

# 双塔干燥器换向阀用双面阀板密封性能仿真研究

张斌,周易文,李卫强

(南京中车浦镇海泰制动设备有限公司,江苏 南京 211800)

**摘要:**采用 ANSYS 分析软件研究了双塔干燥器换向阀用双面阀板密封性能与橡胶材料硬度、橡胶厚度及黏接性能关系,并通过实际密封试验进行了验证。仿真结果表明:该类产品在相同的密封接触形变情况下,提高橡胶硬度有利于密封。同时密封产品应设计合适的橡胶厚度以保证橡胶最大应变在工程许用范围内,确保产品使用寿命的可靠性。仿真和试验验证该类产品的密封机理,可为该类密封产品的设计和选材提供依据。

**关键词:**气动密封;橡胶应变;密封接触应力;黏接

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0145-05

## Simulation Study on Sealing Performance of Double-sided Valve Plate for Directional Valve of Double Tower Dryer

ZHANG Bin, ZHOU Yiwen, LI Weiqiang

(Nanjing CRRC Puzhen Haitai Braking Equipment Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

**Abstract:** With the ANSYS analysis software, the relationship between the sealing performance of double-sided valve plate for directional valve of double tower dryer and the hardness, thickness and adhesion of rubber material was studied, and verified by actual sealing test. The simulation results show that the improvement of rubber hardness is conducive to sealing under the same sealing contact deformation. And meanwhile, the sealing products should be designed with appropriate rubber thickness to ensure the maximum strain of rubber within the allowable range of the project and assure the reliability of product service life. The simulation and test verify the sealing mechanism of corresponding products, which provides a basis for the design and material selection of the sealing products of the same kind.

**Keywords:** pneumatic seal; rubber strain; sealing contact stress; bonding

## 0 引言

轨道车辆中风源系统主要由空气压缩机和干燥器组成,空气压缩机负责提供压缩空气,干燥器负责将压缩空气进行干燥后供制动系统等用风设备使用。其中双塔干燥器是目前动车组以及地铁车辆上主流使用的。该干燥器可以同时干燥和再生,当主气流在一个塔中被干燥时,另一个塔中的滤芯同时进行再生。干燥和再生气路控制主要通过换向阀来实现,其中换向阀主要通过一种双面阀板橡胶密封件实现气路的开合。本文采用 ANSYS 等有限元分析软件对双面阀板橡胶密封件进行密封能力研究。

## 1 双塔干燥器换向阀工作原理

双塔干燥器换向阀<sup>[1]</sup>如图 1 所示,主要由活塞杆、导承、上下阀口及双面阀板橡胶密封件等组成,设计最大工作密封压力为 0.9 MPa。其中双面阀板橡胶密封件密封原理如图 2 所示,活塞杆与双面阀板通过紧固螺母连接一体,在先导压力的作用下轴向活塞运动;向下运动,双面阀板密封产品橡胶面与下阀口接触形成密封,实现充气过

程;向上运动,双面阀板密封产品橡胶面与上阀口接触形成密封,实现排气过程,从而实现双塔干燥器的进气及换气的功能。

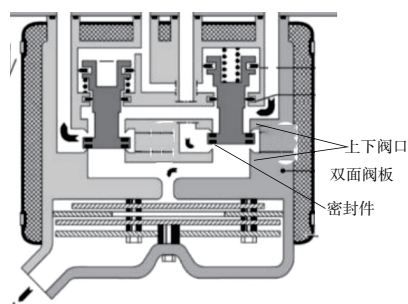


图 1 双塔干燥器换向阀示意图

## 2 换向阀双面阀板橡胶密封件密封仿真模型

### 2.1 换向阀双面阀板橡胶密封件气动密封仿真模型建立

双塔干燥器换向阀双面阀板橡胶密封件的有限元模

型如图 3 所示,其在充气工作时,在弹簧力和工作气压差作用下,双面阀板橡胶与下阀口压紧接触,其中压紧力为 332 N;在排气工作时,其压紧力为 678 N。其中上下阀口、双面阀板金属骨架都为不锈钢材质,其刚度相对橡胶材料可视为刚体,把双面阀板橡胶与上下阀口接触设置为刚体-柔体接触,接触方式为面-面接触<sup>[2]</sup>。橡胶材料为丁腈橡胶,橡胶单元采用 PLANE183 超弹单元,橡胶材料模型采用 Mooney-Rivlin 超弹本构模型。

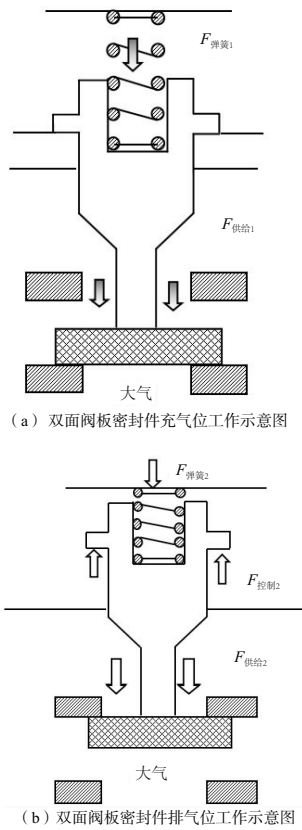


图 2 换向阀双面阀板橡胶密封件工作原理简图

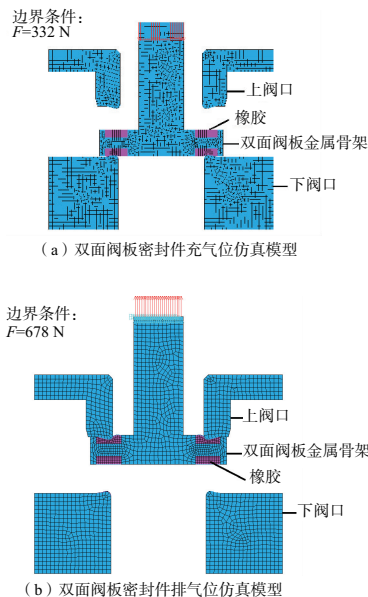
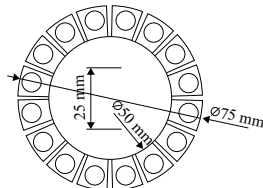


图 3 双面阀板密封件气动密封仿真模型

## 2.2 双面阀板用丁腈橡胶材料力学试验

橡胶材料是一种黏弹性材料,并非是一种完全 100% 的弹性材料。其中橡胶起到密封作用主要靠橡胶材料在载荷作用下弹性变形产生密封接触应力而实现密封。因此橡胶材料参数对其密封能力极其关键。本文以不同配方丁腈橡胶为材料试验对象,在常温 (23±2) °C 进行了等双轴拉伸和回弹性材料试验。其中双轴拉伸试样为 φ60 mm×2 mm 圆形试样,在圆周 16 个均分点施加载荷,其中具体试样形状和试验设备及试验方法如表 1 所示 (非标试验)。

表 1 丁腈橡胶材料试样规格、试验设备及试验方法

试验类型	试样规格	试验设备
等双轴拉伸		EBT-5000 多轴拉伸试验机,载荷量程 0~5 000 N,精度为 0.3%,变形测量采用非接触式激光引伸仪

## 2.3 不同硬度丁腈橡胶材料 Mooney-Rivlin 模型参数的确定

本文仿真中橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 超弹本构模型<sup>[3]</sup>,它较好地描述了橡胶类不可压缩超弹性材料变形小于 150% 的橡胶材料力学性能,能够满足工程橡胶材料的有限元计算需要<sup>[4]</sup>。拟合计算得到不同硬度丁腈橡胶材料 Mooney-Rivlin 超弹本构模型参数见表 2 (常温 23 °C)。

表 2 不同丁腈橡胶仿真材料物理参数 单位:MPa

邵尔硬度	物理量	数值
60	Rivlin 参数 C10	0.32
	Rivlin 参数 C01	0.06
70	Rivlin 参数 C10	0.5
	Rivlin 参数 C01	0.05
80	Rivlin 参数 C10	0.79
	Rivlin 参数 C01	0.08

## 3 仿真结果与讨论

### 3.1 不同硬度丁腈橡胶对双面阀板密封接触应力的影响

研究不同邵尔硬度 (60、70 和 80) 丁腈橡胶材料的双面阀板在双塔干燥器充排气过程密封性能。仿真结果如表 3 所示 (应力指标 ≥0.9 MPa),其中橡胶与上下阀口接触变形如图 4 所示,密封接触应力分布如图 5-图 6 所示。不同硬度橡胶在指定的载荷作用下,橡胶与上下阀口都完全接触,所以不同硬度丁腈橡胶在各密封状态下橡胶应变分布是一致的。但是由于橡胶硬度不同,橡胶弹性模量不一样,产生

的密封接触应力也不同。随着橡胶硬度增加,密封接触应力增大。从计算结果可以看出,为了实现 0.9 MPa 工作气

压密封,建议双面阀板密封件可用橡胶材料,选择 80 邵尔硬度。

表 3 不同硬度丁腈橡胶双面阀板密封性能仿真计算结果

邵尔硬度	充气位最大应变/%	充气位最大密封应力/MPa	排气位最大应变/%	排气位最大密封应力/MPa
60	19.5	0.56	29.4	0.84
70	19.5	0.80	29.4	1.20
80	19.5	1.27	29.4	1.90

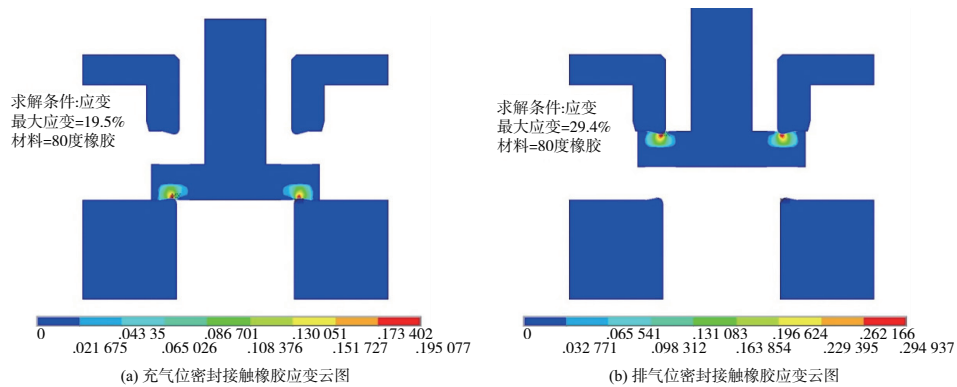


图 4 双面阀板密封接触下橡胶应变仿真结果

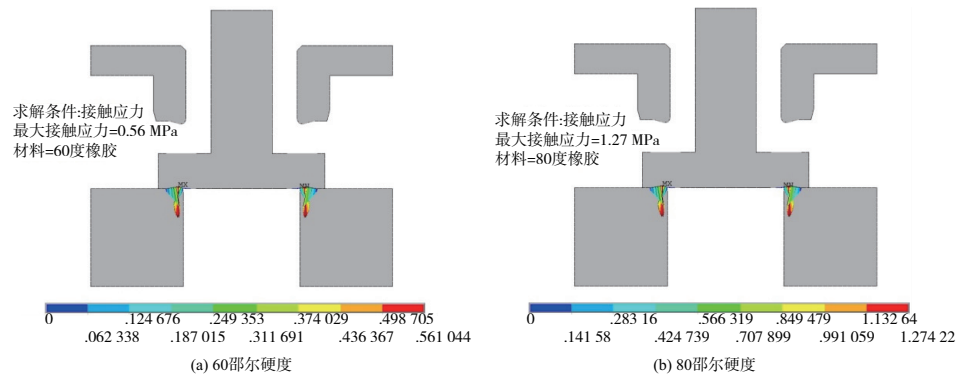


图 5 充气位不同硬度丁腈橡胶双面阀板的密封接触应力云图

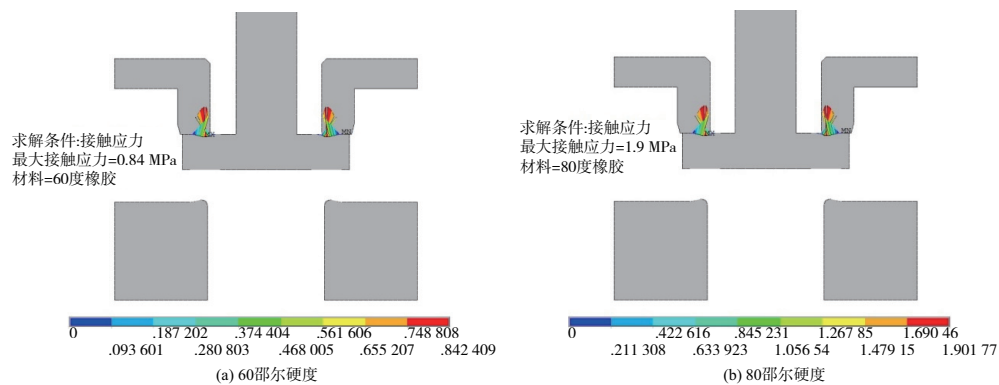


图 6 排气位不同硬度丁腈橡胶双面阀板的密封接触应力云图

### 3.2 橡胶厚度对双面阀板密封性能的影响

在选用 80 邵尔硬度丁腈橡胶的前提下,分析双面阀板橡胶厚度对密封性能的影响。研究了橡胶厚度 1.5 mm ~

6 mm 密封状况下橡胶应力和密封接触应力,仿真计算结果如图 7 所示,结果表明随着橡胶厚度减少,橡胶密封接触应变增大,橡胶密封接触应力增大。但由于双塔干燥器的换向阀处于频繁动作中,工作条件比较恶劣,其双面阀

板密封件是干燥器中的一个易损件。为保证橡胶材料使用寿命的可靠性,工作状态下橡胶材料最好处于小变形状态,本项目控制橡胶材料的应变 $\leq 30\%$ ,最终确定设计的

双面阀板橡胶厚度为 3 mm,其充排气密封过程中,最苛刻环境下橡胶应变为 29.4%,最小的密封接触应力为 1.27 MPa,满足 0.9 MPa 工作气压密封要求。

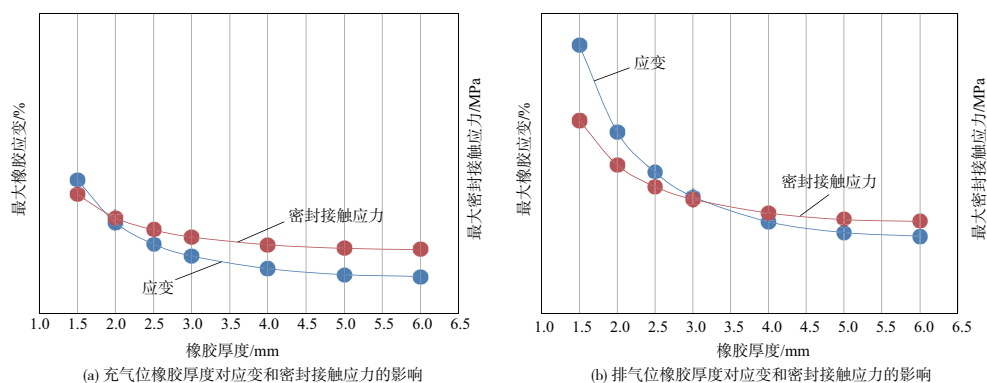


图 7 双面阀板橡胶厚度对双面阀板橡胶应力和密封力的影响曲线

### 3.3 黏接不良对双面阀板密封性能的影响

双面阀板橡胶与金属骨架理论上应黏接良好,但实际上橡胶与金属并非 100% 完全黏接良好。本文假设局部脱黏,模拟该状态下双面阀板在密封工况,建立仿真模型如图 8 所示,局部脱黏处将受到 0.9 MPa 工作气压作用。计算结果表明,双面阀板橡胶在工作气压作用下,橡胶将

随着脱黏发生撕裂,其中撕裂应力达到 2.7 MPa(图 9)。考虑到干燥器换气阀内的气体中常常含有大量的水蒸气、油滴、杂质等,如果橡胶与金属黏接强度不好,很容易导致从局部脱黏发展到全部橡胶撕裂<sup>[5]</sup>,从而密封失效。因此双面阀板密封产品要求橡胶与金属黏接强度 $\geq 3$  MPa,避免局部黏接失效而导致橡胶与金属完全撕裂。

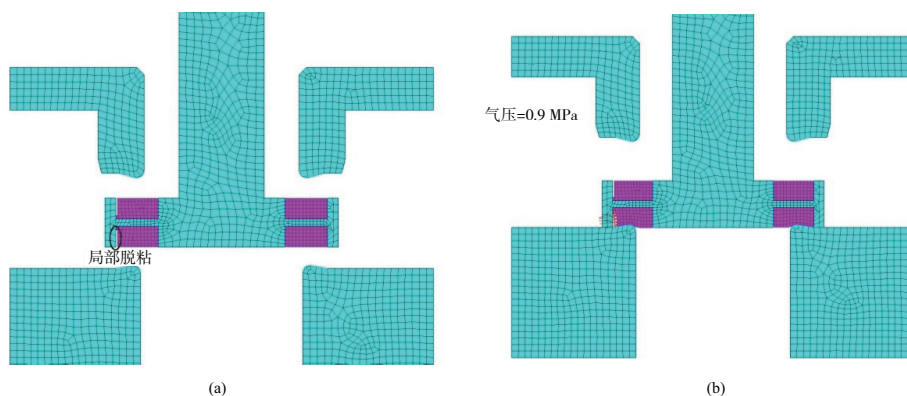


图 8 双面阀板橡胶局部脱黏及工作气压作用下的有限元模型

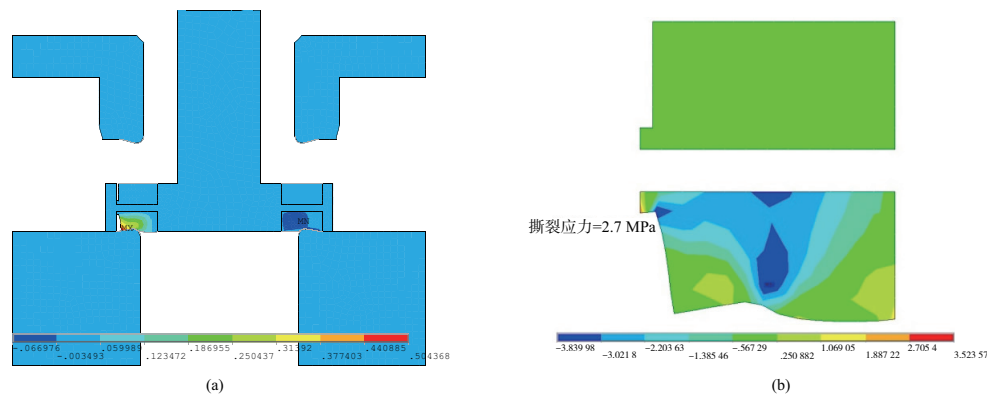


图 9 双面阀板橡胶局部脱黏橡胶变形及橡胶切应力云图

### 3.4 试验验证

制造 60、70、80 邵尔硬度的丁腈橡胶双面板,装配到双塔干燥器换向阀进行充排气保压试验,试验结果如表 4 所示。试验表明:不同硬度丁腈橡胶开始泄漏压力与仿

真计算的结果接近,验证了密封仿真计算的正确性,验证了这类产品的密封机理主要靠橡胶与阀口接触形变产生的接触应力来密封,并且由于上下阀口限位作用,这类产品属于定应变条件的密封,橡胶硬度增加有利于密封。

表 4 不同硬度丁腈橡胶双面板密封保压试验结果

单位:kPa

充气压力	60 邵尔硬度			70 邵尔硬度			80 邵尔硬度		
	开始压力	结束压力	漏气量	开始压力	结束压力	漏气量	开始压力	结束压力	漏气量
300	303.8	302.4	-1.4	304.5	302.8	-1.7	295.6	294.1	-1.5
600	600.0	557.2	-42.8	605.6	599.3	-6.3	599.7	598.5	-1.2
900	900.2	568.7	-331.5	901.7	801.6	-100.1	900.3	898.1	-2.2

## 4 结语

通过有限元方法研究了橡胶材料硬度、橡胶厚度以及橡胶与金属黏接对双塔干燥器换向阀密封性能的影响。发现橡胶材料硬度对于这类高工作气压的气动密封件至关重要。同时该类金属与橡胶黏接的密封产品,其橡胶黏接强度设计要≥3 MPa,才能避免工作时高气压对密封件橡胶材料造成撕裂破坏,导致产品失效。

### 参考文献:

[1] 张成彦,谭跃进,李金禄,等. 吸附式压缩空气干燥器用组合换向阀[J]. 中国设备工程,2018(5):174-175.

[2] 张付英,李腾. 基于 ANSYS 的 Y 形圈初始建模[J]. 天津工业大学学报,2013,32(6):85-88.  
 [3] RIVIN E I,LEE B S. Experimental study of load-deflection and creep characteristics of compressed rubber components for vibration control devices [J]. Journal of Mechanical Design, 1994,116(2):539-549.  
 [4] 杨晓翔. 非线性橡胶材料的有限单元法[M]. 北京:石油工业出版社,1999  
 [5] 刘博. 双塔式空气干燥器故障频发分析及改进研究[J]. 华东科技(综合),2019(5):299.

收稿日期:2022-04-08

### (上接第 118 页)

[12] 刘大有,刘春辰,王生生. 环境智能中上下文推理方法研究综述[J]. 模式识别与人工智能,2011,24(5):673-679.  
 [13] BOLYA D,ZHOU C,XIAO F Y, et al. YOLACT better real-time instance segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2022,44(2):1108-1121.  
 [14] 邵蔚元,郭跃飞. 多任务学习及卷积神经网络在人脸识别中的应用[J]. 计算机工程与应用,2016,52(13):32-37,88.  
 [15] 徐培超,陈雯柏,陈祥凤,等. 多任务及 Resnet 网络在人脸多属性识别中的应用 [J]. 小型微型计算机系统,2018,39(12):2720-2724.  
 [16] BOCHKOVSKIY A,WANG C Y,LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [D/OL]. (2020-05-20) [2021-08-10] https://blog.51cto.com/u\_15228753/2819798.  
 [17] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 640-651.  
 [18] BADRINARAYANAN V,KENDALL A,CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2017,39(12):2481-2495.  
 [19] HU J, SHEN L, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-excitation

networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2020,42(8):2011-2023.  
 [20] WOO S,PARK J,LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module [C]//Computer Vision - ECCV 2018, [S.I.: s.n.],2018.  
 [21] WANG Q L,WU B G,ZHU P F, et al. ECA-net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks [C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle, WA, USA: IEEE, 2020: 11531-11539.  
 [22] SUDRE C H, LI W Q, VERCAUTEREN T, et al. Generalised dice overlap as a deep learning loss function for highly unbalanced segmentations [C]//Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support, [S.I.:s.n.],2017.  
 [23] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector [C]//Computer Vision - ECCV 2016, [S.I.:s.n.], 2016.  
 [24] LIN T Y,GOYAL P,GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2020,42(2):318-327.

收稿日期:2021-09-13