

文章编号 : 1000-4750(2006)06-0142-06

# Inconel718 合金 O 形环回弹特性研究

余伟炜<sup>1,3</sup>, \*蔡力勋<sup>1</sup>, 叶裕明<sup>1</sup>, 左 国<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学应用力学与工程系, 四川, 成都, 610031; 2. 中国核动力院, 四川, 成都, 610041;  
3. 天津大学化工学院化工过程机械系, 天津, 300072)

**摘 要 :** 对从 Inconel718 合金管材截取的 O 形环小试样进行了压缩回弹试验研究。试验表明, 温度、加载历史和轴向尺寸对 O 形环回弹量无明显影响; 常温下 O 形环回弹量随压扁度的变化在 6%~30% 的压扁度范围内表现为抛物递增, 此时 O 形环密封性能良好, 但当压扁度超过 30%, 回弹量开始递减, 且试样的压缩接触面伴随出现凹陷, 在 600 以上还发生坍塌。运用 ANSYS 的弹塑性接触分析功能, 采用不同的本构模型, 分别建立了二维、三维有限元网格模型, 对 O 形环的压缩回弹过程进行了数值模拟。研究表明, ANSYS 的弹塑性接触有限元方法对 O 形环回弹量的分析模拟结果与试验结果吻合较好。

**关键词 :** 塑性; Inconel718; O 形环; 回弹; 高温; 有限元; ANSYS; 接触分析

**中图分类号 :** O344; TL341 **文献标识码 :** A

## SPRINGBACK PROPERTIES OF INCONEL718 ALLOY O-RING

YU Wei-wei<sup>1,3</sup>, \*CAI Li-xun<sup>1</sup>, YE Yu-ming<sup>1</sup>, ZUO Guo<sup>2</sup>

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;  
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 610041, China;  
3. School of Chemical Engineering & Technology, Tianjin University, Tianjin 30072, China)

**Abstract:** To investigate the compression springback properties of Inconel718 alloy O-ring used to seal pressure vessels, a series of experiments based on small O-ring specimens cut from alloy tubes were conducted. Experimental results show that temperature, loading history and axial-length have small effects on the springback properties of the O-ring specimens. At room temperature, it is found that the springback value of an O-ring specimen increases with an increase in the compression ratio as a parabola if the compression ratio is between 6% and 30%. The sealing property of the O-ring is good in this ratio range. When the compression ratio exceeds 30%, the springback value decreases. Environmental temperature higher than 600 leads to the collapse of the initial contact surface of an O-ring specimen during compression test. In order to simulate the springback properties of O-ring, 2D and 3D finite element analyses were carried out with ANSYS program using different constitutive models. It is shown that the simulation results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** plasticity; Inconel718; O-ring; springback; elevated temperature; FEA; ANSYS; contact analysis

收稿日期: 2004-08-10; 修改日期: 2005-05-23

作者简介: 余伟炜(1981), 男, 江苏盐城市人, 硕士生, 从事材料本构与多轴疲劳研究;

\*蔡力勋(1959), 男, 山东人, 教授, 硕士, 工程力学教研、实验室主任, 从事本构关系、疲劳断裂研究(Email: lix\_cai@263.net);

叶裕明(1979), 男, 浙江人, 硕士, 从事电子产品的强度分析;

左 国(1969), 男, 四川人, 副研究员, 研究室主任, 从事容器密封技术研究。

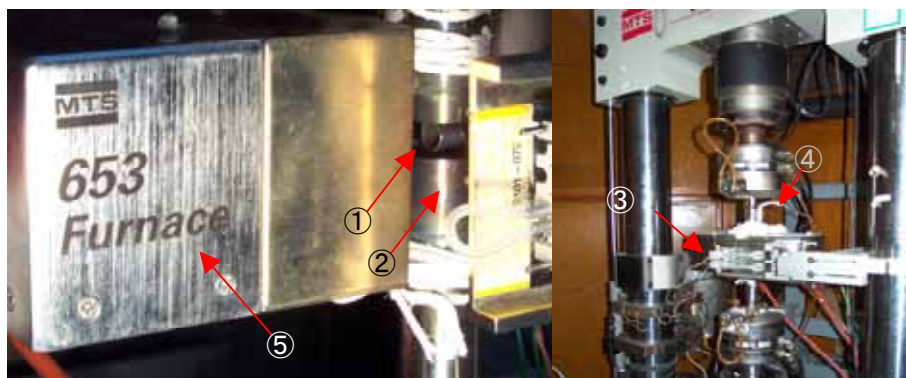
O形环密封技术自60年代被提出后,在压力容器法兰密封结构中得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。正常情况下,压力容器的密封是由法兰面间的O形环的回弹实现的。由于O形环在服役过程中需承受高温与高压等恶劣的工作环境和部分或完全的反复加卸载等复杂的载荷条件,一旦O形环密封失效,即可发生泄漏。为了确保在役过程中的密封可靠性,必须确保O形环的回弹特性。目前,国内对金属O形环回弹特性及其影响因素尚缺乏理论与试验研究,现有的相关工作<sup>[5-7]</sup>也只做了平面分析,而国外相关资料比较缺乏。出于反应堆压力容器结构安全的迫切要求,开展Inconel718合金O形环回弹特性研究对核工程安全控制有重要意义。

## 1 研究条件

### 1.1 试验设备与有限元软件

O形环压缩试验和单轴拉伸本构试验所用材料试验设备分别为MTS809(25kN)和MTS809(125kN)电液伺服材料试验机,MTS控制系统为TestStarII,

应用软件为TestWare-SX。在常温直至700℃的高温下,应变引伸计MTS632.68f-08用来测量O形环的压缩位移,还用来测量常温单轴拉伸试样的轴向应变。试验机载荷传感器和应变引伸计的测量精度为0.5级。高温发生与控制设备为MTS653高温炉系统,高温炉内轴向均温区范围为50mm,该范围内的温度梯度为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,温度控制精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。回弹试验中是通过点焊在上夹具下部端面一侧的热电偶测量试样外表面温度,由于试样直径较小,温度梯度的影响不大。在高温单拉试验中,则将热电偶直接点焊在管材试样中部的外表面来测量温度。高温条件下,在对试样进行加载前均保温15分钟。通过计算机对整个试验过程进行闭环控制和实时数据采集。在O形环压缩回弹试验中,指令控制波形均为三角波,在压缩阶段采用位移(LVDT)控制方式,位移加载速率为0.01mm/s,卸载阶段采用力(Force)控制方式,卸载时间为20s。O形环压缩回弹试验情形如图1所示。拉伸试验控制波形也为三角波,采用位移控制,位移加载速率为0.005mm/s。



① 试样 ② 夹具 ③ 应变引伸计 ④ 热电偶 ⑤ 高温炉

图1 O形环试样的高温加载装置

Fig.1 Loading Equipments for an O-ring specimen at elevated temperature

本文涉及的有限元分析属于接触问题,采用ANSYS软件进行非线性弹塑性接触分析。

### 1.2 试验材料与试样尺寸

试样材料为Inconel718合金管材<sup>[8-10]</sup>,其化学成分(质量百分比)为C: 0.05、Si: 0.03、Mn: 0.2、Cr: 19.0、Mo: 3.0、Al: 0.7、Ti: 1.0、Nb+Ta: 5.0、B: 0.006,余为Fe。Inconel718管材的规格为 $\phi 12.7 \times 1.27$ (管材实际外径 $d=12.75\text{mm}$ ,壁厚 $t=1.28\text{mm}$ )。试验所用的某批国产Inconel718合金管材在出厂时已经进行了固溶处理。O形环试样是通过线切割机将Inconel718管材沿轴向切割成长度为4mm、8mm、

10mm、20mm的短管。

## 2 试验分析

### 2.1 回弹试验参数

为了研究温度、加载历史以及长度尺寸等因素对O形环回弹量的影响,设计了如表1所示试验工况,其中,试验温度为20、200、300、350、450、600、650、700;压缩比在6%~12%范围内有不同加载历史的加载路径。在各加载历史路径中的初始压缩比下的加载方式可以理解为独立加载路径,故表1中含6%、8%、

10%、12%、40%、50%的压缩比独立加载路径。

表 1 O 形环试样加载工况

Table 1 Loading conditions for O-ring specimens

试样编号	试样长度 L/mm	温度 T/°C	压缩比λ的加载路径/%
2-00	10	20	6→7→8→9→10→11→12
2-11	10	20	12→15→20→25→30
8-06	10	20	40
8-07	10	20	50
2-01	10	200	6→7→8→9→10→11→12
3-01	20	300	6→7→8→9→10→11→12
3-02	8	300	6→7→8→9→10→11→12
3-03	4	300	6→7→8→9→10→11→12
2-02	10	300	6→7→8→9→10→11→12
2-07	10	300	8→9→10→11→12
2-08	10	300	10→11→12
2-10	10	300	6→12
2-09	10	300	12
2-03	10	350	6→7→8→9→10→11→12
2-04	10	450	6→7→8→9→10→11→12
2-05	10	600	6→7→8→9→10→11→12
2-06	10	650	12→15→20→25→30
2-12	10	700	6→7→8→9→10→11→12

(注:  $\lambda = \Delta / d$ ,  $\Delta$ 为压缩位移量,  $d$ 为O形环外径)

## 2.2 试验结果分析

### 2.2.1 温度对回弹量的影响

考虑到压缩比 $\lambda=8\%$ 时 O 形环对应的回弹量  $H_{\lambda=8\%}$ 是工程设计中的重要指标, 故以  $H_{\lambda=8\%}$ 为基准, 定义回弹比为

$$H_b = \frac{H_{\lambda=\alpha\%}}{H_{\lambda=8\%}} \quad (1)$$

式中,  $\alpha\%$ 为某压缩比。

图 2、图 3 分别给出了在不同温度下 Inconel718 合金 O 形环回弹量和回弹比随压缩比变化的试验结果。

由图可见: 对应于相同压缩比, 各温度下的回弹量结果处于一个狭窄分散带内, 这表明温度对回弹量的影响不显著; 不同温度下回弹比~压缩比试验结果基本重合, 当压缩比为 6%~12%, 回弹比随压缩比变化关系基本呈单调线性关系:  $H_b = 0.0231\lambda + 0.8091$ 。该线性关系的斜率很小, 表明回弹量增量随压缩比变化较平缓, 当压缩比  $\lambda$  由 8%提高至 12%, 回弹比变为 1.08, 回弹量  $H$  仅增加了 0.05mm。

试验表明, 当温度高于一定温度时试样可发生压缩坍塌。在 600°C 高温下压缩比达到 30%, 试样未出现结构坍塌现象, 而当温度达到 650°C、压缩比达到 30%时, O 形环试样发生断裂坍塌, 断裂部位为试样

与上下夹具的初始接触部位(如图 4 所示)。而在 700°C 高温下, 当压缩比仅为 6%时, O 形环试样即发生断裂坍塌。因此, O 形环不发生压缩断裂坍塌的状态为: 温度低于 600°C, 压缩比小于 30%。

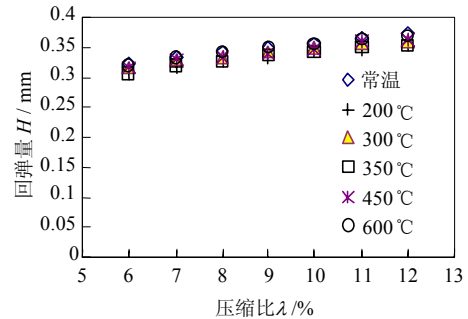


图 2 不同温度下回弹量与压缩比关系曲线

Fig.2 Relationships between springback of the alloy and compression ratio at various elevated temperatures

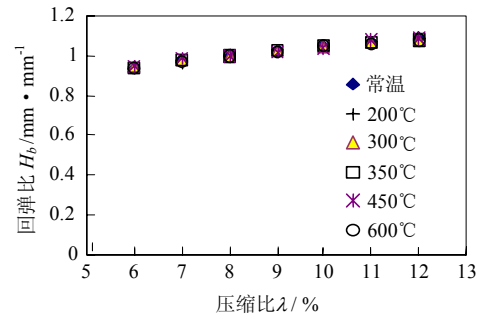


图 3 不同温度下回弹比与压缩比关系曲线

Fig.3 Relationships between springback ratio of the alloy and compression ratio at various elevated temperatures



图 4 650°C、30%压缩比条件下试样的破坏图片  
Fig.4 Collapse of a specimen under loading with 30% compression ratio at 650

### 2.2.2 压扁度对回弹量的影响

定义压扁度  $\eta$ <sup>[2]</sup>为

$$\eta = \frac{d-b}{d} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $b$  为压扁并释放载荷后 O 形环的断面短轴外径;  $d$  为 O 形环的原始断面外径。

根据表 1 中常温加载工况试验结果, 给出

$H_b \sim \eta$  试验曲线如图 5 所示, 可见  $H_b \sim \eta$  关系满足抛物线律:

$$H_b = -0.000463\eta^2 + 0.0297\eta + 0.862 \quad (3)$$

式中  $H_{\lambda=8\%}$  的试验结果为 0.342mm。该式用于回归试验数据的线性相关系数  $R$  高达 0.998。试验结果表明, 最大回弹比对应的最大压缩度  $\eta$  约为 30%, 对应压缩比  $\lambda$  约为 35%, 此时回弹量为最大, 达到 0.446mm。考虑到大压缩比 ( $\lambda > 30\%$ ) 下, 试样的初始压缩接触面发生了严重的凹陷现象, 因此式(3)适用条件应当为:  $\eta$  (0,30%)。需要指出的是, 热处理工艺对 Inconel718 合金管材的弹塑性特性产生较大影响, 因此式(3)揭示的  $H_b \sim \eta$  抛物关系不仅与材料有关且与热处理工艺也相关。

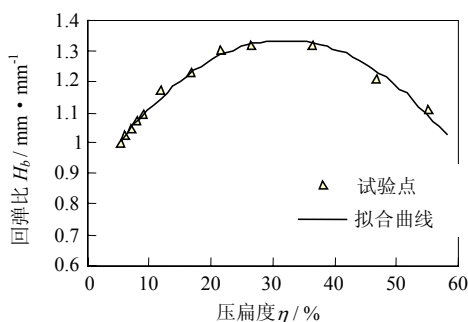


图 5 回弹比与压缩比关系曲线

Fig.5 Relationships between springback ratio and compression ratio

### 2.2.3 长度尺寸因素对回弹量的影响

为研究长度尺寸效应对 300℃ 下 Inconel718 管材试样的回弹量的影响, 取试样轴向长度为 4mm、8mm、20mm, 并根据表 1 中三个加载工况 3-01、3-02 和 3-03 来完成回弹试验。这三个加载工况下各试样的回弹量试验结果如图 6 所示, 可见, 4mm~20mm 不同长度的 O 形环试样的  $H \sim \lambda$  试验关系基本重合, 因此对于所用的 Inconel718 管件材料, 试样长度尺寸对回弹量

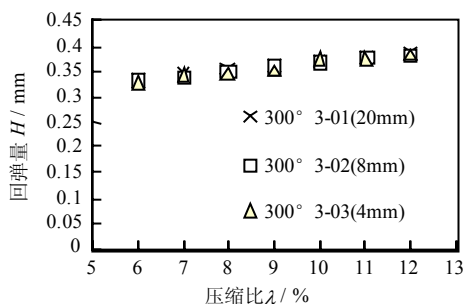


图 6 不同尺寸下回弹量与压缩比关系曲线

Fig.6 Relationships between springback of the alloy and compression ratio with various axial lengths of specimens

影响不明显。事实上, 如果 Inconel718 合金管件在制造 O 形密封环前的固溶热处理不均匀, 以及直径尺寸沿轴向不均匀, 则 O 形环各处回弹特性可能缺乏一致。为反映 O 形密封管件的局部与全局回弹均匀性, 大、小不同长度的 O 形环试样均可作为回弹量测试的选项。

### 2.2.4 加载历史对回弹量的影响

加载历史是否对回弹量有影响是 O 形环应用中所关心的问题。在具有不同历史的加载工况 2-02、2-07、2-08、2-10 下, O 形环回弹量的 300℃ 高温测试结果如图 7 所示。

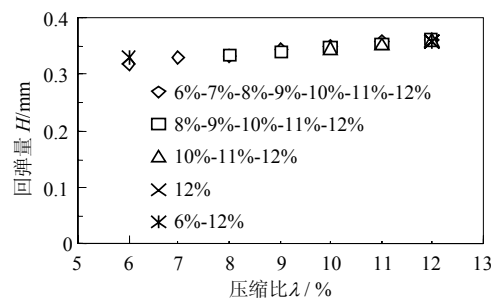


图 7 不同加载历史下回弹量与压缩比关系曲线

Fig.7 Relationships between springback of the alloy and compression ratio under loadings with various loading histories

由图可见, 对应不同加载历史,  $H \sim \Delta/d$  高温试验关系基本重合, 这表明低压缩比加载对后继高压压缩比加载下 300℃ 高温 O 形环回弹量没有明显影响。

## 3 有限元计算分析

### 3.1 有限元网格模型

取压力容器上下法兰和 O 形密封环为研究对象。由于载荷和结构的轴对称性, 因而在建立有限元网格模型的时候, 以 O 形环半径方向为 X 轴, 其对称轴长度方向为 Y 轴, 建立二维、三维轴对称模型。假设上下法兰是刚性的, O 形环材料为 Inconel718 合金, 材料性质为各向同性。

二维模型网格划分采用四节点平面单元 (PLANE182), 单元的特征常数选择轴对称性质。考虑到分析要求和结构特点, 在与 O 形环接触的上下法兰部位网格划分比较细密, 离接触较远部位的网格密度较稀疏, 而 O 形环结构网格划分为均匀、细密。O 形环与上下法兰之间的接触采用二维点-面接触单元 Contac48 来模拟。三维模

型中采用八节点实体单元(SOLID185)进行网格划分,接触单元选择三维点-面接触单元 Contac49。模型网格划分情况如图 8 所示。

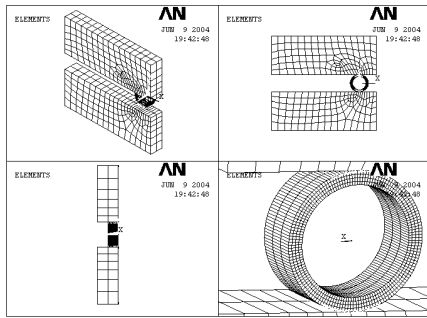


图 8 三维与二维有限元网格模型

Fig.8 3-D and 2-D FEA models

假设上下法兰材料性质为各向同性。摩擦类型取基本库仑摩擦模型。材料特性选择两种类型

- (1) 多线性等向强化 MISO;
- (2) 非线性等向强化 NLISO。

非线性等向强化本构模型(NLISO 模型)表达式

$$\sigma = k + R_0 \varepsilon^{pl} + R_\infty [1 - \exp(-b \varepsilon^{pl})] \quad (4)$$

式中  $\varepsilon^{pl}$  为塑性应变,  $k$  为刚发生塑性应变时材料单轴试样的应力,  $k$ 、 $R_0$ 、 $R_\infty$ 、 $b$  均为材料常数。根据常温单调拉伸试验, 得 NLISO 模型参数为:  $k = 940$ 、 $R_0 = 2500$ 、 $R_\infty = 213.5$ 、 $b = 700$ 。非线性等向强化本构模型对试验数据的回归曲线如图 9 所示, 该图中多线性等向强化本构模型(MISO 模型)取为试验本构关系中抽样离散点之间的直线段集合, 因而 MISO 模型基本上代表了试验本构关系。

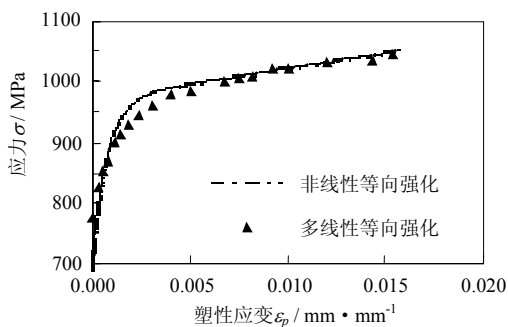


图 9 Inconel718 合金管材的非线性本构关系

Fig.9 Nonlinear constitutive relationships of Inconel718 alloy tube

在下法兰底面加全约束, 上下法兰对称轴上加 X 方向约束。在上法兰面上施加位移, 以模拟 O 形环的加、卸载过程, 将载荷步写入文件, 求解得到结果。

### 3.2 计算结果分析

图 10 表明, 在二维计算条件下, 基于 NLISO 模

型得出的计算回弹量相较采用 MISO 模型的计算回弹量更接近试验结果。

图 11 表明, 在三维计算条件下, 基于 MISO 模型得到的计算回弹量相较于根据 NLISO 模型的计算结果更接近试验结果。

图 10 和图 11 还表明, 采用二维 MISO 模型和采用三维 NLISO 模型得到的计算回弹量与试验结果相比有一定偏差, 但最大误差未超过 15%。比较而言, 采用 MISO 模型得出的计算回弹量相对 NLISO 模型的计算回弹量低些, 因而偏于保守。

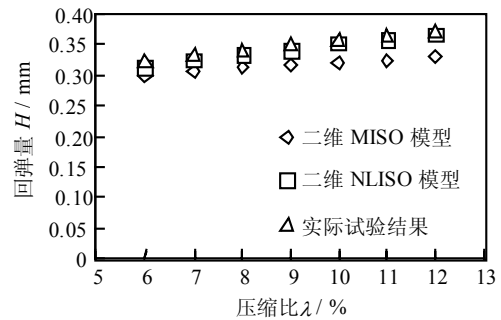


图 10 基于二维有限元网格模型的回弹量计算结果

Fig.10 Springback analysis results of the alloy using 2-D FEA model

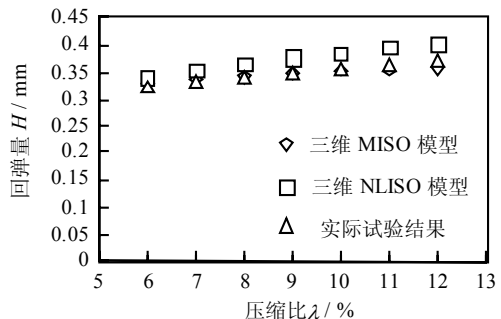


图 11 基于三维有限元网格模型的回弹量计算结果

Fig.11 Springback analysis results of the alloy using 3-D FEA model

四种本构模型下计算所得  $H_b \sim \lambda$  关系由图 12 给出, 图中还给出了  $H_b \sim \lambda$  试验关系。可见, 采用各种本构模型获得的  $H_b \sim \lambda$  计算关系均处于一个狭窄的分散带内, 这表明无论采用何种本构模型计算, 回弹量与压缩比之间的变化规律受两类本构模型以及二维或三维有限元网格模型的影响不大。图 12 还表明基于各本构模型获得的回弹量计算结果与试验结果吻合良好, 因此基于弹塑性接触问题的有限元数值方法可以较真实地模拟 O 形环的压缩回弹特性。

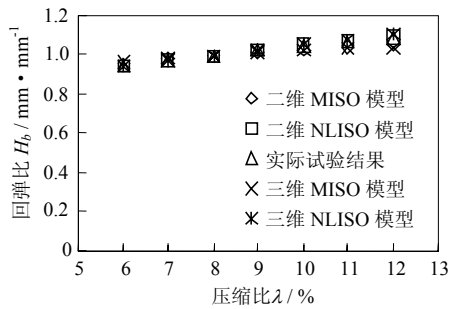


图 12 各模型下回弹比计算结果

Fig.12 Springback analysis results of the alloy using two FEA models and two constitutive models

## 4 结论

(1) 温度、低压缩比加载历史、尺寸效应对 O 形环回弹量的影响不明显;

(2) 为避免 O 形环压缩坍塌, 环境温度应不高于  $600^{\circ}\text{C}$ , 压缩比应不超过 30%;

(3) 常温下 O 形环压扁度与回弹比之间的关系符合抛物律; 对于选用的 Inconel718 合金 O 形环文中给出了基于试验得到的  $H_b \sim \lambda$  抛物律公式;

(4) 基于弹塑性接触问题的有限元方法对 O 形环回弹变形进行数值模拟有良好精度; 二维有限元网格模型中采用 NLISO 本构模型与三维有限元网格模型中采用 MISO 本构模型对 O 形环回弹量的计算分析结果与试验结果吻合更好;

(5) 金属 O 形环的回弹特性与材料的弹塑性本构关系密切相关, 根据单调拉伸试验和弹塑性接触有限元方法可以确定 O 形环回弹规律。

### 参考文献:

[1] 潘家祯. 压力容器材料实用手册-碳钢及合金钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.  
Pan Jiazhen. Practical manual of materials for pressure vessels (vessel-carbon steel and alloy) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)

[2] 刘后桂. 密封技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1981.  
Liu Hougui, Sealing technology [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1981. (in Chinese)

[3] 胡国桢, 石流, 阎家宾. 化工密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.  
Hu Guozhen, Shi Liu, Yan Jiabin. Chemical seal technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991. (in Chinese)

[4] Deutsches Institut for Normung. DIN2505, Berechnung von Flanschverbindungen Teil Berechnung, Teil 2 Dichtungskennwerte [S]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990.

[5] 彭向和, 高芝晖, 曾祥国. O 形密封环的弹塑性大变形和循环松弛分析[J]. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 46~49.  
Peng Xianghe, Gao Zhihui, Zeng Xiangguo. An analysis for finite elastoplastic deformation and cyclic relaxation of confined O-ring for pressure vessels [J]. Journal of Chongqing University, 1998, 21(2): 46~49. (in Chinese)

[6] 虞跃生, 刘光宇. 管材压扁的回弹分析[J]. 金属成形工艺, 2000, 18(5): 22~24.  
Yu Yuesheng, Liu Guangyu. Analysis of spring back in tube flattening process [J]. Metal Forming Technology, 2000, 18(5): 22~24. (in Chinese)

[7] 冯秀, 顾伯勤. 不锈钢空心 O 形环的压缩回弹特性数值模拟[J]. 化工设备与管道, 2003, 5(1): 63~64.  
Feng Xiu, Gu Boqin. Numerical simulation of compression-resilient properties of the stainless O-ring [J]. Process Equipment & Piping, 2003, 5(1): 63~64. (in Chinese)

[8] 张志华, 马治清, 侯翠屏. Inconel718 高温合金小型管材的性能及测试方法[J]. 辽宁冶金, 1991, 2(1): 46~51.  
Zhang Zhuhua, Ma Zhiqing, Hou Cuiping. The performance of small-scale pipe of alloy of Inconel718 and method of testing at elevated temperature [J]. Metallurgy of Liaoning, 1991,2(1): 46~51. (in Chinese)

[9] 杨湘, 苏兴万, 文燕. 国产 Inconel718 合金管的性质及应用研究[J]. 核动力工程, 1997, 18(3): 269~272.  
Yang Xiang, Su Xingwan, Wen Yan. Properties and application of study of Inconel alloy tube made in China [J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(3): 269~272. (in Chinese)

[10] 刘润广, 蒋浩明. Inconel718 合金的超塑性[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(2): 16~20.  
Liu Runguang, Jiang Haomin. Superplasticity of Inconel718 Alloy [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1998, 19(2): 16~20. (in Chinese)