

HTPB 推进剂老化性能湿热影响分析

张晓军, 邢鹏涛, 朱佳佳, 舒慧明

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 掌握 HTPB 推进剂老化过程中, 温度和湿度对其力学性能的影响及贡献程度。**方法** 对 HTPB 推进剂进行不同湿热条件下的加速老化试验, 并测量不同老化时间推进剂的质量损失分数和力学性能, 结合推进剂在温度和湿度下的作用机理, 对质量损失分数随老化时间的变化规律进行分析, 以最大拉伸强度作为性能指标, 对 HTPB 推进剂湿热老化过程进行湿热双因素方差分析。**结果** 湿度对 HTPB 推进剂质量损失分数的影响起主导作用, 在 75%~85%有一个湿度拐点值, 大于或小于这个拐点值, 推进剂遵循不同的质量损失分数变化规律。温度和湿度对推进剂最大抗拉强度方差分析的 F 值均大于其临界值, 影响显著。相比而言, 湿度的影响更加显著, 整个老化过程中, 温度和湿度的影响作用表现出先增加、后下降的趋势。温湿交互作用在试验前期和后期对推进剂的影响不显著, 而在试验中期较为显著, 同样呈现出先增大、后减小的规律。**结论** 湿度对推进剂最大拉伸强度影响的贡献率最大, 温度次之, 交互作用最小。从时间轴上看, 湿度的贡献率表现为单调递增趋势, 温度为单调递减趋势, 交互作用呈现抛物线趋势。

关键词: HTPB; 固体推进剂; 湿热老化; 方差分析

中图分类号: TJ450; V512

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0045-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.008

Analysis of the Effect of Humidity and Heat on Aging Performance of HTPB Propellant

ZHANG Xiao-jun, XING Peng-tao, ZHU Jia-jia, SHU Hui-ming

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This paper aims to grasp the influence and contribution of temperature and humidity on the mechanical properties of HTPB propellants during the aging process. Accelerated aging experiments were carried out on HTPB propellants under different moist heat conditions, and the weight loss percentage and mechanical properties of propellants with different aging times were measured. Combined with the action mechanism of the propellants under temperature and humidity, the change rule of weight loss percentage with aging time was analyzed. The double factor variance analysis for the hygrothermal aging process of HTPB propellant has been carried out by using the maximum tensile strength as the index. The results show that humidity plays a leading role in the influence of the weight loss percentage of HTPB propellants. There is an inflection point value of humidity (between 75% and 85%), greater than or less than this inflection point value, the propellant follows a different weight loss percentage change rules. The F value of temperature and humidity on the analysis of variance of the maximum tensile strength of the propellant is greater than its critical value, which has a significant effect. In comparison, the impact of humidity is more sig-

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-11-22

Received: 2021-10-27; Revised: 2021-11-22

作者简介: 张晓军 (1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为装备可靠性与寿命评估。

Biography: ZHANG Xiao-jun (1979—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: equipment reliability and life assessment.

引文格式: 张晓军, 邢鹏涛, 朱佳佳, 等. HTPB 推进剂老化性能湿热影响分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 045-050.

ZHANG Xiao-jun, XING Peng-tao, ZHU Jia-jia, et al. Analysis of the Effect of Humidity and Heat on Aging Performance of HTPB Propellant [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 045-050.

nificant. The influence of temperature and humidity on the maximum tensile strength of propellant increases first and then decreases during aging. The effect of temperature-humidity interaction on the propellant was not significant in the early and late stages of the test, but it was more significant in the middle of the test, which also showed a law of first increasing and then decreasing. The contribution rate of humidity to the maximum tensile strength of propellant is the largest, followed by temperature, and the interaction is the least. From the time axis, the contribution rate of humidity shows a monotonically increasing trend, while that of temperature decreases monotonically, and the interaction shows a parabolic trend.

KEY WORDS: HTPB; adhesive interface; hygrothermal aging; variance analysis

固体推进剂是固体导弹发动机 (SRM) 能量和工作介质的来源, 其性能尤其是力学性能, 是影响 SRM 结构完整性的重要因素, SRM 的贮存寿命在很大程度上取决于推进剂的老化特性^[1-2]。现阶段, 采用加速老化的方法对固体推进剂贮存性能进行研究时, 加速因素主要考虑温度的影响^[3-4]。随着固体导弹作战使命的扩展和服役环境的扩大, SRM 面临更加恶劣的环境条件, 高温、高湿成为 SRM 典型的贮存使用环境^[5]。高温会加快推进剂组分的氧化分解, 降低其交联密度, 加速其老化进程, 缩短装药结构的寿命和降低其结构完整性和使用安全性^[6]。复合固体推进剂吸湿性强, 即使在环境相对湿度低于 30% 的条件下, 仍能够从空气中吸取水分^[7-8]。水分会削弱推进剂基体/颗粒界面之间的粘接力, 促其发生界面损伤, 严重时表现为“脱湿”, 导致推进剂力学性能显著下降, 影响装药的结构完整性^[9-11]。高温高湿综合环境下, 温度和湿度同时交互作用, 形成对推进剂性能的影响耦合效应, 相比高温或高湿的单一环境因素影响更加严酷^[12-14]。因此, 开展高湿、高温双因素环境条件下推进剂老化性能的影响研究, 对 SRM 装药结构完整性、工作可靠性及贮存寿命评估具有重要价值, 对 SRM 贮存环境条件控制具有重要的指导意义^[15-16]。

本文以 SRM 中广泛应用的 HTPB 推进剂为对象, 对其进行了不同高温高湿条件下的老化试验, 并测试了不同老化时间后推进剂的性能。采用方差分析的方法, 分析了湿度和温度对 HTPB 推进剂性能老化的影响。

1 试验

1.1 推进剂及试验件

所用 HTPB 推进剂由高氯酸铵 (AP)、铝粉、粘合剂、塑化剂、催化剂、防老剂等组成。其中, AP、铝粉、粘合剂的质量分数分别为: 68.5%、18.5%、8.0%, 塑化剂、催化剂、防老剂等助剂总占比为 5%。按照上述配方, 参照航天标准《复合固体推进剂性能测试用试样》^[17], 采用浇铸固化工艺, 首先制作长方体方坯试样, 然后加工成哑铃形试件, 尺寸为 140 mm×48 mm×10 mm。

1.2 湿热加速老化试验

1.2.1 条件

采用温度和湿度双应力条件进行加速老化试验。选取 60、70 °C 两种温度水平和 75%、85% 两种相对湿度水平, 湿热加速试条件取 60 °C/75%、60 °C/85%、70 °C/75%、70 °C/85% 等 4 种温湿度组合。另外, 取 60 °C/65% 温湿度组合作为对比。

取样测试周期根据湿热应力水平和以往加速老化经验确定, 60 °C/75%、60 °C/85%、70 °C/75% 时选取的取样时间点为 1、2、4、8、12、16 d; 70 °C/85% 时选取的取样时间点为 1、2、4、8、12 d; 60 °C/65% 时选取的取样时间点为 2、4、8、12、16 d。

1.2.2 仪器设备

湿热条件通过综合湿热试验箱实现, 选用型号为 SDJ705 的国产设备, 其温度调控范围为 -70~100 °C, 控制偏差为 ±2 °C。相对湿度调控范围为 30%~98%, 控制偏差为 ±3%。

1.2.3 试验程序

湿热加速老化按以下步骤开展:

1) 试验件干燥, 将试验件放置于干燥器中, 温度控制在 20~25 °C, 保存时间 1 d 以上。

2) 运行试验箱, 将试验箱的温度设为规定的温度, 相对湿度设为 30%, 运行至稳定状态。

2) 放置试验件, 将干燥后的试验件放置到试验箱内。

3) 设定湿度条件, 将试验箱湿度调升至规定的湿度, 运行稳定后开始计时。

4) 取样测试, 按照 1.2.1 节确定的取样时间, 进行取样。试验件取出后, 首先在室温环境放置 1~2 h, 确保试验件温度降至环境温度, 然后用于性能测试试验。

1.3 性能测试试验

1.3.1 质量损失分数测试

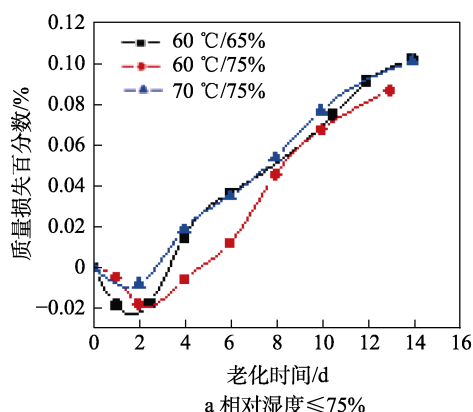
对经过湿热老化后的试件进行质量损失情况测试, 按式 (1) 计算其质量损失分数。本试验采用深圳市君达仪器有限公司生产的 FA2104 型电子分析天平进行测试。

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为质量损失分数; m 为湿热老化后推进剂质量; m_0 为未老化推进剂质量。

1.3.2 力学性能测试

参照航天标准《复合固体推进剂单向拉伸抗拉强度和伸长率主曲线测定方法》^[18]和《复合固体推进剂单轴拉伸试验方法》^[19], 对经过湿热老化的试验件进行拉伸试验, 获取最大抗拉强度等力学性能。试验时, 拉伸速率设置为 100 mm/min, 环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度小于 70%。



2 结果与讨论

2.1 质量损失分数

根据试测得的质量损失分数数据, 可以得到不同湿热老化条件下 HTPB 推进剂质量损失分数随老化时间的关系曲线, 如图 1 所示。质量损失分数的变化反映了推进剂在老化过程中的质量变化, HTPB 推进剂发生质量变化的机制主要有 3 种: 推进剂吸湿而产生的质量增加; 推进剂组分发生分解和降解, 放出气体, 质量减少; 推进剂部分组分发生迁移, 以“晶析”的形式渗出推进剂表面, 导致质量减少。

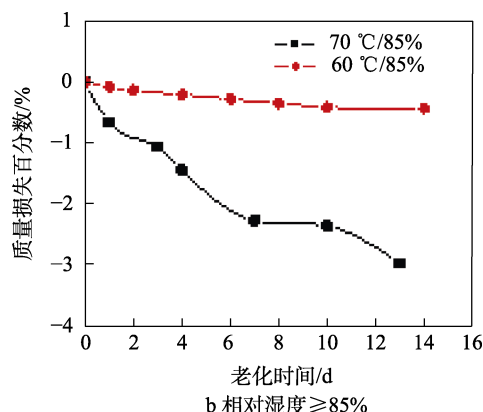


图 1 不同湿热老化条件下推进剂质量损失分数与老化时间的关系曲线

Fig.1 Curves of weight loss percentage and aging time of propellant under different humid and thermal aging conditions: a) relative humidity $\leq 75\%$; b) relative humidity $\geq 85\%$

根据如图 1 推进剂质量损失分数与老化时间曲线关系, 温湿度对推进剂质量损失分数的影响可区分两种情况进行分析。

1) 相对湿度 $\leq 75\%$, 对应 60 °C/75%、60 °C/65%、70 °C/75% 条件, 如图 1a 所示。其推进剂质量损失分数与老化时间曲线明显分为 2 个阶段: 第一阶段, 质量损失分数下降, 说明推进剂质量在增加, 表明推进剂吸湿过程起主导作用, 即引起质量变化的第一种机制起主要作用, 而第二种和第三种机制是次要的。到了第二阶段, 质量损失分数逐渐增加, 这主要是因为推进剂的吸湿达到饱和, 处于湿度相对平衡的状态, 引起质量变化的第一种机制的作用基本停止, 而第二种和第三种机制的作用相对突显, 从而使推进剂质量逐渐下降。在相同湿度条件下, 70 °C 下的质量损失分数明显高于 60 °C 条件下, 其原因是温度越高, 引起质量变化的第二种和第三种机制发挥的作用越大, 导致质量损失增加越显著。

2) 相对湿度 $\geq 85\%$, 对应 60 °C/85% 和 70 °C/85% 两种条件, 如图 1 所示。该条件下推进剂的质量损失分数没有出现相对湿度 $\leq 75\%$ 情况下的第二个阶段, 说明相对湿度 $\geq 85\%$ 情况下一直是吸湿占主导作用。与相对湿度 $\leq 75\%RH$ 情况相似, 相同湿度条件下,

温度越高, 其质量损失分数越大, 但相比相对湿度 $\leq 75\%$ 的情况, 湿度 $\geq 85\%$ 情况下, 温度对质量损失分数的影响更加显著。

文献[20]利用双因素方差分析方法, 分析了温度、湿度及其交互作用对推进剂吸湿率(质量损失的另一描述形式)的影响, 认为湿度对推进剂的吸湿起主导作用。综合以上试验结果和分析, 认为存在一个湿度拐点值, 大于或小于这个拐点值, 推进剂遵循不同的质量损失分数变化规律。

2.2 温湿度双因素方差分析

为定量探讨温度、湿度和温湿度交互作用对 HTPB 推进剂的力学性能的影响情况, 以湿热老化试验所得到的最大抗拉强度为指标, 以温度和湿度为影响因素, 建立双因素方差分析的数学模型^[21]:

$$\left. \begin{aligned} X_{ijk} &= \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \\ (i &= 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, s; k = 1, 2, \dots, t) \\ \sum_{i=1}^r \alpha_i &= 0, \sum_{j=1}^s \beta_j = 0, \sum_{i=1}^r \gamma_{ij} = 0, \sum_{j=1}^s \gamma_{ij} = 0, \\ \varepsilon_{ijk} &\sim N(0, \sigma^2), \text{且所有的 } \varepsilon_{ijk} \text{ 相互独立} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: μ 为最大抗拉强度的理论总均值; α_i 为因

素 A (温度) 的第 i 水平 A_i 对最大抗拉强度测试结果的影响; β_j 为因素 B (湿度) 的第 j 水平 B_j 对最大抗拉强度测试结果的影响; γ_{ij} 为温度 A_i 和湿度 B_j 交互作用对最大抗拉强度测试结果的影响; ε_{ijk} 是水平组合 (A_i, B_j) 下第 k 次重复试验的随机误差。

检验温度、湿度和温湿度交互作用对最大抗拉强度测试结果的影响是否显著, 分别进行如下假设:

$$H_{01}: \alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_r = 0$$

$$H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = \cdots = \beta_s = 0$$

$$H_{03}: \gamma_{ij} = 0, (i=1, 2, \cdots, r, j=1, 2, \cdots, s) \quad (3)$$

如果假设成立, 说明环境因素对试验指标影响显著。

为了对 H_{01} 、 H_{02} 以及 H_{03} 进行检验, 利用平方和分解法, 将试验指标的总误差分解为:

$$S_T = S_e + S_A + S_B + S_{A \times B} \quad (4)$$

记:

$$S_T = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t (X_{ijk} - \bar{X})^2,$$

$$S_e = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t (X_{ijk} - \bar{X}_{ij.})^2, \quad S_A = st \sum_{i=1}^r (\bar{X}_{i..} - \bar{X})^2,$$

$$S_B = rt \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{.j.} - \bar{X})^2,$$

$$S_{A \times B} = t \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{ij.} - \bar{X}_{i..} - \bar{X}_{.j.} + \bar{X})^2 \quad (5)$$

$$\text{式中: } \bar{X} = \frac{1}{rst} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t X_{ijk}, \quad \bar{X}_{ij.} = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t X_{ijk}, \quad \bar{X}_{i..} =$$

$\frac{1}{st} \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t X_{ijk}, \quad \bar{X}_{.j.} = \frac{1}{rt} \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^t X_{ijk}$ 。其中, S_e 为误差平方和; S_A 和 S_B 分别为因素 A 和因素 B 的平方和, $S_{A \times B}$ 为交互作用的平方和。

假设检验统计量为:

当 H_{01} 成立时

$$F_A = \frac{S_A / (r-1)}{S_e / rs(t-1)} \sim F(r-1, rs(t-1)) \quad (6)$$

当 H_{02} 成立时

$$F_B = \frac{S_B / (s-1)}{S_e / rs(t-1)} \sim F(s-1, rs(t-1)) \quad (7)$$

当 H_{03} 成立时

$$F_{A \times B} = \frac{S_{A \times B} / ((r-1)(s-1))}{S_e / rs(t-1)} \sim F((r-1)(s-1), rs(t-1)) \quad (8)$$

因此, 可以用 F_A 、 F_B 和 $F_{A \times B}$ 分别作为 H_{01} 、 H_{02} 和 H_{03} 的检验统计量。对给定显著性水平 α , 检验规则分别为: 当 $F_A > F_{1-\alpha}(r-1, rs(t-1))$ 时, 拒绝 H_{01} , 否则接受 H_{01} ; 当 $F_B > F_{1-\alpha}(s-1, rs(t-1))$ 时, 拒绝 H_{02} , 否则接受 H_{02} ; 当 $F_{A \times B} > F_{1-\alpha}((r-1)(s-1), rs(t-1))$ 时, 拒绝

H_{03} , 否则接受 H_{03} 。 F_A 、 F_B 和 $F_{A \times B}$ 可以根据式(3)和式(6)—(8)计算得到, $F_{1-\alpha}$ 可以查 F 分布表求得。

通过平方和分解, 在获得各个因素平方和与总平方和的基础上, 进一步计算各因素对试验指标变异的贡献率, 对因素的影响重要度进行量化。某一因素贡献率越大, 则表示该项因素对该评价指标的影响程度越高^[22]。

根据上述双因素方差模型, 选取 1.2.1 节中 4 组基本的温湿度环境条件, 老化时间为 1、2、8、12 d 的最大抗拉强度数据 (见表 1) 进行分析处理。取显著水平为 0.05, 则方差分析结果见表 2, 其中 F_{crit} 为 F 统计量的临界值。湿热老化试验中, 各因素对最大抗拉强度的贡献率见表 3。方差分析结果的 F 值、显著水平下的 F_{crit} 和各因素对最大抗拉强度的贡献率用柱形统计图见图 2。

表 1 湿热老化试验的最大抗拉强度数据

Tab.1 Maximum tensile strength data of damp heat aging test MPa

湿热老化 条件	老化时间/d			
	1	2	8	12
60 °C/75%	0.7356	0.6469	0.4438	0.5402
60 °C/85%	0.3823	0.2842	0.2379	0.2533
70 °C/75%	0.5079	0.4265	0.3911	0.4156
70 °C/85%	0.2724	0.2186	0.2021	0.2095

表 2 最大抗拉强度在湿热老化不同天数的方差分析的 F 值
Tab.2 Values of ANOVA for maximum tensile strength at different days of damp heat aging

影响因素	老化天数/d				F_{crit}
	1	2	8	12	
温度因素 A	111.31	91.65	616.33	30.04	5.32
湿度因素 B	630.13	635.80	6440.33	631.75	5.32
交互作用 A×B	5.31	17.47	147.00	1.75	5.32

表 3 温度、湿度及其交互作用对抗拉强度的贡献率

Tab.3 Contribution rate of temperature humidity and their interaction to tensile strength %

影响因素	老化天数/d			
	1	2	8	12
温度因素 A	14.91	12.30	8.56	4.53
湿度因素 B	84.38	85.35	89.40	95.21
交互作用 A×B	0.71	2.35	2.04	0.26

从表 1 和图 2 可以看出, 温度和湿度对推进剂最大抗拉强度方差分析的 F 值均大于其临界值 F_{crit} , 影响显著。相比而言, 湿度的影响更加显著。整个老化过程中, 温度和湿度的影响作用表现出先增加、后下降的趋势。温湿度交互作用在试验初期 (1 d) 和后期 (12 d) 对推进剂的影响不显著, 而在试验中期 (2、8 d) 相对较大, 同样呈现出先增大、后减小的规律。

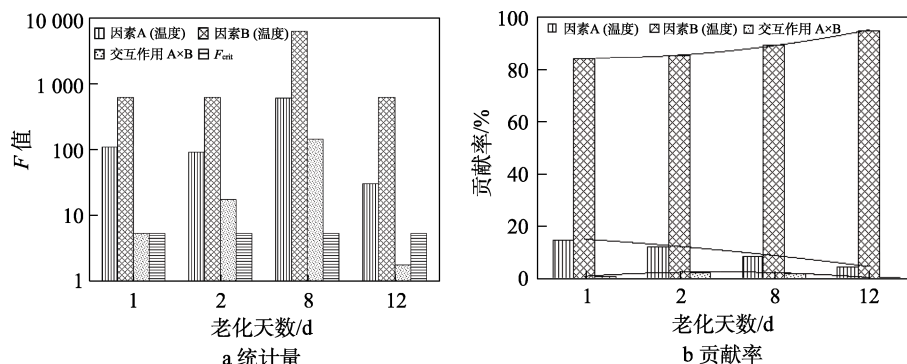


图 2 温度、相对湿度及其交互因素对最大抗拉强度的影响对比

Fig.2 Comparison diagram of the effects of temperature, relative humidity and their interactive factors on the maximum tensile strength: a) statistical comparison diagram; b) comparison diagram of contribution rate

在试验初期(1 d后),温度、相对湿度的 F 值分别为 111.31、630.13,均大于 F_{crit} ,说明温度和湿度单独作用对推进剂最大抗拉强度的影响非常显著。相对湿度的 F 值明显大于温度的 F 值,说明湿度对推进剂最大抗拉强度影响的显著程度更强。温湿度交互作用的 F 值为 5.31,小于 F_{crit} ,影响不显著。结合推进剂质量损失及最大拉伸强度随老化时间的变化规律,该阶段表现为质量损失分数减小,推进剂质量增加,最大拉伸强度减小。分析认为,在该阶段,相对于外界环境湿度,推进剂内部含湿量较低,存在较明显的湿度梯度差,湿气在湿度梯度差的推动下渗入推进剂内部,是一个以吸湿为主导的物理老化阶段,水分破坏了粘合剂和氧化剂的界面粘附^[23],使氧化剂的补强作用快速下降,同时促使了粘合剂的水解断链^[24],导致推进剂的最大拉伸强度下降。温度影响因素涉及物理化学耦合作用,需要时间的累积,其影响效应难以在短时间内显现,与湿度相比,其对最大拉伸强度的影响效果不够明显。

在试验中期(8 d),温度、湿度及其交互作用对应的 F 值总体上升,分别达到 616.33、6440.33、147.00,远远大于 F_{crit} ,影响极其显著,各种因素的影响效应凸显,推进剂内部的水分对基体/颗粒界面的破坏作用不断加剧,高温在满足一定的时间累积后,引起的化学变化逐渐显现。同时,高温和湿度的作用相互促进,形成耦合效应,表现为推进剂质量不断增加,最大拉伸强度趋于稳定。分析认为,该阶段为高聚物断链稍占优势的阶段^[25],物理性老化基本趋于缓和,但水分促使粘合剂的水解断链继续进行^[24],且粘合剂的断链速率稍大于氧化交联速率^[26]。

在试验后期(12 d后),温度、湿度及其交互作用的影响均下降, F 值分别为 30.04、631.75、1.75,其中温度的 F 值较老化 2 d 时有所下降,湿度的 F 值与老化 2 d 时的基本一致,交互作用的 F 值小于临界值,说明温度对推进剂最大拉伸强度的影响作用有所下降,湿度的作用趋于稳定,而交互作用的影响不再显著。与试验中期相比,推进剂的最大拉伸强度均略

有所提高。分析认为,推进剂老化进入了氧化交联占主导的阶段^[26],此阶段由湿气导致的高聚物断链和由温度影响的氧化交联同时存在,虽然温度的作用有所下降,但与温度的作用趋于稳定相比,在高聚物断链与氧化交联两个竞争因素中氧化交联占优势,使得推进剂的最大拉伸强度有所回升。

从贡献率的角度看,湿度对推进剂最大拉伸强度的贡献率最大,始终在 80%以上,且随老化时间有上升的趋势,最高达 95.21%。温度的贡献率随老化时间逐渐减小,交互作用的贡献率先增大、后减小。

3 结论

1) 湿度对 HTPB 推进剂质量损失分数的影响起主导作用,存在一个湿度临界值,大于或小于这个临界值,推进剂遵循不同的质量损失机理。根据试验结果,该临界值介于 75%和 85%间。

2) 温度和湿度对推进剂最大抗拉强度有显著影响,相比而言,湿度的影响更加显著。整个老化过程中,温度和湿度的影响作用表现出先增加、后下降的趋势。温湿交互作用在试验前期和后期对推进剂的影响不显著,而在试验中期较为显著,同样呈现出先增大、后减小的规律。

3) 湿度对推进剂最大拉伸强度影响的贡献率最大,温度次之,交互作用最小。从时间轴上看,湿度的贡献率表现为单调递增趋势,温度为单调递减趋势,交互作用呈现抛物线趋势。

参考文献:

- [1] 任务正,王泽山. 火炸药理论与实践[M]. 北京:中国北方化学工业总公司,2001.
TASK Zheng, WANG Ze-shan. Theory and Practice of dynamite [M]. Beijing: North China Chemical Industry Corporation, 2001.
- [2] 周起槐,任务正. 火药物理化学性能[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
ZHOU Qi-huai, TASK Zheng. Physical and Chemical

- Properties of Gunpowder[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983.
- [3] DING S, KHARE A, LING M T K, et al. Polymer Durability Estimates Based on Apparent Activation Energies for Thermal Oxidative Degradation[J]. *Thermochimica Acta*, 2001, 367-368: 107-112.
- [4] ANTON Chin, ELLISON D S. Cartridge Actuated Devices (CAD) Service Life Determination and Extension by Microcalorimetry[C]//29th International Pyrotechnics Seminar. UK: [s. n.], 2002.
- [5] 吴红光, 董洪远, 齐强, 等. 舰载武器装备海洋环境适应性研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2007, 22(1): 161-165.
- WU Hong-guang, DONG Hong-yuan, QI Qiang, et al. Research on the Ocean Environment Suitability of Shipborne Weapon Equipment[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2007, 22(1): 161-165.
- [6] JUDGE M. An Investigation of Composite Propellant Accelerated Ageing Mechanisms and Kinetics[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(3): 114-119.
- [7] 张旭东, 董可海, 曲凯, 等. 湿老化对丁羟推进剂力学性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2012, 35(3): 71-74.
- ZHANG Xu-dong, DONG Ke-hai, QU Kai, et al. Effect of Moisture Ageing on Mechanical Performance of HTPB Propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(3): 71-74.
- [8] 朱一举, 常海, 丁黎. 湿热环境对 RDX/AP-NEPE 推进剂热安全性及力学性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2014, 37(6): 65-69.
- ZHU Yi-ju, CHANG Hai, DING Li. Effect of Humid and Hot Environment on Thermal Safety and Mechanical Properties of RDX/AP-NEPE Propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(6): 65-69.
- [9] 王玉峰, 洪亮, 李高春. 固体推进剂受潮对其力学性能的影响[J]. *海军航空工程学院学报*, 2008, 23(5): 524-526.
- WANG Yu-feng, HONG Liang, LI Gao-chun. Experiment Research on Effect of Wetting on the Solid Propellants' Mechanical Properties[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2008, 23(5): 524-526.
- [10] 常新龙, 简斌, 赖建伟, 等. HTPB 推进剂湿热老化规律及损伤模式实验[J]. *推进技术*, 2010, 31(3): 351-355.
- CHANG Xin-long, JIAN Bin, LAI Jian-wei, et al. Experimental Investigation for Hygrothermal Aging Law and Damage Mode of HTPB Composite Solid Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(3): 351-355.
- [11] 张旭东, 曲凯. 氢键在丁羟推进剂湿老化与干燥恢复中的作用规律[J]. *固体火箭技术*, 2011, 34(4): 482-487.
- ZHANG Xu-dong, QU Kai. Action of Hydrogen Bond during Moisture Ageing and Drying Recovery of HTPB Propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34(4): 482-487.
- [12] BIDDLE R, BLACK R, BRENN C, et al. Temperature and Humidity Aging Studies on Low Flame Temperature Propellants[C]//7th Propulsion Joint Specialist Conference. Virginia: AIAA, 1971.
- [13] 池旭辉, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂湿老化特性研究[J]. *含能材料*, 2009, 17(2): 236-240.
- CHI Xu-hui, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Humidity Aging Behaviors of NEPE Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(2): 236-240.
- [14] 池旭辉, 彭松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂湿热双应力老化特性[J]. *含能材料*, 2010, 18(3): 309-315.
- CHI Xu-hui, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Humidity-Heat Combination Stress Aging Behavior of NEPE Propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(3): 309-315.
- [15] 罗天元, 黄文明, 王艳艳, 等. 湿度对 HTPB 复合推进剂力学性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2009, 32(6): 84-86.
- LUO Tian-yuan, HUANG Wen-ming, WANG Yan-yan, et al. Effect of Humidity on Mechanical Property of HTPB Composite Propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(6): 84-86.
- [16] 王玉峰, 李高春, 王晓伟. 固体火箭发动机海洋环境下的贮存及寿命预估[J]. *火炸药学报*, 2008, 31(6): 87-90.
- WANG Yu-feng, LI Gao-chun, WANG Xiao-wei. Storage and Life Prediction of Solid Rocket Motor in Sea Environment[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(6): 87-90.
- [17] QJ 1113—1987, 复合固体推进剂性能测试用试样[S].
- QJ 1113—1987, Sample for Performance Test of Composite Solid Propellant[S].
- [18] QJ 1615—1989, 复合固体推进剂单向拉伸抗拉强度和伸长率主曲线测定方法[S].
- QJ 1615—1989, Principal Curve Determination of Uniaxial Tensile Strength and Elongation of Composite Solid Propellant[S].
- [19] QJ 924—1985, 复合固体推进剂单向拉伸试验方法[S].
- QJ 924—1985, Uniaxial Tensile Test Method for Composite Solid Propellant[S].
- [20] 常新龙, 赖建伟, 王若雨, 等. 湿热环境下 HTPB 推进剂的吸湿性能[J]. *火炸药学报*, 2010, 33(3): 76-79.
- CHANG Xin-long, LAI Jian-wei, WANG Ruo-yu, et al. Hygroscopic Properties of HTPB Propellant in the Hydrothermal Environment[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(3): 76-79.
- [21] 吴翊, 李永乐, 胡庆宁. 应用数理统计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
- WU Yi, LI Yong-le, HU Qing-ning. Applied Mathematical Statistics[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003.
- [22] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- REN Lu-quan. Optimum Design and Analysis of Experiments[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [23] DAVIS D. Use of Dilatation in Understanding Composite Propellant Aging[C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 2001.
- [24] 彭培根, 刘培谅, 张仁, 等. 固体推进剂性能及原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1987.
- PENG Pei-gen, LIU Pei-liang, ZHANG Ren, et al. Performance and Principle of Solid Propellant[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1987.
- [25] 侯林法, 张春森, 周学刚, 等. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- HOU Lin-fa, ZHANG Chun-sen, ZHOU Xue-gang, et al. Composite Solid Propellant[M]. Beijing: Aerospace Press, 1994.
- [26] CHRISTIANSEN A, LAYTON L, CARPENTER R. HTPB Propellant Aging and Service Life[C]//16th Joint Propulsion Conference. Virginia: AIAA, 1980.