

# 基于 ABAQUS 的舌形密封圈结构参数分析

刘奇,赵彬,高文磊

(中国船舶集团有限公司 第七一三研究所,河南 郑州 450015)

**摘要:**为了提升密封圈的耐用性,设计一种新型密封结构。运用 ABAQUS 对舌形密封圈进行非线性模拟仿真;运用正交试验与极差分析法分析结构参数对密封性能的影响;以接触应力作为密封性能的评价标准,得到舌形密封圈的结构参数对密封性能的影响由大到小依次为:舌张角、舌宽、厚度;极差分析得到最优组合,并通过仿真分析对最优组合进行验证。

**关键词:**舌形密封圈;正交试验;极差分析;密封性能;结构参数

**中图分类号:**TB42 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0073-03

## Analysis on Structural Parameters of Ligulate Seal Based on ABAQUS

LIU Qi, ZHAO Bin, GAO Wenlei

(713 Research Institute, China Shipbuilding Corporation, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** To improve seal durability, a seal with new structure was designed. Nonlinear analysis of the ligulate seal was simulated based on ABAQUS. The effect of structural parameters on the sealability was discussed with orthogonal experiment and range analysis. According to the evaluation criteria of contact stress, the effect obtained from the structural parameters on the sealability, from large to small in order, was angle, width and thickness. Optimum combination was achieved through range analysis and verified by simulation.

**Keywords:** ligulate seal; orthogonal experiment; range analysis; sealability; structural parameters

## 0 引言

密封圈广泛运用于工程机械<sup>[1]</sup>、船舶<sup>[2]</sup>、化工<sup>[3]</sup>等各种气液压系统中,对系统的密封性运行起着至关重要的作用。某船用大型矩形密封结构采用的是 D 形密封圈(图 1),依靠固定板与活动台压缩 D 形密封圈进行密封。而活动台由于功能要求需要频繁地动作,进而造成了 D 形密封圈的磨损从而引发密封泄漏;同时该矩形密封结构的密封接触范围为 5 m×0.8 m,密封难度较大,在固定板承载变形后会进一步地引发密封泄漏。为提升密封圈的耐用性和可靠性,设计了一种舌形结构的密封圈(图 2)。为确定该舌形密封圈的合理结构参数,本文利用分析软件 ABAQUS 对舌形密封圈进行建模和计算,分析了舌形密封圈主要参数对密封性能的影响,为后续的结构设计提供理论依据。

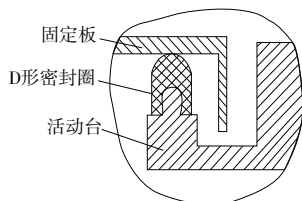


图 1 D 形密封圈结构

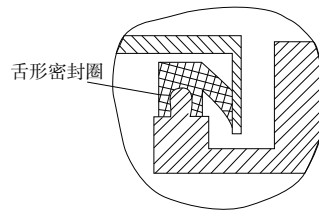


图 2 舌形密封圈结构

## 1 计算模型的建立

根据舌形密封圈的材料和结构的轴向一致性,采用二维平面模型进行密封性能的分析。同时对舌形密封圈的边界条件进行简化,以提升计算模型的计算效率。简化后的二维平面计算模型如图 3 所示。舌形密封圈主要是由舌状橡胶条与固定板的侧板抵压而进行密封,结构设计时主要考虑厚度  $B$ 、舌宽  $H$ 、舌张角  $\alpha$  参数。

### 1.1 密封圈的本构模型

舌形密封圈采用的是橡胶材料,其材料可以经过大的变形而保持体积不变,也就是说可以被认为是不可压缩的材料。据此,可以选用 Mooney-Rivlin 模型来描述橡胶类物理非线性材料,其模型表达式为<sup>[4]</sup>

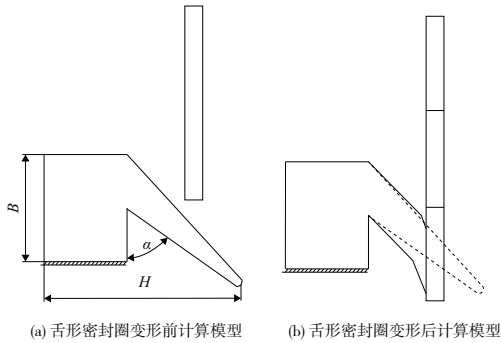


图3 二维平面计算模型

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中:  $W$  为应变能密度;  $C_{10}$  与  $C_{01}$  为材料 Mooney-Rivlin 系数;  $I_1$  和  $I_2$  分别为第一、第二应变张量的不变量。本文的舌形密封圈材料为腈基丁二烯橡胶,  $C_{10}$  与  $C_{01}$  分别取 1.87 和 0.47<sup>[5]</sup>。

## 1.2 有限元模型

舌形密封圈的有限元计算,是一个超弹性不可压缩的非线性接触问题。根据二维平面计算模型的特点,在有限元模型中作如下处理:

- 1) 固定板侧板材料为普通碳素钢,弹性模量  $E = 210\,000\text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.3$ ;
- 2) 为了便于求解,将固定板侧板作刚体处理;
- 3) 考虑固定板侧板与舌形密封圈之间的摩擦,取摩擦系数为 0.3;
- 4) 设定初始边界条件为舌形密封圈下端固定;分析采用侧板下移接触橡胶密封面;
- 5) 网格单元采用带减缩的一阶平面应变单元 CPE4R。

划分网格后的有限元模型如图 4 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者),仿真计算接触应力云图( $B = 70\text{ mm}$ ,  $H = 30\text{ mm}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ )如图 5 所示。

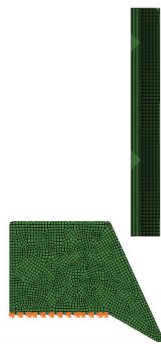


图4 有限元模型

## 2 舌形密封圈的结构参数分析

### 2.1 密封性能评价标准

根据密封原理,实现可靠密封的充分必要条件是舌形密封圈与固定板侧板接触界面上的接触应力不小于被密

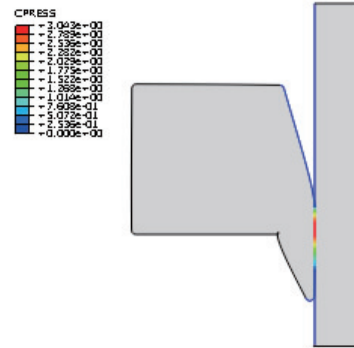


图5 接触应力云图

封的压力<sup>[6]</sup>,也就是说接触面上的接触应力大小可以决定机构密封性能的高低。采取接触面上的最大接触应力作为评判舌形密封圈结构参数设计的优劣。

### 2.2 正交实验

舌形密封圈的结构设计需要综合考虑厚度  $B$ 、舌宽  $H$ 、舌张角  $\alpha$  等因素。多因素分析时可考虑采取正交实验法,通过正交表对试验数据进行综合比较与整体分析,用较少的试验次数来获得可靠性较高的试验数据,以此来选出最优化的参数组合。

根据舌形密封圈的实际情况限制,用正交试验法设计了三因素、三水平的正交实验方案,采用  $L_9(3^4)$  正交表设计试验方案,试验方案及结果如表 1 所示。

表1 正交试验方案及结果

试验号	因素			接触应力/ MPa
	厚度 $B/\text{mm}$	舌宽 $H/\text{mm}$	舌张角 $\alpha/(\text{ }^\circ)$	
1	65	30	30	0.822
2	65	35	45	3.698
3	65	40	60	5.104
4	70	30	45	3.043
5	70	35	60	5.016
6	70	40	30	2.415
7	75	30	60	4.545
8	75	35	30	2.360
9	75	40	45	5.475

### 2.3 正交结果分析

通过正交试验表可以看出第 9 组试验选用的参数可以获得较大的接触应力,其选用方案为  $B(75)H(40)\alpha(45)$  组合。为更深入地确定 3 个参数对密封性能影响的主次顺序,对设计方案进行初步的优化,选用极差法进行数据分析,其步骤如下<sup>[7]</sup>:

1) 计算任一因素列上相同水平所对应的试验结果之和  $K_1, K_2, K_3$ ;

2) 计算极差,  $R = \max(K_1, K_2, K_3) - \min(K_1, K_2, K_3)$ ;

3) 比较极差大小。极差值  $R$  越大,代表该因素对试验结果影响越大。

根据极差法步骤,可得舌形密封圈的极差分析结果如表 2 所示。

表 2 极差分析结果

项目	因素		
	厚度 $B/\text{mm}$	舌宽 $H/\text{mm}$	舌张角 $\alpha/(\text{°})$
K1	9.624	8.410	5.597
K2	10.474	11.074	12.216
K3	12.380	12.994	14.665
$R$	2.756	4.584	9.068
最优因素	75	40	60
主次因素	$B < H < \alpha$		
最优组合	$B(75)H(40)\alpha(60)$		

## 2.4 最优组合仿真验证

采取结构参数厚度  $B$  为 75 mm,舌宽  $H$  为 40 mm,舌张角  $\alpha$  为  $60^\circ$  的参数组合进行数值模拟仿真,仿真结果如图 6 所示。通过应力云图可知,最大接触应力达到了 6.453 MPa,明显优于其他试验组合,为舌形密封圈的最优参数组合。

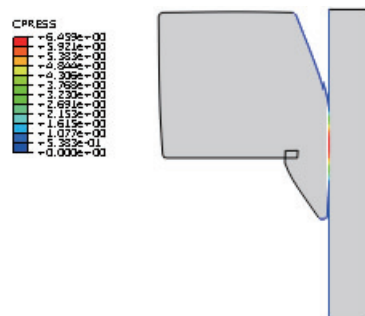


图 6 最优组合接触应力云图

## 3 结语

1) 利用有限元软件 ABAQUS 完成了舌形密封圈的非线性分析,通过模拟仿真完成了对结构密封性能的预测,避开了大量、重复的人工实验,提升了工作效率;

2) 采取数值仿真技术研究了结构参数对密封性能的影响,为进一步的结构设计提供了理论依据,避免了传统设计依靠人为经验所带来的不确定性;

3) 运用正交试验与极差分析法,通过较少的试验数据得到了舌形密封圈的参数对密封性能的影响由大到小依次为:舌张角  $\alpha$ 、舌宽  $H$ 、厚度  $B$ ;舌形密封圈的最优设计组合为: $B(75)H(40)\alpha(60)$ ,并通过了模拟仿真的验证。

### 参考文献:

- [1] 陈江明,郑益民,段辉,等. 某型涡轴发动机鼓风机油漏故障分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6):76-78.
- [2] 桑勇,王旭东,邵利来. 水下机器人液压缸 O 形密封圈的有限元分析[J]. 液压气动与密封,2018,38(5):18-22.
- [3] 王博,徐鑫,陈一鸣,等. 基于 ANSYS Workbench 的天然气管扩管冲蚀磨损仿真模拟[J]. 润滑与密封,2019,44(12):86-95.
- [4] NAMJOO M, GOLBAKHSI H. An efficient design tool based on FEM for evaluating effects of components properties and operating conditions on interaction of tire with rigid road [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1):189-195.
- [5] 陈国定,HAISER H, HAAS W, 等. O 形密封圈的有限元力学分析[J]. 机械科学与技术,2000,19(5):740-741,744.
- [6] 黄中华,金波,刘少军. 深海高压舱密封性能评价研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(5):790-793.
- [7] 王兴. 基于数值模拟和试验的弯曲回弹及模具型面补偿研究[D]. 济南:山东大学,2013.

收稿日期:2021-05-19

(上接第 65 页)

- [7] 刘畅,林建平,路洪洲,等. 汽车 B 柱碰撞失效变形过程仿真重现[J]. 塑性工程学报,2019,26(1):213-220.
- [8] 李晓鹏,李洪春,杨晓东. 尾轴密封用高速高压唇形密封圈失效研究[J]. 液压与气动,2020(2):183-187.
- [9] 吴长鹏,谢斌,潘锋,等. 汽车动力总成悬置的碰撞失效模拟研究[J]. 汽车工程,2019,41(1):36-41,63.
- [10] 常培廷,陈文武,单广斌,等. 柴油加氢装置高压换热器管束断裂原因与防护[J]. 材料保护,2019,52(3):127-133.
- [11] 李雨泽. 注水井分层测压整体测试时“O”型密封圈失效原因[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(5):100-104.
- [12] 林双平,钟振前,蒋清丰,等. 某轿车减振器活塞杆的断裂失效分析[J]. 热加工工艺,2018,47(24):251-254.
- [13] 刘森,吕植强,王光耀. 高强度及软钢断裂失效行为表征与仿真预测[J]. 力学季刊,2018,39(4):829-836.

- [14] 张元祥,梁利华,张继成,等. 多物理场下 FCBCA 焊点电迁移失效预测的数值模拟研究[J]. 力学学报,2018,50(3):43-52.
- [15] 金林奎,周斌,黄持伟,等. SWCH10A 钢塞子装配过程断裂失效分析[J]. 锻压技术,2018,43(11):160-172.
- [16] 杨向同,沈新普,王克林,等. 完井作业油管柱失效的力学机理——以塔里木盆地某高温高压井为例[J]. 天然气工业,2018,38(7):92-98.
- [17] 周国良,方鑫. 软盒包装机往复主动轴防渗油密封装置的设计[J]. 烟草科技,2018,51(7):92-95.
- [18] 杨智勇,李典庆,曹子君,等. 基于广义子集模拟样本加权法的边坡多失效模式可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3):630-641.

收稿日期:2020-08-10