

专题——含能材料及其器件的相容性、性能退化机理和寿命评估方法

固体推进剂长期贮存损伤性能研究进展

陈家兴^{1*}, 黄启庆², 蔺跃龙¹, 武锐¹, 赵猛¹,
贺宏博¹, 史志伟¹, 闫泽永¹

(1. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010;
2. 火箭军装备部驻呼和浩特市地区军代表室, 呼和浩特 010010)

摘要: 主要从发动机装药结构的损伤性能有限元仿真分析方法、蠕变损伤试验设计以及蠕变损伤研究方法等 3 个方面综述了固体推进剂蠕变损伤性能研究进展, 指出蠕变效应会导致推进剂内部含能颗粒与基体之间出现脱湿细观损伤, 进一步总结了现今蠕变试验研究和宏细观蠕变性能数值模拟中的不足。分析认为, 蠕变损伤试验研究的难点在于研究推进剂材料级试验结果与实际装药结构中推进剂蠕变效应的对应性和数据映射关系, 推进剂损伤数值模拟的难点是推进剂含损伤蠕变多尺度本构模型的建立, 以及在自重载荷下药柱形变预测计算的应用计算问题。最后提出的建议可以为开展长期贮存条件下推进剂蠕变损伤性能研究提供一定的参考。

关键词: 固体推进剂; 蠕变损伤性能; 本构模型; 装药结构; 多尺度损伤; 蠕变试验方法

中图分类号: V512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)02-0001-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.001

Research Progress in Damage Properties of Solid Propellant During Long-term Storage

CHEN Jiaying^{1*}, HUANG Qiqing², LIN Yuelong¹, WU Rui¹, ZHAO Meng¹,
HE Hongbo¹, SHI Zhiwei¹, YAN Zeyong¹

(1. Inner Mongolia Institute of Dynamical Machinery, Hohhot 010010, China;
2. Representative Office of the Rocket Force Equipment Department stationed in Hohhot City, Hohhot 010010, China)

ABSTRACT: In this paper, the research progress of solid propellant creep properties was reviewed from three aspects: finite element analysis method, creep damage experiment design and creep damage research method. It was pointed out that the creep property lead to the meso-damage between particles and matrix in the solid propellant. The shortcomings in the present creep experimental research and numerical simulation of multi-scale property were summarized. The analysis showed that the creep experimental research difficulty lied in the research on the correspondence and data mapping relationship between the experimental results of propellant material grade and the creep effect of propellant in the actual charge structure; while the numerical simulation difficulty was the establishment of a multi-scale constitutive model of propellant damage creep and the application calculation of deformation prediction of propellant columns under self-weight load. Finally, the suggestions can provide some

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2024-01-16

Received: 2023-10-20; Revised: 2024-01-16

引文格式: 陈家兴, 黄启庆, 蔺跃龙, 等. 固体推进剂长期贮存损伤性能研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 1-11.

CHEN Jiaying, HUANG Qiqing, LIN Yuelong, et al. Corrosion Causes of Liquid Phase Pipeline Flanges for Separators of A Gas Field in the West of China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 1-11.

*通信作者 (Corresponding author)

references for the study in solid propellant creep damage properties with long-term storage.

KEY WORDS: solid propellant; creep damage properties; constitutive model; charge structure; multi-scale damage; creep experiment method

固体火箭发动机装药结构的完整性对于推进系统的安全性以及实现预定目标起着决定性的作用,推进剂的力学性能对装药结构力学性能完整性的影响较大。研究表明,因固体火箭发动机应用的特殊性,在长期贮存周期内,推进剂会受到温度、压力、振动等外界载荷的作用,反映到推进剂蠕变性能逐渐使得内部微细观孔隙的连通性也随着改变,推进剂内部强氧化剂和金属燃料颗粒与基体,以及颗粒内部逐渐出现裂纹生长和扩展等多种失效模式。

固体推进剂属于非均质黏弹性材料,现今在多尺度蠕变损伤力学对推进剂失效破坏机理的研究还不够深入,国内外还没有形成统一的定论。由于原材料以及工艺限制,推进剂对载荷加载历程和温度有极大的依赖性,在内部初始裂纹和孔隙的前提下,推进剂颗粒的脱湿损伤会逐步演化为宏观损伤破坏,上述研究成果在唯象层面揭示了蠕变损伤演化机制,解释了推进剂力学性能与损伤破坏方式的关联性。对于蠕变损伤性能计算方面,由于含能颗粒内部存在随机性分布特征,已实现的细观颗粒填充模型很难代表真实完整细观结构,从细观角度研究推进剂蠕变损伤性能存在较大的难度。对于推进剂的试件级试验方面,较多完成推进剂哑铃形试样在恒变速率力学试验以及少量特定条件下药柱结构的验证试验,主要是以试件的应变与时间关系曲线获取为目标,很少涉及确定推进剂力学性能的细观损伤机理以及影响因素。

因此,在上述研究背景下,本文围绕推进剂的蠕变性能计算、蠕变试验设计和细观蠕变损伤研究方法3个方面的研究进展,从蠕变损伤性能研究方法、蠕变试验设计、细观蠕变损伤标定和裂纹及孔隙的多尺度演化研究展开了论述。同时,在文中指出了长期贮存周期内蠕变损伤性能需要解决的关键问题,并且对固体推进剂蠕变损伤性能的研究给出了几点建议,主要有在数值模拟方面提出了需要综合考虑多因素作用下开发含蠕变损伤变量的本构模型和裂纹扩展理论模型,以及提出适用于蠕变效应的失效准则;在试验方面提出了需要发展多尺度蠕变力学性能新测试试验平台,建立材料级试验结果与推进剂装药结果的对应性,在材料-结构对应联系上建立数据映射关系,形成对推进剂力学响应的新结论。

1 蠕变效应试验研究

从现有研究可知,对于推进剂静力学性能试验研究,主要集中于载荷作用下力学特性参数的获取,基本都需要对载荷进行一定程度的简化,比如定应变载

荷试验、温度循环试验等,要结合图像处理仪器和方法来探索力学特性参数与不同载荷的映射关系。其他还有围压加载、瞬态冲击以及振动试验等动态力学试验。总的来说,关于推进剂蠕变性能试验研究相对较少,且研究不够系统,蠕变力学性能规律及变化机理尚未形成统一的认识。

1.1 蠕变宏观力学性能

单向力学试验作为最基础的力学性能测试,已被广泛应用在材料的力学性能研究中,但是传统的特征参数(如最大抗拉强度 σ_m 、初始模量 E_c 、断裂伸长率 ϵ_b)并不能反应蠕变效应的损伤和真实工况。目前,国内外对多种类型推进剂的蠕变性能进行的试验研究主要是在不同温度和加载应力下,研究材料应力-应变曲线的变化规律,同时建立相应的本构模型,得出的结论结合黏弹性力学的时温等效原理(TTSP)等理论,用于预测长期蠕变效应对药柱变形的影响。通常推进剂定应力拉伸载荷曲线都表现为3个蠕变阶段^[1]。GAP-ETPE基推进剂恒定温度下的蠕变曲线如图1a所示,通常随着加载应力的增加,蠕变应变增加,形变恢复能力也逐渐降低。在考虑恒定应力而考察不同温度下的蠕变曲线如图1b所示,随着温度的提高,蠕变应变逐渐增大。同时,为了研究贮存周期的影响作用,一些研究人员提出,对于贮存损伤的影响,采用热化学老化试验等方法来引入损伤。在蠕变试验前,针对不同推进剂属性,采用老化试验箱实现不同温度和不同时间的加速老化,来区分贮存时间的影响。

此外,推进剂在整个贮存周期实际上是多种类型载荷共同作用的过程。针对不同载荷的共同作用,一些学者提出了推进剂的多轴试验研究。Geng等^[2]对HTPB推进剂在不同温度和应变速率下进行了双轴压缩载荷试验,结果显示,推进剂具有温度和应变率显著相关的特性,同时双轴压缩强度的结果均高于单轴强度结果。同时,观测到推进剂拉伸断口含能颗粒被拔出,颗粒表面较为光滑,未发现颗粒的破碎,推进剂的损伤主要表现为颗粒与基体的脱黏。Wang等^[3]研究了推进剂在双轴拉伸载荷下的强度,结果显示,随着加载比的增加,推进剂的双轴力学性能接近单轴拉伸。郭宇等^[4]利用表征仪器扫描电镜(SEM),研究了自然贮存蠕变效应下不同位置推进剂含能颗粒粒径等形貌特征,研究表明,药柱在自然贮存条件下,沿轴向方向不同位置推进剂的老化程度不同,越靠近非金属壳体的位置,老化程度越严重,材料力学性能衰减较严重。王虎干等^[5]开展了推进剂老化试验,研

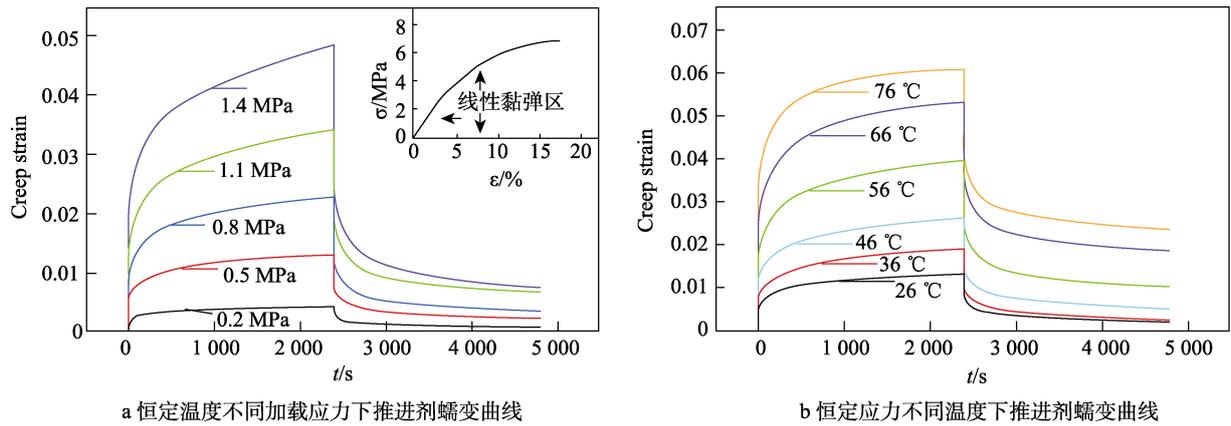


图 1 推进剂蠕变曲线特性^[1]

Fig.1 Creep curves of GAP-ETPE propellant^[1]: a) creep curves of GAP-ETPE propellant at different loading stress; b) creep curves of GAP-ETPE propellant at different temperature

研究表明, 热化学老化后, 试件在蠕变拉伸试验中的最大伸长率随着老化时间的增加明显下降。

王鑫等^[6]研究了在立式贮存状态下考虑自重效应和低频振动载荷作用的推进剂累积损伤量的计算, 在蠕变和疲劳的交互作用下, 开展了推进剂不同定载

荷加载的蠕变试验, 以及定应变幅值往复拉伸疲劳试验, 推进剂的力学性能表现为具有非对称性。不考虑疲劳载荷下蠕变试验的应变-时间曲线如图 2 所示。结果表明, 对于推进剂在低于某一个应力值时, 蠕变效应不会引起推进剂的断裂破坏。

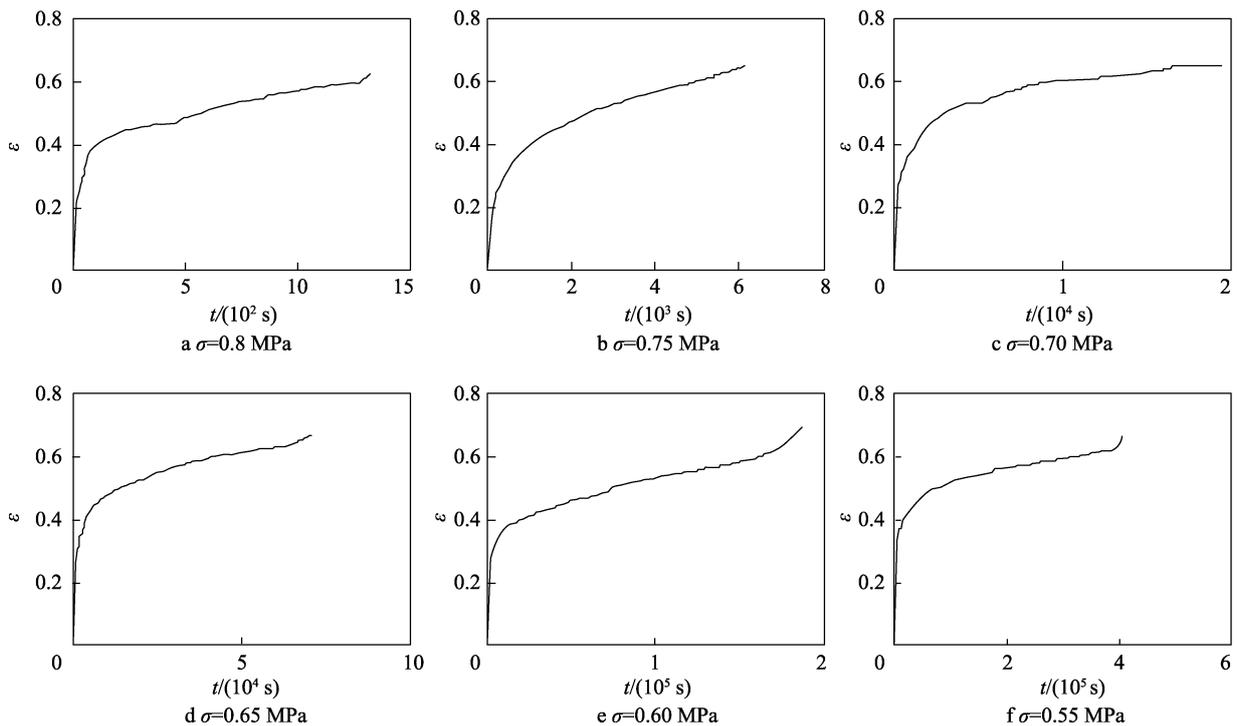


图 2 不同定载荷下应变-时间曲线^[6]

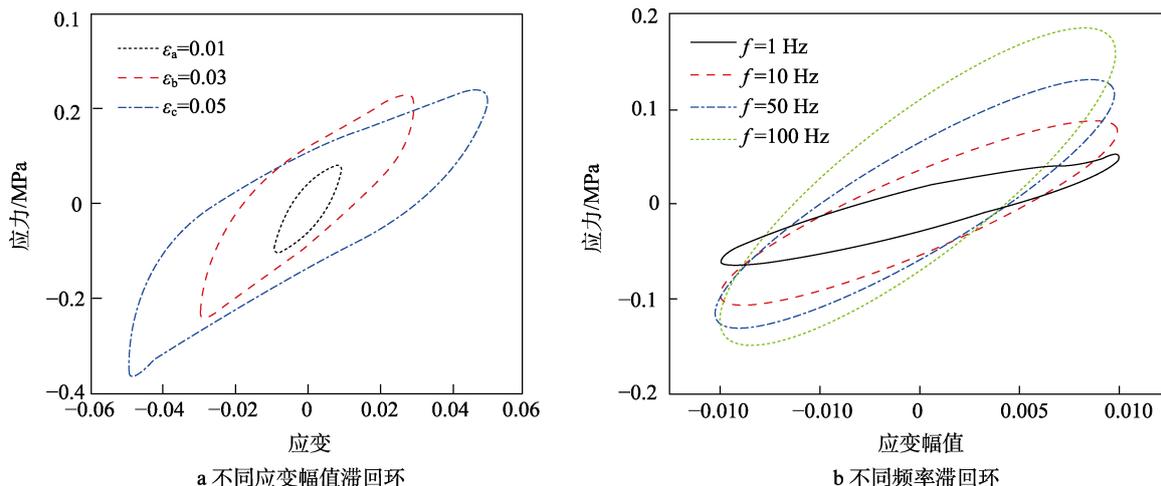
Fig.2 Curves of strain and time with different load^[6]

周东谟^[7]考虑了热老化因素导致的损伤, 建立了在定应变条件下的推进剂力学试验, 研究了不同热老化试验后推进剂最大伸长率等参数变化, 提出了考虑老化损伤的本构模型, 老化损伤参数 δ 通过试验数据实现了拟合, 并且研究了定应变和温度对模型参数的影响规律。童心^[8]采用热机械振动仪 (DMA) 测试了不同频率和不同应变幅值对推进剂能量耗散的影响, 通过分析损耗模量的变化, 研究了推进剂受到循环振

动载荷时的力学响应。结果表明, 振动载荷参数对应力-应变滞回环的影响, 随着频率和应变幅值的增大, 滞回能量损耗越大, 如图 3 所示。

1.2 蠕变细观试验

随着近年来高精度分辨率试验设备的出现, 使得探索推进剂材料内部细观构成及损伤变化成为可能。对于固体推进剂细观损伤和裂纹扩展研究, 需要在清

图3 滞回环变化规律^[8]Fig.3 Hysteresis loops variation with parameters^[8]: a) hysteresis loops at different strain amplitude; b) hysteresis loops at different strain amplitude

晰识别初始缺陷的基础上,采用多种表征方法和试验测试手段来分析材料的失效模式。另外,通过微型CT原位成像和定应变拉伸测试可以精准获取多个加载载荷下推进剂的损伤破坏形式,SEM仪器虽然可以直接观察试件的表面形貌,但是只能研究断口特征;微CT试验平台在获得材料内部微细观结构后,可以清晰地区分界面相、基体和各种固体含能颗粒,同时实现定量表征。其他如超声波检测、红外检测、同步辐射光源以及太赫兹时域光谱技术等无损检测技术也在固体推进剂损伤检测有所应用。其中,超声波检测存在信噪比低、表面检测盲区及对小尺寸的缺陷检测灵敏度不高的局限性;太赫兹时域光谱技术由于设备功率和功能等的差异,对于很多低功率的检测设备,仅仅采用单一的成像模式,常常无法有效成像。

在静态载荷下推进剂的拉伸试验,试验件多依据试验台夹具,采用非标准件,试验结果集中在量化AP颗粒、铝颗粒等颗粒的形状和体积率,以及观测和总结裂纹演化规律。研究表明,在准静态定应变拉伸载荷下,当拉伸工程应变接近于某一个数值时,裂纹形成横向贯穿,试件随后发生断裂,除颗粒内部的初始损伤外,颗粒与基体之间界面的损伤破坏也是断裂形成的诱因,基本上颗粒粒径分布在70~180 μm ,如图4所示^[9]。王龙^[10]以拉伸速率为0.1 mm/s对推进剂非标准试件进行了单轴拉伸,并在高分辨率微CT试验平台上进行了初始阶段、几个设定应变值阶段的原位表征。研究表明,孔隙体积随着应变增大而增加,在存在初始缺陷的情况下,孔隙的球度呈现减小的规律。由图5可以看出,初始缺陷的存在导致含能颗粒与基体界面发生损伤,通过量化颗粒与基体之间沿脱湿方向的界面面积可知,随着孔隙逐渐增加,界面脱湿损伤逐渐增大。研究结果表明,不同材料配方造成的推进剂细观结构差异,会使得其在不同外载荷下呈现不同的力学性能。

李春涛^[11]研究了丁羟四组元推进剂在多种拉伸速率以及不同温度(-50、20、70 $^{\circ}\text{C}$)和不同围压(0.1、2、8 MPa)下的力学性能,通过SEM扫描电镜和微CT仪器相结合的方法,从细观结构不同阶段的演化分析了宏观力学性能变化的内在原因,结果如图6所示。低温高压下,推进剂的损伤断口呈现出复杂的损伤破坏形式,由于颗粒的模量远大于基体材料,在拉伸过程中其损伤破坏形式与拉伸速率有着直接的关系。不同拉伸速率载荷下损伤形式有所差别,当拉伸速率达到1 000 mm/min时,一些直径较大的颗粒上存在裂纹;拉伸速率达到4 200 mm/min时,出现了颗粒破碎。

总结上述对于推进剂宏观以及细观蠕变性能试验的研究,现阶段较多采用标准哑铃形试件完成定载荷拉伸试验,获取不同定应力加载历程的应变-时间曲线等数据,但上述试验过程很少涉及细观孔隙和裂纹损伤定义和演化规律研究,没有深层次揭示蠕变损伤机理。实际情况中,推进剂面临内压等多种载荷,对于推进剂材料级蠕变试验结果,作为推进剂药柱蠕变效应的验证精度会较差。在细观层面上的定应变准静态原位拉伸试验,较少考虑材料的应变率对结果的影响。因此,在蠕变试验研究中,还需要综合考虑真实老化时间和温度效应、试样加载定载荷的方法等试验方法的设计,只有满足上述情况,得出的试验结果才具有更高的应用意义和参考价值。

2 蠕变损伤性能计算研究

长期贮存状态是固体发动机比较复杂的一种工况,尤其对于贴壁浇注大直径固体发动机,内部往往装药量巨大,大直径药柱结构内部在较长贮存周期内,面临多种复杂载荷,在固化降温残余应力和自重载荷的累加作用下,使得装药结构中推进剂以及界面

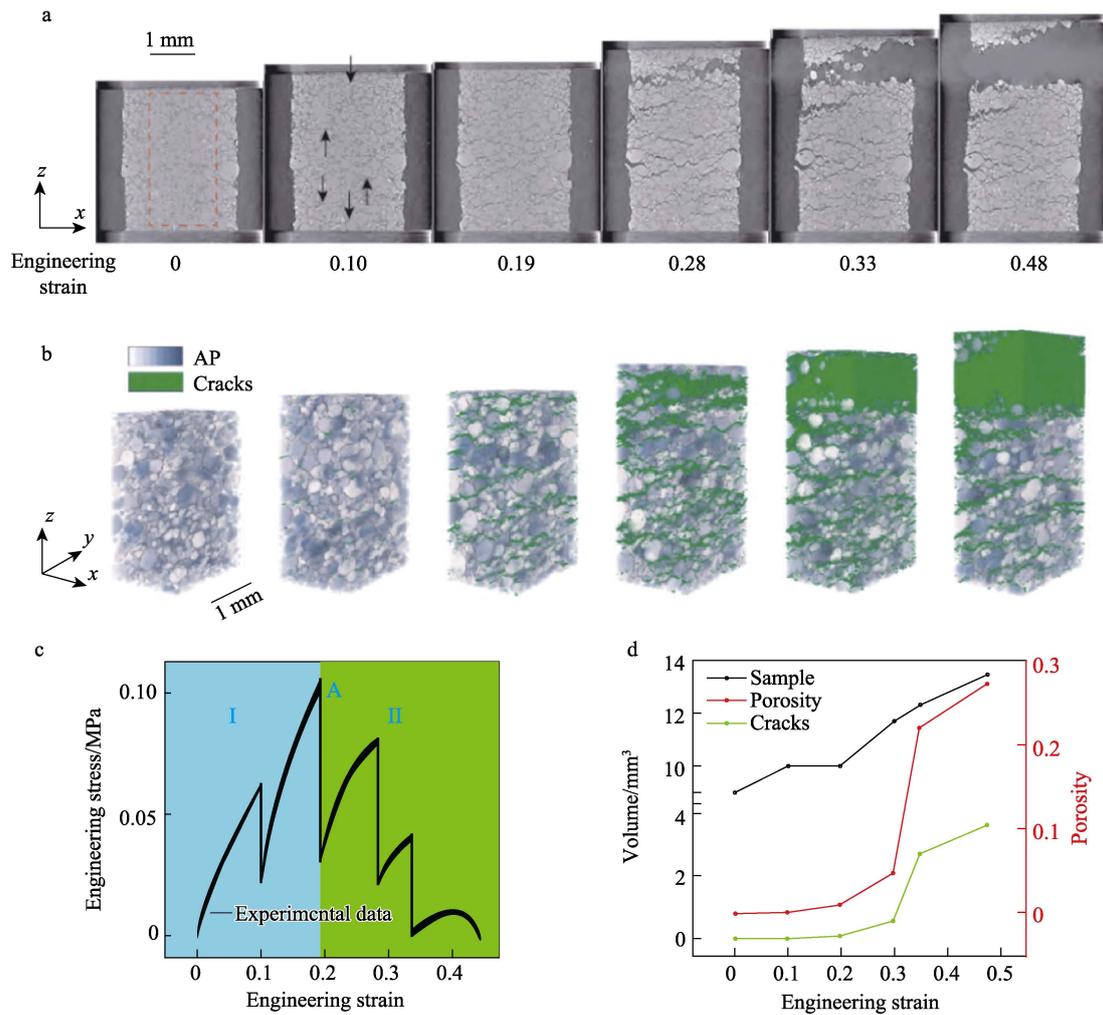


图 4 推进剂纵向拉伸裂纹演化随应变率变化^[9]
 Fig.4 Variation of longitudinal tensile crack evolution of propellant with strain rate^[9]

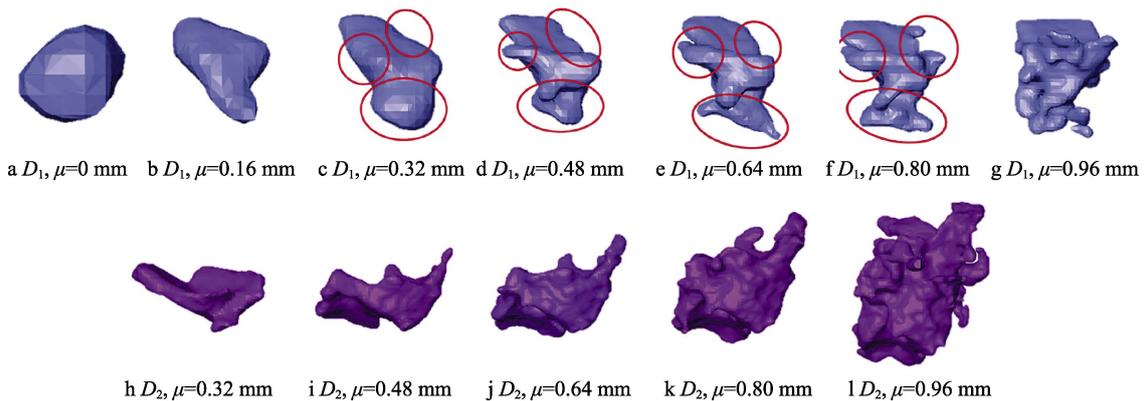


图 5 脱湿损伤三维重构结果^[10]
 Fig.5 Three-dimensional reconstruction results of typical debonding damage^[10]

受到非线性变化的拉伸和剪切耦合应力的作用。对于发动机开展整机验证力学性能测试, 可以揭示推进剂宏观力学损伤以及蠕变破坏机理, 但是会面临时间周期长以及取样困难的问题。因此, 为了弥补试验技术的不足, 许多研究人员开展了蠕变效应下的力学响应分析数值计算, 得出的结论为推进剂应用提供了

参考。

2.1 贮存宏观蠕变模拟计算

推进剂本构模型是描述力学响应的基础, 国内外研究人员针对固体推进剂本构模型完成了较多的研究。根据材料的时间相关性、率相关性、温度相关性

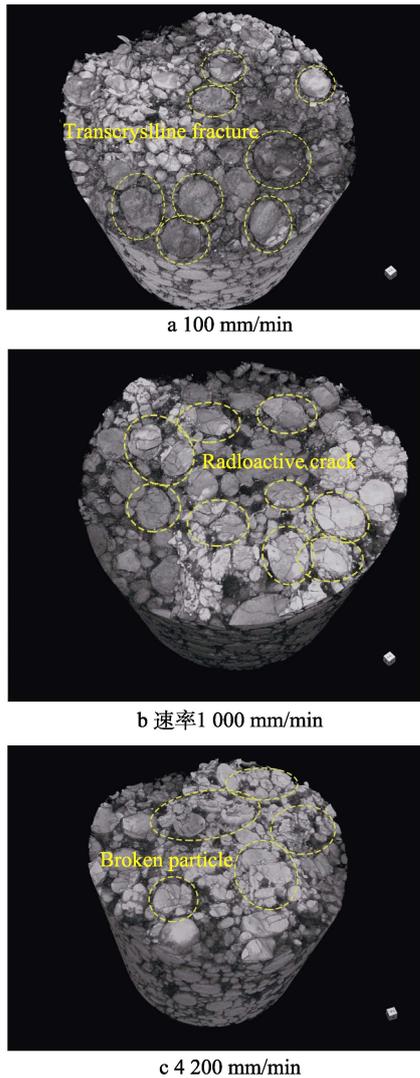


图6 不同拉伸速率下的三维重构图^[11]
Fig.6 Three-dimensional reconstruction at different tension rate^[11]

等力学性能,建立了弹性、黏弹性、塑性、黏塑性和损伤力学的本构模型,通过试验验证总结了模型的有效性和应用范围。早期对于蠕变效应的研究,研究人员以连续介质力学为基础,采用弹性弹簧元件和黏性元件的组合,得到了微分形式的本构模型,如经典的Maxwell模型、Kelvin模型、三参数模型等和材料的积分型本构方程,研究了时间载荷对推进剂蠕变效应的影响。

通常立式或者卧式贮存下固体推进剂蠕变性能的模拟计算以发动机结构为对象,采用宏观唯象方法,结合幂律型本构模型,根据蠕变试验结果的应力应变特性,将应变表示为应力与时间等参数的幂律函数,模拟计算固化降温、重力载荷、振动载荷等耦合工况下药柱整体的应力、应变分布,进一步分析药柱翼尖等特征点及典型路径轴向位移和应力随贮存时间的变化规律。研究过程中,较少考虑非线性细观蠕变损伤演化对宏观蠕变性能的影响。王鑫等^[12-13]研究

了某型发动机在加速老化和实测载荷施加下的力学响应,进行了药柱在固化降温、立式贮存以及低频率和小振幅振动载荷序贯历程下的有限元分析,如图7所示。计算结果表明,受到蠕变效应的影响,随着贮存时间的增加,药柱变形量缓慢增加,达到0.3mm左右。另一方面,采用位移传感器法对标准哑铃形推进剂试件开展了定载荷为0.5~0.8MPa的拉伸试验研究,应力越高,断裂时间越短,蠕变应力与对数蠕变断裂时间具有线性关系,同时定义蠕变损伤变量 D 为应力加载时间与拉伸断裂破坏时间的比值。预测装药结构中固化降温、初期重力载荷和长期重力载荷不同序贯载荷加载历程对应的位移如图7所示,结果显示,前翼槽等关键位置是装药结构的危险点。对数值模拟结果进行后处理后,分析药柱关键点和设定药柱路径蠕变损伤 D 的变化规律,结果显示,不同位置的蠕变损伤不同,低应力和高应力存在较大的差别,药柱中部的蠕变损伤要远高于前翼槽和后翼槽。

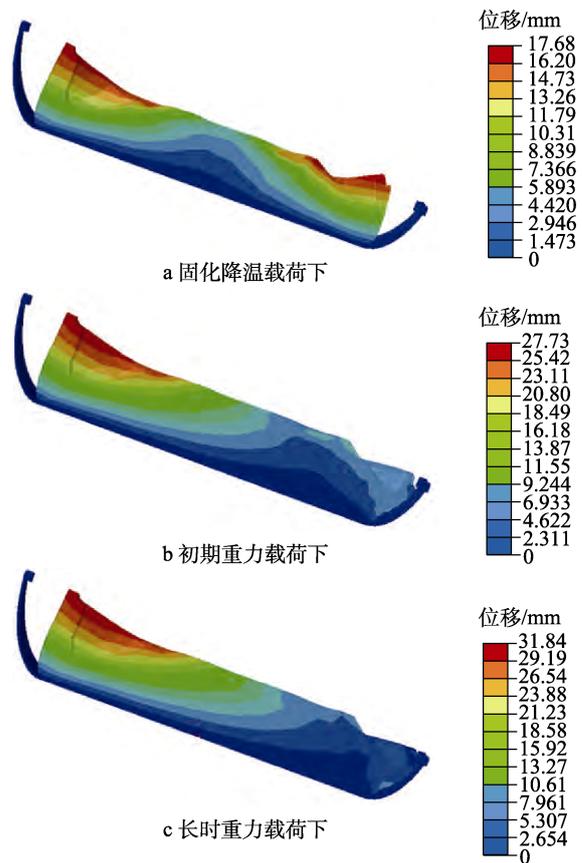


图7 多载荷下装药结构的位移云图^[12]
Fig.7 Displacement diagram of charge structure under multi-load^[12]

王永帅等^[14]采用有限元方法计算了药柱的完整性,试验数据拟合了推进剂幂律型蠕变本构方程的3个参数,如图8所示。计算结果表明,推进剂蠕变速率变化呈现显著的非线性,考虑蠕变效应的药柱最大位移要远大于不考虑蠕变效应的情况。罗一智^[15]采用

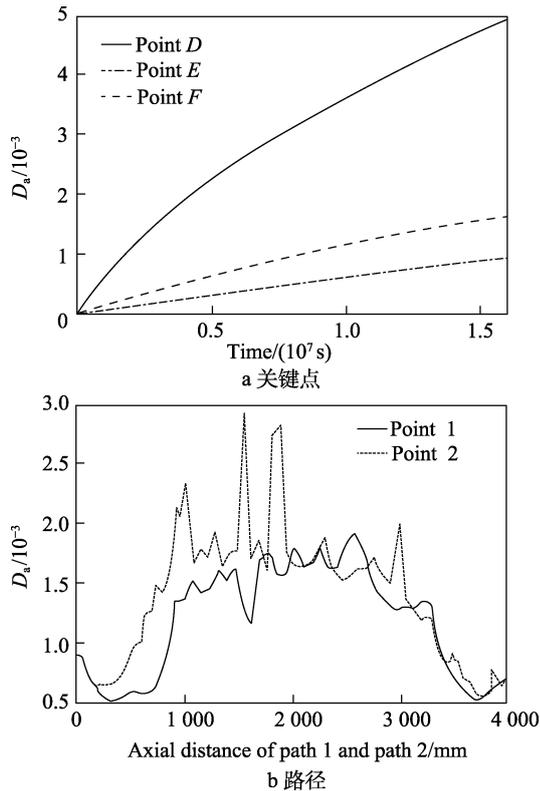


图 8 路径及关键点的蠕变损伤^[14]
Fig.8 Creep damage along key points and paths^[14]

类似的研究方法, 对比分析了重力载荷下是否考虑蠕变效应的 NEPE 推进剂药柱的力学响应。计算结果表明, 2 种情况下, 药柱的最大应力和应变在药柱结构的位置相同, 验证了幂律类蠕变方程与试验数据的偏差最小, 并且各个载荷水平下的试验数据吻合较好。在上述研究过程中, 贮存宏观蠕变性能模拟计算虽然采用了本构模型法和有限元方法相结合, 但由于实际情况中不会出现因蠕变效应造成推进剂断裂的情况, 因此计算结果只可以用于判断推进剂破坏与否, 预测计算结果往往无法有效评估预测复杂载荷下蠕变效应周期内损伤断裂阶段的真实过程。

2.2 细观蠕变损伤计算研究

目前许多学者在研究不同载荷下多尺度孔隙和

裂纹损伤演化时, 提出了多种损伤演化模型。主要有与时间相关的蠕变损伤模型、与伪应变能幂函数相关的损伤模型以及基于热力学理论的损伤模型^[16-18]。研究者们针对推进剂细观结构颗粒填充模型进行了相应的数值模拟, 主要完成了 3 个方面的研究: 首先, 实现了推进剂真实配方的识别和重构, 定义了含能颗粒参数化数据, 在算法的基础上建立了颗粒填充细观模型; 其次, 定义了细观模型中颗粒组归属属性以及颗粒与基体的黏接能, 结合均匀化理论和周期性边界条件等, 采用有限元计算方法完成了力学行为预测, 以及分析了颗粒“脱湿”损伤过程, 分析了裂纹扩展过程中的应力应变状态。对于颗粒与基体黏接界面力学性能的研究表明, 颗粒与基体黏接界面的力学性能是影响宏观应力-应变的重要因素, 但是通过试验测量界面黏接层的力学性能参数过程复杂, 而且难度较高, 通常采用优化反演算法来确定界面参数。

推进剂中颗粒粒径和颗粒分布存在随机性和可设计性的特征, 颗粒、孔隙和微裂纹等缺陷电镜图像如图 9 所示。可以看出, 颗粒大多数近似为球形或椭球形, 并且表面光滑, 填充系数较高。建立颗粒填充模型需要考察多个参数的影响, 为了使计算可行以及减少计算量, 需要在材料内部选择一个代表性体积单元 (RVE)。同时研究结果表明, 不同颗粒数目和尺寸配比的细观模型对脱湿也有一定的影响^[17]。细观颗粒填充模型可以从不同理论与角度出发, 基于多种数值算法来生成。比如连续算法和并列算法, 均设定了一定的区域投放颗粒, 可以单次投放 1 个颗粒, 也可以投放多个颗粒。当达到指定的平衡状态后, 后续颗粒按时间和碰撞能量等规则, 完成预定体积模型的生成。现今在固体推进剂细观模型研究领域, 分子动力学方法生成模型在本质上十分接近颗粒填充材料的真实制备过程, 得到了广泛的关注和发展。

颗粒填充细观结构模型如图 10 所示, 填充模型颗粒等效为球形, 一类为直径相同的颗粒模型, 另一类为不同粒径颗粒填充模型。韩龙等^[19]通过分子动力学方法建立了 NEPE 推进剂细观代表性体积单元模型, 并讨论了颗粒体积分数等对推进剂宏观力学性能

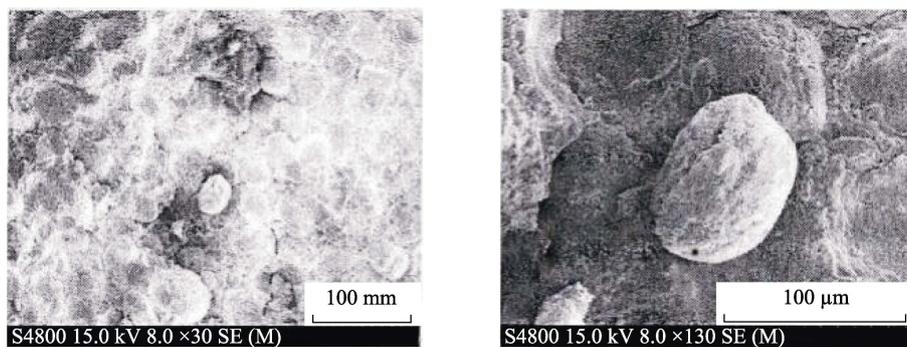


图 9 推进剂电镜扫描图^[17]
Fig.9 SEM images of solid propellants^[17]

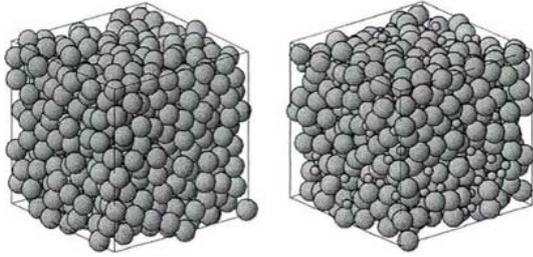


图 10 三维颗粒填充模型^[18]

Fig.10 Three-dimensional particle filling model^[18]

的影响。颜彬^[20]采用热黏弹性积分型本构方程,计算了药柱内孔应力随时间的变化,通过定义细观含能颗

粒材料不同的性能参数,分析了影响药柱完整性的因素。Lei等^[21]以细观颗粒与基体黏接界面能理论模型为研究对象,建立了细观损伤演化的本构模型,预测计算了界面损伤演化规律。庞维强等^[22]引入了内聚力法则,研究了界面性能对推进剂细观损伤演化的影响,同时分析了细观损伤演化情况,预测了细观损伤的刚度衰减。由于损伤内聚力模型可以准确表征推进剂在单轴拉伸过程中基体与颗粒界面之间的脱黏过程,因此他们以刚度衰减率为参数,计算了应变逐渐增大过程中刚度衰减情况,结果显示,损伤出现于大颗粒周围以及密集颗粒附近,如图 11 所示。

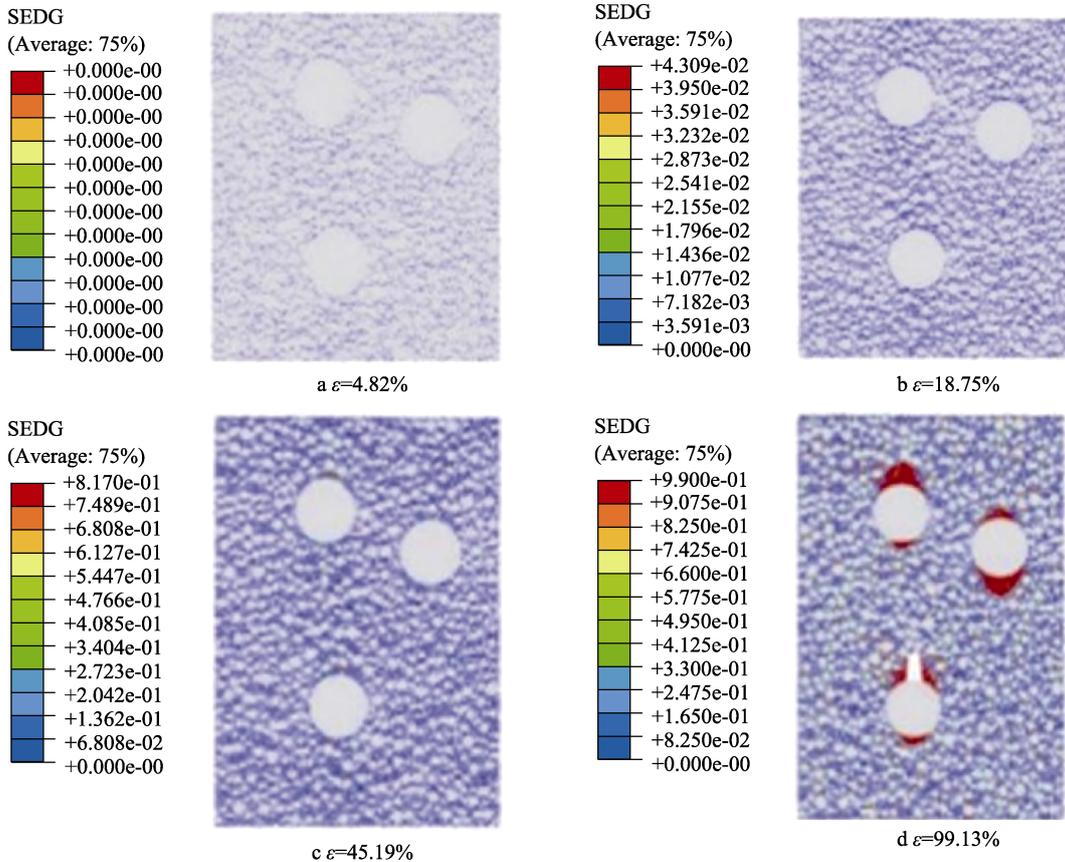


图 11 细观损伤演化刚度衰减图^[22]

Fig.11 Stiffness decay rate diagram of microscopic damage evolution^[22]

3 蠕变失效机理研究

关于固体推进剂破坏准则及判据的研究,现今主要借鉴金属材料强度理论,并结合实际经验,提出了推进剂的最大主应力准则、最大主应变准则、等效应变准则以及弹性应变能准则等。推进剂的失效机理是一个很复杂的问题,除了需要考察材料的蠕变性能外,还需要涉及实际多向应力状态、加载历史、温度和化学老化损伤等因素。同时,失效模式也包括多种类型,如推进剂宏观裂纹,黏接界面脱黏以及药柱大变形等。

在定载荷拉伸作用下,一般认为推进剂宏观损伤

失效过程包含 3 个阶段:第一个阶段与材料的弹性属性相关,即弹性变形阶段,可以认为不存在损伤;第二阶段出现了颗粒与基体界面的脱湿损伤,表现为随着时间的增加,应变增加,界面脱湿逐渐增加;第三个阶段是基体的大变形阶段,基体是唯一承载对象。对于拉伸作用下细观损伤失效也可以分为 3 个阶段,包括第一阶段初始无损伤阶段,第二阶段界面损伤起始段以及发展,第三阶段基体承载阶段。从力学响应可知,细观损伤失效与材料的宏观损伤失效相对应。伍鹏等^[23]研究了推进剂/衬层/绝热层界面的损伤性能,建立了细观颗粒模型代表性体积单元,计算了拉伸载荷下其细观损伤过程,最后采用最大主应力准则

模拟了基体的损伤与失效。拉伸应变下颗粒与基体间裂纹的扩展如图 12 所示。从演化过程可知, 随着应变的增加, 出现了显著的脱湿现象。刘琪琪等^[24]建立了高能推进剂的代表性体积单元模型, 对于损伤研究, 引入了内聚力法则模拟颗粒与界面力学特性, 重点分析了界面能量变化, 对微观损伤演化进行了模拟

分析。通过仿真分析表明, 失效机理是从颗粒的“脱湿”开始, 之后基体微裂纹扩展, 最终推进剂失效断裂。还有学者^[25-26]研究了颗粒直径尺寸和相对位置、有限元网格、颗粒与基体之间的界面层对材料蠕变失效的影响, 这其中由于推进剂材料具有温度相关性, 较少考虑温度效应。

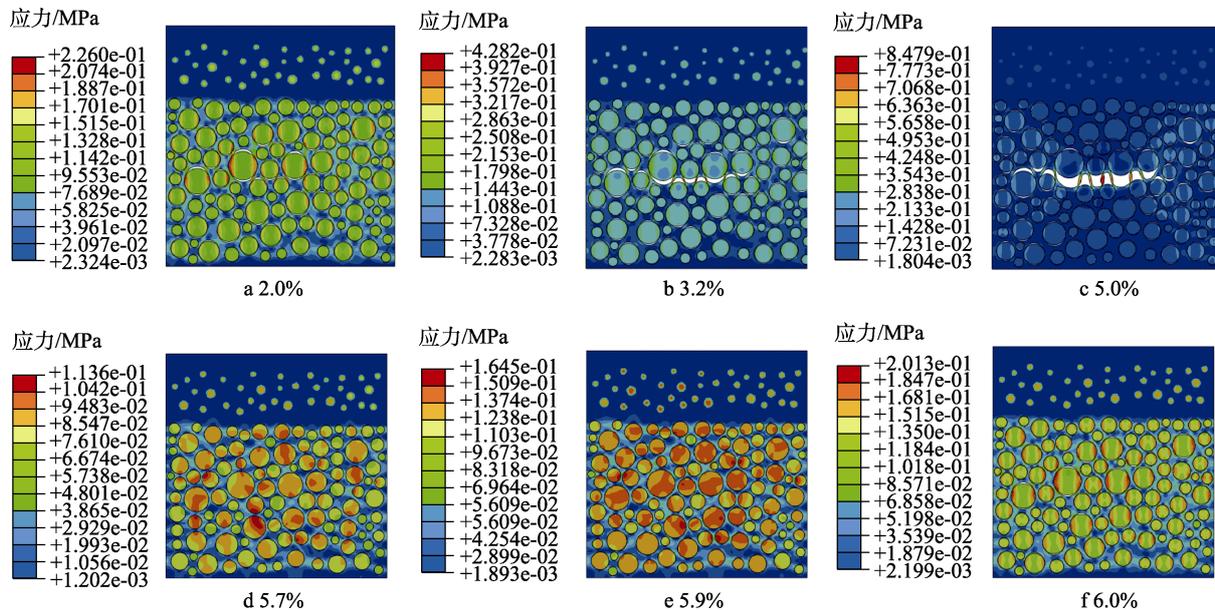


图 12 不同外界拉伸应变下的应力^[23]
Fig.12 Von mises at different tensile strain^[23]

总结上述对于持续载荷下推进剂的微观损伤标度和演化规律研究, 较多是分析推进剂基体与颗粒之间的界面黏接性能的变化, 从能量衰减随时间逐渐改变入手, 分析推进剂宏观力学性能的变化。采用此类跨尺度数值模拟方法研究推进剂损伤失效演化规律, 关键在于正确建立含损伤材料的本构理论和损伤演化方程, 因推进剂内部不同位置颗粒的分布和颗粒体积存在随机性, 建立的代表性体积单元需要涵盖颗粒任意分布等特征, 最后采用均匀化方法可以预测有效刚度。但在求解过程中计算量较大, 对于材料局部非线性力学行为很难描述正确。

4 展望

固体推进剂的长期贮存面临较多的宏观非线性力学行为以及微观损伤, 导致蠕变失效机理不清的问题, 同时对于材料-结构-性能的力学响应特性研究工作尚未系统开展, 新方法、新理论还需要进一步完善。因此, 建议从以下几个方面进一步研究。

1) 在试验设计方面, 由于推进剂具有时效效应和拉伸压缩各向异性等特性, 为了实现推进剂真实贮存蠕变效应试验研究, 第一种可以设计缩比全尺寸发动机, 并设计与真实大直径发动机实际贮存状态相对应的试验装置, 同时还需要考虑温度载荷、药柱药型、

推进剂配方和加速老化效应等设计试验方案, 最后结合无损检测技术及评估方法研究其力学性能; 第二种是以标准哑铃形推进剂试件为对象, 设计定载荷、低温到高温的宽温域老化时间、拉伸和压缩载荷等试验设计参数在特定夹具的试件级蠕变试验, 结合单轴拉伸、扫描表征和重构方法研究材料的蠕变特性。

2) 建立工艺参数化微观代表性体积单元颗粒模型, 实现包含颗粒配方随机性特性的微观模型, 选择恰当的损伤变量来量化贮存期间定应力对推进剂的损伤程度, 构建定应力作用下含损伤推进剂本构模型, 通过定义损伤变量和老化系数来描述推进剂贮存期间蠕变效应全过程。

3) 完善蠕变效应的研究方法, 可以从材料跨尺度力学性能的研究入手, 考虑微观损伤-试件断裂-结构破坏的递进关系, 分析应力、应变及材料特性参数间的关系, 清晰揭示长期贮存下推进剂的蠕变失效机理。

参考文献:

- [1] 刘双, 张锡铭, 张京, 等. GAP-ETPE 基高能固体推进剂的蠕变性能[J]. 火炸药学报, 2022, 45(6): 877-883.
LIU S, ZHANG X M, ZHANG J, et al. Creep Properties of GAP-ETPE-Based High-Energy Solid Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(6):

- 877-883.
- [2] GENG T J, QIANG H F, WANG Z J, et al. Macroscopic and Mesoscopic Properties of HTPB Propellant under Low Temperature Dynamic Biaxial Compression Loading[J]. *Polymer Testing*, 2023, 119: 107922.
- [3] WANG Q Z, WANG G, WANG Z J, et al. Biaxial Tensile Test and Meso Damage Numerical Simulation of HTPB Propellant[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 17635.
- [4] 郭宇, 申志彬, 李海阳, 等. 长贮过程中发动机 HTPB 推进剂老化机理分析[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(1): 95-101.
- GUO Y, SHEN Z B, LI H Y, et al. Investigation on the Aging Mechanism of HTPB Propellant in SRM Long-Term Storage[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(1): 95-101.
- [5] 王虎干, 职世君, 曹付齐, 等. 某固体发动机推进剂加速老化及自然贮存解剖试验研究[J]. *固体火箭技术*, 2021, 44(3): 350-356.
- WANG H G, ZHI S J, CAO F Q, et al. Study on Accelerated Aging and Natural Storage Dissection Test Results of a Solid Rocket Motor Propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2021, 44(3): 350-356.
- [6] 王鑫, 高鸣, 陈思彤, 等. 艇载固体发动机药柱蠕变-疲劳损伤分析[J]. *推进技术*, 2019, 40(4): 921-928.
- WANG X, GAO M, CHEN S T, et al. Creep-Fatigue Damage Analysis of Solid Rocket Motor Grain On-Board[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(4): 921-928.
- [7] 周东谟. 定应变下 HTPB 推进剂老化机理及发动机寿命预估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHOU D M. Aging Mechanism of HTPB Propellant under Constant Strain and Life Prediction of Solid Rocket Motors[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [8] 童心. 动态载荷下复合固体推进剂的热力耦合特性[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- TONG X. Thermomechanical Coupling Characteristics of Composite Solid Propellant under Dynamic Load[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [9] 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 J F, LAI G D, CHAI H W, et al. Research on Three-Dimensional Structural Deformation Failure Mechanism of Solid Propellant under Quasi-Static Tension[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(2): 186-194.
- [10] 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): 271-282.
- WANG L, LIU Y X, WU S C, et al. In-Situ X-Ray Tomography Based Characterization of Propellant Damage Evolution[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(7): 271-282.
- [11] 李春涛, 李伟, 庞爱民, 等. 丁羟四组元推进剂的宽温围压单向拉伸力学行为[J]. *含能材料*, 2022, 30(8): 793-803.
- LI C T, LI W, PANG A M, et al. Uniaxial Tensile Properties of Butadiol Quaternary Propellant under Confining Pressure and Wide Temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(8): 793-803.
- [12] 王鑫, 赵汝岩, 卢洪义, 等. 基于加速老化和实测载荷的立式贮存固体发动机药柱寿命评估[J]. *兵工学报*, 2019, 40(11): 2212-2219.
- WANG X, ZHAO R Y, LU H Y, et al. Service Life Prediction of Solid Motor during Vertical Storage Based on Accelerated Aging and Actual Loadings[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(11): 2212-2219.
- [13] 王鑫, 高鸣, 伍鹏, 等. 固体推进剂药柱立式贮存的蠕变效应[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(2): 160-168.
- WANG X, GAO M, WU P, et al. Research on Creep Effect of Solid Propellant Grain under Vertical Storage[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(2): 160-168.
- [14] 王永帅, 董可海, 张波, 等. 舰载导弹发动机药柱蠕变损伤研究[J]. *兵工自动化*, 2017, 36(6): 80-84.
- WANG Y S, DONG K H, ZHANG B, et al. A Study on Creep Damage of a Shipborne Missile Motor Grain[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2017, 36(6): 80-84.
- [15] 罗一智. NEPE 推进剂发动机立贮适应性分析与评估[D]. 西安: 航天动力技术研究院, 2021.
- LUO Y Z. Analysis and Evaluation of Vertical Storage Adaptability of NEPE Propellant Engine[D]. Xi'an: Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, 2021.
- [16] KACHANOV L M. Rupture Time under Creep Conditions[J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 97(1): 11-18.
- [17] 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 T. Numerical Simulation of Meso-Mechanics Damage in Composite Solid Propellant Based on Mesoscopic Model[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [18] 李辉, 范兴贵, 许进升, 等. 基于热力学理论的固体推进剂粘弹-粘损伤本构模型[J]. *推进技术*, 2022, 43(10): 440-450.
- LI H, FAN X G, XU J S, et al. Thermodynamics-Based Viscoelastic-Viscodamage Constitutive Model for Solid Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(10): 440-450.
- [19] 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 L. Research on the Mesoscopic Damage Mechanism and Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model of Composite Propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [20] 颜彬. 固体火箭发动机复合推进剂装药结构完整性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

- YAN B. Structural Integrity Analysis of Composite Propellant Charge for Solid Rocket Motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [21] LEI M, WANG J J, CHENG J M, et al. A Constitutive Model of the Solid Propellants Considering the Interface Strength and Dewetting[J]. Composites Science and Technology, 2020, 185: 107893.
- [22] 庞维强, 周刚, 王可, 等. 固体推进剂损伤多尺度模拟研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 32-43.
- PANG W Q, ZHOU G, WANG K, et al. Multi-Scale Simulation Developments of Solid Propellant Damage[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(12): 32-43.
- [23] 伍鹏, 李高春, 钱仁军. 固体火箭发动机推进剂/衬层/绝热层粘接界面细观损伤过程数值模拟研究[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(3): 343-349.
- WU P, LI G C, QIAN R J. Numerical Simulation Study of Meso-Scale Damage Process of Solid Rocket Motor Propellant/Liner/Insulator Adhesive Interface[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(3): 343-349.
- [24] 刘琪琪, 王春光, 张恺宁, 等. HEDM 推进剂的非线性粘弹损伤本构及其细观损伤演化研究[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(1): 88-95.
- LIU Q Q, WANG C G, ZHANG K N, et al. Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model and Meso-Damage Evolution of HEDM Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(1): 88-95.
- [25] 许进升. 复合推进剂热粘弹性本构模型实验及数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- XU J S. Experimental and Numerical Research on Thermo-Viscoelastic Constitutive Model of Composite Propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [26] 强洪夫, 王稼祥, 王哲君, 等. 复合固体推进剂强度、损伤与断裂失效研究进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(7): 561-588.
- QIANG H F, WANG J X, WANG Z J, et al. Research Progress on Strength, Damage and Fracture Failure of Composite Solid Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(7): 561-588.