

## 止脱弹簧的蠕变行为与贮存寿命预测\*

孔繁杰<sup>1</sup>, 崔辉如<sup>2</sup>, 刘夏杨<sup>1</sup>, 闫路<sup>1</sup>, 季宝锋<sup>1</sup>

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**根据止脱弹簧的受力模式和失效机理,设计了止脱弹簧的蠕变老化试验装置,对止脱弹簧进行了蠕变加速老化试验,利用图像测量技术研究了载荷和温度对止脱弹簧自由端蠕变行为的影响规律。进一步,基于 Arrhenius 方程建立了止脱弹簧在力-热联合载荷下的蠕变动力学方程,预测了止脱弹簧的使用寿命。研究表明:止脱弹簧的蠕变位移是一个随时间变化的单调非减函数;环境温度和载荷水平的提高都会加速止脱弹簧的蠕变。所提方法和相关结论可为蠕变型止脱弹簧的设计和寿命预测提供参考。

**关键词:**止脱弹簧;蠕变;Arrhenius 方程;寿命预测

**中图分类号:**V435 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-074-06

## Creep behavior and life predication for anti-detaching spring

KONG Fanjie<sup>1</sup>, CUI Huiru<sup>2</sup>, LIU Xiayang<sup>1</sup>, YAN Lu<sup>1</sup>, JI Baofeng<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China;

2. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** According to the loading mode and failure mechanism of a certain anti-detaching spring, a testing device for creep of anti-detaching spring was designed and manufactured. The creep accelerated aging test was done, and the effect of the temperature and loading on the creep behavior of anti-detaching spring was investigated with image measuring technology. Furthermore, the creep kinetic equation of anti-detaching spring subjected to loading and temperature based on Arrhenius equation was derived to predict the service life of the anti-detaching spring. The results show that the displacement of the spring due to creep is a monotonic non-decreasing function of time. Increasing the temperature or initial preload will result in accelerating its creep displacement. The method and conclusion may be helpful in creep anti-detaching spring design and life prediction.

**Key words:** anti-detaching spring; creep; Arrhenius equation; life predication

弹簧是机械产品中应用十分广泛的通用基础性零件<sup>[1]</sup>,也是现代的重要元器件。本文涉及的止脱弹簧主要起固定作用,防止结构异常脱出或滑动。当结构处于贮存状态时,止脱弹簧处于受力状态。随着时间的推移,弹簧会发生蠕变,导致自由端位置发生移动,弹簧止脱功能失效。因此,止脱弹簧自由端在受力状态下的位移是决定弹簧寿命的主要指标参数,当位移蠕变到一定量时,止脱弹簧功能失效。所以,可以通过研究加速贮存状态下弹簧的蠕变行为,对止脱弹簧进行寿命预估。

弹簧的松弛行为及其松弛寿命一直是学者们研究的热点问题之一<sup>[2-7]</sup>。李迪凡等<sup>[8]</sup>针对尾翼轴压和扭转弹簧的失效情况,设计并制造了测量扭转力和轴向力的应力松弛试验装置,利用该装置对尾翼用弹簧进行了高温加速老化试验,对弹簧在室温条件下的贮存寿命进行了评估。张保山

等<sup>[9]</sup>对 60Si2Mn 螺旋压缩弹簧进行了应力松弛试验研究,建立了不同温度、应变水平条件下的松弛型动力学方程,为螺旋压缩弹簧的寿命评判提供了可靠的试验依据。白明远等<sup>[10]</sup>采用高温加速试验方法,对 65Mn 螺旋弹簧的贮存寿命进行了试验研究,讨论了试验温度、试验时间对弹簧应力松弛的影响,并根据 Arrhenius 方程推出的寿命与温度的关系,得到了 65Mn 弹簧的贮存寿命。然而,关于加速贮存状态下弹簧蠕变问题的研究还鲜有报道。因此,对止脱弹簧进行加速贮存条件下的蠕变寿命研究有着重要的理论和实际意义。

本文根据止脱弹簧的失效模式,设计了止脱弹簧蠕变试验装置,通过对止脱弹簧的加速贮存试验,研究了贮存温度和载荷对止脱弹簧蠕变行为的影响,根据试验结果建立了止脱弹簧的加速老化模型,为止脱弹簧的寿命预估提供了依据。

\* 收稿日期:2016-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11132012)

作者简介:孔繁杰(1976—),女,吉林白城人,高级工程师,硕士,E-mail:king\_jii@163.com

# 1 蠕变加速老化试验

## 1.1 试验装置

试验用止脱弹簧如图1所示。根据止脱弹簧的受力方式和失效模式,设计了图2所示的止脱弹簧蠕变试验装置,用于模拟止脱弹簧的受力状态。止脱弹簧的一端(固定端)和中部用固定螺母固定,另一端(自由端)用连接装置与砝码连接,用于模拟受载情况。以上部件都固定在同一固定装置上,并将其放置在试验温箱中。



图1 止脱弹簧

Fig. 1 Anti-detaching spring

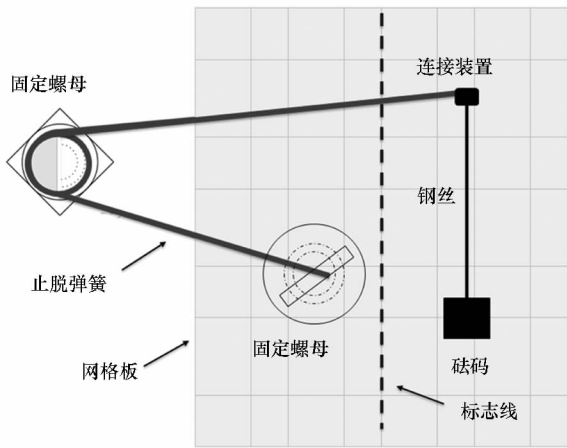


图2 止脱弹簧加速试验装置

Fig. 2 Accelerating test of anti-detaching spring

## 1.2 测量原理

由于止脱弹簧的位移变化十分微小,普通的测量装置难以精确测量其位移。传统的机械测量方法,在高温时容易产生变形,不宜作为本试验的测量仪器。为了能够在高温下进行高精度的测量,采用网格板定位的方法对止脱弹簧的位移进行精确测量。

图3所示背景为网格板,该网格板由矩形块组合而成,矩形的边长分为0.2 mm和0.3 mm两种,并且按照固定的方式排列。该网格板采用耐高温玻璃材质,在200 °C的高温环境下基本不变形,测量精度可以达到0.1 mm。在测量开始时,将止脱弹簧自由端的初始位置作为零点位置,在

网格板上进行标记。根据试验要求,在固定时间点对止脱弹簧自由端的位置进行标记,两个位置间的距离就是止脱弹簧自由端的位移。为了能够分辨出清晰的图像,采用高分辨率相机进行图像采集。

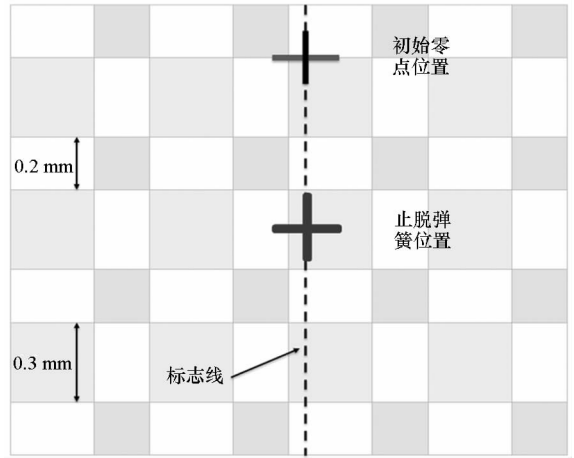


图3 测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test

## 1.3 试验方案设计

止脱弹簧蠕变加速贮存试验条件包含贮存温度和载荷。根据国内外文献调研情况,设立4个贮存温度:90 °C,120 °C,150 °C和180 °C;3个载荷级别:7.84 N,9.31 N和10.78 N。双因素组合后为12个试验工况,每个工况3个样本。试验时,将整套试验装置放在温箱中,待环境温度稳定后,分别进行不同温度条件下的加速贮存试验,定期测量不同载荷下弹簧自由端的位移情况,位移测量方案见表1。

表1 位移测量方案

Tab. 1 Displacement measurement scheme

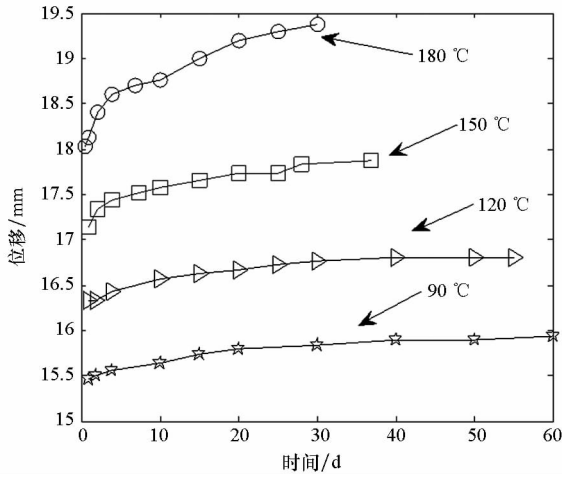
试验温度/°C	测量时间/d									
90	1	2	4	10	15	20	30	40	50	60
120	1	2	4	10	15	20	25	30	40	50
150	1	2	4	7	10	15	20	25	30	35
180	0.5	1	2	4	7	10	15	20	25	30

# 2 试验结果

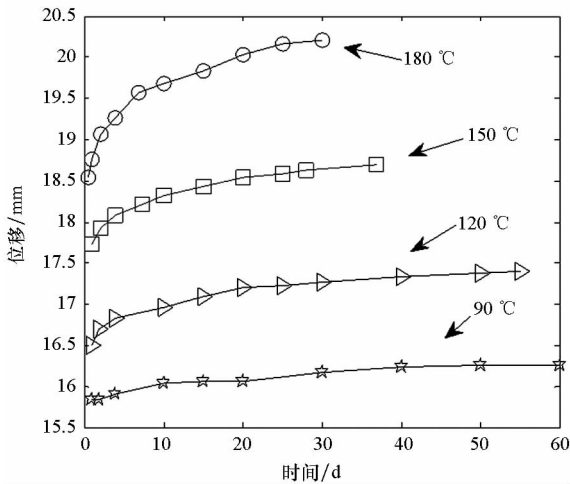
## 2.1 老化温度对止脱弹簧蠕变特性的影响

图4给出了相同载荷条件下,不同老化温度时止脱弹簧自由端位移随老化时间的蠕变曲线。可以看出,相同载荷相同温度条件下,止脱弹簧自由端的位移随老化时间的增加逐渐增大,这正体现了止脱弹簧的蠕变特性。说明在高温条件下,

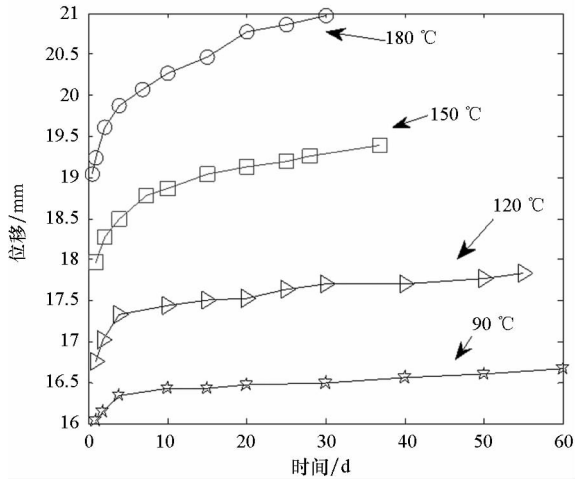
止脱弹簧的蠕变特性非常明显。此外,相同载荷相同老化时间点,止脱弹簧位移随着温度升高而变大,这体现了温度对止脱弹簧蠕变特性的影响。因此,在高温条件或载荷长时间作用下,弹簧具有明显的流变特性,与时间和温度密切相关。



(a)  $F = 7.84 \text{ N}$



(b)  $F = 9.31 \text{ N}$



(c)  $F = 10.78 \text{ N}$

图 4 温度对止脱弹簧蠕变特性的影响

Fig. 4 Effects of temperature on creep property of anti-detaching spring

为了比较同一载荷条件下,温度对止脱弹簧位移的影响程度,选择测量时间为 30 d 的测量结果,相邻温度的位移分别作差进行对比,见表 2。可以看出,同一载荷条件下,环境温度越高,温度对止脱弹簧位移的影响越强烈。此外,同一相邻温度条件下,载荷越大,温度对止脱弹簧位移的影响越明显。也就是说,载荷越大,止脱弹簧位移对温度的敏感性增加。

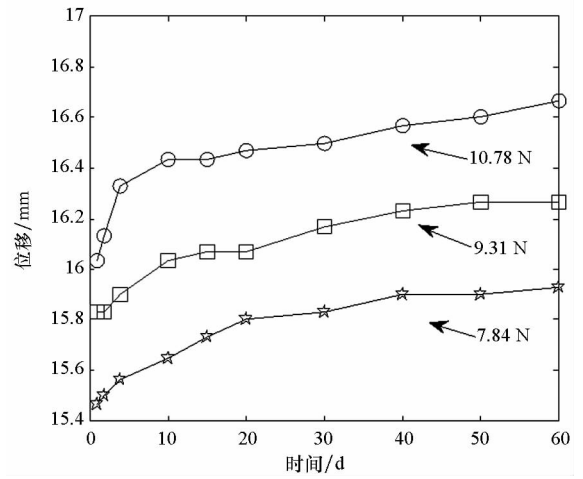
表 2 相邻温度条件下止脱弹簧位移测量结果对比

Tab. 2 Comparison of displacement between adjacent temperature mm

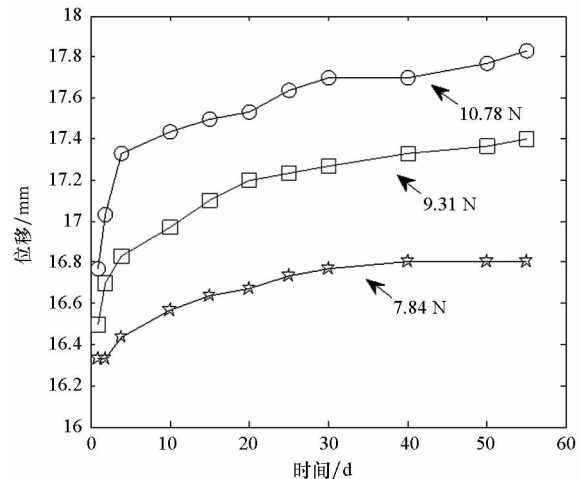
载荷/N	相邻温度/°C		
	90, 120	120, 150	150, 180
7.84	0.93	1.06	1.53
9.31	1.10	1.20	1.56
10.78	1.20	1.56	1.70

### 2.2 载荷对止脱弹簧蠕变特性的影响

图 5 给出了相同温度条件下,不同载荷时止脱弹簧自由端位移随老化时间的蠕变曲线。由



(a)  $T = 90 \text{ °C}$



(b)  $T = 120 \text{ °C}$

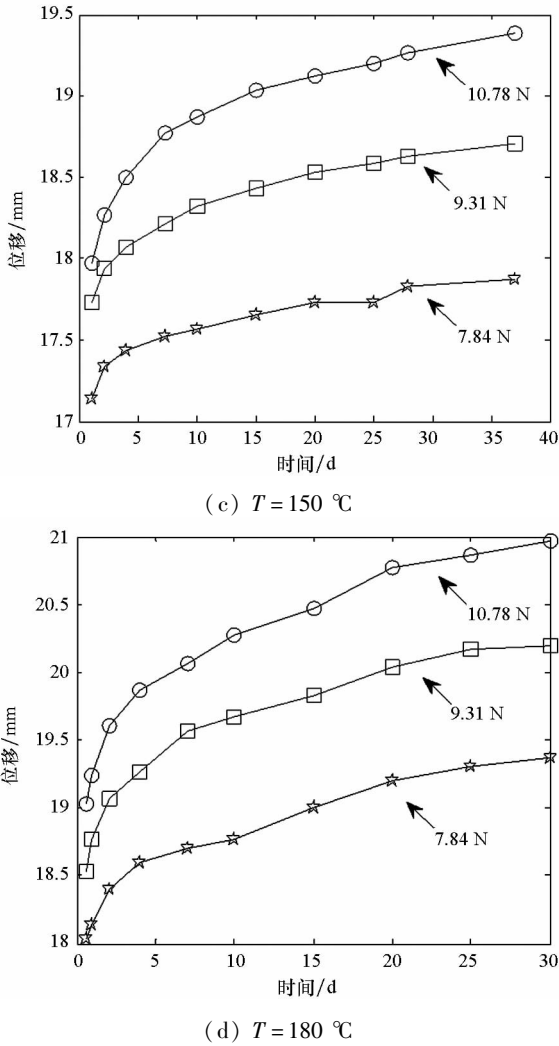


图5 载荷对止脱弹簧蠕变特性的影响  
Fig. 5 Effects of load on creep property of anti-detaching spring

图5可以看出,在相同的温度条件下,载荷越大,止脱弹簧自由端的位移量越大。

为了比较同一温度条件下载荷对止脱弹簧位移的影响程度,选择测量时间为30 d的测量结果,相邻载荷的测量结果分别做差进行对比,见表3。可以发现,同一温度条件下,载荷越大,载荷对止脱弹簧位移的影响越弱。此外,同一相邻载荷条件下,温度越高,载荷对止脱弹簧位移的影响越强烈。即温度越高,止脱弹簧位移对载荷的敏感性增加。

表3 相邻载荷条件下止脱弹簧位移测量结果对比

Tab. 3 Comparison of displacement between adjacent load mm

相邻载荷/N	温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	90	120	150	180
7.84, 9.31	0.33	0.50	0.80	0.83
9.31, 10.78	0.33	0.43	0.63	0.77

### 3 试验结果分析

#### 3.1 老化数学模型

在老化问题的研究中,常用的老化数学模型有对数模型、线性模型和指数模型,它们分别为:

$$P = P_0 + K \ln t \quad (1)$$

$$P = P_0 + Kt \quad (2)$$

$$P = P_0 e^{-Kt} \quad (3)$$

其中: $P$ 为某一时刻的性能; $P_0$ 为常数; $K$ 为与温度有关的性能变化速度常数; $t$ 为老化时间,d。

将试验数据进行预处理,分析得到对数模型与测得数据吻合较好。将试验数据代入式(1),求解得到式(1)的系数,详见表4。

表4 基于对数模型的止脱弹簧变形量随时间变化的线性回归方程

Tab. 4 Linear regression function of deformation of anti-detaching spring changing over time based on logarithmic model

载荷/N	温度/ $^{\circ}\text{C}$	回归方程	SSE	R-square
7.84	90	$Y = 0.1214 \ln t + 15.42$	0.00687	0.9745
9.31	90	$Y = 0.1252 \ln t + 15.76$	0.02105	0.9300
10.78	90	$Y = 0.1401 \ln t + 16.06$	0.01276	0.9648
7.84	120	$Y = 0.1347 \ln t + 16.28$	0.00864	0.9743
9.31	120	$Y = 0.2196 \ln t + 16.52$	0.00545	0.9938
10.78	120	$Y = 0.2391 \ln t + 16.86$	0.03483	0.9673
7.84	150	$Y = 0.1953 \ln t + 17.14$	0.00772	0.9841
9.31	150	$Y = 0.2736 \ln t + 17.70$	0.00300	0.9968
10.78	150	$Y = 0.3932 \ln t + 17.96$	0.00210	0.9989
7.84	180	$Y = 0.3378 \ln t + 18.14$	0.05333	0.9732
9.31	180	$Y = 0.4247 \ln t + 18.74$	0.01483	0.9952
10.78	180	$Y = 0.4909 \ln t + 19.22$	0.04746	0.9885

表 4 中:  $Y$  为总的位移量, mm;  $SSE$  代表和方差系数, 该系数计算的是拟合数据与原始数据对应点的误差的平方和,  $SSE$  越接近 0, 说明模型选择和拟合得更好, 数据预测越成功;  $R-square$  为调整后的方差, 通常也用来描述模型对数据拟合程度的好

坏,  $R-square$  越接近 1, 说明拟合效果越好。从表 4 中的  $SSE$  和  $R-square$  数据分析可知, 对数模型对拟合止脱弹簧老化变形量随时间变化关系是合适的。图 6 为试验实测数据的拟合情况, 同样说明了数据拟合情况较好, 采用对数模型是合理的。

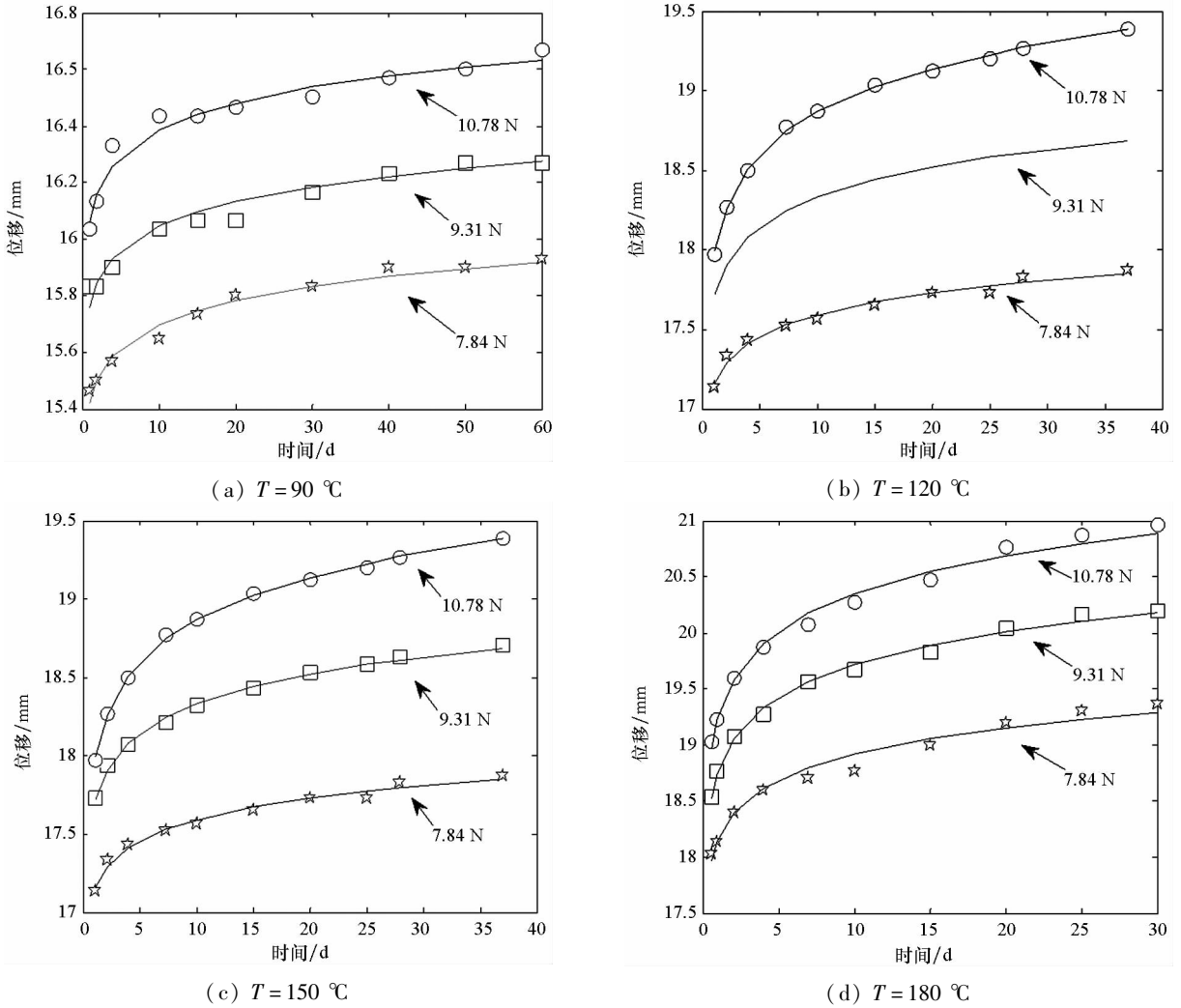


图 6 不同试验温度下数据拟合情况

Fig. 6 Data fitting under different testing temperature

### 3.2 老化动力学方程

在对试验结果的分析处理中, 采用 Arrhenius 老化方程建立预估模型, 性能变化速率常数  $K$  与热力学温度  $T_r$  相关的 Arrhenius 方程为:

$$K = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (4)$$

式中:  $A$  为指前因子,  $s^{-1}$ ;  $Ea$  为表观活化能,  $J \cdot mol^{-1}$ ;  $R$  为摩尔气体常数,  $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ;  $T_r$  为热力学温度,  $K$ 。

依据表 4 的数据拟合结果, 利用式(4), 拟合出载荷为 7.84 N, 9.31 N 以及 10.78 N 下的性能变化速率常数  $K$  与热力学温度  $T_r$  相关的 Arrhenius 方程, 分别为:

$$\ln K = -169.4 \frac{1}{T_r} - 0.3369 \quad (5)$$

$$\ln K = -207.1 \frac{1}{T_r} + 0.2027 \quad (6)$$

$$\ln K = -229.9 \frac{1}{T_r} + 0.5601 \quad (7)$$

通过对模型进行求解, 可以得出不同载荷下基于 Arrhenius 老化模型的止脱弹簧老化变形量的动力学方程, 式(8)、式(9)和式(10)分别代表载荷为 7.84 N, 9.31 N 以及 10.78 N 下的止脱弹簧老化动力学方程。

$$Y = 16.745 + 0.6929e^{-\frac{169.4}{T_r}} \cdot \ln t \quad (8)$$

$$Y = 17.180 + 1.2247e^{-\frac{207.1}{T_r}} \cdot \ln t \quad (9)$$

$$Y = 17.525 + 1.7508e^{-\frac{229.9}{T_r}} \cdot \ln t \quad (10)$$

### 3.3 寿命预测

由止脱弹簧的失效机制可知,受载后初始位移基础上位移量的增加是导致失效的主要原因,因此可以定义相应的位移增量参数。

$$\Delta\varepsilon_L = 10000(Y - Y_0)/Y_0 \quad (11)$$

表5 止脱弹簧预估寿命与位移增量参数对应关系

Tab.5 Congruent relationship between expected life and displacement increment of anti-detaching spring

$F = 7.81 \text{ N}$	$\Delta\varepsilon_L/\text{mm}$	9.05	9.10	9.15	9.20	9.25	9.30	9.35	9.40	9.45	9.50	9.55
	寿命/a	6.71	7.46	8.30	9.22	10.26	11.40	12.68	14.09	15.67	17.42	19.36
$F = 9.31 \text{ N}$	$\Delta\varepsilon_L/\text{mm}$	3.05	3.10	3.15	3.20	3.25	3.30	3.35	3.40	3.45	3.50	3.55
	寿命/a	0.72	0.95	1.26	1.66	2.20	2.90	3.83	5.06	6.67	8.81	11.63
$F = 10.78 \text{ N}$	$\Delta\varepsilon_L/\text{mm}$	1.80	1.82	1.84	1.86	1.88	1.90	1.92	1.94	1.96	1.98	2.00
	寿命/a	1.64	2.00	2.43	2.96	3.61	4.40	5.36	6.52	7.95	9.68	11.79

由表5分析可知,不同载荷条件下,不同位移增量参数对应的止脱弹簧的预估寿命有较大差异。对于止托弹簧的寿命预估问题,需要对其受载进行准确的测量。

### 4 结论

根据止脱弹簧的受力模式和失效机理,设计了止脱弹簧的蠕变老化试验装置。利用该装置通过高温试验箱对止脱弹簧进行了加速贮存试验。研究表明,止脱弹簧具有明显的蠕变特性,其蠕变位移随老化时间、老化温度以及载荷的增加而增大。同一相邻载荷条件下,环境温度越高,载荷对止脱弹簧位移的影响越强烈。同一相邻温度条件下,载荷越大,温度对止脱弹簧位移的影响越明显。

利用对数模型得出了不同温度以及不同载荷条件下的止脱弹簧的变形量,基于 Arrhenius 方程建立了止脱弹簧蠕变型老化动力学方程,分析了温度和载荷对性能变化速率常数的影响。通过定义位移增量参数,给出了在老化温度为 25 °C 条件下,三种载荷条件下的止脱弹簧寿命的参考值。

### 参考文献 (References)

[1] 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.  
ZHANG Yinghui, LIU Huihang, WANG Decheng. Spring manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)

[2] Kula E, Weiss V. Residual stress and stress relaxation [M]. USA: Plenum Press, 1982.

[3] Llano-Vizcaya L D, Rubio-Gonzalez C, Mesmacque G, et al. Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs[J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1130 -

式中: $Y_0$  为初始位移。

假定加载后的位移增量参数达到某种程度时止脱弹簧失效,那么在常温 25 °C 下依据上述的老化变形量动力学方程可以计算止脱弹簧相应的寿命。表5给出了相应位移增量参数对应的止脱弹簧预估寿命,以供参考。

1134.

[4] RW Rohde. Stress relaxation [J]. Acta Metallurgica, 1981, 29: 41 - 52.

[5] 常新龙,刘兵吉,汪亮. 螺旋弹簧应力松弛实验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(1): 99 - 102.  
CHANG Xinlong, LIU Bingji, WANG Liang. Experimental study on stress relaxation of helical spring[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(1): 99 - 102. (in Chinese)

[6] 魏芳荣,李家俊,李群英,等. 螺旋压缩弹簧应力松弛性能的动态试验研究 [J]. 金属热处理, 2007, 32(4): 47 - 50.  
WEI Fangrong, LI Jiajun, LI Qunying, et al. Dynamic experiment on stress relaxation properties of helical compress spring [J]. Heat Treatment Metals, 2007, 32(4): 47 - 50. (in Chinese)

[7] 张英会,刘辉航,姜膺. 弹簧的应力松弛及试验研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2008, 10: 26 - 32.  
ZHANG Yinghui, LIU Huihang, JIANG Ying. Stress relaxation test for springs [J]. Machinery Industry Standardization and Quality, 2008, 10: 26 - 32. (in Chinese)

[8] 李迪凡,封先河,刘聪. 某型导弹尾翼弹簧贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 09(2): 1 - 3.  
LI Difan, FENG Xianhe, LIU Cong. Storage life evaluation of empennage springs[J]. Equipment Enviromental Engineering, 2012, 09(2): 1 - 3. (in Chinese)

[9] 张保山,王永平,李志勇,等. 60Si2Mn 螺旋弹簧的压缩应力松弛行为与贮存寿命预测[J]. 力学实验, 2011, 26(6): 699 - 706.  
ZHANG Baoshan, WANG Yongping, LI Zhiyong, et al. On the compressive stress relaxation behavior and storage life prediction of 60Si2Mn helical springs [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6): 699 - 706. (in Chinese)

[10] 白明远,刘新灵,张卫方. 65Mn 弹簧的贮存寿命预测[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(4): 10 - 13.  
BAI Mingyuan, LIU Xinling, ZHANG Weifang. Prediction on storage life of 65Mn springs [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007, 2(4): 10 - 13. (in Chinese)