

基于位错运动的弹簧应力松弛方程应用研究

贺 毅, 王心雨, 金应荣, 苏 懿, 冉 渭, 廖云庭, 刘青琳

(西华大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610039)

摘 要: 评价弹簧的强压处理工艺、预测弹簧的贮存寿命和载荷损失具有重要的工程意义。本文对圆柱螺旋压缩弹簧进行应力松弛试验, 利用基于位错运动的应力松弛方程对加速试验数据进行拟合分析, 提出评价弹簧强压处理效果的方法, 并对应力松弛方程进行线性化处理, 导出弹簧寿命预测方程和载荷预测方程, 给出计算载荷损失误差的方法, 预测圆柱螺旋压缩弹簧的寿命和载荷损失, 并对其进行试验验证。结果表明: 本文提出的弹簧应力松弛方程效果较好, 载荷损失预测误差在 $\pm 2\%$ 以内。

关键词: 弹簧; 加速试验; 寿命预测; 载荷损失预测; 预测误差

中图分类号: TG142.75 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)06-0096-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4861

Research on the Application of Spring Stress Relaxation Equation Based on Dislocation Motion

HE Yi, WANG Xinyu, JIN Yingrong, SU Yi, RAN Wei, LIAO Yunting, LIU Qinglin

(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China)

Abstract: It is of great significance to evaluate the effect of forced compression treatment for spring and to predict the storage life and load loss of springs. In this paper, the stress relaxation test of cylindrical spiral compression spring was carried out. Started from the stress relaxation modified equation based on dislocation movement, the accelerated test data were fitted and analyzed, and a method to evaluate the effect of forced compression treatment for spring was proposed. Then, the new stress relaxation equation was linearized, and the spring life prediction equation and load prediction equation were derived respectively, and the method for calculating the load loss error was given, and the life and load loss of the cylindrical spiral compression spring were predicted, and it was verified by experiment. The results show that the spring stress relaxation equation is effective and the error of load loss prediction is within $\pm 2\%$.

Keywords: spring; accelerated test; life prediction; load loss prediction; prediction error

弹簧是一种重要的通用机械零件, 其强压处理工艺评价和性能评价尚有进一步完善之处。弹簧

强压(拉、扭)处理是指“将弹簧压缩(拉伸、扭转)至弹簧材料表层产生残余应力, 以达到提高弹簧承

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 西南技术工程研究所合作基金项目(HDHDW5902020301); 西华大学“西华杯”大学生创新创业项目(xhb2023061)。

第一作者: 贺毅(1969—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为高性能结构材料。

ORCID: 0009-0004-2190-4647 E-mail: 859025155@qq.com

引用格式: 贺毅, 王心雨, 金应荣, 等. 基于位错运动的弹簧应力松弛方程应用研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 96-102.

HE Yi, WANG Xinyu, JIN Yingrong, et al. Research on the Application of Spring Stress Relaxation Equation Based on Dislocation Motion[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(6): 96-102.

载能力和稳定几何尺寸”的一种工艺方法^[1]。该定义明确了评价强压处理效果的方法,即根据表层的残余应力进行评价。弹簧承受的载荷主要有动载荷和静载荷。对于承受动载荷的弹簧,疲劳断裂是主要的失效形式^[2],此时强调表面残余应力是合理的。对于承受静载荷的弹簧,应力松弛是主要的失效形式,此时强调表面残余应力有不完善之处^[3-4]。弹簧应力松弛是指在总形变量不变的条件下部分弹性变形转变成了塑性变形,进而引起应力降低的现象^[5-7]。应力松弛分为快速松弛和缓慢松弛两个阶段,两个阶段遵循不同的对数衰减规律。通过强压处理消除快速松弛阶段是该工序的直接目的,此时适宜用应力松弛试验结果评价强压处理的效果。对弹簧强压处理工艺已有系统的研究,目前有电强压处理、热磁强压处理等工艺技术^[8],但如何评价强压处理的效果鲜见研究报道。

另外,根据加速试验结果预测弹簧的寿命和载荷损失是评价弹簧性能的重要方法,也是评价整机可靠性的基础。通常依据方程(1)或方程(2)预测弹簧寿命。

$$\frac{\Delta P}{P_0} = A_1 - B_1 \ln t \quad (1)$$

或

$$P = A_2 - B_2 \ln t \quad (2)$$

式中: P_0 为弹簧初始载荷; ΔP 为弹簧载荷损失量^[9]; A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 为常数; t 为松弛时间。根据给定的置信度确定的置信区间能方便地评估整体可靠性^[10]。但方程(1)或(2)是从 Arrhenius 方程演变而来的,依据的是类物理模型,预测过程中的模型误差尚未引起重视,为了提高预测精度有必要深入研究。

在产品设计中需要知道弹簧的载荷损失及其误差,以便进行设计计算,在产品贮存过程中也需要知道弹簧的载荷损失及其误差,以便进行实时监测。预测弹簧的载荷损失时,通常以方程(2)为基础,分别将试验温度下得到的系数 A_2 和 B_2 对 $1/T$ 拟合,外推得到贮存温度下的 A_2 值和 B_2 值,进而构建贮存温度下的载荷损失方程,最后计算预设贮存期限的载荷损失^[11-13]。采用该方法虽然能预测载荷损失,但对系数 A_2 和 B_2 分别进行拟合导致难以推算预测误差。

文献[14]从位错运动出发,导出的应力松弛改进方程为

$$\tau = -\frac{1}{a_2} \ln(t + a_1) + a_3 \quad (3)$$

式中, a_1 为积分常数,与时间 t 具有相同的量纲。

$$a_2 = \frac{\beta_i}{kT} \quad (4)$$

$$a_3 = \frac{E_1}{\beta_i} - \frac{kT}{\beta_i} \ln \left(-\frac{A\beta_i}{kT} \right) \quad (5)$$

式中: k 为玻耳兹曼常数; T 为绝对温度; A 为常数。

$$E_1 = E - \alpha \quad (6)$$

式中 E 为原子扩散激活能。

$$\alpha = \frac{4f^2}{lb\tau_i} \arcsin \frac{lb\tau_i}{2f} - \frac{f}{\sqrt{1 - \left(\frac{lb\tau_i}{2f} \right)^2}} - f \quad (7)$$

$$\beta_i = \frac{f}{\tau_i} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_i b \tau_i}{2f} \right)^2}} - 1 \right] - \frac{2f^2}{l_i b \tau_i^2} \arcsin \frac{l_i b \tau_i}{2f} \quad (8)$$

式中: f 为位错线的张力; b 为位错的伯氏矢量; τ_i 为不可激活位错承受的最大应力; l_i 为不可激活位错链段最大长度值; l 为位错链段长度, $l_i < l < l_c$, l_c 为临界位错链段长度。由方程(4)——(8)可见,方程(3)中的参数 a_2 和 a_3 具有明确的物理含义,表征了弹性元件载荷与试验环境、材料成分、材料组织、弹性元件初始状态之间的定量关系,方程(3)的建立为解决强压处理工艺评价问题、载荷损失预测误差问题奠定了很好的基础。本文从方程(3)出发,导出了弹簧寿命预测方程和载荷损失预测方程,给出了计算载荷损失误差的方法,为评价弹簧性能、优化弹簧设计提供一定的参考。

1 试验材料及方法

试验所用圆柱螺旋压缩弹簧的尺寸为: 外径 73 mm, 长度 45 mm, 钢丝为 4 mm×2.5 mm 矩形截面, 有效圈数 3 圈, 总圈数 5 圈, 两端并紧磨平, 弹簧材质为 60Si2Mn, 经过油淬火回火和 473 K×3 h 强压处理。由于钢丝的截面积是一定的, 所以用弹簧承受的载荷代替钢丝承受的应力进行分析计算。

为了获得充足的试验数据, 采用连续试验法进行应力松弛试验, 每间隔 20~60 min 采集一次数据。

据。根据弹簧设计要求,弹簧处于装夹状态时的长度为 16.5 mm, 试验温度为 333、363、393、423 以及 453 K 共 5 个温度, 每个温度下的试验时间为 60 天。弹簧钢的回火温度一般在 623 K 以上, 有些弹簧钢抗回火性能好, 低于 373 K 实验效果不理想, 扩大温度区间可有效地从应力松弛曲线反推室温下弹性元件的应力松弛行为, 提高寿命预测数据相关性。在每个试验温度下均取 2 件弹簧压缩到 16.5 mm, 采用周期法进行应力松弛试验, 每间隔 1 周从试验箱中取出测量弹簧的载荷。此外, 将另外选取一批弹簧分成三组, 送往万宁、江津和漠河开展贮存试验, 贮存过程中将弹簧压缩到 16.5 mm, 每间隔半年取回检测弹簧的载荷。

高温加速试验结束后, 垂直于弹簧轴线的平面内截取试样, 经磨削电解抛光后制成透射电镜试样, 用 JEOL-2100F 透射电镜观察样品的显微组织。

2 试验结果与分析

弹簧加速应力松弛试验结果如图 1 所示。用方程(3)拟合所得的系数如表 1 所示。按照方程(3)应当有 $t+a_1 > 0$, 由于时间 t 是从试验开始时计算的, 其最小值为 0, 所以应当有 $a_1 > 0$ 。由表 1 的拟合结果可知出现了 $a_1 < 0$ 的现象。

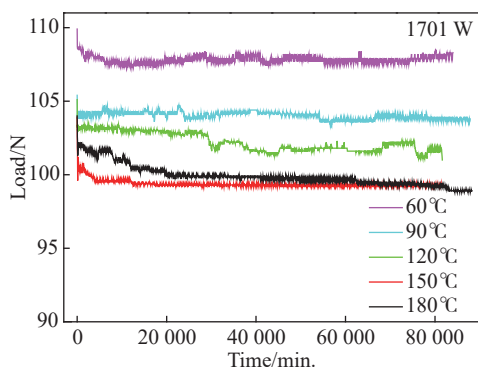


图 1 弹簧加速应力松弛试验结果

Fig. 1 Spring accelerated stress relaxation test results

a_1 是积分过程中带来的, 是积分常数。由方程(3)可见, a_1 与时间 t 具有相同的量纲, 表征了应力松弛试验开始时弹簧内部的状态。由于试验前弹簧经过了强压处理, 所以 a_1 间接地表征了强压处理的效果。强压处理通常用于消除弹簧的快速应力松弛阶段。图 1 所示的试验曲线是应力缓慢松弛

表 1 弹簧应力松弛的拟合值($\delta_k = 0.05$)

Tab. 1 Fitting values of spring stress relaxation($\delta_k = 0.05$)

试验方法	拟合参数	333 K	363 K	393 K	423 K	453 K
连续法	a_1	0.96	-3796	-381	1	1773
	a_2	0.17	0.15	0.17	0.22	0.79
	a_3	109	104	109	123	108
	τ_0	109.9	104.2	110.1	125.8	104
周期法	$\ln t_{L1}$	27.0646	32.6151	25.3728	15.6352	11.5920
	$\ln t_{L2}$	12.7103	15.5856	20.5355	8.83951	11.2555
	$\ln t_{L3}$	14.8890	11.9889	1.80794	10.5012	10.9410
	$\ln t_L$ 的平均值	18.2212	20.0632	15.9054	11.6587	11.2628

阶段的载荷-时间曲线。由此可知 $a_1 > 0$ 表示在应力松弛试验开始时, 应力松弛过程已经进入了缓慢松弛阶段, $a_1 < 0$ 表示在应力松弛试验开始时, 应力松弛过程尚处于快速松弛阶段, 需要经过 $-a_1$ 时间后才能进入缓慢松弛阶段。

生产中常常通过强压处理来消除快速应力松弛阶段, 据此可以用 a_1 值来评价强压处理的效果: 即 $a_1 < 0$ 表示强压处理效果不足, $a_1 > 0$ 且接近于 0, 表示强压处理工艺合理, $a_1 > 0$ 且偏离 0 较远, 表示强压处理效果有冗余。

弹簧应力松弛试验前后的组织如图 2 所示。由图可知试验前后都是回火屈氏体组织, 试验前材料中位错分布不均匀, 试验后位错依然呈现非均匀分布, 没有可观察到的变化。弹簧钢通常进行中温回火, 本文的最高试验温度为 453 K, 低于弹簧的回火温度。试验过程中弹簧的组织没有出现可观察到的变化, 表明试验过程中材料的组织稳定, 应力松弛试验过程中的松弛机制没有出现变化, 符合加速试验的要求。

由方程(3)可知温度对应力松弛有重要的影响。结合我国南北温差较大和试验站的设置情况, 分别选择万宁、江津和漠河 3 个试验站开展自然环境试验。弹簧在 3 个试验站贮存 0.5 年和 1 年后的载荷损失率如表 2 所示。可知弹簧在万宁、江津和漠河贮存后出现了载荷下降现象, 但都在 5% 以内。载荷损失率按下式计算:

$$\delta = \frac{P_0 - P}{P_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中: P_0 为试验前的载荷, 即初始载荷; P 为试验后的载荷。

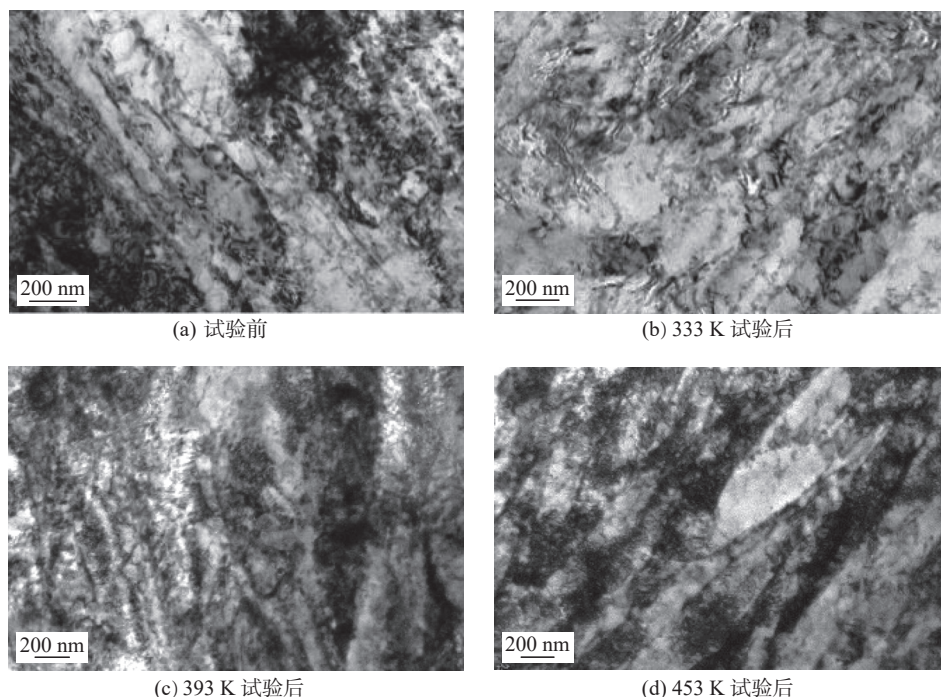


图2 应力松弛试验前后的组织

Fig. 2 Microstructure before and after stress relaxation test

表2 弹簧在试验站贮存后的载荷损失率

Tab. 2 Load loss rate of spring after storage in test station %

贮存状态	样品编号	0.5年	1年
万宁-近海岸棚下贮存	W1	—	2.6
	W2	0.80	—
	W3	1.38	3.6
江津-棚下贮存	J1	1.23	3.8
	J2	2.39	2.0
	J3	2.86	1.9
漠河-棚下贮存	M1	3.13	3.7
	M2	0.87	3.9
	M3	1.28	2.6

3 讨论

3.1 弹簧的贮存寿命预测

在产品的设计过程中,通常预先确定弹簧载荷损失率 δ 的允许值 δ_k ,当弹簧载荷损失率超过允许值时,即为失效,所经历的时间 t_L 即为寿命。通常将弹簧投入试验前检测得到的载荷 P_0 作为初始值,按方程(9)计算弹簧的载荷损失率。

由于方程(3)中 a_1 值相对于寿命而言比较小,可以忽略,所以将 $t+a_1$ 视为寿命值 t_L 。对于给定的

载荷损失率允许值 δ_k ,有:

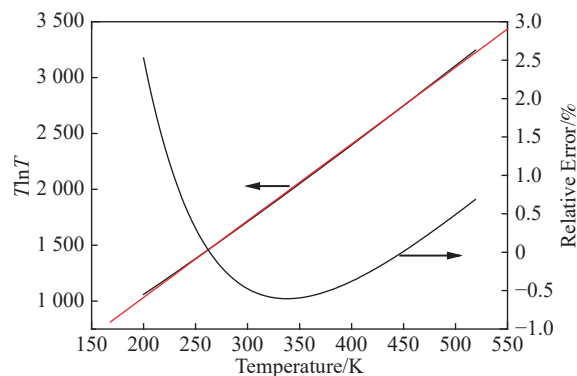
$$\ln t_L = a_2 \tau_0 \left(\frac{a_3}{\tau_0} - \frac{\tau}{\tau_0} \right) = a_2 \tau_0 \left(\frac{a_3}{\tau_0} - 1 + \delta_k \right) \quad (10)$$

由方程(3)可知, a_2 与温度成反比例关系。为便于进行外推,将方程(4)进一步改写为

$$a_3 = \frac{E_1}{\beta_i} - \frac{kT}{\beta_i} \ln \left(-\frac{A\beta_i}{k} \right) + \frac{kT}{\beta_i} \ln T \quad (11)$$

式中 $T \ln T$ 是非线性项,增大了依据方程(10)预测寿命的难度。 $T \ln T$ 随温度变化的关系如图3所示。由图可见在220~500 K温度范围内, $T \ln T$ 近似为温度的线性函数,其误差在1%以内,因此可将 a_3 视为温度的线性函数。

将 a_3 近似表述为温度的线性函数后,对方程

图3 $T \ln T - T$ 关系图Fig. 3 $T \ln T - T$ diagram

(10)进行整理可得

$$\ln t_L = A + B/T \quad (12)$$

方程(12)与根据 Arrhenius 方程导出的寿命预测方程具有相同的形式,因此可以将 Arrhenius 方程视为一种简洁的近似方程。由此可见,将方程(10)简化为方程(12)引入了 $a_2 \times 1\%$ 的误差。这表明根据 Arrhenius 方程预测弹簧的贮存寿命时,模型误差在 $a_2\%$ 以内。表1中的拟合结果表明 $a_2 < 1$,所以模型误差在1%以内。

取 $\delta_k = 0.05$,有

$$\ln t_L = a_2 \tau_0 \left(\frac{a_3}{\tau_0} - \frac{\tau}{\tau_0} \right) = a_2 \tau_0 \left(\frac{a_3}{\tau_0} - 0.95 \right) \quad (13)$$

根据图1所示的各试验温度下载荷衰减曲线计算得到的 $\ln t_L$ 值如表1所示。为了减少试验误差,对周期法试验结果用方程(2)拟合后也得到了对应的 $\ln t_L$ 值。对同一温度下3件弹簧的 $\ln t_L$ 值取平均值得到 $\ln t_a$ 值,用 $\ln t_a$ 对方程(12)拟合得到

$$\ln t_{L0} = -12.89805 + 10960.27056/T \quad (14)$$

拟合得到的 A 值、 B 值和标准差 SD 如表3所示。由此外推可得到贮存温度 $T_0 = 300\text{ K}$ 时的 $\ln t_{L0}$ 值:

$$\ln t_{L0} = 23.6362 \quad (15)$$

表3 弹簧的 $\ln t_a$ 对 $1/T$ 的拟合结果($\delta_k=0.05$)

Tab. 3 The fitting of $\ln t_a$ to $1/T$ of the spring ($\delta_k=0.05$)

参数	A	B	R	SD	N	P
拟合值	-12.8981	10960.2706	0.8826	2.1214	5	0.0475

外推方差 $\sigma^{[15]}$ 为

$$\sigma = SD \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = 2.1214 \times \sqrt{2.6971} = 3.4723 \quad (16)$$

式中: $x_0 = 1/T_0$; $x_i = 1/T_i$, T_i 为试验温度; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

贮存过程中弹簧的失效函数为

$$F(t) = \Phi \left(\frac{\ln t_L - \ln t_{L0}}{\sigma} \right) = \Phi \left(\frac{\ln t_L - 23.6362}{3.4723} \right) = \Phi(z) \quad (17)$$

取可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t) = 0.95 \quad (18)$$

则有 $\ln t_L = 17.9242$ 。即以载荷损失率5%为失效判据,置信度为0.95时,弹簧的对数寿命为(17.9,

$+\infty$),或表示为 $(0.75 \ln t_a, +\infty)$ 。

特别地,贮存到第10年(5256000 min)时的失效函数值为

$$F(5256000) = \Phi \left(\frac{\ln(5256000) - 23.6362}{2.12142 \times \sqrt{2.6971}} \right) = \Phi(-2.3503) = 0.0093 \quad (19)$$

$$\text{或 } R(5256000) = 0.9917 \quad (20)$$

即贮存到第10年时的可靠度为99.17%。这表明弹簧的应力松弛速率很慢。

3.2 弹簧的载荷损失预测

为了检测弹簧在贮存过程中是否出现早期失效等问题,也为了方便设计计算,有必要给出弹簧在指定时间的载荷损失及其预测误差。将方程(3)代入方程(9),令 $t + a_1 = t_l$,则有

$$\delta = 1 - \frac{a_3}{\tau_0} + \frac{1}{a_2 \tau_0} \ln t_L \quad (21)$$

将 a_3 近似地表述为温度的线性函数,对于待预测的某个时刻将 $\ln t_L$ 视为常数,整理可得

$$\delta = UT + V \quad (22)$$

式中: U 和 V 为待定常数; T 为温度。这表明在贮存时间一定的条件下,弹簧的载荷损失与温度线性正相关,据此可预测弹性元件在贮存温度下的载荷损失。

根据表1的拟合结果,结合方程(21)计算得到在对应试验温度和贮存时间下的载荷损失如表4所示,对各贮存时间的载荷损失按方程(22)拟合得到的结果如表5所示。

表4 弹簧在试验温度下的载荷损失率

Tab. 4 Load loss rate of spring at test temperature %

贮存时间/年	试验温度/℃				
	60	90	120	150	180
0.5	2.75	2.96	3.84	4.44	4.76
1.0	2.85	3.06	3.95	4.56	5.30
1.5	2.92	3.12	4.01	4.64	5.61
2.0	2.96	3.17	4.06	4.69	5.83
4.0	3.07	3.27	4.17	4.81	6.36
6.0	3.13	3.33	4.23	4.88	6.68
8.0	3.18	3.37	4.27	4.93	6.90
10.0	3.21	3.40	4.31	4.97	7.07

根据表5的结果,将方程(22)外推得到3个试验站的样品载荷损失率如表6所示。其中载

表5 对应贮存时间下弹簧的载荷损失按方程(22)的拟合结果
Tab. 5 The fitting results of spring load loss at certain storage time with equation (22)

拟合参数	贮存时间/年							
	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	8.0	10
U	-4.00847	-3.96766	-3.94378	-3.92684	-3.88603	-3.86215	-3.84521	-3.83207
V	0.01986	0.02004	0.02015	0.02022	0.02041	0.02051	0.02059	0.02065
R	0.97796	0.97717	0.97670	0.97636	0.97553	0.97503	0.97468	0.97440
SD	0.20110	0.20669	0.21000	0.21238	0.21816	0.22159	0.22404	0.22595
N	4	4	4	4	4	4	4	4
P	0.02204	0.02283	0.02330	0.02364	0.02447	0.02497	0.02532	0.02560

荷损失率误差按与方程(16)相似的方法计算, $t_{0.025}(n-2) = t_{0.025}(2) = 4.3027$ 。由表6可见预测误差在 $\pm 2\%$ 以内。由表2列出的3个试验站贮存0.5年和1年的弹簧载荷损失率可知数据大多在预测范围内,说明预测数据比较准确,间接表明应力松弛方程(14)比较准确,以此为依据预测的寿命是可信的。

表6 弹簧在3个试验站贮存的载荷损失率及其误差预测值
Tab. 6 Load loss rate and prediction error value of spring stored in three test stations

贮存时间/年	载荷损失率/%			载荷损失率误差/ $\Delta \pm \%$		
	万宁	江津	漠河	万宁	江津	漠河
0.5	1.90	1.78	1.31	1.42	1.48	1.72
1.0	2.00	1.87	1.40	1.46	1.52	1.77
1.5	2.05	1.93	1.45	1.48	1.55	1.80
2.0	2.09	1.96	1.49	1.50	1.56	1.82
4.0	2.19	2.06	1.58	1.54	1.61	1.87
6.0	2.24	2.11	1.63	1.56	1.63	1.90
8.0	2.28	2.15	1.67	1.58	1.65	1.92
10.0	2.31	2.18	1.69	1.59	1.66	1.94

4 结论

综合上述分析与讨论结果,可以得出以下结论。

1)从基于位错运动的应力松弛方程出发,导出的寿命预测方程为 $\ln t_a = a_2 \tau_0 \left(\frac{a_3}{\tau_0} - 1 + \delta_k \right)$ 。忽略时间参数 a_1 的影响,并将 a_3 近似表述为温度的线性函数时,该方程退化为 Arrhenius 方程 $\ln t_a = A + B/T$,退化引起的模型误差小于1%。

2)用基于位错运动的应力松弛方程预测圆柱螺旋压缩弹簧的寿命,在置信度为0.95时,置信区间为 $(0.75 \ln t_a, +\infty)$ 。

3)从基于位错运动的应力松弛方程出发,导出

弹簧载荷损失率与温度线性正相关,即 $\delta = UT + V$ 。据此预测圆柱螺旋压缩弹簧的载荷损失,在置信度为0.95时预测误差在 $\pm 2\%$ 以内。

参 考 文 献

[1] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 弹簧术语: GB/T 1805—2021 [s]. 2021.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Spring terminology: GB/T 1805-2021 [s]. 2021.

[2] 王慧, 朱凌静, 王平, 等. 发动机气门弹簧断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(2): 139-142.

WANG H, ZHU L J, WANG P, et al. Fracture failure analysis of engine valve spring[J]. Physical and Chemical Test (Physics), 2015, 51(2): 139-142.

[3] 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 Y H, LIU H H, JIANG Y. Stress relaxation and experimental study of spring[J]. Machinery industry standardization & quality, 2008(10): 26-32.

[4] 刘斌. 微型拉簧、扭簧应力松弛测试与寿命分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.

LIU B. Stress relaxation test and life analysis of micro tension spring and torsion spring [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[5] 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008(3): 1-8.

ZENG Y S, HUANG X, HUANG S. Research status and development trend of creep aging forming technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008(3): 1-8.

[6] CHEN J F, JIANG J T, ZHEN L, et al. Stress relaxation behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in simulated age-forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 214(4): 775-783.

- [7] CUI X X, WU X D, WAN M, et al. A novel constitutive model for stress relaxation of Ti-6Al-4V alloy sheet[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161/162: 105034.
- [8] 苏德达. 弹簧(材料)应力松弛及预防[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- SU D D. Stress relaxation and prevention of spring[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.
- [9] 王建平, 郭孟飞, 梁晓, 等. 斜圈弹簧应力松弛研究及寿命预测[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(5): 795 – 803.
- WANG J P, GUO M F, LIANG X, et al. Stress relaxation and life prediction of inclined coil spring[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(5): 795 – 803.
- [10] 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, 9(2): 1 – 3.
- LI D F, FENG X H, LIU C. Storage life evaluation of a missile tail spring[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(2): 1 – 3.
- [11] 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 F R, LI J J, LI Q Y, et al. Dynamic experimental study on stress-relaxation properties of helical compression spring[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 32(4): 47 – 50.
- [12] 李腾. 0Cr18Ni9 不锈钢弹簧蠕变和应力松弛研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI T. Study on creep and stress relaxation of 0Cr18Ni9 stainless steel spring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [13] 王柯, 师俊平, 金朋. 螺旋压缩弹簧应力松弛特性试验分析及其应用[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(1): 158 – 165.
- WANG K, SHI J P, JIN P. Experimental analysis of stress relaxation characteristics of helical compression spring and its application[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(1): 158 – 165.
- [14] 吴护林, 李忠盛, 金应荣, 等. 弹簧应力松弛反常载荷损失及原因分析[J/OL]. *材料导报*, 2023(23): 1 – 13. [2023-04-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1078.TB.20230131.1559.013.html>.
- WU H L, LI Z S, JIN Y R, et al. Abnormal load loss and cause analysis of spring stress relaxation[J/OL]. *Materials Reports*, 2023(23): 1 – 13. [2023-04-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1078.TB.20230131.1559.013.html>.
- [15] 王霞. 概率论与数理统计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2020: 188.
- WANG X. Probability theory and mathematical statistics[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2020: 188.

(责任编辑: 夏书林)

(上接第 79 页)

- [15] 郭广强. 液环泵内气液两相流动特性及其性能优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- GUO G Q. Study on gas-liquid two-phase flow characteristics and performance optimization in liquid ring pump[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [16] 赵万勇, 宋乾斌, 虎兴娜. 基于正交试验及 CFD 的液环真空泵叶轮优化设计[J]. *流体机械*, 2019, 47(1): 14 – 19.
- ZHAO W Y, SONG Q B, HU X N. Optimization design of liquid ring vacuum pump impeller by orthogonal experiment and CFD[J]. *Fluid Machinery*, 2019, 47(1): 14 – 19.
- [17] 王宇杰, 梁钟, 王军, 等. 蜗壳型线切割对小型离心泵性能和流场影响的数值研究[J]. *排灌机械工程学*, 2023, 41(12): 1212 – 1218.
- WANG Y J, LIANG Z, WANG J, et al. Numerical study on effect of cutting volute profile on performance and flow field of small centrifugal pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(12): 1212 – 218.
- [18] 张人会, 杨军虎, 李仁年. 离心泵叶轮的参数化设计[J]. *排灌机械*, 2009(5): 310 – 313.
- ZHANG R H, YANG J H, LI R. Investigation on parametric design of centrifugal pump blade[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2009(5): 310 – 313.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182 – 197.

(责任编辑: 夏书林)