

# 核电厂循环水系统橡胶膨胀节 寿命预测与研究

许小斌<sup>1</sup>, 薛春旭<sup>2\*</sup>, 韩传伟<sup>2</sup>, 朱雅洁<sup>2</sup>, 杨龙龙<sup>1</sup>

(1. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500; 2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 核电厂循环水系统(CRF)橡胶膨胀节是保障冷却系统安全运行的关键部件,其寿命预测对机组可靠性至关重要。本文以某核电厂DN2800橡胶膨胀节为研究对象,系统开展了多场耦合环境下的老化行为与寿命预测研究。通过热氧老化、海水浸泡及盐雾老化,结合加速老化试验、DAKIN动力学模型外推、指数衰减模型及有限元结构仿真等,对膨胀节寿命与结构可靠性进行了综合评估。研究表明:基于拉断伸长率作为失效判据,DAKIN动力学模型及指数衰减模型预测在30℃服役温度下,膨胀节各层材料的寿命在25.2~30.9年之间。有限元分析证实其在设计工况(0.6 MPa内压与±25 mm轴向位移)下的最大应力与应变远低于材料失效阈值,疲劳试验亦验证其优异的抗循环变形能力。

**关键词:** 橡胶膨胀节;寿命预测;有限元分析;核电厂;循环水系统

**引用论文:** 许小斌,薛春旭,韩传伟,等.核电厂循环水系统橡胶膨胀节寿命预测与研究[J].橡塑技术与装备,2026,52(6):09-13.

**中图分类号:** TQ330.46

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2026)06-0009-05

**DOI:**10.13520/j.cnki.rpte.2026.06.003

## 0 引言

核电厂作为能源供应的关键基础设施,其运行的安全性与可靠性是公众与行业的首要关切。循环水系统(CRF)承担着为凝汽器提供持续冷却水源的核心任务,是保障二回路热阱功能、防止机组跳闸的“生命线”系统。橡胶膨胀节因其优异的弹性补偿能力、良好的密封性和较低的维护成本,在该系统中被广泛应用。然而,CRF系统橡胶膨胀节的服役环境复杂,需承受温度、内部海水、盐雾,以及轴向位移振动等的作用,这些因素共同构成了一个复杂的多场耦合老化体系,导致橡胶材料发生性能衰退,承压能力丧失,最终可能引发泄漏事故,威胁机组安全。当前,对于橡胶膨胀节寿命的管理,核电厂普遍依赖于制造商提供的保守设计寿命(通常为10年)和定期的目视检查。然而,大量群厂运行经验反馈表明,部分膨胀节的实际服役状态远好于预期,而另一些则过早出现失效迹象。这种差异源于实际工况与设计假设的偏离,以及橡胶材料在特定环境下老化行为的复杂性<sup>[1-3]</sup>。因此,本文以某核电厂CRF系统DN2800橡胶膨胀节为研究对象,通过热氧老化、海水浸泡及盐雾老化,结合加速老化试验、DAKIN动力学模型外推、指数衰减模型及有限元结构仿真等,系统开展了多场耦合环境下的

老化行为与寿命预测研究。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

氯丁橡胶(CR)与三元乙丙橡胶(EPDM),江苏永和高分子技术有限公司产品。

### 1.2 主要设备和仪器

WDW-10型电子万能试验机,上海百若试验仪器有限公司产品;MZ-4003B1立式疲劳试验机,江苏明珠试验机械有限公司;GT-7017-ELU热空气老化箱,高铁检测仪器有限公司;GT-SC-60A盐雾试验箱,高铁检测仪器有限公司。

### 1.3 试样制备

将氯丁橡胶(CR)和三元乙丙橡胶(EPDM)胶片按照标准GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》和GB/T 1688—t2008《硫化橡胶 伸张疲劳的测定》的要求,裁制为II型哑铃试样用于拉伸性能测试和疲劳性能测试。

**作者简介:** 许小斌(1979—),男,高级工程师,本科,主要从事核电厂机械设备管理工作。

\* 为通讯作者

## 1.4 试验过程

现场所使用的橡胶膨胀节外层均为三元乙丙橡胶，内层接触海水环境的为氯丁橡胶，接触盐雾环境

的为三元乙丙橡胶。故针对外层三元乙丙橡胶和内层氯丁橡胶，根据表 1 设置的试验环境及试验温度开展加速热老化试验。

表 1 加速热老化试验环境设置

橡胶层位置	橡胶材质	介质环境	试验温度 / °C
外层橡胶	三元乙丙橡胶 (EPDM)	空气	95/105/115/125
内层橡胶	氯丁橡胶 (CR)	海水	65/75/85/95

每个温度每个时间点取出 3 片试样，热老化时间预计进行 64 天（不足 60 天时以试样性能较初始性能降低 50% 为试验终止时间），设置 13 个取样点，取样

点设置为“前密后疏”的方式，具体试验时间具体设置见表 2。

表 2 热老化箱试验温度

老化温度 / °C	老化持续时间 / 天												
	1	2	4	8	12	16	20	26	32	40	48	56	64
$T_1$ (27pcs)	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs
$T_2$ (24pcs)	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs
$T_3$ (21pcs)	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs
$T_4$ (21pcs)	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs	3pcs

当到达取样时间点时打开热老化试验箱并将样品取出，用镊子从中取出 1 组试样，随后将热老化箱关闭并继续试验，直至所有老化试验完成。

针对内层三元乙丙橡胶，采用盐雾老化试验箱模拟加速老化环境。依据 GB/T 35858—2018 标准，配制质量分数为 5%、pH 值为 6.5~7.2 的氯化钠溶液。设定试验箱温度为 35 °C，将试样置于箱内支架上，与垂直方向呈 15°~30° 角。老化周期设定为 0、1、2、4、7、14、21、28、35、42、49、56、63 天。每个周期结束后，取出试样，用蒸馏水冲洗干净并吹干，在标准实验室温度 (23±2 °C) 下调节 16 h 后进行密度、硬度与拉伸性能测试。

## 1.5 性能测试

依据 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》开展拉伸性能测试。

依据 GB/T 1688—2008《硫化橡胶 伸张疲劳的测定》开展疲劳性能测试。

## 1.6 寿命预测动力学模型

对于由温度主导的热氧老化过程，采用经典的 DAKIN 模型，其本质是基于 Arrhenius 方程的化学反应速率模型。该模型假设材料性能衰减速率与温度的关系遵循：

$$\ln t = \ln \left( \frac{f^{-1}(P)}{A} \right) + \frac{E_a}{2.303R} \cdot \frac{1}{T} \quad (1)$$

其中， $t$  为达到某一性能水平  $P$  所需的时间； $A$  为

指前因子， $E_a$  为反应活化能 (J/mol)； $R$  为理想气体常数 (8.314 J/(mol·K))； $T$  为绝对温度 (K)。

通过在不同温度下进行加速老化，得到材料性能保留率（如  $P/P_0=0.5$ ，即性能衰减至初始值的 50%）与老化时间的关系。以  $\ln t$  对  $T$  作图 (Arrhenius 图)，可得到一条直线，其斜率为  $E_a/(2.303R)$ ，截距为  $\ln(f^{-1}(P)/A)$ 。利用该直线外推至实际服役温度 (30 °C)，即可得到预测的服役寿命。

对于盐雾老化，由于温度恒定，其性能衰减主要与时间相关，可采用指数衰减模型进行拟合：

$$R(t) = R_0 e^{-kt} \quad (2)$$

其中， $R(t)$  为  $t$  时刻的性能值， $R_0$  为初始性能值， $k$  为衰减速率常数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 加速老化试验结果与寿命预测

图 1 展示了三元乙丙橡胶和氯丁橡胶在加速老化条件下拉断伸长率保留率的变化规律。从图中可以看出，两种橡胶的拉断伸长率保留率均随老化时间的延长而下降，且温度越高，下降速率越快，符合化学反应动力学的基本规律。

各温度条件下，采用 ORIGIN 获取数据的拟合方程，并将样品失效临界值（本试验为拉断伸长率为原始值的 50%）代入各温度下拟合方程，求得各温度下寿命终止时间  $t_c$ ，详见表 3 和表 4。

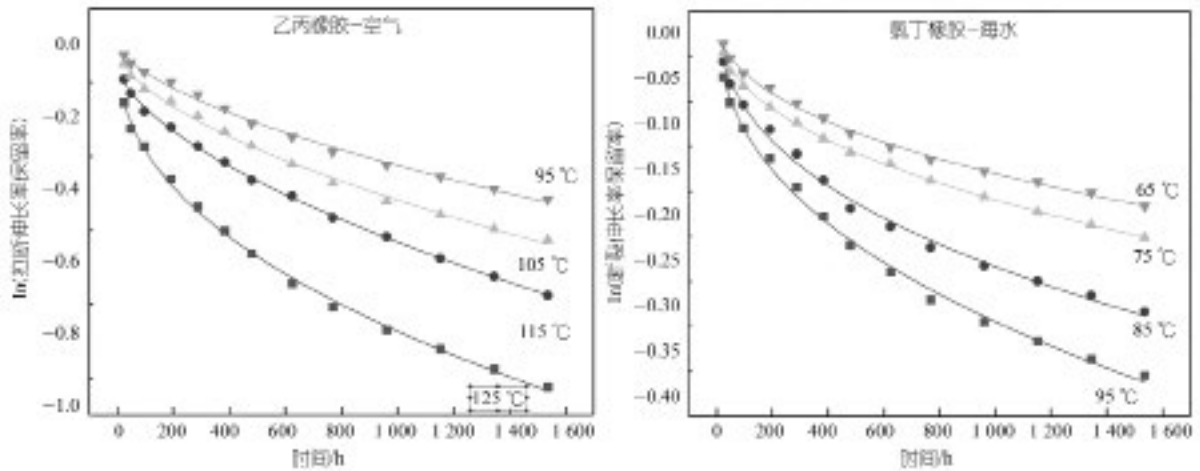


图1 三元乙丙橡胶和氯丁橡胶拉断伸长率ln值与老化时间关系曲线

表3 外层三元乙丙橡胶拟合方程及寿命终止时间

实验温度 $T/^\circ\text{C}$	拟合方程	终止时间 $t_c$
95	$y=0.01192-0.00522x^{0.60335}$	3 398
105	$y=-0.00705-0.00686x^{0.59265}$	2 370
115	$y=-0.04812-0.00744x^{0.60444}$	1 608
125	$y=-0.01034-0.03526x^{0.44513}$	779

表4 内层氯丁橡胶拟合方程及寿命终止时间

实验温度 $T/^\circ\text{C}$	拟合方程	终止时间 $t_c$
65	$y=0.02586-0.00997x^{0.4198}$	26 669
75	$y=0.01432-0.00942x^{0.44153}$	17 704
85	$y=0.04028-0.02014x^{0.39055}$	9 947
95	$y=0.02975-0.02079x^{0.40867}$	5 906

通过试验温度  $T$  和拟合方程得到的寿命终止时间  $t_c$  建立函数关系, 数据见表5和表6。

将上表数据采用 Origin 软件进行线性拟合 (linear fit), 拟合图见图2。

表5 外层三元乙丙橡胶实验温度与终止时间数据表

编号	实验温度 $T/^\circ\text{C}$	绝对温度 /K	终止时间 $t_c$	$X=1/(T+273)$	$Y=\log t_c$
1#	65	338	3 397.952 97	0.002 717	3.531 217
	75	348	2 370.155 73	0.002 645 503	3.374 776 882
	85	358	1 607.98 495	0.002 577 32	3.20 628 198
	95	368	778.62 011	0.002 512 563	2.891 325 616

表6 内层氯丁橡胶实验温度与终止时间数据表

编号	实验温度 $T/^\circ\text{C}$	绝对温度 /K	终止时间 $t_c$	$X=1/(T+273)$	$Y=\log t_c$
1#	65	338	26 669.064 87	0.002 958 58	4.426 007 788
	75	348	17 704.408 95	0.0028 735 63	4.248 081 433
	85	358	9 946.934 19	0.0027 932 96	3.997 689 245
	95	368	5 906.251 26	0.0027 173 91	3.771 311 918

图2中拟合直线方程的  $c$ 、 $d$  及  $R^2$  值见表7和表8。

表7 外层三元乙丙橡胶拟合直线方程的  $a$ 、 $d$  及  $R^2$

方程	$c$	$d$	$R^2$
$Y=c+dX$	-4.706 6	3 045.123 88	0.96

表8 内层氯丁橡胶拟合直线方程的  $a$ 、 $d$  及  $R^2$

方程	$c$	$d$	$R^2$
$Y=c+dX$	-3.686	2 749.659 53	0.99

通过上表拟合直线方程可预估各温度下的寿命,

寿命预测见表9和表10。

综上, 以拉断伸长率为老化特征指标, 当服役环境的平均温度为  $30^\circ\text{C}$  时, 外层三元乙丙橡胶的寿命约为 25.2 年, 内层氯丁橡胶的寿命约为 27.9 年。

对于盐雾环境下的三元乙丙橡胶, 以拉断伸长率保留率  $R(\sigma_t)$  为例, 对  $\ln(R(\sigma_t))$  与时间  $t$  进行线性拟合, 得到图3。拟合曲线的线性相关系数  $R^2$  可达 0.99, 表明指数衰减模型能精确描述三元乙丙橡胶在盐雾环境下的老化行为。

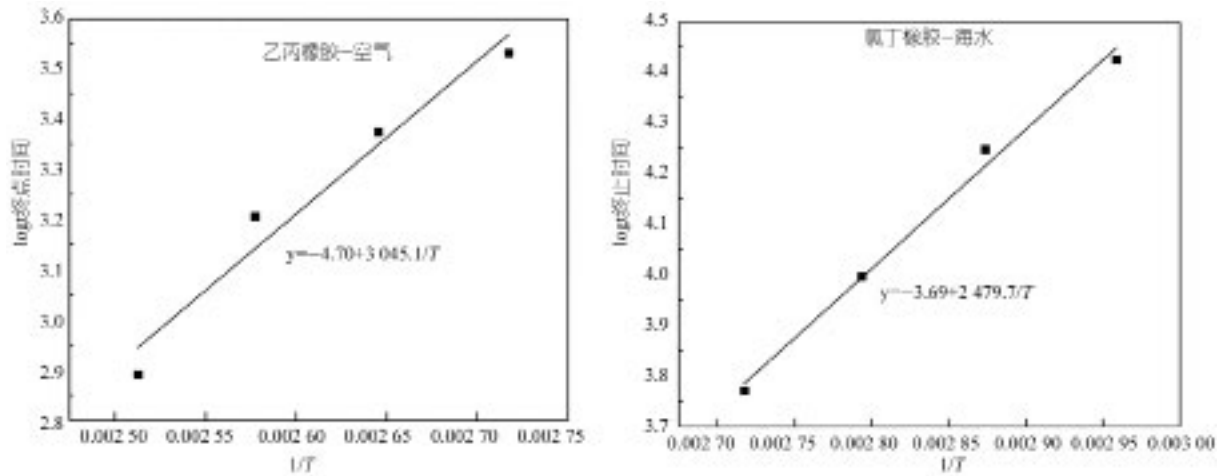


图2 寿命曲线线性拟合

表9 外层三元乙丙橡胶在不同温度条件下寿命

方程	温度 $T/^\circ\text{C}$	$X=1/(T+273)$	$y$	寿命/h	寿命/a
$Y=-4.7066+3.045.12388X$	30	0.003300	5.3433	220451.9	25.2
	35	0.003247	5.1802	151413.9	17.3
	40	0.003195	5.0222	105252.0	12.0

表10 内层氯丁橡胶在不同温度条件下寿命

方程	温度 $T/^\circ\text{C}$	$X=1/(T+273)$	$y$	寿命/h	寿命/a
$Y=-3.686+2.749.65953X$	30	0.003300	5.3888	244784.5	27.9
	35	0.003247	5.2415	174367.7	19.9
	40	0.003195	5.0989	125561.0	14.3

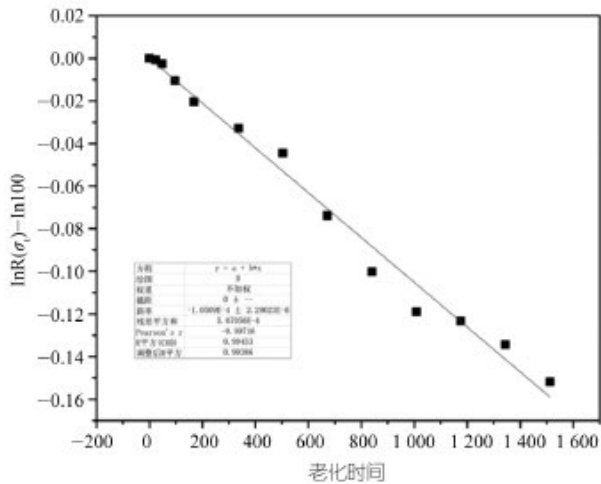


图3 拉伸伸长率保留率的指数模型拟合

拟合得到的老化速率常数  $k=0.000159$ 。将寿命终点  $R(\sigma_t)=50\%$  代入模型，计算得到加速老化条件下的寿命： $t_{acc}=-\ln(0.5)/k \approx 6596$  h。

盐浓度加速因子： $AF_c=5\%/0.2\%=25$

温度加速因子（实际温度  $30^\circ\text{C}$ ，试验温度  $35^\circ\text{C}$ ）： $AFT=\exp[(77000/8.314) \times (1/303.15 - 1/308.15)] \approx 1.64$

总加速因子： $AF=25 \times 1.64=41$

因此，推算的实际服役寿命为：

$$t_{servic}^e = t_{acc} \times AF = 6596 \text{ h} \times 41 = 270436 \text{ h} \approx 30.9 \text{ 年}$$

## 2.2 结构可靠性预测

### 2.2.1 有限元分析

利用 Abaqus 软件建立 DN2800 膨胀节的二维轴对称模型，采用 Mooney-Rivlin 本构模型描述橡胶材料的超弹性。施加最严苛的设计组合工况：0.6 MPa 内压与 25 mm 轴向位移。分析结果如图 4 所示。



图4 膨胀节 0.6 MPa 内压与 25 mm 轴向位移应力和变形计算结果

最大 Mises 应力出现在橡胶膨胀节的波谷内侧，数值为 1.595 MPa，最大应变数值为 25.89 mm。该值远低于三元乙丙橡胶和氯丁橡胶的拉伸性能下限值，表明即使在设计寿命末期，材料性能有所下降，膨胀节仍有足够的安全裕度来承受正常工况下的载荷，不

会发生瞬时爆破失效。

### 2.2.2 疲劳试验

分别对加速热老化后的三元乙丙橡胶和氯丁橡胶试样进行疲劳试验，在 50% 的应变下，以 300 r/min 的频率循环 30 万次。

表 11 橡胶样品伸张疲劳测试结果

橡胶种类	样品编号	变形量	30 万次伸张疲劳结果
EPDM	EPDM-1 <sup>#</sup>	50%	未断裂
	EPDM-2 <sup>#</sup>		未断裂
	EPDM-3 <sup>#</sup>		未断裂
CR	CR-1 <sup>#</sup>		未断裂
	CR-2 <sup>#</sup>		未断裂
	CR-3 <sup>#</sup>		未断裂

根据表 11 可知，试样经 30 万次伸张疲劳后，均未出现断裂。这表明膨胀节橡胶材料能够充分适应 CRF 系统因启停、温变等引起的轴向位移循环，疲劳失效风险极低。

### 3 结论

本文通过对某核电厂循环水系统（CRF）橡胶膨胀节进行系统性的加速寿命试验和结构可靠性分析，得出以下主要结论：

(1) 基于 DAKIN 动力学模型及指数衰减模型，预测在 30 °C 服役温度下，膨胀节各层材料的寿命在 25.2~30.9 年之间，远高于 10 年的设计值。该模型为核电厂制定科学的检修和更换策略提供了量化依据。

(2) 有限元分析与疲劳试验共同证实，在设计工况下，膨胀节的应力水平远低于材料失效阈值，且具备优异的抗循环变形能力。

#### 参考文献：

- [1] 何星, 伍曾, 张馨艺, 等. 中性盐雾环境下橡胶材料断裂及疲劳裂纹扩展速率研究 [J]. 材料导报, 2025, 39(S1): 719-723.
- [2] 闫杰, 李长虹. 南海热带海洋环境下氯丁橡胶电缆护套老化机理研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2025, 43(3): 50-54.
- [3] 马建设, 张鹏瑶, 杨富民, 等. 高分子橡胶材料老化的原因和改善措施 [J]. 新型工业化, 2022, 12(12): 209-212.

## Life prediction and research on rubber expansion joints in the circulating water system of nuclear power plants

Xu Xiaobin<sup>1</sup>, Xue Chunxu<sup>2\*</sup>, Han Chuanwei<sup>2</sup>, Zhu Yajie<sup>2</sup>, Yang Longlong<sup>1</sup>

(1. Yangjiang Nuclear Power Co. LTD., Yangjiang 529500, Guangdong, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. LTD., Suzhou 215004, Jiangsu, China)

**Abstract:** The rubber expansion joint of the circulating water system (CRF) in nuclear power plants is a crucial component for ensuring the safe operation of the cooling system, and its lifespan prediction is vital for the reliability of the unit. This paper focuses on the DN2800 rubber expansion joint of a certain nuclear power plant and systematically investigates its aging behavior and lifespan prediction under a multi-field coupled environment. Through thermal-oxidative aging, seawater immersion, and salt spray aging, combined with accelerated aging tests, DAKIN kinetic model extrapolation, exponential decay model, and finite element structural simulation, a comprehensive evaluation of the lifespan and structural reliability of the expansion joint is conducted. The research results indicate that, based on the tensile elongation at break as the failure criterion, the DAKIN kinetic model and exponential decay model predict that the lifespan of each layer material of the expansion joint ranges from 25.2 to 30.9 years at a service temperature of 30°C. Finite element analysis confirms that under design conditions (0.6 MPa internal pressure and ±25 mm axial displacement), the maximum stress and strain are far below the material failure threshold, and fatigue tests also verify its excellent resistance to cyclic deformation.

**Key words:** rubber expansion joint; life prediction; finite element analysis; nuclear power plant; circulating water system

(R-03)