

考虑围压效应的 N15 固体推进剂本构模型

张继业¹, 许进升², 韩峰¹, 王士欣³

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081;

2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;

3. 中国船舶集团有限公司 第七一三研究所, 郑州 450015)

摘 要: 利用自制围压试验系统, 完成了不同围压下 N15 固体推进剂的力学性能测试, 结果显示: 围压对推进剂初始模量影响不大, 但最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率均随着围压的增大而增大; 结合推进剂细观结构及断面分析, 初步揭示了围压对推进剂力学性能的影响机理, 由于围压的存在, 推进剂内部颗粒脱湿度降低, 孔洞由于受到压迫, 其形成扩展过程延缓, 裂纹萌发扩展被抑制, 从细观结构上证明了围压对推进剂具有强化效果; 根据弹性-黏弹性对应原理建立了考虑围压效应的 N15 推进剂本构模型, 结果表明所建立的本构模型准确度较好, 能够准确描述围压对 N15 推进剂力学性能的影响。

关 键 词: N15 推进剂; 围压试验系统; 围压; 力学性能; 本构模型

中图分类号: V435

文献标志码: A

Constitutive model of N15 solid propellant considering confining pressure effect

ZHANG Jiye¹, XU Jinsheng², HAN Feng¹, WANG Shixin³

(1. School of Mechatronical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering,

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

3. The 713 Research Institute,

China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Mechanical properties of N15 solid propellant under different confining pressures were obtained by using the confining pressure test system. Result showed that the initial modulus of the propellant did not change with the confining pressure, but the maximum tensile strength, rupture strength, the maximum elongation and elongation at break increased with the increase of confining pressure; combined with propellant's mesoscopic structure and cross section analysis, the mechanical mechanism of confining pressure effect on the propellant was revealed preliminarily; as a result of the existence of confining pressure, the particle dewetting inside the propellant was reduced, the holes' propagation de-

收稿日期: 2020-09-18

基金项目: 装备预先研究项目(30107120)

作者简介: 张继业(1982—), 男, 博士生, 主要从事装药结构完整性分析。E-mail: 512605796@qq.com

通信作者: 许进升(1985—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事固体火箭发动机技术研究。

E-mail: xujingsheng@njut.edu.cn

引用格式: 张继业, 许进升, 韩峰, 等. 考虑围压效应的 N15 固体推进剂本构模型[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1335-1344.

ZHANG Jiye, XU Jinsheng, HAN Feng, et al. Constitutive model of N15 solid propellant considering confining pressure effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1335-1344.

layed due to the pressure, and its crack extension and germination was inhibited, which proved that the confining pressure had strengthening effect for propellant; according to the elastic-viscoelastic correspondence principle, a constitutive model considering the confining pressure effect was established for N15 propellant. The results showed that accuracy of the constitutive model was good, and it can describe the influence of confining pressure on the mechanical properties of N15 propellant accurately.

Key words: N15 propellant; confining pressure test system;
confining pressure environment; mechanical properties;
constitutive model

固体推进剂在复杂载荷下的力学特性是装药结构完整性研究的重要支撑和依据。根据前人研究成果^[1-3]发现,发动机点火增压过程是装药结构极易遭到破坏导致其失效的薄弱环节。发动机点火时燃烧室内部压力高达 10 MPa,装药结构尤其是药柱暴露在高温高压环境之中,固体推进剂在此复杂状态下的力学性能与常温常压下有很大不同。相关研究认为固体推进剂材料具有不可压缩性,药柱在围压环境下其轴向和径向均呈现出压应变,但在周向上表现为拉应变,整体处于三向受力状态下。但是目前对于固体推进剂力学性能的研究都是在常压环境下进行的,如 Park 和 Schapery^[4]在研究复合固体推进剂非线性力学性能时,建立了热力学框架下的含损伤热黏弹性本构模型,利用折算时间将不同温度下的材料函数统一到参考温度下,该模型刚提出时是一维的,很快被 Ha 和 Schapery^[5]拓展为三维形式,随后 Hinterhoelal 和 Schapery^[6]完整地提出了相关的数值算法,对三维形式的本构模型进行了二次开发,并将其应用于有限元软件 ABAQUS,成功地模拟了颗粒体积分数为 70% 的 HTPB(端羟基聚丁二烯)推进剂在单轴和多轴复杂应力条件下的力学响应。国内方面,许进升等^[7]、彭威^[8]、邓凯等^[9]也提出了常压下复合固体推进剂的非线性黏弹性本构模型。

上述研究没有考虑环境压力的影响,然而固体推进剂是一类具有压力敏感性的黏弹性材料,采用常压下推进剂力学特性研究结论去进行装药在点火增压条件下的结构完整性研究并不合理,这也是目前装药在常压下力学性能满足设计指标,却在点火工作时失效事故频发的原因所在,这一棘手问题极大困扰着当前固体火箭发动机的研发应用。因此,必须对推进剂在围压环境下的力学性能开展深入细致的研究。

国内外针对材料围压下的力学性能研究已开

展了一定研究工作。Sridhar 等^[10]和 Peroni 等^[11]开展了静水压力对于铝泡沫材料力学性能的影响研究。Liu 等^[12]对围压下固体推进剂填充颗粒周围的应力状态的分析表明:①无论在环境压强还是外加压强下,颗粒的表面都存在较高的三轴拉伸应力;②在围压下,拉伸应力包围高三轴拉应力区域,而在外加压强下包围着高三轴拉应力区域的是压应力,损伤的萌生和演化被抑制,材料具有更高的强度和模量。Traissac 等^[13]进行了不同围压下(0~15 MPa)推进剂的单轴拉伸和剪切试验,发现围压使得推进剂的失效力和失效力应变明显提高。Oezuepek 等^[14]发现围压对推进剂内部产生“脱湿”前力学性能影响不大,但极大影响着推进剂的破坏参数。Tunc 等^[15-16]在 Simo^[17]的有限应变模型的框架下,通过引入 Canga 等^[18]的损伤演化模型,推导出了围压下三维黏弹性本构模型,并进行了有限元二次开发来扩展应用。国内,南京理工大学的张建彬^[19]设计了以液压油为增压介质的围压试验系统,研究了围压对双基推进剂力学性能的影响。申志彬等^[20]研制了宽温-气体围压试验系统,采用高压气体形成围压环境,通过对流换热方式对高压气体及推进剂试样进行温度控制。刘帅杰等^[21]研究了氮气围压加载测试系统,对气体围压条件下煤体单轴压缩破坏的电位特征进行了研究。

综上所述,国内外针对围压下推进剂力学特性进行了一系列研究,基本均从试验研究出发,分析围压环境对推进剂力学特性的大致影响,但深入到含压力影响下的本构模型研究并不多见。本文针对 N15 固体推进剂开展围压条件下的力学性能测试,分析围压对其力学性能的影响规律及作用机理,构建一种含围压效应的黏弹性本构模型,为分析固体火箭发动机点火冲击和压力载荷下的装药结构完整性奠定基础。

1 试 验

1.1 围压试验系统

推进剂力学性能试验在南京理工大学完成,围压试验系统包括供压装置、围压装置和加载装置三部分。供压装置用于供给试验时所需的高压气体;围压装置以耐高压的密闭缸体为主体,提供试验时所需的高压气体环境,并保持缸内环境压力稳定;加载装置以微机控制电子万能试验机为主,提供试验时所需的施加载荷,并利用信号采集软件在控制电脑上实时呈现试验数据,亦可进行数据的存储和处理。围压装置的安装实物图如图 1 所示。

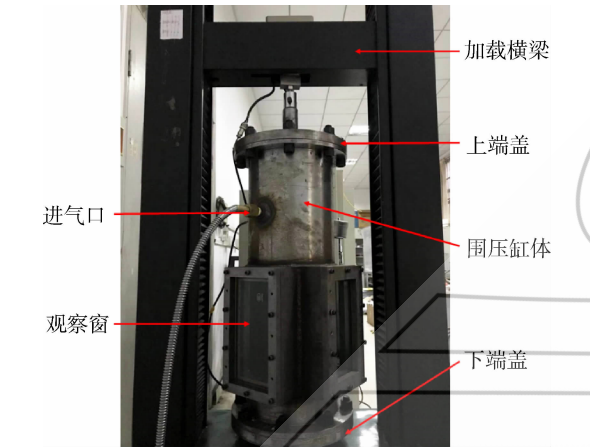


图 1 围压装置实物图

Fig. 1 Photo of confining pressure test system

1.2 试验方案

1.2.1 试验材料

N15 推进剂是一种颗粒填充高能复合材料,常常根据不同的用途指标对其配方进行调节,以满足对于其燃烧特性或能量特性的需求,即便同一配方不同批次的推进剂,由于加工流程及环境因素等影响,易导致其内部结构状态呈现不均匀性,但推进剂的微观结构并无差异,表现出来的宏观力学性能也基本无差别。本文选用同一批次的某配方 N15 浇铸推进剂胚料作为研究对象,其基础配方的质量分数如表 1 所示。

参照固体推进剂单向拉伸试验方法标准 QJ924-85,将 N15 推进剂胚料进行切割,机加工成哑铃状试件,哑铃状试件具体尺寸如图 2 所示。试件加工完毕后放入保温箱内,在 50℃ 的恒温环境中保温 24h,随后使其自然冷却,以消除试件在

表 1 N15 推进剂基础配方的质量分数

Table 1 Mass fraction of basic formula of N15 propellant

材料	质量分数/%
黏合剂	6~8
增塑剂	17~21
高氯酸铵 (AP)	20~30
铝粉 (Al)	20~30
黑索金 (RDX)	18~20
催化剂	1~3

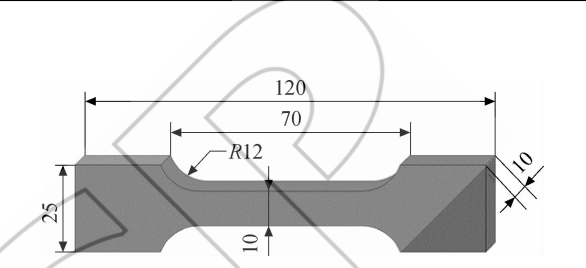


图 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Sample size (unit:mm)

机加工过程中内部产生的残余应力。试验夹具采用标准 QJ924-85 推荐的拉伸试验夹具。

1.2.2 松弛试验

松弛试验在 QJ211B 型电子万能试验机上进行,温度条件为室温((20±1)℃)环境。借鉴常压下等速拉伸试验结果的研究,进行松弛试验时,试件拉伸位移应选取推进剂材料处于线性黏弹性阶段时所对应的应变水平,此时推进剂尚未发生脱湿、链间滑动断裂等损伤,因此可以保证所获取推进剂松弛模量的准确性。本文所进行的松弛试验选取应变水平为 8%,选取等速率线性加载过程进行应变加载,即将试件以 100 mm/min 的拉伸速率拉伸至位移 4 mm(试件标距为 50 mm),应变水平为 8% 处后,停止加载并实时记录试验试件的应力响应,松弛时间为 3 600 s。在该条件下进行多次重复试验,当试验数据的重复度较好时终止试验,取其平均值作为最终试验结果。

1.2.3 单轴拉伸试验

单轴拉伸试验中,为分析 N15 推进剂在不同围压 p 下的力学特性,选取 4 组围压进行试验,分别为 0、0.5、2 MPa 和 5.4 MPa(表显压力)。每个压力值下分别进行 4 个速率的单轴拉伸试验,拉伸速率分别为:2、10、50、200 mm/min,对应的应变率分别为:0.000 667、0.003 33、0.016 7、0.066 7 s⁻¹。本试验方案既研究在同一压力环境下不同

拉伸速率对于 N15 推进剂力学性能的影响,又研究了同一拉伸速率下不同围压对于 N15 推进剂力学行为的影响,还能够进行围压和拉伸速率两个影响因素耦合下的 N15 推进剂力学行为研究。该方案共计 16 个工况,在每个工况下进行 3 次重复试验,共计试验次数 48 次。由于推进剂材料自身的差异性,若过程中出现奇异结果,需舍去该次试验结果,并重新进行该工况下试验,保证每个工况下有 3 个重复度较好的试验数据,选取 3 组试验数据的平均值作为最终试验结果。

1.3 试验结果及分析

1.3.1 松弛试验

松弛试验结果如图 3 所示,在松弛前期(0~1000 s),N15 推进剂应力随时间迅速衰减,在 2000 s 之后,试件进入稳定阶段,应力逐渐趋于稳定值。这与前文所述黏弹性材料的应力松弛现象一致。

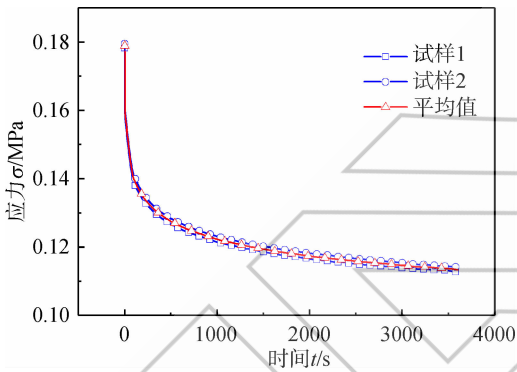


图 3 室温下 N15 推进剂松弛试验结果
Fig. 3 Relaxation test results of N15 propellant at room temperature

根据松弛试验结果可看出,松弛模量 $E(t)$ 随时间呈现对数级衰减趋势。对试验结果曲线进行处理,拟合出 7 阶 Prony 级数的松弛模量函数如下:

$$E(t) = 1.3518 + 26.5316e^{-\frac{t}{0.001}} + 13.1452e^{-\frac{t}{0.01}} + 7.9518e^{-\frac{t}{0.1}} + 3.5226e^{-t} + 2.9025e^{-\frac{t}{10}} + 1.5485e^{-\frac{t}{100}} + 0.4591e^{-\frac{t}{1000}}$$

1.3.2 单轴拉伸试验

在围压 $p=2\text{ MPa}$,拉伸速率 $v_t=10\text{ mm/min}$ 的工况下,进行 3 次重复试验后,对试验数据进行处理,得到的工程应力应变曲线如图 4 所示。可以看出,3 个试样的工程应力应变曲线基本重合,在曲线初始段重合度较好,曲线平衡段及下降段有些差

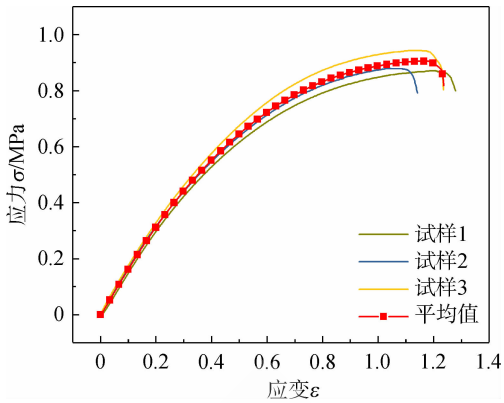
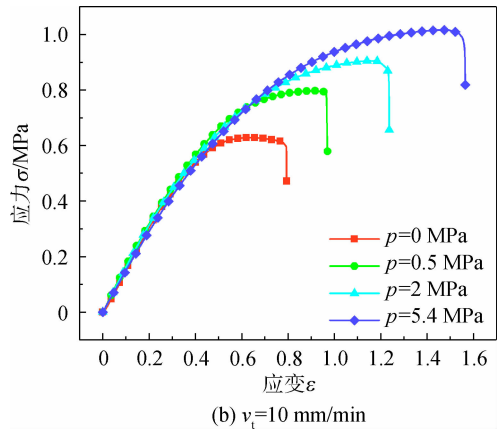
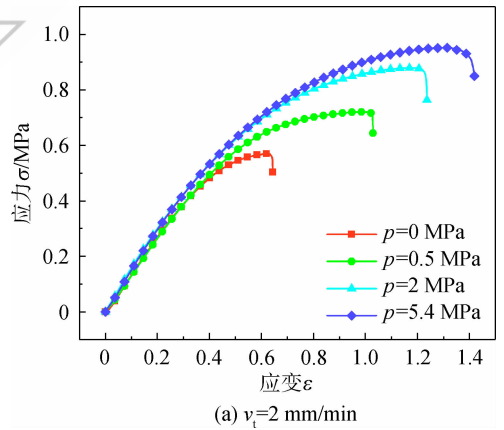


图 4 单轴拉伸应力-应变曲线
($p=2\text{ MPa}$, $v_t=10\text{ mm/min}$)

Fig. 4 Stress-strain curves of uniaxial tensile
($p=2\text{ MPa}$, $v_t=10\text{ mm/min}$)

异,可能是测量误差或试件内部结构不均匀导致的,试验结果在可接受范围内,因此取 3 条曲线的平均值作为该工况下最终的工程应力应变曲线。

如上所述,将所有试验数据处理成工程应力应变曲线,绘制成同一拉伸速率不同围压下的工程应力应变曲线,如图 5 所示。由图可以看出,工程应力应变曲线具有明显的黏弹性特征,各曲线初始段均呈现线性增长,且推进剂强度随着拉伸



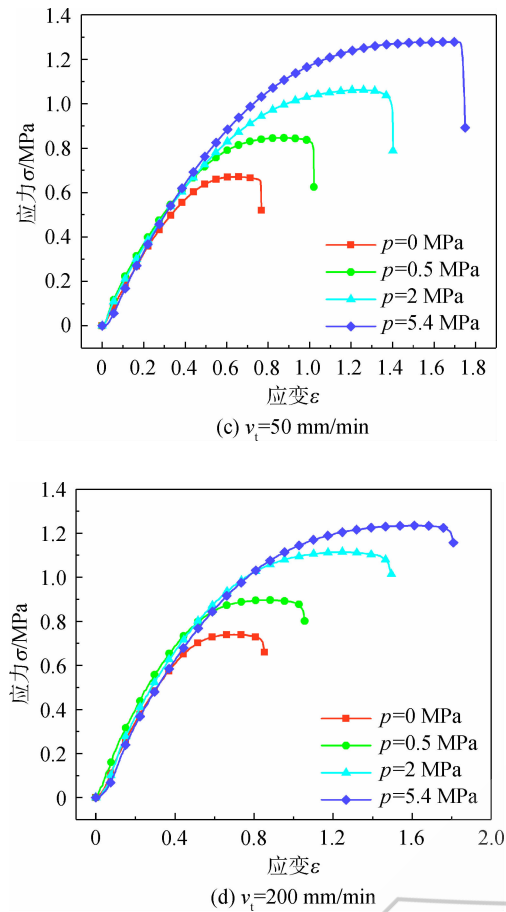


图 5 不同围压下 N15 推进剂应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves for different confining pressure levels of N15 propellant

速度的增大而增大,之后进入屈服段,在经历应变强化段后发生断裂破坏。

围压的增大对于材料初始模量影响不大,但延长了曲线的线弹性阶段,使得曲线屈服段后移,试件的最大抗拉强度和断裂强度均有不同程度的增大,最大伸长率和断裂伸长率亦随受到环境压力的影响而增加。围压对于 N15 推进剂存在强化效果,增大了各力学性能参数。低围压环境下增强作用很明显,压力从 0 MPa 升至 0.5 MPa 时,材料各力学参数值均明显提高;高围压环境下强化效果减弱,某些力学参数随压力升高甚至呈现出平缓趋势,但是否存在压力阈值使得相关力学参数达到上限,不再随压力升高而增加,还需进一步研究。

2 围压效应影响机理分析

N15 推进剂从细观组成结构来看,是一种以黏合剂为基体,填充大量固体颗粒的高能聚合物,其细观结构示意图如图 6 所示。材料的细观结构对其宏观力学性能产生直接影响,在多组元黏弹

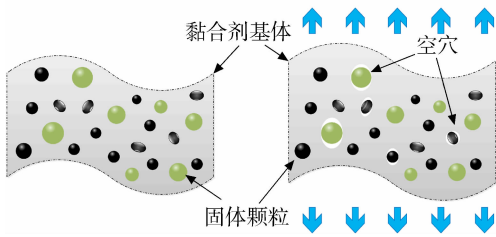


图 6 推进剂细观结构示意图
Fig. 6 Mesoscopic structure diagram of propellant

性材料中,基体呈现连续相,而固体颗粒呈现分散相,各组元之间存在一定的界面,细观结构分布不均匀,因此 N15 推进剂属于异质推进剂。

利用 SU3500 扫描电子显微镜对推进剂断面形貌进行扫描观察,获得断面形貌如图 7 所示。

在拉伸速率为 2mm/min 条件下,对比 0 MPa 和 2 MPa 两种环境压力下放大了 100 倍的断面形貌图,可以看出 0 MPa 时断面上出现了明显的颗粒脱湿现象,并由此形成了串联各界面脱黏处的裂纹,还分布着较多因颗粒与基体完全分离产生的空穴;2 MPa 时断面上也有脱湿现象发生,但其形成的孔洞大小程度明显小于 0 MPa 条件下产生的,这也从放大 1000 倍后的形貌图上得到了验证,2 MPa 比 0 MPa 时的断面明显更致密,产生的孔洞和裂纹也大大减少。当拉伸速率为 200 mm/min 时,可以看出 0 MPa 条件下的断面出现了扩展融合起来的裂纹,但相较于 2mm/min 拉伸条件下,并未出现明显的颗粒脱湿现象,可能是由于拉伸速率过快,推进剂内部黏接界面处还未产生脱湿现象,试件就已经断裂,而 2 MPa 条件下断面几乎观察不到颗粒脱湿和裂纹,呈现出较为致密的结构。由此可以说,环境压力影响了推进剂在被拉伸过程中内部断裂演化机制,表现为断面上颗粒脱湿程度减少,微裂纹及微孔洞萌发扩展过程延缓。

围压对推进剂力学性能的影响机理可总结为,环境压力直接作用于推进剂表面,将基体与颗粒压实,使得两者更加紧密,推进剂试件刚开始处于三向受压状态,在推进剂被拉伸过程中,由于环境压力的作用,相较于大气压时推进剂内部结构本该萌发的颗粒脱湿、微裂纹和微孔洞等,由于受到外界压力的作用,基体与颗粒被压紧,无法产生颗粒脱湿,抑制了内部裂纹及孔洞的萌发,进而延缓了其融合发展,推进剂的致密性大大提高,在宏观上表现为材料应力应变曲线的屈服段延后,各材料力学性能参数与环境压力相关,进而推进剂力学性能得到强化。

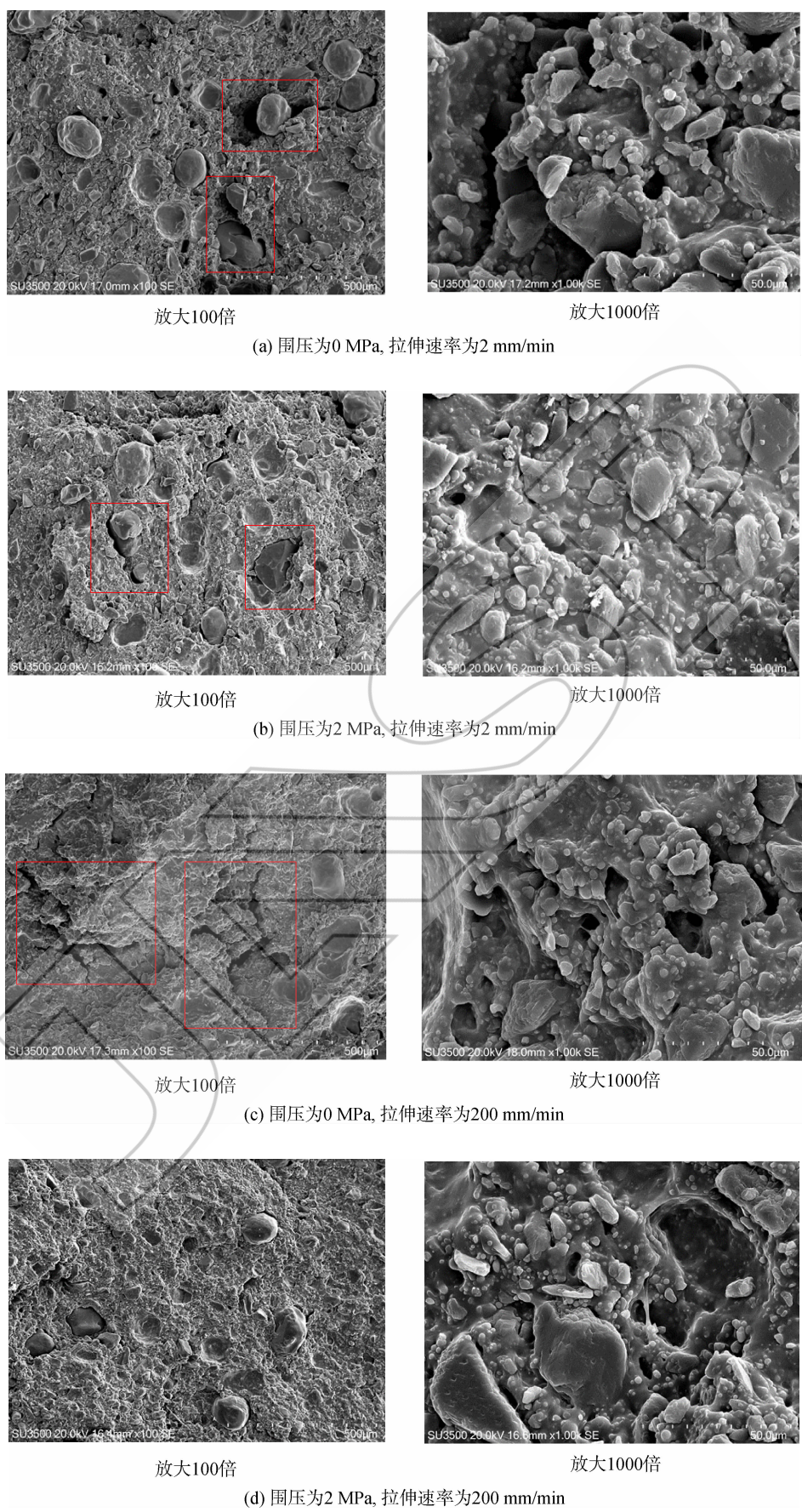


图 7 N15 推进剂断面形貌图

Fig. 7 Section topography of N15 propellant

3 本构模型建立及验证

3.1 本构模型

在黏弹性材料的应力应变关系的研究中,发现线性的黏弹性材料函数可以用来描述黏弹性材料的部分非线性行为。Schapery 提出了伪变量的概念,并将这一概念开发适用于非线性黏弹性材料的本构方程中。相应于弹性材料应力应变关系,对于黏弹性材料,定义

$$\epsilon^r \equiv \frac{1}{E_r} \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon}{d\tau} d\tau \tag{1}$$

式中 ϵ^r 为伪应变, E_r 为参考弹性模量,通常取 $E_r=1$, $E(t)$ 为黏弹性材料的松弛模量函数,那么伪应变 ϵ^r 即为线性黏弹性模型,松弛型积分黏弹性本构模型可写作

$$\sigma = E_r \epsilon^r \tag{2}$$

当黏弹性体内部存在损伤时,引入损伤函数 $C(S)$,式(2)可改写为

$$\sigma = C(S) E_r \epsilon^r \tag{3}$$

伪应变能密度函数为

$$W_r(\epsilon^r, S) = C(S) \frac{(\epsilon^r)^2}{2} \tag{4}$$

损伤演化规律

$$\dot{S} = \left(-\frac{\partial W_r}{\partial S} \right)^\alpha \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)中,材料的损伤演化规律可化为

$$\dot{S} = \left(-\frac{(\epsilon^r)^2}{2} \cdot \frac{\partial C(S)}{\partial S} \right)^\alpha \tag{6}$$

当数据采集频率较高时,时间增量步 Δt 较小,损伤内变量 S 对时间 t 的导数以及损伤函数 $C(S)$ 对内变量 S 的导数均可用增量形式来表达,形式为

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} \approx \left(-\frac{(\epsilon^r)^2}{2} \cdot \frac{\Delta C(S)}{\Delta S} \right)^\alpha \tag{7}$$

进而损伤内变量 S 的增量 ΔS 形式为

$$\begin{aligned} \Delta S &= \left(-\frac{(\epsilon^r)^2}{2} \Delta C(S) \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \Delta t^{\frac{1}{1+\alpha}} \\ S(t+\Delta t) - S(t) &= \left\{ -\frac{(\epsilon^r)^2}{2} [C(t+\Delta t) - C(t)] \right\}^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \Delta t^{\frac{1}{1+\alpha}} \end{aligned} \tag{8}$$

式中 α 为表征材料损伤演化规律的材料常数,在不同拉伸速率下的值不变,与材料的蠕变及松弛特征有关,具有下述相似关系:

$$\alpha = 1 + \frac{1}{n}$$

$$n \approx \frac{\lg D(t)}{\lg t} = -\frac{\lg E(t)}{\lg t} \tag{9}$$

式中 $D(t)$ 和 $E(t)$ 分别表示材料的蠕变柔量和松弛模量。

3.2 模型参数获取

文中第 3.1 节所述本构方程需要确定的参数有松弛模量函数 $E(t)$ 、表征材料损伤演化规律的材料常数 α , 损伤内变量 S 以及损伤函数 $C(S)$ 。其中松弛模量 $E(t)$ 已获得,下面介绍其他参数的获取步骤:

- 1) 根据松弛试验拟合得到的 Prony 级数形式的松弛模量,确定描述损伤演化规律的材料常数 α 的初值。
 - 2) 选取弹性参考模量 $E_r=1$,根据线黏弹性理论,计算出不同拉伸速率下对应的伪应变值。
 - 3) 根据不同拉伸速率下的应力应变计算得到损伤函数 $C(S)$ 与时间 t 之间的函数关系式 $C(t)$ 。
 - 4) 根据式(8)迭代得出损伤内变量 S 与时间 t 之间的函数关系 $S(t)$,即可与步骤 3) 中获得的 $C(t)$ 函数形成对应关系,得到 $C(S)$ 函数。
 - 5) 将同一环境压力不同拉伸速率下获得的 $C(S)$ 函数曲线绘制于同一坐标系中,若各曲线重合度较差,适当调整材料常数 α 值,并重复步骤 4)、步骤 5),待各曲线重合度较好,确定最终的材料常数 α 值。
 - 6) 根据步骤 5) 得到最终的 $C(S)$ 函数曲线,进而拟合出 $C(S)$ 函数。
- 各参数的拟合流程图如图 8 所示。

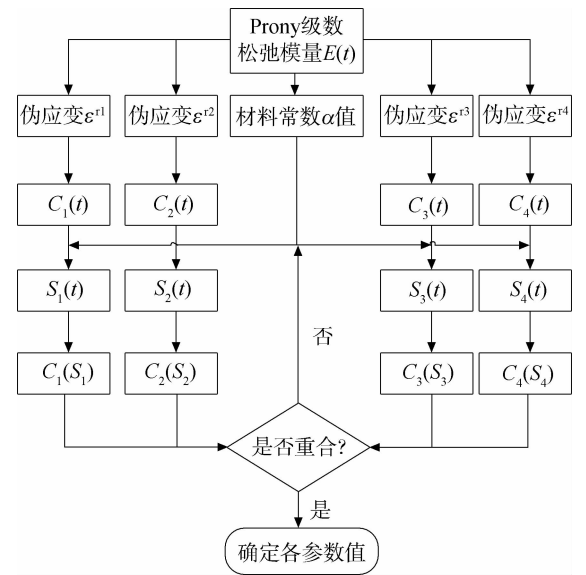


图 8 本构模型参数拟合流程

Fig. 8 Fitting process of constitutive model

根据上文所进行松弛试验获取的松弛模量 $E(t)$, 选定初值 $\alpha=10$, 采用上述拟合步骤, 依次获取每个工况条件下的 $C(t)$ 及 $S(t)$, 经过多次迭代, 最终拟合得到各个环境压力下的 $C(S)$ 曲线如图 9 所示。

各环境压力下的 $C(S)$ 拟合曲线可拟合为下述函数形式:

$$C(S) = C_0 + Ae^{(-\frac{S}{B})} \tag{10}$$

式中 C_0 、 A 、 B 均为函数模型参数, 与围压值相关, 将各损伤模型参数描述为围压的函数, 模型参数见图 10。

3.3 模型验证

在获得了所建立本构模型的所有参数后, 就可以算出不同围压, 不同应变率条件下的力学响应, 进而与试验结果进行对比, 验证模型的准确度。

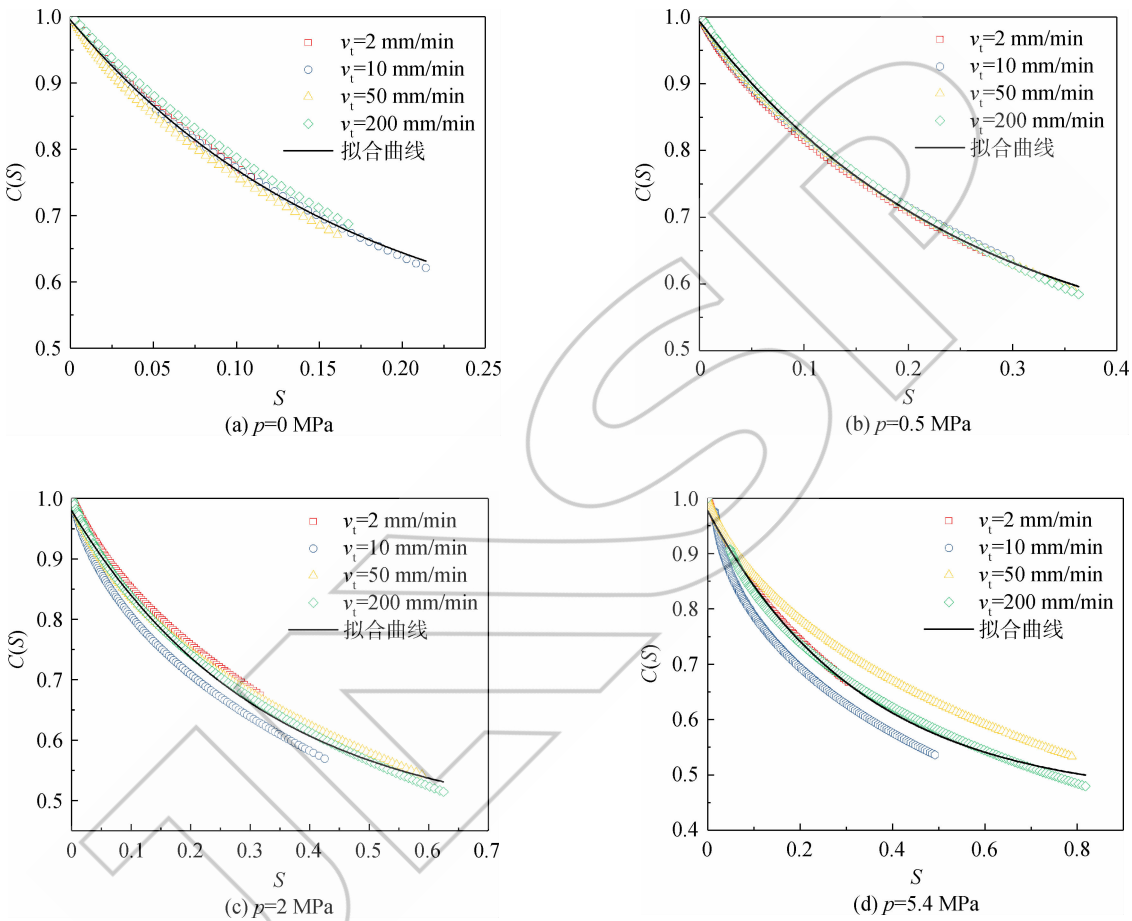
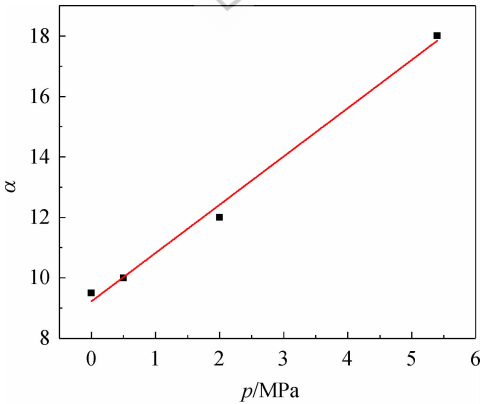
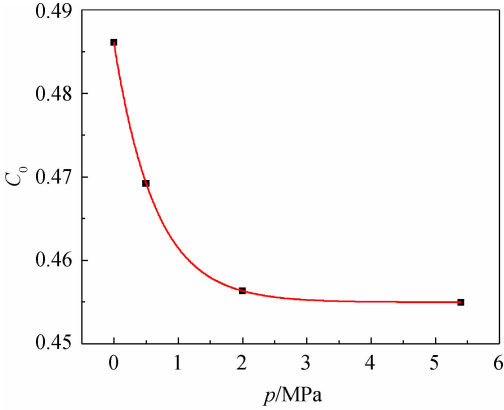


图 9 各环境压力下 $C(S)$ 曲线图
Fig. 9 $C(S)$ curves for different pressure levels



(a) 材料常数 α ($\alpha=1.597p+9.22$)



(b) 参数 C_0 ($C_0=0.45+0.03\exp(-p/0.64)$)

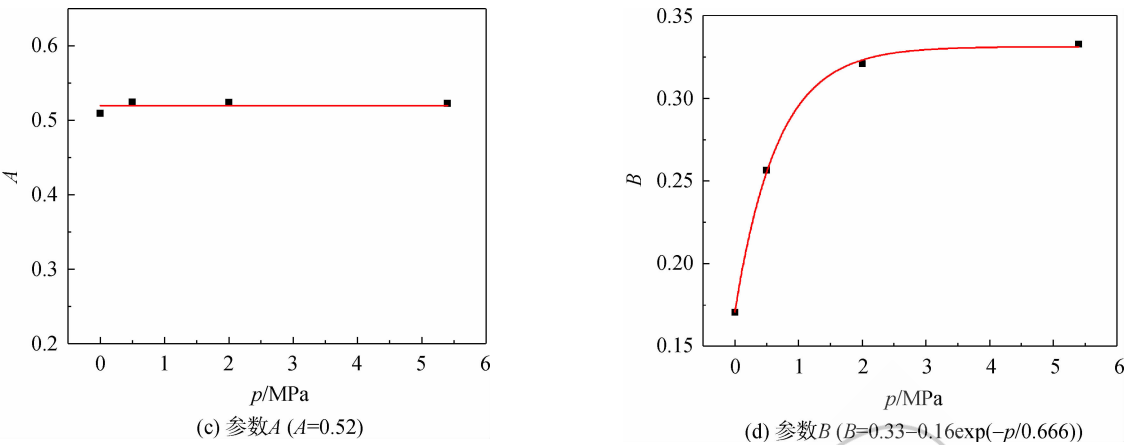


图 10 模型参数拟合结果
Fig. 10 Fitting results of model parameters

首先根据伪应变 ϵ^r 即为线性黏弹性模型的定义,由已知应变率和松弛模量算出伪应变值,然后计算出损伤变量 S 值,其中损伤内变量的增量形式为

$$\Delta S = \left(\frac{(\epsilon^r)^2}{2} \cdot \frac{A}{B} e^{-\frac{S}{B}} \right)^a \Delta t \quad (11)$$

然后求得损伤函数 $C(S)$ 的值,进而算出应力

响应,最终获得完整的应力应变关系。
分别对围压为 0.5 MPa、不同应变率 ϵ 条件下和拉伸速率为 2 mm/min、不同环境压力条件下试件的应力应变关系进行了计算,其计算结果与试验结果对比见图 11。由图可以看出,计算结果曲线与试验曲线重合度较好,说明模型及参数的准确度较好。

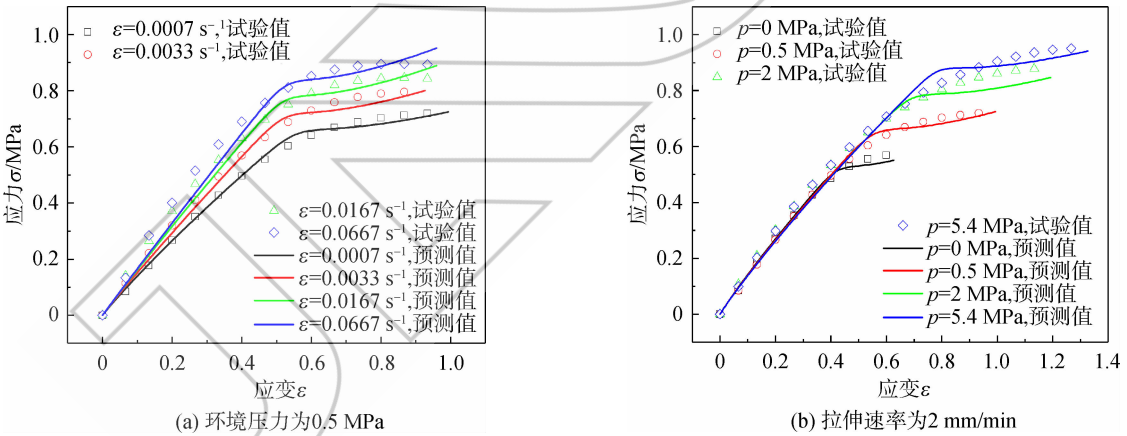


图 11 模型预测结果与试验结果对比
Fig. 11 Comparison of model prediction results with the test results

4 结 论

通过对不同环境下 N15 固体推进剂开展力学性能试验及理论分析,得到结论如下:

- 1) 围压对推进剂初始模量影响不大,但延长了应力应变曲线的线弹性阶段,使得曲线屈服段后移,试件的最大抗拉强度和断裂强度均有不同程度的增大,最大伸长率和断裂伸长率亦随围压的增大而增加。
- 2) 采用扫描电镜技术分析推进剂断面形貌

后得到,由于围压的存在,推进剂内部颗粒脱湿度降低,孔洞由于受到压迫,其形成扩展过程延缓,裂纹萌发扩展被抑制,从细观结构上证明了环境压力对于推进剂具有强化效果。

- 3) 建立了 N15 推进剂考虑围压效应的含损伤黏弹性非线性本构模型,根据模型计算出了不同工况下的力学响应,并与试验结果进行了对比分析,结果表明,所建立的考虑围压效应的 N15 推进剂含损伤黏弹性本构模型准确度较好,能够准确描述围压对 N15 推进剂力学性能的影响。

参考文献:

- [1] 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 Jinsheng. Experimental and numerical research on thermo-viscoelastic constitutive model of composite propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 龚建良, 樊学忠, 李宏岩, 等. 单室双推力发动机装药的瞬态结构完整性分析[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 36(6): 78-82.
GONG Jianliang, FAN Xuezhong, LI Hongyan, et al. Transient structural integrity analysis of single chamber dual thrust engine charge[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 36(6): 78-82. (in Chinese)
- [3] 王鸿丽, 许进升, 刘宗魁, 等. 复合改性双基推进剂黏弹性-黏塑性-黏损伤本构模型研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1308-1315.
WANG Hongli, XU Jinsheng, LIU Zongkui, et al. Research on the viscoelasticity-viscoplasticity-viscodamage constitutive model of composite modified double base propellant[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1308-1315. (in Chinese)
- [4] PARK S W, SCHAPERY R A. A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997, 34(8): 931-947.
- [5] HA K, SCHAPERY R A. A three-dimensional viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage and its experimental validation[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(26): 3497-3517.
- [6] HINTERHOELAL R M, SCHAPERY R A. FEM implementation of a three-dimensional viscoelastic constitutive model for particulate composites with damage growth[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2004, 8(1): 65-94.
- [7] XU Jinsheng, CHEN Xiong, WANG Hongli, et al. Thermo-damage-viscoelastic constitutive model of HTPB composite propellant[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(18): 3209-3217.
- [8] 彭威. 复合固体推进剂粘弹损伤本构模型的细观力学研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
PENG Wei. Mesoscopic mechanics research of viscoelastic damage constitutive model for composite solid propellant [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)
- [9] 邓凯, 阳建红, 陈飞, 等. HTPB 复合固体推进剂本构方程[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1815-1818.
DENG Kai, YANG Jianhong, CHEN Fei, et al. Constitutive equation of HTPB composite solid propellant[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1815-1818. (in Chinese)
- [10] SRIDHAR I, FLECK N A. The multiaxial yield behaviour of an aluminium alloy foam[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(15): 4005-4008.
- [11] PERONI L, AVALLE M, PERONI M. The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(7): 644-658.
- [12] LIU C T, WICKHAM D, SMITH G. Effects of confining pressure on the crack growth behavior in a filled elastomer subjected to a constant strain rate[R]. ADA423471, 2004.
- [13] 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(1): 146-157.
- [14] OEZUEPEK S, BECKER E B. Constitutive equations for solid propellants[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1997, 119(2): 125-132.
- [15] TUNC B, OZUPEK S. Constitutive modeling of solid propellants for three dimensional nonlinear finite element analysis[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69: 290-297.
- [16] TUNC B, ÖZUPEK S. Implementation and validation of a three dimensional damaging finite strain viscoelastic model[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 102/103: 275-285.
- [17] SIMO J C. On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: formulation and computational aspects[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1987, 60(2): 153-173.
- [18] CANGA M E, BECKER E B, SEBNEM Ö. Constitutive modeling of viscoelastic materials with damage-computational aspects[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(15/16/17): 2207-2226.
- [19] 张建彬. 双基推进剂屈服准则及粘弹塑性本构模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
ZHANG Jianbin. Study on yield criteria and visco-elasto-plastic constitutive model of the double-base propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [20] 申志彬, 张亮, 职世君. 固体推进剂宽温-气体围压试验系统设计与试验[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 340-344.
SHEN Zhibin, ZHANG Liang, ZHI Shijun. Wide temperature range-gas ambient pressure test system and experiments for solid propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 340-344. (in Chinese)
- [21] 刘帅杰, 李忠辉, 钮月, 等. 气体围压条件下煤体单轴压缩破坏的电位特征研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 5-8.
LIU Shuaijie, LI Zhonghui, NIU Yue, et al. Study on electric potential characteristics of coal fracture under uniaxial compression and gas confining pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 5-8. (in Chinese)