

航天产品非金属材料/制品贮存寿命评估技术

赵云峰 许文

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 从非金属材料老化机理与寿命预测模型、老化行为表征技术、贮存环境试验与寿命评估技术等方面,概述了国内外的技术发展和现状,介绍了航天产品用非金属材料及制品贮存寿命评估技术的发展及其应用进展。

关键词 非金属材料,复合材料,贮存寿命,贮存期,老化,评估,航天

中图分类号:TB33

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.004

Shelf Life Prediction Technology of Nonmetallic Materials/Parts Applied in Aerospace Industry

ZHAO Yunfeng XU Wen

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The development of the shelf life prediction technology of nonmetallic materials/parts applied in aerospace industry is briefly summarized from several aspects, i. e., the aging mechanism of nonmetallic materials, the models of life prediction for nonmetallic materials, the characterization technique of nonmetallic materials aging, the environmental tests and the method of life prediction of nonmetallic materials.

Key words Nonmetallic Materials, Composite materials, Shelf life, Aging, Prediction, Aerospace

0 引言

以运载火箭、导弹为代表的航天产品,具有“长期贮存,一次使用”的特点,其贮存寿命及可靠性是一项重要的战术技术指标或设计参数。我国长征系列运载火箭承担着高密度的发射任务,产品的批量化生产使其贮存周期延长,贮存寿命成为确保运载火箭高可靠和发射成功的一项重要设计要求。决定航天产品贮存寿命的因素很多,也很复杂,既有贮存、使用环境条件等外在因素,也有设计、原材料和元器件质量、非金属材料及制品老化等内在因素。基于目前的研究和认识水平,一般认为:非金属材料/制品是运载火箭及导弹等航天产品长期贮存过程中的薄弱环节,非金属材料/制品的老化是影响航天产品贮存寿命最重要的因素之一。

航天产品上应用有大量的非金属材料及制品,包括橡胶、塑料、复合材料、胶黏剂、油漆涂料、油脂、织物、陶瓷、玻璃等类^[1]。不同种类的非金属材料具有各自的材料特性,根据火箭、卫星和飞船等航天产品

各自的功能设计,应满足特定的设计要求。同时,非金属材料及制品在航天产品上应用时,都处于一定的结构状态,承受产品在贮存和工作过程中的特种环境条件。因此,不同非金属材料及制品的环境适应能力、贮存失效机理各不相同,其可靠的贮存寿命也必然存在差异。近60年来,航天材料及工艺研究所一直承担着我国各类航天产品中非金属材料及制品的老化研究及贮存期评估工作,开展了持续的研究工作^[1-10],提供了大量可靠的非金属材料贮存试验数据和贮存期评估结论,有力支撑了我国航天产品的研制和航天事业的发展。

1 国内外非金属材料/制品贮存寿命评估技术

1.1 非金属材料老化机理与寿命预测

非金属材料老化机理研究的热点集中于热氧老化、湿热老化、光老化、化学介质中老化和物理老化等方面。热氧老化和湿热老化主要研究材料在热、水蒸汽、氧、杂质等因素影响下的高温分解、降解、氧化机理,研究自由基引发和扩散机理等。Branka Adricic

收稿日期:2015-08-03

作者简介:赵云峰,1964年出生,研究员,博士生导师,主要从事高分子材料及树脂基复合材料的应用研究。E-mail:zhaoyf703@163.com
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第6期

等^[11]采用 TGA 法研究了 PVC 的热氧老化,通过研究 PVC 的老化动力学参数进一步解释热氧老化机理。有学者运用聚合物溶胀理论和化学动力学研究聚醚聚氨酯的老化降解过程,表明这类聚氨酯的降解遵从一级反应动力学规律;McNeill 从分子反应动力学方面出发,研究了材料热氧降解对分子链化学键的影响。受光照射(自然光、紫外光等)所引起的老化降解反应称为光老化,E. Govorcin Bajsic 等在研究聚氨酯弹性体中软段分子量对其光老化降解稳定性的影响时发现,在 290 ~ 400 nm 吸收一定波长的光后,聚合物中分子键断裂或链交联,释放出 CO₂^[12]。化学介质中的老化则研究材料在腐蚀性介质中的降解老化过程。

近 10 多年来,对材料物理老化机理的研究非常活跃,物理老化是指由于物理作用而发生的可逆性变化,不涉及分子结构的改变,如环境应力作用下的龟裂、增塑、低分子添加剂迁移、蠕变等等。有学者认为,物理老化主要引起材料聚集态结构的改变,进而对材料的黏弹性能产生影响^[13]。

在材料寿命预测基础理论方面,最经典也是应用最多的是 Arrhenius 寿命预测模型。Arrhenius 模型描述了材料老化过程近似遵从一级反应动力学规律时,寿命 τ 与环境温度 T 符合关系式:

$$\tau = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

式中, A 为频率因子, E 为老化活化能, R 为 Boltzman 常数。

时温等效原理是预测黏弹性材料长期性能和寿命的理论基础^[14-16]。温度和时间对黏弹性材料的黏弹特性具有等效的作用,即材料以力学松弛为机理的老化过程可在较高温度下短时间内完成,也可在较低温度下长时间内完成,并且老化后材料的物理性能可等效相同。时温等效原理的具体表达形式是时温叠加原理(TTS):

$$E(T, t) = \frac{\rho_T T}{\rho_S T_S} E(T_S, t/a_T) \quad (2)$$

$$\frac{dD[\tau; e]}{dt} = \frac{dD(\tau; L_{UV}, \text{Temp}, RH)}{dt} = A \times L_{UV} \times \exp\left(-\frac{E}{k_b \times \text{Temp}K}\right) \times \exp(C \times RH) \quad (8)$$

式中, L_{UV} 是紫外辐射常数;TempK 是绝对温度,RH 是环境湿度, E 是活化能, k_b 是 Boltzman 常数, A 、 C 是材料常数。

此外,在可靠性试验中运用到的加速寿命 Eyring 模型综合了温度应力及非温度应力(湿度、电应力、振动等)和寿命的关系,也可作为非金属材料寿命预测的评估模型^[18-20]。

由于非金属材料种类的多样性和环境因素的复杂性,材料老化的机理多样而复杂,只有广泛深入地

式中, E 为材料物理性能(模量、损耗等), ρ 为材料密度, T 为试验温度, T_S 为参照温度, a_T 为时间位移因子。时间位移因子 a_T 是建立高温短时间性能变化与低温长时间性能变化之间关系的变量,这种关系可通过 WLF 方程来描述:

$$\lg a_T = -\frac{C_1(T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)} \quad (3)$$

C_1 、 C_2 是反映黏弹性材料时温特性的特征值。

当材料受到应力 σ 作用时,可应用 Zhurkov 寿命预测模型,即寿命 τ 符合与温度-应力的 Zhurkov 关系式:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}} \quad (4)$$

式中, U_0 为活化能, σ 为应力, τ_0 、 γ 为参数。

预测材料在湿热环境中的老化寿命时,G. L. Weleh 提出了如下关系式:

$$\frac{C}{K} = \tau [H_2O] \quad (5)$$

$$\ln \frac{C}{K} = A + B \frac{1}{T} \quad (6)$$

式中, τ 为材料寿命, $\frac{C}{K}$ 为与湿度有关的老化速率常数, $[H_2O]$ 为环境水分子摩尔浓度, T 为温度, A 、 B 为常数。

在涂层材料室外老化寿命预测的研究中,美国的 William Q. Meeker 和 Luis A. Escobar^[17] 提出了随机降解(退化)模型。由于环境因子变化的随机性,材料性能退化的速率也是随机的,因此,在寿命期 τ 内的累计性能退化 $D(\tau)$ 可由下式表示:

$$D(\tau) = D(\tau; e) = \int_0^\tau \frac{dD[t; e(t)]}{dt} dt \quad (7)$$

式中, $dD[t; e(t)]/dt$ 是退化速率; $e(t)$ 是时间 t 时的环境变量。当涂层在室外受温度、湿度、光辐射综合环境因子作用时,性能退化速率描述为以下关系模型:

研究各类材料的不同老化机理,开展基础性的材料老化动力学研究和环境变量与寿命的关系模型研究,才能在材料寿命预测技术上取得不断的进展。

1.2 非金属材料老化行为表征技术

非金属材料的老化行为表征是开展贮存试验和寿命评估研究的必要手段。工程应用中常根据材料特定的性能参数随贮存时间及状态的变化来反映材料的老化特性,这种表征方式虽然结果直观,但不能从机理上反映出材料的老化规律和材料老化的一些

本征特性。随着现代仪器分析方法的发展,在材料老化行为表征技术研究领域逐步出现了一些新方法。如:傅立叶红外光谱法(FT-IR)、分子量法、定量动力学法、接触角测量法、电子自旋共振波谱法、核磁共振波谱法、拉曼光谱法等等。

FT-IR 用来定量检测材料老化的程度,高分子材料老化后,最显著的微观特征是产生大量的氧化基团—羰基(C=O),羰基浓度的大小在 FT-IR 谱图上反映为 1715 cm^{-1} 处吸收峰强度的大小,采用相对吸收强度可表征羰基浓度和材料的老化程度^[21]。

Govorcin. E. Bajsic 等^[12]认为分子量是表征高分子材料老化性质的一个最重要参数,研究了分子量和老化系数以及老化性能之间的关系,结果发现对老化过程为断链的高分子材料,由于老化过程中分子量与老化系数之间存在对应关系,可以把分子量作为可预测的物理量,进行老化系数的计算,在此基础上对材料的使用寿命进行预测。

在定量动力学研究方面,TGA、DTA、DSC、DTG、TMA 和 PGC 等各种热分析方法具有各自的特点,在不同升温速率下,TGA 可以给出比较可靠的老化机理方面的信息,有利于深入研究真实的老化动力学参数。也可以从得到的 TG 曲线中进一步计算出表观活化能、反应系数和微分函数等高分子材料热或热氧老化反应动力学参数。

有学者认为,材料在老化过程中,表面位能会发生规律变化,测量表面位能的变化可反映出材料的老化程度,而表面位能可采用接触角测量仪测量标准液体(水、 CCl_4)与被测材料表面的浸润接触角来表征。电子自旋共振波谱法可用于测量高分子材料试样在老化过程中其表面的自由基浓度,进而获得不同老化条件下的自由基生成速率,为在一定环境条件的材料老化动力学研究提供数据。

先进的现代仪器分析方法是开展材料老化行为表征技术和寿命预测技术研究的重要保障。

1.3 非金属材料贮存环境试验与寿命评估技术研究

在材料的贮存环境试验和寿命评估技术研究领域,国内外各行业针对工程应用都开展了大量的研究工作。研究的技术途径包括了自然环境的贮存(或暴露)试验和人工环境的加速贮存试验。

以美、俄为代表的强国把材料的环境适应性工程验证作为核心技术之一,其中包括了材料的寿命预测技术。在世界范围内,建立了跨国、跨区域的自然环境联合试验站网。美国在“民兵”、“大力神”等导弹的贮存寿命评价中,采用全过程检测的贮存试验计划,制定了 MIL-STD-810A-F 系列标准,包含了对材料的环境试验与评价,推动了军用材料的设计、应用

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第6期

和发展^[22-25]。

在自然环境贮存试验方面,国内的各军工行业在全国建有多个代表各种典型环境的试验站网。如兵器装备领域,以国防科技工业自然环境试验研究中心为依托,在海南、广州、重庆等地建立了完善的试验站网点,开展了长期、丰富的材料自然贮存试验研究,并正着力制定拟颁布关于军用装备的自然环境试验方法标准^[26]。

国外在加速贮存试验方面开展了大量的研究工作,俄罗斯制定有材料加速贮存试验的相关标准,如:ГОСТ 9.035“固定连接密封件贮存期的快速测定法”。Г. М. 古尼耶夫等人研究了无负荷条件下树脂基复合材料剩余强度的预测方法,建立了古尼耶夫中值老化公式: $S = S_0 + \eta(1 - e^{-\lambda t}) - \beta \ln(1 + \theta t)$,式中, S 为复合材料中值强度, S_0 为初始强度, η 、 β 为材料常数, λ 、 θ 为状态参数, t 为老化时间^[27]。

在美国材料测试标准 ASTM632D 中,给出了预测建筑构件及材料使用寿命的加速试验流程。Langley 研究中心的研究人员在复合材料贮存寿命评估时,根据材料的蠕变力学行为模型,将高温加速试验中获得的材料动态力学性能曲线进行时温叠加(TTS),得到常温下的材料动态性能参数变化主曲线,进而通过主曲线预测材料性能或评估材料贮存寿命^[28]。美国空军实验室的 Brice N. Cassenti 等研究了“O”型密封圈的寿命预测方法,采用扭摆试验和循环压缩回弹试验,测试“O”型密封圈的动态储能模量和损耗模量,建立了在负荷状态下“O”型密封圈形变和应力变化的预测方法^[29]。

在国内,关于非金属材料加速贮存试验与寿命预测技术研究也经历了 50 多年的发展,逐步形成了一些标准试验与评估方法,并积累了一些经验的试验研究方法。橡胶材料及制品的寿命评估有 GJB92—86《热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则》;对火工品的加速寿命试验方法有 GJB736.8—90《火工品试验方法 71℃ 试验法》。

在航天产品应用中,航天材料及工艺研究所总结出了一整套半经验性的加速寿命评估技术方法。并获得了较好的工程实际验证^[1]。文献[5]推算了当羧基亚硝基氟橡胶 7113 胶料密封件压缩永久变形达到 40% 时对应的贮存寿命为 9.8 a,置信度 95%。而以前对羧基亚硝基氟橡胶 7104 胶料密封件在压缩率 30% 条件下的贮存寿命评估结果为 6.8 a(20℃)^[2]。可见 7113 密封件的贮存寿命要长于 7104 密封件。

根据乙丙橡胶加速老化试验数据,通过四种贮存期评估方法预测乙丙橡胶贮存寿命,并将评估结果与自然贮存结果相比较。结果表明,评估寿命准确性排

序为国军标法>温度系数法>功能点斜法>寿命方程对数法,国军标法是四种评估方法中评估寿命最保守最可靠的方法,评估寿命与自然贮存数据也基本吻合。温度系数法和功能点斜法可简化加速老化试验,缩短试验周期,在预测乙丙橡胶压缩永久变形不大于0.5(对应自然贮存寿命 10.4 a)时,准确性较高,预测其长期贮存寿命时需取一定的安全系数^[4]。

根据 6 种橡胶密封材料的加速老化试验数据和自然贮存数据的比较研究结果表明,橡胶密封材料的老化符合范德霍夫规则,即加速系数在 2~4 的范围内。加速温度之间的加速系数与真实的加速系数趋于接近,在无自然贮存数据的情况下,可通过开展加速老化试验,计算出加速温度之间的加速系数,用于代替真实的加速系数开展整机加速老化试验^[9]。

航天材料及工艺研究所针对非金属材料 and 复合材料的老化机理也开展了一系列研究工作^[3,6-7]。

在航空材料应用研究中,许凤和等提出建立加速老化与大气老化环境条件之间的当量关系,采用温度、湿度、紫外光辐照的大气环境参数当量关系能更

好地预测材料性能^[30-31]。

在一些材料加速老化寿命预测的专题研究中,如:胶黏剂胶接寿命预测,采用定载荷加载检查方式,考核胶接性能在加速环境中的长期适应性,并把胶接失效确定为一种符合威布尔分布的统计失效模型,采用统计评估方法预测胶黏剂的贮存寿命。

此外,采用对比加速试验的方法也可定性评估某些新材料的贮存寿命,该方法需要选择一种已知贮存性能的参照材料,它们的使用状态和贮存环境条件基本一致,通过在相同的加速环境条件下(热氧或湿热)考核两种材料特性参数随老化时间的变化趋势,评价二者耐老化特性的优劣,由此间接获得新材料的贮存寿命。

2 非金属材料及制品贮存寿命评估技术在航天产品上的应用

航天产品上应用有大量的非金属材料及制品遍及航天产品的箭体结构、控制系统、地面设备、动力系统各个部分,表 1 为主要非金属材料及典型产品在航天产品的应用情况。

表 1 航天产品用非金属材料及其典型应用

Tab. 1 Nonmetallic materials applied in aerospace industry and their typical applications

材料	主要功能	典型产品	主要应用部位
橡胶	液压油密封、耐强氧化介质密封、耐燃烧剂密封、高压氧密封、超低温密封、阻尼减振、隔振	丁腈橡胶、氟橡胶、羧基亚硝基氟橡胶、氟醚橡胶、乙丙橡胶、硅橡胶、氯丁橡胶、氯醚橡胶材料的 O 型、X 型、D 型密封件,油封、密封环等; 硅橡胶、丁基橡胶、丁腈橡胶等 ZN 系列阻尼材料及各类减振器、减振垫、隔振器、缓冲垫、复合阻尼结构等	伺服机构、箭体结构、推进剂贮箱及管路活门、飞船高压氧管路系统; 火箭平台系统减振、惯导系统减振、仪器舱、电子设备安装板阻尼结构等
塑料	次承力结构、密封、绝热、绝缘	聚四氟乙烯、聚三氟氯乙烯、聚酰亚胺、尼龙 610、尼龙 1010、聚氨酯泡沫塑料、PMI 泡沫塑料、PEEK、聚氯乙烯等制品	次结构支架、衬套、绝缘子、活门密封、绝热结构等
复合材料	箭体结构、防热等多功能结构	碳/环氧树脂、碳/双马树脂、高硅氧/环氧树脂等产品; 碳/酚醛树脂、玻璃/酚醛、碳-碳、高硅玻璃纤维增强二氧化硅、高硅玻璃纤维增强 PTFE、蜂窝夹层结构	多种舱段、筒、卫星支架、梁、框; 防热帽、防热层、天线盖板、整流罩等
胶黏剂	结构粘接、耐高温、低温、导电等粘接密封、灌封	环氧型胶黏剂 HYJ-14、HYJ-16、HYJ-29、HYJ-51、J 系列结构胶黏剂等; GXJ-62、GXJ-63、DW-3、导电胶 GXJ-39、灌封胶 GD414、GN522、聚氨酯灌封胶等	火箭各系统、整机、仪器、组部件
油漆涂料	表面环境防护、防热、隔热等	防锈漆、三防漆、四防漆、五防漆等; 防热、隔热涂层、隐身涂层、高辐射涂层、抗氧化涂层等	箭体表面、仪器壳体表面、地面设备
油脂	润滑、液压、导热油脂	7804、7015、特 12 润滑脂、4601 液压油、10 [#] 、12 [#] 航空液压油、导热脂	涡轮泵、轴承、管路、活门、伺服机构、舵机、电子仪器、电源
其他	隔热、密封、绝缘等	毛毡、石棉、石墨、云母、绳索、纺织品、棉线等	箭体结构系统

通过系统开展非金属材料贮存期评估研究,可以获得非金属材料贮存寿命的评估结论,并以贮存寿命的评估结论为依据,对各种非金属制品从材料、零件状态的保管,到配套总装的生产周转,直至交付后贮存使

用的各个期限都进行划线规定,即给出每一项非金属材料、零件的保管期、生产周转期和贮存期。“三期”的规定一方面为型号定型、交付满足贮存期要求提供依据,另一方面,为批生产过程中控制各环节产品处于有

效期限,确保产品质量提供重要技术依据。

保管期:橡胶、塑料及复合材料类材料的保管期是指产品从硫化或热压、固化成型起到装入(或加工成型再装入)部组件、单机、分系统、全箭时止的期限;油漆涂料、油料类材料的保管期指从材料制成时起到用于部组件、单机、分系统、全箭时止的期限;胶黏剂类材料的保管期指由原材料配制成胶液(或制成胶膜)时起到用于部组件、单机、分系统、全箭时止的期限。

生产周转期:指材料、制品从用于部组件、单机、分系统、全箭时起到总装完毕,检验合格并经用户代表签字验收时止的期限(运载火箭的生产周转期与贮存期合并)。

贮存期:航天产品的贮存期从非金属材料或制品用于部组件、单机、分系统、全箭时起,到材料或制品仍能满足设计要求的期限。

对于航天产品,橡胶、塑料、复合材料及油料类产品的存放时间超过规定的保管期时,其保管期可占用贮存期,但保管期和贮存期的总和应保持不变;而上述材料及制品的贮存期则不能占用保管期;胶黏剂、油漆涂料类产品的保管期与贮存期不能互相挪用。

在早期的贮存期试验研究工作中,主要采用了平行贮存试验的技术途径,从研制初期开始,投入了大量的材料贮存试验件,在代表不同贮存环境的贮存基地开展了全面的平行贮存试验。通过每年对贮存试验件的取样和性能测试,逐年获取材料的贮存性能数据,由此获得非金属材料贮存期评定结论。通过平行贮存试验获得的各项材料贮存性能数据和贮存期结论是最为真实和可靠的,但也存在试验周期长,投入人力和物力较大、管理协调难度高等缺点。

加速贮存试验的目的是在较短的周期内获得相对可靠的贮存期评估结论,它是建立在材料贮存老化相关性理论基础之上,对非金属材料的贮存老化机理和失效模型赋予一定的假设前提和边界条件,并在试验过程中,通过强化环境因子(温度、湿度等),获得非金属材料在相对短时间内的性能变化规律,并采用统计评估等数学手段,评定非金属材料及制品贮存可靠性的试验方法。在几十年的研究工作中,探索开展了加速贮存的试验技术途径和贮存期评估方法,并以可靠、保险为原则,逐步总结出橡胶、塑料、胶黏剂等非金属材料和典型制品的加速贮存试验及贮存期评估方法。通过加速贮存试验获得的贮存期评估结论与平行贮存试验的结论可能存在一定的偏差,这是由环境因子的多样性、复杂性和理论假设的局限性等因素决定的。但通过与平行贮存试验中的材料贮存性能数据对比可知,采用加速贮存试验获得的贮存期评

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第6期

估结论大都是保守的、可靠的。

在新一代航天产品的研制过程中,大量新设计、新材料和新工艺的采用使航天产品将对非金属材料贮存寿命评估技术提出更高的要求,平行贮存试验和加速贮存试验仍将是开展产品贮存可靠性研究的必要技术途径,两种技术途径互为补充、互为支撑。

3 结语

航天产品非金属材料/构件贮存寿命评估是航天材料应用研究的一项关键技术,也是航天产品研制过程中的一项重要工作,为满足未来航天技术发展和航天产品研制的需要,应当持续加强如下几方面的工作:(1)整机状态的加速贮存与寿命预测技术研究;(2)加速贮存与自然贮存的相关性研究;(3)航天材料及制品在空间环境、多因素综合气候环境、多因素综合应力条件下、特种介质等特殊应用环境下的环境适应性评价及寿命评估技术研究;(4)建立非金属材料环境试验与寿命信息数据库等。加强自然贮存信息的积累与应用,加强各类材料贮存老化机理研究。

参考文献

- [1] 赵云峰. 航天特种高分子材料研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2013(4):217-228
- [2] 李昌盛. 快速估算 7104 胶料及其制品 MF102-229 密封环的贮存期[J]. 材料工艺, 1982(4):51-55
- [3] 肖鑫, 赵云峰, 许文, 等. 橡胶材料加速老化实验及寿命评估模型的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(1):6-10
- [4] 丁孝均, 赵云峰, 许文, 等. 加速老化与自然贮存试验预测乙丙橡胶贮存寿命比较[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(增刊 I):253-257
- [5] 赵云峰, 吴福迪, 许文. 羧基亚硝基氟橡胶的性能及应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(4):26-30
- [6] 郑爱刚, 杨光, 许文, 等. 氯化橡胶涂层人工加速条件下的老化机理[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(4):72-76
- [7] 詹茂盛, 李小换, 许文, 等. 热氧、湿热和热水老化对 T300/BHEP 复合材料玻璃化转变温度的影响[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(3):56-60
- [8] 张国彬, 王玉森, 许文, 等. 航天用硅橡胶制品贮存试验技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(1):26-29
- [9] 丁孝均, 赵光辉, 赵云峰, 等. 橡胶密封材料加速系数研究[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(1):93-97
- [10] 丁孝均, 赵云峰, 许文. 甲基乙炔基硅橡胶密封件贮存寿命评估研究[J]. 有机硅材料, 2015, 29(3):203-206
- [11] Branka Andrić, Tonka Kovačić, Ivka Klarić Andrić B, et al. Kinetic analysis of the thermo-oxidative degradation of poly(vinyl chloride) in poly(vinyl chloride)/methyl methacrylate-butadiene-styrene blends Isothermal degradation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 78(3):459-465

(下转第 26 页)