

极端低温环境下 HTPB 推进剂力学性能试验

孙海涛^{1,2}, 杨庚^{1,2}, 袁杰红^{1,2*}, 申志彬^{1,2}, 霍亮³

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

3. 内蒙动力机械研究所, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:为研究固体推进剂在极端低温环境下的力学性能和失效机制,采用自研的宽温-围压加载试验系统,开展了三组元端羟基聚丁二烯推进剂在不同温度、围压值以及高应变率条件下的单轴拉伸试验,并对断面形貌进行了电镜扫描观测,分析了温度、拉伸速率及围压值对推进剂力学性能影响规律,探讨了推进剂在不同工况下的损伤破坏机理。结果表明:拉伸速率增大、围压值增大及温度降低时,推进剂脱湿点伸长率降低,脱湿点前移,推进剂内部发生脱湿存在围压和应变率阈值,超过该阈值时,推进剂更易发生脱湿行为。低温状态下,推进剂最大伸长率对高拉伸速率变化更为敏感,其最大抗拉强度和最大伸长率均随着围压值的增大而呈增大趋势,在-55℃、10 MPa、4 200 mm/min 极端拉伸工况下最大伸长率为28.8%,仍具有良好的力学性能。该推进剂破坏形式随着温度的降低和拉伸速率的提高,表现为脱湿损伤、基体断裂和颗粒开裂三种模式综合作用。

关键词:端羟基聚丁二烯推进剂;力学性能;极端低温;围压

中图分类号:V435 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-023-08



论
文
拓
展

Mechanical properties experiment of HTPB propellant under extreme temperature

SUN Haitao^{1,2}, YANG Geng^{1,2}, YUAN Jiehong^{1,2*}, SHEN Zhibin^{1,2}, HUO Liang³

(1. School of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China;

3. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute, Huhhot 010010, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and failure mechanism of the solid propellant under extreme low temperature environment, the uniaxial tensile test of a three-component butyl hydroxyl propellant was carried out under different temperatures, wide range of superimposed pressure values and high strain rate conditions by adopting the self-developed wide-temperature-superimposed pressure loading test system, and the fracture morphology was observed by electron microscope scanning. The effect of temperature, tensile rate and peripheral pressure value on the mechanical properties of the propellant was analysed, and the damage mechanism of the propellant under different working conditions was discussed. Results show that when the tensile rate increases, the superimposed pressure increases and the temperature decreases, the elongation of the dewetting point of the propellant decreases, the dewetting point moves forward, and dewetting occurs inside the propellant. There are superimposed pressure and strain rate thresholds, above which the propellant is more prone to dewetting behaviour. At low temperature, the maximum elongation of propellant is more sensitive to the change of high tensile rate, and its maximum tensile strength and maximum elongation both tend to increase with the increase of the value of the peripheral pressure, and the maximum elongation is 28.8% under the extreme tensile condition of -55℃, 10 MPa, and 4 200 mm/min. The failure mode of the propellant is affected by a combination of dewetting damage, matrix fracture, and particle cracking, as the temperature decreases and the tensile rate increases.

Keywords: hydroxyl-terminated polybutadiene tripropellant; mechanical properties; extreme low temperatures; superimposed pressure

收稿日期:2024-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12372203);湖南省杰出青年基金资助项目(2021JJ10046)

第一作者:孙海涛(1985—),男,河南周口人,副教授,博士,E-mail:sunhaitao319@nudt.edu.cn

*通信作者:袁杰红(1965—),男,湖南长沙人,教授,博士,硕士生导师,E-mail:yuanjiahong@126.com

引用格式:孙海涛,杨庚,袁杰红,等. 极端低温环境下 HTPB 推进剂力学性能试验[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 23-30.

Citation: SUN H T, YANG G, YUAN J H, et al. Mechanical properties experiment of HTPB propellant under extreme temperature [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 23-30.

高空机载固体发动机,因任务复杂、使用环境恶劣,其工作环境温度已下探至 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于固体推进剂而言,该温度已属于极端低温。温度越低,越接近推进剂的玻璃化温度,推进剂力学性能下降越明显,越易导致发动机药柱结构完整性失效。在点火发射期间,发动机药柱的环向处于拉伸状态且燃烧室内处于围压环境中,采用常温常压条件下的完整性判据去评估低温点火工况的药柱结构完整性,不能完全反映真实的受力状态。鉴于此,研究低温、围压和高应变率条件下固体推进剂的力学性能具有重要意义。

针对推进剂在低温围压状态下的力学性能, Traissac 等^[1]研究了端羟基聚丁二烯(hydroxyl-terminated polybutadiene, HTPB)推进剂在宽温范围内、应变率小于 $1\ 000\ \text{mm}/\text{min}$ 条件下的力学性能,指出增大围压值会显著增大推进剂断裂伸长率和断裂强度。Bihari 等^[2]研究得到常温下围压对推进剂性能的影响存在一个阈值,超过该值时,增大围压值对推进剂性能影响程度减弱。赖建伟等^[3]开展了不同低温和应变率下推进剂的单轴压缩试验,结果表明温度主要影响推进剂压缩模量,拉伸速率主要影响压缩强度。在此基础上,张晓军等^[4]对比了推进剂低温拉伸及压缩性能差异,发现低温会显著影响推进剂拉压模量。王哲君等^[5]、冯伟杰等^[6]、申志彬等^[7],结合低温单轴拉伸试验和断口扫描试验,发现温度越低,推进剂损伤越严重。张继业等^[8]研究了围压及拉伸速率对 N15 推进剂力学性能的影响规律,建立了适用于点火工况下的推进剂本构模型。赵敏等^[9]研究了温度及拉伸速率对硝酸酯增塑聚醚(nitrate ester plasticized polyether, NEPE)推进剂力学性能的影响规律,发现高温和慢拉、低温和快拉的“耦合”作用,均加剧了推进剂内部损伤的发生。Li 等^[10-12]则研究了低温、围压条件下 NEPE 推进剂力学性能,并建立了考虑围压效应与应变率效应的本构模型。国内外的相关研究,温度范围主要集中在 $-50\sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间^[13-16],而机载固体发动机随机挂载飞行时,飞行高度可达万米高空,按照相关大气标准,其工作温度已下探至极端低温 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$,而极端低温条件下固体推进剂力学性能的研究工作鲜有公开发表。

本文针对固体推进剂极端低温工作环境,开展了三组元 HTPB 推进剂在不同温度、宽泛围压值以及高应变率条件下的单轴拉伸试验,分析温度、拉伸速率及围压值对推进剂力学性能的影响

规律,并通过对拉伸断口进行电镜扫描,进一步分析了推进剂在不同载荷工况下的破坏机理。研究成果可为机载固体火箭发动机低温环境适应性评估和药柱结构完整性分析提供参考。

1 试样及试验方案

1.1 试样

试验采用三组元 HTPB 推进剂,即铝(Al)、高氯酸铵(ammonium perchlorate, AP)、HTPB,其质量分数分别为 18.5% 、 69.5% 、 12% ,试验件按照 GJB 770B—2005《火药试验方法》(方法 413.1)中 B 型改良试样制作。具体尺寸:长度 $120\ \text{mm}$,工程标距 $(70\pm 0.5)\ \text{mm}$,厚度 $(8\pm 0.5)\ \text{mm}$,宽度为 $(8\pm 0.5)\ \text{mm}$,具体构型如图 1 所示。

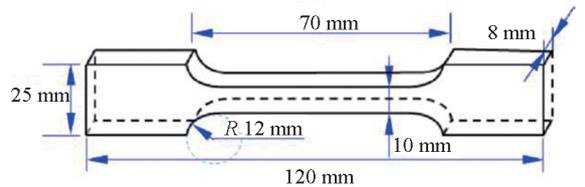


图 1 推进剂试样

Fig. 1 Propellant specimen

1.2 试验方案设计

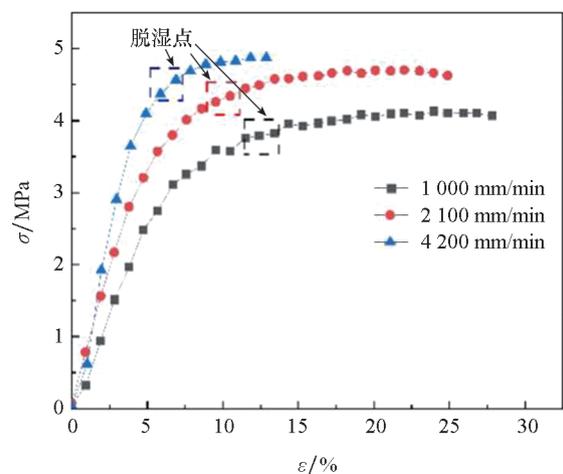
1) 单轴拉伸试验。温度、围压及应变率是影响固体推进剂力学性能的主要因素,为研究其影响规律,设计 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个温度点, $1\ 000\ \text{mm}/\text{min}$ 、 $2\ 100\ \text{mm}/\text{min}$ 和 $4\ 200\ \text{mm}/\text{min}$ 三个较高拉伸速率, $3\ \text{MPa}$ 、 $6\ \text{MPa}$ 、 $10\ \text{MPa}$ 三个围压值,共计 27 种组合工况进行单轴拉伸试验。为保证试验结果的可靠性和试样内部温度均匀,每种工况取 4 个平行试样,并于试验开始前将试样在温箱中保温 1 h,压强稳定 2 min 后开始试验,试验结果选取性能曲线一致性较好的试样,并对其进行均值处理,保证试验结果的可靠性。试验设备采用团队自主研发的宽温-围压加载试验系统,主要模块包括围压试验罐和高低温试验箱等。

2) 电镜扫描试验。为分析不同工况下固体推进剂的破坏机理,将断口切取片状后用扫描电镜进行形貌观测。

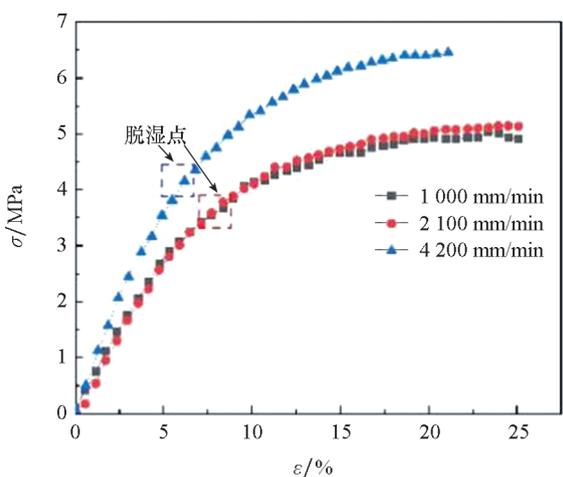
2 试验结果与分析

2.1 围压与拉伸速率耦合影响

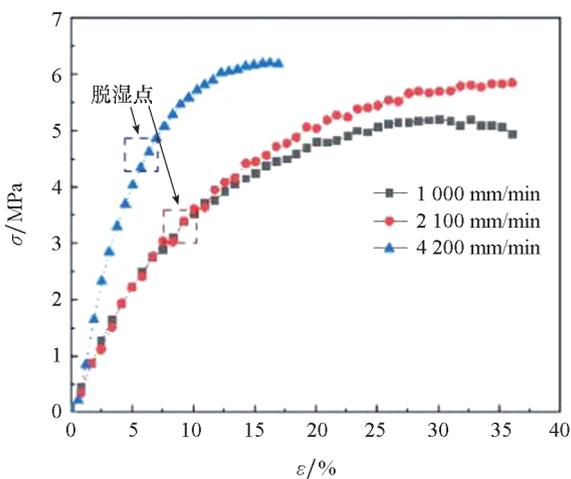
图 2 为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同围压和拉伸速率下推进剂单轴拉伸应力-应变曲线。



(a) $P = 3 \text{ MPa}$



(b) $P = 6 \text{ MPa}$



(c) $P = 10 \text{ MPa}$

图 2 $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 不同围压和拉伸速率对推进剂应力 - 应变曲线的影响

Fig. 2 Effect of tensile rate on the stress-strain curve of propellant at different circumferential pressures at $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$

HTPB 推进剂属于黏弹性材料,在其拉伸过程中,常伴有脱湿现象,如图 2(a) 所示。脱湿产生的原因是推进剂基体与固体填料 AP 颗粒之

间的化学键或者物理吸附在外力拉伸作用下被拉开,常伴随有推进剂试样表面变白,本文选取应力 - 应变曲线斜率变化最大处为脱湿点。图 2(a) 表明,3 MPa 围压环境下固体推进剂产生了明显的脱湿现象,并且脱湿点强度随拉伸速率的增大而提高,脱湿点伸长率则随拉伸速率的增大而降低。原因在于,拉伸速率越高,推进剂内部裂纹扩展速率越大,裂纹沿强度较低的基体 - 颗粒界面迅速扩展,部分界面脱湿后出现颗粒破碎,并且由于基体材料的黏弹性,在高应变速率载荷下材料的模量高,界面应力集中增大,因此表现为拉伸速率增大,脱湿点前移,脱湿点强度提高。

不同拉伸速率对脱湿点伸长率影响曲线如图 3 所示。结合图 2 与图 3 可知,脱湿点伸长率随围压值的增大而减小,即脱湿点呈前移趋势。这与文献[15]中围压条件会抑制 HTPB 推进剂的脱湿以及提高脱湿点伸长率的现象不完全相同。推进剂属于颗粒增强复合材料,当其承受外力作用时,基体通过基体 - 颗粒界面将载荷传递给推进剂中铝粉和高锰酸钾等颗粒,载荷传递机制会阻碍和延缓裂纹扩展^[16]。本文研究对象为三组元 HTPB 推进剂,其固体颗粒含量高,结构本身对界面脱湿的延缓效应较强。当围压值较低时,围压对界面脱湿的抑制效应不够明显。当围压超过特定阈值后,此种抑制脱湿的效应才显现出来。在高围压工况下,同样存在拉伸速率越高脱湿点伸长率越低的现象。结合图 2(b) ~ (c) 可知,在围压达到 6 MPa 后,拉伸速率 1 000 mm/min 和 2 100 mm/min 的应力 - 应变曲线几乎吻合,但拉伸速率为 4 200 mm/min 时,脱

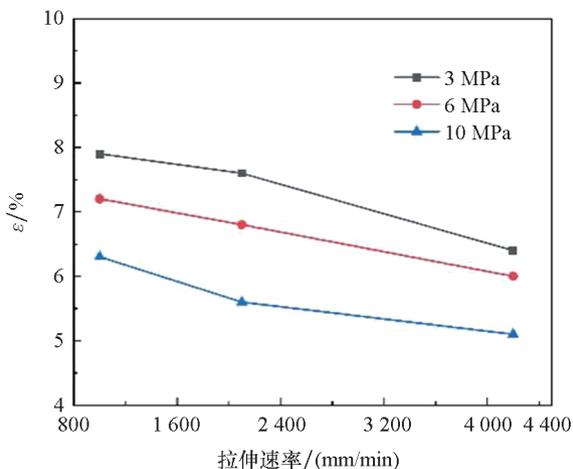


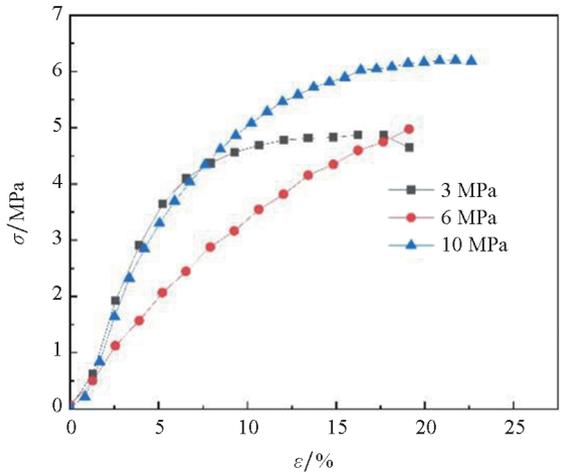
图 3 不同拉伸速率对脱湿点伸长率影响

Fig. 3 Effect of different stretching rates on elongation at the dewetting point

湿点明显前移,表明高围压状态下,拉伸速率也存在特定阈值,在超过该阈值时,拉伸速率的变化会显著影响推进剂的脱湿。

在推进剂单轴拉伸应力-应变曲线中,除脱湿点外,推进剂最大抗拉强度及最大伸长率随拉伸条件的变化趋势也不可忽视,图 4 为不同拉伸速率下围压对推进剂应力-应变曲线的影响情况,图 5 为不同围压值对推进剂力学性能的影响情况。

由图 4 和图 5 可知, -55 °C 测试环境下,最大抗拉强度和最大伸长率均随着围压值的增大而呈增大趋势。这与文献 [15] 中低温环境 HTPB 推进剂最大伸长率随着围压值升高急剧下降的现象不同,由于本试验采用的新型推进剂 AP 含量更高,结合上文中本型推进剂围压与拉伸速率均存在一个阈值抑制推进剂脱湿现象,即抑制推进剂发生损伤,在 -55 °C、10 MPa、4 200 mm/min 极端拉伸工况下最大伸长率为 28.8%,说明本推进剂在低温、高围压、高应变率情况下仍能保持良好的力学性能,进而适应低



(c) $v = 4\ 200\ \text{mm/min}$

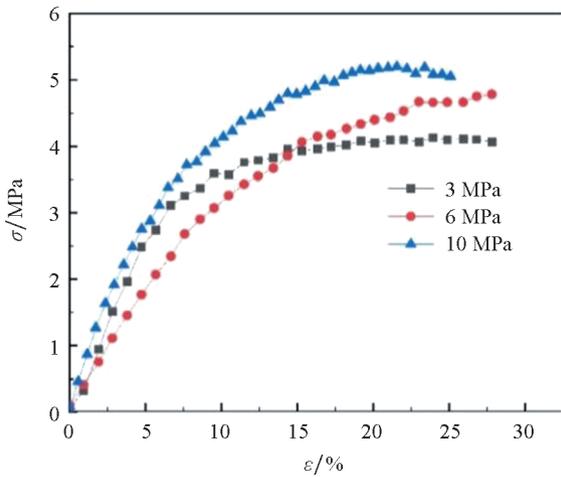
图 4 -55 °C 不同拉伸速率下围压对推进剂应力-应变曲线的影响

Fig.4 Effect of peripheral pressure on propellant stress-strain curves at different stretching rates at -55 °C

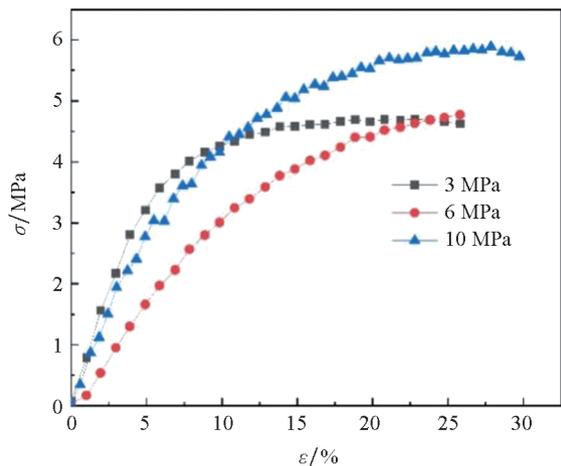
温点火工况。国内外在研究低温点火工况时,药柱结构完整性评估判据已逐渐从常温常压最大伸长率转变为低温、高应变率、高围压综合影响下最大伸长率。

2.2 温度与拉伸速率耦合影响

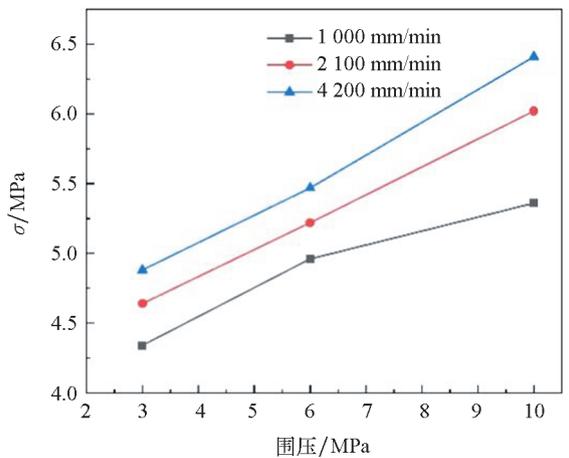
推进剂为典型黏弹性材料,温度越低,其力学性能下降越明显,为了更直观反映温度及拉伸速率对推进剂力学性能的影响,选取推进剂脱湿点伸长率、最大抗拉强度和最大伸长率随温度和拉伸速率变化情况进行分析,由 2.1 节可得围压达到某一阈值后,围压对脱湿性能的影响加剧,为防止围压对本节因素分析产生影响,本节选取 6 MPa 工况下的力学性能进行分析,图 6~8 为围压取 6 MPa 不同拉伸速率下 3 种力学性能参数随



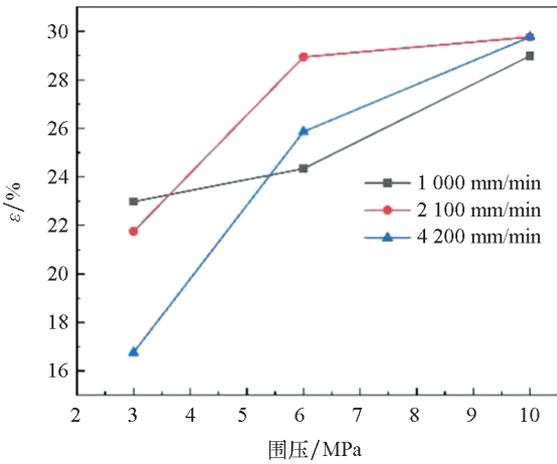
(a) $v = 1\ 000\ \text{mm/min}$



(b) $v = 2\ 100\ \text{mm/min}$



(a) -55 °C 下围压对最大抗拉强度的影响
(a) Effect of superimposed pressure on maximum tensile strength at -55 °C



(b) -55 °C 下围压对最大伸长率的影响
 (b) Effect of superimposed pressure on maximum elongation at -55 °C

图 5 围压对推进剂力学性能的影响
 Fig. 5 Effect of superimposed pressure on mechanical properties of propellant

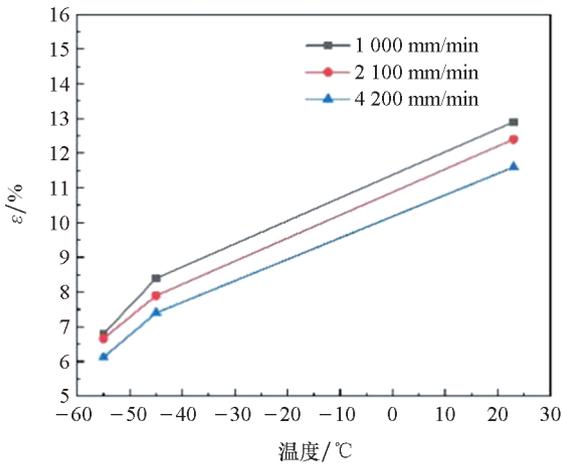


图 6 温度对脱湿点伸长率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on elongation at the dewetting point

温度的变化曲线。

由图 6 可知,温度越低、拉伸速率越快,推进剂脱湿点伸长率越小,脱湿点前移越明显。已有相关文献^[15-18]证实了脱湿点首先发生在推进剂内部大颗粒处,大颗粒处基体-颗粒界面应力较小,而推进剂内部 AP 颗粒粒径大于 Al 颗粒粒径,结合推进剂组分占比可得,AP 颗粒对脱湿性能的影响起主导作用。

由图 7 可以明显看出,不同拉伸速率下最大抗拉强度随温度变化趋势相同,最大抗拉强度随着温度的降低而升高,这是因为温度的降低使得推进剂组分中黏合剂基体强度升高且黏合剂与

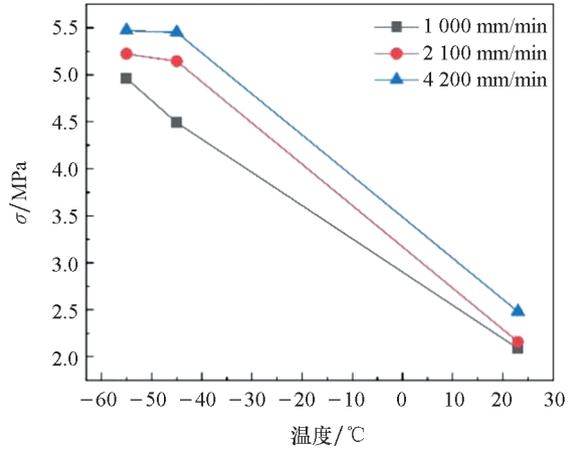


图 7 温度对最大抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of temperature on maximum tensile strength

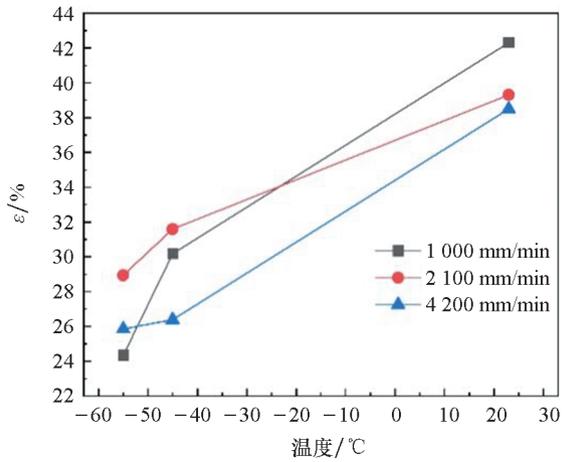


图 8 温度对最大伸长率的影响

Fig. 8 Effect of temperature on maximum elongation

AP 颗粒之间界面作用加强,两者的协同作用下使得最大抗拉强度增大,与文献[17-18]中四组元 HTPB 推进剂低温力学性能现象相似。此外,低温工况下(-45 °C、-55 °C),拉伸速率从 4 200 mm/min 到 2 100 mm/min 最大抗拉强度的降低幅度明显低于拉伸速率从 2 100 mm/min 到 1 000 mm/min,而在常温下规律相反,这说明低温状态下,推进剂对高拉伸速率的变化更为敏感。

由图 8 可见,在三种拉伸速率条件下推进剂最大伸长率随着温度的降低而减小,而在不同温度环境下,最大伸长率变化趋势呈现明显的分散性。23 °C 环境下,最大伸长率随着拉伸速率的增大而降低;-45 °C 环境下最大伸长率随着拉伸速率的增大先升高后降低;-55 °C 环境下,最大伸长率随着拉伸速率的增大先升高后降低。这表明低温和高拉伸速率的耦合作用会显著影响推进剂

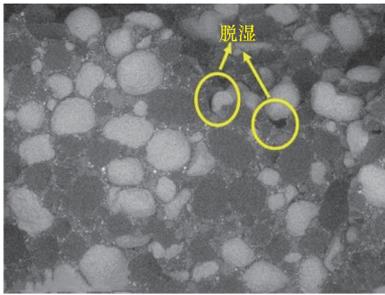
损伤模式,常见推进剂损伤模式有脱湿损伤、基体断裂和颗粒破损三种。由于低温高应变率工况下是三种模式的综合作用,因此耦合作用下推进剂的损伤机理亟待进一步研究。

2.3 电镜扫描结果分析

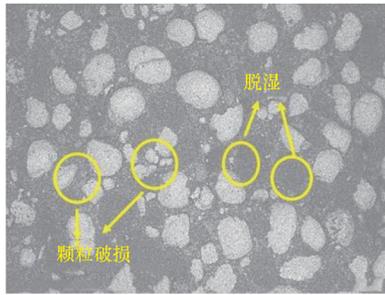
为探究推进剂在不同拉伸工况下的破坏机制,开展了电镜扫描试验。图 9 为不同拉伸工况下推进剂的断口形貌。由图 9(a) ~ (c) 可以看出,在常温拉伸工况下,推进剂拉伸断口有明显的 AP 颗粒和颗粒脱湿后产生的凹坑,围压在 3 MPa 时,AP 颗粒表面光滑且未发现破碎颗粒,损伤方式主要为脱湿损伤。随着围压值的增大,凹坑减少,表明围压对推进剂脱湿现象有抑

制作用;颗粒破碎现象逐渐明显,表明常温高围压状态下推进剂的损伤破坏形式主要有脱湿损伤和颗粒破损。

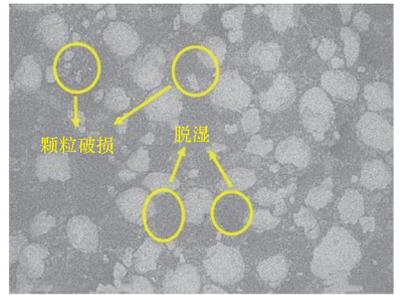
图 9(d) ~ (i) 为低温 -55 °C 条件下推进剂在不同围压值和拉伸速率下的断口形貌,损伤破坏形式表现为脱湿损伤、基体断裂和颗粒破损三种模式综合作用。随着围压值和拉伸速率的增加,断面 AP 颗粒破损量显著增多。这是因为低温会增大推进剂基体模量,基体与 AP 颗粒界面应力增加,从而不易发生脱湿现象。当 AP 颗粒所受拉伸应力增大时,会导致颗粒发生破损,进而使得低温、高围压、高拉伸速率条件下推进剂损伤和破坏形式更为复杂。



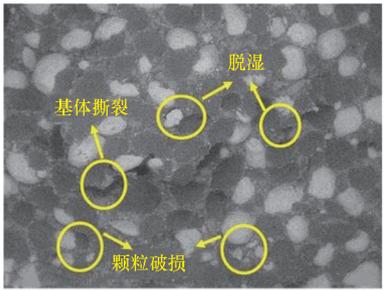
(a) 23 °C ,3 MPa,1 000 mm/min



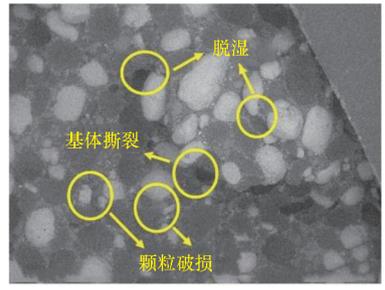
(b) 23 °C ,6 MPa,1 000 mm/min



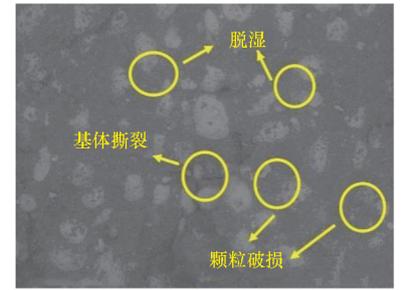
(c) 23 °C ,10 MPa,1 000 mm/min



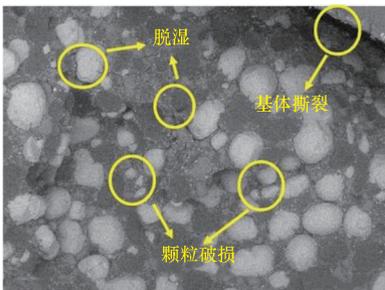
(d) -55 °C ,3 MPa,1 000 mm/min



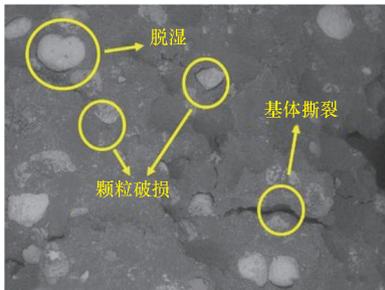
(e) -55 °C ,6 MPa,1 000 mm/min



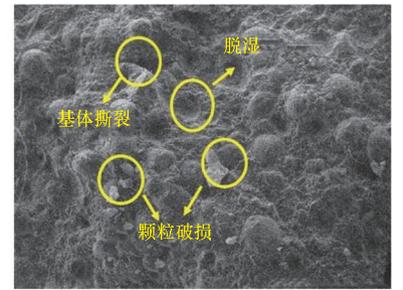
(f) -55 °C ,10 MPa,1 000 mm/min



(g) -55 °C ,3 MPa,4 200 mm/min



(h) -55 °C ,6 MPa,4 200 mm/min



(i) -55 °C ,10 MPa,4 200 mm/min

图 9 不同工况下推进剂的断口形貌

Fig.9 Propellant fracture morphology under different working conditions

3 结论

本文基于宽温-围压加载试验系统,通过开展不同温度、围压及拉伸速率下三组元HTPB推进剂单轴拉伸试验来研究三种因素耦合作用对推进剂力学性能的影响,并基于电镜扫描试验,分析了极限低温状态下推进剂的破坏机理,得到以下结论:

1) 拉伸速率增大、围压值增大及温度降低时,推进剂脱湿点伸长率降低,脱湿点呈前移趋势。推进剂内部发生脱湿存在围压和应变率阈值,超过该阈值时,推进剂更易出现脱湿现象。

2) 低温状态下,最大抗拉强度和最大伸长率均随着围压值的增大而呈增大趋势,在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 10 MPa 、 $4\text{ }200\text{ mm/min}$ 极端拉伸工况下最大伸长率为 28.8% ,说明本推进剂在极端环境下仍能保持良好的力学性能,进而更适应机载发动机低温点火工况。

3) 相同拉伸速率下,最大抗拉强度随着温度的降低而升高,最大伸长率随着温度的降低而减小。低温状态下,推进剂对高拉伸速率的变化更为敏感。

4) 常温高围压状态下推进剂的破坏形式主要由脱湿损伤和颗粒破损组成,随着温度的降低及拉伸速率的提高,推进剂破坏形式表现为脱湿损伤、基体断裂和颗粒破损三种模式综合作用。

参考文献 (References)

- [1] TRAISSAC Y, NINOUS J, NEVIERE R, et al. Mechanical behavior of a solid composite propellant during motor ignition[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1995, 68(1): 146-157.
- [2] BIHARI B K, KUMARASWAMY A, JAIN M, et al. Effect of pressure on mechanical properties of composite propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(5): 799-805.
- [3] 赖建伟,常新龙,龙兵,等. 低温和应变率对HTPB推进剂压缩力学性能影响[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(6): 792-794, 798.
LAI J W, CHANG X L, LONG B, et al. Effects of low temperature and strain rate on compressive mechanical properties of HTPB propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(6): 792-794, 798. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHANG X J, CHANG X L, LAI J W, et al. Comparative research of tensile and compressive mechanical properties of

- HTPB propellant at low temperature[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(6): 771-774. (in Chinese)
- [5] 王哲君,强洪夫,王广,等. 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 Z J, QIANG H F, WANG G, 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. (in Chinese)
- [6] 冯伟杰,强洪夫,王学仁,等. HTPB推进剂/衬层单轴拉伸及损伤特性试验研究[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(4): 478-484.
FENG W J, QIANG H F, WANG X R, et al. Experimental study of uniaxial tensile and damage characteristics of HTPB propellant/liner[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2024, 47(4): 478-484. (in Chinese)
- [7] 申志彬,张亮,职世君. 固体推进剂宽温-气体围压试验系统设计与试验[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 340-344.
SHEN Z B, ZHANG L, ZHI S J. Wide temperature range-gas ambient pressure test system and experiments for solid propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 340-344. (in Chinese)
- [8] 张继业,许进升,韩峰,等. 考虑围压效应的N15固体推进剂本构模型[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1335-1344.
ZHANG J Y, XU J S, HAN F, et al. Constitutive model of N15 solid propellant considering confining pressure effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1335-1344. (in Chinese)
- [9] 赵敏,王小英,杨洁,等. 温度和拉伸速率对NEPE推进剂力学性能影响研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2023, 21(4): 64-68.
ZHAO M, WANG X Y, YANG J, et al. Study on influence of temperature and tensile rate on mechanical performance of NEPE propellant[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2023, 21(4): 64-68. (in Chinese)
- [10] LI H, WANG S X, LI M, et al. Experimental research on tensile mechanical properties of NEPE propellant under confining pressure [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(11): 1769-1779.
- [11] LI H, XU J S, CHEN X, et al. Experimental investigation and modeling the compressive behavior of NEPE propellant under confining pressure [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2021, 46(7): 1023-1035.
- [12] LI H, XU J S, LIU J M, et al. Research on the influences of confining pressure and strain rate on NEPE propellant: experimental assessment and constitutive model[J]. Defence Technology, 2021, 17(5): 1764-1774.
- [13] KUMAR N, PATEL B P, RAO V V, et al. Hyperviscoelastic constitutive modelling of solid propellants with damage and compressibility [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(5): 461-471.
- [14] PAN Y, QU W Z, ZHANG S C, et al. A nonlinear ultrasonic method for detection and characterization of dewetting damage

- in solid propellant[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(10): e202200079.
- [15] 张亮, 申志彬, 虞跨海. 围压下固体推进剂的破坏机理分析[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44(6): 6-13.
ZHANG L, SHEN Z B, YU K H. Analysis on the failure mechanism of solid propellant under superimposed pressure[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(6): 6-13. (in Chinese)
- [16] 张镇国, 张宏亮, 侯晓, 等. HTPB 推进剂“脱湿”性能表征及影响因素试验研究[J]. *固体火箭技术*, 2020, 43(3): 265-270.
ZHANG Z G, ZHANG H L, HOU X, et al. Experiment on dewetting performance characterization and influencing factor of HTPB propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(3): 265-270. (in Chinese)
- [17] 李春涛, 李伟, 庞爱民, 等. 丁羟四组元推进剂的宽温围压单向拉伸力学行为[J]. *含能材料*, 2022, 30(8): 793-803.
LI C T, LI W, PANG A M, et al. Uniaxial tensile properties of butadiol quaternary propellant under confining pressure and wide temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(8): 793-803. (in Chinese)
- [18] 李春涛. 测试压强对固体推进剂单向拉伸力学性能影响机理研究[D]. 西安: 航天动力技术研究院, 2022.
LI C T. Study on the influence mechanism of test pressure on uniaxial tensile mechanical properties of solid propellant[D]. Xi'an: Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, 2022. (in Chinese)