

弹簧卡环解锁力影响因素及控制方法

时晓钊, 刘志亮, 时晓铭*, 韩刚侠, 彭维奇

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月9日; 发布日期: 2026年1月20日

摘要

多批次弹簧卡环在预压解锁试验中出现解锁力大比例不合格问题, 严重影响生产进度。通过分析弹簧卡环各生产环节, 找出影响零件解锁性能的关键过程和控制方法。研究结果表明: 热处理过程影响零件内部组织的一致性, 进而影响弹簧卡环内应力, 最终影响弹簧卡环解锁力, 适当提高热处理回火时间可以降低预压解锁力; 弹簧卡环解锁磨合面的粗糙度对解锁力较大。

关键词

弹簧卡环, 预压解锁, 热处理, 表面粗糙度

Spring Ring Unlocking Force Influencing Factors and Control Methods

Xiaozhao Shi, Zhiliang Liu, Xiaoming Shi*, Gangxia Han, Weiqi Peng

Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnic Technology Co., Ltd., Luzhou Sichuan

Received: December 9, 2025; accepted: January 9, 2026; published: January 20, 2026

Abstract

The large batch of spring rings has a large proportion of unlocking force unqualified problems in the pre-compression unlocking test, which seriously affects production progress. Through the analysis of each production link of the spring ring, the key processes and control methods that affect the unlocking performance of the parts are found out. The results show that the heat treatment process affects the uniformity of the internal structure of the parts, and then affects the internal stress of the spring ring, and finally affects the unlock force of the spring ring. Appropriately increasing the heat treatment tempering time can reduce the pre-compression unlocking force; the roughness of the unlocking friction surface the spring ring has a greater effect on the unlocking force.

*通讯作者。

Keywords

Spring Collet, Pre-Pressure Unlocking, Heat Treatment, Surface Roughness

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

弹簧卡环广泛应用于点式分离火工装置，是决定分离装置能否完成解锁的关键零件。利用弹簧卡环与壳体斜面配合运动收缩弹簧卡环实现解锁。弹簧卡环解锁力影响了产品解锁性能和环境适应性，当解锁力偏大时，可能导致产品分离失败，当解锁力偏小时，可能导致在复杂力学环境下提前解锁。因此，该类型结构产品一般对解锁力提出明确的指标：用运动组件将弹簧卡环压入壳体内孔里再取出，重复完 5 次试验后如解锁力满足要求则该发产品判为合格，若 8 次试验后解锁力仍不满足要求，则应更换弹簧卡环。

某系列产品要求解锁力为 900 N~1200 N。在批生产的弹簧卡环预压试验过程中，出现了解锁力超指标上限的情况，且预压解锁稳定性差，对生产进度和产品交付造成不利影响。本文对弹簧卡环加工工艺过程进行梳理分析，结合仿真分析和工艺试验验证确定了影响各类弹簧卡环解锁力的主要影响因素，提出并验证了对应的控制方法，有效解决了预压解锁力不合格问题。

2. 弹簧卡环解锁力影响因素分析

某系列产品弹簧卡环材料为弹簧钢，牌号为 50CrVA GB/T3077-1999，热处理要求为 HRC32~37，镀覆方式为 Fe/Ap.Ni8，结合弹簧卡环工艺流程分析，对预压解锁力不稳定进行 FMEA 分析，如下图 1 所示，末端 9 个要素可能是影响弹簧卡环预压解锁力因素。

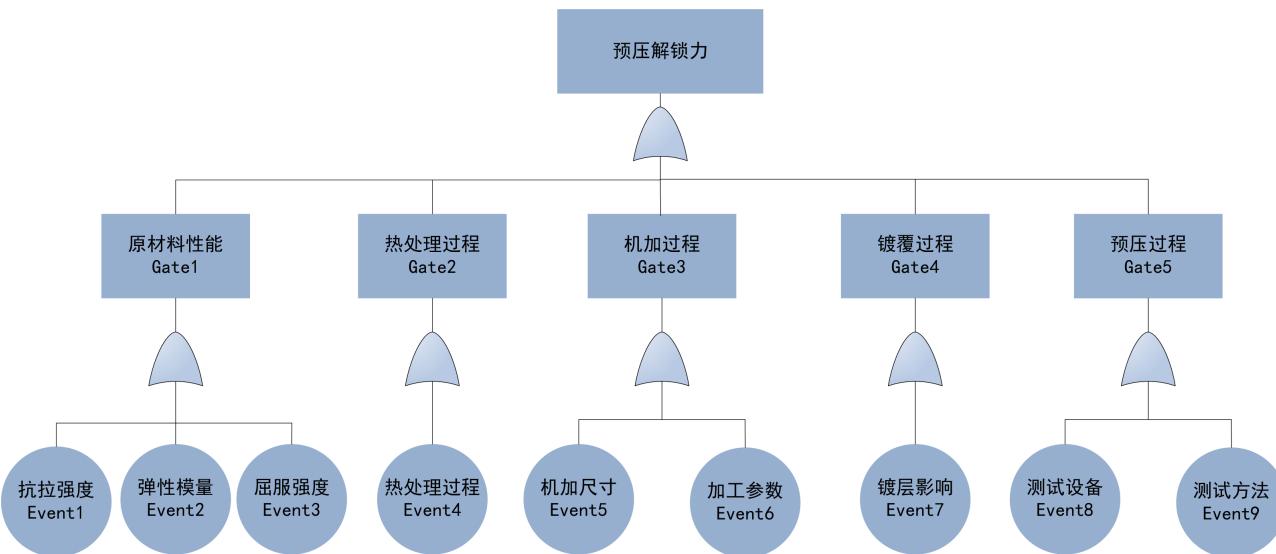


Figure 1. FMEA analysis chart of pre-press unlocking force

图 1. 预压解锁力 FMEA 分析图

3. 弹簧卡环解锁力控制方法

3.1. Event1-3——原材料性能

原材料的力学性能是影响弹簧卡环预压解锁力的一个重要因素，其中包括抗拉强度、弹性模量、弹性极限等，为测试原材料性能并分析原材一致性，分别从不同的棒料上下取材料加工成材料试验件，经拉伸破坏力学试验，拉伸破坏数据见图2，原材料的力学性能基本一致。

为进一步验证，进行如下试验：引入最小范围影响因子，试验过程不进行热处理，原材料仅进行同参数机加过程及同槽镀覆过程加工成为弹簧卡环，再进行预压解锁试验，试验结果如图3所示，一致性的原材料加工成为的弹簧卡环预压解锁力较稳定，不进行热处理后弹簧卡环经多次磨合后，预压解锁力从800 N左右稳定在400 N~600 N范围。

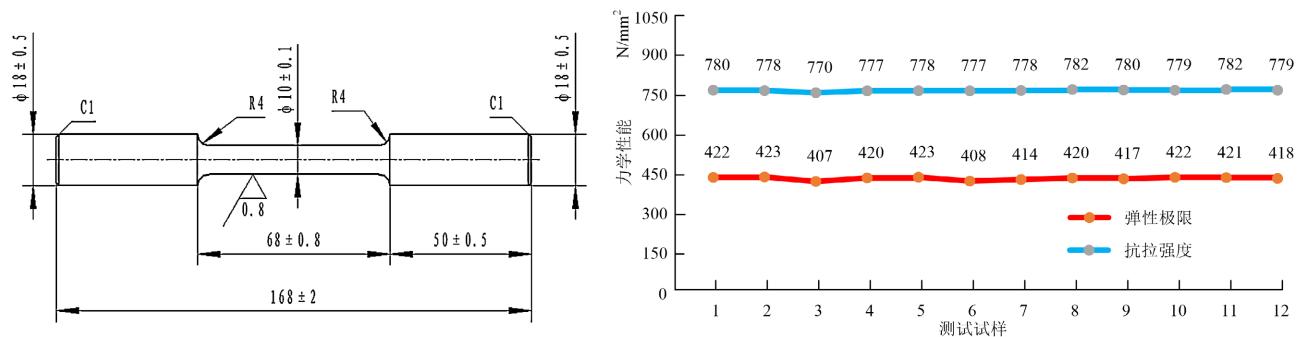


Figure 2. Structure of the raw material tensile failure test piece and raw material property data chart

图2. 原材料拉伸破坏试验件结构及原材料性能数据图

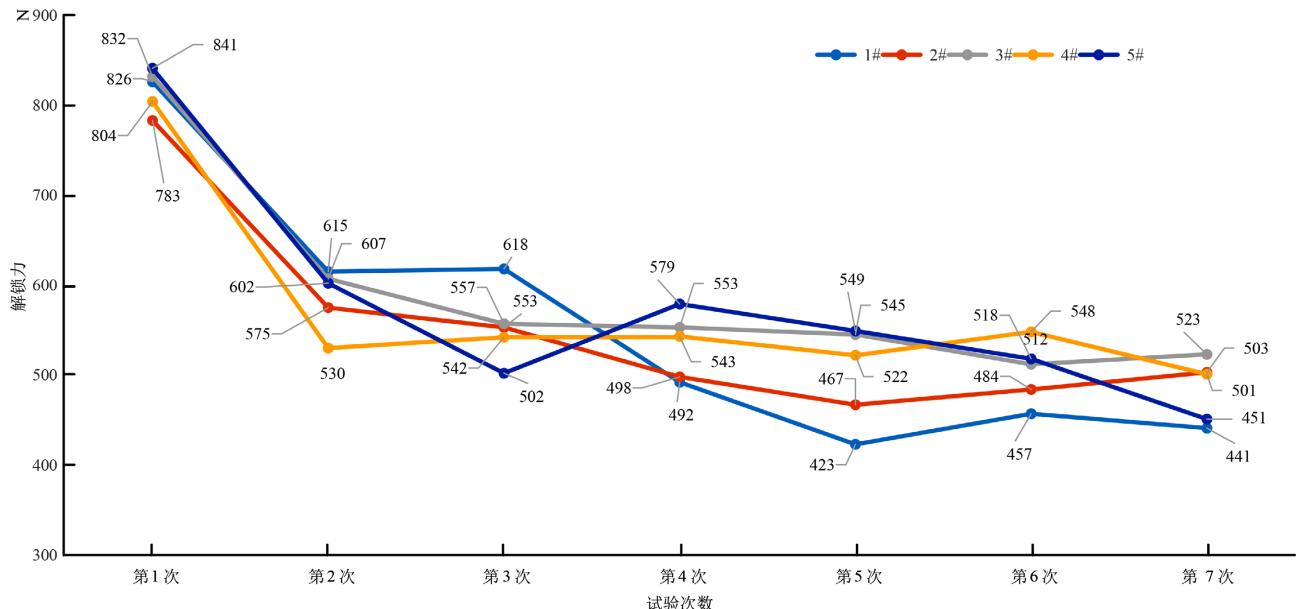


Figure 3. Results of the spring collet pre-compression test without heat treatment

图3. 不经热处理进行弹簧卡环预压试验结果

3.2. Event 1~4——热处理过程

热处理过程会使材料金相组织发生转变，从而导致材料硬度及相关性能发生变化[1][2]。热处理淬火

温度按 $850^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 控制, 淬火时间按 66~68 min 控制, 回火温度按 $630^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 控制, 回火时间分 5 组加工再进行试验件拉力试验。从图 4 可知, 回火时间越短, 热处理硬度越高, 弹性极限越高、抗拉强度越高。弹簧卡环预压解锁过程在未发生完全弹性形变前, 热处理硬度越高, 弹性极限越高, 对应的预压解锁力也越大。当原材料的弹性极限超过预压解锁所需最大应力时, 预压解锁力趋于稳定, 不会随着材料硬度提高而提高。

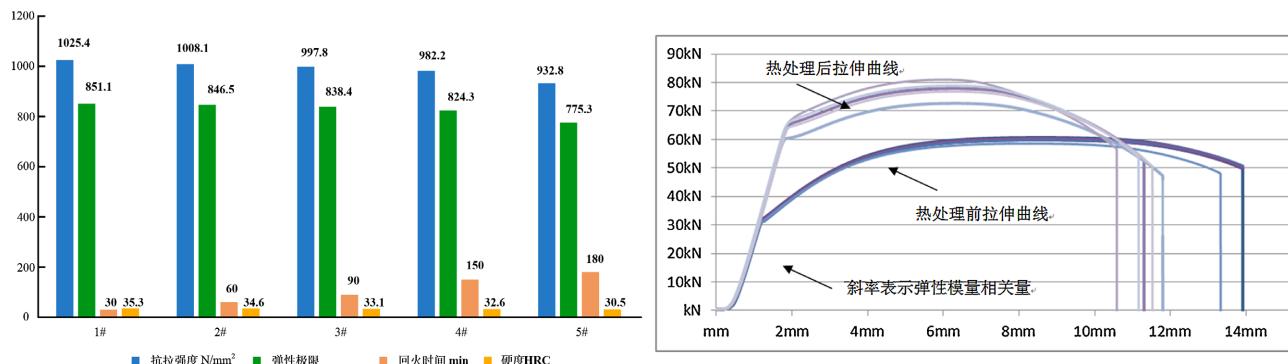


Figure 4. Experimental results of materials with different tempering times and tensile curves of materials
图 4. 不同回火时间材料试验结果及材料拉伸曲线

分别对预压解锁试验不合格的弹簧卡环进行金相分析, 结果如图 5 所示: 1#和 2#均为回火屈氏体 + 铁素体的混合体, 其中 1#含有的铁素体较多, 组织结构欠佳。由于不同组织的晶粒大小有区别, 就易导致产品在热处理过程中产生内应力, 故预压解锁过程还有可能存在弹簧卡环内应力影响。

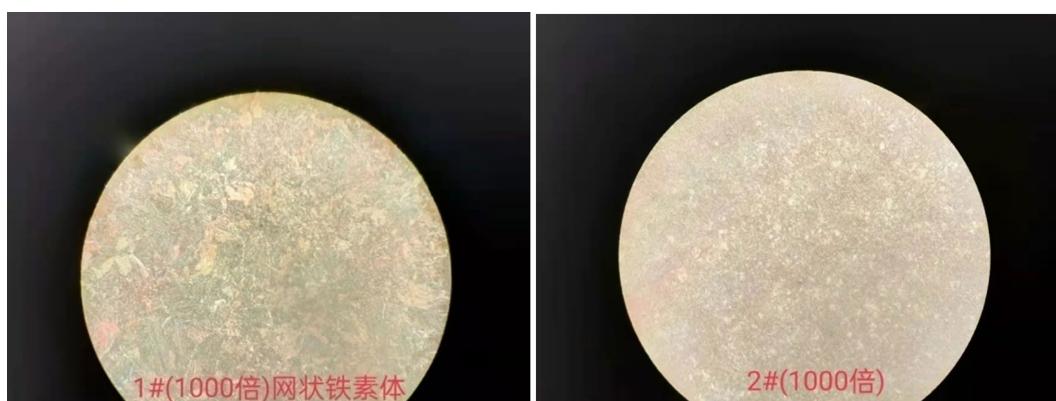


Figure 5. Photomicrograph of the spring clip at 1000×
图 5. 簧卡环金相试验 1000 倍放大图

热处理过程分为淬火过程和回火过程, 淬火过程主要作用使金相组织发生转变, 但转变的过程会产生较大的内应力[3]。回火过程主要作用: 1) 提高组织稳定性; 2) 消除组织内应力; 3) 调整材料力学性能, 但回火过程会降低材料硬度[4] [5]。由此可知, 适当延长回火时间, 可以消除内应力的影响。

3.3. Event 5——机加尺寸

由于弹簧卡环是关键零件, 图样对于各尺寸公差要求都比较高, 所以合格的弹簧卡环尺寸范围波动较小, 用同性能原材料按不同机加尺寸分别加工成为弹簧卡环, 机加尺寸分别按外形尺寸上限加工、下限加工, 再进行预压解锁试验, 结果如图 6 所示: 机加尺寸对预压解锁力存在一定影响, 但影响很小。

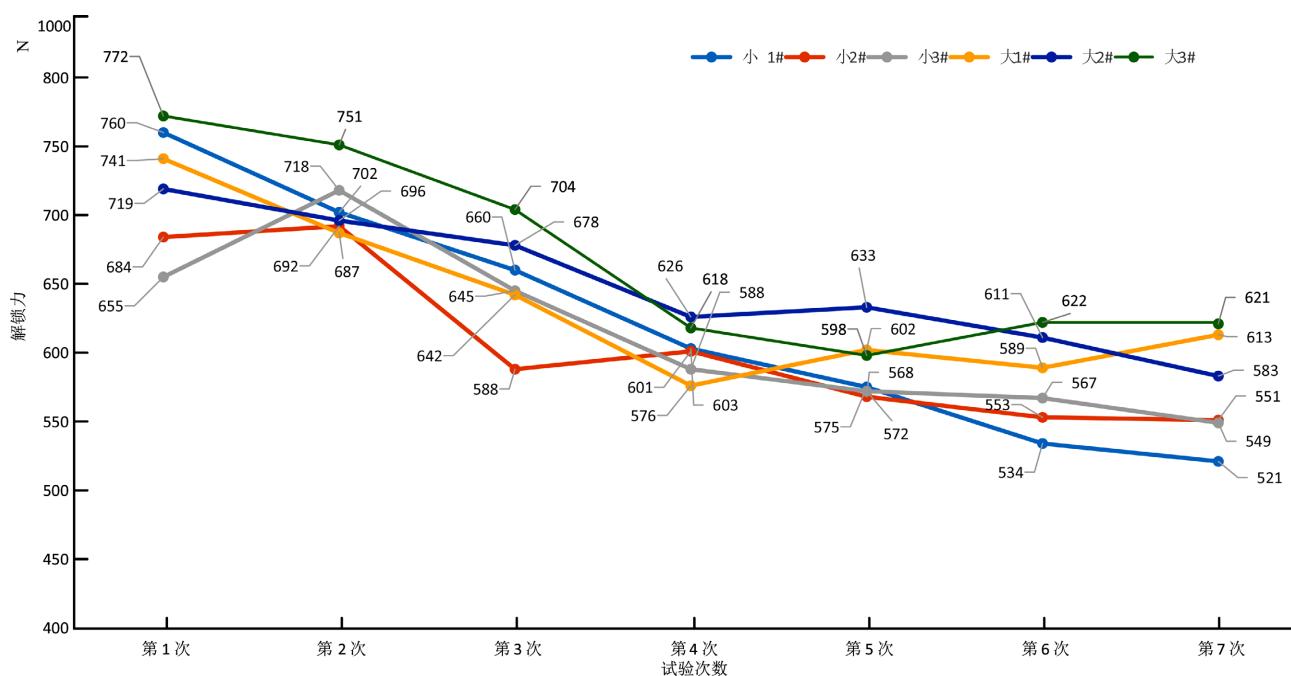


Figure 6. The pre-pressure unlocking force of the upper and lower limit spring collet
图 6. 机加尺寸上、下限弹簧卡环预压解锁力图

3.4. Event 6——摩擦系数

为确定弹簧卡环表面粗糙度影响大小进行如下试验：将精加工初始参数进刀量由 0.05 mm/s 调整到 0.1 mm/s ，精加工余量由 0.1 mm 调整到 0.2 mm ，零件不进行热处理，其余内容按工艺执行，加工后弹簧卡环表面粗糙度见图 7 所示。左端调整加工参数前弹簧卡环表面粗糙度在 $\text{Ra}0.8\text{--Ra}1.6$ 之间，而右端调整加工参数后弹簧卡环面粗糙度在 $\text{Ra}1.6\text{--Ra}3.2$ 之间。

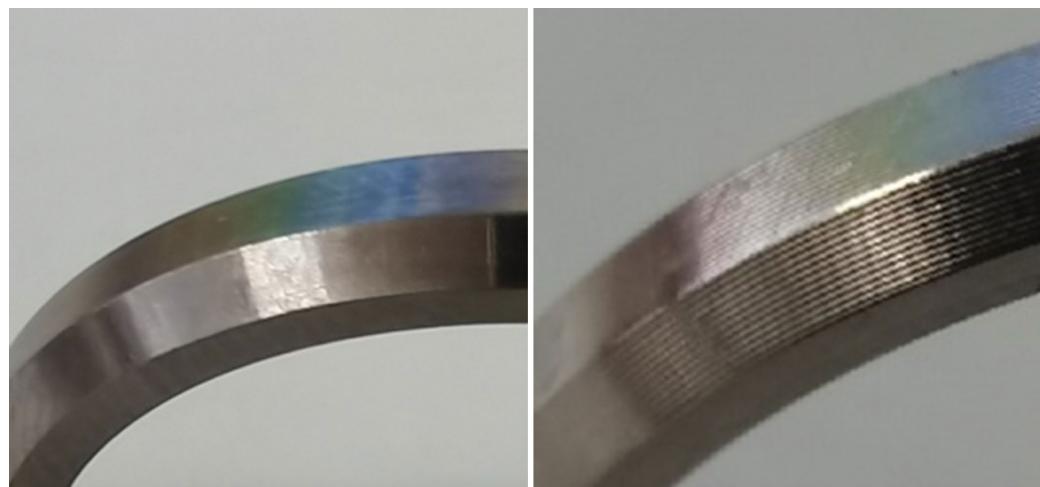


Figure 7. Different surface profile of spring collet
图 7. 不同粗糙度弹簧卡环表面实物图

将调整加工参数后的弹簧卡环进行预压解锁试验，结果如图 8 所示，与图 3 正常的弹簧卡环相比，粗糙度较大的弹簧卡环预压结果严重超出 $400\text{--}600 \text{ N}$ 原材料试验件的统计数据，且预压力稳定性较差。

由此可见, 粗糙度对于预压解锁力影响很大, 弹簧卡环表面粗糙度越大, 预压解锁力越大。

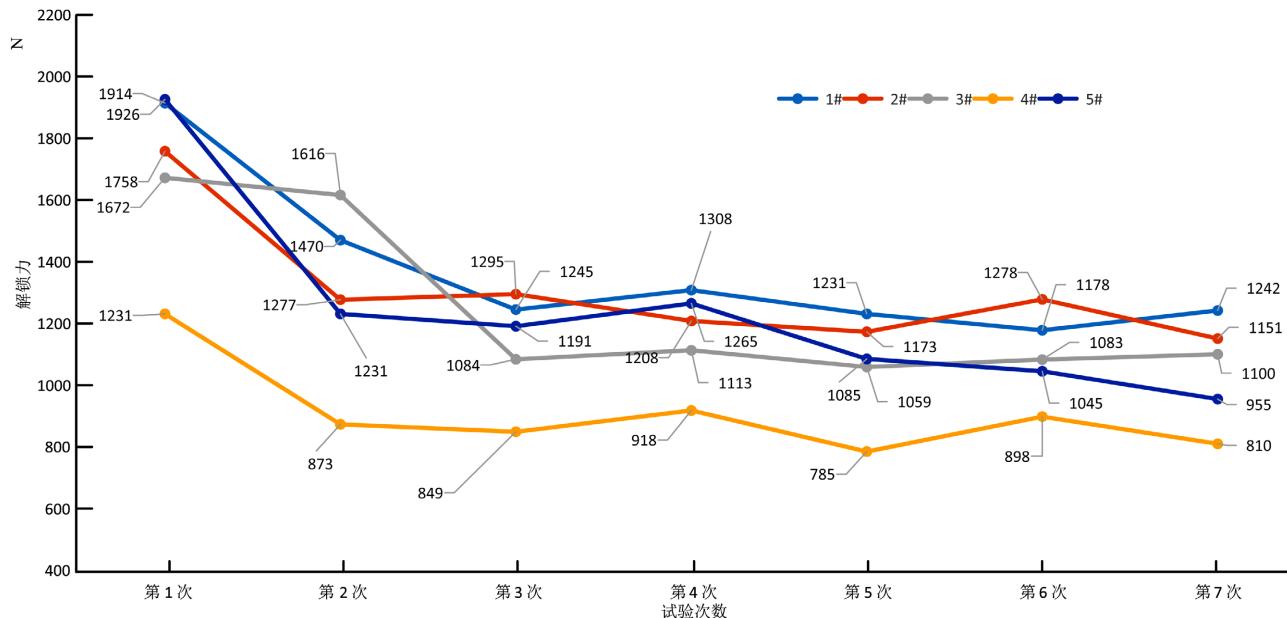


Figure 8. Unlocking force of the rough spring collet

图 8. 粗糙度较大的弹簧卡环预压解锁力

3.5. Event 7~9——镀覆、测试设备、测试方法影响

弹簧卡环的镀覆方式为 Fe/Ap-Ni8, 该种镀覆方式为化学镀镍, 通过溶液将产品同槽镀覆, 镀层可检可测, 镀层一致性较好^{[6][7]}。相比于机加外形尺寸公差, 镀层公差为 0.008~0.012 mm, 对产品尺寸影响很小, 对预压解锁力影响可以忽略。预压解锁所用设备为电脑拉力试验机每年均进行计量检定, 设备一直处于检定有效期内, 测试设备稳定可靠。

预压解锁力的测试方法主要涉及人员能力水平、工装差异以及工艺方法差异。预压解锁力测试人员稳定, 工装经检测均满足工装图样要求, 工艺方法从量产首批生产一直沿用至今, 试验过程中加载平稳, 未出现任何失稳情况。

综上所述, 得如下结论: 1) 对弹簧卡环预压解锁力产生主要影响的因素有弹簧卡环表面粗糙度、热处理硬度、热处理内应力; 2) 适当增加热处理回火时间, 可以消除热处理内应力影响, 但会降低热处理硬度。

4. 仿真分析

对弹簧卡环解锁过程进行仿真分析^[8], 利用 Abaqus 根据图样名义尺寸建立实体三维对称模型, 采用 C3D8R 单元网格, 增加对称约束, 底部 X、Y、Z 方向约束, 弹簧卡环顶部施加 Y 方向位移 4 mm, 接触面施加表面到表面的有限滑移接触要求, 接触面的摩擦系数根据仿真要求调整, 查摩擦系数对照表, 钢-铝有润滑时摩擦系数 0.02, 无润滑时 0.17, 钢有润滑时摩擦系数为 0.05~0.1, 无润滑时 0.1。但摩擦系数与表面的光洁度、材料的硬度有关系。材料属性: 根据材料力学书籍, 钢的弹性模量 E: 210,000 MPa, 泊松比 0.3。铝的弹性模量 E: 70,000, 泊松比 0.33^[9], 如下图 9 所示。

仿真结果如图 10 所示, 从仿真结果可以看出: 1) 弹簧卡环最大应力达到 1200 MPa, 超过材料的弹性极限(约 850 MPa), 弹簧卡环已包含塑性变形, 且塑性变形较大; 2) 壳体最大应力较小, 远小于材料弹性极限, 因此, 壳体无塑性变形。

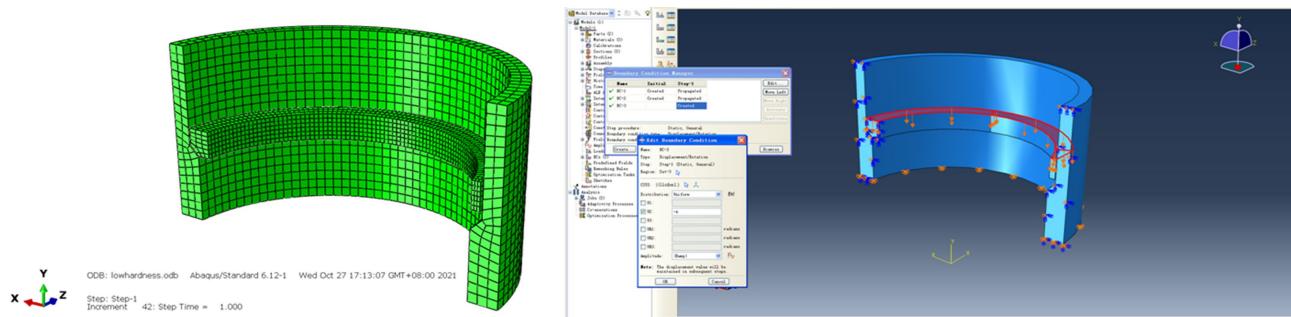


Figure 9. Simulation model boundary conditions and simulation model diagram
图 9. 仿真模型边界条件及仿真模型图

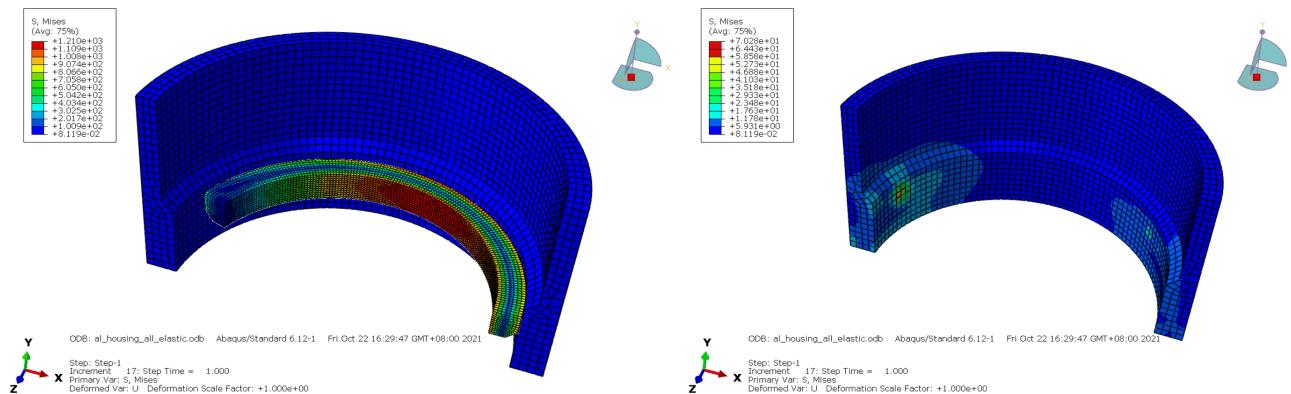


Figure 10. Stress distribution diagram of the spring ring and housing maximum
图 10. 弹簧卡环和壳体最大应力分布图

5. 结论

对弹簧卡环预压解锁力产生主要影响的因素有弹簧卡环表面粗糙度、热处理硬度、热处理内应力，延长热处理回火时间，以消除热处理应力，可以降低弹簧卡环预压解锁力，50CrVA 类弹簧钢性能较佳的热处理硬度区间在 40HRC~50HRC [10]，而本文研究的某系列弹簧卡环要求硬度为 HRC32-37，金相组织不均匀，该弹簧卡环经热处理后金相稳定性差，易产生热处理内应力，预压解锁过程是弹性变形与塑性变形混合过程，解锁力与前者相比稳定性差，弹簧卡环采用 40HRC-50HRC 硬度值还需进一步探讨。

参考文献

- [1] 叶永超. 50CrVA 弹簧钢材料的热处理工艺研究[J]. 信息记录材料, 2025, 26(9): 20-28.
- [2] 董纪, 杨晓斌, 刘晨曦, 等. 超高强度钢热处理组织中碳化物演化行为研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1052-1063.
- [3] 张衡, 张迪, 刘馨宇, 等. 锻造及热处理工艺对耐磨钢组织及耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(7): 138-143.
- [4] 王玲奇, 何燕霖, 潘乐. 回火温度对高氮不锈钢显微组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(6): 8-13.
- [5] 邓彪, 陈蓬, 王国栋. 回火温度对二次硬化马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 65-71.
- [6] 刘明举, 程纪华. 化学镀镍镀层质量影响因素的分析[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(12): 1-4.
- [7] 谢洪波, 江水, 陈华三, 等. 化学镀镍规律及机理探讨[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(2): 26-30.

- [8] 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 王守新. 材料力学[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [10] 热处理手册编委会. 热处理手册第二分册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.