

文章编号: 1000-8241(2016)08-0836-07

# 基于 ABAQUS 的快开盲板密封圈性能比较

罗凡<sup>1</sup> 陈伟忠<sup>1</sup> 王磊<sup>2</sup> 黄冬<sup>2</sup>

1. 江苏盛伟过滤设备有限公司; 2. 中国石油天然气股份有限公司西部管道分公司

**摘要:** 针对环锁型快开盲板在工程应用中存在的主要问题, 分析了门盖开闭困难或密封失效的原因, 介绍了自主发明的鞍形橡胶密封圈的结构原理及应用情况。采用 ABAQUS 有限元分析软件建模, 对自主发明的鞍形橡胶密封圈和进口的唇形橡胶密封圈进行密封性能比较分析与研究。结果表明: 在相同的工况条件下, 鞍形橡胶密封圈的各项密封性能指标均优于唇形橡胶密封圈, 且其自身的 Mises 应力分布也优于唇形橡胶密封圈, 不影响实际使用寿命。鞍形橡胶密封圈已应用于国产化高压大口径环锁型快开盲板, 鞍形密封圈及其配套的密封结构可以解决快开盲板启闭过程中的卡死问题。(图 10, 表 4, 参 14)

**关键词:** 鞍形橡胶密封圈; 快开盲板; 有限元; 高压; 大口径; 国产化

中图分类号: TE978

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.08.008

## Performance comparison of sealing rings in fast-opening blinds based on ABAQUS

LUO Fan<sup>1</sup>, CHEN Weizhong<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, HUANG Dong<sup>2</sup>

1. Jiangsu Sunway Filter Co. Ltd.; 2. PetroChina West Pipeline Company

**Abstract:** The ring lock type fast-opening blinds present many problems in their engineering application. In this paper, the causes for difficult opening/closing or sealing failure of door/lid systems were analyzed, and the structural principle and application of the saddle rubber sealing ring which was invented independently were illustrated. Then, comparative analysis was made on sealing performances of the saddle rubber sealing ring and the imported lip sealing ring by the ABAQUS finite element model. It is shown that the saddle rubber sealing ring is superior to the lip rubber sealing ring in all sealing performance indexes under the same operating conditions. Besides, better Mises stress distribution of the saddle rubber sealing ring has no impact on its actual service life. The saddle rubber sealing ring has been applied to domestically produced ring lock type fast-opening blind with high pressure and large diameter. This product, together with its support sealing structures, can prevent the so-called "sticking" phenomenon during the opening/closing of fast-opening blinds. (10 Figures, 4 Tables, 14 References)

**Key words:** saddle rubber sealing ring, fast-opening blinds, finite element, high pressure, large diameter, domestically produced

快开盲板是用于压力管道或压力容器的圆形开口上, 能够实现快速开启或关闭的一种机械装置, 主要由筒体法兰、头盖、勾圈或卡箍、密封圈、安全联锁机构、开闭机构、转臂及短节(需要时)等部件构成。快开盲板是压力容器快开门盖的一种, 被广泛应用于天然气领域中需经常启闭的设备。目前常用的快开盲板包括牙嵌型、卡箍型、插扣型、环锁型等不同结构, 以手动操作为主<sup>[1]</sup>。

近十年来我国天然气工业的迅速发展与天然气输配系统的建设和完善密不可分。快开盲板作为天然气管网的关键设备, 在国内需求巨大, 但目前却主要靠进口。据不完全统计, “十二五”期间中国石油新建输气管道  $5 \times 10^4$  km, 新建的阀室、压气站、分输站使用快开盲板达 1 500~2 000 台, 采购金额达  $6 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$  元。为此, 中国石油设立了重大科技专项(2012E-2802), 联合国内相关企业, 实

现包括快开盲板等油气管道关键设备的国产化应用<sup>[2-4]</sup>。根据《快开盲板国产化研制与应用技术条件》的要求,完成了 12.6 MPa、DN1 550 的 AKM 环锁型快开盲板样机(目前国内参数最高)的研制。通过了中国机械工业联合会和中国石油天然气集团公司科技管理部主持的鉴定。

为实现国产化并有所改进提高,依据多年的研究成果,并结合环锁型快开盲板用的进口唇形橡胶密封圈在国内实际使用中出现的问題<sup>[5]</sup>,以进口环锁型快开盲板结构为基础,对其密封结构及密封圈形式等进

行了创新设计,解决了环锁型快开盲板在启闭过程中经常出现环锁无法达到预定位置的问题。

## 1 主要问题及改进方案

### 1.1 主要问题

环锁型快开盲板的主要部件为环锁,其通常位于门盖的边部或者中部,采用自紧式密封结构,密封圈(为橡胶材质)通常分为唇形(C形)或U形两种形式(表 1、图 1)。

表 1 AKM 环锁型快开盲板主要技术参数

快开盲板类型	公称直径 /mm	设计压力 /MPa	设计温度 /°C	腐蚀裕量 /mm	水压试验压力 /MPa	开启力 /N	启闭操作时间 /min
AKM 环锁型结构	1 550	12.6	-35~60	2	18.9	≤200	≤1



图 1 AKM 环锁型快开盲板实物图

快开盲板是具有一定运动动作的机械加工部件,为了实现其快开与密封的目的,对快开盲板的机械加工,尤其是端面的间隙配合、密封结构、运动机构的精度要求均越来越高。但由于快开盲板主要用于天然气压力容器设备,长期处于气候多变与恶劣的露天环境,容易受到天然气杂质的腐蚀与堵塞,且并非经常开启,故环锁型快开盲板在实际使用过程中往往未能达到设计效果,经常出现启闭过程中环锁无法达到预定位置、卡死的现象。因此,以加工精度来保证快开盲板密封效果与快开盲板的实际使用情况难以匹配。

### 1.2 原因分析

既要快开又要密封,环锁型快开盲板在唇形密封圈结构时,端部法兰和门盖之间的间隙尺寸(初始密封间隙)必须控制在较小的范围内(进口快开盲板随规格变化应控制在 1~1.5 mm)。而在实际加工、安装和使用中,以下 6 个因素常造成间隙尺寸变化,导致门盖开闭困难或者密封失效。①结构装配:门盖的环锁滑道面呈 20° 倾斜布置,门盖与端部法兰装配不同心,

使得局部间隙更小,环锁运动阻力增大;②材料刚性:如 DN1 550 等门盖质量超过 5 t,依靠铰链座、铰链轴等铰链体焊接后与端部法兰组合,门盖质量会导致相对位置变化而影响间隙尺寸,使得环锁运动阻力增大;③金加工:大型锻件加工的尺寸公差较难控制,尺寸检验也困难,存在金属时效等问题,部件最终尺寸影响间隙;④焊接情况:端部法兰与筒体焊接,焊接变形造成间隙不均匀;⑤环境因素:诸如收发球筒等容器外部的灰沙、内部的气体杂质等堆积在密封面或门盖环锁滑道处,均会改变间隙而影响门盖开闭;⑥腐蚀因素:环锁接触面等易腐蚀生锈,由于间隙有限,环锁难以松动。

可见,环锁型快开盲板卡死问题是设计理念问题,并非制造与安装的质量问题,但目前往往归咎于制造与安装等质量问题。

### 1.3 新型鞍形密封圈

鞍形密封圈是一种具有微量浮动功能的自紧式密封圈结构(图 2)。

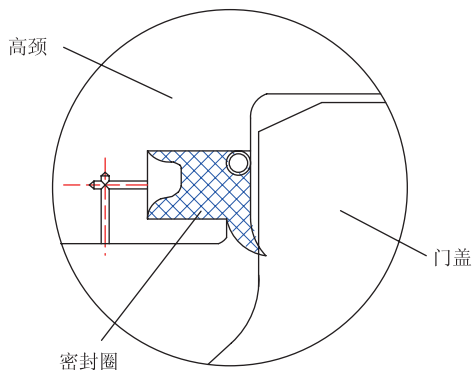


图 2 鞍形密封圈结构示意图

对鞍形密封圈的浮动过程进行分析(图3):①过程 a 为无内压时,鞍形密封圈唇口贴住盲板密封面,实现初始密封;②过程 b 为加载内压时,密封圈内腔压力升高,密封圈上浮,其上表面贴住盲板密封面;③过程 b~d 为内压卸载后,密封圈回位,盲板与环锁间的间隙为 1~2 mm,便于环锁与法兰分离,快开结构开启;

④过程 b~c 为内压卸载后,若环锁不能运动,则下压螺钉,使得环锁、盲板及密封圈均向内移动 1~2 mm;⑤过程 e~f 为环锁与法兰分离,收紧环锁,快开结构开启。由此可知,鞍形密封圈能够有效避免快开盲板启闭过程中可能发生的卡死现象。新型鞍形密封结构已通过国家鉴定,取得了国家实用新型专利<sup>[6-7]</sup>。

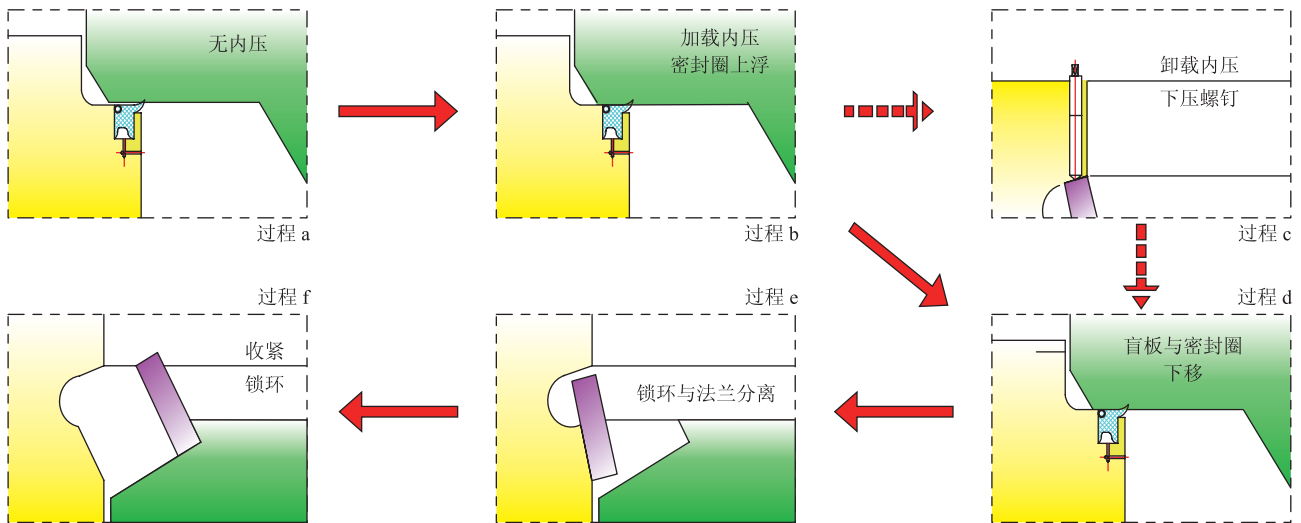


图3 鞍型密封圈浮动过程示意图

## 2 有限元模拟

### 2.1 模型建立

以 DN1 550 环锁型快开盲板为尺寸依据,对唇形和鞍形密封圈的密封性能进行有限元模拟分析,研究 12.6 MPa 设计工况和 19 MPa 水压试验工况下密封面的接触应力情况。

模拟采用 ABAQUS 有限元分析软件<sup>[8]</sup>。唇形与鞍形密封圈密封性能的分析难点在于三重非线性:橡胶材料非线性、大变形以及接触非线性,采用 ABAQUS 能够较好地保证模拟结果的准确性。鉴于目前利用有限元软件分析橡胶密封圈的失效行为没有统一的判定标准,在此设定:橡胶密封圈关键密封面上的最大接触压力大于内压,即可实现密封,否则密封失效。同时,为了便于研究,提出以下假设<sup>[9-11]</sup>:①橡胶密封圈材料的拉伸与压缩性质相同,不考虑松弛老化现象;②由钢构件构成的门盖和法兰的刚度是橡胶的几万倍,可以忽略其变形,即视为密封圈变形的约束边界(解析刚体);③橡胶密封圈受到的压缩视为由门盖和法兰约束边界的指定位移引起。

唇形和鞍形密封圈均为圆周对称结构,故采用

1.5° 模型进行有限元分析(图4)。橡胶本身的刚度较低,易挤入缝隙,因此唇形和鞍形密封圈均加入弹簧以

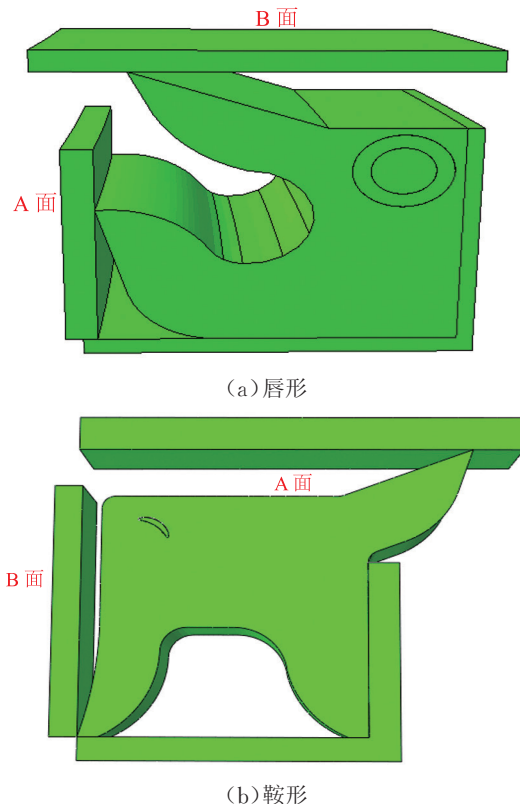


图4 密封圈有限元模型图

增加刚度,保证密封效果及使用寿命(表 2)。橡胶采用国际普遍认可的 Mooney-Rivlin 模型进行模拟计算,系数  $C_{01}$  和  $C_{10}$  分别取 1.87 和 0.47。橡胶材质选择低温乳液聚合法生产的耐油气性好、耐磨性较高的低温丁腈橡胶。模型中橡胶截面采用 C3D10H 杂交单元划

分网格,钢圈模型采用 C3D8 单元划分网格,门盖以及法兰则采用解析刚体建模。唇形橡胶圈与周围的切向接触采用库伦摩擦控制,摩擦系数取 0.2(考虑接触面有润滑),法向接触采用硬接触控制,允许接触后分离,橡胶材料与弹簧之间建立绑定接触<sup>[10]</sup>。

表 2 橡胶密封圈结构尺寸与材料参数

弹簧结构尺寸			弹簧材料参数			橡胶密封圈结构尺寸		
外径/mm	螺距/mm	弹簧丝直径/mm	材质	弹性模量/GPa	泊松比	外径/mm	截面高度/mm	宽度/mm
5	2.5	0.9	06Cr19Ni10	210	0.3	1 610	23.8	18

2.2 模拟过程

密封圈的模拟过程的载荷分 3 个步骤进行加载:

- ① A 部件向右移动,挤压密封圈,模拟密封圈安装至密封槽;
- ② B 部件向下移动,挤压密封圈,模拟快开结构闭合;
- ③ 施加相应工况下的内压,分别模拟设计工况和水试工况的密封情况。

在有限元模拟过程中,唇形与鞍形密封圈预留的初始密封间隙分别为 1 mm 和 4 mm。模拟结果表明:在提升工况压力过程中,鞍形密封圈首先沿着密封槽上浮至门盖位置,接着发生形变填充密封间隙实现密封,而唇形密封圈则直接发生形变实现密封,由此有效地验证了鞍形的浮动特性。

实现密封的关键是其关键密封面上的最大接触压力大于内压。唇形的 A、B、C 面的最大接触应力均大于 12.6 MPa,为关键密封面(图 5a),鞍形的关键密封面为 A 面和 B 面(图 5b)。沿关键密封面做路径,

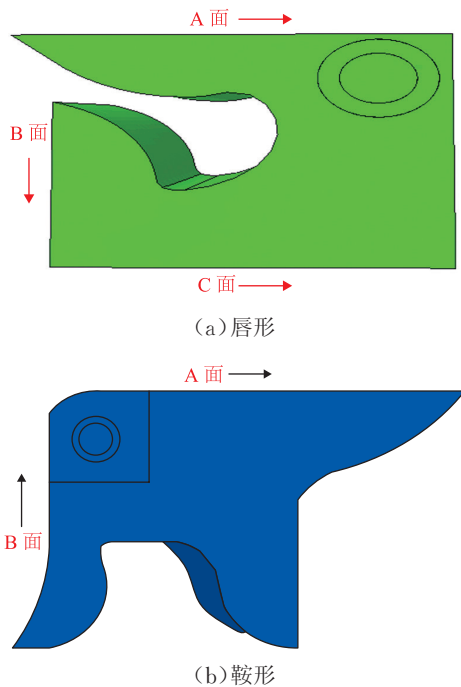
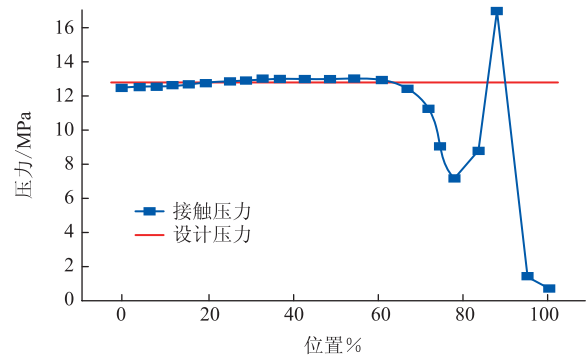
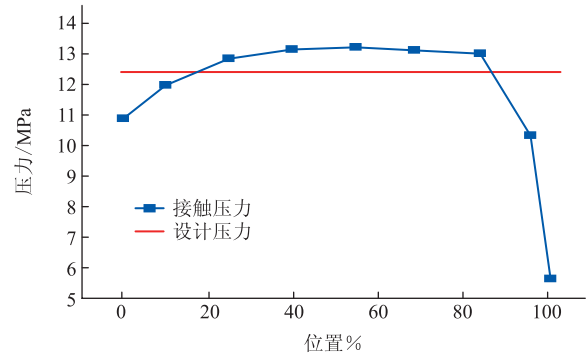


图 5 关键密封接触面示意图

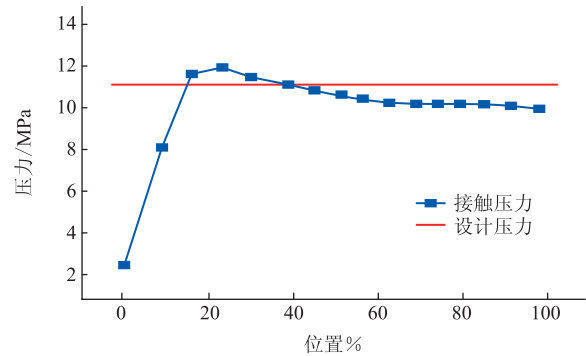
提取路径上的接触应力值,并与设计压力 12.6 MPa 进行对比,接触应力超过 12.6 MPa 的部分即为完全密封面。模拟得出唇形 A、B、C 面的接触应力分布曲线与鞍形 A、B 面的接触应力分布曲线(图 6、图 7)。



(a) A 面接触应力分布曲线



(b) B 面接触应力分布曲线



(c) C 面接触应力分布曲线

图 6 唇形关键密封面的接触应力分布曲线

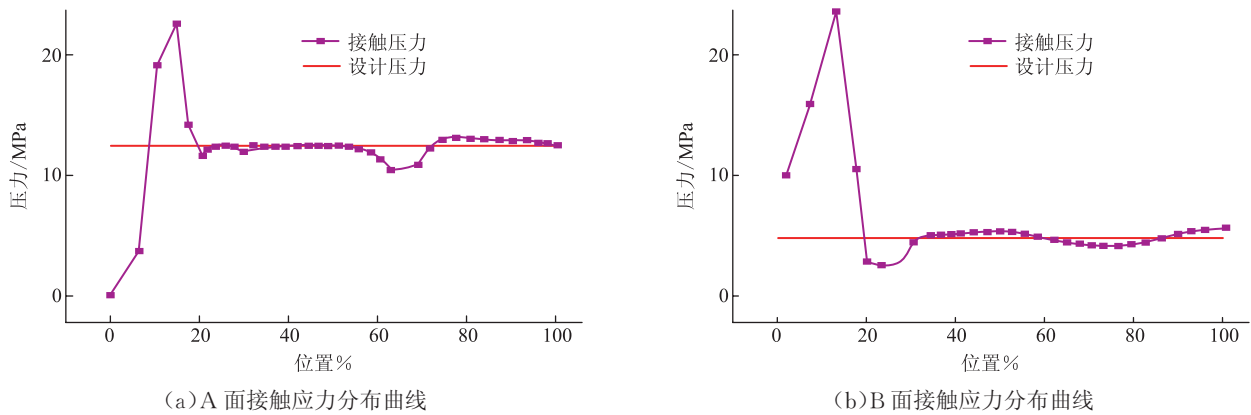


图7 鞍形关键密封面的接触应力分布曲线

利用相同方法对 19 MPa 水压试验工况下的密封性能进行研究,得到的接触应力分布与设计压力时的接触应力分布类似。

### 2.3 结果分析

通过对比唇形与鞍形密封圈的有限元模拟结果(表 3)可知:在设计压力下,鞍形密封圈比唇形密封圈

的最大密封比压高约 57%;在水压试验压力下,鞍形密封圈比唇形密封圈的最大密封比压高约 20%。在少一个关键接触面的情况下,鞍形密封圈仍比唇形密封圈的完全密封长度比提高了 28%(设计压力)和 54%(水压压力)。由此可见,鞍形密封圈比唇形密封圈具有更好的密封稳定性。

表3 唇形与鞍形密封圈有限元模拟结果

密封圈	关键密封面	设计压力工况下			水压试验压力工况下		
		最大密封比压	完全密封长度比	完全密封长度比均值	最大密封比压	完全密封长度比	完全密封长度比均值
唇形	A	1.037	56.7%	45.3%	1.025	52.0%	41.3%
	B	1.069	21.4%		1.022	20.6%	
	C	1.057	57.9%		1.038	51.3%	
鞍形	A	1.670	61.4%	58.15%	1.300	65.7%	63.5%
	B	1.650	54.9%		1.250	61.3%	

## 3 初始密封间隙尺寸分析

环锁型快开盲板合适的初始密封间隙尺寸是保证其正常使用的前提。若间隙较大,密封圈在槽口处的应力较大,密封圈易被挤出,导致橡胶圈局部失效,影响门盖开启。但钢圈尺寸和强度足够,一般不会造成整体密封失效。若间隙较小,则极易出现快开盲板启闭过程中环锁无法达到预定位置、卡死现象。唇形、鞍形的初始密封间隙  $\delta$  分别设定为 1 mm、4 mm(图 8)。

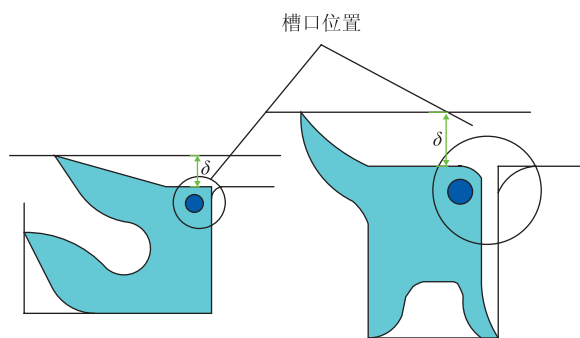


图8 唇形和鞍形初始密封间隙示意图

### 3.1 Mises 应力和接触压力比较

Mises 应力反映了密封圈截面上各主应力的大小。一般地, Mises 应力大的区域,材料容易出现裂纹,同时较大的 Mises 应力将加速橡胶材料松弛,从而造成刚度下降。Mises 应力的计算公式为<sup>[12-13]</sup>:

$$[\sigma] = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

计算得出,唇形密封圈与鞍形密封圈在工作压力下的 Mises 应力分布相似,高应力区域均集中在槽口倒角位置附近,唇形、鞍形密封圈的最大应力分别为 27.02 MPa、14.96 MPa。而鞍形初始密封间隙为 4 mm,是唇形的 4 倍,即鞍形在较大初始密封间隙的情况下 Mises 最大应力值仍较小,从 Mises 应力分布方面来看,鞍形的应力分布更合理。

唇形、鞍形密封圈的关键密封面上的最大接触压力均大于工作内压 12.6 MPa,且鞍形关键密封面上的最大接触压力均大于唇形(表 4),可见鞍形密封圈比唇形密封圈的密封效果更加稳定可靠。

表 4 唇形和鞍形密封圈关键密封面上的接触压力

密封圈	最大接触压力/MPa	
	A 面	B 面
唇形	13.77	28.15
鞍形	29.58	32.67

### 3.2 唇形密封圈初始密封间隙分析

唇形密封圈的初始密封间隙由 0.2 mm 增至 2.0 mm 时,密封圈 A、B 面上的最大接触压力、密封圈最大应力、最大挤出量的变化(图 9、图 10)为:随初始密封间隙的增大,唇形密封圈 A、B 面的最大接触压力呈下降趋势,  $\delta$  大于 1 mm 后其变化趋于平缓,但仍大于内压;密封圈最大挤出量和最大 Mises 应力随间隙增大而明显增大<sup>[14]</sup>。

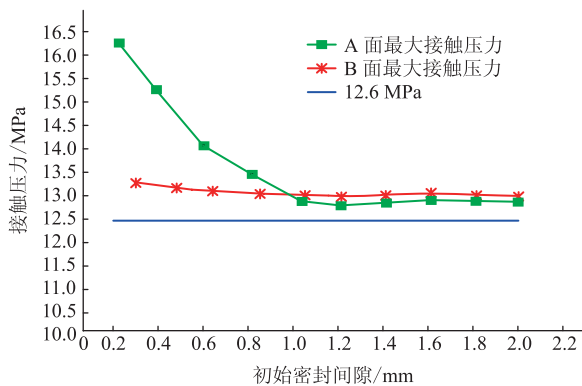


图 9 初始密封间隙对 Mises 接触压力的影响

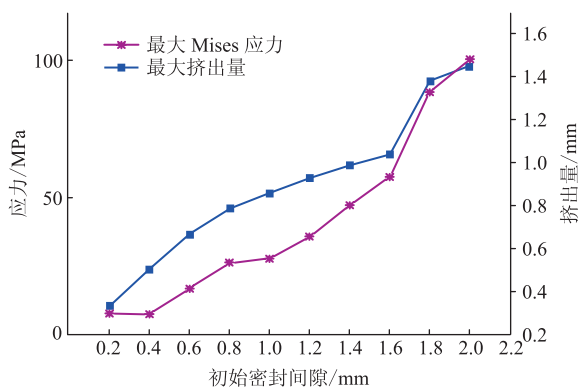


图 10 初始密封间隙对 Mises 应力和变形的影响

### 3.3 结果分析与实践

随着初始密封间隙变大,唇形密封圈最大挤出量和最大 Mises 应力明显增大,而最大接触压力呈下降趋势。对于唇形密封圈,12.6 MPa、DN1 550 环锁型快开盲板合适的初始密封间隙应控制在 1 mm 左右。而如此小的间隙,制造装配时很难控制,且在实际使用中受多种因素影响,快开盲板启闭时容易出现卡死现象。但若放大间隙,则会在密封可靠度降低的同时,密封圈

材料容易出现裂纹且加速橡胶材料的松弛,影响密封圈的的实际使用寿命。

而鞍形密封圈在较大的初始密封间隙情况下(唇形的 4 倍),各种工况下其密封性能均优于唇形密封圈。同时,鞍形密封圈自身的 Mises 应力分布也优于唇形密封圈,不会影响实际使用寿命。在设计与使用时,无需将端部法兰和门盖之间的间隙尺寸(初始密封间隙)留很大,只要环锁运动能克服上述因素即可。另外,鞍形密封圈微量浮动距离通常不到 1 mm,不会产生密封圈的磨损。

AKM 环锁型快开盲板系列的设计选用鞍形密封圈和配套的密封结构,实际扩大的端面间隙配合尺寸比使用进口唇形密封圈的大 60%。经过一年多的使用(已投入使用约 100 台),效果良好,有效地避免了环锁无法达到预定位置、卡死现象的发生。

## 4 结论

通过高压大口径环锁型快开盲板国产化项目的研制实践,分析了唇形橡胶密封圈存在的主要问题,研发的新型鞍形橡胶密封圈用于国产化高压大口径环锁型快开盲板。经国内专家鉴定:AKM 环锁型快开盲板性能满足技术条件要求,达到国外同类产品先进水平,自主研发的鞍形密封圈结构,密封可靠,盲板开关灵活。

采用 ABAQUS 对环锁型快开盲板用唇形和鞍形橡胶密封圈的密封性能进行模拟分析,结果表明:自主研发的鞍形橡胶密封圈的密封性能、自身受力状态、保证快开等方面的指标均优于进口的唇形橡胶密封圈,尤其适用于高压、大口径环锁型快开盲板,在保证密封的前提下,能够很好地满足结构快速启闭的需要,应用前景良好。

### 参考文献:

- [1] 罗凡,陈伟忠. 2014 年全国特种设备安全与节能学术会议论文集[C]. 北京:中国质检出版社,2015:375-381.
- LUO F, CHEN W Z. Proceedings of 2014 national academic conference for special equipment safety and energy saving[C]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2015:375-381.
- [2] 谭东杰,李柏松,杨晓峰,等. 中国石油油气管道设备国产化现状和展望[J]. 油气储运,2015,34(9):913-918.

- TAN D J, LI B S, YANG X Z, et al. Development and prospect of PetroChina's pipeline equipment localization[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9): 913-918.
- [3] 刘毅军. 中国天然气产业链“十二五”整体规划透视[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 105-109.
- LIU Y J. Perspective on the overall plan of a complete industrial chain in natural gas sector during the 12th Five-Year Plan in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 105-109.
- [4] 殷建平, 黄辉. 我国天然气供求分析和未来消费政策选择[J]. 改革与战略, 2010, 26(4): 26-29.
- YIN J P, HUANG H. The supply and demand of natural gas in China and its future consumption policies[J]. Reformation & Strategy, 2010, 26(4): 26-29.
- [5] 唐彪, 文剑, 裴斌, 等. 快开盲板密封圈国产化研究与应用[J]. 科技创新与应用, 2013(1): 21-22.
- TANG B, WEN J, PEI B, et al. Research and application of the quick opening closure blind plate sealing ring[J]. Technology Innovation and Application, 2013(1): 21-22.
- [6] 周天旭. 大型锁环式天然气快开盲板结构优化设计与试验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014: 21-23.
- ZHOU T X. Optimized design and experimental research of large band-lock quick opening closures[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014: 21-23.
- [7] 周天旭, 陈平, 陈水莲. 基于 Ansys Workbench 的快开盲板锁环分析及优化[J]. 化工机械, 2013, 40(4): 484-486.
- ZHOU T X, CHEN P, CHEN S L. Analysis and optimization of locking ring for quick-opening blind plate based on Ansys Workbench[J]. Chemical Engineering Machinery, 2013, 40(4): 484-486.
- [8] 王丹, 韩磊, 陈加鑫. 基于 Abaqus 的 O 形橡胶密封圈热应力分析[J]. 橡胶科技, 2013, 11(6): 18-21.
- WANG D, HAN L, CHEN J X. Thermal stress analysis of rubber O-rings based on Abaqus FEA software[J]. Rubber Science and Technology, 2013, 11(6): 18-21.
- [9] 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(9): 65-69.
- TAN J, YANG W M, DING Y M, et al. Finite element analysis of the sealing performance of O-ring seal structure[J]. Lubrication Engineering, 2006(9): 65-69.
- [10] 石莹. 新型天然气过滤器快开盲板橡胶密封圈仿真分析与性能试验[D]. 北京: 北京化工大学, 2015: 23-25.
- SHI Y. Analysis and performance test on rubber ring of new type natural gas filter quick-opening closure[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015: 23-25.
- [11] 韩传军, 张杰. 矩形橡胶密封圈的有限元分析及优化[J]. 橡胶工业, 2013, 60(2): 98-103.
- HAN C J, ZHANG J. Finite element analysis optimization of rectangle rubber seal[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(2): 98-103.
- [12] 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): 740-744.
- CHEN G D, HAISER H, HAAS W, et al. Analysis of elastomeric O-ring seals using the finite element method[J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19(5): 740-744.
- [13] 郑津洋, 董其伍, 桑芝富. 过程设备设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 100.
- ZHENG J Y, DONG Q W, SANG Z F. Process equipment design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 100.
- [14] 石莹, 陈平, 周淑敏. 高压大型天然气快开盲板用 C 形橡胶圈密封性能分析[J]. 润滑与密封, 2015(5): 89-93.
- SHI Y, CHEN P, ZHOU S M. Sealing performance analysis of rubber C-ring for high-pressure natural gas quick-opening closure[J]. Lubrication Engineering, 2015(5): 89-93.
- (收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-04-21; 编辑: 刘朝阳)
- 
- 基金项目:** 中国石油重大科技专项“油气管道关键设备国产化”, 2012E-2802。
- 作者简介:** 罗凡, 男, 高级工程师, 1960 年生, 1982 年毕业于华东理工大学化工机械专业, 现主要从事天然气管网用压力容器设备新技术的研究与开发。地址: 江苏省常州市长虹西路 383 号, 213102。电话: 13816639167, Email: luofansh@163.com