

文章编号:1006-9941(2019)05-0398-06

石蜡/HTPB燃料的力学性能

王印¹,王飞²,胡松启¹,刘林林¹,刘辉³

(1.西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室,陕西 西安 710072; 2.上海航天动力技术研究所,上海 201109; 3.西安航天化学动力有限公司,陕西 西安 710025)

摘要: 为了研究端羟基聚丁二烯(HTPB)体系质量分数以及温度对石蜡/HTPB燃料力学性能的影响,制备了7种不同配方石蜡/HTPB拉伸试件,并使用万能材料试验机以 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 拉伸速率进行了单轴拉伸实验,分析了燃料的最大抗拉强度、断裂伸长率和初始弹性模量变化规律。结果表明,随着HTPB体系质量分数增加,燃料的断裂伸长率增大,而最大抗拉强度和初始弹性模量皆减小;当环境温度较高(接近石蜡熔点 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,燃料的最大抗拉强度和初始弹性模量皆随着HTPB质量分数增加而增大;燃料的最大抗拉强度随温度降低而逐渐增大,其中当温度由 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,H20燃料最大抗拉强度由 1.189 MPa 升高至 2.150 MPa ;以HTPB体系为基体、石蜡为填料的石蜡/HTPB燃料,在其基体与填料的界面上存在相互阻滞作用力,可提高燃料的力学性能。

关键词: 端羟基聚丁二烯(HTPB);石蜡/HTPB燃料;力学性能;固液混合发动机

中图分类号:TJ55;V512

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018153

1 引言

固液混合发动机是以固体燃料和液体氧化剂为推进剂的航天器动力装置,具有安全可靠、可低成本实现推力调节和多次启动功能、成本低廉、燃烧产物绿色环保等优点,但传统固体燃料(如HTPB)燃面退移速率较低,单位时间成气量较少,往往导致固液混合发动机推力不足,因此该航天动力装置至今仍未得到广泛应用^[1]。石蜡(Paraffin)燃面退移速率比传统固体燃料(如HTPB)高3~4倍,且燃烧热值与HTPB或煤油相当,成本廉价,且密度比煤油高20%以上,因此石蜡燃料的出现为固液混合发动机技术发展注入了新的活力^[2-5]。石蜡属于热塑型材料但在常温下已发生脆性断裂,伸长率较低且韧性较差,因此石蜡燃料普遍存在

力学性能较差的缺陷^[6-7]。然而,发动机在制造、储存、运输及工作时,会受到冲击、振动、加速和点火压力等载荷作用,燃料作为发动机中最脆弱的部件之一,其力学性能的好坏是该燃料能否在发动机中得到应用的重要前提条件^[8-9]。因此,研究含石蜡燃料的力学性能对固液混合发动机技术的发展具有重要意义。

为提高含石蜡燃料的力学性能,常在石蜡中添加各种增强体系。日本东海大学Shinya^[10]在石蜡中添加乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA),提高含石蜡燃料的力学性能,研究表明,当EVA的质量分数达到20%时,最大抗拉强度增大为原来的1.6倍,最大应变增大为原来的2.2倍,但燃面退移速率约降低为原来的40%。

汪灵^[11]在石蜡中添加硬脂酸,研究其混熔体系的力学性能,结果表明,硬脂酸可提高石蜡均匀性,且对石蜡强度有显著的增强作用,当硬脂酸的质量分数为10%时,石蜡/硬脂酸燃料的抗拉强度增大为 1.792 MPa 。

陈名华等^[12]在石蜡中添加三种组分来改变石蜡的力学性能,结果表明,石蜡的强度随着硬脂酸、增韧剂和聚乙烯质量分数的增加而增强。张燕^[13]采用分子动力学模拟方法对石蜡与硬脂酸、增韧剂和聚乙烯四者共混物的相容性、可混合性、力学性能进行了分

收稿日期:2018-06-08;修回日期:2018-08-09

网络出版日期:2018-12-19

基金项目:国家自然科学基金(51606157)和陕西省自然科学基金(2017JQ5068)资助,中央高校基本科研业务费与专项基金

作者简介:王印(1993-),男,博士研究生,主要从事固液混合发动机研究。e-mail:wongyin@mail.nwpu.edu.cn

通信联系人:刘林林(1984-),男,博士,副研究员,主要从事新型含石蜡燃料研究。e-mail:lll@nwpu.edu.cn

引用本文:王印,王飞,胡松启,等.石蜡/HTPB燃料的力学性能[J].含能材料,2019,27(5):398-403.

WANG Yin, WANG Fei, HU Song-qi, et al. Mechanical Property of Paraffin/HTPB Fuel[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(5): 398-403.

析,结果表明,三种共混物的力学性能均优于石蜡,提出可对石蜡物理共混改性,提高燃料力学性能。

John D 等^[14]在石蜡中加入低密度聚乙烯蜡(LDPE)并制备了拉伸试件,在 20 ℃下,通过万能材料试验机对含石蜡/LDPE 燃料进行了单向拉伸实验,结果表明,LDPE 可减少石蜡中的孔隙,有助于石蜡/HTPB 燃料的结构完整性,同时石蜡/LDPE 燃料试件的最大抗拉强度和初始弹性模量随着 LDPE 质量分数的升高而升高,且 LDPE 质量分数为 2%~4% 时,石蜡/LDPE 燃料最大抗拉强度与 HTPB 燃料相当,但初始弹性模量和最大伸长率远低于 HTPB 燃料。

尽管国内外提出多种方法,在石蜡中添加各种添加剂以提高燃料的力学性能,但由于 EVA、硬脂酸、聚乙烯等添加剂与石蜡相容性较差或改善效果不佳,因此这些方法未能得到广泛应用。HTPB 是固体推进剂配方中常见的黏合剂,抗拉强度和断裂伸长率较高。随环境温度的变化,石蜡/HTPB 燃料的力学性能亦发生改变,但目前有关 HTPB 质量分数、环境温度对石蜡/HTPB 燃料力学性能影响的研究和报道较少。

因此,本研究以 58# 半精炼石蜡和 HTPB 体系为原料制备拉伸试件,在不同温度下进行拉伸实验并对燃料力学性能进行表征,通过分析石蜡/HTPB 燃料力学性能变化规律,为改善石蜡/HTPB 燃料的力学性能提供依据。

2 实验

2.1 试剂与仪器

试剂:58# 半精炼固体石蜡,工业级,中国石油天然气股份有限公司大庆炼化分公司;HTPB,Ⅲ型,工业级,黎明化工研究设计院有限责任公司;三(2-甲基-1-氮丙啶)氧化膦(MAPO),分析纯,天元化工有限责任公司;甲苯二异氰酸酯(TDI),分析纯,南宁广宇化工有限公司。

仪器:山东威海环宇化机 1 L 加热搅拌釜;小型真空浇注缸;YH-9000A 温控型电脑式万能材料试验机;蔡司 EVO MA 25/LS 25 钨灯丝扫描电镜。

2.2 试件制备

本研究在石蜡中添加 HTPB 以改善石蜡燃料力学性能,按表 1 配方制备 7 种试件用于试验。

按照 GJB770B-2005 方法 413.1《最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率单向拉伸法》要求,试件需制备成哑铃型形状,按照试件制备工艺不

表 1 7 种试件的配方

Table 1 The formulation of 7 kinds of specimens %

No.	HTPB	TDI	MAPO	Paraffin
H00	0	0	0	100
H10	9.37	0.58	0.05	90
H20	18.72	1.17	0.11	80
H30	27.90	1.75	0.17	70
H40	37.43	2.34	0.23	60
H50	46.79	2.92	0.29	50
H100	93.55	5.87	0.58	0

同,试件可分为 A 型和 B 型,其中 A 型为挤压成型工艺制备的试件;B 型为浇注成型工艺制备的试件。石蜡为热塑型材料,韧性较差且易碎裂,若采用挤压成型工艺则无法制备出结构完整的试件,因此需采用浇注成型工艺制备试件,但石蜡凝固时收缩较为严重,因此拉伸试件只能采用沿长度方向冗余浇注,待固化后修剪为 B 型标准试件,其工程标距为(70±0.5) mm,厚度为(10±0.5) mm。

H00 试件制备:将石蜡在 80 ℃油浴中加热融化为液态后,采用真空浇注法浇注到哑铃型模具中自然冷却至室温,脱模后按照 B 型标准拉伸试件修剪即可。

H10~H50 试件制备:按表 1 配方比例在熔化为液态的石蜡中添加 HTPB 搅拌 1 h 左右后,添加固化剂 TDI 和交联剂 MAPO 搅拌 10 min,采用真空浇注法将药浆浇注到哑铃型模具中,60 ℃固化 72 h 后即可。

H100 试件制备:采用真空浇注法将添加有固化剂的 HTPB 药浆浇注到哑铃型模具中,80 ℃固化 48 h 后即可。

2.3 试件拉伸实验及断面显微观察

参照 GJB770B-2005 方法 413.1 将 7 种标准试件在 YH-9000A 温控型电脑式万能材料试验机中进行单向拉伸测试,拉伸速率为 10 mm·min⁻¹,获得试件在单向拉伸时的力与位移曲线,为表征试件的力学性能参数提供原始数据支持。拉伸前将试件与夹具一同保温 1 h,使试件内部温度达到实验温度且分布均匀。

燃料剖面形貌:将试件在 YH-9000A 温控型电脑式万能材料试验机上拉断后,用扫描电镜观察其断面形貌。

2.4 力学性能表征方法

根据固体推进剂力学性能常用评判指标,通过单向拉伸实验,以最大抗拉强度、断裂伸长率和初始弹性模量参数表征石蜡/HTPB 燃料的力学性能^[15]。

最大抗拉强度是衡量燃料最大承载能力指标,最

大抗拉强度与拉伸载荷之间的关系可表示为:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (1)$$

式中, σ_m 是最大抗拉强度, MPa; F_m 是最大拉伸载荷, N。初始弹性模量是衡量燃料抵抗弹性变形能力大小的尺度, 初始弹性模量越大, 燃料在外部载荷作用下弹性形变量越小。

$$E_i = \frac{(F_d - F_c) \times L_0}{(L_d - L_c) \times A_0} \quad (2)$$

式中, E_i 为初始弹性模量, MPa; F_c 和 F_d 分别为应力在 3% 和 15% 时试件承受的拉伸载荷, N; L_0 为试件初始标距, mm; L_c 和 L_d 分别为应力在 3% 和 7% 时试件的有效长度, mm; A_0 为试件初始横截面积, mm²。

断裂伸长率可衡量燃料受单向拉伸载荷断裂时发生形变量的大小^[16]。

$$\varepsilon_b = \frac{L_b - L_0}{L_0} \quad (3)$$

式中, ε_b 为断裂伸长率, %; L_b 为试件承受拉伸载荷断裂时的有效长度, mm。

3 结果与讨论

3.1 HTPB 质量分数对石蜡/HTPB 燃料力学性能的影响

7 种试件在 20 °C 下的拉伸应力-应变曲线如图 1 所示。由图 1 可知, 在 20 °C 下石蜡/HTPB 燃料(H10 和 H20)的拉伸力学性能与纯石蜡(H00)相似, 在单向拉伸载荷作用下试件的应力-应变曲线斜率和峰值较高, 即初始弹性模量较高, 同时试件的最大抗拉强度较大, 分别为 1.422 (H00), 1.184 MPa (H10) 和 1.189 MPa (H20), 但断裂伸长率较小, 呈现脆性材料的特性, 当 HTPB 质量分数大于 20% 时, 其试件(H30、H40 和 H50)的应力-应变曲线与 H00 相比发生显著变化, 在单向拉伸载荷作用下, 应力-应变曲线斜率和峰值较低, 即最大抗拉强度和初始弹性模量随着 HTPB 质量分数增加而减小, 而断裂伸长率显著增大, 呈现弹性体材料的特征。

在 20 °C 下, 不同试件的最大抗拉强度、断裂伸长率和初始弹性模量见表 2。

从表 2 可见, 在 20 °C 下 HTPB 体系质量百分含量为 10% 的燃料(H10)断裂伸长率由 0.78% 增加至 4.17%, 且随着 HTPB 质量分数继续增加, 燃料的断裂

伸长率也随之增大, 而最大抗拉强度和初始弹性模量呈现减小的趋势, 因此, 在石蜡中添加 HTPB 可有效地提高石蜡/HTPB 燃料的力学性能。当 HTPB 体系质量分数由 20% 升高至 30% 时, 燃料(H30)最大抗拉强度约减小为原来(H20)的 67%, 断裂伸长率约增大为原来(H20)的 2 倍, 因此可添加一定量 HTPB 制备出力学性能较好的石蜡/HTPB 燃料。

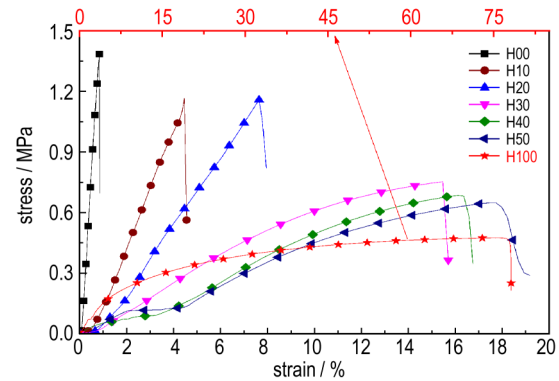


图 1 7 种试件在 20 °C 环境中的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of 7 kinds of specimens in the 20 °C environment

表 2 20 °C 时试件的最大抗拉强度、断裂伸长率和初始弹性模量

Table 2 Maximum tensile strength, elongation at break and initial elasticity modulus of specimens at 20 °C

sample	σ_m / MPa	ε_b / %	E_i / MPa
H00	1.422	0.78	227.011
H10	1.184	4.17	119.333
H20	1.189	7.02	90.963
H30	0.796	15.25	70.916
H40	0.703	16.08	63.127
H50	0.596	18.20	56.535
H100	0.485	78.12	11.104

Note: 1) σ_m is the maximum tensile strength. 2) ε_b is the elongation at break. 3) E_i is the elasticity modulus.

在 20 °C 下, 当燃料中 HTPB 体系质量分数由 20% 增加至 30% 时, 燃料的最大抗拉强度、断裂伸长率和弹性模量皆发生显著改变, 故用 SEM 对试件 H20 和 H30 断裂横截面形貌进行观察, 从而分析石蜡/HTPB 燃料混合体系微观结构, 试件 H20 和 H30 在 20 °C 下以 10 mm·min⁻¹ 拉伸速率单向拉伸后的断面形貌如图 2 所示。

由图 2 可见, HTPB 将石蜡包裹构成共混体系, 以 HTPB 为基体、石蜡为填料的燃料当受到一定外力作用时, HTPB 发生弹性形变, 可提高燃料的断裂伸长率, 克服石蜡易碎、易断裂的缺陷, 因此燃料的伸长率

随 HTPB 质量分数升高逐渐升高。石蜡颗粒作为填料,可增强燃料的抗拉强度和初始弹性模量,因此以 HTPB 基体包裹着石蜡的结构,可提高石蜡燃料的伸长率、增强 HTPB 的抗拉强度和初始弹性模量,改善了石蜡/HTPB 燃料的力学性能。

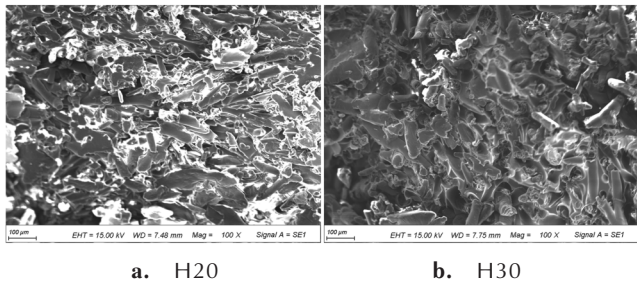


图2 石蜡/HTPB 燃料(H20,H30)拉伸断面的扫描电镜图
Fig.2 SEM images of the tensile cross section of paraffin/HTPB fuels(H20 and H30)

3.2 温度对石蜡/HTPB 燃料力学性能的影响

H00~H50 试件 $-40\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的最大抗拉强度变化趋势如图3所示。从图3曲线趋势看,在测试的温度范围内,燃料的最大抗拉强度皆随着 HTPB 质量分数的增加而减小,但在高温条件下,与之相反。由石蜡属于非弹性体材料,最大抗拉强度较大,而 HTPB 属于高分子弹性体,最大抗拉强度较小,在共混体系中随着 HTPB 含量增加,燃料逐渐表现为 HTPB 的力学特性。在拉伸形变的短时间内 HTPB 内部结构的热力学非平衡程度较高,从而呈“软化”状态,因此也导致燃料的最大抗拉强度减小。在高温下石蜡(熔点为 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$)变软或部分熔化,导致石蜡最大抗拉强度显著减小,此时石蜡/HTPB 燃料的抗拉强度和初始弹性模量主要依靠粘合剂维持,因此随着 HTPB 质量分数的增加,试件的抗拉强度增大。由于 HTPB 属于有机高分子材料,随着温度降低,虽然未达到玻璃化转变温度,但可能发生低温脆性转变导致试件最大抗拉强度增大、断裂伸长率减小,因此在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下当 HTPB 体系质量分数由40%增加至50%时,燃料的最大抗拉强度反而增大。

初始弹性模量是衡量燃料在受到载荷作用时形变大小的重要指标,这对评估燃料在外部作用力下仍保持药柱结构完整性具有重要作用,温度对石蜡/HTPB 燃料初始弹性模量的影响结果如图4所示。

由图4可见,随着温度升高,试件的初始弹性模量降低,试件H10(HTPB 质量分数为10%)在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下初始弹性模量为298.6 MPa,但在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,H10试件初始弹性模量减小至38.2 MPa。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,当

HTPB 质量分数由40%增加至50%时,燃料的初始弹性模量略有增大,这是因低温导致 HTPB 体系在低温下已发生脆性转变,此现象也验证了图3,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下当 HTPB 体系质量分数由40%增加至50%时,试件最大抗拉强度增大。

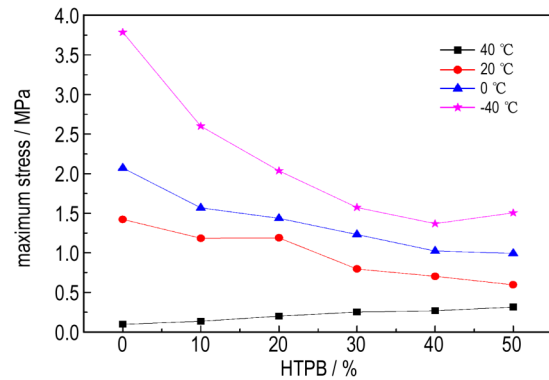


图3 温度对石蜡/HTPB 燃料最大抗拉强度的影响
Fig.3 Effect of temperature on the maximum tensile strength of paraffin/HTPB fuels

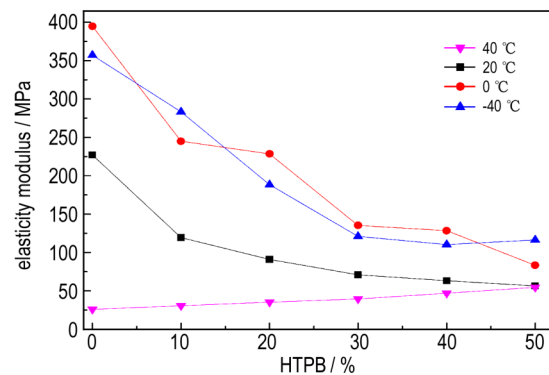
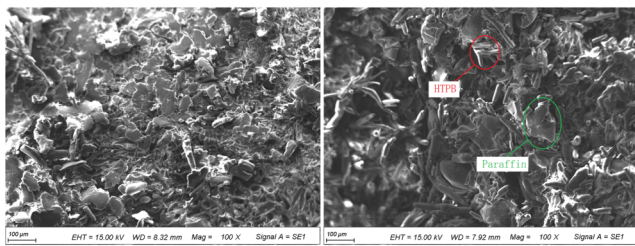


图4 温度对石蜡/HTPB 燃料初始弹性模量的影响
Fig.4 Effect of temperature on the initial elasticity modulus of paraffin/HTPB fuels

通过显微观察试件断面形貌研究石蜡/HTPB 燃料力学性能增强机制,因 HTPB 含量较高时,试件断面形貌更为清晰,且 H40 燃料的力学性能较好,因此对其未拉伸的截面和拉伸后断面进行 SEM 显微观察。

由图5b可见,拉伸断面上存在大量丝状物,但石蜡属于脆性材料而 HTPB 为弹性体材料,因此可确定该丝状物为 HTPB。对比图5a与图5b可见,试件在拉伸过程中已固化的 HTPB 被拉长后断裂并留下未能弹性恢复的丝状 HTPB,从切片形貌和断面形貌可验证石蜡是被粘合剂体系以网状形式包裹在内,石蜡可保证燃料的强度大小,而黏合剂可提高燃料的断裂伸长率,使得石蜡/HTPB 燃料受到一定的载荷作用时,仍能保持完整的结构。



a. before test of H40 b. after test of H40

图5 石蜡/HTPB燃料(H40)断面的扫描电镜图

Fig.5 SEM images of the cross section of paraffin/HTPB fuels (H40)

4 结论

(1)在 20 °C 时,随着 HTPB 质量分数的增加,石蜡/HTPB 燃料的最大抗拉强度和初始弹性模量逐渐减小,而断裂伸长率却逐渐增大,尤其是当 HTPB 质量分数由 20% 增加至 30% 时,燃料的最大抗拉强度由 1.189 MPa 降低为 0.796 MPa,断裂伸长率由 7.02% 升高至 15.25%。

(2)在 40 °C 时,随着 HTPB 质量分数的增加,石蜡/HTPB 燃料的最大抗拉强度和初始弹性模量均逐渐增大,但力学性能始终较常温和低温条件下的差。

(3)随着温度降低,石蜡/HTPB 燃料的最大抗拉强度和初始弹性模量逐渐增大。对于 HTPB 质量分数为 20% 的石蜡/HTPB 燃料,在 -40 °C 时其最大抗拉强度可达到 2.15 MPa,但在 40 °C 环境中最大抗拉强度仅有 0.31 MPa。

(4)在石蜡中添加一定量的 HTPB 形成以 HTPB 为弹性基体、石蜡为填料的石蜡/HTPB 共混体系,在受到外载荷作用时,HTPB 基体发生位错或滑移,但该滑移在基体与填料界面上受到阻滞,使得固体填料产生应力集中,从而提高燃料的力学性能。随着温度升高,石蜡逐渐软化,基体与填料界面上的阻滞逐渐减弱,因此高温条件下燃料的最大抗拉强度和初始弹性模量较小。

参考文献:

- [1] 蔡国飙. 固液混合火箭发动机技术综述与展望[J]. 推进技术, 2012, 33(6): 831-839.
CAI Guo-biao. Development and application of hybrid rocket motor technology: overview and prospect[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(6): 831-839.
- [2] Karabeyoglu M, Cantwell B, Altman D. Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels [C]// Utah: 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City, 2001: AIAA 2001-4503.

- [3] Karabeyoglu A, Zilliac G, Cantwell B J, et al. Scale-up tests of high regression rate paraffin-based hybrid rocket fuels[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2004, 20(6):1037-1045.
- [4] Karabeyoglu M A, G reg Zillia, Paul Castellucci, et al. Development of high burning rate hybrid rocket fuel flight demonstrations [C]// 39th AIAA /ASME /SAE /ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, 2003: AIAA 2003-5196.
- [5] 胡松启, 武冠杰, 刘欢, 等. 含石蜡燃料的能量特性和退移速率测试[J]. 含能材料, 2014, 22(4):498-502.
HU Song-qi, WU Guan-jie, LIU Huan, et al. Energy characteristics and regression rate measurement of paraffin-based fuel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4): 498-502.
- [6] 唐乐, 陈苏杭, 许志伟, 等. 石蜡燃料的燃烧性能与其化学组成的关系[J]. 含能材料, 2017, 25(8): 633-638.
TANG Yue, CHEN Su-hang, XU Zhi-wei, et al. Relationship between combustion characteristics and chemical components of paraffin fuel[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(8): 633-638.
- [7] 谢悦, 宿晓如, 冯春冬, 等. 颗粒增强橡胶复合材料有效力学性能预测分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(7): 142-147.
XIE Yue, SU Xiao-ru, FENG Chun-dong, et al. Prediction of effective mechanical properties of rubber composites reinforced with particles[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(7): 142-147.
- [8] 贺向东, 唐敏, 陆贺建. 固体火箭发动机套管型药柱结构的抗冲击研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(9): 21-25.
HE Xiang-dong, TANG Min, LU He-jian. Research on shock resistance of solid rocket motor's canular solid propellant grains[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(9): 21-25.
- [9] 王哲君, 强洪夫, 王广, 等. 固体推进剂力学性能和本构模型的研究进展[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 403-416.
WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Review on the mechanical properties and constitutive models of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(4): 403-416.
- [10] Maruyama S, Ishiguro T, Shinohara K, et al. Study on mechanical characteristics of paraffin-based fuel [C]//Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2011.
- [11] 汪灵, 王一鸣, 郑夏, 等. 硬脂酸对石蜡熔点及力学性能的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 112-116.
WANG Ling, WANG Yi-ming, ZHENG Xia, et al. Influence of stearic acid on paraffin melting point and it's mechanical properties [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2008, 30(2): 112-116.
- [12] 陈名华, 胡进, 张学民. 用于机械加工石蜡材料的改性研究[J]. 新技术新工艺, 2012, 1(3):51-53.
CHEN Ming-hua, HU Jin, ZHANG Xue-min. Study on modification of paraffin materials for mechanical processing[J]. *New Technology & New Process*, 2012, 1(3): 51-53.
- [13] 张燕. 石蜡钝感剂的增韧改性研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
ZHANG Yan. Study on toughening of paraffin Wax [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [14] Desain J, Brady B, Metzler K, et al. Tensile Tests of Paraffin Wax for Hybrid Rocket Fuel Grains [C]//Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2015.

- [15] 黄辉, 董海山. 一类对撞击不敏感的新型炸药[J]. 含能材料, 2002, 10(2): 74-77.
HUANG Hui, DONG Hai-shang. Studies on new explosives insensitive to impact[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(2): 74-77.
- [16] 张炜, 周星, 鲍桐. 固体推进剂分析测试原理及典型案例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
ZHANG Wei, ZHOU Xing, BAO Tong. Solid propellant analysis test principle and typical case[M]. China National Defence Industry Press, 2016.

Mechanical Property of Paraffin/HTPB Fuel

WANG Yin¹, WANG Fei², HU Song-qi¹, LIU Lin-lin¹, LIU Hui³

(1. *Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*;
2. *Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China*; 3. *Xi'an Aerospace Chemical Propulsion Co. Ltd., Xi'an 710025, China*)

Abstract: To study the effect of mass fraction of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) system and temperature on the mechanical properties of paraffin/HTPB fuels, seven kinds of paraffin/HTPB tensile specimens with different formulations were prepared, and the unidirectional tensile experiments were carried out by an universal materials testing machine at a tensile rate of $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. The variation law of maximum tensile strength, elongation at break and the initial elasticity modulus of the fuel were analyzed. Results show that the fracture elongation of fuel increases with the increase of mass fraction of HTPB system, while the maximum tensile strength and the initial elasticity modulus decrease. When ambient temperature approaches the melting point of $58 \text{ }^\circ\text{C}$ for paraffin, the maximum tensile strength and initial elasticity modulus of the fuel increase with increasing the mass fraction of HTPB. The maximum tensile strength of fuel increases gradually with decreasing the temperature. In which, when the temperature decreases from $20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, the maximum tensile strength of H20 fuel increases from 1.189 MPa to 2.150 MPa . The paraffin /HTPB fuel of HTPB system as matrix and paraffin as filler has mutual block acting force on the interface between its matrix and filler, which can increase the mechanical performance of the fuel.

Key words: hydroxyl-terminated polybutadiene(HTPB); paraffin/HTPB fuels; mechanical property; solid-liquid hybrid motor

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018153

(责编:王艳秀)