

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.030

## 液压密封件低温性能仿真分析

贾丽丽<sup>1</sup>, 梁传涛<sup>1</sup>, 黄爽<sup>2</sup>

(1. 山东泰开电器机构有限公司, 山东 泰安 271000; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:** 低温环境是密封件应用中的一种特殊运行工况,会对密封件的性能产生影响,甚至会造成密封失效,密封件的低温性能研究非常必要。文中通过对高压断路器液压操动机构密封件的多个样本进行测试分析,借助计算机辅助工程分析(CAE),模拟了材料的特性,并分别建立密封件的仿真分析模型,在不同温度和工作载荷工况下进行了仿真分析,探究了液压操动机构典型密封件的低温运行能力及不同厂家密封产品的密封效果,并经样机低温试验验证,证明仿真分析与试验结果基本吻合,为密封件的制造、应用及液压操动机构的可靠性改善提供指导和数据支持。

**关键词:** 液压密封件; 低温性能; 仿真分析; 低温环境; 低温试验

## Simulation Analysis of Low Temperature Performance of Hydraulic Seals

JIA Lili<sup>1</sup>, LIANG Chuantao<sup>1</sup>, HUANG Shuang<sup>2</sup>

(1. Shandong Taikai Electric Mechanism Limited Company, Shandong Tai'an 271000, China;

2. AVIC China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Low temperature environment is a kind of special working condition in the application of seals, which will affect performance of the seals and even cause seal failure. Therefore, it is quite necessary to study the low temperature performance of the seals. In this paper, the characteristic of the seals material is simulated by the test and analysis of several samples of the seals of the hydraulic operating mechanism of high voltage circuit breaker and with the the aid of computer aided engineering analysis(CAE), and the simulation and analysis models of the seals are set up respectively. The simulation analysis is carried out under different temperature and working load conditions, and the low temperature operation ability of typical seals of hydraulic operating mechanism and the sealing effect of the seal products from different manufacturers are investigated. It is proved by the low temperature test and verification of the sample that the simulation analysis and test result are basically in agreement, which provides guidance and data support for the manufacture and application of seals and the improvement of reliability of hydraulic operating mechanism.

**Key words:** hydraulic sealing element; low temperature performance; simulation analysis; low temperature environment; low temperature test

## 0 引言

高压断路器液压操动机构用密封件种类较多,主要有密封圈、格莱圈、斯特封等,按工况可分为动密封和静密封。密封件的密封性能直接决定了液压操动机构的应用可靠性,属于液压操动机构的关键零部件之一。

受橡胶材料的应用温度范围局限,普通密封件

的应用温度范围一般为-30~120℃,耐低温密封件的应用温度范围一般为-50~120℃(不同厂家、不同材质应用范围有所不同),液压操动机构运行工况为正常自然环境,所以一般上限应用温度不受限,而低温环境会造成密封件硬化,对密封性能影响较大,所以液压操动机构用密封件的低温性能研究非常必要。

本处选取液压操动机构的典型密封件为研究

对象,将不同厂家的产品作为研究样本,测试分析其材料的力学性能,建立密封件仿真分析模型,通过对其工作载荷仿真模拟,探究典型液压操动机构密封件的低温运行能力,及不同厂家密封产品的密封效果。

## 1 液压密封件失效分析

密封件用于隔绝油压和空气,或隔断高压油区和低压油区。若密封件存在问题,会造成操动机构对外漏油,或造成液压操动机构内部泄漏而频繁打压。如果处理不及时,故障会不断发展。例如,油泵电机及控制单元烧坏;泄漏逐渐增快,直至影响断分性能造成事故。

密封圈承受因挤压而带来的压应力作用,继而产生形变,产生密封效果。密封性能是产品可靠工作的重要保证,密封结构尺寸变化、位置精度变化、表面形貌变化、密封件老化、磨损等因素都将影响密封性能,产品出现内、外泄漏问题,会直接导致压力下降,工作不可靠,甚至功能丧失<sup>[1]</sup>,见图1。

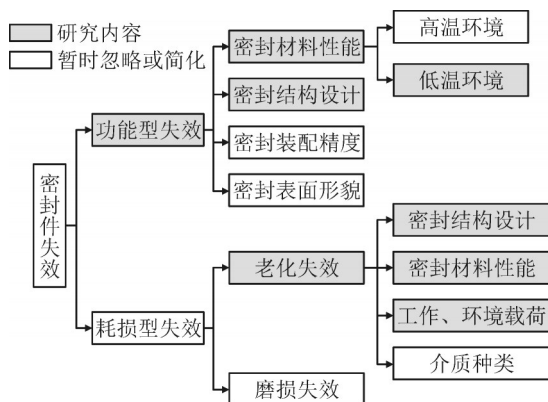


图1 密封件失效影响因素

Fig. 1 Influencing factors of seal failure

图1中,密封失效通常包括功能型失效和耗损型失效两种<sup>[2]</sup>。功能型失效是在其工作载荷及环境作用下,其密封性能不能满足产品要求引起的失效,功能型失效通常与密封材料性能、密封结构设计、密封装配精度、密封件表面形貌等因素密切相关,其中密封材料性能是指密封材料在不同温度环境中的力学特性;耗损型失效是产品在使用初期并未发现明显缺陷,但随着使用时间、次数的积累,密封产品的性能逐渐退化的过程失效,通常又包括:老化失效和磨损失效两种模式,其中老化失效的敏感影响因素是:密封件结构设计、密封件材料特性、工作载荷、环境和介质种类,密封件磨损失效的敏感影响因素是:密封结构设计、密封件材料特性、工作载荷、环境载荷和对磨副磨损条件等。

文中结合所研究操动机构的工作环境、载荷条件,重点分析典型密封结构的主要失效,确定对于极寒工况下,动、静密封产品的耐受低温特性和耐受低温特性随使用的退化情况。

## 2 仿真试验研究

基于密封件的失效分析,为探究各典型密封件的常温以及低温密封性能,开展的仿真试验方案见图2,结合实际产品运行状态,建立仿真模型,对不同厂家密封产品的特性、不同环境温度条件、不同密封形式的密封界面应力分布进行探究。探究其密封效果与密封机理的同时,为开展试验研究提供理论依据。

### 2.1 材料特性曲线测试

因密封件的应用温度主要受限于橡胶件的材料特性,本处选用不同厂家的以下密封样件为研究对象,具体样本的分类明细见表1。

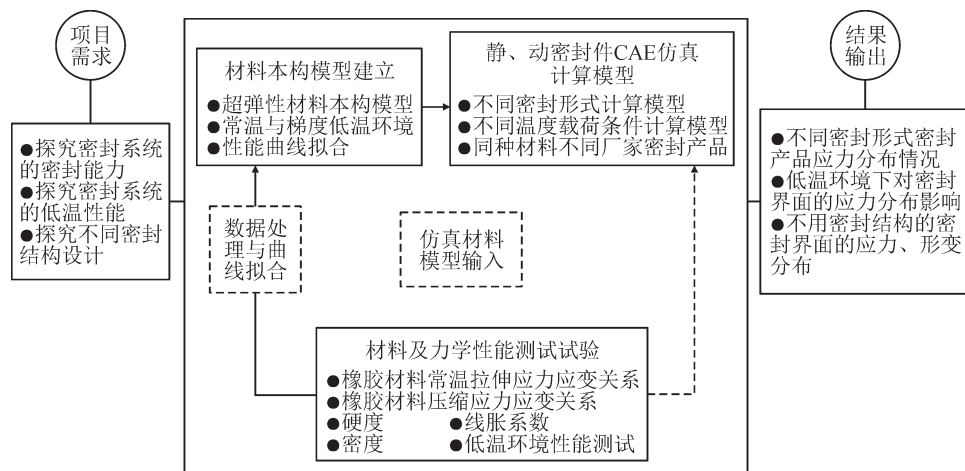


图2 仿真试验方案总体思路

Fig. 2 General idea of simulation experiment

表1 典型密封件样本种类

| Table 1 Sample type of typical seals |      |         |           |      |
|--------------------------------------|------|---------|-----------|------|
| 密封形式                                 | 介质种类 | 密封件材料   | 样本种类      | 样本编号 |
| 静密封                                  | 液压油  | 丁腈(NBR) | 进口W公司低温产品 | JA   |
|                                      |      |         | 进口W公司常规产品 | JB   |
|                                      |      |         | 国产T公司常规产品 | JC   |
| 动密封                                  | 液压油  | 丁腈(NBR) | 进口W公司低温产品 | DA   |
|                                      |      |         | 进口W公司常规产品 | DB   |
|                                      |      |         | 国产T公司常规产品 | DC   |

1)利用高低温材料试验机和低温膨胀仪,分别进行橡胶材料压缩应力—应变测试;橡胶材料拉伸应力—应变测试;密封件材料线胀系数测试。

2)使用计算机软件拟合多组数据,求得多组数据的平均值。部分材料的拟合曲线见图3、4。

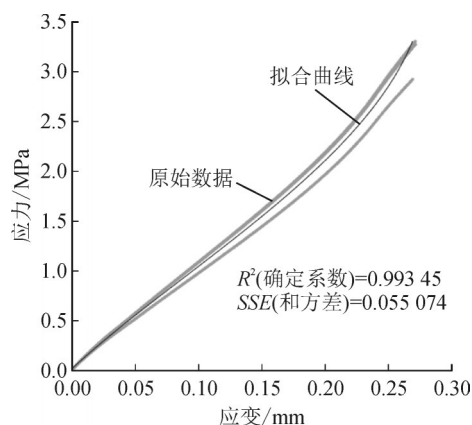


图3 A样本常温压缩曲线拟合

Fig. 3 Fitting of the "A" sample compression curve at normal temperature

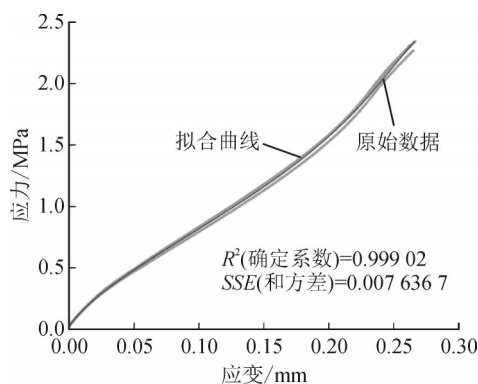


图4 B样本常温压缩曲线拟合

Fig. 4 Fitting of the "B" sample compression curve at normal temperature

3)仿真模型中材料参数设置。压盖和凹槽一般为刚体,材料属性可按通常用金属材料(钢材质或铝材质)的性质设置;O型圈属于可变形体,需要设置弹性模量、泊松比和密度等相应参数,见表2。

表2 材料参数

| Table 2 Material parameter |           |     |                                      |
|----------------------------|-----------|-----|--------------------------------------|
| 模型                         | 弹性模量      | 泊松比 | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
| 钢材质                        | 210 MPa   | 0.3 | 7 850                                |
| 铝材质                        | 280 MPa   | 0.4 | 2 300                                |
| O型圈                        | 拟合实测应力—应变 |     | 1 000                                |

由于O型圈属于超弹性材料,应通过试验测得其应力—应变值,进而利用Abaqus软件选择合适的超弹性材料本构模型对实测值进行拟合,从而得到较真实的橡胶材料参数。

## 2.2 静密封的几何仿真模型

1)几何模型建立。静密封模型由轴套、缸体和橡胶O型圈组成<sup>[3]</sup>。根据各零件的实测尺寸,在Part模块建立上述零件的轴对称模型,见图5,O型圈采用可变形平面模型,缸体和轴套采用离散刚体线模型<sup>[4]</sup>。O型圈划分了多个区域,以便于后续划分出更加完美的网格。



图5 静密封几何模型

Fig. 5 Geometric model of static seal

2)添加设置并划分网格。分别进行分析步设置、接触设置和载荷设置,然后对密封圈划分网格,为了提高仿真精度,O型圈划分六面体网格,载荷设置(本处按40 MPa加载,下同)和网格划分,见图6、7。

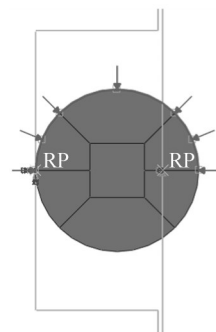


图6 设置外界压力

Fig. 6 Setting external pressure

## 2.3 动密封的几何仿真模型

1)几何模型建立。动密封模型由轴、缸体、轴密封填充聚四氟乙烯组合结构<sup>[3]</sup>,根据各零件的实际尺寸,建立轴对称模型(本处以斯特封为例),PTFE和O型圈采用可变形平面模型,缸体和轴采用离散

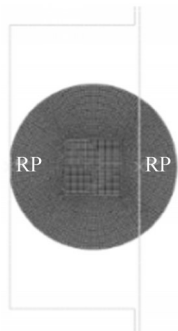


图7 网格模型

Fig. 7 Grid model

刚体线模型<sup>[5]</sup>。将各零件按照实际配合关系进行组配,见图8。

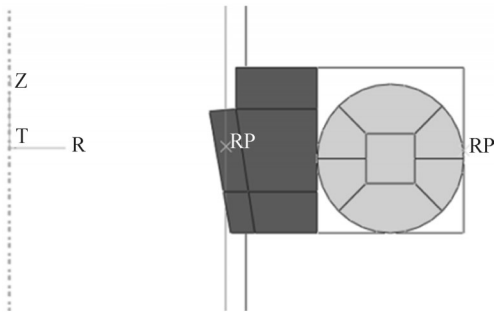


图8 动密封几何模型

Fig. 8 Geometric model of dynamic seal

2)添加设置并划分网格。同样,分别进行分析步设置、接触设置和载荷设置,然后对密封圈划分六面体网格,为了提高仿真精度,PTFE和O型圈分别划分六面体网格,载荷设置和网格划分分别见图9、10。

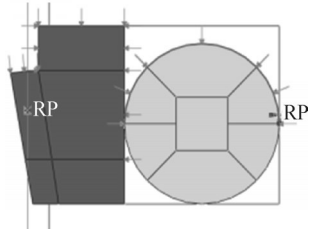


图9 设置外界压力

Fig. 9 Setting external pressure

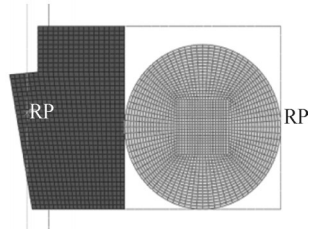


图10 网格模型

Fig. 10 Grid model

### 3 仿真试验结果

#### 3.1 静密封仿真试验结果

液体静密封仿真数据汇总见表3。

表3 静密封仿真试验结果汇总表

Table 3 Summary of results of static seal simulation test

| 样本<br>种类          | 编<br>号 | 最大应力仿真结<br>果/MPa <sup>[6]</sup> |       |       | 最大接触应力仿<br>真结果/MPa <sup>[6]</sup> |       |       |
|-------------------|--------|---------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|
|                   |        | 常温                              | -30 ℃ | -35 ℃ | 常温                                | -30 ℃ | -35 ℃ |
| 进口W<br>公司低<br>温产品 | JA     | 15.55                           | 19.46 | 21.79 | 23.20                             | 22.86 | 22.96 |
| 进口W<br>公司常<br>规产品 | JB     | 15.13                           | —     | —     | 25.10                             | —     | —     |
| 国产T公<br>司常<br>规产品 | JC     | 15.40                           | 22.16 | —     | 24.20                             | 30.58 | —     |

1)JA、JB、JC 3种样本在常温条件下的仿真结果中,其应力分布情况、应力集中情况、接触应力情况均未表现出明显差异<sup>[7]</sup>,这与试验中其密封性能无明显差异的结果相符;

2)JA、JB、JC 3种样本在常温条件下的仿真结果中,其接触应力的仿真计算数值均小于其介质压强,因此,仿真计算结果表示其产品在该工作载荷条件下,均会发生一定泄漏,建议调整密封设计为多道密封;

3)JA 产品为进口耐低温专用材料,其低温环境对其应力集中程度的增加最不明显,说明其极强的耐受低温能力,而JB 进口常规材料,低温试验中表现极强的脆性,-30、-35 ℃时压缩试验测试失败,因此未建立良好的材料模型<sup>[8-10]</sup>;

4)国产T公司的JC 样本,在低温-30 ℃时候应力集中增加明显,材料破坏风险增大,在-35 ℃时候,材料几乎表现为刚性,材料模型建立失败<sup>[11-12]</sup>。

部分仿真分析结果见图11<sup>[13]</sup>-15。

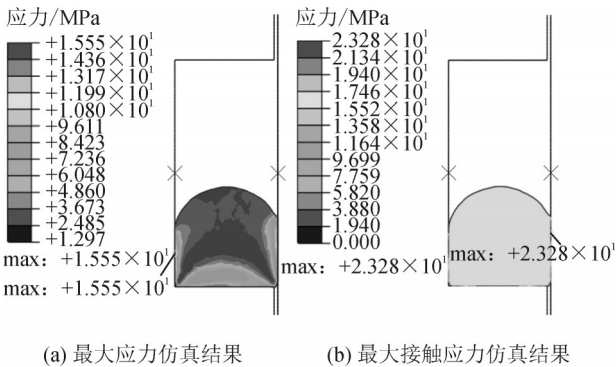


图11 进口W公司低温产品常温下仿真结果

Fig. 11 Simulation results of imported W company cryogenic product at room temperature

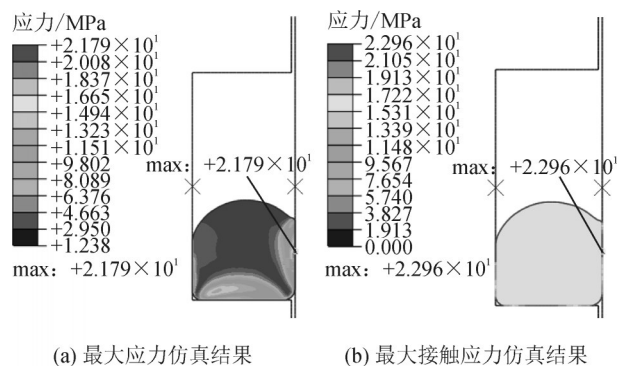


图 12 进口W公司低温产品-35 °C下仿真结果

Fig. 12 Simulation results of imported W company

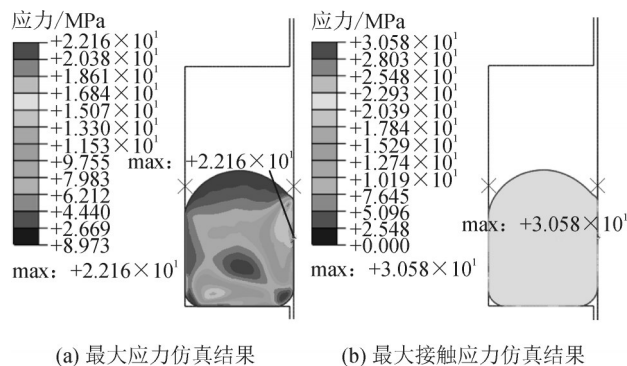


图 15 国产T公司常规产品-30 °C下仿真结果

Fig. 15 Simulation results of domestic T company

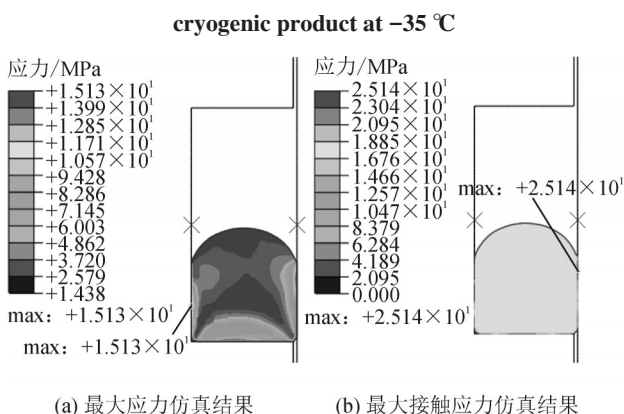


图 13 进口W公司常规产品常温下仿真结果

Fig. 13 Simulation results of imported W company's conventional products at room temperature

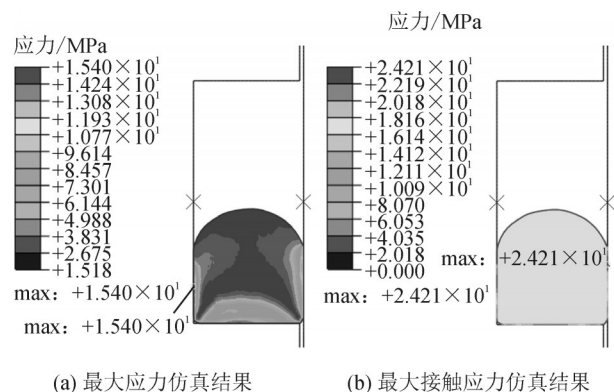


图 14 国产T公司常规产品常温下仿真结果

Fig. 14 Simulation results of domestic T company's conventional products at room temperature

### 3.2 动密封仿真试验结果

动密封产品中,进口产品与国产产品在常温条件下密封效果差异不大;在低温条件下,进口低温专用产品的应力计算结果理想,表现出对使用温度很好的耐受性,其数据汇总见表4<sup>[14-17]</sup>。

部分仿真分析结果见图16-20。

表 4 动密封仿真试验数据汇总表

Table 4 Summary of dynamic seal simulation test data

| 样本<br>种类          | 编号 | 最大应力仿真<br>结果/MPa |        |        | 最大接触应力仿真<br>结果/MPa |        |        |
|-------------------|----|------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
|                   |    |                  |        |        |                    |        |        |
|                   |    | 常温               | -30 °C | -35 °C | 常温                 | -30 °C | -35 °C |
| 进口W<br>公司低<br>温产品 | DA | 55.4             | 55.5   | 57.0   | 85.8               | 86.7   | 90.4   |
| 进口W<br>公司常<br>规产品 | DB | 56.2             | —      | —      | 88.7               | —      | —      |
| 国产T<br>公司常<br>规产品 | DC | 56.6             | 58.9   | —      | 91.3               | 111.6  | —      |

## 4 试验验证

为了验证仿真结果,搭建低温试验台,见图21。通过将液压操动机构样机装到低温试验箱内,试验液压操动机构在不同温度工况下的密封性能,以验证仿真分析结果。

经试验验证,无论<sup>[15,18-19]</sup>是进口还是国产的常规密封件产品,在-30 °C温度下静态保压都未出现液压油泄漏,但操动机构动作5次试验以后再保压,都出现了液压油泄漏,说明密封已失效。而安装进口低温密封件的操动机构,分别在-35、-40、-45 °C温度下长时间静态保压和动作后保压,均未见液压油泄漏,说明该低温密封件的低温密封性能良好<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

对不同密封样本在不同温度条件下,按照其工作载荷建立仿真计算模型,通过理论分析、材料性能测试、仿真计算及试验验证<sup>[21-22]</sup>,得出如下结论:

1)用于液压操动机构中的液体静密封产品,进

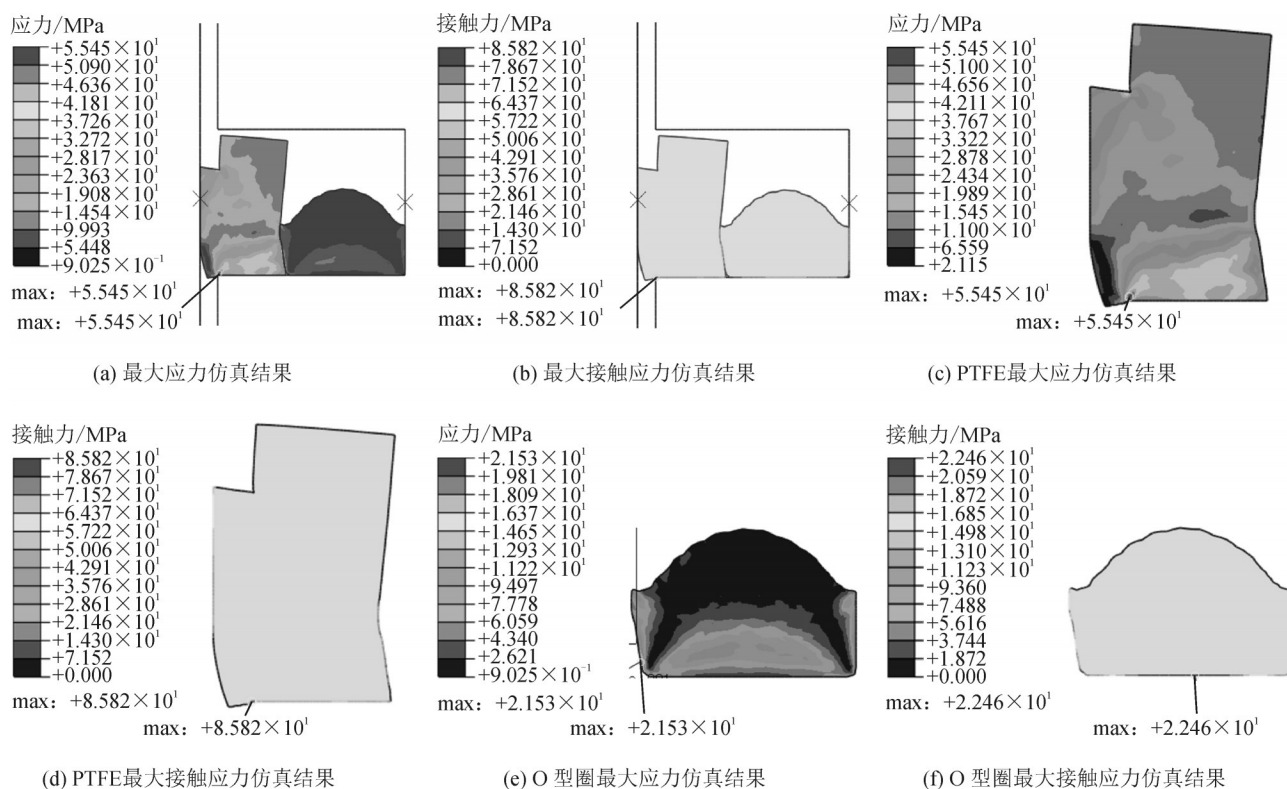


图 16 进口 W 公司低温产品常温下加载仿真结果

Fig. 16 Simulation results of low temperature products of W company under normal temperature loading

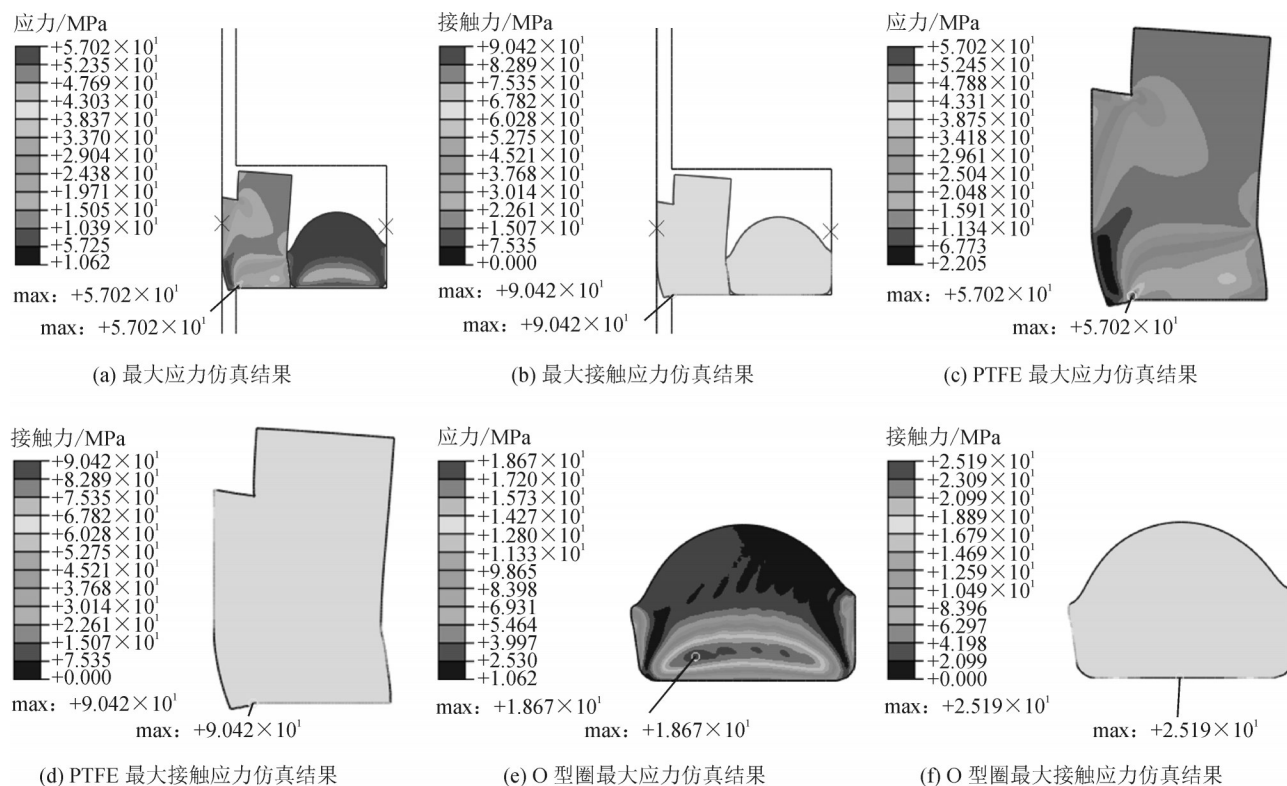


图 17 进口 W 公司低温产品-35 °C 下加载仿真结果

Fig. 17 Simulation results of low temperature products of W company under -35 °C loading

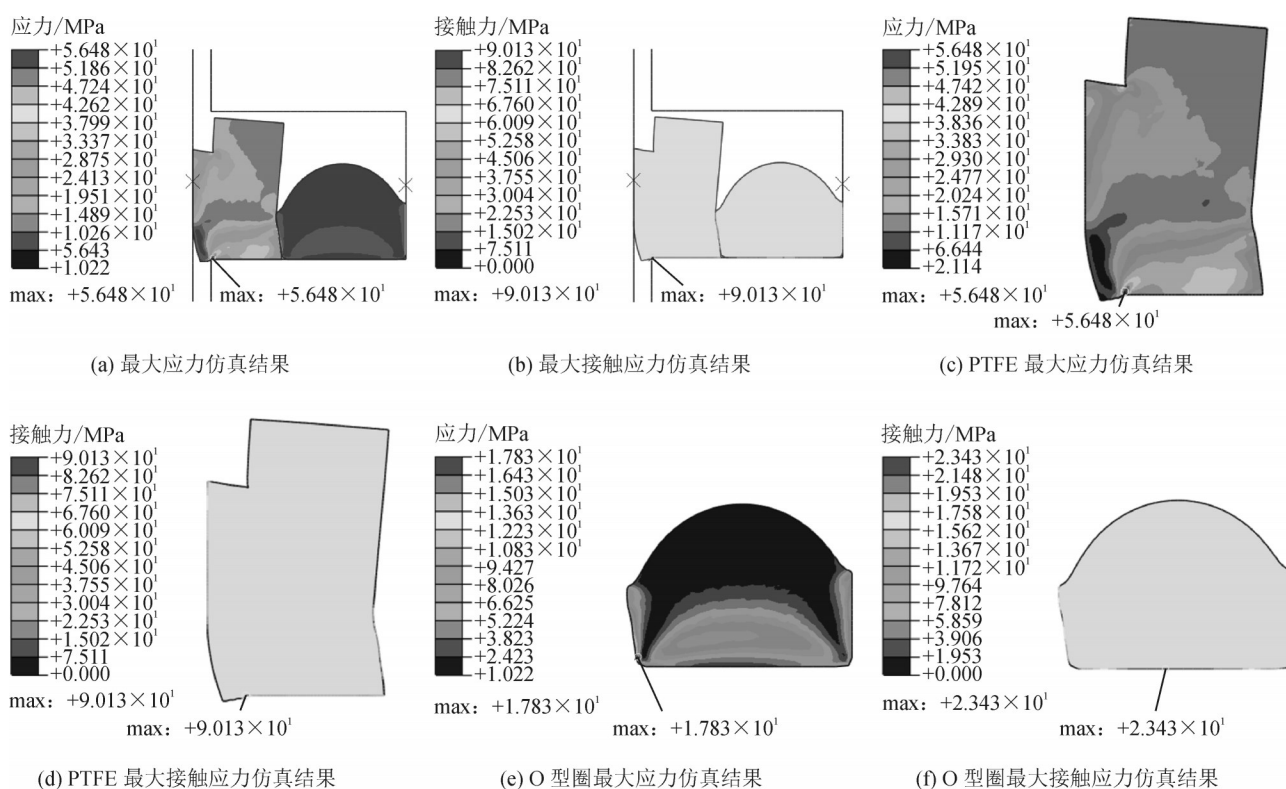


图 18 进口 W 公司常规产品常温下加载仿真结果

Fig. 18 Simulation results of general product of W company under normal temperature loading

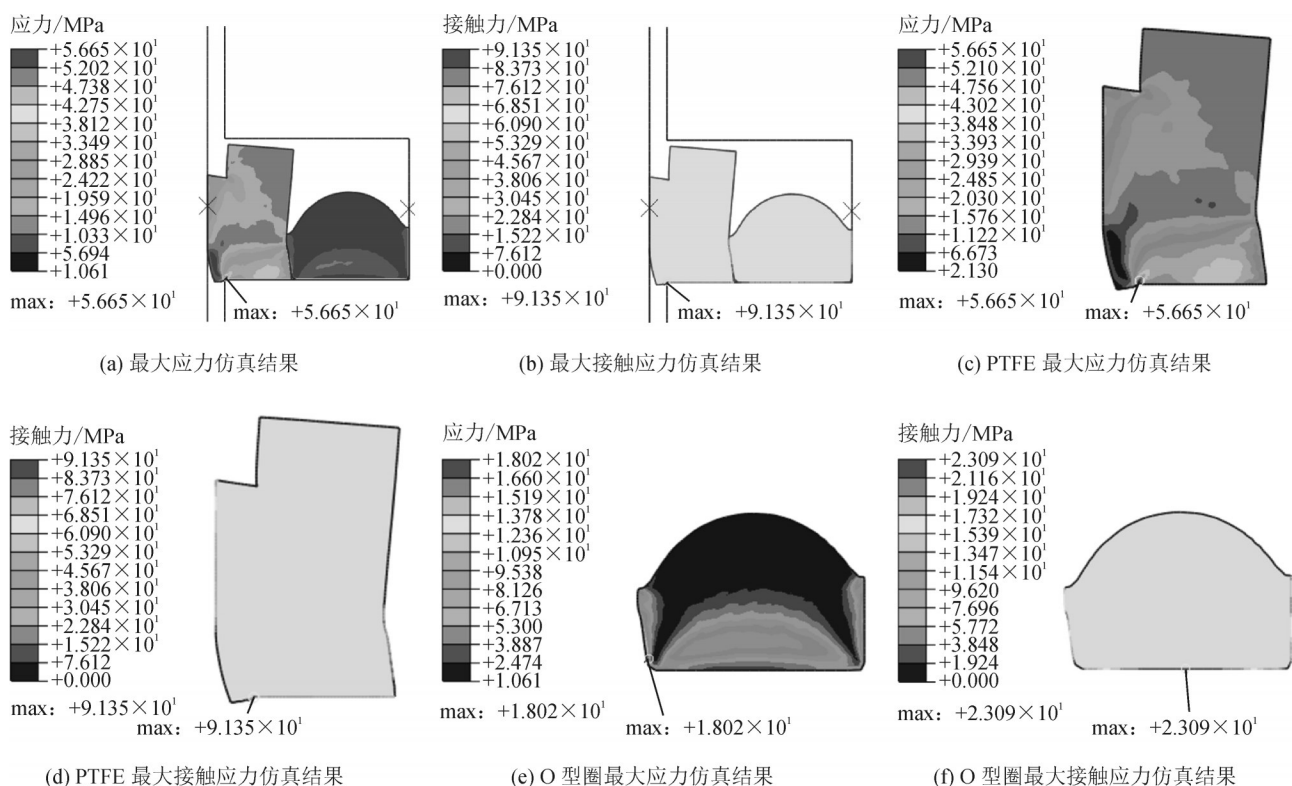


图 19 国产 T 公司常规产品常温下加载仿真结果

Fig. 19 Simulation results of domestic T company's conventional products under normal temperature loading

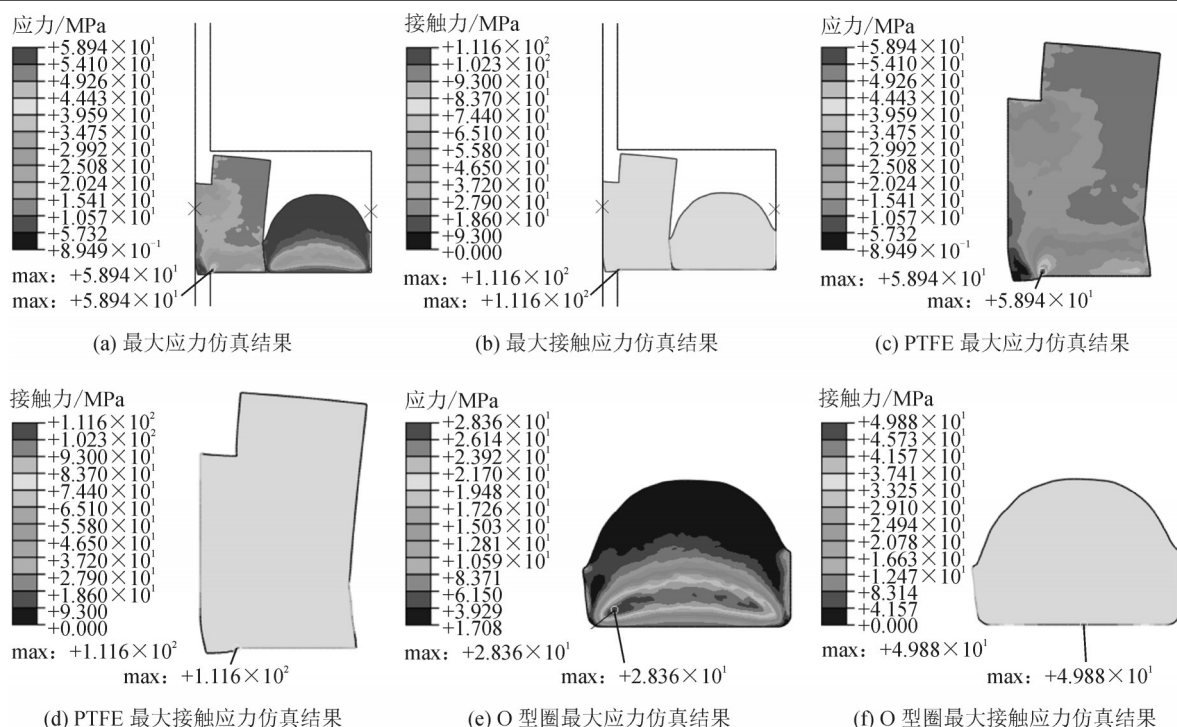


图 20 国产 T 公司常规产品-30 °C 下加载仿真结果

Fig. 20 Simulation results of domestic T company's conventional products under -30 °C loading

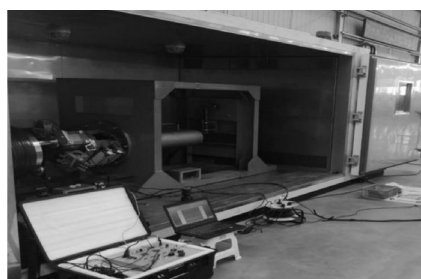


图 21 液压弹簧操动机构低温试验台

Fig. 21 Low temperature characteristics test bed of hydraulic spring operating mechanism

口 W 公司产品与国产 T 公司产品在常温条件下密封效果差异不大,单道密封,均无法满足产品实际工作载荷时的密封需求,建议优化密封设计,增加冗余保护;在低温条件下,进口 W 公司的耐低温产品表现出更好的适用性。

2)动密封产品中,进口 W 公司产品与国产 T 公司产品在常温条件下密封效果差异不大;在低温条件下,进口 W 公司低温产品的应力计算结果理想,表现出对使用温度很好的耐受性。

3)对于常规普通密封件,虽然厂家标注为最低应用温度为-30 °C,但根据仿真分析和试验结果可知,-30 °C 时材料破坏风险已非常大了,所以配装常规密封件的操动机构不能应用在-30 °C 及以下温度的环境中。

## 参考文献:

- [1] 赵志正. 决定橡胶密封能力的几个因素[J]. 世界橡胶工业, 2001, 28(5): 31-37.  
ZHAO Zhizheng. Several factors determining the sealing ability of rubber[J]. World Rubber Industry, 2001, 28(5): 31-37.
- [2] 付平, 常德功. 密封设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
FU Ping, CHANG Degong. Seal design manual[M]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [3] 陈宝伦. 液压操动机构的设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
CHEN Baolun. Design and application of hydraulic operating mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [4] 顾伯勤, 李新华, 田争, 等. 静密封设计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.  
GU Boqin, LI Xinhua, TIAN Zheng, et al. Static seal design technology[M]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [5] 刘令勋, 刘英贵. 动态密封设计技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.  
LIU lingxun, LIU Yinggui. Dynamic seal design technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1993.
- [6] 沈锋钢, 颜永年, 吴任东, 等. O 形橡胶密封圈静密封应

- 力分析及密封性能研究[J]. 新技术新工艺, 2007(1): 22-24.
- SHEN Fenggang, YAN Yongnian, WU Rendong, et al. Static sealing stress analysis and sealing performance research of O-ring[J]. New Technology and New Technology, 2007(1): 22-24.
- [7] 胡殿印, 王荣桥, 任全彬, 等. 橡胶O形圈密封结构的有限元分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2005(2): 255-260.
- HU Dianyin, WANG Rongqiao, REN Quanbin, et al. Finite element analysis of rubber O-ring seal structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(2): 255-260.
- [8] 王伟, 赵树高. 橡胶O形密封圈的非线性有限元分析[J]. 润滑与密封, 2005, 170(4): 106-110.
- WANG Wei, ZHAO Shugao. Nonlinear finite element analysis of rubber O-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2005, 170(4): 106-110.
- [9] 王朝晖, 何康康. O形橡胶密封圈的非线性有限元分析[J]. 航天制造技术, 2016(2): 4-8.
- WANG Chaohui, HE Kangkang. Nonlinear finite element analysis of O-ring[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(2): 4-8.
- [10] 郭博志, 宋笔锋. O形圈的非线性有限元分析[J]. 液压与气动, 2009(1): 31-34.
- GUO Bozhi, SONG Bifeng. Nonlinear finite element analysis of O-ring[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2009(1): 31-34.
- [11] 谭晶, 杨卫民, 丁玉梅, 等. O形橡胶密封圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2006, 181(9): 65-69.
- TAN Jing, YANG Weimin, DING Yumei, et al. Finite element analysis of sealing performance of O-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2006, 181(9): 65-69.
- [12] 杨亭阁. 丁腈橡胶O型圈的研究与应用[J]. 应用科技, 2000, 27(12): 28-29.
- YANG Tingge. Research and application of NBR O-ring[J]. Applied Science and Technology, 2000, 27(12): 28-29.
- [13] HWANG M D, GRADY W M, SANDERS H W. Calculation of winding temperatures in distribution transformers subjected to harmonic currents[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3): 1074-1079.
- [14] 王喆, 王旭光. 浅析O形密封圈在使用中出现的问题[J]. 煤炭技术, 2002, 21(8): 8-9.
- WANG Zhe, WANG Xuguang. Analysis on problems of O-ring in use[J]. Coal Technology, 2002, 21(8): 8-9.
- [15] 刘溪娟, 刘承宗, 林钧毅, 等. 一种含超弹性接触问题的密封结构的有限元求解方法[J]. 中国机械工程, 2001, 12(11): 1211-1213.
- LIU Xijuan, LIU Chengzong, LIN Junyi, et al. A finite element analysis method of the sealing structure with hyperelastic contact problem[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(11): 1211-1213.
- [16] 高亚娟, 赵选勃, 王文昌. GIS用三元乙丙、丁腈、氯丁橡胶O形密封圈物理性能比较分析[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 118-125.
- GAO Yajuan, ZHAO Xuanbo, WANG Wenchang. Comparative analysis of physical properties of EPDM, NBR and chloroprene rubber O-ring for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 118-125.
- [17] 刘青, 赵旭. 基于格莱圈结构的O形密封圈动密封分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(4): 36-40.
- LIU Qing, ZHAO Xu. Dynamic seal analysis of o-ring seal based on glaser ring structure[J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 36-40.
- [18] 赵志礼, 孙桂英. 液压密封可靠性研究[J]. 煤炭开采, 2007, 12(6): 83-85.
- ZHAO Zhili, SUN Guijia. Research on reliability of hydraulic seal[J]. Coal Mining, 2007, 12(6): 83-85.
- [19] CHARLTON D J, YANG J. A review of methods to characterize rubber elastic behavior for use in finite element analysis[J]. Rubber Chemical and Technology, 1994, 67(3): 481-503.
- [20] 王永茂, 申展. 基于Ansys的不同截面密封圈密封性能仿真分析[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 158-163.
- WANG Yongmao, SHEN Zhan. Simulation analysis of sealing performance of different section sealing ring based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 158-163.
- [21] 黄乐, 贾晓红, 郭飞, 等. 基于MATLAB GUI橡塑密封数值仿真平台[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2): 107-111.
- HUANG Le, JIA Xiaohong, GUO Fei, et al. Numerical simulation platform for rubber-plastic seal based on MATLAB GUI[J]. Lubrication and Sealing, 2016, 41(2): 107-111.
- [22] 杨友胜, 王杰. 水液压O形圈锥面密封特性分析[J]. 液压与气动, 2020(2): 30-35.
- YANG Yousheng, WANG Jie. Analysis of water hydraulic o-ring cone sealing characteristics[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2020(2): 30-35.
- 贾丽丽(1978—), 女, 高级工程师, 从事高压开关及操动机构设计研究方面的工作。
- 梁传涛(1974—), 男, 高级工程师, 从事高压开关及操动机构设计研究方面的工作(E-mail: TKJGSJS@126.com)。