

文章编号: 1006-9941(2026)02-0146-08

热老化复合改性双基推进剂变温松弛模量模型研究

刘家铭^{1,2}, 杨保雨^{1,2}, 朱亮^{1,2}, 杨春庆^{1,2}, 邓恒^{1,2}, 党进锋^{1,2}

(1. 陆空基信息感知与控制全国重点实验室, 北京 100081; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为提升固体发动机装药长期贮存性能评估的准确性, 解决现有模型难以同时耦合温度与老化时间效应的关键问题, 实现宽温域、全老化周期内松弛模量的高精度预测。基于复合改性双基推进剂在 343.15 K 下加速老化实验获取的应力松弛数据, 应用时间-温度等效原理, 通过引入老化时间作为内变量, 构建了考虑老化效应的变温松弛模量模型。模型结果表明, 在 233.15~323.15 K 的测试温度范围内, 以及 343.15 K 高温加速老化 0~100 d 的条件下, 模型预测曲线与实验数据均呈现良好的一致性, 说明该模型能够有效反映 CMDB 推进剂松弛模量在宽温域和全老化周期内的变化规律。

关键词: 复合改性双基推进剂; 热老化; 变温; 主曲线; 应力松弛模量模型

中图分类号: TJ55; TJ765.3; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025233

0 引言

复合改性双基(Composite Modified Double-base, CMDB)推进剂因其高比冲、低特征信号和燃气清洁等特性^[1-2], 已成为中小口径固体火箭发动机的主要动力源。对于固体火箭发动机而言, 通常需要较长的贮存寿命以避免过早销毁造成的巨大浪费或延迟更换引发危险后果^[3]。固体推进剂的贮存性能是决定固体火箭发动机贮存寿命的关键制约因素^[4]。由于贮存期间物理损伤^[5]与化学老化^[6]的影响, 固体推进剂的力学性能持续退化^[7], 达到特定贮存寿命后将无法满足使用要求。因此, 准确预估推进剂在贮存期间力学与粘弹性行为的变化是进行固体火箭发动机药柱结构完整性分析的关键。

作为一类典型的颗粒填充复合材料, CMDB 推进剂具备双基推进剂的粘弹性特征^[8], 在静态或动态载荷下表现出显著的蠕变与应力松弛行为^[9]。松弛模量作为表征该类材料粘弹性响应的核心参数, 其准确性直接决定了本构模型的预测能力, 并最终影响发动机装药结构完整性分析的可信度。

在粘弹性材料松弛模量建模方面, 已有研究在不同推进剂体系中取得了一定进展。针对 HTPB 推进剂, Schapery 等^[10]和 Duncan 等^[11]测定了其在非稳态温度条件下的松弛模量, 并基于时间-温度等效原理构建了松弛模量主曲线。在此基础上, Xu 等^[12]采用 Prony 级数对松弛模量进行表征, 并通过在转换因子中引入温度依赖性变量, 提出了一种较为准确的变温松弛模量模型。在 CMDB 推进剂方面, 孟红磊等^[13]通过应力松弛实验获得了不同温度下的松弛模量数据, 提出了一种改进的静态模量获取方法, 并利用等速拉伸实验验证了该方法的准确性。Liang 等^[14]基于双参数 Maxwell 模型的松弛函数, 建立了一种新的应力松弛模量模型。Rui 等^[15]通过考虑物理老化效应, 提出了应力松弛数据的简化处理方案。Zheng 等^[16]提出改进型标准线性固体模型(Improved standard linear solid model, SLS), 以描述热氧老化过程中特性粘度演化对压缩应力松弛行为的影响, 该模型有效弥补了经验模型的理论缺陷, 同时考虑了材料在热氧老化过程中特性粘度的演化规律。Liu 等^[17-19]系统研究了 CMDB 推进剂在老化过程中的微观机制与宏观性能演变规律, 通过不同条件下的单轴拉伸实验, 并结合扫描电镜与气相色谱分析, 建立了考虑老化效应的松弛模量模型及含损伤粘弹性本构模型。尽管已有研究奠定了重要基础, 但现有模型主要针对未老化状态, 尚难

收稿日期: 2025-10-18; 修回日期: 2025-11-16

网络出版日期: 2026-02-03

作者简介: 刘家铭(1994-), 男, 博士, 研究领域: 固体火箭发动机装药结构完整性分析。e-mail liujiaming@njust.edu.cn

引用本文: 刘家铭, 杨保雨, 朱亮, 等. 热老化复合改性双基推进剂变温松弛模量模型研究[J]. 含能材料, 2026, 34(2):146-153.

LIU Jia-ming, YANG Bao-yu, ZHU Liang, et al. Research on the Temperature-dependent Relaxation Modulus Model for Thermally Aged Composite Modified Double-base Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2026, 34(2):146-153.

准确描述松弛模量在全老化周期内的连续演变规律,且缺乏对老化时间与测试温度耦合影响的统一表征。因此,发展一种同时考虑老化与温度变化的变温松弛模量模型,兼具重要的理论创新价值与工程应用前景。

为此,本研究对 CMDB 推进剂在 343.15 K 条件下开展了为期 100 d 的加速热老化实验,并通过应力松弛实验系统地表征了不同老化时间下的松弛模量曲线。在此基础上构建了一个能够同时考虑老化时间与松弛模量测试温度的松弛模量模型,以期为准确评估装药贮存性能及预测不同老化阶段下固体火箭发动机药柱的结构完整性,提供了关键的理论依据与数据支撑。

1 实验部分

1.1 样品与仪器

样品:CMDB 推进剂,山西北方兴安化学工业有限公司,其主要成分如表 1 所示^[20]。同时按 GJB770B-2005《火药实验方法》^[21]要求,CMDB 推进剂拉伸实验试件加工为 A 型标准哑铃型试件,试件总长度为 120 mm,宽度为 25±0.5 mm,厚度为 5±0.2 mm。其中,有效拉伸段的截面尺寸为(10±0.2) mm×(5±0.2) mm,拉伸工程标距为 50±0.5 mm。

表 1 复合改性双基推进剂组成成份^[20]

Table 1 Composition of CMDB propellant^[20]

component	function	mass fraction / %
NC	binder	18
NG	plasticizer	20
Cyclotetramethylenetetranitramine (HMX)	energetic filler	50
3,4-Dinitrofurazan Oxidized Furazan (DNTF)	energetic filler	6
N-Methyl-4-nitroaniline (MNA)	stabilizer	1
other additives	ballistic modifier	5

仪器:电热鼓风恒温干燥箱,KH-100A 型,广州康恒仪器有限公司;万能材料试验机,QJ211B-20KN 型,上海倾技仪器仪表科技有限公司。

1.2 实验步骤

1.2.1 高温加速老化实验

为保证 CMDB 推进剂老化机理与自然贮存条件一致的前提下缩短试验周期,研究选定 343.15 K 作为加速老化温度。试样封装于铝箔袋中密封保存,确保老化过程中环境湿度始终低于 10% RH。将密封试样置

于恒温老化箱中进行高温加速老化,并分别于 20, 35, 50, 65, 80, 100 d 等预设时间点取样。取样后,将试样置于干燥器中自然冷却 24 h,随后进行力学性能测试。

1.2.2 应力松弛实验

对于粘弹性材料而言,当处于应变恒定状态时,随着时间的延长应力呈现逐渐减小的趋势,该现象称为应力松弛。应力松弛实验是获取松弛模量的直接方法,即将试件迅速拉伸至目标的应变值 ϵ_0 ,随后在该应变水平下保持一定时间,记录应力响应随时间的变化^[13]。

为系统表征热老化温度 343.15 K 条件下不同老化时间的 CMDB 推进剂在宽温域内的粘弹性响应,本研究开展了多种测试温度条件下的应力松弛实验。基于前期单轴拉伸实验结果,将应变水平统一设定为 1%,以确保材料处于线性粘弹性区间,从而保障松弛模量数据的物理一致性。实验中,以 100 mm·min⁻¹ 的速率将不同老化状态的试件拉伸至 1% 应变,随即保持该应变恒定 1200 s,并全程采集应力-时间数据。考虑到 CMDB 推进剂在实际工程中的使用温度区间为 -40~50 °C (233.15~323.15 K),本研究选取 323.15, 298.15, 273.15, 253.15, 233.15 K 作为测试温度点。每个温度条件下均进行 3 次重复实验,最终结果取平均值以保障数据的可靠性。

1.3 实验结果与分析

在常温 (298.15 K) 条件下进行应力松弛实验,所得不同老化时间 CMDB 推进剂的松弛模量曲线如图 1 所示,由图 1 可以看出,随着老化时间的延长,松弛模量曲线呈现系统性上移趋势,表明材料松弛模量随老化进程显著提升。

为清晰呈现松弛模量随老化时间的演化规律,将松弛模量曲线横纵坐标转换为 $\lg [E(t)]$ 和 $\lg (t)$,结果如图 2 所示。分析图 2a~c 可知,CMDB 推进剂的松弛模量随老化时间延长呈现整体上升趋势。在各测试温

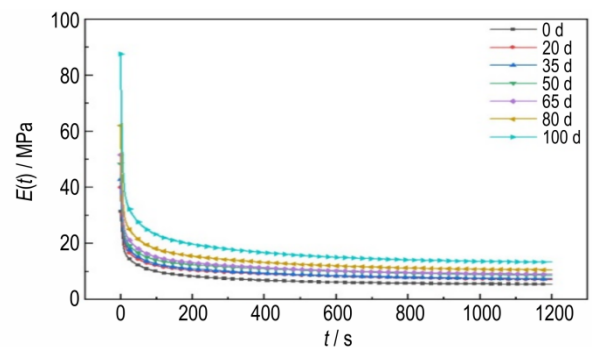


图 1 CMDB 推进剂松弛模量曲线 (298.15 K)

Fig.1 Relaxation modulus curve of CMDB propellant (298.15 K)

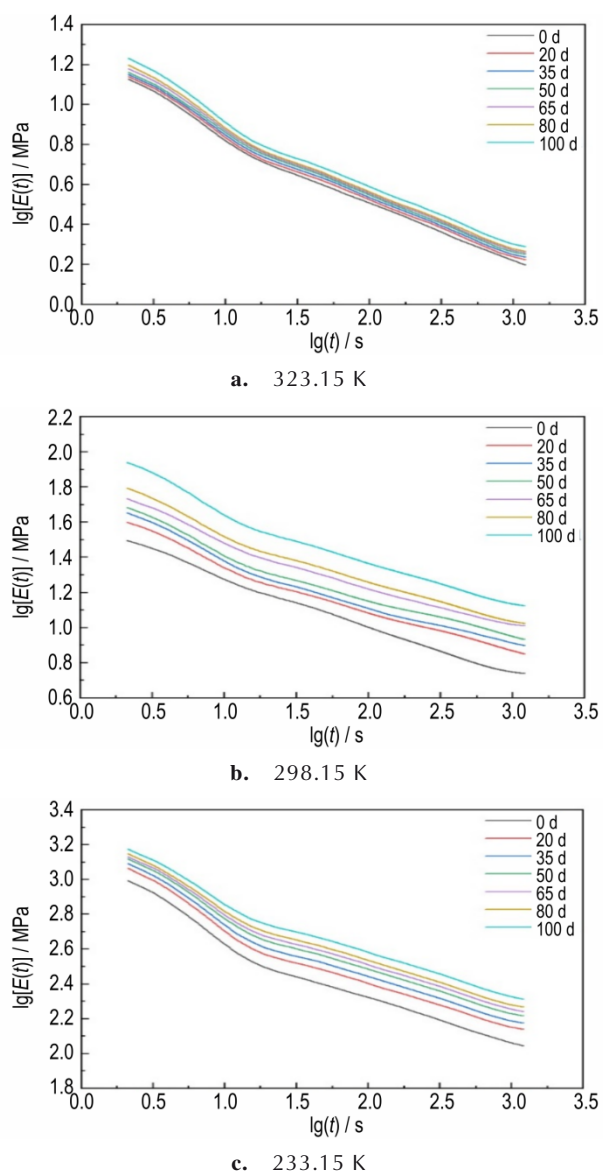


图2 不同温度下CMDB推进剂 $\lg[E(t)]$ - $\lg(t)$ 曲线
Fig.2 $\lg[E(t)]$ - $\lg(t)$ curves of CMDB propellant at different temperatures

度下, 松弛模量曲线的变化规律基本一致, 表明老化对材料松弛模量的影响具有普适性。值得注意的是, 不同松弛实验测试温度下, 松弛模量随老化时间的增大略有不同, 当松弛实验测试温度为 323.15 K 时, 松弛模量随老化时间的增大程度较小。

通过对相同老化时间下不同测试温度的松弛模量曲线进行对比分析(图3), 可进一步考察温度对材料松弛行为的影响。图3a和b显示, 在不同老化时间下, 松弛模量随测试温度的变化规律基本一致。结合图2~3可知, 在相同老化状态下, CMDB推进剂的松弛模量随测试温度降低而显著增强, 表现出典型的温度依赖性行为。各老化状态下的松弛模量曲线均呈现

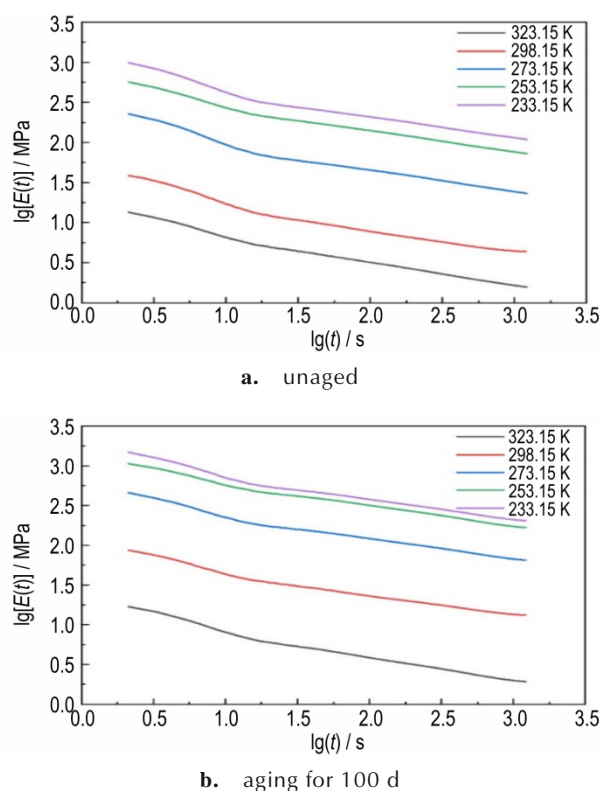


图3 相同老化时间CMDB推进剂在不同测试温度下的 $\lg[E(t)]$ - $\lg(t)$ 曲线
Fig.3 $\lg[E(t)]$ - $\lg(t)$ curves of the CMDB propellant at different test temperatures under the same aging time

这一特征, 表明温度对材料粘弹性行为的影响模式在不同老化阶段具有一致性。

2 考虑老化效应的变温松弛模量模型

本研究依据CMDB推进剂在老化过程中松弛模量的演化规律, 应用时间-温度等效原理, 系统构建了不同老化状态下的松弛模量主曲线。基于现有变温松弛模量模型, 通过分析老化时间对主曲线形态与位置的影响规律, 进一步建立了能够统一表征老化与温度耦合效应的变温松弛模量模型, 为推进剂长期贮存性能评估提供了更完善的建模基础。

2.1 变温松弛模量模型

松弛模量是构建一维积分型粘弹性本构模型的核心参数, 其精度直接决定模型预测结果的可靠性。参照 GJB770B-2005《火药试验方法》^[21] 将应力松弛实验数据中以应变达到预设水平 ε_0 的时刻 t_0 定义为松弛起始时刻(即零时刻)。基于此, 松弛模量由式(1)计算:

$$E(t) = \frac{F(t)(1 + \varepsilon_0)}{A_0 \varepsilon_0} \quad (1)$$

式中, $E(t)$ 为 t 时刻对应的松弛模量, MPa; $F(t)$ 为 t 时刻对应的松弛力, N; ε_0 为指定松弛应变水平; A_0 为推进剂试件初始截面积, mm^2 。

在固体推进剂的力学表征体系中, 恒温松弛模量指在特定温度下测得的材料松弛行为, 其描述能力局限于该温度条件; 而变温松弛模量则能够表征材料在连续温度区间内的模量演化规律。为准确描述 CMDB 推进剂在宽温域下的应力-应变响应, 获取其变温松弛模量至关重要。通常, 构建变温松弛模量的方法基于多个恒温条件下的松弛模量数据, 通过引入时间-温度等效原理, 建立覆盖宽时间尺度的松弛模量主曲线, 从而实现对任意特征温度下松弛模量的有效预测。

根据不同测试温度下的应力松弛实验数据, 可获得相应的恒温松弛模量曲线。将松弛模量曲线横纵坐标转换为 $\lg[E(t)]$ 和 $\lg t$, 结果如图 3 所示。以未老化 CMDB 推进剂为例, 选定 298.15 K 作为参考温度, 采用作图法确定各测试温度对应的温度移位因子对数值 $\lg(a_T)$ 。在此基础上, 应用 Williams-Landel-Ferry (WLF) 模型^[22]对温度移位因子与测试温度之间的关系进行拟合, 以确定模型特征参数。WLF 方程的具体表达式如下:

$$\lg(a_T) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2)$$

式中, C_1 和 C_2 为材料参数; T 为实际测试温度, K, T_{ref} 为参考温度, K。

基于所得的温度移位因子, 将所有测试温度下的松弛模量曲线进行水平移位, 使其与参考温度 (298.15 K) 下的曲线重合, 平移后的结果如图 4 所示。最终, 将图 4 中对数坐标系下的主曲线转换至常规线性坐标系, 即得到未老化 CMDB 推进剂在参考温度 298.15 K 下的松弛模量主曲线, 如图 5 所示。

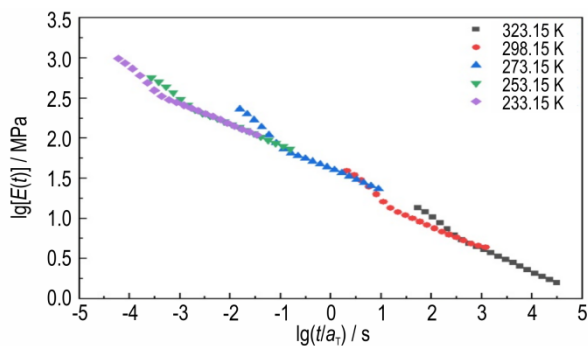


图 4 不同测试温度下松弛模量曲线平移结果
Fig. 4 Shifted curves of relaxation modulus at different test temperatures

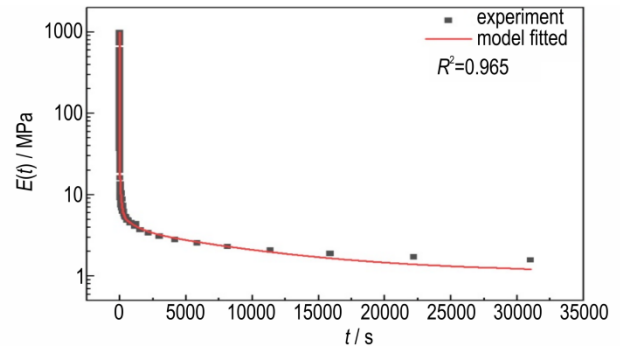


图 5 未老化 CMDB 推进剂松弛模量主曲线
Fig. 5 Master curve of relaxation modulus for unaged CMDB propellant

在粘弹性本构理论中, 松弛模量常表述为一系列 Maxwell 单元松弛行为的线性叠加, 如式 (3) 所示。

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (3)$$

式中, E_∞ 为稳态松弛模量, MPa; E_i 为第 i 阶 Prony 级数的松弛模量, MPa; τ_i 为对应的第 i 阶特征松弛时间, s。

采用式 (3) 对图 5 所示未老化 CMDB 推进剂的松弛模量主曲线进行拟合, 以确定 Prony 级数的各项参数。一般而言, 提高 Prony 级数阶数虽可增强拟合精度, 但阶数过高易导致拟合过程不收敛, 且不利于工程应用^[13]。鉴于固体推进剂松弛模量的表征经验, 通常采用 3~9 阶 Prony 级数即可满足精度要求。本研究选用五阶 Prony 级数进行参数识别, 拟合结果示于图 5, 实验数据与拟合曲线吻合良好, 表明五阶 Prony 级数能够有效描述松弛模量主曲线的变化规律。拟合参数列于表 2, 其中个特征松弛时间 τ_i 与相应松弛模量 E_i 间的数值对应关系清晰, 且参数取值与实验曲线趋势一致。

表 2 未老化 CMDB 推进剂松弛模量主曲线 Prony 级数拟合参数
Table 2 Prony series fitting parameters for the master curve of relaxation modulus of unaged CMDB propellant

i	1	2	3	4	5
E_i / MPa	777.409	134.356	61.232	13.966	2.917
τ_i / s	0.0001	0.01	1	100	10000
$E_\infty = 1.577 \text{ MPa}$					

在式 (3) 基础上, 引入移位因子, 则变温松弛模量可表示为

$$E(t, T) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{\xi}{\tau_i}\right) \quad (4)$$

式中, T 为松弛实验测试温度, K; ξ 为折算时间, 定义为 $\xi = t/a_T$ 。

然而, 采用上述移位因子及主曲线方法反演得到

的各温度下初始松弛模量,与实验结果存在系统性偏差,即所有温度下的初始模量预测值均等同于最低测试温度对应的初始松弛模量。这一系统性偏差会显著影响对固体推进剂在宽温域内力学响应的准确描述。尤其在发动机点火增压与高过载发射等瞬态载荷工况下,推进剂药柱的承载时间极短,若理论松弛模量与实际值存在显著差异,将直接影响装药结构完整性分析的可靠性,导致数值模拟精度降低。造成此问题的根本原因在于,现有方法在构建松弛模量主曲线时,忽略了不同测试温度下初始松弛模量所对应的特征松弛时间存在差异这一关键物理事实。基于此,许进升^[23]对上述宽泛温度范围内松弛模量的获取方法进行了改进:通过记录平移后不同温度下松弛模量曲线初始模量所对应的松弛时间,引入“零时间 t_0 ”概念,进而构建“零时间 t_0 ”与测试温度之间的变化关系,即 $t_0 = \psi(T)$ 。为此,可将变温松弛模量主曲线的折算时间 ξ 重新定义为:

$$\xi = \frac{t}{a_T} + \psi(T) \quad (5)$$

并进行大量的实验研究,通过推进剂试样在等速率拉伸实验下的的应力响应与线性热粘弹性本构模型

预测结果的对比研究,验证了该变温松弛模量模型的准确度。

2.2 老化变温松弛模量模型

基于建立的松弛模量主曲线构建方法,对图2所示不同老化时间的CMDB推进剂松弛模量曲线进行系统处理,得到了各老化时间对应的松弛模量主曲线。进一步采用式(4)所示变温松弛模量模型分别对不同老化时间下的松弛模量主曲线进行拟合,拟合结果在对数坐标系下如图6所示,相应的拟合参数详见表3。

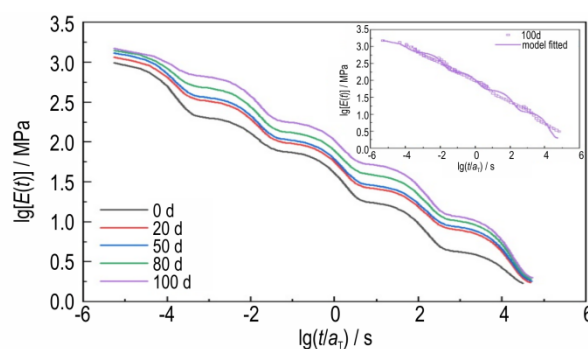


图6 不同老化时间下CMDB推进剂松弛模量主曲线

Fig.6 Master curves of relaxation modulus for CMDB propellant at various aging times

表3 不同老化时间下CMDB推进剂松弛模量主曲线 Prony 级数拟合参数

Table 3 Prony series fitting parameters for master curves of relaxation modulus of CMDB propellant at various aging times

t_a / d	E_∞ / MPa	E_1 / MPa ($\tau_1 = 0.0001 \text{ s}$)	E_2 / MPa ($\tau_2 = 0.01 \text{ s}$)	E_3 / MPa ($\tau_3 = 1 \text{ s}$)	E_4 / MPa ($\tau_4 = 100 \text{ s}$)	E_5 / MPa ($\tau_5 = 10000 \text{ s}$)
0	1.577	777.409	134.356	61.232	13.966	2.917
20	1.678	857.659	177.485	68.442	17.241	3.425
50	1.772	905.805	279.265	81.483	24.709	4.148
80	1.844	954.133	359.127	102.471	33.914	4.651
100	1.941	959.568	487.151	139.901	46.492	5.068

根据图6的拟合结果,CMDB推进剂松弛模量主曲线随老化时间延长呈现系统性上移趋势。结合表3的拟合参数进一步分析表明:在相同特征时间条件下,各 Prony 级数项对应的松弛模量 E_i 均随老化时间呈单调递增,稳态松弛模量 E_∞ 也呈现一致的增大趋势。基于上述演化规律,本文采用式(6)所示的函数关系对稳态松弛模量 E_∞ 及各阶松弛模量 E_i 随老化时间 t_a 的变化规律进行统一表征。

$$E_i = B_{i1} + B_{i2} \exp(B_{i3} \cdot t_a) \quad (6)$$

式中, B_{i1} 、 B_{i2} 和 B_{i3} 为常数,参数拟合结果如表4所示。

将式(6)代入式(4),引入老化时间 t_a ,从而建立考虑老化效应的变温松弛模量模型,以描述并预测不同老化时间和测试温度下CMDB推进剂的松弛模量。

表4 松弛模量 E_i 与老化时间 t_a 之间函数关系参数拟合结果

Table 4 Fitted parameters for the functional relationship between relaxation modulus E_i and aging time t_a

E_i	B_{i1}	B_{i2}	B_{i3}	R^2
E_∞	2.971	-1.384	-0.00282	0.9875
E_1	985.021	-205.576	-0.02150	0.9929
E_2	-35.785	173.095	0.01090	0.9911
E_3	57.777	5.491	0.02690	0.9949
E_4	7.122	7.164	0.01690	0.9943
E_5	8.292	-5.374	-0.00504	0.9973

不同老化时间下CMDB推进剂的温度移位因子 $\lg(a_T)$ 和“零时间 t_0 ”随测试温度变化关系的拟合结果如图7和图8所示。

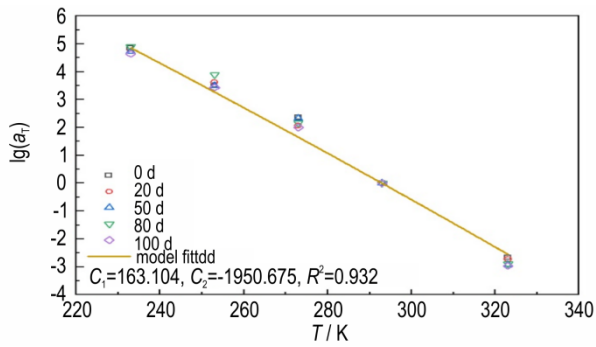


图7 不同老化时间下CMDB推进剂温度移位因子拟合结果
Fig.7 Fitted temperature shift factors for CMDB propellant at various aging times

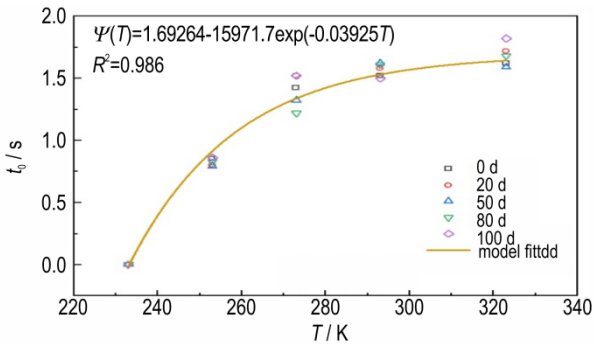


图8 不同老化时间下CMDB推进剂“零时间 t_0 ”拟合结果
Fig.8 Fitted “zero-time t_0 ” values for CMDB propellant at various aging times

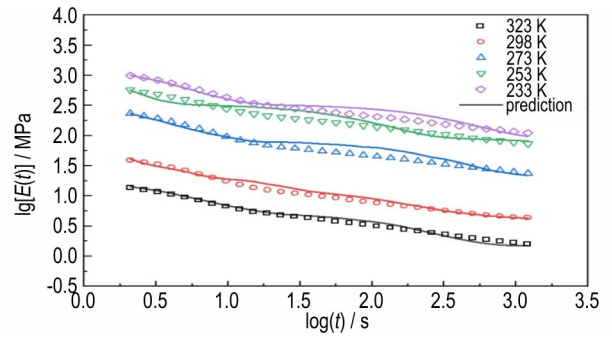
基于图7与图8的结果分析可知,不同老化时间下CMDB推进剂的温度移位因子 $\lg(a_T)$ 和“零时间 t_0 ”随测试温度的变化趋势基本一致;在相同测试温度下,老化时间对二者的影响均不显著。该现象与文献[22]中关于HTPB推进剂的研究结论相符,表明老化时间对推进剂温度相关性的影响较弱,在建模过程中可予以合理忽略。基于此,本文采用单一拟合曲线统一表征不同老化时间下温度移位因子 $\lg(a_T)$ 和“零时间 t_0 ”随测试温度的变化规律。联立式(4)~式(6),可建立考虑老化效应的变温松弛模量模型,其表达式如下:

$$E(t, t_a, T) = E_\infty(t_a) + \sum_{i=5}^i E_i(t_a) \exp(-(\frac{t}{\alpha_T} + \psi(T))/\tau_i) \quad (7)$$

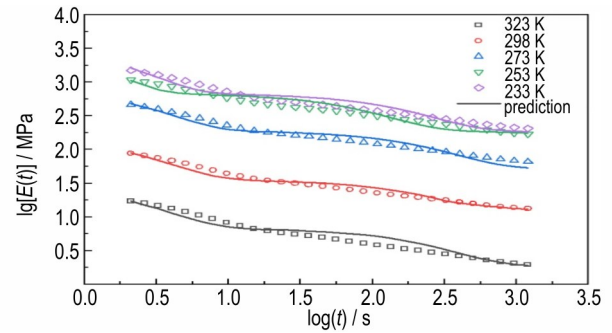
式中, T 为松弛实验测试温度, τ_i 为特征时间,考虑老化效应的变温松弛模量模型中取值如下式所示:

$$\tau_i = 10^{2i-6} \quad (8)$$

图9对比了用于模型参数识别的实验数据(未老化与老化100 d状态)与模型预测结果,图10则展示了模型对未参与参数识别的老化状态(老化35 d与65 d)的预测能力。对比结果表明,模型预测曲线与实



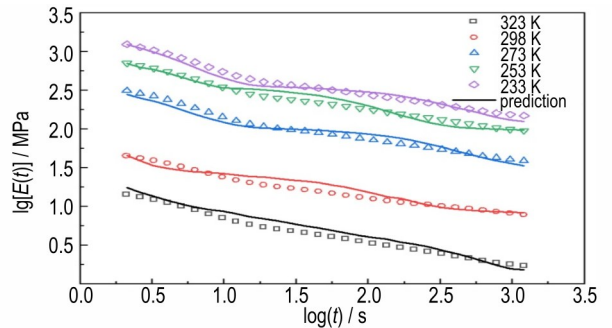
a. unaged



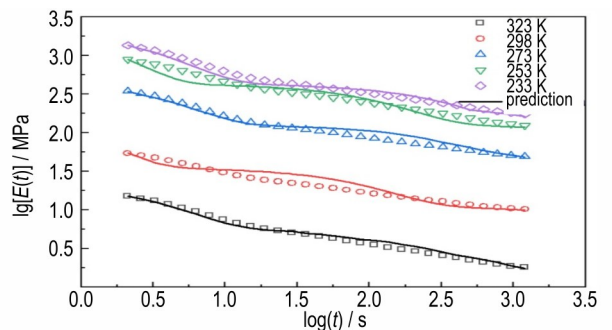
b. aging for 100 d

图9 考虑老化效应的变温松弛模量模型预测结果和实验结果对比图

Fig.9 Comparison between model predictions and experimental results for temperature-dependent relaxation modulus accounting for aging effects



a. aging for 35 d



b. aging for 65 d

图10 老化35 d与65 d CMDB推进剂松弛模量的模型预测与实验结果对比

Fig.10 Comparison between model predictions and experimental results for CMDB propellant aged for 35 and 65 days

验数据在所有条件下均吻合良好,能够高精度复现CMDB推进剂在233.15~323.15 K测试温度区间、经历343.15 K加速老化0~100 d后的松弛模量演化行为,验证了模型具备出色的预测能力。

3 结论

本文通过开展CMDB推进剂的高温加速老化实验,系统获取了其在老化过程中应力松弛模量曲线的演变规律,构建了不同老化时间下的松弛模量主曲线。通过在现有模型中引入老化时间作为内变量,建立了能够有效反映老化效应的变温松弛模量模型。主要结论如下:

(1)老化时间与测试温度对CMDB推进剂的松弛模量均具有显著影响。在不同测试温度下,松弛模量均随老化时间的延长而增大;而在相同老化时间下,松弛模量随测试温度的降低而显著增加,呈现典型的温度依赖性特征。

(2)基于现有变温松弛模量模型,通过引入老化时间作为关键变量,发展了考虑老化效应的变温松弛模量模型。利用未参与参数识别的老化35 d和65 d实验数据验证表明,该模型能够准确预测CMDB推进剂在233.15~323.15 K温度范围内、经历343.15 K加速老化0~100 d后的松弛模量演化行为,具有良好的预测精度和工程适用性。

参考文献:

- [1] CHATURVEDI S, DAVE P N. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2013: S1878535215000106.
- [2] LI Y, YUAN J M, ZHAO W, et al. Application and Development of 3,4-Bis(3-nitrofurazan-4-yl)furoxan (DNF) [J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2021, 91(3): 445-455.
- [3] ZÜPEK, Sebnem. Computational procedure for the life assessment of solid rocket motors [J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2010, 47(4): 639-648.
- [4] STRUIK LCE. Physical aging in amorphous glassy polymers [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1976.
- [5] ASTHANA S N, C N, SINGH H. Studies on thermal stability, autoignition and stabilizer depletion for shelf life of CMDB propellants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1989, 21(1): 35-46.
- [6] DU Y Q, ZHENG J, YU G B. Storage life prediction under pre-strained thermally-accelerated aging of HTPB coating using the change of crosslinking density [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1387-1394.
- [7] BOHN M A, VOLK F. Aging behavior of propellants investigated by heat generation, stabilizer consumption, and molar mass degradation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992.
- [8] ZHANG H N, CHANG H, LI X J, et al. The effect of strain rate on compressive behavior and failure mechanism of CMDB propellant [J]. *Defence Technology*, 2021.
- [9] SUN C X, XU J S, CHEN X, et al. Strain rate and temperature dependence of the compressive behavior of a composite modified double-base propellant [J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 89(oct.): 35-46.
- [10] PARK S W, SCHAPERLY R A. A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34(8): 931-947.
- [11] DUNCAN E, 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.
- [12] XU J S, JU Y T, HAN B, et al. Research on relaxation modulus of viscoelastic materials under unsteady temperature states based on TTSP [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2013.
- [13] 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 for Structural Integrity of Modified Dual-base Propellant Charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [14] LIANG N, ZHU S R, CHEN J Z. A new empirical model for stress relaxation of polymer matrix [J]. *Acta Mater Compos Sin*, 2017, 34: 2205-2210.
- [15] RUI M G, MORAIS J L. A simple and effective scheme for data reduction of stress relaxation incorporating physical-aging effects: an analytical and numerical analysis [J]. *Polym Test*, 2013, 32: 961-971.
- [16] ZHENG W, ZHAO X Y, LI Q G, et al. Compressive stress relaxation modeling of butadiene rubber under thermo-oxidative aging [J]. *J Appl Polym Sci*, 2017, 134: 44630.
- [17] 刘家铭, 许进升, 陈雄, 等. 热老化改性双基推进剂拉伸力学性能及强度主曲线 [J]. 含能材料, 2021, 29(9): 819-826.
LIU Jia-ming, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, et al. Tensile mechanical properties and strength master curve of thermal aged CMDB propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(9): 819-826.
- [18] LIU J, LI H, CHEN X, et al. A one-dimensional model for the aging and damage effects on the response of composite double-base propellants [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2022: 1-17.
- [19] LIU J, TONG X, LUO X, et al. The relaxation behavior of composite double-base propellants with various stabilizer content under thermal aging [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2022: 1-13.
- [20] 刘所恩, 周伟良, 潘葆, 等. Pdadn在螺压硝酸胺改性双基推进剂中的应用研究 [J]. 含能材料, 2013, 21(2): 209-212.
LIU Suo-en, ZHOU Wei-liang, PAN Bao, et al. Application of PDADN in screw extruded nitramine modified double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 209-212.
- [21] GJB 770B-2005 [S], 火药实验方法: 200-204, 262-266.
GJB 770B-2005 [S], Test method of propellant: 200-204, 262-266.

- [22] WANG Z, QIANg H, WANG T, et al. Tensile behaviors of thermal aged HTPB propellant at low temperatures under dynamic loading [J]. *Mechanics of time-dependent materials*, 2020, 2: 24.
- [23] 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 Jin-Sheng. Experimental and Numerical Simulation Research on the Thermal Viscoelastic Constitutive Model of Composite Propellants[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

Research on the Temperature-dependent Relaxation Modulus Model for Thermally Aged Composite Modified Double-base Propellants

LIU Jia-ming^{1,2}, YANG Bao-yu^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}, YANG Chun-qing^{1,2}, DENG Heng^{1,2}, DANG Jin-feng^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Land and Air Based Information Perception and Control, Beijing 10081, China; 2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To improve the accuracy of long-term storage performance evaluation for solid rocket motor grains and solve the critical limitation of existing models being difficult to simultaneously couple the effects of temperature and aging time, this investigation aims to achieve high-precision prediction of relaxation modulus over a wide range of temperature and the full aging cycle. Based on the stress relaxation data obtained from accelerated aging tests of Composite Modified Double-Base(CMDB) propellant at 343.15 K, a temperature-dependent relaxation modulus model that accounts for aging effects was developed by applying the time-temperature equivalence principle and introducing aging time as an internal variable. The results show that the predicted curves are in good agreement with the experimental data under test temperatures ranging from 233.15 K to 323.15 K and after accelerated aging at 343.15 K for 0–100 days. Thus, it indicates that the developed model can effectively describe the variation of the relaxation modulus for CMDB propellant over a wide range of temperature and the full aging cycle.

Key words: Composite Modified Double-Base(CMDB); thermally aging; temperature-dependent; master curve; relaxation modulus model

CLC number: TJ55;TJ765.3;TP391.9

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025233

(责编:高毅)