

专题——导弹产品贮存定寿延寿关键技术

弹簧应力松弛效应下级间分离系统退化建模与性能演化研究

李昂¹, 吴彦增¹, 白雪¹, 庞欢², 孙中超³

(1.北京电子工程总体研究所, 北京 100854; 2.长安大学 汽车学院, 西安 710064;

3.西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: **目的** 预测航天器长期贮存下弹簧的应力松弛及其导致的分离系统性能演化规律。**方法** 融合弹簧加速退化试验与多体动力学方法, 实现分离性能演化规律预测。通过温度加速试验, 建立弹簧的应力松弛本构模型, 预测多个温度组合剖面下弹簧力的非线性衰减规律。构建分离系统多体动力学模型, 引入弹簧松弛效应, 形成分离系统性能演化模型。**结果** 弹簧应力松弛主要发生在贮存前2 a, 衰减率为5.6%, 贮存20 a后, 弹簧载荷衰减6.3%。弹簧应力松弛效应导致分离性能下降, 贮存期满后, 分离速度损失2.1%, 分离距离损失3.1%。参数分散性影响下, 分离偏角最大值为0.408°, 小于姿态阈值。**结论** 贮存期内弹簧具有明显的应力松弛效应, 会导致分离失效风险增加, 对分离速度、分离距离、分离姿态均会产生影响, 需在设计初期考虑应力松弛效应。

关键词: 级间分离; 应力松弛; 性能退化; 多体动力学; 加速试验

中图分类号: TH135

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.001

Degradation Modeling and Performance Evolution Prediction of Stage Separation Systems with Spring Stress Relaxation Effects

LI Ang¹, WU Yanzeng¹, BAI Xue¹, PANG Huan², SUN Zhongchao³

(1. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; 2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The work aims to predict the stress relaxation of spacecraft springs under long-term storage and the resulting evolution of separation system performance. Spring accelerated degradation testing and multi-body dynamics methods were integrated to predict the evolution of separation performance. Through temperature-accelerated testing, a stress relaxation constitutive model for the spring was established, and the nonlinear decay law of spring force under multiple temperature profiles was predicted. A multi-body dynamics model of the separation system was constructed, and the spring relaxation effect was incorporated to develop a separation system performance evolution model. The spring exhibited a high stress relaxation rate of 5.6% within the first 2 years of storage. After 20 years of storage, the spring force loss was approximately 6%. With increasing storage

收稿日期: 2025-03-26; 修订日期: 2025-04-30

Received: 2025-03-26; Revised: 2025-04-30

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-371)

Fund: General Project of Shaanxi Provincial Natural Science Foundation (2024JC-YBMS-371)

引文格式: 李昂, 吴彦增, 白雪, 等. 弹簧应力松弛效应下级间分离系统退化建模与性能演化研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 1-6.

LI Ang, WU Yanzeng, BAI Xue, et al. Degradation Modeling and Performance Evolution Prediction of Stage Separation Systems with Spring Stress Relaxation Effects[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 1-6.

time, the spring stress relaxation effect caused a decline in separation performance, leading to a 2.1% reduction in separation velocity and 3.1% reduction in separation distance at the expiry of storage life. Under parameter dispersion, the maximum separation angle was 0.408° , which was below the attitude threshold. In conclusion, springs exhibit significant stress relaxation effects during storage, increasing the risk of separation failure. Stress relaxation effects have effects on velocity, distance and attitude of separation, which should be considered in the initial stage of design.

KEY WORDS: stage separation; stress relaxation; performance degradation; multi-body dynamics; accelerated testing

航天器级间分离是航天器在轨工作的关键动作,其可靠性直接影响任务的成败。作为分离机构的核心动力元件,预压弹簧通过储存的弹性势能驱动解锁装置运动,其性能稳定性直接决定分离速度、运动轨迹及姿态控制精度。然而,在长期贮存过程中,弹簧材料的应力松弛现象导致预紧力持续衰减,造成分离初速度下降、姿态偏差过大等连锁反应。姿态偏转角超差会引发级间碰撞风险。这种“静默退化”特性使得传统基于新件性能的设计评估方法面临严峻挑战。

近年来,围绕弹簧应力松弛与级间分离动力学研究,在材料科学与航天工程领域取得重要进展,形成了微观机制、数值仿真与工程优化的跨尺度研究体系。弹簧应力松弛研究深入微观组织演化与本构模型,揭示复杂服役条件下材料性能的变化规律。吴护林等^[1]分析了位错条带组织在温度-载荷耦合下的动态演化,建立了基于可激活位错的对数型松弛方程。Tu等^[2]研究发现,无碳化物马氏体材料可显著降低高强弹簧应力松弛率,提供了材料选用新理论依据。李少龙等^[3]与 Xin等^[4]分别研究了不同温度与载荷条件下 GH4090 合金、T9A 钢弹簧的性能,提出了适用于复杂条件的材料性能预测模型。Hu等^[5]进一步建立了 Ti-6Al-4V 钛合金弹簧长期服役下的寿命预测模型。彭琛等^[6]、王建平等^[7]采用有限元与理论模型定量分析了结构参数与载荷的关系。Zhang等^[8]构建了室温蠕变模型,并通过了实验验证。苏懿等^[9]开发了在线测量技术。蒋克全等^[10]与靳明旭等^[11]则通过热强压处理技术提高了弹簧抗松弛能力。Zhang等^[12]和贺毅等^[13]提出跨尺度寿命预测方法,有效提高了预测精度。在级间分离动力学领域,则聚焦气动干扰、动态稳定性与过程优化的研究。Xu等^[14]构建了并行火箭级间分离模型,定量揭示了气动干扰与轨迹演化规律。Wang等^[15]提出以压力中心导数作为超音速分离的动态稳定性评价指标。Lu等^[16]采用移动脉动球模型(MPBM)分析了液体晃动对分离安全性的影响。Meng等^[17]研究了中间级进气对旋风分离器性能的影响,并建立了预测模型。Song等^[18]通过风洞试验揭示了攻角对分离姿态的影响。Yang等^[19]提出的降阶气动模型显著提高了仿真计算效率。Choi等^[20]研究了火工装置热冲击响应规律。此外,黎小峰等^[21]与 Xie等^[22]强调了弹簧应力松弛对高压断路器级间分离延迟的影响。

针对弹簧松弛本构模型以及分离动力学的研究已经取得显著进展,但鲜有考虑贮存期内弹簧的应力松弛效应来研究分离系统的性能退化规律,不足以支撑航天器分离机构高可靠性长寿命设计。本研究提出“材料退化-机构动力学-系统性能演化”多层级关联分析方法,通过加速退化试验,建立考虑弹簧应力松弛效应的本构模型,构建时变刚度弹簧驱动的分离组件多体动力学模型,揭示分离性能演化规律。研究成果可为航天器贮存维护提供理论工具,支撑检测周期优化、延寿评估等工程决策。

1 分离系统多体动力学建模与验证

1.1 分离系统多体功能原理及影响因素分析

分离系统的功能为使被分离件达到一定的分离速度、分离距离,并保证偏角在一定范围内,其原理如图 1 所示。分离系统由安装基体、被分离件和若干分离弹簧组件组成。单个分离组件由安装座、导向杆、限位螺母和圆柱压缩弹簧组成。其中,各分离弹簧组件的安装座与基体固连,导向杆与被分离件固连,在导向杆与安装座之间安装压缩弹簧,分离过程中,限位螺母控制弹簧的释放长度。

为了得到适用于该类分离系统的通用动力学分析模型,通过故障树分析(FTA)方法对影响分离性能的影响因素进行分析,得到的关键参数如表 1 所示。

1.2 分离系统多体动力学建模及验证

基于 1.1 节的功能原理和参数,采用 Adams 软件进行分离系统多体动力学建模(如图 2 所示),包括三维建模、几何约束建立、载荷定义、模型参数化、分离动力学性能(速度、加速度、距离、角度等)虚拟传感器施加、求解器设置等。参数取值如表 1 所示,并考虑导向杆与安装座的间隙和摩擦,其中间隙为 1.5 mm,摩擦因数取 0.2,模型计算时长取 60 ms。求解分离过程中被分离件的动态响应参量,得到的结果如图 3 所示。

从加速度曲线可以看出,分离初始阶段存在较强的动力驱动,被分离件加速度达到 70.5 m/s^2 。之后加速度开始下降,在 50 ms 时,加速度归 0,表示完成分离。整个过程中,被分离件的最大速度为 2.3 m/s,分离距离为 142.6 mm。该分离速度与试验结果

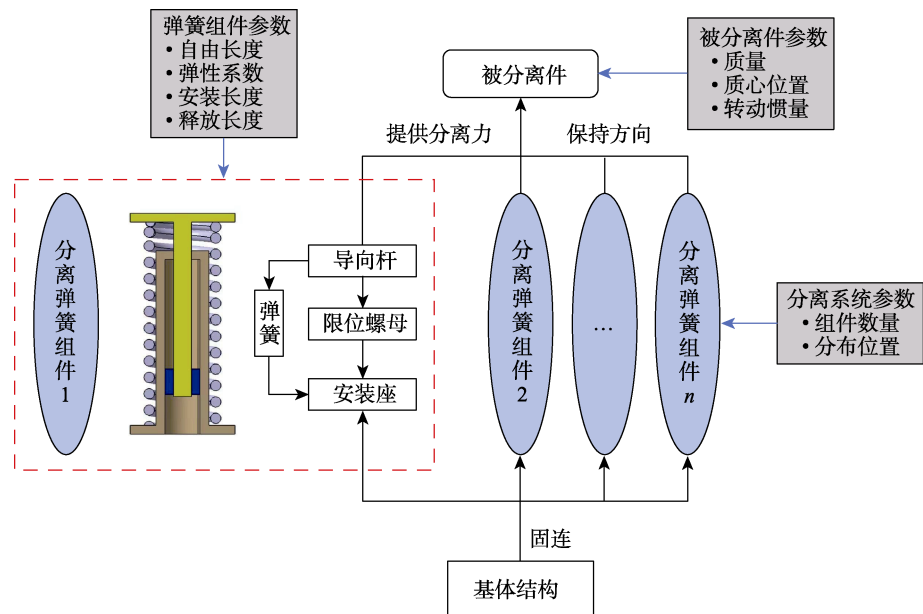


图 1 分离系统组成及功能原理
Fig.1 Composition and functional principle of separation system

表 1 分离系统设计参数
Tab.1 Design parameters of separation system

参数名称		数值	偏差	是否退化	影响分析
被分离件	质量 m	60 kg	± 3 kg	否	影响分离加速度、速度、距离和角加速度、角速度
	质心位置(x, y, z)	(0,0,232) mm	± 0.3 mm	否	
	转动惯量(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})	(2.9,2.9,1.7)	± 0.1	否	
分离系统参数	组件数量 n	4	/	否	影响被分离件分离力的作用点
	组件布置参数(R_i, θ_i), $i=1, \dots, n$	212 mm, 间隔 90°	/	否	
分离弹簧组件参数	自由长度 $L_{0,i}$, $i=1, \dots, n$	221 mm	± 1 mm	是	影响各作用点处分离力的初值和释放规律
	弹性系数 K_i , $i=1, \dots, n$	14 760 N/m	± 738 N/m	是	
	安装长度 $L_{a,i}$, $i=1, \dots, n$	143 mm	± 1 mm	否	
	释放长度 $L_{b,i}$, $i=1, \dots, n$	70.2 mm	± 1 mm	否	

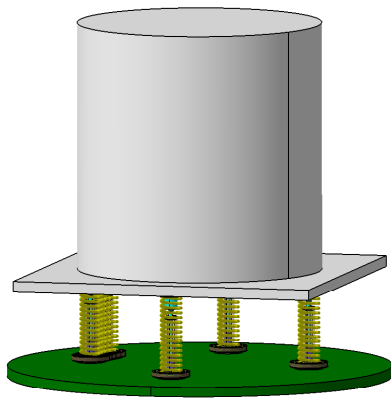


图 2 分离系统多体动力学模型
Fig.2 Multi-body dynamics model of separation system

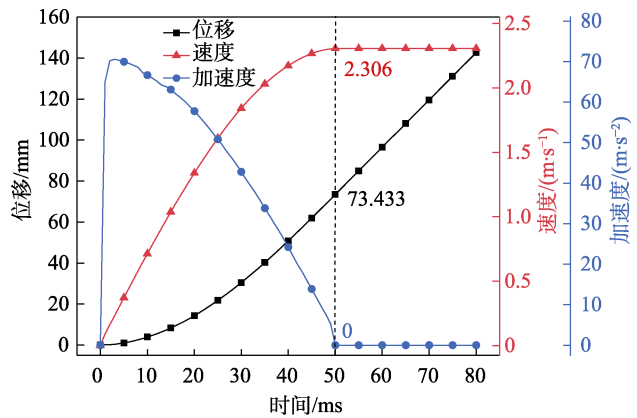


图 3 分离过程动力学响应
Fig.3 Dynamic response of separation process

(2.4 m/s) 对比误差<5%。

2 分离性能演化规律分析

2.1 基于加速试验的弹簧应力松弛本构模型

贮存过程中分离弹簧长期保持压缩状态,由于材料的黏弹性以及在恒定应变下内部会发生微观的位错滑移、晶界迁移等不可逆塑性变形,这种依赖时间的变形导致储存的弹性势能逐渐耗散,表现为宏观预紧力随时间逐渐衰减。常温下弹簧的应力松弛速率很慢,难以在短时间内获取贮存期性能退化规律,升高温度可激活材料内部位错运动,促进分子链段重排,从而在较短时间内复现长期松弛效应。因此,为了获取弹簧组件在贮存剖面内的应力松弛规律,采用温度加速试验,选取 210、225、230、255 ℃ 共 4 种温度水平,每种温度下取 4 个试验件,试验时长为 72 h。试验得到的弹簧力退化规律如图 4 所示。

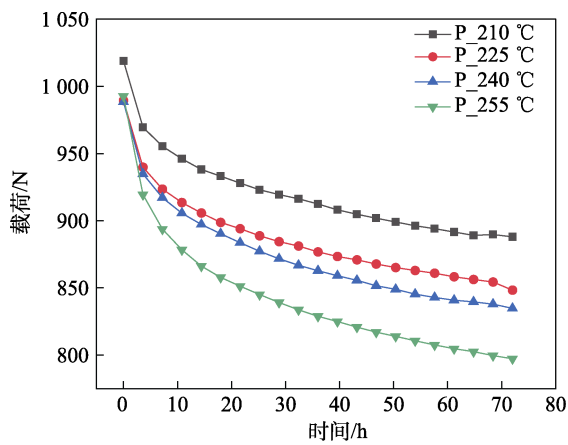


图 4 高温下弹簧力退化曲线
Fig.4 Spring force degradation curve at high temperature

在弹簧材料符合线性黏弹性、主导弛豫机制单一且实验条件恒定的情况下,指数衰减模型能够合理描述应力松弛过程。因此,本文选取指数衰减模型对高温下的应力松弛本构关系进行回归分析:

$$Y(t) = Be^{-K_T t^\alpha} \quad (1)$$

式中: $Y(t)$ 为 t 时刻的性能参数; K_T 为温度 T 对应的退化速率; t 为温度 T 下持续的时间; α 和 B 是待定常数,且不随温度变化。

以 4 个高温下的时间 t 和性能参数 Y 为输入,采用最小二乘法拟合各温度下的性能退化本构模型,得到常量 $B=996.738$, $\alpha=0.334\ 071$, 各温度对应的退化速率见表 2。可见,提高试验温度会显著增加应力松弛速率。

根据贮存环境要求,弹簧实际贮存在 10、30、40、25 ℃ 温度下,且时间比例为 1:1:1:3。采用 Arrhenius 模型,计算贮存温度下的应力松弛本构模型:

表 2 不同试验温度对应的弹簧载荷退化速率
Tab.2 Degradation rate of spring load in relation to various test temperature

温度/℃	210	225	240	255
K_T	0.030 222	0.033 296	0.043 492	0.054 512

$$K = A \cdot e^{\frac{E}{R(\theta+273)}} \quad (2)$$

式中: R 为理想气体常数,取 8.314 472 J/(mol·K); θ 为温度,℃; E 为激活能, J/mol; A 为待定常数。

将表 2 中 4 个高温下的退化速率代入式 (2), 求解得到活化能 $E=29\ 746.485\ 1$ J/mol, 常数 $A=46.92$ 。再将 4 个贮存温度代入式 (2), 得到的退化速率见表 3。各贮存温度及综合贮存剖面内弹簧载荷随贮存时间的退化规律如图 5 所示。计算结果表明, 弹簧载荷衰减主要发生在贮存期前 2 a, 衰减率为 5.6%, 贮存期 20 a 后, 弹簧载荷衰减 6.3%。

表 3 不同贮存温度对应的弹簧载荷退化速率预测
Tab.3 Prediction of spring load degradation rate at different storage temperature

温度/℃	10	30	40	25
K_T	0.000 151	0.000 351	0.000 515	0.000 288

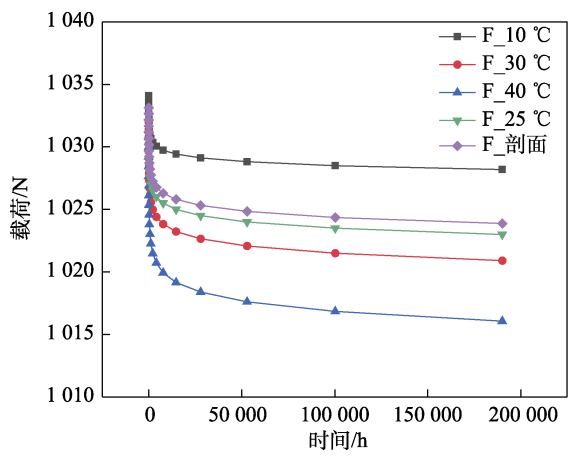


图 5 工作温度下弹簧力预测结果
Fig.5 Prediction results of spring force at operating temperature

2.2 贮存期分离性能演化规律研究

弹簧应力松弛会导致分离性能下降,由分离弹簧在不同贮存期下的性能退化率乘以初始弹性系数得到实际弹性系数,并将其引入分离系统动力学模型,其余参数与表 1 保持一致,评估得到贮存期内分离速度、分离距离随贮存时间的演化规律,结果如图 6 所示。可见,在贮存初期,分离速度、距离随贮存时间退化较快,50 000 h 后,退化速率明显降低。贮存期 20 a 后,分离速度损失 2.1%,分离距离损失 3.1%,满足设计要求。分析分离速度和距离与弹簧载荷损失率之间的关系,结果如图 7 所示。可见,分离速度、

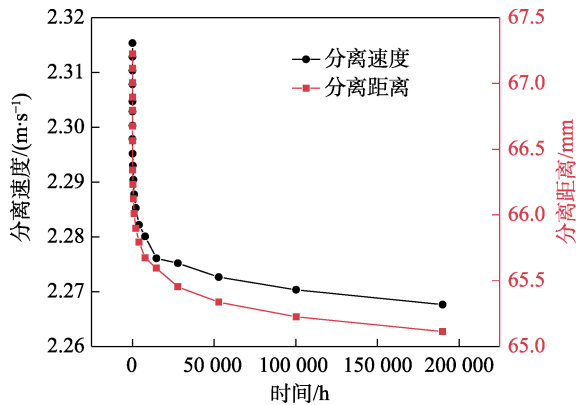


图 6 贮存期内分离速度、距离演化规律

Fig.6 Evolution patterns of separation velocity and distance during storage period

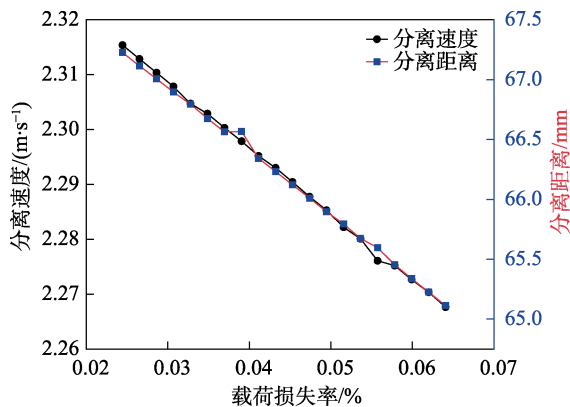


图 7 分离速度、距离与载荷损失率关系

Fig.7 Relationship between separation velocity, distance, and load loss rate

分离距离与弹簧载荷损失率接近线性关系, 因此在分离系统设计初期应考虑弹簧载荷衰减损失的影响。

3 参数分散性对姿态偏角的影响分析

级间分离系统通常采用对称分布的分离组件, 以确保推力均衡, 但在实际分离过程中, 因分离组件弹簧载荷分布离散性、质心轴线偏移及制造公差等因素, 如果被分离件产生过大偏转, 存在碰撞与姿态失稳的风险。基于表 1 参数, 按照正态分布抽取 1 000 个样本, 计算得到了参数分散性影响下的角度偏差分布, 如图 8 所示。可以看出, 最大值为 0.408° , 低于姿态阈值要求的 0.5° , 被分离件姿态失稳的概率较小。

4 结论

本文针对级间分离系统在贮存期的性能演化问题, 研究了弹簧应力松弛效应下的分离系统性能演化规律, 可为航天器长期贮存可靠性评估提供理论支撑。具体结论如下:

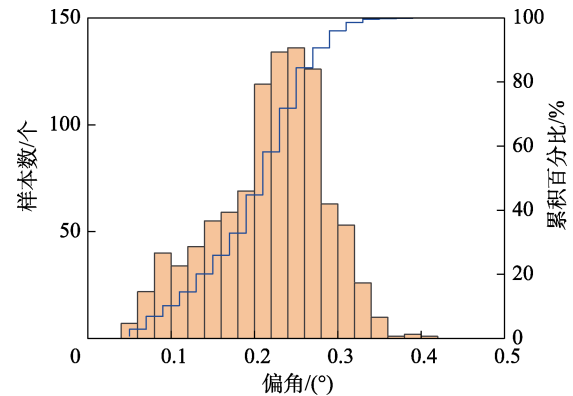


图 8 参数分散性下分离偏角的分布特性

Fig.8 Distribution characteristics of separation deviation angles under parameter dispersion

1) 通过温度加速退化试验揭示了弹簧应力松弛本构关系, 采用 Arrhenius 模型预测了贮存剖面内弹簧力的退化规律。弹簧载荷衰减主要发生在贮存期前 2 a, 衰减率为 5.6%, 贮存 20 a 后, 弹簧载荷衰减 6.3%。

2) 将弹簧应力松弛本构模型与分离系统多体动力学模型相融合, 得到分离系统贮存期内的性能演化规律。弹簧应力松弛效应会导致分离失效风险增加, 对分离速度、分离距离、分离姿态均会产生影响, 需在设计初期评估其影响。

3) 分析了参数分散性影响下的分离转角分布特性, 最大偏角低于姿态阈值要求, 具有一定的安全余量。

参考文献:

- [1] 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]. 材料导报, 2023, 37(23): 191-196.
WU H L, LI Z S, JIN Y R, et al. Abnormal Load Loss and Cause Analysis of Spring Stress Relaxation[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 191-196.
- [2] TU T Q, WANG J, LU J N, et al. Microstructure-Dependent Stress Relaxation Property of 2000 MPa Grade Valve Spring Steels[J]. Steel Research International, 2024: 2400483.
- [3] 李少龙, 赵振, 董红莉, 等. GH4090 合金圆柱螺旋弹簧应力松弛性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(2): 2209-2214.
LI S L, ZHAO Z, DONG H L, et al. Research on Stress Relaxation Performance of GH4090 Superalloy Cylindrical Spiral Spring[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(2): 2209-2214.
- [4] NONG X, FENG W B, GAO J Z, et al. Stress Relaxation Constitutive Relations and Finite Element Analysis of T9A Helical Compression Spring[J]. Materials Transactions, 2021, 62(7): 962-967.
- [5] HU J W, CHEN X, WANG Y S. Stress Relaxation Mechanism and Life Evaluation of Titanium Alloy

- Springs under Long-Term Thermo-Mechanical Coupling Conditions[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108472.
- [6] 彭琛, 桂超, 李镭, 等. 轴压松弛圆柱螺旋弹簧载荷分量数值模拟研究[J]. *环境技术*, 2024, 42(10): 260-271.
PENG C, GUI C, LI Q, et al. Numerical Simulation of Load Components of Cylindrical Helical Spring with Axial Compression Relaxation[J]. *Environmental Technology*, 2024, 42(10): 260-271.
- [7] 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. Study on Stress Relaxation and Life Prediction of Canted Coil Spring[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(5): 795-803.
- [8] ZHANG B, REN P J, WANG Z, et al. Research on the Spring Creep Based on the Load Simulator of the Double Torsion Spring Steering Gear[J]. *Materials*, 2023, 16(10): 3763.
- [9] 苏懿, 王心雨, 冉渭, 等. 弹簧应力松弛载荷的在线测量新方法[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(4): 79-85.
SU Y, WANG X Y, RAN W, et al. New Method for On-Line Measurement of Spring Load during Stress Relaxation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(4): 79-85.
- [10] 蒋克全, 王宝龙, 赵兴德. 压缩弹簧抗应力松弛技术应用研究[J]. *航空精密制造技术*, 2024, 60(4): 52-55.
JIANG K Q, WANG B L, ZHAO X D. Research on Application of Anti-Stress Relaxation Technology of Compression Spring[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2024, 60(4): 52-55.
- [11] 靳明旭, 赵春光, 常程城, 等. 高速动车组制动系统调压阀弹簧力值衰减因素试验研究[J]. *铁道机车车辆*, 2023, 43(6): 136-140.
JIN M X, ZHAO C G, CHANG C C, et al. Test and Optimization of Springs Force for Pressure Regulating Valve in Braking System of High-Speed EMU[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2023, 43(6): 136-140.
- [12] ZHANG T T, GAO Z G, XU Z F, et al. Stress Relaxation Behavior and Life Prediction of 1Cr₁₈Ni₉ Spring Based on PSO-TCN Attention[J]. *Advances in Manufacturing*, 2025, 24: 538-542.
- [13] 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 Y, WANG X Y, JIN Y R, 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.
- [14] XU Y H, CHEN L, SONG G L. Separation Schemes and Dynamic Analyses on Parallel Stage Separation of Launch Vehicles[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2784(1): 012005.
- [15] WANG Y, WANG Y P. Unsteady Interaction and Dynamic Stability Analysis of a Two-Stage-to-Orbit Vehicle during Transverse Stage Separation[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 216: 488-503.
- [16] LU Y, YUE B Z, HAO B L, et al. Stage Separation of Recoverable Liquid Launch Vehicle by Using Moving Pulsating Ball Analogue for Propellant Sloshing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(2): 360-370.
- [17] MENG H, CHEN J Y, CAO M Q, et al. An Experimental Study on the Effect of Interstage Inlet Gas on Separation Performance of Two-Stage Series Cyclone Separators[J]. *Powder Technology*, 2024, 446: 120147.
- [18] SONG W, AI B C, ZHAO X J. Prediction and Evaluation of the Stage-Separation Compatibility of an Internally Carried Air-Launch Vehicle[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 105: 106001.
- [19] YANG L, YE Z Y, LI W H, et al. Longitudinal Aerodynamic Modeling and Verification for Air-Launch-to-Orbit System during Stage Separation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 117: 106915.
- [20] CHOI S, KWON S, LEE S E, et al. Shock Response of Precision Linear Shaped Charge in a Multistage Rocket System[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2023, 24(1): 92-104.
- [21] 黎小峰, 巫世晶, 李小勇, 等. 考虑弹簧应力松弛的高压断路器运动特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(7): 1575-1583.
LI X F, WU S J, LI X Y, et al. Kinetic Characteristics of High Voltage Circuit Breakers Based on Spring Stress Relaxation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(7): 1575-1583.
- [22] XIE Y, SHEN D J, HU J, et al. Cause Analysis of the Compression Spring Stress Relaxation of Circuit Breaker Operating Mechanism in a 220 kV Substation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2819(1): 012071.