126,129]

3.2.2 理论推导和数值算法

由于利用作图法确定复合固体推进剂的临界损伤阈值存在一定的主观性,因此,为了降低作图法对结果不确定性的影响,国内外研究者提出了采用理论推导和数值计算的方法确定上述阈值的思想。2013年,基于热力学能量守恒定律,龚建良等^[138]推导得到了HTPB复合固体推进剂发生“脱湿”损伤时的临界粘接能表达式。2014年,Xu等^[139]认为,线粘弹性本构模型预测结果与复合固体推进剂拉伸应力-应变曲线试验结果开始出现较大偏差的时刻即为“脱湿”损伤发生的临界阈值点。基于该思想和等效应力的概念,Li等^[140]计算得到了不同应变率和压强条件下拉伸时NEPE复合固体推进剂的临界损伤应变阈值。2017年马浩等^[141]提出了基于应力-应变曲线的数值计算方法,即首先将试验数据整理为等距应变形式,然后以 $\Delta\varepsilon$ 为步长的二阶差分计算得到相应的“脱湿”损伤临界阈值,具体表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta^2\sigma_k = \Delta\sigma_{k+1} - \Delta\sigma_k \\ \Delta\sigma_k = \sigma_{k+1} - \sigma_k \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_{k+1} 和 σ_k 分别为应变 ε_{k+1} 和 ε_k 对应的应力值,MPa; $\Delta^2\sigma_k$ 的最大点为“脱湿”点,相应的应力和应变值分别为“脱湿”点强度和伸长率。

2018年,刘领等^[142]采用Origin软件对HTPB、NEPE两类复合固体推进剂的拉伸应力-应变曲线分别求一阶导数和二阶导数,得到模量-应变曲线和模量变化率-应变曲线。然后,根据2个曲线的变化特性,将模量变化率-应变曲线的第1个波谷定义为初始“脱湿”点,而将应力-应变曲线上距过原点与最大伸长率点的直线最远的点定义为特征“脱湿”点。在总结以前损伤模型的基础上,2022年,Li等^[143]基于不可逆热力学框架提出了考虑损伤历史、应变率和围压效应的损伤萌发准则,并将损伤萌发势函数 $\varphi_2^*(Y)$ 定义为线粘弹性应变能密度 Y 的幂函数,具体表达式如下:

$$\begin{cases} f_D = \varphi_2^*(Y) - \alpha \cdot \varphi_{i,c}^*(S_0) > 0 \\ \varphi_2^* = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{S_0}{k_1 + 1} \left(\frac{Y}{S_0} \right)^{k_1 + 1} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \cdot (1 - D)^n \cdot \left[1 - w \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0} \right) \right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\varphi_{i,c}^*(S_0)$ 为损伤萌发临界值,MPa; S_0 为损伤萌发参数,MPa; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, s^{-1} ; p_0 是参考压强,MPa; D 为损伤变量; α 、 k_1 、 k_2 、 n 和 w 是材料参数。

3.3 宏观损伤演化模型

目前,针对宏观尺度上复合固体推进剂的损伤演

化模型构建,国内外研究者主要采用特征参量法和累积损伤理论法。其中,前者通常是应用唯象的方法确定能够表征损伤演化和宏观力学性能劣化程度的物理参量或内变量,并以该参量变化的数学表达式间接描述损伤的演化,而无需具体考虑推进剂损伤演化的物理机制。而后者则结合Miner线性累积损伤理论和推进剂所承受的载荷特点进行理论推导,最终得到具体的损伤演化表达式。

3.3.1 基于特征参量法的损伤演化模型

1971年,针对损伤材料的力学响应研究,Lemaitre提出了应变等效原理。基于该原理和Kachanov提出的有效应力概念,Ma等^[144]认为复合固体推进剂等材料的损伤演化模型可采用损伤后的有效强度值 $\tilde{\sigma}$ 进行构建,即 $D = 1 - \tilde{\sigma}/\sigma$ 。利用该表达式,同时通过对试验数据进行分析,可拟合得到考虑应变率、压强、临界损伤阈值等因素的损伤演化模型的具体形式。1987年,Farris等^[145]指出颗粒增强复合材料的宏观模量随损伤度的提高而下降,据此可建立唯象的损伤模型。随后,为预测宏观模量的改变和描述损伤的演化,Tong等^[146]提出了多种模型建立方法。1999年,Jung和Youn^[147]将上述模型建立的思想应用于复合固体推进剂的损伤演化研究中。2001年,Canga等^[148]对Jung等提出的模型进行了进一步修正,使得所建模型更适合于构建含损伤的非线性本构模型及有限元仿真计算,并得到了Xing等^[149]研究者的广泛应用。1990年,针对粘弹性材料的变形特性,Schapery^[150]基于能量法则提出了该类材料裂纹扩展规律的描述方法,并随后给出了基于内变量 S_m 和伪应变能密度函数 W^R 的指数型损伤演化模型。上述模型被Rami^[151]、Xu^[139]和强洪夫课题组^[87,152]等国内外研究者广泛应用于复合固体推进剂的含损伤非线性本构关系构建,但损伤函数的具体形式随推进剂类型和加载条件有所变化。由于CT数与测试的复合固体推进剂的密度紧密相关,而不同损伤程度下推进剂的密度会发生改变,因此,在微裂纹类型单一的假设下,阳建红等^[153]于1999年提出了基于CT数的拉伸加载下HTPB复合固体推进剂的损伤演化模型 $D = 1 - E(CT)/(CT_0)$, CT_0 为无损伤时的数值。同时,阳建红等^[121]还认为AE能量 U 也与复合固体推进剂内部的损伤程度密切相关,因此,于2000年定义了基于该表征参量的损伤演化方程 $D = U/U_{AE}$, U_{AE} 为全破坏时的AE能量值。2011年,Shekhar等^[154]通过研究发现,拉伸加载下复合固体推进剂的泊松比变化与其“脱湿”损伤密切相关。基于该

结论,2012年,常武军等^[66]以泊松比 $\nu(t)$ 为表征参量建立了HTPB复合固体推进剂的单轴拉伸损伤演化模型,泊松比值采用加载过程中推进剂的体积变化量 $\Delta V(t)/V_0$ 和加载速率进行计算。2017~2022年,针对疲劳加载下HTPB和NEPE复合固体推进剂的损伤特性,童心、Hu等^[155-156]提出了模量降低法建立损伤演化函数的思想,例如可应用疲劳 i 次时的动态模量 E_i 与未损伤时的初始动态模量 E_0 的比值计算损伤,表达式为 $D = 1 - E_i/E_0$ 。同样针对疲劳加载下的复合固体推进剂的损伤演化研究,梁蔚等^[157]提出了以峰值应变为表征参量的模型构建方法,模型中考虑了疲劳损伤三阶段的特点。

3.3.2 基于累积损伤理论的损伤演化模型

20世纪80~90年代,Bills、Laheru^[158-159]认为复合固体推进剂等粘弹性材料的损伤可视为连续递增失效过程,因此,可应用累积损伤的相关理论建立不同载荷作用下该类材料的损伤演化模型。1997年,Duncan^[160]利用连续积分型累积损伤模型(式(7))研究了拉伸加载下HTPB复合固体推进剂的损伤演化行为,并初步提出了结合恒定应变率破坏试验结果确定模型中损伤参数的方法。2008~2009年,利用Kachonov损伤模型,Kunz^[161]推导了恒定速率加载、蠕变加载、松弛加载和循环加载4类典型条件下复合固体推进剂的累积损伤模型,并提出了模型参数的改进型拟合方法。2011年,孟红磊^[162]首先将式(7)所示模型应用于固体推进剂的蠕变损伤演化模型构建,然后针对该模型不能较好描述恒定应变率拉伸加载下推进剂损伤特性的问题,通过增加应变率项对其进行了修正。2012~2013年,通过在式(7)所示模型的积分项分母中引入时温等效因子,王玉峰、邓斌等^[163-164]建立了可以研究温度循环条件下复合固体推进剂药柱累积损伤的数学模型,但模型的具体形式稍微不同。2018年,应用上述考虑温度影响的累积损伤模型,李高春等^[165]开展了实际贮存环境温度下复合固体推进剂药柱的损伤评估和参数敏感性分析。结合孟红磊、王玉峰等考虑率温因素影响的方法,李辉等^[166]建立了宽温准静态加载下HTPB复合固体推进剂的累积损伤模型(式(8)),然后将预测损伤演化特性和临界失效时间与试验结果进行比对,验证了所建模型的有效性。2023年,利用蠕变条件下的累积损伤表达式,吴轩等^[167]建立了考虑损伤的蠕变型本构模型,并利用HTPB推进剂的蠕变试验结果获得了累积损伤模型中的参数值,最后对试验条件下推进剂的损伤演化进行了预测。此外,2013

年,基于不可逆能量耗散的损伤变量定义方法和动态线粘弹性理论,邓斌等^[168]还建立了HTPB复合固体推进剂在周期应力作用下的累积损伤计算模型,并讨论了应力幅值和频率对累积损伤的影响规律。

$$D(t) = \frac{1}{\lambda} \int_0^t [\sigma(t)]^\beta dt \quad (7)$$

式中, $D(t)$ 为随时间 t 变化的累积损伤函数; $\sigma(t)$ 为给定的应力加载历史,MPa; λ 和 β 为模型材料参数。

$$D(t) = \frac{1}{\alpha \times \varepsilon^b} \int_0^\xi [\sigma(\xi)]^\beta d\xi \quad (8)$$

式中, ξ 为考虑温度影响(以移位因子 a_T 形式描述)的折算时间 $\xi = t/a_T, s$; a 和 b 为反映加载应变率 ε 影响的累积损伤材料参数。

3.4 当前研究中存在的不足

在宏观尺度上,针对复合固体推进剂的损伤行为研究,主要存在以下不足:

(1)宏观损伤识别测试试验方面:多种类型测试装置或试验系统的研制、搭建和持续改进,为揭示加载过程中复合固体推进剂的损伤行为变化规律奠定了重要基础,但上述装置几乎全为自主研发或自主搭建,缺乏针对相应装置或试验系统测试精度的深入分析以及测试结果有效性验证方法的研究;

(2)临界损伤阈值确定方法方面:基于图像分析和试验测试法的研究结果的精确性明显受到宏观损伤识别测试装置或试验系统观测准确性的影响,而基于理论推导和数值计算法的研究过程比较复杂。同时,上述2种研究方法主要用于确定拉伸加载下粘接界面“脱湿”损伤的临界阈值,缺乏针对是否能够拓展应用于其它载荷或其它损伤形式下临界阈值确定的分析。此外,几乎没有开展上述不同研究方法获得的结果一致性以及适用范围等的讨论和研究;

(3)宏观损伤演化模型方面:无论是基于特征参量法或是基于累积损伤理论的方法,在损伤表征参量遴选、模型建立方法遴选以及具体数学表达式推导等方面对研究者的理论水平和综合知识储备要求都比较高,而且实施步骤比较繁琐。

4 复合固体推进剂损伤行为的跨尺度研究进展

由于复合固体推进剂内在结构组成的多尺度特征,其不同载荷作用下的损伤行为包括了不同尺度上演化过程的耦合和跨越多个尺度力学响应的关联。

因此,越来越多的研究者开始认识到跨尺度研究方法在分析复合固体推进剂损伤行为时的重要性。基于国内外研究者的研究情况,本文重点从宏细观跨尺度性能构效关系构建、宏细观跨尺度数值模拟计算2个方面对相关进展进行综述。

4.1 宏细观跨尺度性能构效关系构建

应用第2节所述细观尺度上复合固体推进剂损伤行为的研究方法,国内外研究者基于研究结果首先揭示了率温压、老化等不同使役载荷和典型配方下推进剂宏观力学响应发生改变的内在机理,通过构建宏细观跨尺度性能构效关系,深化了对于推进剂性能的认识。

常温准静态单轴拉伸条件下,由于固体推进剂的细观结构“脱湿”损伤随应变率升高而减弱,并转变为以基体的内撕裂为主。1999年王亚平等^[27]指出上述损伤形式的改变是推进剂宏观伸长率随应变率升高而不断增大的内在原因。随后,从应变率对微裂纹在固体推进剂细观结构内部扩展路径的影响角度出发,Wang^[28]和Pan等^[126]进一步解释了室温较高应变率时固体推进剂具有更高伸长率的原因。基于细观有限元数值计算结果,职世君等^[169]从粘接界面损伤数量和损伤后的演化程度2个方面分析了应变率对室温加载条件下推进剂伸长率的影响效果。计算结果表明,应变率的提高虽能导致更多的粘接界面发生损伤,但局部的损伤程度较低,即“脱湿”点应变会减小,而推进剂的总体伸长率会提高。随着应变率的持续升高,局部“脱湿”损伤的演化会被进一步抑制,因此,“脱湿”点应变反而会增大,但由于推进剂细观结构中出现固体填充颗粒的断裂,因而其伸长率总体上会下降。Wang^[28]和职世君^[170]等都认为存在使固体推进剂最易发生“脱湿”损伤的临界应变率。张亮^[103]认为当固体推进剂内部的粘接界面损伤数量突破某一阈值时,会导致整体刚度的突然下降,在应力-应变曲线的较小应变处形成第1个“应力峰”,而曲线上第2个“应力峰”的出现则与推进剂的最终失效破坏相关,上述损伤机理是导致部分加载条件下固体推进剂应力-应变曲线出现“双峰”现象的内在原因。针对Traissac等^[171]于1995年发现的固体推进剂的失效应力和失效应变随围压数值的增大而显著增加的现象,Zhang等^[35]利用细观有限元数值计算的方法对其进行了解释,即围压条件下推进剂内部损伤界面的数量较常压下显著减小,而且界面的损伤程度几乎不随应变的增加而增大,推进剂的“脱湿”损伤在一定程度上被围压抑制了。上述结论与Özüpek等^[172]利用体积膨胀法测试得到的结果保持一致。

低温条件下,固体推进剂变硬、变脆。一方面,推进剂的拉伸强度和模量增大,而伸长率降低;另一方面,推进剂的界面断裂表面能和基体的杨氏模量增大。对于相同配方的固体推进剂,当温度变化时,粘接界面的“脱湿”损伤程度主要由界面断裂表面能和基体的杨氏模量所决定^[152]。因此,低温下微裂纹更容易在断裂应力值固定的填充颗粒内部产生、扩展和成核,而“脱湿”现象不明显。低温条件下,随应变率不断升高,伴随推进剂拉伸变形时有更强的应力波。因此,低温高应变率条件下,更多微裂纹会在填充颗粒内部产生,最终导致大量填充颗粒发生断裂。如果推进剂内部的填充颗粒几乎都发生了断裂,则应变率的变化基本上不再对推进剂的细观损伤产生更明显的影响,即对伸长率变化的影响变弱。

应用第2节所述细观尺度上复合固体推进剂损伤行为的研究方法,国内外研究者还基于研究结果分析了不同细观结构形式(例如:基体材料类型,固体填充颗粒的类型、形状、尺寸和分布等)和初始损伤条件下推进剂的宏观力学性能变化情况,通过构建宏细观跨尺度性能构效关系,为满足不同使役工况下性能指标要求的推进剂配方设计提供了数据支撑。例如,2018年,封涛等^[73]通过对细观有限元数值计算结果进行分析发现,由于RDX颗粒的粒径小于AP颗粒,一方面其对载荷的传递能力较低,导致在相同应变下推进剂的应力值下降;另一方面导致“脱湿”损伤更多发生在AP颗粒与基体的粘接界面,因此,RDX颗粒的含量对推进剂的抗拉强度影响较小。同时,基于细观有限元数值计算结果,封涛等^[74]还量化分析了固体填充颗粒破碎、基体孔洞和界面“脱湿”3类初始损伤对复合固体推进剂初始模量、抗拉强度和应力-应变曲线特性等力学响应的影响程度。分析结果表明,粘接界面的初始“脱湿”损伤具有最为显著的影响效果,因此,可适当加入一些交联剂和键合剂来优化界面的粘接性能,进而提高推进剂的力学性能。

通过将宏观损伤演化模型中的表征参量定义为具有物理含义的细观参数的函数,国内外研究者建立了能够反映宏细观跨尺度性能构效关系的复合固体推进剂的损伤型非线性本构模型。例如,1993年,通过引入化学反应动力学及裂纹扩展模型,Zhou^[119]从不可逆热力学角度构建了考虑化学老化和微裂纹损伤的HTPB复合固体推进剂的本构模型。2008年,采用复合材料的均质化理论,Xu等^[173]提出了一种包含孔穴统计增长过程的宏观本构模型,模型将复合固体推进

剂的损伤演化通过孔穴的不断成核和聚合来描述。2016年, Hur等^[174]提出了一种基于细观力学方法的固体推进剂本构模型, 该模型将弹性模量定义为孔隙体积分数的函数, 损伤由减少的弹性模量表示。2018年, 通过将复合固体推进剂的“脱湿”损伤视为裂尖失效区的演化, 以及将损伤演化视为初始(缺陷)微裂纹的扩展过程, 顾志旭等^[175]利用微裂纹均匀化理论及其动态扩展模型建立了宏-细观相结合的粘弹性损伤本构模型。2020年, Lei等^[176]提出了孔隙元件的概念以表征细观尺度下固体填充颗粒与基体界面发生的“脱湿”损伤和孔隙变化过程, 同时损伤程度由名义裂纹长度参量进行表征, 进而建立了考虑“脱湿”的复合固体推进剂的宏细观本构模型。2024年, 乌布力艾散·麦提图尔荪等^[177]应用固体推进剂的代表性体积单元中微空洞含量 c 的演化函数来反映宏观剪切模量和体积模量随变形程度的增加而发生的下降情况, 进而建立了考虑细观损伤的推进剂粘弹性多尺度本构模型。

4.2 宏细观跨尺度数值模拟计算

随着计算机性能的不断进步以及固体力学的发展, 通过计算机数值模拟仿真进而分析材料的失效破坏特性成为一种可行且经济的方法。为了更好地模拟固体的破坏过程, 数值计算模型中应尽可能地包含固体材料内部真实非均匀的微、细观结构细节, 但如果在全尺度上都包含所研究对象的这些微、细观结构的细节, 即使将实验室中小尺度的试验件作为研究对象, 也需要付出高昂的计算代价, 甚至超过目前软硬件所允许的计

算上限, 使计算无法进行。为了得到足够的计算精度, 同时又保证计算的顺利进行, 基于跨尺度的固体材料失效破坏的数值模拟方法得到了研究者的关注和应用。

目前, 按照跨尺度数值模拟时不同尺度间场变量信息(例如位移、应力和应变等)传递或关联方式的不同, 可将其划分为: 单向方法、协同方法(或弱双向耦合方法)和并发方法(或强双向耦合方法)^[178-180]。由于微观-细观层级的跨尺度数值模拟更侧重于分析材料本身的损伤行为机理, 其作用更多体现为指导材料设计, 而细观-宏观层级的跨尺度数值模拟对分析评估材料或结构在受载时的力学响应和失效情况具有更重要的意义, 因此, 后者受到了工程界更多的关注, 本文也以该层级为例阐述3种跨尺度数值模拟方法的特点。其中, 单向方法仅考虑某一尺度对另一尺度的单向影响, 例如从细观结构模型开展数值模拟出发进行逐级等效或均匀化处理, 即自下而上获得材料的宏观等效性能, 或从宏观结构模型开展数值模拟出发进行逐级反演, 即自上而下地将场变量信息传递给细观结构模型进行局部化分析计算, 进而得到损伤演化结果, 典型计算流程如图14a所示^[180]。协同方法和并发方法都是细观结构模型和宏观结构模型同时开展分析计算, 但前者是2个尺度的模型分开计算, 首先在考虑某一尺度对另一尺度影响的基础上, 将获得的影响结果再反馈回第1个尺度作进一步的迭代分析计算, 场变量进行传递关联的典型流程如图14b所示^[181], 该方法最早由 Renard 和 Marmonier^[182]于1987年提出, 随后

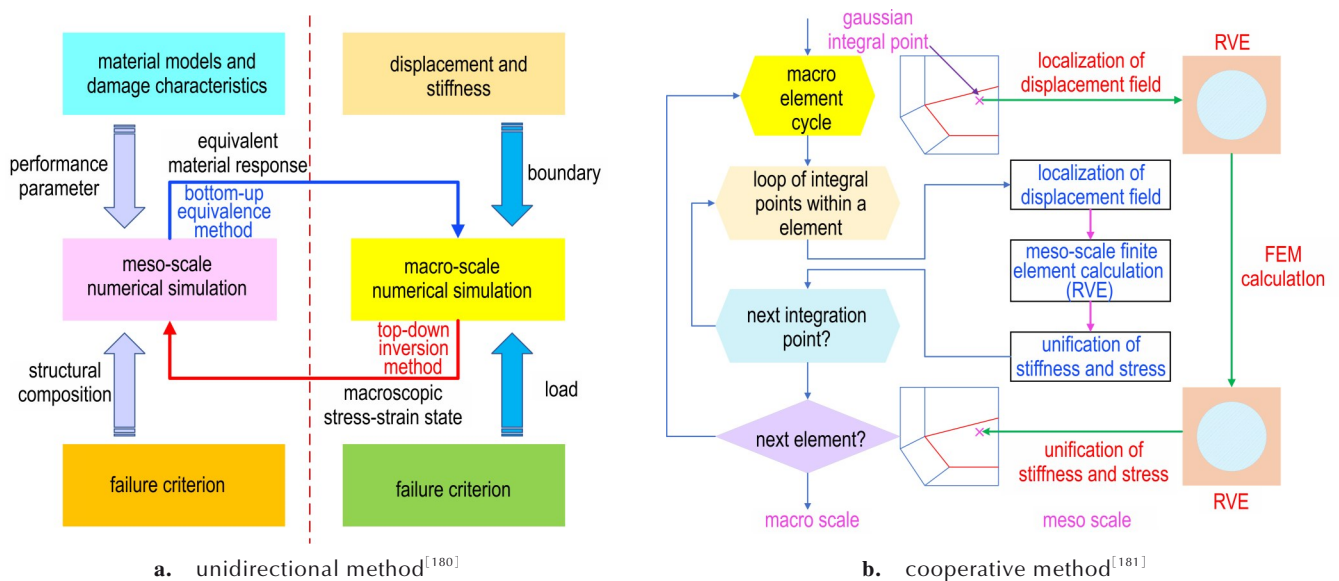


图14 典型跨尺度数值模拟方法的场变量传递关联流程图^[180-181]

Fig.14 Flow charts of transfer and relevancy for field quantities with typical cross-scale numerical simulation methods^[180-181]

Matsui等^[183]通过开展计算误差分析对其进行了发展完善。由于协同方法要利用均匀化方法实现场变量信息由细观尺度传递关联至宏观尺度,因此,一般要求细观尺度与宏观尺度之比足够小且细观结构在局部为周期性结构,而复合固体推进剂的RVE模型即具有该特点,且在开展细观数值模拟时也通常会考虑周期性边界条件。如果细观尺度与宏观尺度之比已不足够小时,就无法再应用均匀化方法获得的场变量准确代表宏观尺度的局部量,此时必须应用并发方法开展数值模拟^[178-179],即通过采用将细观特性融入宏观形函数等方法实现场变量信息的传递关联,典型方法如多尺度有限元方法(MsFEM)^[184]、扩展多尺度有限元方法(EMsFEM)^[185]等。上述方法具有计算精度更高的特点,但计算过程也更为复杂,导致其实际使用不便。

虽然,近年来跨尺度数值模拟方法已在复合材料力学行为研究中得到了较为广泛的应用,但该方法应用于固体推进剂的力学响应研究还比较匮乏,仅有少部分研究者进行了初步探索。2020年,为研究三点弯曲试验过程中HTPB复合固体推进剂的变形和损伤行为,伍鹏等^[186]建立了如图15所示的基于子模型方法的跨尺度数值模拟计算模型。其中,宏观模型尺寸和预置裂纹尺寸、位置与实际的三点弯曲试验件一致,边界条件的设置也与真实试验相同,而裂纹尖端的细观尺度子模型边界条件由宏观结果插值得到,并采用计算精度较高的结点(对应位移驱动量)驱动子模型,如图15b所示。2024年,为准确预测低温点火过程中固体推进剂药柱的开裂行为,王贵军等^[187]提出了一种如图16a所示的跨尺度分析方法,即首先在推进剂药柱

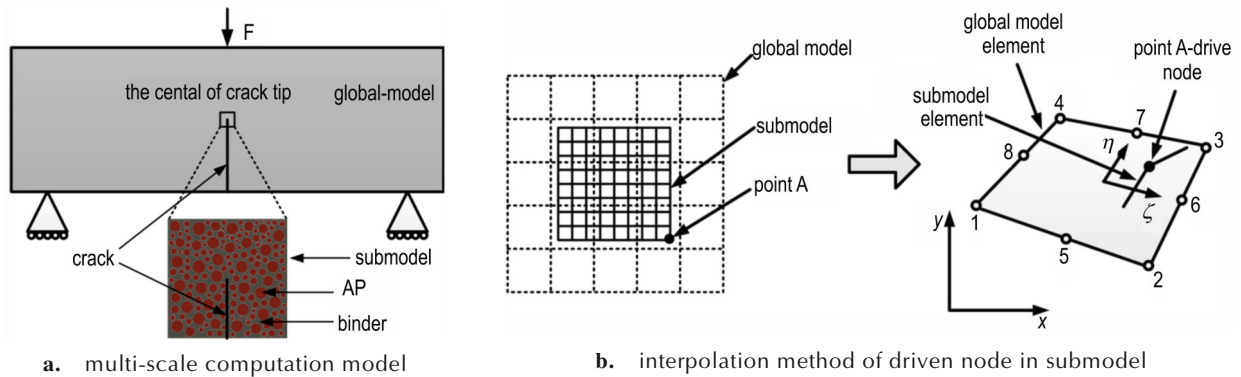
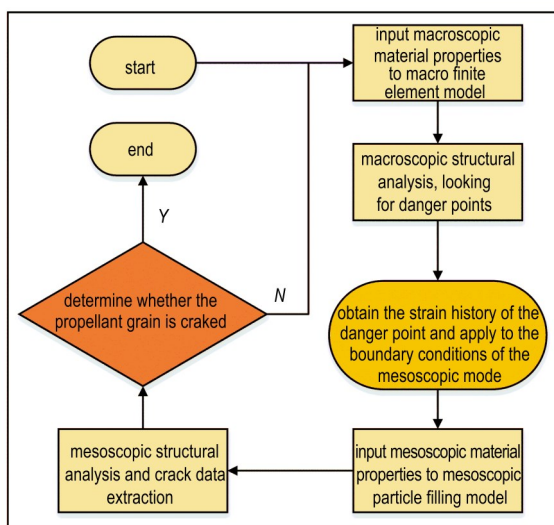
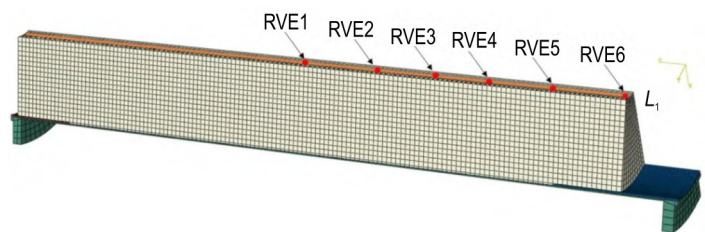


图15 复合固体推进剂三点弯曲试验的跨尺度数值计算模型及数据传递方法^[186]

Fig.15 Multi-scale numerical calculation model and data transfer method for three-point bending test of composite solid propellant^[186]



a. flow chart of contracting cross-scale method



b. cross-scale computation model

图16 固体推进剂药柱开裂行为的收缩跨尺度分析方法及计算模型^[187]

Fig.16 Contracting cross-scale method and multi-scale computation model for cracking failure of solid propellant grain^[187]

的宏观有限元计算模型上开展低温点火下的变形分析,获取危险点位置,然后将相应位置处的应变幅值传递给细观尺度的推进剂RVE模型(图16b),最后通过开展细观有限元数值计算,分析推进剂损伤的萌生和演化,进而判断宏观尺度上推进剂药柱是否发生开裂。由于场变量信息仅从宏观尺度传递给细观尺度,作者将上述方法也称之为“全局-局部单向收缩耦合”的跨尺度分析方法。

4.3 当前研究中存在的不足

针对复合固体推进剂损伤行为的跨尺度研究,主要存在以下不足:

(1)跨尺度性能构效关系构建方面:以宏细观构效关系为主,且构效关系的精准性对细观尺度损伤观测和数值计算结果的精确性依赖较高,目前还无法通过构效关系的建立以全面准确地揭示SRM全寿命周期内固体推进剂发生的损伤行为和宏观性能变化。此外,基于构效关系建立的固体推进剂损伤型非线性本构模型,需要研究者对推进剂的细观损伤行为具有全面透彻的理解,而且可以准确遴选出合适的表征参量,同时能充分考虑细观模型参数的求解方法以及整个本构模型应用于数值模拟时的计算效率等问题;

(2)跨尺度数值模拟计算方面:针对复合固体推进剂损伤行为的研究还处于初步阶段,以单向跨尺度数值模拟为主。同时由于不同尺度下场变量数值大小差异性等原因,缺乏公认的能够有效连接微观尺度、细观尺度到宏观尺度的全尺度数值模拟理论框架以及计算平台,尤其是如何实现全尺度下的并发跨尺度模拟具有更高的难度,上述不足进一步影响了复合固体推进剂损伤行为的跨尺度数值模拟计算研究进展。

5 总结与展望

针对复合固体推进剂的损伤行为,通过在微细宏观尺度上持续深入地研究,以及在跨尺度方面进行的初步探索,国内外研究者取得了众多有价值的研究成果和新突破,对于科学认知固体推进剂的性能以及指导推进剂配方设计、SRM药柱结构设计和确保SRM的正常工作等提供了重要的技术支持。但目前相关研究中仍存在许多不足,需要进一步深入研究和完善,主要体现在以下几个方面:

(1)微观尺度研究方面:以数值模拟计算为主,但研究水平还处于初步阶段,计算模型、计算规模等与复合固体推进剂的实际结构和损伤行为演化情况还存在

较大差距,而且进行计算结果有效性检验的手段比较匮乏。

针对上述问题,首先,发展能够将复合固体推进剂中键合剂、防老化剂等小组分以及加载温度、应变率、压强、老化、湿度等外界条件充分融入计算的微观尺度数值模拟方法,同时提高整个模拟体系选取的原子数量和模拟规模,从而拓宽微观尺度上开展复合固体推进剂损伤行为数值模拟时考虑的影响因素的范围,以更全面地揭示复合固体推进剂的损伤机制;

其次,通过将不同影响因素下开展的微观尺度数值模拟计算得到的复合固体推进剂的变形规律、损伤演化机制以及孔洞等损伤表征参量的变化曲线、界面层厚度与宏细观试验得到的结果进行对比,从多个方面检验微观尺度数值模拟计算方法、计算结果等的有效性,最终进一步提升微观尺度数值模拟在开展固体推进剂损伤行为研究中的作用。

(2)细观尺度研究方面:针对复合固体推进剂的初始损伤和损伤演化,在试验观测能力和定量表征方面均取得了重要进展,但观测结果的精确性还有待进一步提高,实现复杂载荷、多载荷叠加和序贯载荷下推进剂损伤演化的动态实时观测和高精度成像仍存在较大难度。因此,需要通过重新设计加工加载台配件、增加温度和压强环境腔、改变试验件和夹具的构型、尺寸等方式,对现有SEM、微CT、SRF等细观损伤观测仪器和设备进行升级,同时加紧研制能对复杂应力中高应变率动态加载下复合固体推进剂细观结构损伤进行全场实时动态观测和重构的试验装置,以进一步提高细观尺度上损伤观测试验的加载能力(例如温度、高应变率、压强、拉剪、蠕变和序贯载荷)和时空分辨能力(包括采样的频率、采样的精度等),尽可能覆盖SRM全寿命周期内复合固体推进剂的使用工况范围,同时尽快拟制对初始损伤和损伤演化进行试验观测和定量表征的标准规范,从而在提高观测结果精度的同时实现在细观尺度上全面准确地揭示复合固体推进剂发生损伤演化的深层次机制;

基于图像信息分析的损伤演化模型的精确性受到细观损伤观测试验结果准确性的影响,而基于内聚力理论的损伤演化模型研究,则离充分反映外载荷多因素的影响还有较大差距,而且缺乏检验所建损伤演化模型有效性的方法。因此,需要尽快完善直接开展固体填充颗粒与基体粘接界面性能测试的试验方法,结合试验结果曲线和性能参数大小检验现有损伤演化模型构建理论和方法的合理性、准确性,确定不同损伤演

化模型的具体适用范围。同时,继续发展能够在复合固体推进剂细观损伤演化模型中综合考虑温度、应变率、压强、老化和初始损伤程度等因素影响的理论和方法,给出模型参数确定的流程算法,并完成所建损伤演化模型的子程序编译和在细观有限元数值计算中的应用,最终逐步提高复合固体推进剂细观损伤演化模型的代表水平;

细观损伤数值模拟的有限元模型以二维为主,且与实际固体推进剂的细观结构特性还不完全匹配,确定模型参数的方法不统一,损伤演化过程的数值模拟还主要集中于准静态单一载荷条件下发生的粘接界面“脱湿”损伤,对计算结果有效性的检验也不够全面深入。因此,需要在兼顾计算成本和计算效率的前提下,继续开发与复合固体推进剂细观结构空间分布更接近的二维和三维有限元计算模型,改进在上述模型中插入不同组分含量下发生粘接界面“脱湿”、基体撕裂和固体填充颗粒断裂的损伤演化模型的方法,并完善多因素耦合、复杂载荷和序贯载荷等加载方式下的边界条件和载荷的施加方式,通过将上述研究步骤进行规范化、标准化,并将计算得到的不同变形程度下的损伤演化过程和损伤程度与试验结果进行定性、定量的对比分析,最终检验并提高细观尺度上复合固体推进剂损伤演化数值模拟的计算精度。

(3)宏观尺度研究方面:通过自主研发或自主搭建,已形成了从宏观尺度对复合固体推进剂损伤行为进行识别的多型测试装置或试验系统,但缺乏对其精度的深入分析以及测试结果有效性验证的研究。因此,需要分析影响宏观尺度上损伤识别测试结果的因素以及这些因素的影响程度,然后重点从试验件的处理方法、采集信号的软硬件的精度、信号和图像的处理方式等方面提高测试结果的精度。同时,对损伤识别测试试验用装置进行标定,标定范围涵盖该装置的所有测试工况,尤其包括低温、高压强等极端条件,从而准确建立不同测试条件下检测信号、图像等信息与损伤程度间的函数关系,以提高宏观尺度上损伤识别测试试验结果的有效性;

确定临界损伤阈值的方法主要用于研究拉伸加载下粘接界面发生的“脱湿”损伤,缺乏相关方法能否拓展应用于其它载荷或其它损伤形式的讨论分析,而且几乎没有开展不同临界损伤阈值确定方法获得的结果一致性、有效性和适用范围的研究。需加强不同宏观测试手段获得的临界损伤阈值之间的比较,确定最适合于某一固体推进剂配方、加载条件的试验方法。同

时,针对率温压耦合加载条件以及双轴和拉剪复杂加载条件,发展确定临界损伤阈值的新理论和新方法。由于宏观尺度上确定的损伤程度是一个混合量,不易区分出具体的损伤形式和不同损伤形式所占的比例,因此,在确定临界损伤阈值时应加强与细观损伤观测结果、细观数值仿真计算结果之间的联系。通过上述3个方面的努力,进一步提高宏观尺度上临界损伤阈值确定的精确性;

无论是基于特征参量或是基于累积损伤理论的宏观损伤演化模型构建方法,对研究者的理论水平和综合知识储备要求都比较高,而且实施步骤比较繁琐。因此,需要进一步优化建立宏观损伤演化函数的表征参量的提取步骤和方法,同时优化确定损伤演化函数中参数数值的流程,以降低计算步骤的复杂程度,并完善可以综合考虑率温压等影响因素以及序贯载荷加载的损伤演化模型的构建方法,从而进一步提高宏观尺度上所建立的损伤演化模型的预测能力。

(4)跨尺度研究方面:相关研究主要集中于宏观跨尺度性能构效关系构建,但离全面准确地揭示SRM全寿命周期内固体推进剂发生的损伤行为及宏观性能变化规律还有一定差距,基于构效关系建立固体推进剂的损伤型非线性本构模型,需要研究者不仅全面透彻地理解推进剂的微细观损伤行为,而且在本构模型构建方面具有很深的造诣。而针对复合固体推进剂损伤行为的跨尺度数值模拟计算研究还处于初步阶段,以单向跨尺度数值模拟为主,还无法实现微-细-宏观全尺度下的并发跨尺度数值模拟。

针对上述问题,首先,需要通过在微细宏观单一尺度上大量开展复合固体推进剂的损伤行为研究,并对研究结果进行全方位、多层次的比较,形成针对损伤测试识别、损伤演化模型建立以及损伤演化数值模拟计算的标准规范,提高损伤行为研究结果的准确性,为后续微-细-宏观跨尺度构效关系构建、非线性本构模型建立和数值模拟计算研究奠定坚实基础;

其次,充分发挥微细宏观不同尺度上研究复合固体推进剂损伤行为的优势,分析不同尺度下应力、应变等力学响应参量计算结果存在数量级差异性的内在原因,从而完善不同尺度之间与损伤相关的场变量信息进行有效交互传递的理论方法体系,最终实现复合固体推进剂损伤演化全过程全尺度的精确分析,进而全面揭示SRM全寿命周期内不同载荷工况下推进剂力学响应发生变化的内在机理,为典型工况下推进剂损伤行为控制措施的提出提供重要的理论依据。

参考文献:

- [1] 张天军, 许鸿杰, 李树刚. 非均匀材料损伤破坏的多尺度耦合理论[J]. 固体力学学报, 2011, 32(1): 29-36.
ZHANG Tian-jun, XU Hong-jie, LI Shu-gang. A multi-scale coupling theory for damage and failure of heterogenous materials [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011, 32(1): 29-36.
- [2] 何国威, 夏蒙芬, 柯孚久. 多尺度耦合现象: 挑战和机遇[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 121-123.
HE Guo-wei, XIA Meng-fen, KE Fu-jiu. The phenomenon of multi scale coupling: Challenges and opportunities [J]. *Progress of Natural Science*, 2004, 14(2): 121-123.
- [3] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 415-416.
CHEN Ru-xun. Design and research of solid rocket motor (the first volume) [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1991: 415-416.
- [4] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 2-5.
HOU Lin-fa. Composite solid propellant [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994: 2-5.
- [5] DENG S, WANG S, ZHOU H, et al. Molecular dynamics simulation of molecular network structure and mechanical properties of polymer matrix in PBT propellant [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105723.
- [6] 齐晓飞, 张晓宏, 宋振伟, 等. 分子动力学方法在火炸药研究中的应用进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(3): 37-42.
QI Xiao-fei, ZHANG Xiao-hong, SONG Zhen-wei, et al. Application progress of molecular dynamics method in propellants and explosives [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2012, 10(3): 37-42.
- [7] CUMMING A, LEIPER G, ROBSON E. Molecular modelling as a tool to aid the design of polymer bonded explosives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993: 23-26.
- [8] 张崇民, 赵小锋, 付小龙, 等. 分子动力学模拟在推进剂组物理化学性能研究中的应用进展[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 531-542.
ZHANG Chong-min, ZHAO Xiao-feng, FU Xiao-long, et al. Progress in the application of molecular dynamics simulation in the study of physical and chemical properties of propellant components [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(6): 531-542.
- [9] 刘冬梅, 肖继军, 陈军, 等. 不同模型下 HMX 晶体结构和性能的 MD 研究[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 765-770.
LIU Dong-mei, XIAO Ji-jun, CHEN Jun, et al. MD study on structure and properties of HMX crystal under different models [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 765-770.
- [10] XIAO J J, LI S Y, CHEN J, et al. Molecular dynamics study on the correlation between structure and sensitivity for defective RDX crystals and their PBXs [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2013, 19(2): 803-809.
- [11] ZHANG P A, LI T Q, LIU S M, et al. Effects of NPBA on interface interaction and mechanical properties of NEPE propellant: Insight from molecular dynamics simulation [J]. *Computational Materials Science*, 2020, 171: 109135.
- [12] 张丽娜, 李定华, 姚维尚, 等. GAP 接枝海因与推进剂组分相互作用的分子模拟[J]. 推进技术, 2010, 31(5): 587-592.
ZHANG Li-na, LI Ding-hua, YAO Wei-shang, et al. Molecular dynamics simulation of interaction between GAP grafted hydantoin and solid oxidizers in for GAP propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(5): 587-592.
- [13] LI J, YANG Y, LUO X W, et al. Developments of molecular dynamics simulation for composites' interface [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42: 644-648.
- [14] ZHU W, WANG X, XIAO J, et al. Molecular dynamics simulations of AP/HMX composite with a modified forcefield [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1): 810-816.
- [15] 付一政, 刘亚青, 梅玉林. HTPB 与 Al 不同晶面结合能和力学性能分子动力学模拟[J]. 物理化学学报, 2009, 25(1): 187-190.
FU Yi-zheng, LIU Ya-qing, MEI Yu-lin. Molecular dynamics simulation on binding energies and mechanical properties of HTPB and different crystal faces of Al [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2009, 25(1): 187-190.
- [16] LV L, YANG M, LONG Y, et al. Molecular dynamics simulation of structural and mechanical features of a polymer-bonded explosive interface under tensile deformation [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 557: 149823.
- [17] LONG Y, LIU Y G, NIE F D, et al. Force-field derivation and atomistic simulation of HMX/graphite interface and polycrystal systems [J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2012, 57: 102-114.
- [18] ZHANG J, SHI L, LUO P, et al. Mechanical properties and deformation behaviors of the hydroxyl-terminated polybutadiene and ammonium perchlorate interface by molecular dynamics simulation [J]. *Computational Materials Science*, 2023, 221: 112077.
- [19] 周水平, 唐根, 庞爱民, 等. GAP 复合固体推进剂微观结构演变特性[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(5): 580-585, 592.
ZHOU Shui-ping, TANG Gen, PANG Ai-min, et al. Evolution of meso-structure of GAP composite solid propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(5): 580-585, 592.
- [20] 刘晋湘, 梁蓓, 朱立勋, 等. I 类 AP 初始缺陷对丁羟推进剂力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(3): 273-277.
LIU Jin-xiang, LIANG Bei, ZHU Li-xun, et al. Effect of initial defect of type I AP on the mechanical properties of HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(3): 273-277.
- [21] CERRI S, BOHN M A, MENKE K, et al. Aging of ADN rocket propellant formulations with desmophen-based elastomer binder [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(4): 526-537.
- [22] 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.
- [23] COLLINS B C, MAGGI F, MATOUS K, et al. Using tomography to characterize heterogeneous propellants [R]. AIAA 2008-941, 2008.
- [24] LEE H, BRANDYBERRY M, TUDOR A, et al. Three-dimensional reconstruction of statistically optimal unit cells of polydisperse particulate composites from microtomography [J]. *Physical Review E*, 2009, 80(6): 061301.

- [25] 马昌兵, 强洪夫, 武文明, 等. 丁羟推进剂微观结构的统计特性分析[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 52-56.
MA Chang-bing, QIANG Hong-fu, WU Wen-ming, et al. Statistical character analysis on microstructure of HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34 (3): 52-56.
- [26] 李世奇. 固体发动机药柱细观损伤演化规律研究[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2021.
LI Shi-qi. Research on the meso-damage evolution law of solid motor grain [D]. Xi'an: Rocket Force University of Engineering, 2021.
- [27] 王亚平, 王北海. 丁羟推进剂拉伸脱湿的电子显微镜观测[J]. 固体火箭技术, 1999, 21(2): 71-74.
WANG Ya-ping, WANG Bei-hai. Study on the fracture behavior of HTPB propellant by means of SEM [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 21(2): 71-74.
- [28] WANG Z, QIANG H, WANG G. Experimental investigation on high strain rate tensile behaviors of HTPB propellant at low temperatures [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(6): 814-820
- [29] CHEN X, LAI J, CHANG X, et al. Compressive mechanical properties of HTPB propellant at low temperatures and high strain rates [J]. *Results in physics*, 2017(7): 4079-4084.
- [30] GENG T, QIANG H, WANG Z, et al. Macroscopic and mesoscopic properties of HTPB propellant under low temperature dynamic biaxial compression loading [J]. *Polymer Testing*, 2023, (119): 107922.
- [31] WANG Z, QIANG H, WANG G, et al. A new test method to obtain biaxial tensile behaviors of solid propellant at high strain rates [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2016, 25 (6) : 515-524.
- [32] CUI J, QIANG H, WANG J. Experimental and simulation research on microscopic damage of HTPB propellant under tension-shear loading [J]. *AIP Advances*, 2022(12): 085214.
- [33] ZHOU D, WU H, LIU X. Effect of pre-strain aging on the microdamage properties of composite solid propellant. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(8): 1234-1242.
- [34] WANG J, CHENG J, LEI M, et al. Mechanical properties and constitutive model of a composite solid propellant under the synergistic effects of accelerated aging time, pre-strain, and damage growth [J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 148: 103453.
- [35] ZHANG L, SHEN Z, LI H. Effects of superimposed pressure on the mechanical properties of HTPB propellant in a wide temperature range [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(8): 1216-1226.
- [36] 曾甲牙. 丁羟推进剂拉伸断裂行为的扫描电镜研究[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(4): 69-72.
ZENG Jia-ya. Study on the fracture behavior of HTPB propellant by means of SEM [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(4): 69-72.
- [37] 陈煜, 刘云飞, 谭惠民. NEPE 推进剂的细观力学性能研究[J]. 火炸药学报, 2008(1): 56-59.
CHEN Yu, LIU Yun-fei, TAN Hui-min. Study on the micromechanics of the NEPE solid propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008(1): 56-59.
- [38] VAN RAMSHORST M C J, DI BENEDETTO G L, DUVALOIS W, et al. Investigation of the failure mechanism of HTPB/AP/Al propellant by in-situ uniaxial tensile experimentation in SEM [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41 (4) : 700-708.
- [39] SHI R, SUN B, LIU X, et al. A mesoscopic damage model of solid propellants under thermos-mechanical coupling loads [J]. *Polymer Testing*, 2019, 79: 105927.
- [40] 李高春, 刘著卿, 张璇, 等. SEM 与数字图像法分析复合推进剂细观破坏 [J]. 含能材料, 2013, 21(3): 330-333.
LI Gao-chun, LIU Zhu-qing, ZHANG Xuan, et al. Mesoscale failure in solid propellant by coupling SEM and digital image correlation method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 330-333.
- [41] 李世奇, 强洪夫, 王广, 等. 单轴拉伸下 HTPB 推进剂细观损伤演化实验研究 [J]. 推进技术, 2022, 43(9): 411-417.
LI Shi-qi, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Experimental study on the meso-damage evolution of HTPB propellant under uniaxial tension load [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(9): 411-417.
- [42] 魏晋芳, 赖国栋, 柴海伟, 等. 准静态拉伸下固体推进剂三维结构变形损伤失效机理研究 [J]. 固体火箭技术, 2023, 46(2): 186-194.
WEI Jin-fang, LAI Guo-dong, CHAI Hai-wei, et al. Research on three-dimensional structural deformation failure mechanism of solid propellant under quasi-static tension [J]. *Journal of Rocket Technology*, 2023, 46(2): 186-194.
- [43] LIU Y, QIAN W, 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*, 2023, 882: 145451.
- [44] 赵玖玲, 强洪夫. MAPO 含量和 AP 级配对于丁羟推进剂力学性能的影响 [J]. 固体火箭技术, 2011, 34(4): 329-334.
ZHAO Jiu-ling, QIANG Hong-fu. Effects of MAPO contents and AP size distribution on mechanical behavior of HTPB propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34(4): 329-334.
- [45] 陈煜, 刘云飞, 夏吉东, 等. 键合剂对 NEPE 推进剂破坏趋势影响的实验定量研究 [J]. 固体火箭技术, 2010, 33(3): 299-301.
CHEN Yu, LIU Yun-fei, TXIA Ji-dong, et al. Quantitative experimental study on effect of bonding agents on the dewetting damage of NEPE solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(3): 299-301.
- [46] 杨秋秋, 蔡如琳, 徐胜良, 等. 原位拉伸扫描电镜法研究 GAP 推进剂的损伤行为 [J]. 火炸药学报, 2019, 42(5): 511-515.
YANG Qiu-qiu, CAI Ru-lin, XU Sheng-liang, et al. Damage behavior of GAP solid propellant by in-situ tensile SEM method [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42 (5): 511-515.
- [47] 杨秋秋, 徐胜良, 强福智, 等. 固体推进剂 SEM 图像分形维数研究 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(1): 63-67.
YANG Qiu-qiu, XU Sheng-liang, QIANG Fu-zhi, et al. Study on fractal dimension of SEM images of solid propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2021, 19(1) : 63-67.
- [48] 刘新国, 刘佩进, 王哲君. 低温动态加载下老化 HTPB 推进剂细观损伤研究 [J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 72-77.
LIU Xin-guo, LIU Pei-jin, WANG Zhe-jun. Microscopic damage of aged HTPB propellant at low temperatures under dynamic loading [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019,

- 42(1): 72-77.
- [49] 刘新国. 低温单轴拉伸下HTPB推进剂脱湿力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
LIU Xin-guo. Research on Dewetting Mechanical behaviors of HTPB propellant at low temperatures under uniaxial tension loading [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [50] LUO H, LOU Y, HE K, et al. Coupling in-situ synchrotron X-ray radiography and FT-IR spectroscopy reveal thermally-induced subsurface microstructure evolution of solid propellants[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 249: 112609.
- [51] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [52] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture [J]. *Advance in applied mechanics*, 1962, 7: 55-129.
- [53] ALFANO G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(6): 723-730.
- [54] RAVI-CHANDAR K. Mixed-mode fracture of solid propellants [R]. ADA351742.
- [55] 封涛. 基于细观模型的复合固体推进剂损伤数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
FENG Tao. Numerical simulation of meso-mechanics damage in composite solid propellant based on mesoscopic model [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018.
- [56] HOU Y, XU J, ZHOU C, et al. Microstructural simulations of debonding, nucleation, and crack propagation in an HMX-MDB propellant [J]. *Materials & Design*, 2021, 207: 109854.
- [57] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992, 40(6): 1377-1397.
- [58] NEEDLEMAN A. Micromechanical modelling of interfacial decohesion [J]. *Ultramicroscopy*, 1992, 40(3): 203-214.
- [59] 侯宇菲, 许进升, 古勇军, 等. 基于内聚力法则的高能硝酸酯增塑聚醚推进剂开裂过程细观模型 [J]. 兵工学报, 2020, 41(11): 2206-2215.
HOU Yu-fei, XU Jin-sheng, GU Yong-jun, et al. Mesoscopic model of cracking process of NEPE propellant based on cohesive zone model [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(11): 2206-2215.
- [60] LEE Y, PRAKASH V. Dynamic brittle fracture of high strength structural steels under conditions of plane strain [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(22): 3293-3337.
- [61] ASHCROFT I A, HUGHES D J, SHAW S J. Model fracture of epoxy bonded composite joints: 1. Quasi-static loading [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2001, 21(2): 87-99.
- [62] HAN B, JU Y, ZHOU C. Simulation of crack propagation in HTPB propellant using cohesive zone model [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 26: 304-317.
- [63] CUI H R, LI H Y, SHEN Z B. Cohesive zone model for mode-I fracture with viscoelastic-sensitivity [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 221: 106578.
- [64] 颜小婷, 夏智勋, 那旭东, 等. 复合固体推进剂颗粒填充模型及其统计特性分析 [J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(5): 61-71.
YAN Xiao-ting, XIA Zhi-xun, NA Xu-dong, et al. Particle packing model of composite solid propellant and its statistical analysis [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(5): 61-71.
- [65] MERCIER S, KOWALCZYK-GAJEWSKA K, CZARNOTA C. Effective behavior of composites with combined kinematic and isotropic hardening based on additive tangent Mori-Tanaka scheme [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174: 107052.
- [66] 常武军. 复合固体推进剂细观损伤及其数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
CHANG Wu-jun. Meso damage and numerical simulation of composite solid propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of technology, 2013.
- [67] SHEN L, SHEN Z, LI H, et al. A Voronoi cell finite element method for estimating effective mechanical properties of composite solid propellants [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(11): 5377-5385.
- [68] KNOTT G M, JACKSON T L, BUCKMASTER J. Random packing of heterogeneous propellants [J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(4): 678-686.
- [69] KOCHAVETS S V. Random sphere packing model of heterogeneous propellants [D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [70] MAGGI F, STAFFORD S, JACKSON T L, et al. Nature of packs used in propellant modeling [J]. *Physical Review. E*, 2008, 77(4): 046107.
- [71] KUMAR N C, MATOUS K, GEUBELLE P H. Reconstruction of periodic unit cells of multimodal random particulate composites using genetic algorithms [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42: 352-367.
- [72] COLLINS B, MAGGI F, MATOUS K, et al. Using tomography to characterize heterogeneous propellants [C]//Proceedings of 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008: 1-7.
- [73] 封涛, 许进升, 韩龙, 等. 细观结构对HTPB推进剂力学性能影响的数值研究 [J]. 功能材料, 2018, 49(1): 01078-01082.
FENG Tao, XU Jin-sheng, HAN Long, et al. Numerical research on the influence of mesoscopic structure on HTPB propellant mechanical properties [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(1): 01078-01082.
- [74] 封涛, 许进升, 韩龙, 等. 初始缺陷对复合固体推进剂力学性能影响的数值研究 [J]. 功能材料, 2018, 49(2): 02204-02208.
FENG Tao, XU Jin-sheng, HAN Long, et al. Numerical study of the influence of initial defects on the mechanical properties of composite solid propellants [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(2): 02204-02208.
- [75] 侯宇菲, 许进升, 陈雄, 等. 考虑颗粒形状的复合固体推进剂细观损伤分析 [J]. 固体火箭技术, 2019, 42(4): 440-446, 475.
HOU Yu-fei, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, et al. Microscopic damage analysis of composite solid propellants considering the particle shape [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(4): 440-446, 475.
- [76] KOSIBA G D, WIXOM R R, OEHLSCHLAEGER M A. High-fidelity microstructural characterization, performance modeling of aluminized composite propellant [J]. *Propellants*,

- Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(12): 1387-1395.
- [77] GALLIER S, HIERNARD F. Microstructure of composite propellants using simulated packings and X-ray tomography[J]. *Journal of propulsion and power*, 2008, 24(1): 147-150.
- [78] 刘著卿, 李高春, 邢耀国, 等. 复合固体推进剂细观损伤扫描电镜实验及数值模拟[J]. *推进技术*, 2011, 32(3): 412-416.
LIU Zhu-qing, LI Gao-chun, XING Yao-guo, et al. Numerical simulation and SEM study on the microstructural damage of composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3): 412-416.
- [79] 申柳雷, 申志彬, 李晶钰, 等. 复合固体推进剂等效力学性能 VCFEM 细观预示方法[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4): 53-58.
SHEN Liu-lei, SHEN Zhi-bin, LI Jing-yu, et al. VCFEM microscopic method for evaluating effective mechanical properties of composite solid propellants[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4): 53-58.
- [80] VIJAY C, RAGUVARUN K, BHARGHAV K V S, et al. Use of X-Ray computed tomography for validation of random packs of composite solid propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(7): 915-922.
- [81] LI G, WANG Y, JIANG A, et al. Micromechanical investigation of debonding processes in composite solid propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(7): 642-649.
- [82] DE FRANCQUEVILLE F, DIANI J, GILORMINI P, et al. Use of a micromechanical approach to understand the mechanical behavior of solid propellants[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 153: 103656.
- [83] CUI H, LV X, XU Y, et al. A step-by-step equivalent microprediction method for the mechanical properties of composite solid propellants considering dewetting damage[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 2427463.
- [84] 张兴高, 张炜, 芦伟, 等. HTPB 推进剂填料/基体界面粘结合能老化特性研究[J]. *含能材料*, 2009, 17(3): 269-273.
ZHANG Xing-gao, ZHANG Wei, LU Wei, et al. Aging characteristics of interfacial adhesive property of filler/binder matrix for HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 269-273.
- [85] 赵玖玲, 强洪夫. 基于粘附功的复合推进剂 AP/基体界面损伤宏细观仿真[J]. *固体火箭技术*, 2011, 34(5): 614-618, 622.
ZHAO Jiu-ling, QIANG Hong-fu. Interface damage bi-scale simulation of composite solid propellant based on cohesive work[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34(5): 614-618, 622.
- [86] 彭威, 任均国, 周建平. 复合固体推进剂脱湿模型的研究[J]. *固体火箭技术*, 2017, 23(2): 48-51.
PENG Wei, REN Jun-guo, ZHOU Jian-ping. A study on dewetting model of composite solid propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 23(2): 48-51.
- [87] 王哲君. 低温动态加载下 HTPB 推进剂力学行为的实验和理论研究[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2016.
WANG Zhe-jun. Experimental and theoretical research on mechanical behaviors of HTPB propellant at low temperatures under dynamic loading[D]. Xi'an: Rocket Force University of Engineering, 2016.
- [88] 韩龙. 复合固体推进剂细观损伤机理及本构模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
HAN Long. Study on meso damage mechanism and constitutive model of composite solid propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2017.
- [89] 韩龙, 许进升, 周长省. HTPB/IPDI 复合固体推进剂细观界面率相关参数的反演识别研究[J]. *含能材料*, 2016, 24(10): 928-935.
HAN Long, XU Jin-sheng, ZHOU Chang-sheng. Inverse identification of the rate-dependent micro interface parameters of HTPB/IPDI composite propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(10): 928-935.
- [90] 张超, 侯俊玲, 李群. 复合固体推进剂脱湿过程细观建模与损伤定量表征[J]. *固体火箭技术*, 2020, 43(4): 423-431.
ZHANG Chao, HOU Jun-ling, LI Qun. Meso-modeling and damage quantitative characterization of dewetting process in composite solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(4): 423-431.
- [91] XU Y, LI X, WANG X, et al. Inverse parameter identification of cohesive zone model for simulating mixed-mode crack propagation[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2014, 51(13): 2400-2410.
- [92] ZHI S, SUN B, ZHANG J. Multiscale modeling of heterogeneous propellants from particle packing to grain failure using a surface-based cohesive approach[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(3): 746-759.
- [93] CHANG W J, JU Y T, Han B. Numerical simulation of particle/matrix interface failure in composite propellant[J]. *Defence Technology*, 2012, 8(3): 35-60.
- [94] 职世君, 曹付齐, 申志彬, 等. 复合固体推进剂颗粒脱湿损伤参数反演[J]. *推进技术*, 2016, 37(10): 1977-1983.
ZHI Shi-jun, CAO Fu-qi, SHEN Zhi-bin, et al. Parameters inversion of particle dewetting damage of composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(10): 1977-1983.
- [95] 封涛, 郑健, 许进升, 等. 复合固体推进剂细观结构建模及脱黏过程数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(1): 223-231.
FENG Tao, ZHENG Jian, XU Jin-sheng, et al. Mesoscopic structure modeling and numerical simulation of debonding process of composite solid propellants[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(1): 223-231.
- [96] 汪文强, 郑健, 陈雄, 等. 基于扩展有限元的改性双基推进剂的开裂过程模拟研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(1): 149-154.
WANG Wen-qiang, ZHENG Jian, CHEN Xiong, et al. Numerical simulation of crack propagation in CMDDB propellant based on extended finite element method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(1): 149-154.
- [97] KANG G, NING Y, CHEN P. Meso-scale failure simulation of polymer bonded explosive with initial defect by the numerical manifold method[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 173: 109425.
- [98] 袁洪魏, 唐维. PBX 炸药断裂行为仿真计算方法研究[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(6): 484-494.
YUAN Hong-wei, TANG Wei. Simulation method of fracture behavior for PBXs[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(6): 484-494.
- [99] 龙旭, 朱佳琦, 苏昱太, 等. 基于断裂相场的高分子粘结炸药裂纹演化及其力学性能退化分析[J]. *计算力学学报*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.o3.20230412.1246.024.html>.
LONG Xu, ZHU Jia-qi, SU Yu-tai, et al. Analysis of crack evolution and mechanical properties degradation of polymer

- bonded explosives based on phase-field fracture [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.o3.20230412.1246.024.html>.
- [100] 封涛, 许进升, 韩龙, 等. 含初始缺陷的复合固体推进剂力学性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(3): 91-99.
FENG Tao, XU Jin-sheng, HAN Long, et al. Mechanical properties of composite solid propellant with initial defects [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(3): 91-99.
- [101] 马昌兵. 复合固体推进剂微观结构模型及力学性能数值模拟研究[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2010.
MA Chang-bing. Research on mesostructure modeling and mechanical properties numerical simulation of composite solid propellant [D]. Xi'an: Rocket Force University of Engineering, 2010.
- [102] 申柳雪. 基于VCFEM的复合固体推进剂力学性能预示与设计方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
SHEN Liu-xue. Mechanical performance prediction and design methods of composite solid propellant based on VCFEM [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2018.
- [103] 张亮. 固体推进剂围压和率相关本构模型试验与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
ZHANG Liang. Experimental and applied research on constitutive model of composite solid propellant under superimposed pressure and changing rates [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2020.
- [104] WANG Q, WANG G, WANG Z, et al. Biaxial tensile test and meso damage numerical simulation of HTPB propellant [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 17635.
- [105] 赵玖玲. 基于全域CZM的复合推进剂微观损伤与断裂研究[J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(3): 269-274, 302.
ZHAO Jiu-ling. Research on microscopic damage and fracture of composite propellant based on global CZM [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(3): 269-274, 302.
- [106] WUBULIAISAN M, WU Y, HOU X, et al. Viscoelastic debonding criterion-based interface for modeling the mechanical behavior of solid propellants subjected to large deformation [J]. *European Journal of Mechanics/A Solids*, 2023, 98: 104873.
- [107] 侯宇菲, 许进升, 周长省, 等. 复合固体推进剂颗粒与基体初始界面有无缺陷的微观模型对比[J]. *兵工学报*, 2020, 41(9): 1800-1808.
HOU Yu-fei, XU Jin-sheng, ZHOU Chang-sheng, et al. Comparison of solid propellant micromodels with and without damage at initial particle/matrix interface [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(9): 1800-1808.
- [108] 王哲君, 强洪夫, 王广, 等. 固体推进剂力学性能和本构模型的研究进展[J]. *含能材料*, 2016, 24(4): 403-416.
WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Review on the mechanical properties and constitutive models of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(4): 403-416.
- [109] SMITH T L. Volume changes and dewetting in glass bead polyvinyl chloride elastomeric composites under large deformations [J]. *Rubber Chemistry & Technology*, 1959, 3(1): 113-116.
- [110] FARRIS R J. The character of the stress-strain function for highly filled elastomers [J]. *Transactions of the Society of Rheology*, 1968, 12(2): 303-314.
- [111] RICHTER H P, BOYER L R, GRAHAM K J, et al. Shock sensitivity of damaged energetic materials [C]//Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation, Portland, Oregon, 1989.
- [112] 赵伯华, 沈月萍. 火箭装药体积形变力学特性的研究[J]. *推进技术*, 1994, 4(2): 58-62.
ZHAO Bo-hua, SHEN Yue-ping. A study on volume deformation mechanical properties of rocket grain [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1994, 4(2): 58-62.
- [113] NEVIERE R. An extension of the time-temperature superposition principle to non-linear viscoelastic solids [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 5295-5306.
- [114] JUNG G D, YOUN S K. A nonlinear viscoelastic constitutive model of solid propellant [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(25): 3755-3777.
- [115] 张镇国, 张宏亮, 侯晓, 等. HTPB推进剂“脱湿”性能表征及影响因素试验研究[J]. *固体火箭技术*, 2020, 43(3): 265-270.
ZHANG Zhen-guo, ZHANG Hong-liang, HOU Xiao, et al. Experiment on dewetting performance characterization and influencing factor of HTPB propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(3): 265-270.
- [116] KNOLLMAN G C, MARTINSON R H, BELLIN J L. Ultrasonic assessment of cumulative internal damage in filled polymers (II) [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(6): 3164-3172.
- [117] ELBAN W L. Production and assessment of damaged high energy propellant samples [R]. NSWC TR 79-259, Naval Surface Weapons Center, 1980.
- [118] LIU C T. Investigation of the effect of pre-damage on the crack growth behavior in particulate composite material [R]. AIAA 93-34058, 1993.
- [119] ZHOU J. A constitutive model of polymer materials including chemical aging and mechanical damage and its experimental verification [J]. *Polymer*, 1993, 34(20): 4252-4256.
- [120] 阳建红, 王芳文, 覃世勇. HTPB复合固体推进剂的声发射特性及损伤模型的试验和理论研究[J]. *固体火箭技术*, 2000, 23(3): 37-40.
YANG Jian-hong, WANG Fang-wen, TAN Shi-yong. Experimental and theoretical study on AE characteristic and damage model of HTPB composite solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(3): 37-40.
- [121] 阳建红, 李学东, 赵光辉, 等. HTPB推进剂微观损伤机理的声发射实验研究[J]. *推进技术*, 2020, 21(3): 67-70.
YANG Jian-hong, LI Xue-dong, ZHAO Guang-hui, et al. Acoustic emission experimental study on meso-damage mechanism of HTPB propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 21(3): 67-70.
- [122] 刘承武, 阳建红, 邓凯, 等. HTPB推进剂温度冲击环境下损伤特性的声发射试验[J]. *无损检测*, 2011, 33(1): 47-49, 84.
LIU Cheng-wu, YANG Jian-hong, DENG Kai, et al. The acoustic emission testing of damage properties of HTPB solid propellant under temperature shock [J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 33(1): 47-49, 84.
- [123] 刘承武, 阳建红, 张晖. 复合固体推进剂损伤演化的声发射检测[J]. *上海航天*, 2011, 28(3): 69-72.
LIU Cheng-wu, YANG Jian-hong, ZHANG Hui. Acoustic emission testing for damage evolution of composite solid propellant [J]. *Aerospace Shanghai*, 2011, 28(3): 69-72.
- [124] BESCOND C, MOREAU A, LEVESQUE D, et al. Laser ultra-

- sonic determination of the elastic constants of damaged propellant[J]. *AIP Conference*, 2002, (21): 1392-1399.
- [125] MIHARA T, HAMAJIMA T, TASHIRO H, et al. Ultrasonic inspection of rocket fuel model using laminated transducer and multi-channel step pulser [C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2013, 1511(1): 1617-1622.
- [126] PAN Y, QU W, ZHANG S, et al. A nonlinear ultrasonic method for detection and characterization of dewetting damage in solid propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(10): e202200079.
- [127] PETER W H, RANSON W F. Digital imaging technique in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [128] MCDONNELL M P, RAST R H, LAWRENCE J L. Methods for enhancing accuracy of modulus, strain, and strain rate using video extensometry [C]//JANNAF 41st Structures and Mechanical Behavior Subcommittee Meeting, San Antonio, Texas, 2012.
- [129] MILLER T C. Damage and dilatometry for solid propellants with digital image correlation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 44(2): 234-245.
- [130] LEI M, CHEN E, ZHAO Z, et al. A temperature/strain-rate-dependent finite deformation constitutive and failure model for solid propellants [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 66(9): 294611.
- [131] WUBULIAISAN M, WU Y, HOU X, et al. Multiscale viscoelastic constitutive modeling of solid propellants subjected to large deformation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 262-263: 112084.
- [132] SHIMIZU M, YOSHIDA T, ITO K, et al. X-ray computerized tomography (XCT) for nondestructive inspection research of solid rocket motors [C]//14th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, Japan, 1986.
- [133] RAVINDRAN V R, SREELAKSHMI C, VIBINKUMAR S. Digital radiography-based 3D-CT imaging for the NDE of solid rocket propellant systems [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2008, 50(10): 564-568.
- [134] DAI J, LI T, XUAN Z, et al. Defect edge detection on CT images of the grain in solid rocket motor [C]//2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022.
- [135] Q/G 45A—2015 固体火箭发动机推进剂力学性能测试项目及 要求 [S]. 中国航天科技集团公司第四研究院标准, 2015. Q/G 45A—2015: Test items and requirements for mechanical properties of solid rocket motor propellants [S]. Xi'an: Standard of the Fourth Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2015.
- [136] PHILADELPHIA P A. ASTM D2095-Standard test method for tensile strength of adhesives by means of bar and rod specimens [S]. USA: American Society for Testing and Material, 1996(Reapproved 2002).
- [137] 韦震, 鞠玉涛, 周清春, 等. 基于内聚力模型的铝/丁羟胶粘接界面力学研究 [J]. *固体火箭技术*, 2014, 37(2): 241-246, 252. WEI Zhen, JU Yu-tao, ZHOU Qing-chun, et al. Research on adhesive interfacial mechanical properties of Al/HTPB based on cohesive zone model [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014, 37(2): 241-246, 252.
- [138] 龚建良, 刘佩进, 李强. 基于能量守恒的 HTPB 推进剂非线性本构关系 [J]. *含能材料*, 2013, 21(3): 325-329.
- GONG Jian-liang, LIU Pei-jin, LI Qiang. Nonlinear constitutive relation of HTPB propellant based on the first law of thermodynamics [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 325-329.
- [139] XU J, CHEN X, WANG H, et al. Thermo-damage-viscoelastic constitutive model of HTPB composite propellant [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51: 3209-3217.
- [140] LI H, XU J, LIU J, et al. Research on the influences of confining pressure and strain rate on NEPE propellant: Experimental assessment and constitutive model [J]. *Defence Technology*, 2021, 17: 1764-1774.
- [141] 马浩, 职世君, 申志彬, 等. HTPB 推进剂“脱湿点”及快慢组合拉伸研究 [J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(6): 741-745. MA Hao, ZHI Shi-jun, SHEN Zhi-bin, et al. Study of dewetting points and composite rate tensile for HTPB propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(6): 741-745.
- [142] 刘领, 李月常, 胡蒙莉, 等. 复合固体推进剂单向拉伸曲线的拟合分析 [J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(3): 325-331. LIU Ling, LI Yue-chang, HU Meng-li, et al. Fitting analysis of stress-strain curves for composite solid propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(3): 325-331.
- [143] LI H, XU J, CHEN X, et al. A nonlinear viscoelastic constitutive model with damage and experimental validation for composite solid propellant [J]. *Scientific Reports*, 2023: 13: 2049.
- [144] MA H, SHEN Z B, LI D K. A viscoelastic constitutive model of composite propellant considering dewetting and strain-rate and its implementation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(9): 1167-1174.
- [145] FARBER J N, FARRIS R J. Model for prediction of the elastic response of reinforced materials over wide ranges of concentration [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, 34: 2093-2104.
- [146] TONG W, RAVICHANDRAN G. Effective elastic moduli and characterization of a particulate metal-matrix composite with damaged particles [J]. *Composites science and Technology*, 1994, 52(2): 247-252.
- [147] JUNG G D, YOUN S K. A nonlinear viscoelastic constitutive model of solid propellant [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(25): 3755-3777.
- [148] CANGA M E, BECKER W B, ÖZUPEK S. Constitutive modeling of viscoelastic materials with damage-computational aspects [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190(15-17): 2207-2226.
- [149] XING R, WANG L, ZHANG F, et al. Mechanical behavior and constitutive model of NEPE solid propellant in finite deformation [J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 172: 104383.
- [150] SCHAPERLY R A. A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1990, 38(2): 215-253.
- [151] RAMI M H, ANASTASIA H M. Numerical finite element formulation of the Schaperly non-linear viscoelastic material model [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59(1): 25-45.
- [152] WANG Z, QIANG H, WANG G, et al. Tensile mechanical properties and constitutive model for HTPB propellant at low temperature and high strain rate [J]. *Journal of Applied Poly-*

- mer Science*, 2015, 132(24): 42104.
- [153] 阳建红, 陈顺祥, 赵光辉, 等. HTPB 复合固体推进剂内损伤的 CT 识别[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 59-62.
YANG Jian-hong, CHEN Shun-xiang, ZHO Guang-hui, et al. CT identification of meso-damage of HTPB composite solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(3): 59-62.
- [154] SHEKHAR H, SAHASRABUDHE A D. Longitudinal strain dependent variation of poisson's ratio for HTPB based solid rocket propellants in uniaxial tensile testing[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36(6): 558-563.
- [155] 童心, 王永平, 许进升, 等. HTPB 推进剂的低温疲劳特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1234-1240.
TONG Xin, WANG Yong-ping, XU Jin-sheng, et al. Fatigue properties of HTPB propellant at low temperature[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(5): 1234-1240.
- [156] HU Q, FANG Q Z, SHA B, et al. Study on the viscoelastic damage properties of NEPE solid propellant with different cyclic stress ratios[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(5): e202100342.
- [157] 梁蔚, 吕庆山, 陈雄, 等. 温度对 HTPB 推进剂疲劳特性的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(3): 184-190.
LIANG Wei, LV Qing-shan, CHEN Xiong, et al. Effect of temperature on fatigue properties of HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3): 184-190.
- [158] BILLS K W. Observations on the linear cumulative damage concept[C]//Proceedings of the JANNAF Structures and Mechanical Behavior Subcommittee Meeting, Chemical Propulsion Information Agency Publication. 1980, 331: 57-59.
- [159] LAHERU K L. Development of a generalized failure criterion for viscoelastic materials[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 1992, 8(4): 756-759.
- [160] DUNCAN E J S, MARGETSON J. A nonlinear viscoelastic theory for solid rocket propellants based on a cumulative damage approach[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1998, 23(2): 94-104.
- [161] KUNZ R. Characterization of solid propellant for linear cumulative damage modeling[C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2013.
- [162] 孟红磊. 改性双基推进剂装药结构完整性数值仿真方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
MENG Hong-lei. Research on numerical simulation method of structure integrity analysis for modified double base propellant grain[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [163] 王玉峰, 邢耀国, 李高春, 等. 温度循环条件下固体装药应力及累积损伤研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1132-1137.
WANG Yu-feng, XING Yao-guo, LI Gao-chun, et al. Stress and cumulative damage of solid charge under temperature cycling condition[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(5): 1132-1137.
- [164] 邓斌, 杨东, 段静波, 等. 温度载荷下的药柱累积损伤分析[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 280-284.
DENG Bin, YANG Dong, DUAN Jing-bo, et al. Cumulative damage analysis of solid rocket motor grain under temperature loading[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(2): 280-284.
- [165] 李高春, 韩永恒, 黄卫东, 等. 装药累积损伤评估及参数敏感性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 11-14.
LI Gao-chun, HAN Yong-heng, HUANG Wei-dong, et al. Cumulative damage evaluation and parametric sensitivity analysis of motor grain based on monitored ambient temperature[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(3): 11-14.
- [166] 李辉, 许进升, 周长省, 等. HTPB 推进剂温度相关性失效准则[J]. 含能材料, 2018, 26(9): 732-738.
LI Hui, XU Jin-sheng, ZHOU Chang-sheng, et al. Failure criterion related to temperature for HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9): 732-738.
- [167] 吴轩, 郑健, 许进升, 等. HTPB 固体推进剂蠕变损伤模型研究[J]. 火炸药学报, 2023, 46(3): 260-265.
WU Xuan, ZHENG Jian, XU Jin-sheng, et al. Research on creep damage model of HTPB solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(3): 260-265.
- [168] 邓斌, 董可海, 谢燕. 基于能量耗散的药柱粘弹性累积损伤[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(1): 24-27.
DENG Bin, DONG Ke-hai, XIE Yan. Viscoelastic cumulative damage of solid propellant grain based on energy dissipation[J]. *Journal of National University of Defense*, 2013, 35(1): 24-27.
- [169] 职世君, 沈欣, 曹军伟. 低温高应变速率下复合固体推进剂损伤机理分析[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(5): 574-579.
ZHI Shi-jun, SHEN Xin, CAO Jun-wei. Damage mechanism analysis of composite solid propellants under low temperature and high strain rate[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(5): 574-579.
- [170] 张亮, 职世君, 申志彬, 等. HTPB 复合固体推进剂率相关损伤机理分析与验证[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 210458.
ZHANG Liang, ZHI Shi-jun, SHEN Zhi-bin, et al. Analysis and verification of rate-dependent damage mechanism of HTPB composite solid propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(10): 210458.
- [171] TRAISSAC Y, NINOUS J, NEVIERE R, et al. Mechanical behavior of a solid composite propellant during motor ignition[J]. *Rubber chemistry and technology*, 1994, 68: 146-157.
- [172] ÖZUPEK S, BECKER E B. Constitutive modeling for solid propellants[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1997, 119(5): 125-132.
- [173] XU F, ARAVAS N, SOFRONIS P. Constitutive modeling of solid propellant materials with evolving microstructural damage[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(5): 2050-2073.
- [174] HUR J, PARK J B, JUNG G D, et al. Enhancements on a micromechanical constitutive model of solid propellant[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 87(1): 110-119.
- [175] 顾志旭, 郑坚, 彭威, 等. 基于不可逆热力学的宏微观粘弹性损伤本构模型[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 396-403.
GU Zhi-xu, ZHENG Jian, PENG Wei, et al. A macro-micro viscoelastic damage constitutive model based on irreversible thermodynamic[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(2): 396-403.
- [176] LEI M, WANG J J, CHENG J, et al. A constitutive model of the solid propellants considering the interface strength and

- dewetting [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 185: 107893.
- [177] 乌布力艾散·麦提图尔荪, 周涛, 吴艳青, 等. 考虑细观损伤的推进剂黏弹性多尺度本构模型研究[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 133-141.
- MAIMAITIUSUN Wubuliansan, ZHOU Tao, WU Yan-qing, et al. A multiscale viscoelastic constitutive model for solid propellants considering microscale damage [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2): 133-141.
- [178] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(1): 1-68.
- CHEN Yu-li, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, 39(1): 1-68.
- [179] 杨强, 解维华, 孟松鹤, 等. 复合材料多尺度分析方法与典型元件拉伸损伤模拟[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 617-624.
- YANG Qiang, XIE Wei-hua, MENG Song-he, et al. Multi-scale analysis method of composites and damage simulation of typical component under tensile load [J]. *Acta Materialia Sinica*, 2015, 32(3): 617-624.
- [180] 谭志勇, 阎君, 宁蕙, 等. 宏/细观一体化多尺度数值分析的进展与应用[J]. 强度与环境, 2023, 50(5): 1-10.
- TAN Zhi-yong, YAN Jun, NING Hui, et al. Developments and application of macro-meso integration multi-scale numerical analysis method [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2023, 50(5): 1-10.
- [181] FEYEL F. A multilevel finite element method (FE^2) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192(28-30): 3233-3244.
- [182] RENARD J, MARMONIER M F. Etude de l'initiation de l'endommagement dans la matrice d'un matériau composite par une méthode d'homogénéisation [J]. *Aero-space Science and Technology*, 1987, 6: 37-51.
- [183] MATSUI K, TERADA K, YUGE K. Two-scale finite element analysis of heterogeneous solids with periodic microstructures [J]. *Computers & structures*, 2004, 82(7): 593-606.
- [184] HOU T Y, WU X H. A multiscale finite element method for elliptic problems in composite materials and porous media [J]. *Journal of computational physics*, 1997, 134(1): 169-189.
- [185] ZHANG H W, WU J K, FU Z D. Extended multiscale finite element method for elasto-plastic analysis of 2D periodic lattice truss materials [J]. *Computational mechanics*, 2010, 45(6): 623-635.
- [186] 伍鹏, 李高春, 王鑫. HTPB 推进剂三点弯曲过程试验与数值模拟[J]. 含能材料, 2020, 28(6): 514-521.
- WU Peng, LI Gao-chun, WANG Xin. Experimental and numerical simulation on the damage process of HTPB propellant at the crack tip [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6): 514-521.
- [187] 王贵军, 周涛, 吴艳青, 等. 固体发动机药柱低温点火开裂失效的跨尺度分析[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 142-151.
- WANG Gui-jun, ZHOU Tao, WU Yan-qing, et al. Cross-scale analysis of low temperature ignition cracking failure of solid rocket motor grain [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2): 142-151.

Multiscale Research Progress on Damage Behaviors of Composite Solid Propellants

WANG Zhe-jun¹, QIANG Hong-fu¹, WANG Jia-xiang¹, PEI Shu-di¹, LI Shi-qi¹, GENG Ting-jing¹, HAN Yong-heng²

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. Military Representative Bureau of Naval Armament Department in Beijing Region, Beijing 100071, China)

Abstract: The damage behaviors of composite solid propellants were reviewed from four aspects: micro scale, meso scale, macro scale and cross scale. During this process, the observation and characterization methods of damage at different scales, determination methods for damage thresholds, construction methods for damage evolution models, numerical simulation methods for damage, and macro-mesoscopic cross-scale analysis methods were summarized. Based on this, to several shortcomings in current research, the future research directions that need to be further focused on are as follows: expanding the range of influencing factors to be considered in numerical simulation of damage behaviors for composite solid propellants at the microscale, and strengthening the verification of simulation results with experimental research conclusions from multiple aspects; improve the observation ability of damage experiments at the meso scale, the characterization level of damage evolution models, and the computational accuracy of damage numerical simulations; improve the detection accuracy of damage identification testing at the macro scale, the accuracy of determination methods for damage thresholds, and the predictive ability of damage evolution models; further establishing a theoretical method system for cross-scale study of the propellant damage behaviors based on the developed standard specification for the study of damage behaviors for composite solid propellants in single-scale.

Key words: composite solid propellant; damage observation; damage characterization; damage model; numerical simulation; multiscale

CLC number: TJ55;V512

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024014

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 22205259); The Youth Talent Promotion Plan of Shaanxi University Science and Technology Association (No. 20190504)

(责编: 王馨逸)