

弹箭橡胶材料贮存累积损伤 仿真应用研究

李正雄, 杨华明, 黄红宁

(西南技术工程研究所, 重庆 401329)

摘要: **目的** 利用计算机便捷计算橡胶材料长期贮存过程的累积损伤。**方法** 分析弹药上使用广泛的 4 种橡胶材料在长期贮存过程中产生累积损伤的原因和损伤模式, 在经典反应动力学方程中引入修正系数, 对反动力学方程进行修正, 建立 4 种橡胶的累积损伤模型。在此基础上, 开发一套针对不同贮存环境下不同种类橡胶材料各种性能的累积损伤仿真软件。将软件仿真计算得到的多个牌号橡胶密封圈压缩永久率数据与实际试验测试得到的压缩永久变形率数据进行对比。**结果** 计算机仿真预示结果与 60 d 试验实测结果接近, 计算偏差在 10% 以内。**结论** 该仿真软件预测精度较高, 可用于对长贮过程中弹药橡胶材料和其他橡胶材料累积损伤仿真。

关键词: 橡胶材料; 贮存累积损伤; 热老化; 累积损伤模型; 仿真预测

中图分类号: TJ04 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)02-0160-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.018

Research on Simulation Application of Cumulative Damage of Rubber Materials Used in Ammunition and Rocket

LI Zhengxiong, YANG Huaming, HUANG Hongning

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 401329, China)

ABSTRACT: The work aims to conveniently calculate the cumulative damage of rubber materials during long-term storage by computer. The reasons and damage modes of the cumulative damage of 4 kinds of rubber materials which used in ammunition during long-term storagewere analyzed. Correction coefficientswere introduced into the classical reaction kinetic equation to correct the reaction kinetic equation and establish a cumulative damage modelfor the4 kinds of rubber. On this basis, a set of cumulative damage simulation software for various properties of different types of rubber materials under different storage environments was developed. The compression set rate data of multiple grades of rubber seal ring calculated by software simulation were compared with the compression set rate data obtained in actual test.The results showed that the computer simulation prediction results were close to the 60 day's actual test results.The calculation deviation was within 10%. In conclusion, the prediction accuracy is high, it can be used forsimulation of cumulative damage of ammunition rubber materials and other rubber materials during long storage.

KEY WORDS: rubber; cumulative damage during storage; thermal aging; cumulative damage model; simulation prediction

收稿日期: 2024-11-18; 修订日期: 2024-12-20

Received: 2024-11-18; Revised: 2024-12-20

引文格式: 李正雄, 杨华明, 黄红宁. 弹箭橡胶材料贮存累积损伤仿真应用研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 160-166.

LI Zhengxiong, YANG Huaming, HUANG Hongning. Research on Simulation Application of Cumulative Damage of Rubber Materials Used in Ammunition and Rocket[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 160-166.

橡胶是在各行业都广泛应用的一类材料,其性能退化和损伤广受各界关注,利用计算机对橡胶等高分子材料进行仿真预测和仿真试验分析(例如支座力学破坏机理仿真分析^[1]、高分子材料齿轮箱设计^[2]、橡胶高温磨损^[3]等)是近年来研究的主要方向^[4],但是针对橡胶在贮存过程中的累积损伤仿真研究进行得较少。导弹、火箭弹等弹药大都使用了橡胶圈、灌密封胶、胶黏剂等橡胶材料实现密封、减震、黏接等功能。由于弹药是一种长期贮存、一次性使用的物品,所以其贮存期通常都比较长,在贮存过程中,橡胶材料会因为贮存环境的长期作用使其产生与贮存时间有关的累积损伤。这些累积损伤通常表现为压缩永久变形率降低、硬度增大、黏接性能降低等,会直接影响到弹药的战技性能,所以利用计算机仿真技术准确有效地对高分子材料的贮存累积损伤进行预测和仿真十分重要。笔者分析了弹药上常用的橡胶材料在贮存过程中的损伤过程,开展加速试验,通过力学性能测试试验获得橡胶累积损伤数据,建立累积损伤模型,开发仿真软件,将软件应用于几类橡胶材料的贮存累积损伤预测和可视化仿真,验证应用效果。

1 累积损伤模型的建立

1.1 损伤机制分析

要建立橡胶材料的累积损伤模型,首先要摸清橡胶在长期贮存过程中的损伤机制,由于橡胶等高分子材料自然老化试验周期长,现在普遍采用加速老化^[5]的试验方式研究橡胶在贮存过程中的损伤机制。张凯等^[6]在不改变其贮存损伤机理的基础上,开展了丁腈橡胶的热氧老化试验。试验结果表明,随着老化时间的延长,丁腈橡胶密封圈外表面 O 元素含量总体都呈上升趋势,外表面 C 元素含量总体降低,内部 C 元素总体含量上升。说明在 2 种试验过程中,同时发生了增塑剂邻苯二甲酸二丁酯、癸二酸二丁酯向表面迁移的行为,丁二烯主链氧化交联,导致其压缩变形率发生变化。杨晓红等^[7]研究了不同硫化体系下三元乙丙橡胶的热氧老化规律。试验结果表明,老化后橡胶的表面形貌、压缩永久变形率、压缩应力松弛都有一定程度的劣化,损伤机制主要也是因温度导致的热氧老化,而且橡胶内部热量经导热只与外界空气对流传热,不考虑辐射传热^[8]。

1.2 累积损伤理论研究

Arrhenius 在建立了经验公式后,曾试图在理论上解释它,他首先提出了活化分子的概念,并从热力学原理出发,建立了活化能的 Arrhenius 理论。按照橡胶材料性能与老化时间的关系,可求得性能变化速率常数 K 。在一定范围内,老化速率常数 K 与热力学温度 T 之间的关系符合 Arrhenius 公式^[9]:

$$k = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

式中: A 为表观指前因子; E 为表观活化能, kJ/mol; R 为通用气体常数, J/(mol·K)。

橡胶材料的环境损伤过程不是一种简单反应过程,而是一系列复杂的物理和化学反应(转变)。阿伦尼乌斯理论认为,活化分子转变成产物分子的速率与温度无关。这一假设只在温度范围较窄的情况下使用,但是对于温度范围较宽的情况下,反应速率与温度是相关的。因此,通过引入修正系数 m 对反应温度进行修正,复杂反应的反应速率常数修正后为:

$$\begin{cases} k = A_0 T^m e^{-\frac{E}{RT}} \\ E = E_0 + mRT \end{cases} \quad (2)$$

将 E 代入到 k 中得到:

$$k = A_0 T^m e^{-\frac{E_0 + mRT}{RT}} = A_0 (T \cdot e)^m e^{-\frac{E_0}{RT}} \quad (3)$$

可见对活化能 E 的修正系数 m , 又以 e^m 形式到了指前因子 A 中,说明可将 E 的修正理解为是对 A 的补充修正^[10]。也就是说,如果直接用 $(T \cdot e)^m$ 修正 A , 则并不需要对 E 再次进行修正,在 A 修正“彻底”的情况下, E_0 并不随温度变化,这与速率常数 k 表达式中活化能 E_0 不随温度变化的物理意义完全一致。式(3)为橡胶材料累积损伤动力学理论模型。

1.3 加速贮存试验

弹药上使用最为广泛的橡胶材料是 O 形密封圈,由于 O 形橡胶密封圈属于挤压型密封圈,它是依靠 O 形橡胶密封圈安装在沟槽中产生预压缩作用,并形成弹性变形^[11]。肖坤等^[12]选择弹药领域常用的 5171 丁腈橡胶、5860 硫化橡胶、19901 三元乙丙橡胶、6141 硅橡胶制作成橡胶密封圈,开展热分析试验和热氧老化加速贮存试验,探索橡胶材料受温度影响导致的性能变化规律,利用试验过程中橡胶圈的压缩永久变形率和表面交联密度数据,求解橡胶材料热老化过程中的反应机理函数和模型中的指前因子 A_0 和活化能 E_0 等损伤动力学参数,建立了几种橡胶的累积损伤模型。

橡胶密封圈样品如图 1 所示,装配好的试验装置如图 2 所示。压缩工装根据各橡胶密封圈实际使用过程中的装配尺寸设计,试样压缩变形量与实际装配状态基本一致。

TMA 试验结果表明,5171 丁腈橡胶在温度超过 100 °C 时,其老化过程中的损伤机理会发生变化。因此,将丁腈橡胶密封圈的最高试验温度设置为 100 °C,试验条件为高中低 3 个温段,共 4 个温度点(50、70、80、100 °C);其他 3 种橡胶密封圈在进行 TMA 试验后,按照高中低 3 个温段共 4 个温度点(70、80、100、110 °C)进行试验^[13-14],试验时间为 60 d。



图1 橡胶密封圈样品
Fig.1 Test sample of rubber seal



图2 橡胶密封圈压缩工装
Fig.2 Clamp for rubber seal

$$\ln \beta = \ln \left\{ AE_a / [Rg(a)] \right\} - 5.33 - 1.052E_a / (RT) \quad (4)$$

在 $\beta=10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时, 5171 橡胶的 DSC-TGA 曲线的部分基础数据见表 1。

表 1 5171 丁腈橡胶试验数据
Tab.1 Test data of 5171 NBR

| w/% | c | T/K | da/dT |
|-------|-------|--------|------------------------|
| 90.42 | 0.098 | 378.76 | 7.086×10^{-3} |
| 87.76 | 0.115 | 380.43 | 7.853×10^{-3} |
| 84.95 | 0.145 | 383.84 | 8.376×10^{-3} |
| 82.76 | 0.179 | 387.86 | 9.628×10^{-3} |
| 78.45 | 0.209 | 390.22 | 1.085×10^{-2} |
| 76.83 | 0.223 | 392.72 | 1.178×10^{-2} |
| 73.67 | 0.249 | 393.99 | 1.298×10^{-2} |
| 71.52 | 0.279 | 395.98 | 1.410×10^{-2} |
| 67.95 | 0.305 | 397.86 | 1.525×10^{-2} |
| 65.84 | 0.325 | 400.01 | 1.618×10^{-2} |
| 59.86 | 0.361 | 402.21 | 1.743×10^{-2} |
| 54.52 | 0.383 | 404.69 | 1.801×10^{-2} |
| 50.86 | 0.419 | 405.87 | 1.874×10^{-2} |
| 48.93 | 0.439 | 408.36 | 1.956×10^{-2} |

1.4 累积损伤模型求解

热老化反应动力学研究一般采用的热分析手段为 TG、DTG、DSC 等, 利用实验所得的等温或非等温图谱进行热分析数学处理^[15], 较常用的方法有十余种。Ozawa 法^[16]避开了反应机理来求取活化能, 因而不会因反应机理不同而带来误差, 这是该方法突出的优点, 因此选择使用该方法, 求解反应活化能值, Ozawa 公式见式 (4)。与用机理函数计算出的活化能值进行对比, 确定反应机理函数^[17]。

将表 1 所列数据代入 Achar 微分方程 (式 (5)) 和 Coats-Redfer 积分方程 (式 (6)) 计算得到的动力学参数见表 2。

Achar 微分方程:

$$\ln \left[\frac{dc}{dt} \times \frac{1}{f(c)} \right] = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

Coats-Redfer 积分方程:

$$\ln \frac{g(c)}{T^2} = \ln \frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

表 2 $\beta=10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时热老化动力学结果
Tab.2 Thermal aging kinetics results when $\beta=10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

| Achar 微分法 | | | Coats-Redfer 积分法 | | |
|---|---------|-------|---|---------|-------|
| $E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $\ln A$ | r | $E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $\ln A$ | r |
| 185.224 | 39.882 | 0.996 | 163.832 | 32.026 | 0.991 |
| 212.658 | 42.854 | 0.995 | 208.736 | 45.618 | 0.998 |
| 237.465 | 48.134 | 0.996 | 258.081 | 52.109 | 0.999 |
| 248.255 | 43.233 | 0.999 | 222.984 | 46.226 | 0.998 |
| 168.085 | 32.493 | 0.992 | 138.016 | 23.018 | 0.981 |
| 308.214 | 62.782 | 0.993 | 356.125 | 73.989 | 0.980 |
| 136.786 | 26.457 | 0.992 | 159.962 | 31.067 | 0.978 |
| 87.128 | 15.387 | 0.991 | 112.954 | 21.785 | 0.965 |
| 62.187 | 9.182 | 0.995 | 90.012 | 16.162 | 0.947 |
| 40.214 | 2.856 | 0.996 | 68.013 | 9.345 | 0.921 |
| 29.271 | -0.243 | 0.998 | 52.983 | 6.675 | 0.890 |
| 131.156 | 22.018 | 0.998 | 136.258 | 24.738 | 0.972 |
| 108.345 | 21.002 | 0.998 | 128.234 | 23.258 | 0.990 |
| 110.488 | 18.978 | 0.996 | 112.968 | 19.568 | 0.981 |

表 2 的计算结果表明, 对于同一组数据, 有 2 号、4 号和 14 号等多种机理函数与之相匹配。在升温速率为 5、10、15 °C/min 时, 从所产生的数据中选择相同的转化率 c , 根据方程式 (4) 进行计算, 得到在不同转化率条件下的活化能 E_a 值, 结果见表 3。

表 3 在不同 c 下 Ozawa 法计算的 E_a 值
Tab.3 Value of E_a calculated by Ozawa method under different c number

| c | $E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$ | r |
|-----|---------------------------|-------|
| 0.2 | 106.572 | 0.993 |
| 0.3 | 105.185 | 0.994 |
| 0.4 | 105.326 | 0.995 |
| 0.5 | 103.296 | 0.996 |

用机理函数计算的 E_a 值与用 Ozawa 法计算的 E_a 值相比较, 14 号机理函数的 E_a 值较接近, 则对应的 $f(c)=(1-c)^{3/2}$ 即可确定为最可几机理函数。由表 2 的数据可知, 在不同升温率下求得的动力学参数有一定差异, 但这种差异性基本在误差所允许的误差范围内。因此, 说明热老化反应机理是唯一的、确定的, 推断出的动力学模型是可靠的。

通过热分析试验的试验数据进行处理计算, 即可得到热老化的起始温度 T_0 、指前因子 A_0 及活化能 E_0 。通过求解计算, 5171 丁腈橡胶模型中的指前因子 $A_0=18.67$, 活化能 $E_0=58\ 000$ J/mol; 5860 硫化橡胶的 $A_0=23.61$, $E_0=85\ 550$ J/mol; 6141 硅橡胶的 $A_0=27.50$, $E_0=39\ 640$ J/mol; 19901 三元乙丙橡胶的指前因子 $A_0=42.92$, $E_0=9\ 900$ J/mol。

建立 4 种橡胶材料反应速率的模型:

$$1) 5171 \text{ 丁腈橡胶 } k = 18.67(T \cdot e)^m e^{-\frac{58\ 000}{RT}}。$$

$$2) 5860 \text{ 硫化橡胶 } k = 23.61(T \cdot e)^m e^{-\frac{85\ 550}{RT}}。$$

$$3) 6141 \text{ 硅橡胶 } k = 27.50(T \cdot e)^m e^{-\frac{39\ 640}{RT}}。$$

$$4) 19901 \text{ 三元乙丙橡胶 } k = 42.92(T \cdot e)^m e^{-\frac{9\ 900}{RT}}。$$

利用橡胶高温段测试获得的压缩永久变形率保留率试验数据计算获得的 5171 丁腈橡胶模型中每个温度下的反应速率, 将 3 个温度点的 k 取平均值, 代入 k 中计算得到 $m=1/4$, 代入到 $\frac{dc}{dt} = kf(c)$ 中, 得:

$$\frac{dc}{dt} = kf(c) = 18.67(T \cdot e)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{58\ 000}{RT}} (1-c)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

将式 (7) 进行变换得:

$$\frac{dc}{(1-c)^{\frac{2}{3}}} = 18.67(T \cdot e)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{58\ 000}{RT}} dt \quad (8)$$

对式 (8) 两边进行积分, 化简得:

$$c = 1 - \left[\frac{18.67(T \cdot e)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{58\ 000}{RT}} t}{3} \right]^{\frac{3}{10}} \quad (9)$$

这就是建立的 5171 丁腈橡胶的累积损伤模型, 其他橡胶的累积损伤模型也用同样的流程计算建立。

2 橡胶材料累积损伤仿真软件开发

橡胶密封材料仿真技术对发橡胶的性能退化预测和寿命预测能够起到指导的作用。刘博等^[18]运用有限元仿真的方法分析了不同载荷下 O 形橡胶圈的变形和受力情况。湛虎等^[19]、韩传军等^[20]分别以 Y 形橡胶密封圈、X 形橡胶密封圈为研究对象, 分析了相应的 von Mises 应力分布以及接触压力分布情况, 利用计算机有限元分析对密封件的承载能力和密封性能进行了分析研究, 提出了优化方案, 改进了密封圈的密封性能。刘俊^[21]利用仿真技术模拟了 O 形橡胶圈的性能变化, 判断了该材料的性能优劣。吴健等^[22]利用有限元仿真方法获得了航空用三元乙丙橡胶 (EPDM) 材料性能与温度的关系, 为航空器材料环境适应性提供了支撑。张晓东等^[23]利用 ABAQUS 对橡胶密封圈压缩率与环境温度进行了仿真研究, 掌握了密封可靠性的变化规律。但由于现有的有限元仿真软件只能对立场、热场等进行有限元仿真分析, 无法对材料的累积损伤进行预测和仿真, 李正雄等^[24]基于理论研究和试验分析建立的高分子材料累积损伤模型在现有的有限元仿真软件上进行了二次开发, 对不同贮存环境下、不同种类/结构的橡胶材料各种性能的累积损伤变化开发仿真软件, 按软件模型库里对应的模型自动计算处理, 绘制损伤量值的变化曲线, 将薄弱环节材料的损伤过程直观可视化展示。

开发的“弹用高分子材料贮存累积损伤仿真软件”主要分为 2 部分: 商用有限元仿真软件 ABAQUS 的二次开发; 高分子材料累积损伤仿真软件的开发。软件开发的总体系统构架和 workflow 如图 3 所示。机械载荷在 ABAQUS 软件中手动施加于模型上^[25], 主要包括位移约束条件和力边界载荷。材料的环境载荷从材料环境载荷数据库中读取和施加, 此时需对所选取的材料环境载荷按一定规则进行拆分, 转换成多种工况组合的热边界条件。

橡胶材料累积损伤仿真的第二步为累积损伤仿真软件开发, 这一步需在第一步 ABAQUS 软件计算结果的基础上开展。根据第一步计算得到的热固耦合多工况仿真结果, 开发材料参数模块、疲劳损伤表征参数模块、模型定义模块、仿真参数设定模块、材料环境载荷谱还原模块等。最后定义时间步长后进行高分子材料累积损伤仿真。

ABAQUS 计算完成后, 输出橡胶材料模型的热

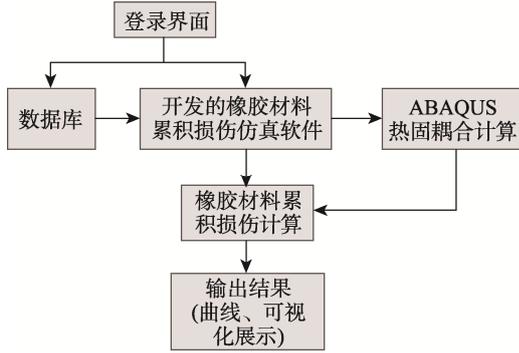


图3 仿真软件系统构架和工作流程
Fig.3 System architecture and workflow of simulation software

固耦合结果。此时，累积损伤仿真软件根据 ABAQUS 的计算结果，并调用材料数据库、材料损伤数据库中的相关参数，依据还原的环境载荷响应谱进行高分子材料的累积损伤计算，仿真软件部分界面如图 4 所示。

3 橡胶材料累积损伤仿真软件应用

利用开发的仿真软件计算 5171 丁腈橡胶、5860 硫化橡胶、19901 三元乙丙橡胶、6141 硅橡胶在低温段（50、70 °C）下的累积损伤，与该温度下的实际性能测试值进行对比，误差都小于 15%，对比曲线如图 5 所示。同时利用仿真软件计算 5171 丁腈橡胶在



图4 仿真软件部分界面
Fig.4 Interface of simulation software

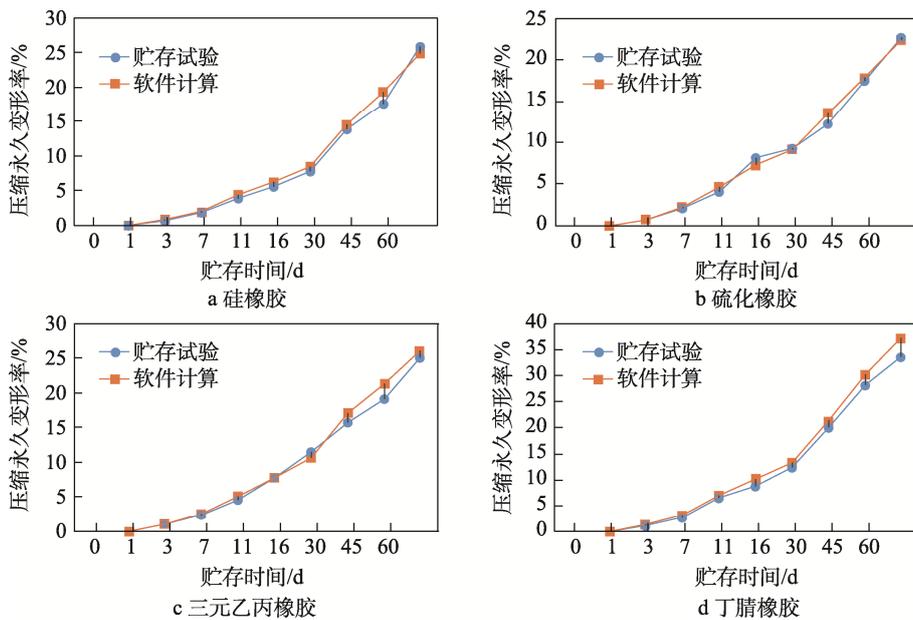


图5 仿真软件预测值对实测值曲线对比
Fig.5 Curve comparison between predicted value and measured value: a) silicone rubber; b) vulcanized rubber; c) EPDM rubber; d) nitrile rubber

南方某地(年平均温度为 25.7 °C)环境下贮存 10 a 后的累积损伤, 与实际贮存 10 a 后的实测值进行对比, 验证仿真软件的可行性和准确性。通过模型计算, 丁腈橡胶密封圈在 25.7 °C 下贮存 10 a 后, 受压方向截面尺寸为 2.87 mm, 而同型号密封圈在南方某地自然环境(25.7 °C)下贮存 10 a 后测得的受压方向截面尺寸平均值为 2.59 mm, 误差为 10.8%。按照仿真软件预测计算结果, 5171 丁腈橡胶密封圈在贮存过程中的损伤变化云图如图 6 所示。

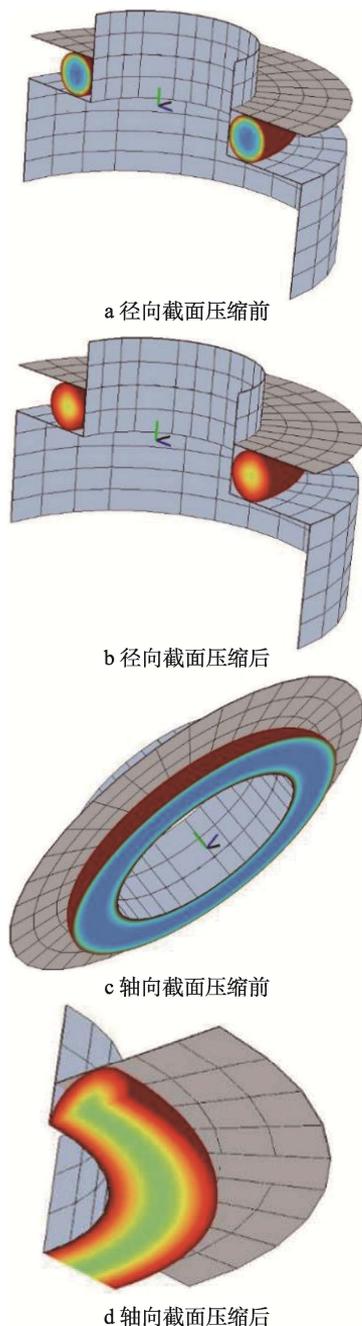


图 6 橡胶密封圈累积损伤压缩永久变形率仿真
Fig.6 Simulation of cumulative damage compression permanent deformation rate of rubber seal ring:
a) before radial section compression; b) after;
c) before axial section compression; d) after

4 结论

本文通过分析橡胶密封圈在贮存过程中的损伤机制, 建立了橡胶材料贮存累积损伤模型。在此基础上, 设计开发了一套针对橡胶材料在贮存过程中累积损伤仿真预测的仿真软件, 对橡胶材料贮存累积损伤进行了仿真和预测, 可以得出以下结论:

1) 本文采用加速试验的方法对橡胶材料的压缩永久变形率在变温条件下随时间的变化关系进行了研究, 通过理论推导和试验数据支持, 获得了橡胶材料贮存累积损伤模型, 利用开发的计算机仿真软件, 对橡胶材料贮存累积损伤进行了仿真计算和可视化展示。

2) 建立了一套橡胶材料系统仿真方法, 通过将仿真预测数据和实际测试数据进行对比发现, 软件仿真计算结果准确度较高。该方法可以较好地预测橡胶材料累积损伤, 缩短了试验时间, 提高了累积损伤预测的效率, 并且降低了试验成本。

3) 通过对橡胶材料累积损伤的仿真, 可以较地对橡胶材料实际贮存过程中的性能变化作出分析, 从而指导弹药密封、减震结构环境适应性设计和结构设计、材料选择, 具有较好的实际应用前景。

参考文献:

- [1] 陈放, 徐健. 圆板式橡胶支座力学破坏机理仿真分析[J]. 重庆建筑, 2020, 19(10): 39-41.
CHEN F, XU J. Simulation Analysis on Mechanical Failure Mechanism of Circular Plate Rubber Bearing[J]. Chongqing Architecture, 2020, 19(10): 39-41.
- [2] 王凤, 陈国栋, 陈军, 等. CAE 技术在高分子材料齿轮箱设计中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(5): 33-38.
WANG F, CHEN G D, CHEN J, et al. Application of CAE Technology in Design of Polymer Material Gear Box[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(5): 33-38.
- [3] 白文娟, 成涛, 王敏, 等. 新型空腔结构下的橡胶高温磨损测试温度场的仿真研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 80-85.
BAI W J, CHENG T, WANG M, et al. Simulation Study on Temperature Field of High-Temperature Abrasion Test of Rubber under Novel Cavity Structure[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 80-85.
- [4] 刘柏兵, 温泰斗, 卜继玲, 等. 仿真分析技术在橡胶弹簧硫化时间设计中的应用[J]. 橡胶工业, 2018, 65(9): 965-970.
LIU B B, WEN T D, BU J L, et al. Application of Simulation Analysis Technology in Curing Time Design of Rubber Spring[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(9): 965-970.
- [5] STEFEK T, DAUGHERTY W, SKIDMORE E. Status

- Report for Aging Studies of EPDM O-Ring Material for the H1616 Shipping Package[R]. [s. l.]: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2012.
- [6] 张凯, 王丰, 朱蕾, 等. 丁腈橡胶 5171 密封件热氧老化研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 1-4.
ZHANG K, WANG F, ZHU L, et al. Thermal-Oxidative Aging of Nitrile Rubber 5171 Sealing Element[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 1-4.
- [7] 杨晓红, 许进升, 周长省, 等. 三元乙丙橡胶热氧老化后的力学性能[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(2): 126-130.
YANG X H, XU J S, ZHOU C S, et al. Microcosmic Structure and Mechanics Performance of EPDM Rubber in Hot-Oxygen Aging[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(2): 126-130.
- [8] 刘文钊, 余剑, 张聚伟, 等. 多孔物质气固反应动力学研究[J]. 中国科学: 化学, 2012, 42(8): 1210-1216.
LIU W Z, YU J, ZHANG J W, et al. Kinetic Study of Reaction of Porous Solids[J]. Scientia Sinica Chimica, 2012, 42(8): 1210-1216.
- [9] 朱敏, 徐子剑, 黄桂. 变温条件下的高分子材料热老化估算方法[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(5): 11-14.
ZHU M, XU Z J, HUANG G. The Estimation of Thermal Aging of Polymer Materials Based on Variable Temperature Conditions[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(5): 11-14.
- [10] 任宁, 张建军. 热分析动力学数据处理方法的研究进展[J]. 化学进展, 2006, 18(4): 410-416.
REN N, ZHANG J J. Progress in Datum Treatment Methods of Thermal Analysis Kinetics[J]. Progress in Chemistry, 2006, 18(4): 410-416.
- [11] 蔡祖光. O 形橡胶密封圈及其应用[J]. 砖瓦世界, 2019(6): 39-49.
CAI Z G. O-Shaped Rubber Seal Ring and Its Application[J]. Brick & Tile World, 2019(6): 39-49.
- [12] 肖坤, 顾晓辉. 某弹用 O 型密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 59-61.
XIAO K, GU X H. Thermal Oxidation Aging Test and Life Assessment of Bullet O-Ring[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 59-61.
- [13] 成勇, 张欣, 刘宇, 等. GIS 设备气密封 O 型圈老化及其使用寿命的试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 88-94.
CHENG Y, ZHANG X, LIU Y, et al. Research on Aging and Working Life of the O Type Sealing Ring Used in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 88-94.
- [14] 张凯, 马艳, 衣志勇, 等. O 形三元乙丙橡胶密封圈的使用寿命预测[J]. 橡胶工业, 2014, 61(12): 746-749.
ZHANG K, MA Y, YI Z Y, et al. Lifetime Prediction of EPDM O-Ring[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(12): 746-749.
- [15] 王杰, 张跃. 高低温环境对丁腈橡胶 O 形圈密封性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 148-152.
WANG J, ZHANG Y. Influence of High and Low Temperature Environment on Sealing Performance of Nitrile Butadiene Rubber O-Ring[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(8): 148-152.
- [16] VYAZOVKIN S, CHRISAFIS K, DI LORENZO M L, et al. ICTAC Kinetics Committee Recommendations for Collecting Experimental Thermal Analysis Data for Kinetic Computations[J]. Thermochimica Acta, 2014, 590: 1-23.
- [17] 刘畅. GAP 热分解机理函数研究[J]. 中国新技术新产品, 2009(9): 233-234.
LIU C. Study on Thermal Decomposition Mechanism Function of GAP[J]. China New Technologies and Products, 2009(9): 233-234.
- [18] 刘博, 乔桂玉, 许健, 等. 低温液体火箭发动机高压静密封有限元分析[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 39-45.
LIU B, QIAO G Y, XU J, et al. FEM Analysis on High-Pressure Static Sealing of Low-Temperature Liquid Rocket Engine[J]. Structure & Environment Engineering, 2010, 37(6): 39-45.
- [19] 谌彪, 张赞牢, 杨建勇, 等. 静密封条件下 Y 形橡胶密封圈有限元分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 72-75.
CHEN B, ZHANG Z L, YANG J Y, et al. Finite Element Analysis on Rubber Sealing Y-Ring in the Condition of Static Seal[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(3): 72-75.
- [20] 韩传军, 张杰. 往复密封用 X 形圈的优化设计及有限元分析[J]. 液压与气动, 2012, 36(10): 76-79.
HAN C J, ZHANG J. Optimization and Finite Element Analysis on X-Ring of Reciprocating Seals[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012, 36(10): 76-79.
- [21] 刘俊. 基于 ANSYS 的橡胶 O 型密封圈仿真分析[J]. 工业技术创新, 2016, 3(6): 1088-1090.
LIU J. Simulation Analysis on O-Type Rubber Sealing Ring Using ANSYS[J]. Industrial Technology Innovation, 2016, 3(6): 1088-1090.
- [22] 吴健, 张传兵, 王友善, 等. 航空用三元乙丙橡胶的拉伸/压缩力学行为研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65(11): 1210-1213.
WU J, ZHANG C B, WANG Y S, et al. Research on Tensile/Compression Mechanical Behavior of EPDM for Aviation Applications[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(11): 1210-1213.
- [23] 张晓东, 余鑫, 张毅, 等. 基于 ABAQUS 的橡胶密封圈应力松弛分析[J]. 润滑与密封, 2020, 45(1): 124-128.
ZHANG X D, YU X, ZHANG Y, et al. Stress Relaxation Analysis of Rubber Sealing Ring Based on ABAQUS[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(1): 124-128.
- [24] 康凤举, 华翔, 李宏宏, 等. 可视化仿真技术发展综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5310-5313.
KANG F J, HUA X, LI H H, et al. Overview of Development of Visualization Simulation Technology[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5310-5313.
- [25] Thinks. Abaqus Analysis User's Manual Version 6.7[K]. Guangzhou: Thinks, 2007.