

综述·专论

弹箭密封橡胶制品的寿命预估

韩馨毅, 杜华太, 杜明欣, 崔 俞, 张春梅, 杨敬亭

(山东非金属材料研究所, 山东 济南 250031)

摘要:综述国内外橡胶材料及制品的贮存或使用寿命的研究进展, 重点介绍战略导弹和运载火箭(简称弹箭)用密封橡胶制品的寿命预估方法, 包括动力学曲线模型、时温等效模型、热重点斜法和湿热老化模型分析法, 并提出弹箭密封橡胶制品今后的研究重点, 目的是为弹箭密封橡胶制品的贮存和使用提供技术保证。

关键词:密封橡胶制品; 橡胶材料; 寿命预估; 老化; 模型分析法; 导弹; 火箭

中图分类号: TQ336.4⁺2; TQ336.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2022)05-0000-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2022.05.0000



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

战略导弹和运载火箭(简称弹箭)是十分特殊的产品, 其在制造完成后的很长时间内都处于贮存、维护及检修的状态, 但只要投入使用, 很快就达到寿命终点, 而在其贮存期间, 弹箭系统的各项性能及可靠性应始终要符合标准规定^[1]。

作为关键的基础元器件, 橡胶制品(配件)在弹箭中已得到广泛应用。目前, 弹箭橡胶制品已涉及各胶种, 而且随着弹箭技术水平的不断提高, 许多新型橡胶制品的研发得到大力推动, 橡胶制品的形式、种类更加多样化, 应用领域涉及弹箭密封、减振、防护、屏蔽和功能配件等。同时, 橡胶制品以其高弹性、耐高低温、耐介质等优异性能大量应用于弹箭导引头、传感器、电磁阀、电爆阀、安全活门、调节器、燃油分配器、助推器、燃油箱和减压器等部位的密封。但是, 弹箭密封橡胶制品在使用中因受到热、氧、臭氧、紫外线、水分、应力等多种因素的影响, 其性能会缓慢下降, 可能发生变脆、变硬、粉化和开裂等问题, 严重的会影响橡胶制品的正常使用^[2-3]。为了准确了解弹箭密封橡胶制品的贮存或使用寿命, 需要

对其寿命进行预估。

弹箭密封橡胶制品的贮存或使用寿命是从硫化完成到功能失效的时间, 包括橡胶制品未装机时在自由状态下(在库房)的贮存时间、在分系统部件装机和整机系统装配状态下(在库房/现场)的贮存和使用时间。弹箭发动机的寿命通常指其服役寿命或有效贮存期, 一般长达几年、十几年, 甚至几十年, 而其工作寿命却不长, 普通弹箭发动机的工作寿命不会超过10 min^[4-5]。弹箭发动机在设计初期的期望服役寿命为设计服役寿命, 生产厂家在交货时会告诉用户其预估服役寿命。在弹箭发动机即将达到服役寿命时, 如果其整体性能良好, 可以采取一定措施(如更换弹箭零部件等)使弹箭寿命得以延长^[6-7]。

1 国内外橡胶材料及制品的贮存或使用寿命研究进展

1.1 国外

自19世纪60年代发现橡胶材料及制品在经过自然老化后其性能衰减, 人们就开始研究橡胶材

作者简介: 韩馨毅(1996—), 男, 山东烟台人, 山东非金属材料研究所硕士生, 主要从事特种橡胶性能的研究工作。

E-mail: 2524903585@qq.com

引用本文: 韩馨毅, 杜华太, 杜明欣, 等. 弹箭密封橡胶制品的寿命预估[J]. 橡胶工业, 2022, 69(5): 000-000.

Citation: HAN Xinyi, DU Huatai, DU Mingxin, et al. Life prediction of sealing rubber product for missile and rocket[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(5): 000-000.

料人为加速老化与自然老化的关系,寻求其加速老化的途径,以便在实验室内对橡胶材料及制品的贮存或使用寿命进行预测。美国和俄罗斯等国家在该方面进行了较系统的研究,做了很多加速老化与自然老化试验,得到很多试验数据,并在此基础上制定了橡胶材料及制品贮存的相应规范。

美国军方通过多家机构对涉及军用的橡胶材料及制品进行室内、室外自然老化和加速老化行为的研究,研究了橡胶材料及制品的自然老化与加速老化的相关性,得到拉断伸长率、压缩永久变形和应力松弛为表征橡胶材料及制品老化性能较合适的参数,其中拉断伸长率受老化影响的规律最为明显,压缩永久变形和应力松弛可用于描述在恒定载荷时橡胶材料性能随时间变化的规律。

美国在1960年制定了橡胶制品军方标准MID-HLBK-695,该标准经过多次修订后,现行为2005年修订的MID-HLBK-695D。该标准按贮存寿命将22种军用橡胶材料划分为3类:第1类橡胶材料有5种,贮存寿命较长,最长达20年;第2类橡胶材料有8种,贮存寿命为5~10年;第3类橡胶材料有9种,贮存寿命为2~5年。同时,针对各类武器装备用近300多项橡胶制品,该标准分别按使用条件给出其贮存寿命,这些橡胶制品的应用范围覆盖武器装备的方方面面。

在橡胶材料及制品的贮存或使用寿命研究方面,俄罗斯按照其使用受力和非受力要求建立了相应的专用数学模型,针对影响贮存寿命的多种因素,通过加速老化和自然老化对模型分析结果的可靠性及准确性进行了验证及修正,并制定了相应的寿命评价标准,如ГОСТ 9.707等。俄罗斯莫斯科弹性体研究院拥有专门的寿命评估软件CARMA,利用该软件可以根据加速老化试验结果获得如下结果:确定在给定性能指标条件下橡胶制品的存贮或使用寿命;确定在给定条件下存贮或使用后橡胶制品的性能水平;确定在给定加速老化条件(温度和时间)下橡胶制品的存贮和使用寿命及其极限值;根据自然试验结果预测橡胶材料及制品的性能变化;以可靠性水平预测橡胶制

品的贮存或使用寿命等。

由于拥有坚实的研究基础和大量翔实的试验数据,前苏联时期制定的各类橡胶材料及制品规范均明确给出在特定的使用条件(如使用介质、使用温度范围、贮存条件和承载条件等)下橡胶制品的装机贮存寿命,并建立武器装备寿命延长的规范,从而确保了武器装备橡胶制品的应用可靠性。

目前,在橡胶材料及制品的贮存或使用寿命预测方面,国外强化橡胶材料及制品的失效机理研究和微观结构分析,重点研究其宏观特性与微观结构的关系,寻找与其使用性能密切相关的特性参数,建立特性参数的有关定量表征方法,通过微观结构预测橡胶材料及制品的使用特性。随着现代分析技术的发展,橡胶材料及制品的贮存或使用寿命评价技术逐渐微观化、衡量化。

1.2 国内

国内橡胶材料及制品的贮存或使用寿命预测方面的研究起步较晚,中国兵器工业集团第五三研究所(五三所)、西北橡胶塑料研究设计院有限公司、沈阳橡胶研究设计院有限公司、中航航发北京航空材料研究院和广州合成材料研究院有限公司等进行了较多的探索,积累了一定的经验。目前,我国已形成橡胶材料及制品的使用寿命预测的多个标准,如HG/T 3087—2001, GJB 92.2—1986和GB/T 20028—2005等。

“九五”期间五三所从俄罗斯引进先进特种橡胶密封材料及制品的性能评价技术及设备,使五三所橡胶密封材料及制品的贮存或使用寿命预测技术得到大幅提高。结合以往多年的研究成果,五三所积极开展理论及应用研究,针对特种橡胶材料进行老化性能规律的研究,取得了较好的研究成果,获得了较丰硕的成果。目前针对某空空导弹密封橡胶制品的贮存性能进行了探索研究,针对空地导弹密封橡胶制品的贮存性能采用引进软件CAMRA进行了加速老化研究。

总体来看,国内橡胶材料及制品的贮存或使用寿命评价技术研究尚处于起步阶段,与国外相比主要存在如下差距:试验状态模拟手段单一,只能预测橡胶材料及制品在一种或几种条件下的贮

存或使用寿命,不能进行复杂条件下的贮存和使用寿命预测;橡胶材料及制品的系统性老化试验数据较少,无国防武器装备用橡胶密封材料的寿命评价系统数据库,这方面的研究缺乏系统性;橡胶材料的分子级老化机理研究较少,大多以宏观物理性能变化趋势为主要研究对象,缺少由微观结构变化到宏观物理性能变化的定量表征研究。

2 弹箭密封橡胶制品的寿命预估

自19世纪中期起,很多研究人员便开始研究橡胶制品人工加速老化与自然老化的规律。之后,弹箭技术的不断发展使得橡胶制品的寿命预估工作不断进步。现阶段,我国弹箭密封橡胶制品的寿命预估工作有了更大发展,已经有了国家标准方法及国家军用标准方法^[8-10]。人工加速老化下弹箭密封橡胶制品的寿命预估试验需要满足以下假设:对老化结果有影响的只有一个反应或者多个具有相同活化能的反应;老化反应的活化能是与温度无关的常数;老化反应速率只与温度有关,与其他因素无关^[7]。

2.1 弹箭密封橡胶制品的寿命预估原理

时间-温度叠加模型和扩散限制氧化模型是弹箭密封橡胶制品的寿命预估理论基础。弹箭密封橡胶制品在贮存时因为热、氧、应力和介质等因素会发生氧化、热解、水解等老化反应,这些老化反应有多个步骤并且过程复杂,其中起主导作用的步骤称之为控制步骤,橡胶制品的老化快慢与控制步骤有很大关系,其各方面性能的衰减也与之相关。在化学反应动力学理论中,老化程度和老化时间与老化温度有一定的关系。将人工加速老化扩展,便可以对弹箭密封橡胶制品进行寿命预估,针对不同的老化反应使用不同方法对老化程度、老化时间和老化温度进行处理,可以得到不同的计算公式。

人工加速老化试验预估的弹箭密封橡胶制品的贮存或使用寿命为近似值,其准确性取决于橡胶制品在老化过程中是否遵循假设^[11-12]。人工加速老化试验基本上在一个前提下进行:加速老化

试验中试样老化机理与实际老化机理相同。
美国军用标准化手册推荐的橡胶构件贮存寿命^[13]如表1所示。

表1 美国军用标准化手册推荐的橡胶构件贮存寿命
Tab. 1 Storage life of rubber components recommended by American military standardization manual

类 别	胶 种	贮存寿命/年
长寿命	硅橡胶、氟硅橡胶、氟橡胶、聚硫橡胶、聚丙烯酸酯橡胶、氟磷酸橡胶	≤20
中等寿命	氯磺化聚乙烯、丁基橡胶、氯丁橡胶、聚醚型聚氨酯、聚丙烯氧化物、三元乙丙橡胶、乙丙橡胶、氯醚橡胶	5~10
短寿命	丁腈橡胶、丁苯橡胶、顺式聚丁二烯、顺式-1,4聚异戊二烯橡胶、聚酯型聚氨酯橡胶	3~5

美国军用橡胶构件的老化等级按照国际标准化组织建议的方法进行划分,主要针对生胶的耐热老化性能进行判断,而弹箭密封橡胶制品一般是针对硫化胶的耐热老化性能进行判断,而硫化胶的耐热老化性能除了与生胶性能有关外,还受补强体系、填充体系、硫化体系和防老化体系等的影响,而这些的影响往往会超过生胶的影响。

2.2 弹箭密封橡胶制品的寿命预估方法

2.2.1 动力学曲线模型分析法

使用动力学曲线模型预估弹箭密封橡胶制品寿命分为2步:第1步用动力学曲线表征橡胶性能与贮存或使用时间的关系,再通过坐标的变化,将动力学曲线转变成直线,最后计算不同温度下的速率常数;第2步用阿累尼乌斯方程推算指定温度下的老化速率常数,最后建立起该温度下的老化方程。相关动力学老化方程^[14-15]如下。

$$f(P) = e^{-kt} \tag{1}$$

$$f(P) = Ae^{-kt} \tag{2}$$

$$f(P) = Be^{-k\alpha} \tag{3}$$

$$\varepsilon = kt^n \tag{4}$$

式中, P 为老化系数, k 为老化速率常数, t 为老化时间(h), A 为指前因子, B 和 α 为与温度无关的常数, ε 为老化指数, n 为转换系数。

研究表明,式(3)的精确性最好,不仅能用于计算弹箭密封橡胶制品的寿命,也可预测弹箭密封橡胶制品的性能变化。

2.2.2 时温等效模型分析法

时温等效模型需要先选定弹箭密封橡胶制品的老化失效标准,然后使用时间-温度叠加模型来预测橡胶制品的寿命。时温等效模型原理为:橡胶制品在较低温度长时间自然老化下的力学松弛现象可以以提高温度,从而缩短橡胶制品的老化时间(人工加速老化)来等效表征。因此,升高老化温度与延长老化时间对弹箭密封橡胶制品的分子运动和粘弹性行为是等效的,相关的动力学公式^[16]如下。

$$\alpha_\tau = e^{\frac{E_a}{R(1/T_r - 1/T)}} \quad (5)$$

式中: α_τ 为平移因子; E_a 为阿累尼乌斯活化能; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T_r 为参考温度, $^\circ\text{C}$; T_1 为试验温度, $^\circ\text{C}$ 。

根据弹箭密封橡胶制品老化后的拉断伸长率、压缩应力松弛、压缩永久变形和硬度变化等数据,利用阿累尼乌斯方程近似处理活化能,通过多组温度下的试验,就可以计算 α_τ ,从而计算出任意温度下弹箭密封橡胶制品的寿命。

2.2.3 热重点斜法分析法

热重点斜法源自美国T. W. DAKIN提出的寿命推算法。DAKIN寿命推算法需要选定弹箭密封橡胶制品性能衰减变化的一个临界值,在性能达到临界值之后,建立橡胶制品贮存期与环境温度之间的关系式,先用阿累尼乌斯方程描述,然后将方程转化为求对数形式^[17]。

$$\lg \tau = a + \frac{b}{T_2} \quad (6)$$

$$b = \frac{E_a}{2.303R} \quad (7)$$

式中: τ 为橡胶制品在环境温度下达到临界值所需要的时间,h; a 和 b 为常数,分别代表热老化寿命曲线中的截距和斜率; T_2 为环境温度,K。

将 E_a 代入式(7)可求出弹箭密封橡胶制品的热老化寿命曲线的 b ,再通过热老化性能试验确定出 a ,之后通过式(6)即可推算弹箭密封橡胶制品在特定温度下的寿命。

其中,弹箭密封橡胶制品的热重分析与表观活化能的统计方程如下:

$$E = 12\,000 + 2.06 \sum_{n=1}^{10} \frac{t_n}{\left(\frac{\Delta W_n}{W_a}\right)^{1/2}} \quad (8)$$

式中: E 为橡胶制品的表观活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; n 为测试温度点数,取值范围为1—10; t_n 为各测试温度, $^\circ\text{C}$; ΔW_n 为各测试温度下试样质量损失率,%; W_a 为试样总质量损失率($W_a = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots + \Delta W_{10}$),%。

2.2.4 湿热老化模型分析法

弹箭密封橡胶制品的老化有多种影响因素,当胶种和贮存条件等因素固定时,弹箭密封橡胶制品的性能变化与老化温度、老化时间之间存在特定关系。由于弹箭密封橡胶制品在湿热加速老化试验中受到温度和湿度的共同影响,故应同时考虑温度和湿度的作用^[18]。

当弹箭密封橡胶制品的老化主要由温度引发时,其寿命采用式(9)的阿累尼乌斯模型计算;当弹箭密封橡胶制品的老化主要由湿度引发时,其寿命采用式(10)的Eyring模型计算。

$$L(T) = A_1 e^{E_a/KT} = A_1 e^{B_1/T} \quad (9)$$

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-(A_2 - B_2/V)} \quad (10)$$

式中: L 为老化寿命; T 为绝对温度,K; K 为玻尔兹曼常数, $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; V 为绝对单位的应力(如相对湿度等); A_1 , A_2 , B_1 和 B_2 为待定模型参数。

综合考虑温度和湿度的影响,将阿累尼乌斯模型与Eyring模型相结合对弹箭密封橡胶制品的寿命进行预测,得到相应的湿热老化模型^[19]为:

$$L(H, T) = \frac{A}{H} e^{(c/H + d/T)} \quad (11)$$

式中, $L(H, T)$ 为湿热老化寿命, H 为相对湿度, A , c 和 d 均为模型参数。

对式(11)两边同时取对数,可得到线性方程:

$$\ln L(H, T)H = \ln A + \frac{c}{H} + \frac{d}{T} \quad (12)$$

式(12)兼顾温度和湿度的老化作用,适用于温度和湿度同为加速因子的老化试验中弹箭密封橡胶制品的寿命预测。

2.3 弹箭的寿命延长

弹箭的寿命延长是指对已经失效或即将到达

寿命期限的弹箭橡胶制品进行替换,从而使弹箭能够继续服役,达到延长其寿命的效果。并不是所有已经失效或即将到达寿命期限的弹箭都可以延寿,只有那些因为密封橡胶制品老化和螺栓断裂等的弹箭才可以通过更换新的零部件进行寿命延长,并且在完成寿命延长工作后需要重新对弹箭进行寿命预估,以保证其性能可靠,不超出服役寿命。

3 结语

本文综述国内外橡胶材料及制品的贮存或使用寿命研究进展,重点介绍弹箭密封橡胶制品的寿命预估方法,可为弹箭密封橡胶制品的贮存和使用提供帮助。

今后可在以下几方面继续开展研究工作。

(1) 研究环境因素对橡胶材料及制品性能的影响规律,探讨密封橡胶制品的密封失效机理和老化机理、特性参数以及密封临界值的确定,开展单因子和多因子试验研究。

(2) 利用各种先进的测试手段,通过对橡胶制品的宏观性能及微观性能研究,建立橡胶材料的特性与使用性能的本构关系,确定与使用性能密切相关的材料特性参数,并建立相应的科学预测技术。

(3) 针对各种橡胶制品在高温空气、燃油等不同服役条件下的自然老化、加速老化试验,建立各种橡胶材料老化的数学模型,确定各种橡胶材料的寿命,确立武器装备橡胶材料的服役寿命的科学评价方法。

(4) 建立橡胶材料及制品在长期服役环境下的数据库系统,并根据具体服役环境为其寿命准确预估建立多种评价模型。

(5) 建立橡胶材料及制品新的理化检测表征方法,其中老化解析方法包括外观(采用光学显微镜、图像显微镜和扫描显微镜表征)、化学性能(采用红外光谱分析和表面能谱分析表征)、热性能(采用差示扫描量热分析和热重分析表征)、物理性能(采用微量拉伸测试和动态力学性能测试表征)等的评价。另外,也可以利用近年来新的方法

如原子力显微镜分析、定量动力学方法以及热分析与红外光谱分析联用方法等进行橡胶材料及制品老化的研究。

参考文献:

- [1] 周堃,罗天元,张伦武. 弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程,2005,2(2):6-11.
ZHOU K, LUO T Y, ZHANG L W. Prediction techniques for storage life of missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2):6-11.
- [2] 代化,田文增. 热空气老化法测定橡胶贮存寿命研究进展[J]. 船电技术,2012,32(z2):82-85.
DAI H, TIAN W Z. Reviews on storage life prediction of rubber based on hot air acceleration aging method[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2012, 32(z2):82-85.
- [3] 苏正涛,刘培元,陆明. 国外航空橡胶制品贮存寿命控制的研究进展[J]. 合成材料老化与应用,2019,48(6):114-118,136.
SU Z T, LIU P Y, LU M. Review on shelf-life related research and standards of rubber products for aviation industry[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(6):114-118,136.
- [4] 陈海建,石伟峰. 导弹固体火箭发动机贮存寿命预测方法研究[J]. 现代防御技术,2016,44(3):148-153,160.
CHEN H J, SHI W F. Method of predicting storage life of missile solid rocket motor[J]. Modern Defense Technology, 2016, 44(3):148-153,160.
- [5] 徐金洲,贾东明. 舰上导弹固体火箭发动机贮存寿命的分析方法研究[J]. 固体火箭技术,2009,32(3):271-273.
XU J Z, JIA D M. Research of analysis method for storage life of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(3):271-273.
- [6] 解红雨,周伟勇,吴勋,等. 固体火箭发动机寿命预估方法研究进展[J]. 固体火箭技术,2019,42(3):377-383,395.
XIE H Y, ZHOU W Y, WU X, et al. Research progress on the service life prediction method for the solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3):377-383,395.
- [7] 王铮. 固体火箭发动机使用寿命的预估和“延寿”[J]. 固体火箭技术,1999,22(1):23-29.
WANG Z. Prediction and prolongation of solid rocket motor service life[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999, 22(1):23-29.
- [8] 全国橡胶委橡胶和物理化学试验方法分技术委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度:GB/T 20028—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [9] 国防科学技术工业委员会. 热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则 第一部分:试验规程:GJB92. 1—1986[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,1986.

- [10] 国防科学技术工业委员会.热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则 第二部分:统计方法:GJB92.2—1986[S].北京:总装备部军标出版发行部,1986.
- [11] 魏莉萍,唐磊,林景雪,等.热重点斜法估算硫化橡胶的热老化寿命[J].橡胶工业,2001,48(3):174-176.
WEI L P, TANG L, LIN J X, et al. Estimation of vulcanizate heat aging life with thermometric point-slope method[J]. China Rubber Industry, 2001, 48(3): 174-176.
- [12] 魏小琴,李泽华,杨万钧,等.热重点斜法快速评估氟硅橡胶贮存寿命[J].装备环境工程,2010,7(6):106-108,145.
WEI X Q, LI Z H, YANG W J, et al. Rapid evaluation of storage life of fluorosilicone rubber using thermogravimetric point slope method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 106-108, 145.
- [13] 李咏今.橡胶热老化定量和定性评定方法研究的进展[J].特种橡胶制品,1996,17(6):40-48.
LI Y J. Study progress of quantitative and qualitative evaluation methods for heat aging of rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 1996, 17(6): 40-48.
- [14] 刘晓丹,谢俊杰,冯志新,等.橡胶材料加速老化试验与寿命预测方法研究进展[J].合成材料老化与应用,2014,43(1):69-73.
LIU X D, XIE J J, FENG Z X, et al. Research progress on accelerated aging and life prediction method for rubber material[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(1): 69-73.
- [15] 肖琰,魏伯荣,杜茂平.橡胶加速老化试验及贮存期推算方法[J].合成材料老化与应用,2007,36(1):40-43.
XIAO Y, WEI B R, DU M P. Accelerated aging test of rubber and calculation of its storage life[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2007, 36(1): 40-43.
- [16] 胡文军,刘占芳,陈勇梅.橡胶的热氧加速老化试验及寿命预测方法[J].橡胶工业,2004,51(10):620-624.
HU W J, LIU Z F, CHEN Y M. Accelerated thermal oxidative aging test of rubber and prediction of its service life[J]. China Rubber Industry, 2004, 51(10): 620-624.
- [17] 李咏今.橡胶老化性能变化或寿命预测的计算方法[J].合成橡胶工业,1989,12(3):205-209.
LI Y J. Calculation method of rubber aging property change or life prediction[J]. China Synthetic Rubber Industry, 1989, 12(3): 205-209.
- [18] 孙书,李秀杰,李伟煜,等.航天器用GD414硅橡胶材料的湿热老化试验与贮存寿命预测[J].失效分析与预防,2020,15(2):78-83.
SUN S, LI X J, LI W Y, et al. Hydrothermal aging test and storage life prediction of GD414 silicone rubber for spacecrafts[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(2): 78-83.
- [19] 张晓军,常新龙,陈顺祥,等.固体火箭发动机粘接界面湿热老化与寿命评估[J].固体火箭技术,2013,36(1):27-31.
ZHANG X J, CHANG X L, CHEN S X, et al. Hygrothermal aging testing and life assessment for adhesive interface of solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(1): 27-31.

收稿日期:2021-07-08

Life Prediction of Sealing Rubber Product for Missile and Rocket

HAN Xinyi, DU Huatai, DU Mingxin, CUI Yu, ZHANG Chunmei, YANG Jingting

(Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: The research progresses of storage or service life of rubber materials and products at home and abroad were summarized, and the methods of life prediction of sealing rubber products for strategic missile and carrier rocket (missile and rocket for short) were mainly introduced, these methods included dynamic curve model, time and temperature equivalent model, thermometric point-slope method and humid and heat aging model analysis methods. At the same time, the future research focus of sealing rubber products for missile and rocket were put forward in this paper, the purpose was to provide technical guarantee for the storage and use of sealing rubber products for missile and rocket.

Key words: sealing rubber product; rubber material; life prediction; aging; model analysis method; missile; rocket