DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202506020

不同加载应变率下 HTPB 复合固体推进剂的低温力学性能

赖建伟,常 建,吴寒菁,周 源,袁胜智
(海军工程大学,湖北 武汉 430033)

摘 要:为分析加载应变率对 HTPB 复合固体推进剂低温力学性能的影响,在温度 -50～25 ℃ 及 14～200 mm/min 拉伸速率下开展了固体推进剂的定/变速率单轴拉伸力学性能实验。结果表明,在定速率拉伸下,温度越低,拉伸速率越小,推进剂脱湿现象越严重。推进剂力学性能与温度和应变率具有较强的相关性,最大拉伸强度和弹性模量随应变率增加和温度降低逐渐增大,脱湿应变则相反。低温对推进剂的弹性模量和脱湿应变的影响比应变率的影响更显著,而应变率对最大拉伸强度的影响比温度的影响更显著;在变速率拉伸下,推进剂力学性能对低温更加敏感,最大拉伸强度和最大拉伸应变都随着温度降低而显著下降;在 -40 ℃ 低温下,最大拉伸强度分别从高速率加载时的 1.89 MPa 和 2.18 MPa 降至变速率加载时的 1.47 MPa 和 1.60 MPa,而最大拉伸应变分别从高速率加载时的 61% 和 70% 降至变速率加载时的 51% 和 58%。

关键词:材料力学;固体推进剂;力学性能;加载应变率;HTPB;脱湿
中图分类号:TJ55;V512 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7812(2026)01-0090-07

Low Temperature Mechanical Properties of HTPB Composite Solid Propellant under Different Loading Strain Rates

LAI Jian-wei, CHANG Jian, WU Han-jing, ZHOU Yuan, YUAN Sheng-zhi
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To analyze the influence of loading strain rates on the low temperature mechanical properties of HTPB composite solid propellants, the constant/variable rate uniaxial tensile mechanical property experiments of solid propellant were carried out at -50—25 ℃ and tensile rates of 14—200 mm/min. The results show that under constant rate tension, as the temperature decreases and the tensile rate drops, the dewetting becomes more severe. The mechanical properties of the propellant have a strong correlation with temperature and strain rate. The maximum tensile strength and elastic modulus gradually increase with the increase in strain rate and decrease in temperature, while the dewetting strain shows the opposite trend. The effects of low temperature on the elastic modulus and dewetting strain of the propellant is more significant than that of the strain rate, while the influence of the strain rate on the maximum tensile strength is more significant than that of temperature. Under variable rate tension, the mechanical properties of the propellant are more sensitive to low temperature, and both the maximum tensile strength and the maximum tensile strain decrease significantly with the decrease in temperature. At -40 ℃, the maximum tensile strength decreases from 1.89 MPa and 2.18 MPa at high-rate loading to 1.47 MPa and 1.60 MPa at variable-rate loading, respectively, and the maximum tensile strain decreases from 61% and 71% at high-rate loading to 51% and 58% at variable-rate loading, respectively.

Keywords: material mechanics; solid propellant; mechanical properties; loading strain rates; HTPB; dewetting

收稿日期:2025-06-15; **修回日期**:2025-08-25
基金项目:海军工程大学自主研发项目(No.2023507050)
作者简介:赖建伟(1984-),男,博士。E-mail:1712021022@nue.edu.com
引用本文:赖建伟,常建,吴寒菁,等.不同加载应变率下 HTPB 复合固体推进剂的低温力学性能[J].火炸药学报,2026,49(1):90-96.
LAI Jian-wei, CHANG Jian, WU Han-jing, et al. Low Temperature Mechanical Properties of HTPB Composite Solid Propellant under Different Loading Strain Rates[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao),2026,49(1):90-96.

引　言

随着航天任务的多样化和空间探测活动的不断深入，固体火箭发动机的工作条件越来越苛刻，服役环境温度范围越来越宽，面临低温极端环境的使用要求日益增加，这使得人们对固体火箭发动机的低温性能更加关注[1-5]。固体推进剂作为固体火箭发动机的重要组成，其低温力学性能的优劣直接关系到固体火箭发动机的可靠性和安全性[6,7]。因此，开展固体推进剂的低温力学性能研究具有重要的工程意义。

固体推进剂是一种依赖于环境温度和时间的黏弹性材料，具有强烈的率相关性[8-10]。为探索温度和应变率对固体推进剂力学性能的影响规律，国内外学者开展了大量的理论和实验研究。一方面，考虑推进剂的率相关性从变化加载速率进行研究。王哲君等[11,12]研究了 HTPB 固体推进剂在应变率 0.4～14.14 s^{-1}准静态加载下的单轴拉伸力学性能，通过分析发现固体推进剂的变形性能受到温度和应变率的显著影响。杨龙等[13]开展了 HTPB 推进剂在应变率 0.000 17～2 500 s^{-1}范围内的压缩试验和应变率 0.000 12～80 s^{-1}范围内的拉伸试验，全面考察了固体推进剂的率相关性。吕轩等[14]通过可测试推进剂黏弹性泊松比的单向定速拉伸试验，发现相同温度条件下推进剂泊松比随着拉伸速率的增大而增大，之后泊松比趋近于定值。另一方面，从变化加载方式的角度进行研究。马浩等[15]开展了 −50 ℃环境下推进剂快慢组合拉伸试验，研究了“转换应变”对推进剂极限力学性能的影响，得到了极限力学性能参数随着转换应变的增大呈下降趋势。Kim 等[16]通过在应变为 11% 时改变拉伸速率，进行了 20 ℃常温条件下从低到高拉伸速率(0.05 /min 到 0.5 /min)以及从高到低拉伸速率(0.5 /min 到 0.05 /min)的试验，结果表明力学响应曲线只在拉伸速率改变点处有所变化，其余部分近似遵循原定拉伸速率的响应曲线。目前大部分研究主要集中在固体推进剂的率相关性上，对于变化加载方式下低温、应变率共同作用的研究相对较少。

本研究针对 HTPB 推进剂开展恒定和变化速率两种不同加载方式下低温单向拉伸实验，通过扫描电镜实验，得到固体推进剂的破坏模式，并分析低温、应变率以及加载方式对推进剂力学性能的影响规律。

1　实　验

1.1　样品制备

实验所用固体推进剂材料为 HTPB 复合固体推进剂。其中，固体填充颗粒(AP/Al)质量分数为 84%，黏合剂、键合剂和防老剂等其他组分质量分数为 16%。

根据航天工业标准 QJ 924-1985《复合固体推进剂单向拉伸试验方法》，将推进剂加工制作成标准哑铃型试件，如图 1 所示。试件在设定低温条件下保温 1h，确保试件内外部温度均匀并达到设定温度，而后在带保温箱的拉伸试验机上开展不同条件下的单轴拉伸测试。单轴拉伸试验完毕后，用刀片切取拉伸断面制成 5 mm × 5 mm 试样，镀金后利用 TESCAN 公司 VEGA3 LMH 型扫描电子显微镜对试件断面进行细观观察。

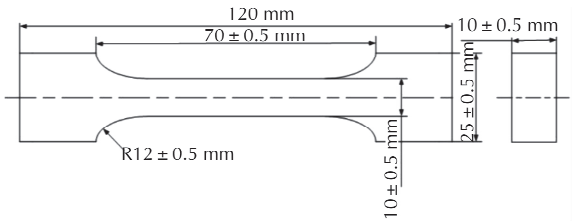


图 1　标准哑铃型试样

Fig. 1　Standard dumbbell-shaped specimen

1.2　定速率拉伸实验

实验温度分别为 25、−10、−20、−30、−40 和 −50 ℃，拉伸速率分别为 14、35、140 和 200 mm/min。

1.3　变速率拉伸实验

实验温度分别为 25、−40 ℃，推进剂试样先以 14 mm/min 的速率拉伸至 22.2% 的应变，再以 100 和 200 mm/min 的速率进行拉伸直至断裂。

2　结果与分析

2.1　实验现象分析

不同条件下推进剂拉伸断面形貌扫描电镜观察图如图 2 所示。

由图 2 可以看出，不同温度和不同拉伸速率条件下推进剂拉伸形貌呈现出显著差别。实验温度为 25 ℃时，拉伸速率为 35 mm/min 条件下推进剂少量颗粒出现脱湿现象，如图 2(a)所示；而拉伸速率为 200 mm/min 条件下推进剂的颗粒表面浸润程度良好，基体连续相与颗粒分散相结合较为完整，没有出现脱湿，如图 2(b)所示。这表明，在常温作用下，推进剂的破坏主要是由基体连续相的撕裂造

成。这是由于推进剂引入键合剂使固体颗粒周围形成高模量层，改善了基体/颗粒界面的粘结力学性能，使界面的粘结力学性能优于基体的力学性能，因而推进剂在外力作用下，微裂纹主要在基体成核，扩展、汇聚并最终宏观断裂。但同时随着拉伸速率的降低，发生在基体处的裂纹有可能向颗粒表面扩展引起部分颗粒出现脱湿。

对比图 2(c)和图 2(d)可以发现，在 −40 ℃低温时，拉伸速率为 35 mm/min 条件下推进剂分散相局部不均匀，相当一部分颗粒出现裸露现象，没有被连续相完全浸润，出现脱湿现象；而拉伸速率为 200 mm/min 条件下推进剂也有部分颗粒出现脱湿。这说明推进剂在低温条件下更容易发生脱湿。

对比图 2(e)和图 2(f)可以发现，在相同变拉伸速率条件下，温度变化也会对推进剂细观结构产生较大影响。常温情况下，推进剂的颗粒表面浸润良好，未出现明显脱湿，而低温 − 40 ℃ 条件下出现明显脱湿。对比图 2(b)和图 2(e)、图 2(d)和图 2(f)可以发现，在相同温度下，其推进剂断口细观形貌变化不明显，加载方式的改变并未对推进剂脱湿情况产生显著影响。

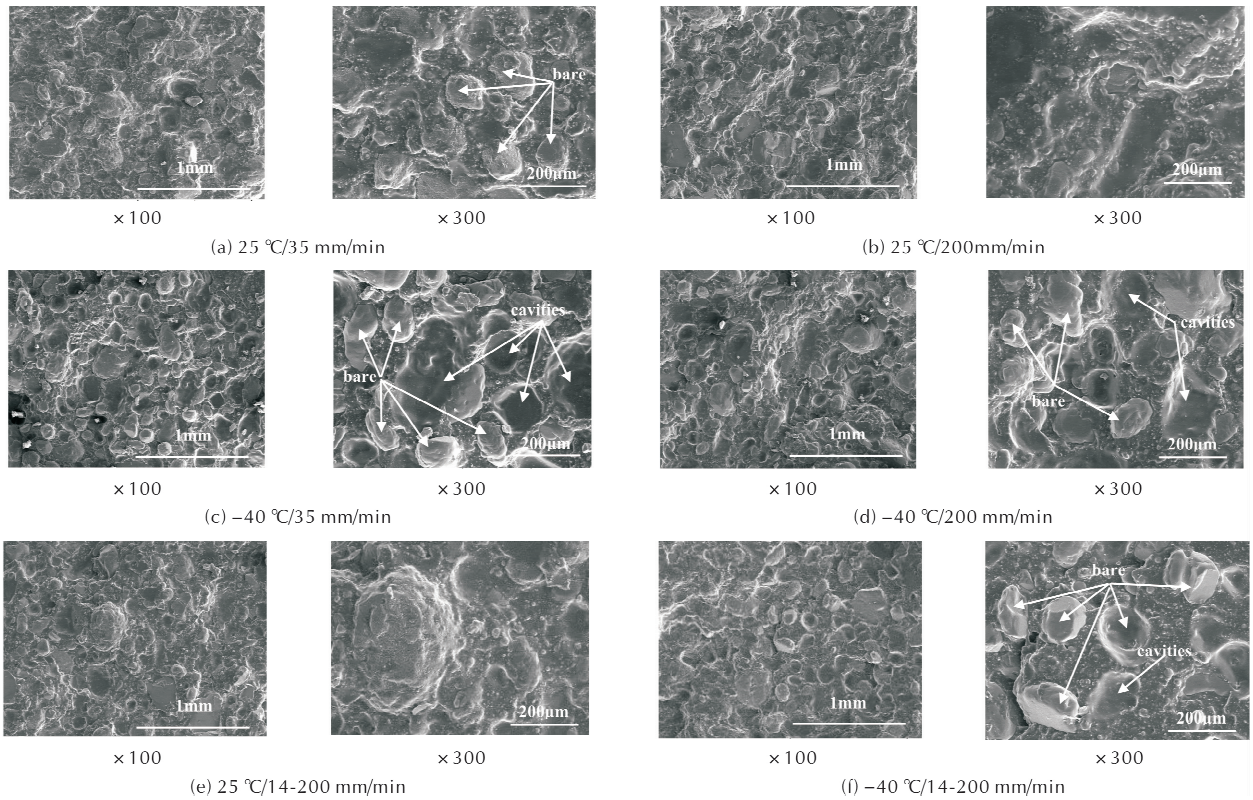
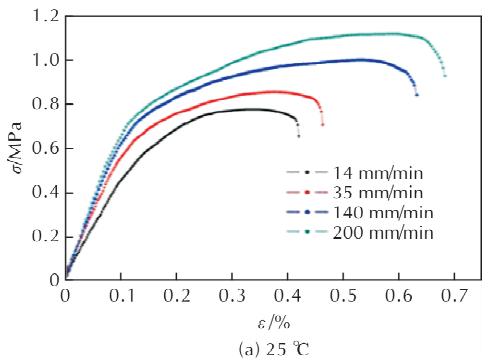


图 2 不同条件下推进剂拉伸断面形貌图

Fig. 2 Tensile fracture surface morphology of propellants under different conditions

2.2 定速率拉伸应力—应变曲线分析

不同温度下固体推进剂定速率单轴拉伸应力—应变曲线如图 3 所示。



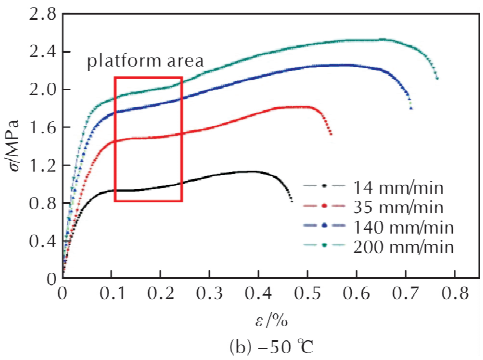


图 3 推进剂定速率拉伸应力—应变曲线

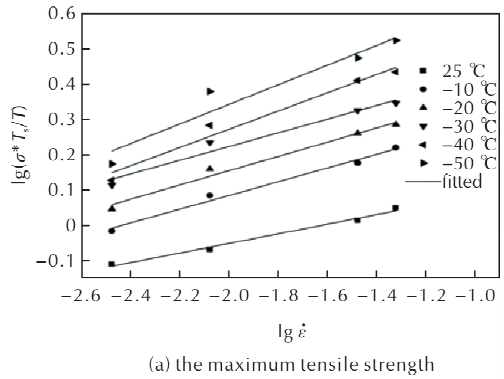
Fig. 3 Stress—strain curves of solid propellants under constant strain rate tensile loading

由图 3 可以看出，推进剂单轴拉伸应力—应变曲线具有显著的温度和应变率效应，随着温度降低和拉伸速率增加，应力逐渐增加。其中，温度为 25 ℃时，应力—应变曲线为典型的逐渐上升曲线。当温度为 −50 ℃时，应力—应变曲线在非线性段中呈现出 25 ℃时没有的“马鞍形”平台区，而且随着拉伸速率越小，平台区越明显。在平台区内，推进剂处于近似理想塑性状态，这是因为此时推进剂内部损伤以脱湿为主，基体与颗粒界面不断丧失承载能力，使得应力随应变增加变化较小。王虎干[2]和王哲君等[11]在研究不同拉伸速率下固体推进低温力学性能时也发现了该平台区，并认为该平台的出现与固体推进剂的脱湿损伤有密切关系。上述曲线从宏观上说明推进剂的力学性能受温度和加载速率影响较大。

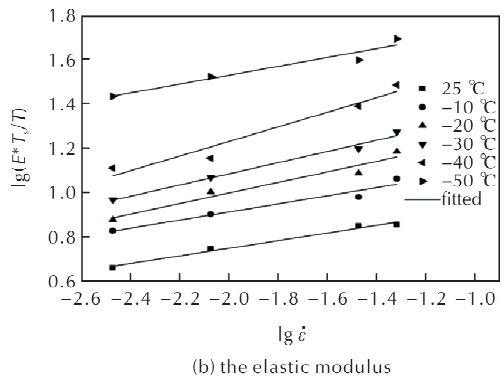
2.3　低温和应变率对力学性能的影响分析

以 25 ℃为参考温度，分别对不同温度和应变率下的最大拉伸强度、弹性模量进行取对数，脱湿应变不作处理，得到固体推进剂的最大拉伸强度、弹性模量和脱湿应变与温度和应变率关系如图 4 所示。

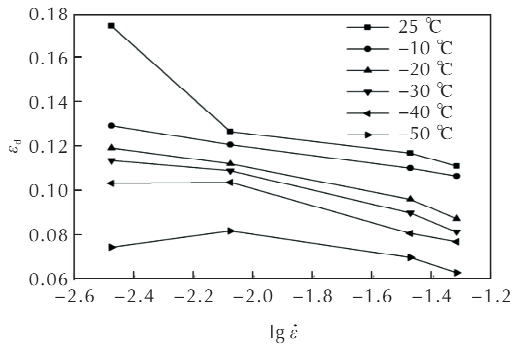
由图 4 可知，最大拉伸强度、弹性模量随着温度的降低和应变率的增加逐渐增加，而且最大拉伸强度和弹性模量的对数与应变率的对数呈线性关系。脱湿应变随着温度的下降和应变率的增加逐渐下降，但是与应变率对数的线性关系不显著。



(a) the maximum tensile strength



(b) the elastic modulus



(c) the dewetting strain

图 4　力学性能随温度和应变率的变化曲线

Fig. 4　Variation of mechanical properties with temperature and strain rate

为了定量衡量温度和应变率对固体推进剂拉伸力学性能的影响，利用双因素方差分析方法，取显著性水平为 0.05，得到方差分析结果的 F 值如表 1 所示，其中 F_{crit} 为 F 统计量的临界值。

表 1　拉伸力学性能双因素方差分析结果

Table 1　The variance analysis results of two-elements on tensile mechanical properties

factors	F-value of the maximum tensile strength	F-value of elastic modulus	F-value of dewetting strain	F_{crit}
temperature	18.342	40.541	3517.209	2.901
strain rate	29.609	13.564	25.003	3.287

从表 1 可以看出，温度和应变率对推进剂拉伸力学性能的 F 值都明显大于 F_{crit}(2.901，3.287)值，这说明温度和应变率对推进剂的最大拉伸强度、弹性模量和脱湿应变具有显著影响。其中，与最大拉伸强度对应的应变率 F(29.609)值要大于温度的F(18.342)值，而与弹性模量和脱湿应变对应的温度 F(40.541，3571.209)值要大于应变率的 F(13.564，25.003)值，这反映出温度对推进剂的弹性模量和脱湿应变的影响比应变率的影响更显著，而应变率对最大拉伸强度的影响比温度的影响更显著。主要原因有：(1)由于弹性模量由线弹性段得到，通常认为该段没有损伤发生，其数值主要由不同温度下的材料特性决定，温度越低推进剂模量越大，因此温度对模量影响比应变率影响大。(2)由图 2 分析可知，低温使推进剂内部出现明显的脱湿损伤，而应变率变化所产生的脱湿影响不够明显，这直接反映了低温比应变率对脱湿应变影响更显著的特点。(3)最大拉伸强度是推进剂内部脱湿和基体断裂损伤综合作用下的破坏结果。低温主要影响脱湿损伤，而应变率会对

两种损伤都有较大影响。特别是由于推进剂材料具有强烈的应变率敏感性，基体裂纹扩展对应变率更加敏感，因此应变率对最大拉伸强度的影响更为显著。

2.4 力学性能主曲线规律分析

固体推进剂在实验的低温和应变率范围内依然具有较好的黏弹性，符合时温等效原理，因而时间—温度移位因子 α_T 服从 W.L.F 方程：

$$\lg\alpha_T=\lg\left(\frac{t}{t_0}\right)=-\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \tag{1}$$

式中：C_1、C_2 为材料常数，通过试验数据拟合来确定；T_0 为参考温度，一般取室温。

由式(1)可知，$t=t_0\cdot\alpha_T$，等式两边分别对 $d\varepsilon$ 求导，整理得到 $\frac{d\varepsilon}{dt_0}=\frac{d\varepsilon}{dt}\alpha_T$，即 $\dot\varepsilon_0=\dot\varepsilon\cdot\alpha_T$。代入式(1)可得：

$$\lg\alpha_T=\lg\left(\frac{\dot\varepsilon_0}{\dot\varepsilon}\right)=-\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \tag{2}$$

式(2)反映了温度—应变率等效关系，移位因子 α_T 与温度和应变率满足如下关系：

$$\alpha_T=\dot\varepsilon(T_0)/\dot\varepsilon(T) \tag{3}$$

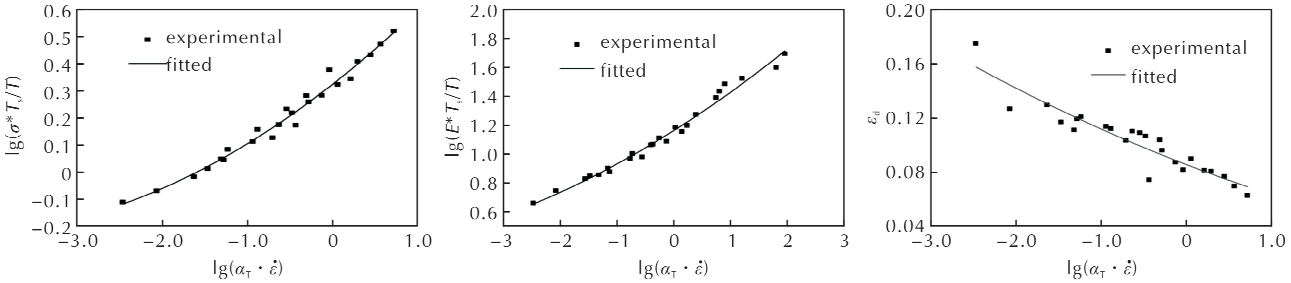
等式两边同取对数，得到：

$$\lg\dot\varepsilon_0(T_0)=\lg\dot\varepsilon(T)+\lg\alpha_T \tag{4}$$

因此，将不同温度下曲线(对应于 $\log\dot\varepsilon(T)$)向左或向右平移 $\lg\alpha_T$ 即可叠加得到某参考温度下的黏弹性特性。移位因子 α_T 的意义可以理解为在参考温度下应变率的相对增大或降低，相当于载荷作用时间的减小或增加。由此可见，时间—温度等效性与应变率—温度等效性的本质是一致的。

根据不同温度和应变率条件下 HTPB 推进剂准静态力学性能试验数据，参照航天工业标准 QJ 2487-93《复合固体推进剂单向拉伸应力松弛模量以及主曲线测定方法》，并结合式(3)和(4)，以 25℃ 为参考温度，得到推进剂的力学性能主曲线如图 5 所示。

由图 5 可知，推进剂的最大拉伸强度和弹性模量主曲线随温度降低和应变率增加逐渐增加，而脱湿应变主曲线呈下降趋势，表明该推进剂在低温、高速拉伸条件下，脱湿应变较小。因此固体发动机应该尽量避免在低温条件下受到冲击、振动等作用，以防止推进剂发生内部损伤，影响力学性能。推进剂拉伸力学性能主曲线拟合关系式如表 2 所示。



(a) Main curve of the maximum tensile strength (b) Main curve of the elastic modulus (c) Main curve of dewetting strain

图 5 推进剂拉伸力学性能主曲线

Fig. 5 Main curve of tensile mechanical properties of propellants

表 2 推进剂拉伸力学性能主曲线拟合关系式

Table 2 Main curve fitting relationships on tensile mechanical properties of propellants

mechanical properties	fitting relationship	R^2
maximum tensile strength	$\lg(\sigma\cdot T_S/T)=1.1665+0.2473\cdot\lg(a_T\cdot\dot\varepsilon)+0.0170\cdot\lg^2(a_T\cdot\dot\varepsilon)$	0.9829
elastic modulus	$\lg(E\cdot T_S/T)=0.3263+0.2453\cdot\lg(a_T\cdot\dot\varepsilon)+0.0269\cdot\lg^2(a_T\cdot\dot\varepsilon)$	0.9788
dewetting strain	$\varepsilon_d=0.0861-0.0240\cdot\lg(a_T\cdot\dot\varepsilon)+0.0020\cdot\lg^2(a_T\cdot\dot\varepsilon)$	0.8576

由表 2 可知，各力学性能主曲线与 $\lg(a_T\cdot\dot\varepsilon)$ 呈二次函数关系，且相关系数较高。力学性能主曲线关系式是在时温等效原理的基础上得到的，包含温度、应变率与力学性能的关系。在相关失效准则和判据的基础上，利用主曲线关系式可对推进剂低温点火破坏进行评判。

2.5 变速率拉伸应力—应变曲线分析

分别进行常温 25℃ 和低温 −40℃ 时的推进剂变速率拉伸实验，推进剂先以 14 mm/min 的速率拉伸至 22.2% 的应变(速率转换点)再以 100 mm/min 和 200 mm/min 的速率进行拉伸直至破坏，得到变速率拉伸和恒定速率拉伸应力—应变曲线如图 6

所示。

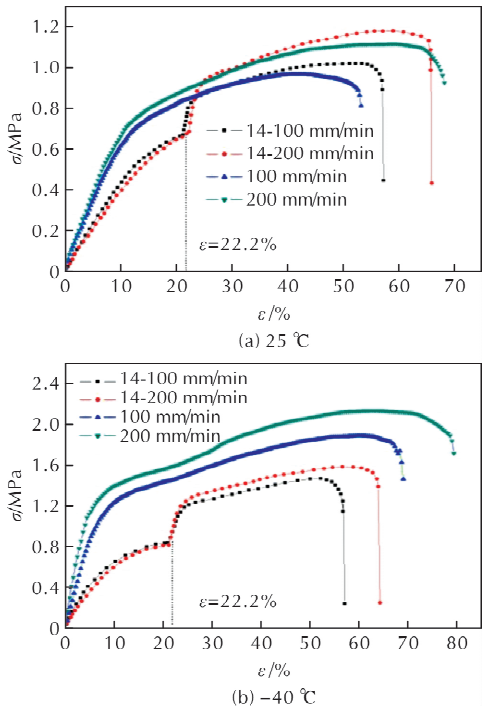


图 6　推进剂变速率拉伸应力—应变曲线

Fig. 6　Stress—strain curves of solid propellants under variable strain rate tensile loadings

常温 25 ℃ 条件下，推进剂变速率拉伸应力—应变曲线变化不明显，应变在 22.2% 之后，变速率拉伸曲线与直接拉伸曲线的趋势大小基本一致，与 Kim 等[15]得到的规律基本一致。低温 −40 ℃ 条件下，推进剂变速率拉伸应力—应变曲线差异显著，应变在 22.2% 之后，拉伸速率发生变化导致变速—拉伸曲线比恒定拉伸曲线的应力要低很多，最大拉伸强度和最大拉伸应变都有较大的下降。而且相比而言，速率转换后拉伸速率越大，其最大拉伸强度下降幅度越大，说明拉伸速率的改变对其性能大小具有显著影响。当应变在 22.2% 之前，变速率拉伸速率 14 mm/min 小于定速率拉伸速率 100、200 mm/min。由图 2 细观观察可知，当拉伸速率较小时，脱湿现象更明显，可能此时推进剂内部积聚了更为严重的脱湿损伤。当应变超过 22.2% 时，在低温和应变率的共同作用下，脱湿破坏进一步加深，从而导致最大拉伸强度和最大拉伸应变出现显著下降。又由于强度受应变率影响更为显著，因此速率转换后拉伸速率越大，其最大拉伸强度下降也越大。

3　结　论

（1）随着温度降低和拉伸速率减小，推进剂的脱湿损伤越严重，其宏观表现为低温条件下推进剂应力—应变曲线在非线性段中出现“马鞍形”的平台区，而且随着温度越低和拉伸速率越小，平台区越明显。

（2）在低温和应变率的共同作用下，推进剂的力学性能呈现出复杂变化规律。低温对推进剂的弹性模量和脱湿应变的影响比应变率的影响更显著，而应变率对最大拉伸强度的影响比温度的影响更显著。

（3）在定速率拉伸下，随着温度的降低和应变率的增加，推进剂最大拉伸强度、弹性模量逐渐增加，脱湿应变逐渐下降。最大拉伸强度和弹性模量的对数与应变率的对数呈线性关系，但脱湿应变与应变率对数的线性关系不显著。推进剂的强度和模量主曲线随温度降低和应变率增加逐渐增加，而脱湿应变主曲线呈下降趋势。

（4）常温变速率加载时，加载速率变化对推进剂力学性能影响不明显；低温变速率加载时，由于脱湿破坏加深，推进剂的最大拉伸强度和最大拉伸应变都远小于高速率加载时的值。这说明推进剂在相同载荷下更容易发生低温破坏，因此变拉伸速率的推进剂低温力学性能问题需要关注。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1]　赖建伟 常新龙，王朝霞，等. 固体推进剂低温力学性能研究进展[J]. 火炸药学报，2013，36(2)：1-8.
LAI Jian-wei，CHANG Xin-long，WANG Chao-xia，et al. Progress of study on low temperature mechanical properties of solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*)，2013，36(2)：1-8.

[2]　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.
WANG Hu-gan. Mechanical properties of HTPB solid propellants with different strain rate at low temperature [J]. *Journal of Projectiles*，*Rockets*，*Missiles and Guidance*，2018，38(6)：12-14.

[3]　刘新国. 低温单轴拉伸下 HTPB 推进剂脱湿力学行为研究[D]. 西安：西北工业大学，2019.
LIU Xin-guo. Research on dewetting mechanical behaviors of HTPB propellant at low temperatures under uniaxial tension loading [D]. Xi′an：Northwestern Polytechnical University，2019.

[4]　王冉，武毅，白龙，等. 宽温域宽应变率下丁羟四组

元 HTPB 推进剂单轴压缩力学行为[J]. 含能材料，2024，32(2)：183-192.
WANG Ran，WU Yi，BAI Long，et al. Uniaxial compressive mechanical behavior of fourcomponent HTPB propellant under wide temperature and strain rate range[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*，2024，32(2)：183-192.

[5] 马思瑜，钱建国，黄洪勇，等. 适应超低温环境的 HTPB 推进剂试验研究[J]. 火炸药学报，2025，48(4)：392-398.
MA Si-yu，QIAN Jian-guo，HUANG Hong-yong，et al. Experimental study on HTPB propellant adapted to ultra-low temperature environments [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*)，2025，48(4)：392-398.

[6] 宋仕雄，史宏斌，刘中兵，等. 低温状态点火瞬间固体发动机药柱结构响应分析[J]. 固体火箭技术，2018，41(3)：278-283.
SONG Shi-xiong，SHI Hong-bing，LIU Zhong-bing，et al. Structural analysis of solid rocket motor grain at ignition transient under low temperature [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*，2018，41(3)：278-283.

[7] 王佳奇，贺绍飞，申志彬，等 低温点火条件下药柱结构完整性分析与试验[J]. 固体火箭技术，2019，42(3)：356-360.
WANG Jia-qi，HE Shao-fei，SHEN Zhi-bin，et al. Analysis and experiment on grain structural integrity under low temperature ignition [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*，2019，42(3)：356-360.

[8] 朱国翠，袁申，刘长义，等. HTPE/AP/AL/RDX 推进剂的准静态拉伸力学性能[J]. 火炸药学报，2021，44(5)：686-692.
ZHU Guo-cui，YUAN Shen，LIU Cang-yi，et al. Mechanical properties of quasi-static stretch of HTPE/AP/AL/RDX propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*)，2021，44(5)：686-692.

[9] 刘远祥，胡少青，张亚俊. 不同拉伸速率下改性双基推进剂的力学特性[J]. 推进技术，2022，43(1)：200757.
LIU Yuan-xiang，HU Shao-qing，ZHANG Ya-jun，et al. Mechanical properties of modified double-base propellant under different tensile rates [J]. *Journal of Propulsion Technology*，2022，43(1)：200757.

[10] 吴成丰，胡少青，卢莹莹，等. 应变率对高固含量 HTPB 推进剂力学特性与破坏机制的影响[J]. 火炸药学报，2024，47(7)：656-664.
WU Cheng-feng，HU Shao-qing，LU Ying-ying，et al. Effect of strain rate on mechanical propertiesand failure mechanisms of HTPB propellant with high solid content[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*)，2024，47(7)：656-664.

[11] 王哲君，强洪夫，王广. 低温高应变率条件下 HTPB 推进剂拉伸力学性能研究[J]. 推进技术，2015，36(9)：1426-1432.
WANG Zhe-jun，QIANG Hong-fu，WANG Guang，et al. Tensile mechanical properties of HTPB propellant at low temperature and high strain rate [J]. *Journal of Propulsion Technology*，2015，36(9)：1426-1432.

[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)：1-9.

[13] 杨龙. CMDB 和 HTPB 推进剂力学行为的应变率相关性及本构模型[D]. 北京：北京理工大学，2016.
YANG Long. Strain-rate dependency and constitutive model of mechanical behaviours of CMDB and HTPB propellant [D]. Beijing：Beijing Institute of Technology，2016.

[14] 吕轩，申志彬，崔辉如. 固体推进剂粘弹性泊松比应变率-温度等效关系[J]. 固体火箭技术，2019，42(3)：322-326.
Lü Xuan，SHEN Zhi-bin，CUI Hui-ru. Viscoelastic Poisson′s ratio strain rate-temperature equivalent relationship of solid propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*，2019，42(3)：322-326.

[15] 马浩，职世君，申志彬，等. HTPB 推进剂“脱湿点”及快慢组合拉伸研究[J]. 固体火箭技术，2017，40(6)：741-745.
MA Hao，ZHI Shi-jun，SHEN Zhi-bin. Study of dewetting points and composite rate tensile for HTPB propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*，2017，40(6)：741-745.

[16] KIM Shin-Hoe，IM Yong-Taek. Experimental study of material behavior of AP-HTPB base composite solid propellant [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*，2019，33(7)：3355-3361.