

PBT 固体推进剂低温力学性能研究^{*}

张 哲, 曾国伟, 张正金, 沈业炜, 李兆娜

(上海航天动力技术研究所, 浙江 湖州 313000)

摘 要: 为考察PBT固体推进剂低温力学性能, 采用单轴拉伸实验方法研究了固化参数、交联参数、固化时间三种因素对PBT固体推进剂-40℃下力学性能的影响。玻璃化温度测试结果表明, 全部样品玻璃化温度处于-51.3~-53.6℃, 推进剂在-40℃下处于高弹态; 单轴拉伸测试结果表明: PBT固体推进剂在低温状态下硬度、抗拉强度与固化参数、交联参数、固化时间呈正相关, 伸长率与固化参数、交联参数、固化时间呈负相关。低温力学性能受固化参数、交联参数影响显著性低于常温力学性能; 低温下固化参数在1.00~1.05内与伸长率呈现一定线性关系。

关键词: PBT固体推进剂; 低温; 力学性能; 单轴拉伸; 线性拟合

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 09-210287-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210287

Low Temperature Mechanical Properties of PBT Solid Propellant

ZHANG Zhe, ZENG Guo-wei, ZHANG Zheng-jin, SHEN Ye-wei, LI Zhao-na

(Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Huzhou 313000, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of PBT propellant at low temperature, the uniaxial tensile test method was used to study the effects of curing parameters, crosslinking parameters, and curing time on the mechanical properties of PBT propellant at -40℃. The glass transition temperature of all samples is between -51.3~-53.6℃, indicating that propellant is in rubbery state at -40℃. The results of mechanical properties data show that hardness and tensile strength are positively correlated with curing parameter, crosslinking parameter and curing time, and the elongation is negatively correlated with curing parameters, crosslinking parameters and curing time. Effects of curing parameter, crosslinking parameter on mechanical properties at -40℃ are less significant than those at 20℃. Elongation presents a good linear relationship when curing parameter is between 1.00~1.05.

Key words: PBT propellant; Low temperature; Mechanical properties; Uniaxial tension; Linear fit

1 引 言

固体推进剂作为火箭发动机的重要组成部分, 在工作过程中容易受到低温影响, 导致其内部固化网络发生变化, 进而改变其力学性能, 增大发生故障

概率^[1-4]。因此开展固体推进剂在低温状态下的性能研究对于降低故障概率、提升固体火箭发动机综合性能具有重要意义^[5-7]。国内外针对固体推进剂低温力学性能进行了大量研究。王虎干^[8]研究了-50℃低温下HTPB推进剂的力学性能与装药结构完整性的

^{*} 收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-06-28。

基金项目: 装备预先研究重点基金 (61407200203)。

通讯作者: 张 哲, 硕士, 助理工程师, 研究领域为复合固体推进剂。

引用格式: 张 哲, 曾国伟, 张正金, 等. PBT固体推进剂低温力学性能研究[J]. 推进技术, 2022, 43(9): 210287.
(ZHANG Zhe, ZENG Guo-wei, ZHANG Zheng-jin, et al. Low Temperature Mechanical Properties of PBT Solid Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(9): 210287.)

相关性,结果表明,随着应变速率的增大,推进剂应力-应变曲线的“双峰”现象越来越明显。王小英等^[9]对 NEPE 推进剂低温力学性能的研究表明,低温条件下推进剂最大拉伸强度和弹性模量增大,伸长率降低,且随着温度降低,推进剂在发生屈服时对应的伸长率逐渐降低。Jeremic^[10]研究了低温条件下 $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内固体推进剂的力学性能,结果对真实低温状态点火下药柱的完整性具有指导意义。

近年来以 3,3-双(叠氮甲基)氧丁环-四氢呋喃共聚醚(PBT)为粘结剂的固体推进剂逐渐成为热点^[11-14],张杰凡等^[15]研究了 PBT 复合固体推进剂的热分解特性,结果表明在温升速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的条件下,PBT 复合推进剂的初始分解温度为 183.6°C ,在慢烤试验中,PBT 复合推进剂中最先分解的组分为 BU,且 BU 的分解并未导致样品整体发生反应。吴战武等^[16]使用 PBT 粘结剂,制备了铝粉质量分数为 5% 的 PBT 叠氮三组元推进剂,使用 $\Phi 118$ 标准发动机测试,其能量比冲达 246.4 s ,该配方综合性能良好,可供高性能少烟推进剂装药。PBT 具有感度低、能量高等优点,兼顾固体推进剂对于能量与安全性能的需求,在低特征信号推进剂领域也具有很大发展潜力^[17]。

目前为止有关固体推进剂低温力学性能的研究对象多为 HTPB,NEPE 推进剂,针对 PBT 固体推进剂低温力学性能的相关研究较少。本文采用单轴拉伸实验对 PBT 固体推进剂力学性能进行测试,考察了固化参数、交联参数、固化时间对 PBT 固体推进剂低温力学性能的影响。

2 实 验

2.1 实验原料

BAMO-THF 共聚醚(PBT),羟值 19.88 mgKOH/g ,数均分子量 4500,营口天元化工研究所股份有限公司;高氯酸铵(AP),40~60 目,大连高佳化工有限公司;超细 AP, $d_{50}=(10\pm 2) \mu\text{m}$,上海航天动力技术研究所;铝粉, $d_{50}=(29\pm 3) \mu\text{m}$,辽宁鞍钢实业微细铝粉有限公司;三羟甲基丙烷,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;二羧酸乙二醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;双(2,2-二硝基丙醇)缩甲醛/缩乙醛(A3),上海航天动力技术研究所。

2.2 试样制备

试样采用复合固体推进剂制备工艺,推进剂配方如表 1 所示。首先按比例称量粘结剂、交联剂、扩链剂、增塑剂等组分,加入铝粉预混均匀制成稀浆。将称量好的 AP 加入稀浆中置于 VKM-5 型立式捏合

机混合 120~130min 得到推进剂药浆,真空浇注于模具中,在 60°C 条件下固化 6~8 天,制得固体推进剂样品。

Table 1 Basic composition of PBT propellant (%)

Component	AP	Al	A3	PBT	Others
Mass fraction	56	16	14	10	4

主要考察参数见表 2。其中固化参数(R)为体系中异氰酸酯基摩尔数与粘结剂羟基摩尔数的比值,交联剂参数(ρ_i)为体系中交联剂羟基摩尔数与粘结剂摩尔数的比值,扩链剂参数(ρ_e)为扩链剂羟基摩尔数与粘结剂羟基摩尔数的比值。

Table 2 Main parameters of PBT propellant

Sample	R	ρ_i	ρ_e	t/d
1	0.98	0.4	0.6	7
2	1.00	0.4	0.6	7
3	1.02	0.4	0.6	7
4	1.05	0.4	0.6	7
5	1.00	0.6	0.6	7
6	1.00	0.8	0.6	6
7	1.00	0.8	0.6	7
8	1.00	0.8	0.6	8
9	1.00	1.0	0.6	7

2.3 测试条件

2.3.1 力学性能测试

使用 WDW-5J 电子万能材料试验机(上海华龙测试仪器厂生产)进行测试,样品制备及测试方法以 GJB-770B-2005 413.1 为依据^[18],将试样制成哑铃形,在试样纵轴方向施加静态单向拉伸载荷,以测其所能承受的最大抗拉强度、断裂强度及相应的伸长率。低温测试速度为 $100 \text{ mm}/\text{min}$ 。

2.3.2 硬度测试

使用 LX-A 型橡胶硬度计(上海六菱仪器厂)进行测试,试样制备以 QJ 1113《复合固体推进剂性能测试用试样》为依据,试样测试以 QJ 1360-1988《复合固体推进剂硬度测试方法》为依据^[19]。

2.3.3 玻璃化温度测试

采用差示扫描量热法测试玻璃化温度,使用液氮将样品调节至 -100°C ,平衡 10min,再逐渐升温。使材料的比热容在玻璃化温度前后会发生突变,反映在差示扫描量热基线上出现一个向上(向下)的台阶,通过数据处理获得玻璃化温度。试样尺寸:直径 4~5mm,厚度 1.5~2.5mm。升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气气氛,流量 $40 \text{ ml}/\text{min}$ ^[20]。

3 结果与讨论

3.1 测试结果

本试验各样品硬度(H)、密度、玻璃化温度(T_g)测试结果见表 3,单轴拉伸分析样品力学性能测试结果见表 4。表中 σ_m 为抗拉强度, ε_m 为最大伸长率, ε_b 为断裂伸长率。

Table 3 Hardness, glass transition temperature, density of PBT propellant

Sample	H	Density/(g/cm ³)	$T_g/^\circ\text{C}$
1	21	1.794	-53.2
2	38	1.794	-53.6
3	58	1.798	-51.3
4	57	1.798	-52.0
5	57	1.799	-52.2
6	57	1.803	-51.5
7	61	1.797	-51.4
8	63	1.797	-53.4
9	55	1.795	-52.9

Table 4 Mechanical behaviors of PBT propellant at room temperature and low temperature

Sample	Mechanical properties at 20 $^\circ\text{C}$			Mechanical properties at -40 $^\circ\text{C}$		
	σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$	σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$
1	258	70.7	81.4	-	-	-
2	657	75.2	83.7	2471	71.2	78.0
3	955	71.2	80.1	2990	69.7	74.3
4	1226	58.4	63.5	3218	66.8	70.4
5	1028	46.2	50.6	3256	60.2	64.2
6	968	57.9	60.9	3201	68.9	76.9
7	1201	47.1	50.5	3330	60.2	62.8
8	1272	49.0	52.7	3632	57.9	60.9
9	1263	39.8	42.7	3413	50.8	54.6

PBT 固体推进剂的力学性能主要由固化网络与界面粘接所决定。固化网络由粘结剂、交联剂中羟基与异氰酸酯基发生反应,生成聚氨基甲酸酯构成。界面粘接即氧化剂颗粒与粘结剂基体的界面作用。

本实验主要考察的固化参数、交联参数、固化时间三种因素均可以通过影响固化网络来影响 PBT 固体推进剂低温力学性能^[21]。

本实验主要研究固体推进剂高弹态低温力学性能。当温度降低至 T_g 以下时,构成固化网络的聚合物将转变为玻璃态。聚合物玻璃态与高弹态的分子链运动单元、运动机理不同,处于玻璃态时,高分子链中整链运动停滞,可运动的为链节、小侧基、曲柄运动等。当处于高弹态时,高分子链整链可发生运动^[22]。在玻璃态聚合物不再适用 WLF 方程,力学性质发生本质改变,故玻璃态不在本文讨论范围之内。

通过表 3 可以看出,本次实验所测得 PBT 固体推进剂样品密度稳定在 1.794~1.803cm³,差异较小。玻璃化温度(T_g)稳定在-51.3~-53.6 $^\circ\text{C}$,表明在测试温度-40 $^\circ\text{C}$ 条件下,固体推进剂样品尚处于高弹态,未进行玻璃化转变。从硬度以及单轴拉伸实验结果中可以看出,不同样品的抗拉强度与伸长率存在明显差异,后文将进行逐一分析。

3.2 固化参数对 PBT 固体推进剂低温力学性能的影响

表 5 为固化参数(R)与硬度(H)、模量(E)、抗拉强度(σ_m)、最大伸长率(ε_m)之间的关系。在 $R=0.98$ 时,固体推进剂未能完全固化、硬度仅为 21。 $R>1.0$ 时,固体推进剂均能正常固化。随着 R 值升高,PBT 固体推进剂的 E,H ,低温 σ_m 均逐渐升高, ε_m 逐渐下降。图 1 为低温下不同固化参数固体推进剂单轴拉伸曲线,拉伸过程表现出明显的三阶段变化规律,前期应力快速增加,伸长率大于 20% 后应力增加逐渐变缓,直至破坏。低温 R - ε_m 拟合曲线 R -Square 为 0.99111, R - ε_b 拟合曲线 R -Square 为 0.98016, $\varepsilon_m,\varepsilon_b$ 与 R 值拟合度较高,具有一定线性关系,见图 2。

在固化反应过程中,异氰酸酯基与羟基反应,生成氨基甲酸酯聚合物,使推进剂成为具有一定力学性能的弹性体。 R 值升高后,异氰酸酯基含量增加,提高了固化反应程度。宏观上体现为推进剂硬度增加、抗拉强度上升、伸长率下降。另外低温状态下伸

Table 5 Effects of curing parameter on mechanical properties of PBT propellant at low temperature

Sample	R	Mechanical properties at 20 $^\circ\text{C}$				Mechanical properties at -40 $^\circ\text{C}$				H
		σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$	E/MPa	σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$	E/MPa	
1	0.98	258	70.7	81.4	0.33	-	-	-	-	21
2	1.00	657	75.2	83.7	1.12	2471	71.2	78.0	11.14	38
3	1.02	955	71.2	80.1	1.56	2990	69.7	74.3	12.71	58
4	1.05	1226	58.4	63.5	3.37	3218	66.8	70.4	17.30	57

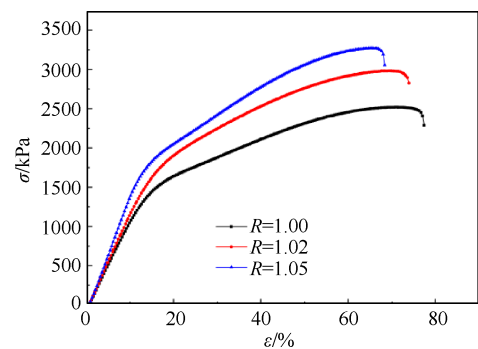


Fig. 1 Stress-strain curves of the propellant with different curing parameter at -40°C

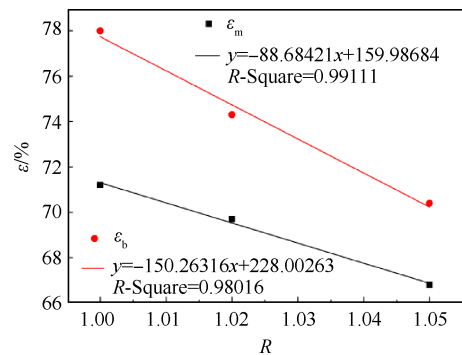


Fig. 2 Linear fit of R and $\varepsilon_m, \varepsilon_b$ at -40°C

长率随固化参数增加降低幅度小于常温。 R 值取 1.00, 1.02 时, 低温状态下最大伸长率和断裂伸长率均低于常温, 在 R 值增加到 1.05 后低温状态下伸长率已经高于常温状态。

由文献[23]可知, 通过对应力-应变曲线积分可以求出拉伸过程中外界对拉伸试件做功(W_a)。 W_a 与 σ, ε 均呈正相关, 可以反应样品的韧性与综合性能, W_a 越大表明拉伸至断裂所需要做的功越多。

$$W_a = \int F dL$$

(1)

应力与应变分别为

$$\sigma = F/S$$

(2)

$$\varepsilon = l/l_0$$

(3)

由式(1)~(3)可得

$$\int \sigma d\varepsilon = W_a/(Sl_0)$$

(4)

式中 W_a 为拉伸到断裂外力做的总功; F 为外界拉力; S 为横截面积; l 为拉伸距离; l_0 为试样初始长度; σ 为材料所受应力; ε 为材料的应变。

l_0, S 均已知, 求得 W_a 与固化参数关系曲线如图 3 所示: 随着 R 值升高至 1.02, 常温与低温的 W_a 均升高。 R 值继续增加, 低温 W_a 增长效果不明显, 常温 W_a 有所下降。推测在 R 值达到 1.02 时, 体系中的异氰酸酯基与羟基的反应接近效率最高点, 继续增加 R 值对 W_a 影响有限, 甚至使反应不完全的高分子链增加, 对体系的力学性能产生负面影响。故在 R 值取 1.02 时, 固体推进剂对外界能量的吸收作用达到阈值, 抗拉强度与伸长率表现出较好的平衡性。

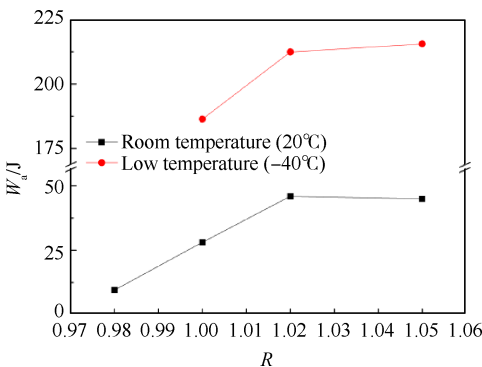


Fig. 3 Relationship of W_a - R of PBT propellant

3.3 交联参数对 PBT 固体推进剂低温力学性能的影响

通过对比表 6、图 4 可以看出, 拉伸过程正常且曲线呈现良好的规律性, 随着交联参数的升高, PBT 固体推进剂硬度、模量与低温抗拉强度均随之升高, 伸长率随之降低。图 5 显示低温 ρ_i - ε_m 拟合曲线 R -Square 为 0.84586, ρ_i - ε_b 拟合曲线 R -Square 为 0.86055, $\varepsilon_m, \varepsilon_b$ 与交联参数呈负相关, 但线性相关度不高。

交联剂为小分子多元醇, 分子中含有三个羟基, 能与 PBT、固化剂反应形成交联点。随着交联参数的升高, 三官能度的羟基含量增多, 交联点与交联密度也随之增加, 交联点之间的分子链链长缩短, 使聚合物分子链连接更紧密, 从而表现出上述规律。

Table 6 Effects of crosslinking parameter on mechanical properties of PBT propellant at low temperature

Sample	ρ_i	Mechanical properties at 20°C				Mechanical properties at -40°C				H
		σ_m /kPa	ε_m /%	ε_b /%	E /MPa	σ_m /kPa	ε_m /%	ε_b /%	E /MPa	
2	0.4	657	75.2	83.7	1.12	2471	71.2	78.0	11.14	38
5	0.6	1028	46.2	50.6	3.06	3256	60.2	64.2	14.20	57
7	0.8	1201	47.1	50.5	3.11	3330	60.2	62.8	14.32	61
9	1.0	1263	39.8	42.7	3.44	3413	50.8	54.6	15.93	55

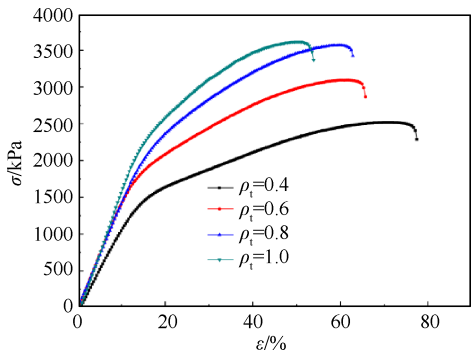


Fig. 4 Stress-strain curves of the propellant with different crosslinking parameter at -40°C

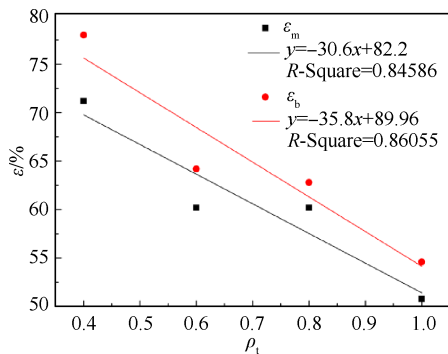


Fig. 5 Linear fit of ρ_i and ε_m , ε_b at -40°C

从图 6 中可以看出,随着 ρ_i 从 0.4 升高至 0.8, W_a 逐渐升高,在 ρ_i 取 0.8 时常温、低温 W_a 均达到最大值,综合力学性能最好。 ρ_i 继续增加则常温、低温 W_a 均有所降低。在交联参数较低时,增加交联剂用量会提升推进剂的综合力学性能。 ρ_i 取 0.8 附近时,体系内交联剂达到最佳值,断裂功最大。继续增加交联剂则会使交联密度过大,交联点之间的分子链过短,导

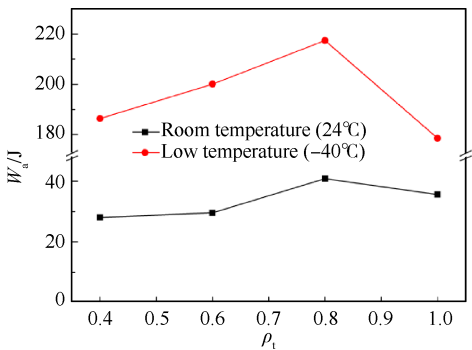


Fig. 6 Relationship of W_a - ρ_i of PBT propellant

致 W_a 降低。

3.4 固化时间对 PBT 固体推进剂低温力学性能的影响

图 7 为固体推进剂不同固化时间的红外图谱,混合刚结束时的药浆在 2270cm^{-1} 处存在 $-\text{NCO}$ 特征吸收峰, 2100cm^{-1} 附近为 $-\text{N}_3$ 特征吸收峰,此时尚处于快速反应阶段,羧基与异氰酸酯基反应生成氨基甲酸酯, 1680cm^{-1} , 1450cm^{-1} 为酯基上 $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}-\text{N}$ 的特征吸收峰, 1050cm^{-1} 处为酯基 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰。固化一天后, $-\text{NCO}$ 特征吸收峰消失,此时反应程度大幅增加,酯基伸缩振动吸收峰有所增强。固化 6 天后,反应程度接近终点,反应速率变慢,随着固化程度提高,光透过率下降,各特征峰均有所减弱。

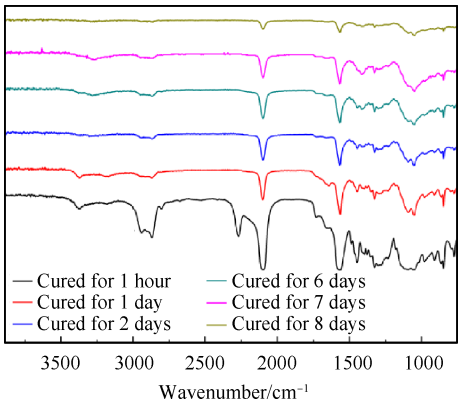


Fig. 7 Absorption spectrum of PBT propellant with different curing time

从表 7 可以看出,固化 6, 7, 8 天后所测的推进剂硬度分别为 57, 61, 63, 差别较小,固化时间 6 天时模量为 12.85MPa ,第 7 天与第 8 天的模量相近且与第 6 天相比有所提高。抗拉强度与伸长率数据所呈现规律与图 8 拉伸曲线所呈规律一致:随着固化时间延长,固体推进剂低温抗拉强度升高,伸长率降低。在固化 6 天后,推进剂硬度即达到 57。此时宏观上推进剂已经固化,固化反应接近反应终点,但体系中依然存在少量游离的羟基与异氰酸根持续发生反应,随着固化时间继续延长,固化网络体系的固化程度也进一步提高。

从图 9 可以看出,固化第 7 天与第 6 天相比, W_a 有

Table 7 Effects of curing time on mechanical properties at low temperature

Sample	t/d	Mechanical properties at 20°C				Mechanical properties at -40°C				H
		σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$	E/MPa	σ_m/kPa	$\varepsilon_m/\%$	$\varepsilon_b/\%$	E/MPa	
6	6	968	57.9	60.9	2.07	3155	68.9	76.9	12.85	57
7	7	1201	47.1	50.5	3.11	3330	60.2	62.8	14.32	61
8	8	1272	49.0	52.7	2.22	3632	57.9	60.9	14.31	63

所升高,固化第 8 天时,低温 W_a 变化幅度较小,常温 W_a 有所下降,印证固化 7 天反应程度接近反应终点, W_a 已经达到阈值,继续延长固化时间对 W_a 作用不明显,或导致后固化反应,使体系中反应不完全的高分子链增多, W_a 降低。

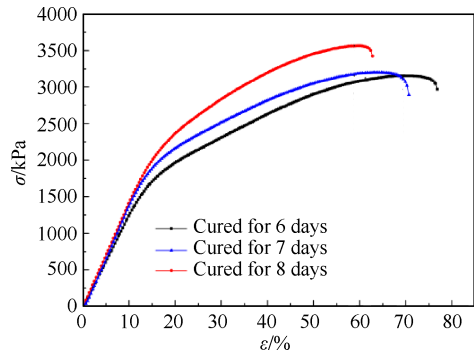


Fig. 8 Stress-strain curves of the propellant with different curing time at -40°C

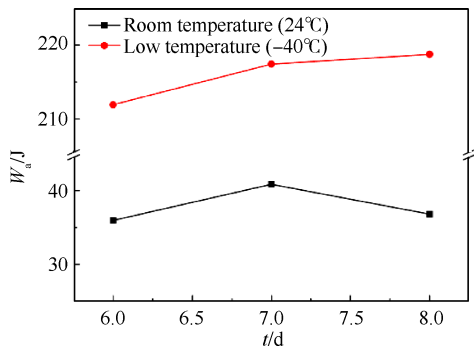


Fig. 9 Relationship of W_a -curing time

4 结 论

本实验开展了 PBT 固体推进剂低温力学性能影响因素研究,得到结论如下:

(1) 固化参数、交联参数、固化时间三种因素对 PBT 固体推进剂密度、玻璃化温度影响较小,玻璃化温度稳定在 $-51.3\sim-53.6^{\circ}\text{C}$,推进剂在测试温度 (-40°C) 条件下处于高弹态。

(2) PBT 固体推进剂在低温抗拉强度与固化参数、交联参数呈正相关,低温伸长率与固化参数、交联参数呈负相关,伸长率与固化参数具有一定线性关系;低温下固体推进剂的伸长率受固化参数、交联参数影响显著性低于常温;固化参数 1.02,交联参数 0.8 时 W_a 值较高,综合力学性能较好。

(3) 在固化参数为 1.0,交联参数 0.4,扩链参数 0.6, 60°C 烘箱条件下,6 天可使固体推进剂固化。随固化时间延长,固体推进剂低温抗拉强度升高,伸长

率降低。固化 7 天可使 W_a 达到较好水平。

致 谢:感谢装备预先研究重点基金的资助,感谢吴祝俊研究员对本文的指导与建议。

参考文献

- [1] 高 晨,刘博龙,刘 洋,等. 低温推进剂利用系统仿真平台设计与应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2019 (4): 43-46.
- [2] 张晓军,常新龙,赖建伟,等. HTPB 推进剂低温拉伸/压缩力学性能对比[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(6): 771-774.
- [3] 龙 兵,常新龙,刘万雷,等. HTPB 推进剂低温断裂性能试验研究[J]. 推进技术, 2014, 39(9): 1278-1282. (LONG Bing, CHANG Xin-long, LIU Wan-lei, et al. Experimental Study on Low Temperature Fracture Properties of HTPB Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 39(9): 1278-1282.)
- [4] 王鸿丽,许进升,陈 雄,等. 固体火箭推进剂过保温后力学性能试验研究[J]. 弹道学报, 2018, 30(1): 51-54.
- [5] Cady C M, Blumenthal W R, Gray III G T, et al. Mechanical Properties of Plastic-Bonded Explosive Binder Materials as a Function of Strain-Rate and Temperature [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 23(4): 812-819.
- [6] 李亦健,高 旭,陈 虹,等. 低温推进剂加注系统置换介质的相似性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 703-708. (LI Yi-jian, GAO Xu, CHEN Hong, et al. Similarity Analysis of Different Replacement Gases for Cryogenic Propellant Loading System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(3): 703-708.)
- [7] 刘 畅,强洪夫,王哲君. 低温动态加载下老化 HTPB 推进剂强度准则研究[J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2581-2587. (LIU Chang, QIANG Hong-fu, WANG Zhe-jun. Strength Criterion of Aged HTPB Propellant at Low Temperature under Dynamic Loading[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2581-2587.)
- [8] 王虎干. 不同应变速率下 HTPB 固体推进剂低温力学性能试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(6): 12-14.
- [9] 王小英,汪 越,尹欣梅,等. NEPE 推进剂低温力学性能研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14 (5): 64-67.
- [10] Jeremic R. Some Aspect of Time-Temperature Super-Position Principle Applied for Predicting Mechanical Properties of Solid Rocket Propellants[J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 1999, 24(4): 221-223.
- [11] 胡义文,郑启龙,宋秀铎,等. 叠氮聚酯推进剂低温黏弹特性及其冲击损伤行为[J]. 火炸药学报, 2013,

- 36(6): 771-774.
- [12] Badgujar D M, Talawar M B, Asthana S N, et al. Advances in Science and Technology of Modern Energetic Materials: An Overview[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(2): 289-305.
- [13] Oyumi Y, Mitarai Y, Bazaki B, et al. Thermal Decomposition of AMMO/AP Composite Propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993(18): 168-182.
- [14] 菅晓霞, 郑启龙, 胡义文, 等. PBT弹性体力学性能及低温脆性研究[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(2): 189-193.
- [15] 张杰凡, 徐 森, 刘大斌, 等. PBT复合固体推进剂的热分解特性[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(6): 752-757.
- [16] 吴战武, 刘旭峰, 纪明卫, 等. 少烟PBT推进剂制备及性能研究[J]. *爆破器材*, 2019, 48(4): 17-22.
- [17] Eishu K. Characterization of BAMO/NMMO Copolymers [J]. *Propellant, Explosives, Pyrotechnic*, 1994 (19): 270-275.
- [18] GJB 770B-2005, 火药试验方法[S].
- [19] QJ 1113-1987, 复合固体推进剂性能测试用试件[S].
- [20] 李守超, 程 清, 陈伟华, 等. 差示扫描量热法测定橡胶玻璃化温度[J]. *分析仪器*, 2012(3): 26-30.
- [21] 沈业伟, 仇玉成, 童丽伦. PBT钝感高能推进剂高温力学性能调节技术研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(11): 2595-2600. (SHEN Ye-wei, ZHANG Yu-cheng, TONG Li-lun. Study on Adjustment Technology for High Temperature Mechanical Properties of PBT Insensitive High Energy Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2595-2600.)
- [22] 华幼卿, 金日光. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [23] 李 洋, 马 松, 李国平, 等. PBT/N100胶片的力学性能及交联网络的完整性[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(2): 197-202.

(编辑:朱立影)