

文章编号:1006-9941(2021)09-0819-08

热老化改性双基推进剂拉伸力学性能及强度主曲线

刘家铭,许进升,陈雄,李辉,范兴贵

(南京理工大学机械工程学院,江苏南京210094)

摘要:为探讨老化高固含量改性双基推进剂(CMDB)的准静态拉伸力学性能,在四种温度(323,293,273,253 K)和不同应变率(3.3×10^{-5} 、 3.3×10^{-4} 、 3.3×10^{-3} 、 3.3×10^{-2} s $^{-1}$)条件下,开展了CMDB推进剂单轴拉伸实验;对不同老化时间(0,10,20,35,50,65,80,100 d)的CMDB推进剂试样进行了气相色谱实验,研究了CMDB推进剂老化后的力学性能和中定剂含量的变化。结果表明,老化过程中最大伸长率和中定剂含量呈显著下降趋势,可以作为老化后的CMDB推进剂的失效判据。利用时间温度等效原理(TTSP),得到了CMDB推进剂最大抗拉强度主曲线,建立了老化强度主曲线方程,该方程可以在准静态应变率范围内对不同老化时间的CMDB推进剂的最大抗拉强度进行预估。

关键词:改性双基(CMDB)推进剂;热老化;力学性能;强度主曲线

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021004

1 引言

固体推进剂是固体火箭发动机的动力之源,其力学性能及稳定性关系到固体火箭发动机的结构完整性。为了准确分析固体火箭发动机的结构完整性,必须研究固体推进剂在不同条件下的力学行为^[1-3]。在长期贮存过程中,由于化学反应和物理损伤的存在,固体推进剂的力学性能会随着贮存时间的增加而不断降低,进而影响固体火箭发动机的使用寿命^[4-6]。可见,为了保证固体火箭发动机的正常使用,需要对固体推进剂贮存过程中的力学性能进行研究。

目前,国内外常用的固体推进剂老化方法主要分为自然老化实验和高温加速老化实验,由于自然老化实验具有成本高和实验周期长等缺点,因此,国内外常采用Arrhenius方程和高温加速老化实验相结合的方法,研究固体推进剂的老化力学性能^[7-9]。Zhao等^[10]

通过溴化法测定老化后单基推进剂中的中定剂(DPA)含量,建立了湿度相关的老化动力学方程,该方程可以对不同环境湿度下推进剂的贮存寿命进行预估。Wang等^[11-12]通过中应变率拉伸实验得到了低温环境下老化丁羟推进剂力学性能,建立了温度率相关老化本构模型,该模型可以有效描述HTPB推进剂在低温中应变率条件下的本构特性。Li等^[13]通过围压拉伸实验得到了围压条件下硝酸酯增塑聚醚推进剂推进剂的力学性能,利用时温等效原理,建立了围压环境下的推进剂最大抗拉强度主曲线方程,该方程可以有效描述围压环境下推进剂最大抗拉强度主曲线。强洪夫等^[14]通过单轴拉伸试验得到了不同老化天数下HTPB推进剂的拉伸力学性能,建立了老化后HTPB推进剂最大伸长率主曲线方程,确定了单轴拉伸条件下推进剂的失效判据。描述固体推进剂的力学性能与加速老化时间之间的关系,对于推进剂老化研究具有重要作用,在过去的几十年中,线性、指数或对数老化力学性能模型已被广泛使用,但没有建立CMDB推进剂老化过程中最大抗拉强度主曲线方程。

为了获得老化过程中CMDB推进剂力学性能,同时对不同老化时间下CMDB推进剂的最大抗拉强度进行预估。本研究通过70℃高温加速老化实验,获取了0,10,20,35,50,65,80,100 d老化时间的CMDB

收稿日期:2020-12-31;修回日期:2021-03-02

网络出版日期:2021-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助(51606098)

作者简介:刘家铭(1994-),男,博士生,研究领域:固体火箭发动机装药结构完整性分析。e-mail:18362961032@njjust.edu.cn

通信联系人:许进升(1985-),男,副教授,博士,研究领域:固体火箭发动机装药结构完整性分析。e-mail:xujinsheng@njjust.edu.cn

引用本文: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.

推进剂试件,通过单轴拉伸实验和气相色谱实验,研究了CMDB推进剂老化后的力学性能和中定剂含量的变化。基于时间温度等效原理^[15],绘制了最大抗拉强度主曲线,建立了一种老化强度主曲线方程,以此描述不同老化阶段CMDB推进剂的强度主曲线,同时对不同老化天数下CMDB推进剂的最大抗拉强度进行预估。

2 实验

2.1 试件制备

采用的高固含量改性双基推进剂(CMDB)由山西北方兴安化学工业有限公司提供,其典型配方如下:硝化棉(NC)18%,增塑剂硝化甘油(NG)20%,高能炸药黑索今(HMX)和3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)为56%,N-methyl-4-nitroaniline(MNA)中定剂1%,其他添加剂5%。

试样经螺压工艺制备,根据火药试验方法GJB 770B-2005^[16],将试样制成尺寸为120 mm×25 mm×5 mm,标距为50 mm的标准哑铃型试件。

2.2 加速老化实验

加速老化实验在恒温老化烘箱(± 1 K)中进行。将试件置于铝箔密封袋中密封包装,以保证老化过程中湿度小于10%(RH<10%)。在70℃(343.15 K)温度下,试件高温加速老化100天,并于不同老化阶段取出,进行力学性能测试及化学组分分析。

2.3 拉伸测试

为避免湿度及温度变化对推进剂力学性能的影响,在拉伸实验之前,将老化后试样置于防潮箱内静置48h。使用万能拉伸实验机进行单轴拉伸实验,其测试速率范围为0.001~500 mm·min⁻¹。根据现有实验条件及准静态拉伸速率范围,单轴拉伸实验采用四种等速拉伸速率(0.1、1、10、100 mm·min⁻¹,即 3.3×10^{-5} 、 3.3×10^{-4} 、 3.3×10^{-3} 、 3.3×10^{-2} s⁻¹),并在四种环境温度(253, 273, 293, 323 K)下进行测试。单轴拉伸试验之前,将试件置于铝箔袋内密封保温3 h,以保证保温过程中环境湿度低于5%,避免湿度变化对试样力学性能的影响。

2.4 中定剂含量测试

为确定老化过程中,CMDB推进剂试样的中定剂(MNA)含量变化。本研究采用气相色谱仪,对不同老化阶段的CMDB推进剂样品的中定剂含量进行测试。气相色谱测试于南京理工大学化工学院民用爆破研究所进

行。实验标准参照火药试验方法GJB 770B-2005^[16],每组样品均取自CMDB推进剂哑铃型试件的相同部位,将样品切成尺寸为2 mm×2 mm×2 mm的颗粒后,均匀混合。试样用乙醚提取,将提取物中的中定剂在色谱仪内进行分离,用内标法进行定量,计算中定剂的含量。每组样品进行三次重复试验,实验结果取均值,以保证实验数据准确性。

3 实验结果与讨论

3.1 力学性能

为了获得四种温度下典型的拉伸应力-应变曲线,研究采用GJB770B-2005^[16]中方法413.1对试件进行拉伸力学性能测试,图1所示为70℃高温加速老化100 d的CMDB推进剂在293 K和 3.3×10^{-3} s⁻¹的等速拉伸测试条件下的应力-应变曲线,不同老化时间的CMDB推进剂的应力-应变曲线相似,因此选用加速老化100 d的应力-应变曲线进行分析。由图1可以看出,整个加载过程中应变率恒定,在加载初期,应变率存在震荡现象。由于测试设备原因导致的应变率振荡所对应的应变小于加载过程总应变的10%,因此可以满足恒定工程应变率的要求^[11],并且获得的测试数据在本研究中是有效的。

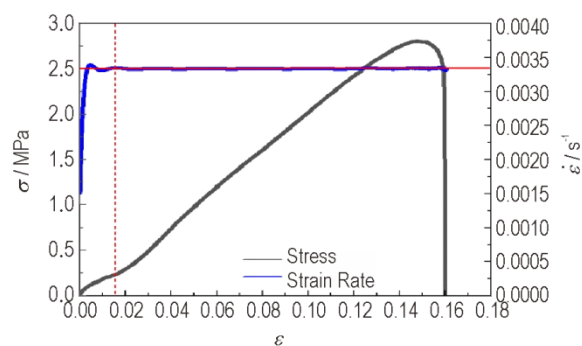


图1 典型应力-应变曲线

Fig.1 Typical stress-strain case curves of the samples

为排除图1所示加载过程中应变率震荡对实验结果造成的影响,采用线性插值法^[17]对试验数据进行数据处理,进而获得CMDB推进剂典型应力-应变曲线。图2所示为70℃高温加速老化100d后的CMDB推进剂在四种不同应变率下的典型应力-应变曲线,CMDB推进剂未老化应力-应变曲线形式与老化后应力-应变曲线形式基本相同。老化后,在准静态载荷作用下CMDB推进剂仍呈现出粘弹性材料行为。同时,应变率显著影响老化后CMDB推进剂的拉伸性能。

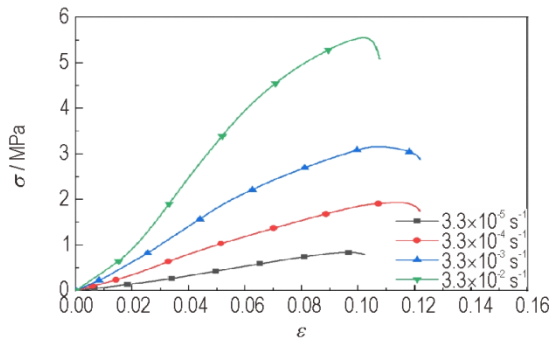


图2 不同应变率下CMDDB推进剂拉伸的应力-应变曲线
Fig.2 Typical stress-strain curves of the tensile tests for CMDDB propellant at various strain rates

表1为老化100d后的CMDDB推进剂在不同测试条件下力学性能的关键点数据(弹性模量 E 、最大抗拉强度 σ_m 、最大伸长率 ε_m 、断裂强度 σ_b 和断裂伸长率 ε_b)，由表1可以看出，在相同老化时间下，CMDDB推进剂材料具有明显的应变率效应和温度效应，该现象与HTPB推进剂在不同测试条件下的现象一致^[11]，随着应变率的增加或温度的降低，最大抗拉强度、断裂强度和弹性模量不断增加；随着温度的降低，最大伸长率和断裂伸长率减小。

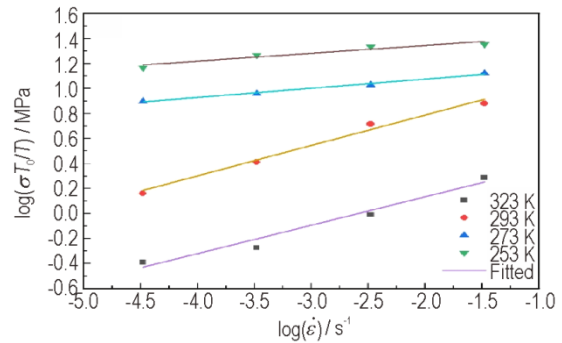
图3为不同测试温度下CMDDB推进剂的最大抗拉强度随变化率的对数变化关系曲线，图3a为未老化

表1 老化100d后的CMDDB推进剂在不同测试条件下拉伸力学性能

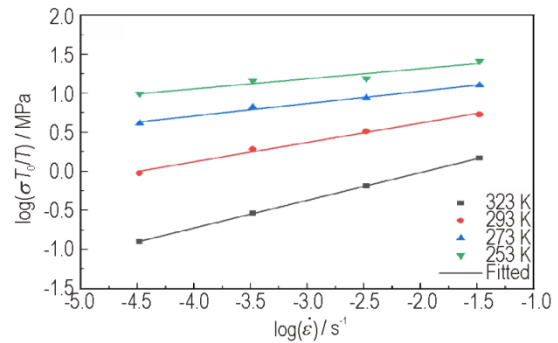
Table 1 Variation of the typical mechanical parameters for CMDDB propellant with accelerated aging 100d under various tensile test conditions.

$\dot{\varepsilon} / s^{-1}$	T / K	E / MPa	σ_m / MPa	$\varepsilon_m / \%$	σ_b / MPa	$\varepsilon_b / \%$
3.3×10^{-5}	323	2.23	0.1294	6.17	0.1091	7.01
	293	8.21	0.8367	9.67	0.7919	10.22
	273	100.71	3.7027	5.59	3.6055	5.71
	253	268.13	8.1712	5.35	8.11	5.36
3.3×10^{-4}	323	3.98	0.3377	9.49	0.2767	11.15
	293	22.76	1.9375	11.41	1.7392	12.19
	273	122.73	6.2756	7.4	6.2445	7.49
	253	458.36	12.3989	5.33	11.3322	5.34
3.3×10^{-3}	323	6.03	0.7146	13.16	0.6242	14.45
	293	40.11	3.1567	10.71	2.8659	12.21
	273	144.13	8.1152	6.65	8.0784	6.71
	253	515.82	13.5849	6.14	13.4526	6.15
3.3×10^{-2}	323	10.92	1.6757	17.02	1.5418	18.78
	293	80.64	5.5499	10.21	5.0839	10.76
	273	312.85	12.6537	8.27	9.8237	8.33
	253	640.63	22.3433	7.47	20.8302	7.54

CMDDB推进剂关系曲线，图3b为老化100天CMDDB推进剂关系曲线。通过对比图3a和图3b可以看出，温度对老化后CMDDB推进剂的最大抗拉强度 σ_m 的影响与未老化推进剂的影响基本相同。老化前后，CMDDB推进剂的最大抗拉强度 σ_m 随应变率的增加而逐渐增加，同时最大抗拉强度 σ_m 与应变率呈现出线性对数关系。



a. maximum tensile stress without aging



b. maximum tensile stress after aging for 100d

图3 CMDDB推进剂在不同环境温度下最大抗拉强度与应变率的关系

Fig.3 Variation of maximum tensile stress for CMDDB propellant with strain rate at various tensile test temperatures

在不同拉伸试验条件下，CMDDB推进剂的典型力学性能参数随老化时间的变化规律如图4、图5所示。由图4、图5可以看出，高温加速老化对CMDDB推进剂的力学性能有着显著的影响。最大抗拉强度 σ_m (图4a~d)与最大伸长率 ε_m (图5a~d)均随老化时间的增加而减小。图4a~d可以看出，在不同测试条件下，CMDDB推进剂的最大抗拉强度 σ_m 与老化时间的关系是非线性的，这与HTPB推进剂在室温和准静态拉伸条件下最大抗拉强度与老化时间的关系不同^[1]。同时，在253 K温度下进行测试时，随着老化时间的增加，最大抗拉强度先增大后减小，如图4d所示，且应变率越高，该现象越明显。图5a~d可以看出，在不同测试温度下，最大伸长率 ε_m 与老化时间呈线性关系，这

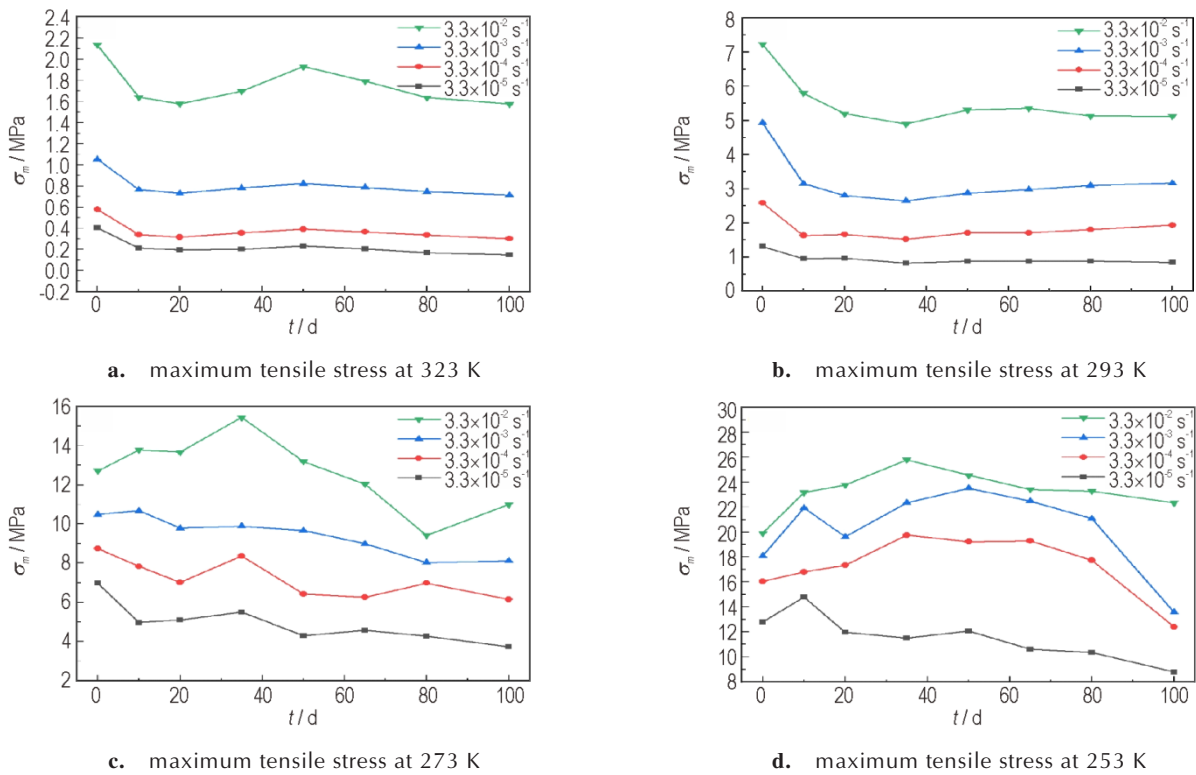


图4 不同老化阶段的CMDB推进剂在不同拉伸实验条件下的最大抗拉强度曲线

Fig.4 Variation of the typical maximum tensile stress for CMDB propellant with aging time under various tensile test conditions

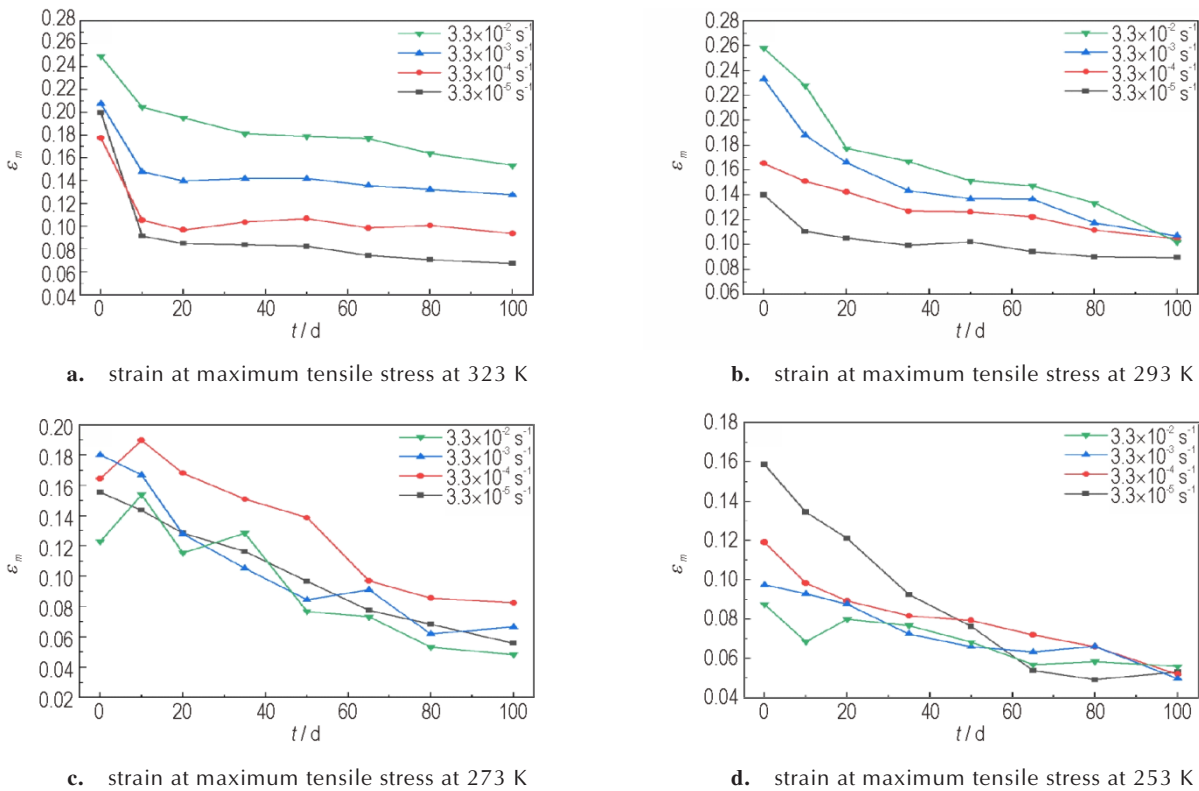


图5 不同老化阶段的CMDB推进剂在不同拉伸实验条件下的最大伸长率曲线

Fig.5 Variation of the typical strain at maximum tensile stress for CMDB propellant with aging time under various tensile test conditions

与HTPB推进剂在室温和准静态拉伸条件下最大伸长率与老化时间的关系相同^[1]。由于CMDB推进剂在不同测试条件下,最大抗拉强度随老化时间的变化规律性较弱,最大伸长率随老化时间的变化规律性较强且变化趋势基本相同,因此最大伸长率可作为CMDB推进剂老化寿命预估研究中的评判依据。

从上面的实验结果可以看出,CMDB推进剂在不同实验温度和不同应变率下的应力应变行为及抗拉强度、伸长率等力学性能指标都有明显的差别,这是因为CMDB推进剂由硝化棉硝化甘油基体和掺入其中的大量奥克托今颗粒组成,是一种粘弹性材料。由于硝化棉基体具有高温变软而低温变脆的特性,因此其力学性能受温度影响很大。同时,从断裂力学的角度,可以说CMDB推进剂裂纹扩展对低应变率作用更敏感,有缺陷的CMDB推进剂在低应变率下更容易破坏,所以低应变率下抗拉强度和伸长率都很小^[18]。

3.2 老化机理研究

众所周知,CMDB推进剂力学性能受到推进剂老化进程中组分变化的影响^[19]。硝化棉(NC)和硝化甘油(NG)作为CMDB推进剂基体和增塑剂的主要成分,在贮存过程中通常会缓慢分解,释放出氮氧化物。分解产生的氮氧化物通过自催化反应进一步加速NC和NG的分解并释放大量的热,这是CMDB推进剂稳定性差的主要原因^[20]。同时,由于硝化棉的分解及氮氧化物的产生,基体内部出现孔洞,随着老化的不断累积,孔洞进一步扩展形成微裂纹,因此随着老化的进行,CMDB推进剂的最大抗拉强度和最大伸长率不断降低^[19]。为阻止这种情况的发生,将中定剂添加到推进剂中,以阻止或减缓自催化反应的进行,当NC和NG分解产生氮氧化物时,中定剂与氮氧化物反应,将分解产生的氮氧化物吸收,阻止氮氧化物自催化作用的发生,从而延缓NC和NG的分解,同时延长CMDB推进剂的贮存寿命^[21]。

本研究所述CMDB推进剂采用N-methyl-4-nitroaniline (MNA)作为中定剂,随着老化的进行,中定剂不断与氮氧化物反应,进而被消耗,如图6所示。MNA含量随老化的进行不断降低,对氮氧化物的吸收不断减弱,导致NC和NG分解产生的部分氮氧化物无法被吸收,自催化作用不断加剧,使NC和NG的分解速率不断提升。由于NC和NG是CMDB推进剂基体和增塑剂的主要成分,NC和NG的分解及NG的汗析,导致基体软化,颗粒与界面间粘合应力减小,使颗粒在外加载荷的作用下更容易脱湿,从而影响推

进剂的力学性能。同时中定剂的含量变化可以作为老化进程的失效判据,通过研究中定剂含量的变化,对CMDB推进剂贮存寿命进行预估。

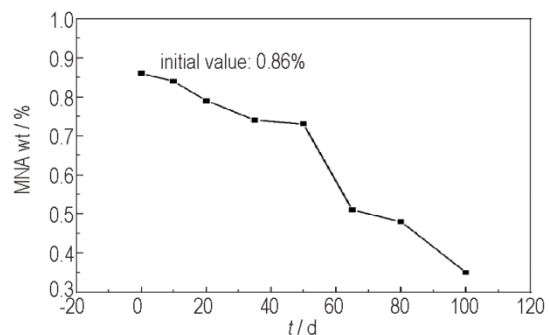


图6 70 °C加速老化CMDB推进剂中定剂(MNA)质量分数变化
Fig.6 Change rules of mass fraction of stabilizer (MNA) in CMDB propellants accelerated aged at 70 °C

3.3 老化强度主曲线

强度主曲线通常用于预测在较大温度区间和应变率区间内高固含量弹性体的机械性能^[22]。结合时间温度等效原理(TTSP),以测试温度293 K作为参考温度,绘制了老化CMDB推进剂力学参数的主曲线。典型曲线如图7所示。可以清楚地看到,对数移位因子 $\log(\alpha_T)$ 随温度呈非线性,老化前后对数移位因子 $\log(\alpha_T)$ 随温度变化趋势相近,对数移位因子随温度变化曲线几乎彼此重合(图7a)。推进剂的所有强度主曲线在老化前后都是非线性的,未老化推进剂强度主曲线与老化后推进剂强度主曲线相比趋势较缓,老化后推进剂强度主曲线几乎彼此重合(图7b)。

为描述强度主曲线中最大抗拉强度 σ_m 与应变率 $\log(\alpha_T \dot{\epsilon})$ 间的关系,采用式(1)表示^[13]:

$$\log(\sigma_m T_0/T) = A_1 + \frac{A_2}{1 + \exp(A_3 \log(\dot{\epsilon} \alpha_T) + A_4)} \quad (1)$$

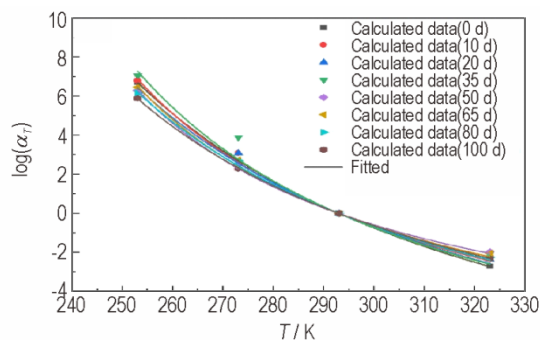
$$\log \alpha_T = -\frac{B_1(T - T_0)}{B_2 + (T - T_0)} \quad (2)$$

式中, T_0 为参考温度,298 K; T 为当前温度,K; $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2$ 为常数。以式(1)和式(2)对未老化推进剂强度主曲线及移位因子曲线进行拟合,确定式(1)和式(2)中各参数的具体数值,见表2所示。

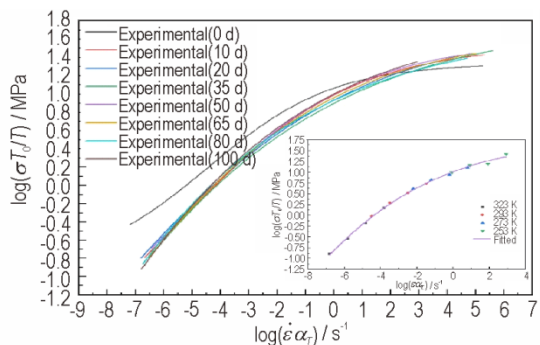
根据图7所示老化强度主曲线,建立式(3)所示老化强度准则:

$$\log(\sigma_m T_0/T) = C \left(A_1 + \frac{A_2}{1 + \exp(A_3 \log(\dot{\epsilon} \alpha_T) + A_4)} \right) + D \quad (3)$$

其中 C, D 为老化相关参数。以式(3)对老化后强度主曲线进行拟合,确定不同老化时间对应的老化相关参



a. Logarithmic shift factor



b. maximum tensile stress

图7 CMDB推进剂外推到293 K温度下强度主曲线

Fig.7 Typical master curves of maximum tensile stress for CMDB propellant reduced to 293 K

表2 CMDB推进剂强度准则参数值

Table 2 Constant values of the master curve for CMDB propellant

A_1	A_2	A_3	A_4	B_1	B_2	R^2
1.33343	-2.26802	0.45315	2.01391	13.91371	122.87165	0.992

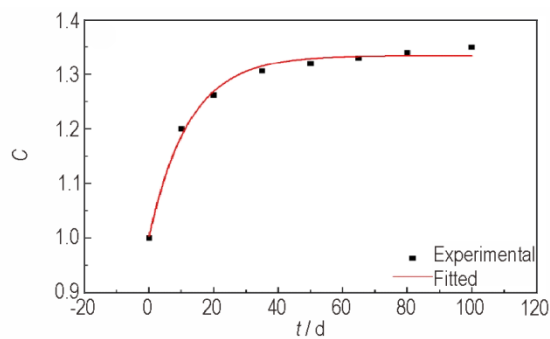
数 C, D 值如图 8 所示。

值得注意的是,根据图 8a,图 8b 所示,老化相关参数 C, D 为老化时间相关的函数,为建立老化强度准则,必须获得 C, D 作为老化相关的函数。因此 C, D 可以表示如下:

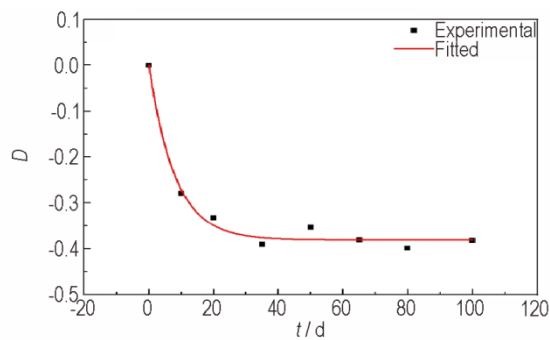
$$C = c_1 \exp(-t/c_2) + c_3 \quad (4)$$

$$D = d_1(1 - \exp(-d_2 t)) \quad (5)$$

式中, t 为老化时间, d ; c_1, c_2, c_3, d_1, d_2 为常数。以式(4)和式(5)对图 8 老化相关参数曲线进行拟合,得到式(4)和式(5)中各参数的具体数值,见表 3 所示。图 7b 显示了实验数据与老化强度准则模型之间的良好一致性。可以清楚地看到,最大强度主曲线可以预测 CMDB 推进剂在各种老化天数和应变率范围内的最大抗拉强度。



a. parameter C



b. parameter D

图8 老化参数变化规律

Fig.8 Variation of aging parameter with parameter C and D

表3 老化相关参数值

Table 3 Aging parameter values

C			D	
c_1	c_2	c_3	d_1	d_2
1.3352	-0.3317	12.3969	-0.3804	0.1248

4 结论

基于高固含量 CMDB 推进剂高温加速老化实验、准静态单轴拉伸试验和气相色谱测试,研究了 CMDB 推进剂在各种环境温度和应变率条件下的拉伸力学性能及老化对力学性能的影响,为 CMDB 推进剂热加速老化力学性能研究提供了一定的实验数据基础。同时,结合时温等效原理(TTSP),获得了老化强度主曲线,为老化强度预估提供了一种新方法。根据研究结果,可以得出以下结论:

(1) 老化过程中 CMDB 推进剂的力学性能有很大变化,相同测试温度和相同应变率条件下,CMDB 推进剂最大伸长率随老化时间的延长而减小,最大抗拉强度随老化时间的延长具有一定的下降趋势,强度值在一定范围内波动($\Delta\sigma < 30\%$)。

(2)老化过程中CMDB推进剂的最大伸长率和中定剂含量呈明显下降趋势,当下降到50%以下时,推进剂的性能不能满足使用要求。因此,可以通过测试CMDB推进剂的最大伸长率和中定剂含量变化,预估推进剂的贮存寿命。

(3)相同老化时间下,CMDB推进剂材料具有明显的温度效应和应变率效应,不同测试温度和应变率下,推进剂力学性能差异较大;随着应变率的增加或温度的降低,最大抗拉强度、断裂强度和弹性模量不断增加;随着温度的降低,最大伸长率和断裂伸长率的值减小。

(4)基于TTSP获得的老化强度主曲线可以预测CMDB推进剂在不同老化天数下相当大的应变率范围内的最大抗拉强度,可以通过建立最大强度主曲线方程,对不同老化天数的CMDB推进剂的最大抗拉强度进行预估。

参考文献:

- [1] Kadiresh P N, Sridhar B T N. Experimental evaluation and simulation on aging characteristics of aluminised AP-HTPB composite solid propellant[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 24(4): 406-412.
- [2] Özüpek. Computational Procedure for the Life Assessment of Solid Rocket Motors[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2010, 47(4): 639-648.
- [3] Judge M D and Lessard P. An Advanced GAP/AN/TAGN Propellant. Part I: Ballistic Properties[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(2): 175-181.
- [4] ZHOU Jian-ping. A constitutive model of polymer materials including chemical ageing and mechanical damage and its experimental verification[J]. *Polymer*.1993. 34(20):4252-4256.
- [5] Cerri S, et al. Aging of HTPB/Al/AP Rocket Propellant Formulations Investigated by DMA Measurements[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(2): 190-198.
- [6] 张兴高,张炜,朱慧,等. 固体推进剂贮存老化研究进展[J]. *含能材料*.2008,16(2): 232-237.
ZHANG Xing-gao, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Review on the aging of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008,16(2):232-237.
- [7] 杜永强,郑坚,彭威,等. HTPB推进剂贮存老化建模及寿命预估研究综述[J]. *化工进展*, 2016, 35(S2): 219-224.
DU Yong -qiang, ZHENG Jian, PENG Wei, et al. Review of the research of aging modeling and life prediction for HTPB propellant[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(Suppl.): 219-224.
- [8] 王国强,史爱娟,丁黎,等. 丁羟推进剂的热加速老化力学性能及寿命预估[J]. *火炸药学报*, 2015, 38(1): 47-50+55.
WANG Guo-qiang, SHI Ai-juan, DING Li, et al. Mechanical properties of HTPB propellant after thermal accelerated aging and its life prediction [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2015, 38(1): 47-50+55.
- [9] 杜永强,郑坚,彭威,等. 基于分段老化模型的HTPB推进剂贮存寿命[J]. *含能材料*, 2016, 24(10): 936-940.
DU Yong -qiang, ZHENG Jian, PENG Wei, et al. Storage life of HTPB propellant based on segmented aging model[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(10):936-940.
- [10] Zhao Xin, RUI Xiao-ting, WANG Yan, et al. Propellant shelf-life prediction under temperature and relative humidity conditions based on DPA kinetics[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2019, 37(4): 407-419.
- [11] WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Experimental investigation on high strain rate tensile behaviors of HTPB propellant at low temperatures [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(6).
- [12] WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Tensile mechanical properties and constitutive model for HTPB propellant at low temperature and high strain rate [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(24).
- [13] LI Hui, WANG Shi-xin, XU Jin-sheng, et al. Experimental research on tensile mechanical properties of NEPE propellant under confining pressure [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(11): 1769-1779.
- [14] 强洪夫,王哲君,王广,等. 低温动态加载下三组元HTPB复合固体推进剂的失效判据[J]. *含能材料*, 2019, 27(4): 274-281.
QIANG Hong-fu, WANG Zhe-jun, WANG Guang, et al. Failure criteria of three-component HTPB composite solid propellant at low temperature under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019,27(4):274-281.
- [15] 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. The failure criterion related to temperature for HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9):732-738.
- [16] GJB 770B-2005[S],火药试验方法:200-204,262-266.
GJB 770B-2005 [S], Test method of propellant: 200-204, 262-266.
- [17] 史万明. 线性插值法[J]. *火控技术*, 1977(2): 68-72.
SHI Wan-ming. Linear interpolation method [J]. *Fire Control Technology*, 1977(2):68-72.
- [18] 王亚平,王北海. 环境湿度及拉伸速度对丁羟推进剂伸长率的影响[J]. *含能材料*, 1998, 6(2):59-64.
WANG Ya-ping, WANG Bei-hai. Effect of environmental humidity on elongation of HTPB propellant at different stretching rate[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1998, 6(2):59-64.
- [19] Bohn M A, Volk F. Aging Behavior of Propellants investigated by heat generation, stabilizer consumption, and molar mass degradation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17(4): 171-178.
- [19] Kumar P. An overview on properties, thermal decomposition, and combustion behavior of ADN and ADN based solid propellants[J]. *Defence Technology*, 2018, 14(6): 661-673.
- [20] TANG Qiu-fan, FAN Xue-zhong, LI Ji-zhen, et al. Experimental and theoretical studies on stability of new stabilizers for N-methyl-P-nitroaniline derivative in CMDB propellants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 327: 187-196.
- [21] WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Tensile behaviors of thermal aged HTPB propellant at low temperatures under dynamic loading [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2020, 24(2): 141-159.

Tensile Mechanical Properties and Strength Master Curve of Thermal Aged CMDB Propellant

LIU Jia-ming, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, LI Hui, FAN Xing-gui

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the quasi-static tensile mechanical properties of aging high solid content modified double-base propellants (CMDB), the uniaxial tensile tests of CMDB propellant were carried out at four different temperatures (323, 293, 273, 253 K) and different strain rates (3.3×10^{-5} , 3.3×10^{-4} , 3.3×10^{-3} , $3.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$). The CMDB propellant samples with different aging time (0, 10, 20, 35, 50, 65, 80, 100 d) were tested by gas chromatography. The mechanical properties of CMDB propellant and the change of stabilizer content after aging were studied. The results show that the maximum elongation and the content of stabilizer decrease significantly during the aging process, which can be used as the failure criterion of the aging CMDB propellant. By using the time-temperature superposition principle (TTSP), the maximum tensile strength curve of CMDB propellant was obtained, and the aging strength main curve equation was established, which could be used to predict the maximum tensile strength of CMDB propellant with different aging time in the range of quasi-static strain rate.

Key words: CMDB propellant; thermal aging; tensile mechanical properties; master curve

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021004

(责编:姜梅)