

# 航空橡胶密封件力学与密封性能检测技术\*

杨 恒,柯玉超,王 申,董弋锋,黄圣濠,姚学锋

(清华大学航天航空学院,北京 100084)

[摘要] 介绍了航空橡胶密封件的力学、泄漏、损伤、接触变形等特性的无损检测技术及应用情况。其中,橡胶密封件泄漏压差测量方法,用于获得不同压差下的气体泄漏率;橡胶密封件接触应力超声检测技术,实现了橡胶密封接触应力的准确测量;橡胶密封件损伤与泄漏的红外热成像测试技术,可以得到泄漏点的定位与泄漏量的精确测量;橡胶密封件接触变形数字图像相关技术,获得了织物接触界面变形场与应力场的演化规律等。同时,对航空橡胶密封件的非接触测量技术进行了展望。

关键词: 橡胶密封件; 红外热成像技术; 超声检测; 数字图像; 接触应力; 泄漏

## Measurement Technologies of Mechanical and Seal Performance for Aviation Rubber Seals

YANG Heng, KE Yuchao, WANG Shen, DONG Yifeng, HUANG Shenghao, YAO Xuefeng

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] The article mainly introduces the non-destructive measuring technologies of mechanics, leakage, damage and contact deformation for aviation rubber seals and their applications. The measuring technologies contain pressure difference method for leakage measurement; ultrasonic testing technology for contact stress; infrared thermal imaging technology for damage and leakage detection; digital image correlation method for measuring contact deformation. Meanwhile, the non-contact measurement technologies of aviation rubber seals in the future are prospected.

Keywords: Rubber seal; Infrared thermal imaging technology; Ultrasonic inspection; Digital image; Contact stress; Leakage

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.106

橡胶密封材料对于保证航空、航天、航海、汽车、石油、水利等工程结构密封性设计要求具有重要的作用,其主要通过与被密封表面接触和挤压产生变形来实现密封效果<sup>[1-3]</sup>。由于橡胶是高分子聚合物,具有超弹性特性,在挤压力的作用下会发生较大变形。另外,对于表面包附着纤维织物的橡胶密封材料,虽然可以减小橡胶摩擦系数、降低磨损、防止橡胶粘连金属,但也使得密封件与被接触表面之间的接触与摩擦问题变得更加复杂<sup>[4-7]</sup>。

由于接触界面的不可达性及隐蔽,其本身难以观察与测量,判定接触界面是否泄漏以及定量确定泄漏率大小是一项十分复杂的工作。目前,国内外很多橡胶密封研究采用理论或有限元方法分析接触界面接触应力,用接触应力大小与气体内外压差来判定是否泄漏<sup>[4]</sup>,并以此作为设计指标。

本文主要介绍航空橡胶密封件的界面接触应力、损伤及泄漏率、接触变形的无损检测技术及特点,对于织

物橡胶密封件的优化设计、性能评估、寿命预测具有重要的研究价值。

### 1 橡胶密封件泄漏压差测量方法

为了满足大型客机大间隙、大尺度及小载荷的密封要求,织物密封材料通常以管状或异形结构的形式使用,从而获得较小的载荷作用,产生较大变形,填补结构件之间的间隙,并起到良好的密封效果。

图1是一种典型的大型飞机舱门织物橡胶密封件,其横截面大体呈心形<sup>[4]</sup>。密封件主体为硅橡胶,外侧复合有聚酯纤维织物布,中间夹杂着聚酯纤维网眼布。

采用气体泄漏测试系统对管状织物橡胶密封件气体泄漏率进行测试<sup>[4,8]</sup>,气体泄漏测试系统原理如图2所示。密封箱体内的两个腔体分别为高压舱和低压舱,均连接有测试气压的压力传感器。高压舱体与空气压缩机相连,通过气体通路上的压力控制阀控制流量和压力,压力控制阀与高压舱体之间还安装有流量传感器,以测量由空气压缩机压入的气体质量流量。低压舱与

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(11472152)。

真空泵相连,也通过气体通路上的压力控制阀控制流量和压力,压力控制阀与低压舱之间也安装有流量传感器,用来测量真空泵从低压舱抽走的气体质量流量。

测试开始时,启动真空泵和空气压缩机,真空泵从低压舱不断抽气,空气压缩机不断地将空气压入高压舱,并通过各自线路上的压力控制阀控制气流速度。安装在高压舱与低压舱上的压力传感器实时测量各自舱室内的气体压力。通过安装在管路上的流量传感器测量上述气体的流量。当压力维持稳定后,所测量的气体流量即为由高压舱泄漏到低压舱的泄漏率。测试过程中,信号处理系统通过控制对流量计、压力传感器测试数据采集、记录和分析,从而可以研究各种气压条件下的气体泄漏率。

管状橡胶密封件(图1)在不同压差下的气体泄漏率如图3所示。可见,随着压强差的增加,气体泄漏率增大。其泄漏率增加与压差基本呈二次多项式关系,这主要因为密封件表面为聚酯纤维织物布,气体通过金属舱门门框与密封件接触界面泄漏的情况与气体通过多孔介质类似<sup>[8-12]</sup>。

## 2 橡胶密封件接触应力超声检测技术

接触应力是评价接触界面特性的一个重要指标,因此测量橡胶密封件界面的接触应力,对于橡胶密封件的优化设计、性能评估、寿命预测,具有重要的参考价值。由于接触界面的不可达性,很难用传统的力学测量手段(如应变片等)来得到接触部位的接触应力。超声无损检测技术为接触应力的测量提供了可能性。超声波在传播过程中遇到材料界面都会发生反射和透射。接触界面不同的性质与应力状态会对超声在界面处的反射产生影响。清华大学姚学锋课题组针对橡胶密封件接触应力测量,提出了一种便捷的基于超声无损检测技术的测试方法<sup>[7]</sup>,该方法不需要改变被测试件的外形和受载状态,可以实现较小接触应力的测量。

在实际情况下,由于材料表面都有一定的粗糙度,接触界面两边的物体并不完全接触,在材料接触界面会存在一个真实接触面积。在不同的接触应力下,真实接触面积会有所不同。而超声波在界面的反射、透射性能与界面真实接触面积相关。真实接触面积会随着接触应力的增大呈一定规律的增大,真实接触面积越大则超声信号在界面透射越多,而界面反射的回波信号振幅越小,因此可以建立界面接触应力与超声回波信号之间的关系。

利用超声回波法建立超声测量接触应力的试验平台,由超声发射接收仪、示波器、超声探头、加载装置系统等组成,试验装置及方法原理如图4(a)所示。加载

台为一块有4个支撑的金属平板,中间开有一个通孔,便于探头探测信号。通过在试件上放置不同质量的砝码来实现不同力的加载,如图4(b)所示。

通过对回波信号的分析,建立回波信号强度和接触



图1 管状织物橡胶密封件

Fig.1 Tubular fabric rubber seal

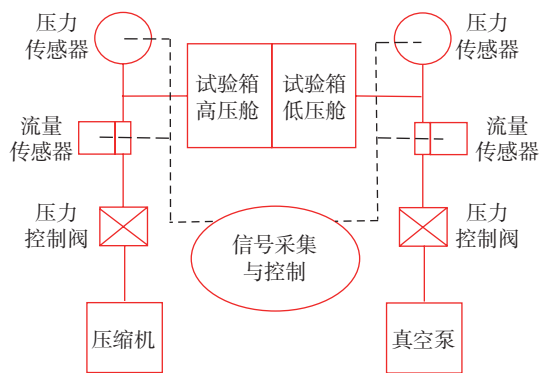


图2 橡胶密封件泄漏测试系统

Fig.2 Leakage measuring system for rubber seal

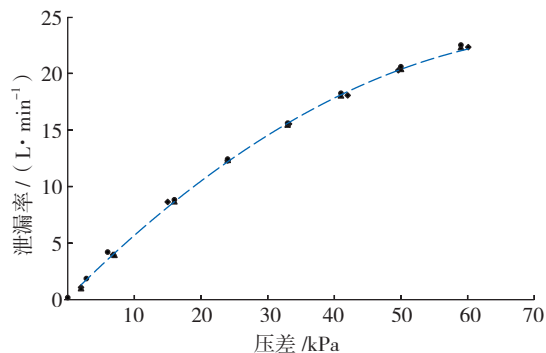
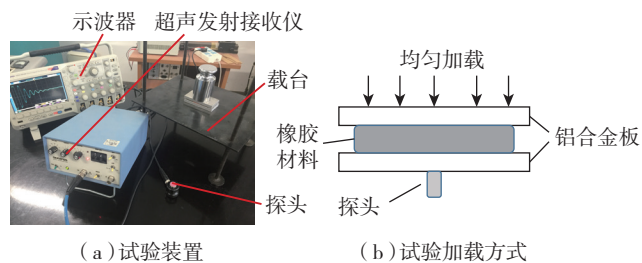


图3 管状橡胶密封件在不同压差下的气体泄漏率

Fig.3 Air leakage in different pressure difference for tubular rubber seal



(a) 试验装置

(b) 试验加载方式

图4 试验装置及加载方式

Fig.4 Experimental set-up and loading

应力大小之间的关系。提取试验中不同接触应力下的一次回波信号的最大幅值,得到不同接触应力下的超声波幅值变化曲线,如图 5 所示<sup>[13]</sup>。可以看出,随着接触应力的增大,反射信号幅值不断减小,该试验规律与理论分析符合,试验测量的接触应力量级为 0.1MPa 左右。利用标定试验可以得到回波信号幅值和接触应力的标定曲线,利用标定曲线和其他未知受载情况下的一次回波幅值即可反演得到橡胶界面的接触应力<sup>[13]</sup>。

### 3 橡胶密封件损伤与泄漏的红外测试技术

红外热成像是一种新兴起的全场、非接触测量技术,可以较准确地得到拍摄区域的温度场。本课题组将红外热成像技术应用到了密封领域,利用温度图像在损伤处的温度梯度分布特征,实现了泄漏点的定位与泄漏量的精确测量。

为了建立泄漏率的模型,首先对其进行热力学理论分析,对于一般的密封问题可以简化为含有孔洞的无限大平板气体传热问题。当气体经过壁面向外泄漏时,泄漏孔处的温度场受到多个因素的影响,包括气体温度及压强、外界环境气体温度及压强、孔径、气体泄漏率、泄漏气体的比热容及壁面的导热系数等因素。对该问题进行量纲分析,可以得到泄漏率与这些参数的关系,进而通过 FLUENT 模拟结果来确定模型的具体形式与其中的参数值。为了验证模型的正确性,利用流量计和带有泄漏孔的密封盒子等装置进行试验验证,试验仪器如图 6 所示。

通过拍摄温度图像(图 7),并对泄漏孔周围的温度场进行梯度运算,再代入泄漏模型计算,可以得到不同温度下的泄漏率。与 FLUENT 模拟得到的泄漏率进行比较,可以看出试验结果与模拟结果的误差在 10% 以内,说明基于温度梯度的泄漏率计算模型是准确的。

### 4 橡胶密封件接触变形测量的数字图像技术

橡胶密封材料接触变形与接触应力研究主要涉及接触力学、实验固体力学、高分子材料学、摩擦学等基础理论与试验技术。尚无接触理论可以精确预测有限厚度织物橡胶密封材料接触表面的变形与应力分布。同时,接触面的应力与变形无法用传统的试验应力分析技术测试。因此,橡胶密封接触面变形与应力的测量方法是接触力学研究领域中的极具挑战性的科学问题。

清华大学姚学锋课题组采用三维数字图像相关技术获得接触面周围的三维变形场分布,继而结合织物橡胶密封材料接触面的三维有限元模型,由三维位移场反演得到接触表面三维应力场分布,为接触界面变形与应力的测量提供了有效的解决方法。

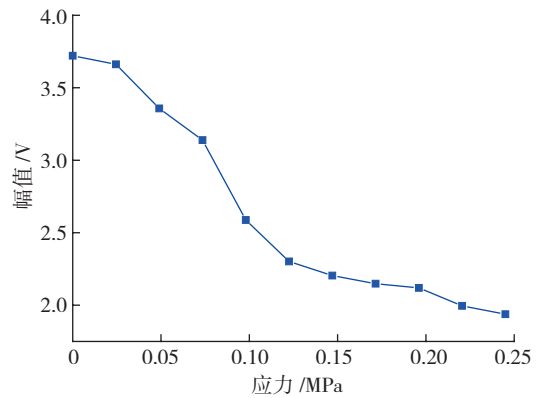


图5 橡胶-铝合金界面不同接触应力下的超声幅值变化曲线  
Fig.5 Ultrasonic amplitude curve of rubber – aluminum alloy interface under different contact stress



图6 红外测试技术试验装置  
Fig.6 Experimental device diagram of infrared test technology

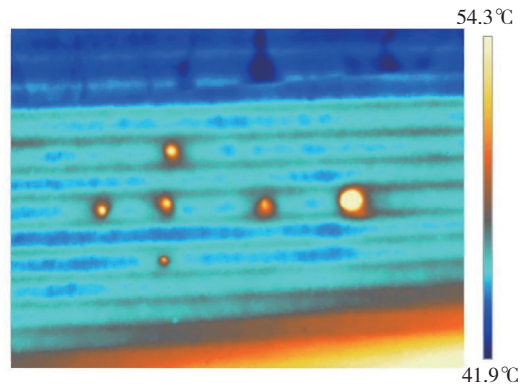


图7 含孔容器气体泄漏时的温度场测量结果  
Fig.7 Measurement of temperature field of containers with holes at gas leakage

三维数字图像相关方法在位移场测量中应用广泛,它利用相机采集试件变形前后的数字图像,根据试件的表面图像特征(散斑等),再利用灰度图像相关算法获得试件表面的位移场。

图 8 所示是将喷斑后的试件安装在万能试验机的平台上,利用双目 CCD 相机系统采集的图像,通过三维数字图像相关计算软件进行图像处理获得接触界面附近的位移场分布。

为了表征密封性能,织物橡胶接触界面处的接触应

力分布是重要的力学参量。为了获得接触界面的应力分布,建立与试验一致的有限元模型,如图9(a)所示。根据试验测得的接触界面附近位移场分布,结合建立的有限元模型,按以下反演算法来得到接触界面的应力分布。不断改变有限元模型中加载头的位移,直至在该位移 $u$ 下,有限元模拟得到的接触界面附近的位移场满足:范数 $\|\vec{u}_{\text{simulation}} - \vec{u}_{\text{test}}\|$ 取最小值。图9(b)是加载条件下反演获得的织物橡胶表面的应力场分布。通过该方法获得了织物接触界面变形场与应力场的演化规律,为橡胶密封材料设计与优化提供了指导。

## 5 结论

本文介绍了橡胶密封件泄漏压差测量方法、橡胶密封件接触应力超声检测技术、橡胶密封件损伤与泄漏的红外测试技术和橡胶密封件接触变形测量的数字图像相关技术,通过这些无损检测方法可以实现对橡胶密封件气体泄漏率、接触界面应力、气体泄漏位置和接触区域变形等的准确测量。这些无损检测方法的提出为航空橡胶密封件性能的测试与评估提供了系统的实现方式。鉴于航空橡胶密封件的特殊用途,航空橡胶密封件的无损检测技术目前是一个十分重要而且仍需要继续探索的课题,除了数字图像相关技术、压差测量方法、超声检测技术、红外成像测试技术等,橡胶密封件的无损检测技术正在向运动机构密封件、曲面密封件、智能密封件、密封件在线检测等方面的应用发展。

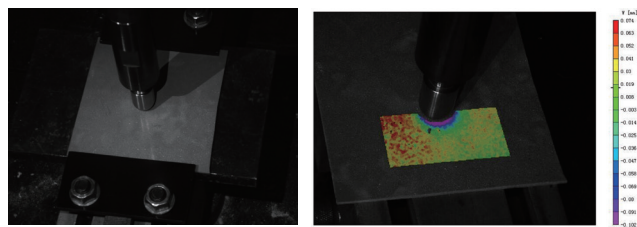
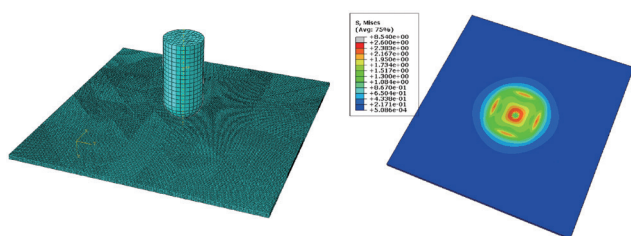


图8 试验装置及橡胶表面Z向位移场测量结果

Fig.8 Test device and Z direction displacement field measurement results on rubber surface



(a) 有限元模型

(b) 接触应力反演结果

图9 橡胶密封接触界面有限元模型及接触应力反演结果

Fig.9 Finite element model of rubber sealing contact interface and the inversion result of contact stress

## 参考文献

- [1] 姚学锋,熊超,罗欢,等.橡胶密封材料的热力学性能实验研究[C]//中国力学学会北方七省市第十三届学术大会论文集.郑州:郑州大学出版社,2010.
- [2] YAO Xuefeng, XIONG Chao, LUO Huan, et al. Experimental study on thermodynamic properties of rubber sealing materials[C]//Proceedings of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics Seven Northern Provinces 13th Academic Conference. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2010.
- [3] HUANG Feng, LIU Ruosi, KE Yuchao, et al. Finite element simulation of compression behavior for rubber seal[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(6): 83-88.
- [4] YANG H, YAO X F, KE Y C, et al. Constitutive behaviors and mechanical characterizations of fabric reinforced rubber composites[J]. Composite Structures, 2016, 152: 117-123.
- [5] 柯玉超.航空橡胶密封结构关键性能与成型工艺研究[D].北京:清华大学,2016.
- [6] KE Yuchao. Key performance and molding process of rubber sealing structure for aviation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [7] KE Y C, YAO X F, YANG H, et al. The compression and friction of tubular rubber seal under the curved surface loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(1): 14-22.
- [8] 罗欢.橡胶密封件力学性能研究[D].北京:清华大学,2012.
- [9] LUO Huan. The mechanical properties of rubber seals[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [10] KE Y C, YAO X F, YANG H, et al. Kinetic friction characterizations of the tubular rubber seals[J]. Tribology International, 2014, 72(4): 35-41.
- [11] KE Y C, YAO X F, YANG H, et al. A measuring method of gas leakage along the contact interface of the stripped rubber seals[J]. Measurement, 2015, 61: 299-304.
- [12] YAO X F, LEI Y M, XIONG C, et al. Mechanics analysis on helium leakage of flexible composites[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2012, 19(8): 603-612.
- [13] YAO X F, LEI Y M, XIONG C, et al. Experimental study of helium leakage parameters in flexible composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(6): 3562-3568.
- [14] YAO X F, LEI Y M, XIONG C, et al. Experimental study on damage-induced helium leakage in flexible composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(19): 2936-2945.
- [15] KE Y C, YAO X F, YANG H, et al. Gas leakage prediction of contact interface in fabric rubber seal based on a rectangle channel model[J]. Tribology Transactions, 2017, 60(1): 146-153.
- [16] 黄圣濠.橡胶界面接触应力的超声波测试方法及其应用[D].北京:清华大学,2017.

HUANG Shenghao. Rubber interface contact stress ultrasonic testing method and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

通讯作者:姚学锋,教授、博士生导师,研究方向为先进复合材料及结构设计、实验固体力学等,E-mail: yxf@mail.tsinghua.edu.cn.

(责编 逸飞)