

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.006

高弹性橡胶夹层结构封严板分析方法

许腾飞, 王新峰, 郭树祥

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要:飞机活动面缝隙采用封严结构可以有效提升隐身性能。本文提出了一种橡胶夹层结构的封严板结构, 对该封严板使用的橡胶材料进行了单轴、等双轴与平面拉伸试验。对常用的 Mooney-Rivlin、二次多项式、Neo-Hookean、Yeoh 和三次 Ogden 本构模型进行拟合分析, 确定了二次多项式和三次 Ogden 形式的高弹性材料模型, 在此基础上建立了封严板结构有限元模型并进行装配分析和气动载荷作用分析。最后通过试验验证了所选用的橡胶材料高弹性本构模型与橡胶夹层封严板结构仿真分析方法的正确性。

关键词:橡胶; 高弹性; 本构模型; 封严板

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)03-0394-07

Analytical Method of Sealed Plate with Hyperelastic Rubber Sandwich Structure

XU Tengfei, WANG Xinfeng, GUO Shuxiang

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The sealing structure applied on the gap of the aircraft movable surface effectively improves the stealth performance. This paper proposes a sealing plate featured with a rubber sandwich structure. The uniaxial, equal biaxial and planar tensile tests were conducted based on this structure. The fitting analysis was performed by the common constitutive models, containing Mooney-Rivlin's, quadratic polynomial's, Neo-Hookean's, Yeoh's, and Ogden's third order model. The hyperelastic material model was built by quadratic polynomial model and Ogden's third-order model. Based on the above analysis, the finite element model of the sealed plate structure was established, and the corresponding assembly analysis and aerodynamic load analysis were performed. The accuracy of the hyperelastic constitutive model of the rubber material and the simulation analysis method for the proposed sealed plate was verified by experiments.

Key words: rubber; hyperelastic; constitutive model; sealing plate

隐身技术是未来飞行器发展的一个主要方向。为实现飞机整体隐身特性应尽可能减少开口和缝隙, 增加飞机表面的平滑度。采用封严结构是减少结构活动面部位缝隙的最有效措施。现有的封严技术主要应用在航空发动机领域, 主流的封严技术有石墨封严、篦齿封严以及刷式封严等^[1]。但隐身所用封严结构主要用于可动翼面与机翼固定后缘之间的结构间隙等部位, 不但要求封严结构件具有抵抗气

动吸力的高强度、高刚度的气动密封特性, 同时要求封严结构件具有形变大, 回弹性高等特点。因此, 对封严结构的柔性大变形和刚性封严性这两种相互制约的性能要求对其结构设计带来困难。

目前, 国内对于飞机隐身的封严结构的研究较少, 对于封严结构所使用材料体系、结构形式和成型工艺等尚待研究。为同时满足封严性和大变形要求, 本文提出一种橡胶夹层结构的封严结构。封

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-02-19

通信作者: 王新峰, 男, 副教授, E-mail: xinfengwang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 许腾飞, 王新峰, 郭树祥. 高弹性橡胶夹层结构封严板分析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 394-400. XU Tengfei, WANG Xinfeng, GUO Shuxiang. Analytical method of sealed plate with hyperelastic rubber sandwich structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 394-400.

严板主体为碳布和石英布用于增加结构的承载能力,使用橡胶夹层来增加结构的弹性与大变形的能力。

橡胶材料属于超弹性体,是不可压缩且具有高度非线性的复合材料^[2]。橡胶的非线性主要体现在它的应力-应变曲线不成线性变化,具有复杂的本构关系。描述橡胶力学性能的方法有两种,基于热力学统计理论和基于连续介质力学理论。目前比较成熟的本构模型,有基于热力学统计理论的 Arruda-Boyce 模型、Van der Waals 模型和基于连续介质力学理论的多项式模型、Ogden 模型^[3-6]。魏永涛等研究了橡胶材料分析的罚有限单元法和混合插值有限单元法,数值结果和解析解对比验证了算法的有效性^[7];危银涛等给出了 Yeoh 模型橡胶本构关系的数值实现,推导了不可压缩橡胶材料有限元分析的详细列式^[8];龚科家等开发了基于 CCD 图像处理的橡胶本构试验系统,对典型轮胎用填充橡胶进行本构关系试验与有限元研究^[9]。但是目前,对用于封严功能的橡胶及橡胶夹层结构研究较少。

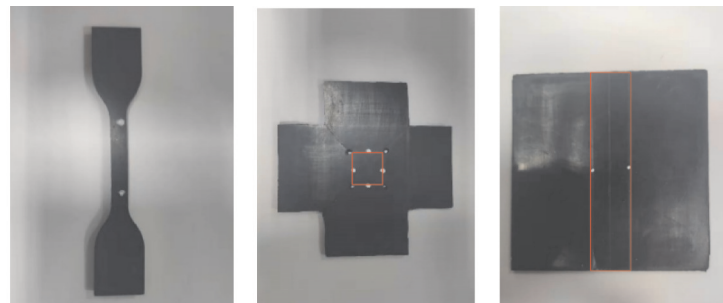
本文通过相应的橡胶拉伸试验,基于试验曲线对比分析了各橡胶本构模型适用性,选取可靠的本构模型并确定其相应的参数。建立了橡胶夹层封严结构有限元模型,并开展了相应的验证试验。

1 超弹性橡胶材料性能试验

由于飞行过程中存在不可避免的不规律振动和超强气动吸力,封严结构中使用的橡胶会受到拉伸、压缩、剪切等各种复杂受力。为了准确的模拟橡胶的实际力学性能,须要进行单轴拉伸、等双轴拉伸以及平面拉伸试验。

1.1 试验件和试验设备

单轴拉伸试验件为 GB/T528—2009 标准中 2 型哑铃状试样^[10]。等双轴拉伸试样采用十字形,测试区域为试样中心标红区域,在试样中心测试区域 4 个顶角,分别用直径 2 mm 的冲刀冲切圆孔,以减小应力集中对试验结果的影响。平面拉伸试件为矩形试样,中间红色区域为测试区域,测试区域长宽比为 5.44:1。3 种试样如图 1 所示,图中白色点为标记点用于应变测量。



(a) Uniaxial tensile specimen (b) Biaxial tensile specimen (c) Plane tensile specimen

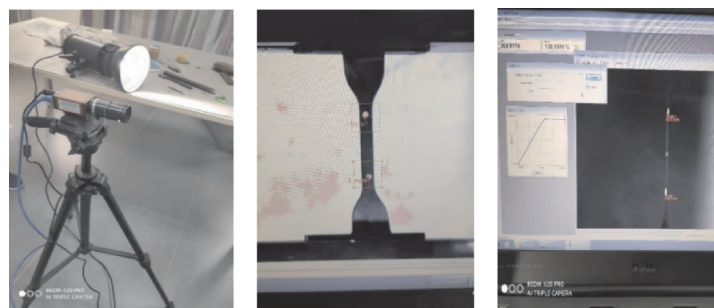
图 1 拉伸试验件

Fig.1 Tensile test specimens

试验所使用的设备包括加载设备和测量设备。单轴拉伸和平面拉伸试验加载设备为单轴电子万能拉伸机,双轴拉伸试验在双轴四缸电液伺服动静试验机上进行。

由于橡胶试样较薄、材质较软、易大变形等,使

用引伸计、贴应变片等应变测量方法不再适用,因此本次试验应变采用非接触式测量的方法。光学 CCD 镜头采集图像,捕捉跟踪试验件标注的测量点,通过图像处理软件实时输出试验件的应变时间曲线。应变测量系统如图 2 所示。



(a) CCD camera (b) Capture trace marker points (c) Output strain curve

图 2 应变测量系统

Fig.2 Strain measuring system

1.2 试验数据处理与结果

对于橡胶拉伸试验的应力-应变关系,一般采用名义应力和名义应变来定义。试验机输出载荷时间曲线,应变测量系统输出应变时间曲线,通过时间的对应关系可以得到载荷应变曲线,除以各自测试区域初始截面积即可得到应力应变曲线。

对于等双轴拉伸和平面拉伸试验的应力定义为

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

式中: F 为试验机拉伸载荷, S_0 为测试区域初始截面积(测试区域边长乘以厚度)。

而对于单轴拉伸试验,采用橡胶大变形不可压缩方法进行数据处理可以大幅提高本构模型精度^[11-12]。

橡胶在单轴拉伸前、后标距段体积不变,可以表示为

$$V_0 = S_0 L_0 \quad (2)$$

$$V_1 = S_1 L_1 = S_1 (L_0 + \Delta L) \quad (3)$$

式中: V_0 和 V_1 分别为拉伸前、后标距段的体积, S_0 和 S_1 分别为变形前后标距段的截面积。

由橡胶不可压缩的特性有 $V_0 = V_1$,式(2)和(3)整理变形后截面积为

$$S_1 = \frac{S_0 L_0}{L_0 + \Delta L} \quad (4)$$

因此,橡胶的单轴拉伸应力可以表示为

$$\sigma = \frac{F}{S_1} = \frac{F(L_0 + \Delta L)}{S_0 L_0} = \frac{F}{S_0} (1 + \epsilon) \quad (5)$$

最终得到的橡胶单轴、等双轴和平面拉伸试验的应力-应变曲线,如图3所示。

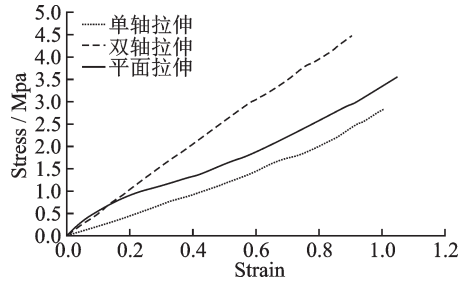


图3 拉伸试验应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of tensile tests

2 橡胶高弹性本构模型

采用ABAQUS中Property模块中的最小二乘法拟合程序对 Mooney-Rivlin、二次多项式、Neo-Hookean、Yeoh以及3次 Ogden 共5种本构模型进行单轴拉伸、等双轴拉伸和平面拉伸试验数据拟合并确定其本构参数。首先输入3种工况的应力、应变试验数据,再选择要拟合的本构模型进行拟合,如图4所示。

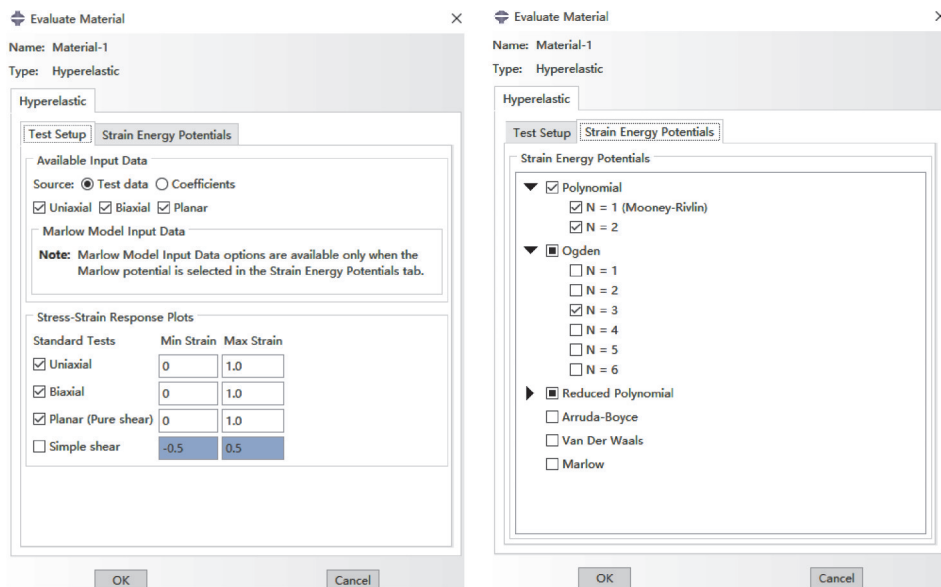


图4 ABAQUS拟合本构模型
Fig.4 Fitting constitutive model in ABAQUS

橡胶的多项式形式本构表达式为

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$

式中: N 为多项式的阶数; C_{ij} 为相关的材料系数; I_1

和 I_2 为与主伸长率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 有关的应变偏量不变量。

取 $N=1$ 时,可得到 Mooney-Rivlin形式本构模型;取 $N=2$ 时,则可得到二次多项式表达式。 $j \neq$

0,所有 $C_{ij}=0$ 时,则得到缩减的多项式模型

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i$$

减缩多项式模型取 $N=1$ 时,可以得到 Neo-Hookean 形式本构模型;取 $N=3$ 时,可以得到 Yeoh 形式本构模型。

若以主伸长率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 作为自变量,则可以得到 Ogden 形式本构模型,其表达式为

$$W = \sum_i \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

式中, μ_i 和 α_i 为相关的材料系数。

通过考核各本构模型的稳定性、可靠性与精度来选用最适合表征封严板所用橡胶材料力学性能的本构模型。图 5 给出了单轴拉伸试验的拟合曲线,从图 5 中试验数据曲线趋势可以看出,二次多项式、Yeoh、三次 Ogden 模型始终与试验曲线比较吻合,Mooney-Rivlin 模型在应变超过 50% 后偏差较大,Neo-Hookean 模型曲线趋势始终与试验曲线有一定偏差。

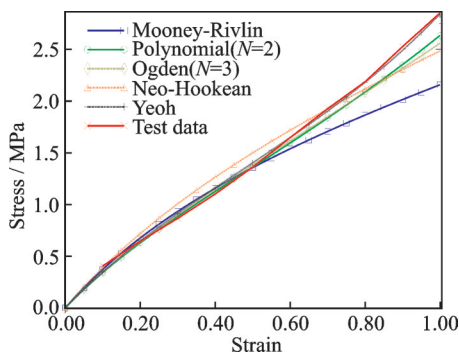


图 5 单轴拉伸试验拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of uniaxial tensile test

双轴拉伸试验拟合曲线如图 6 所示。从图 6 中曲线趋势可以看出 Mooney-Rivlin、二次多项式模型和三次 Ogden 模型的曲线趋势与试验数据趋势最为接近, Yeoh 模型曲线在 20%~80% 应变范围应力偏低,超过 80% 后又明显偏高,而 Neo-Hookean 模型曲线则在应变超过 30% 后明显不正确。

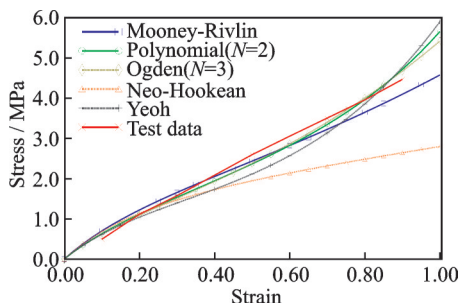


图 6 等双轴拉伸试验拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of biaxial tensile test

平面拉伸试验拟合曲线如图 7 所示,应变小于 70% 时各本构曲线与试验曲线都比较接近,大于 70% 后 Mooney-Rivlin 与 Neo-Hookean 模型不再准确。

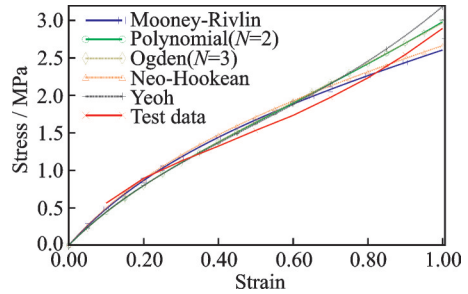


图 7 平面拉伸试验拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of plane tensile test

综上所述,二次多项式模型和三次 Ogden 模型与各载荷工况的试验结果吻合较好,可真实反应出封严板所使用的橡胶材料力学性能,其拟合的材料本构参数分别由表 1 和表 2 给出。

表 1 二次多项式模型的材料参数

Table 1 Coefficients of quadratic polynomials constitutive model

C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}	C_{02}
0.531 4	0.097 3	-0.027 0	0.055 8	0.008 0

表 2 Ogden(N=3)模型的材料参数

Table 2 Coefficients of Ogden (N=3) constitutive model

i	μ_i	α_i
1	0.997 3	2.824 0
2	-0.011 0	3.931 0
3	0.263 7	-2.373 2

3 橡胶夹层结构封严板仿真分析方法

3.1 封严板仿真模型

封严板结构形式如图 8 所示。采用碳布铺层和石英布铺层,每隔 2 层中间夹一层橡胶,一共 17 层,碳布和石英布每层厚度为 0.25 mm,橡胶每层厚度为 0.3 mm。

结构从上往下依次为:碳布全铺层 2 层;石英布全铺层 4 层;石英变厚度铺层 6 层。前端为 2.1 mm,后端为 4.5 mm。封严板弦向长度为 151 mm,其中机翼后缘连接区为 30 mm,之后每隔 20 mm 厚度向前端阶梯递减。碳布铺层角度为 0/90°,石英布从下往上铺层为 0/45/-45/90° 对称铺层。网格划分如图 9 所示,碳布和石英布单元数量为 70 150 个,单元类型为 C3D8R,橡胶单元数量为 28 900 个,单元类型为 C3D8RH。

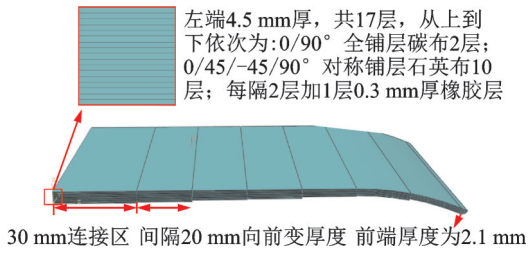


图8 封严板结构形式

Fig.8 Structure of sealing plate

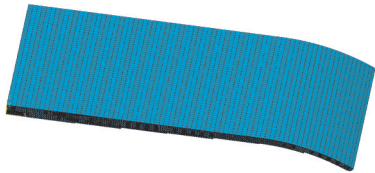


图9 封严板网格划分

Fig.9 Finite element mesh of sealing plate

襟翼在封严结构的仿真分析中主要作为支撑结构,封严板实际安装时与其搭接贴紧,因而等效简化为解析刚体。同时,为保证数值仿真过程中载荷的准确传递,通过定义面-面接触关系模拟两者间的相互作用。图10展示封严板与襟翼的装配方式以及襟翼上翼面与封严板下表面的接触关系,图10中RP为解析刚体的参考点。封严板气动载荷分布沿弦长方向从后缘操纵面由0.01 MPa线性递减至0.006 4 MPa,沿机翼展向每个剖面的弦向气动载荷的分布不变。为考核封严板大变形的能力,最大施加2.5倍的气动载荷。封严板安装至襟翼通过连接区施加向下的位移载荷实现,气动载荷施加在ABAQUS软件中通过定义局部坐标系使用

解析函数实现,如图11所示。

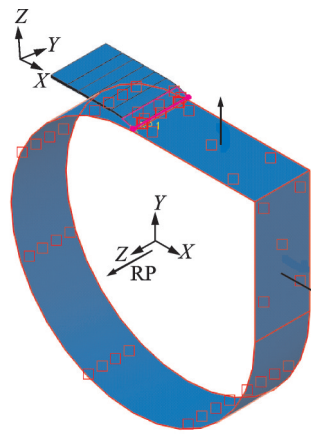


图10 装配及接触关系示意图

Fig.10 Assembly and contact diagram

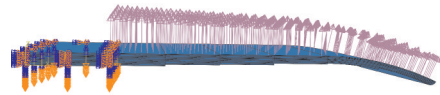


图11 封严板载荷工况与约束方式

Fig.11 Load condition and restraint mode of sealing plate

3.2 仿真分析结果

图12给出了封严板的变形过程。由图12可以看出,随着封严板向下安装,襟翼翼面与封严板搭接区接触,在接触载荷的作用下,封严板产生一定的变形。然后从零开始施加气动载荷,在施加到规定的气动载荷时,由于装配产生的内应力的作用,封严板前端并未与襟翼翼面产生分离,满足封严性要求。随着气动载荷的继续增加,当加载到约1.25倍气动载荷时封严板前端向上抬起翼面分离。

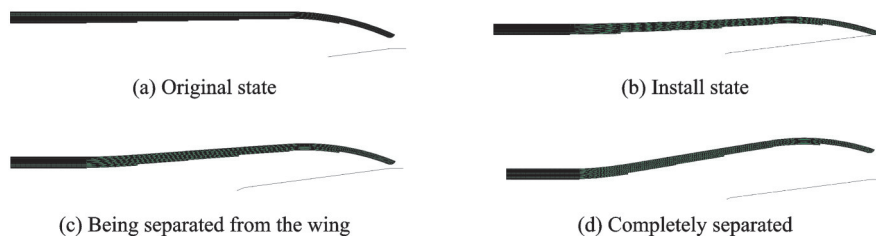


图12 封严板变形过程

Fig.12 Deformation process of seal plate

图13分别给出了使用两种橡胶本构模型,在最大气动载荷作用下封严板离面位移云图。使用二次多项式橡胶本构的封严板最大位移为7.07 mm,即由安装位置抬起11.24 mm,使用三次Ogden本构最大位移为6.94 mm,即由安装位置抬起11.11 mm,两者基本一致。图14给出了使用二次多项式橡胶本

构模型封严板的Mises应力(S)云图。由图中结果可知,封严板碳布与石英布刚度较大,因此应力明显较大,而橡胶夹层,其刚度小,应力值较纤维层小很多。从应力分布情况看,由搭接区到支持区,封严板应力逐渐增大,在夹持端达到最大值,表明封严板在受气动载荷过程中产生的是弯曲变形。

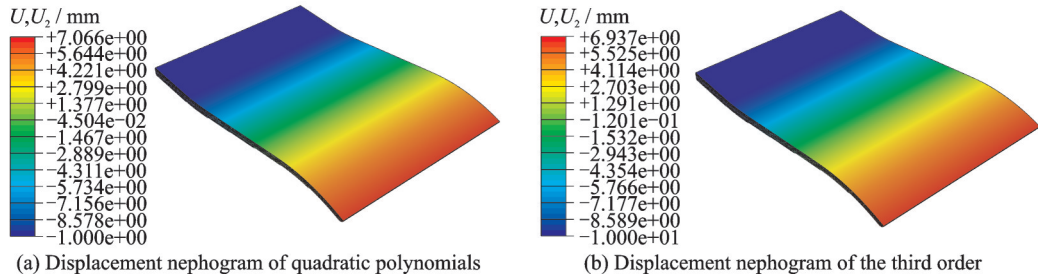


图 13 封严板位移云图

Fig.13 Displacement nephogram of sealing plate

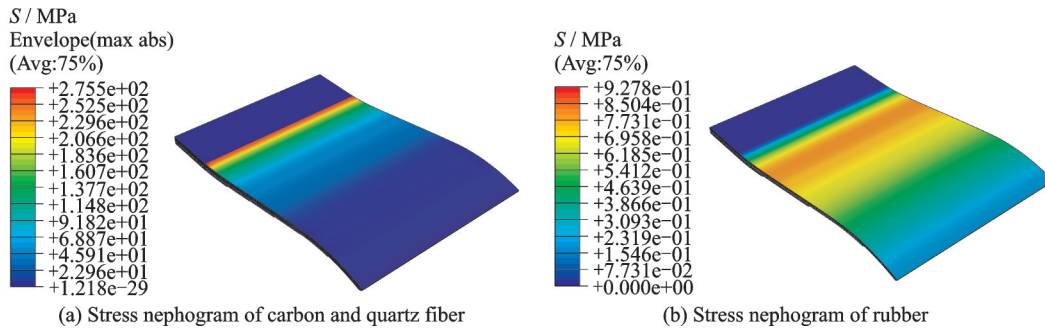


图 14 封严板的 Mises 应力云图

Fig.14 Mises stress nephogram of sealing plate

4 试验验证

为验证采用高弹性橡胶本构的夹层结构封严板有限元分析的准确性,进行了封严板装配及气动载荷作用模拟实验。在封严板上采用粘贴帆布袋来模拟气动载荷试验,根据静力等效得到帆布袋的加载位置距离封严板前端 64.4 mm,气动载荷的等效集中力大小为 98.4 N。使用压块保证封严板的实际安装状态,并通过螺旋加载方式施加载荷。使用 1 000 N 量程的载荷传感器监控实时载荷,同时在封严板的前端安装位移计测量位移,试验如图 15 所示。

表 3 给出了各级载荷作用下封严板前端位移

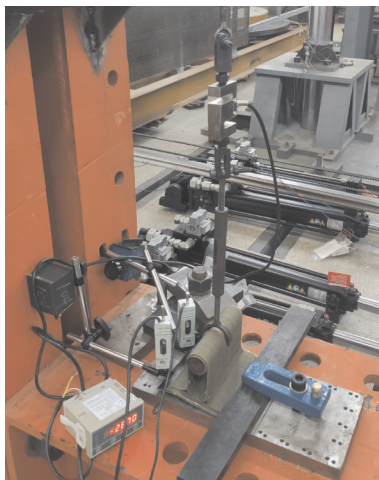


图 15 模拟气动载荷试验

Fig.15 Simulation aerodynamic load test

情况,同时也给出了采用不同橡胶本构模型的仿真结果。由表 3 中可以看出,在加载到 100 N 时封严板前端未产生位移,满足封严性能要求。加载至 116 N 时封严板前端开始抬起,低于仿真分析结果。随着载荷的提高,封严板端部位移持续增加,并且当完全卸载后封严板前端与安装平台恢复贴合状态。

表 3 有限元模拟和实际试验所测得等效载荷对比(位移单位:mm)

Table 3 Comparison of equivalent load measured in the test and finite element simulation (displacement unit: mm)

等效载荷/N	Polynomial(N=2)	Ogden(N=3)	Test
100	0	0	0
116	0	0	0.08
150	2.56	2.43	4.05
200	7.22	7.12	8.94
246	11.24	11.11	13.05

图 16 给出了封严板端部仿真分析与试验的载荷位移曲线。由图中可以看出试验中封严板端部较早出现位移,端部抬起后随载荷的增加均基本呈线性增长,但试验结果略高于仿真结果。端部开始抬起后,仿真曲线和试验曲线的斜率基于相同,表明所建立的有限元模型能够较好的反应出封严板结构真实的受力响应。

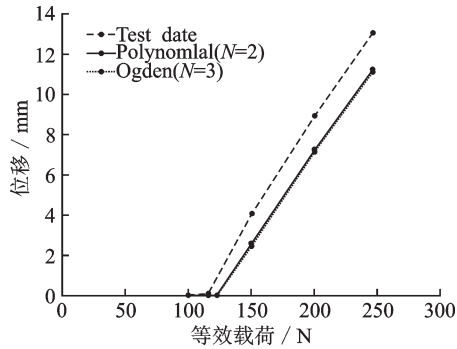


图16 位移载荷曲线

Fig.16 Displacement-loading curves

5 结 论

本文采用的基于图像处理技术的非接触应变测量系统对橡胶拉伸试验进行应变测量,得到了准确的橡胶单轴拉伸、等双轴拉伸和平面拉伸试验应力应变曲线。基于上述试验曲线评估了橡胶不同本构模型的拟合精度,确定了封严板橡胶二次多项式和三次Ogden形式的高弹本构模型。建立了橡胶夹层封严板结构有限元分析模型,并与试验结果进行对比分析。分析结果验证了选用的橡胶本构模型以封严板仿真分析方法的正确性,为后续继续开展封严板其他工况的仿真分析奠定了基础。

参考文献:

- [1] 陈礼顺,王彦岭,卢建红,等.航空发动机封严技术的研究和应用进展[J].航空制造技术,2008,51(8): 82-84, 95.
CHEN Lishun, WANG Yanling, LU Jianhong, et al. Development of study and application of aeroengine sealing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(8): 82-84, 95.
- [2] 李晓芳,杨晓翔.橡胶材料的超弹性本构模型[J].弹性体,2005,15(1): 50-58.
LI Xiaofang, YANG Xiaoxiang. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. China Elastomerics, 2005, 15(1): 50-58.
- [3] BOYCE M C, ARRUDA E M. Constitutive models of rubber elasticity: A review[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(3): 504-520.
- [4] YEOH O H. Some forms of the strain energy for rub-

ber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.

- [5] OGDEN R W. Nearly isotropic elastic deformations: Application to rubberlike solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1978, 26(1): 37-57.
- [6] RIVLIN R S. The elasticity of rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1992, 65(3): 51-67.
- [7] 魏永涛,于建华.橡胶有限元分析之研究[J].工程科学与技术,1997,1(5): 78-83.
WEI Yongtao, YU Jianhua. Finite element analysis of rubber[J]. Advanced Engineering Sciences, 1997, 1(5): 78-83.
- [8] 危银涛,杨挺青,杜星文.橡胶类材料大变形本构关系及其有限元方法[J].固体力学学报,1999,20(4): 282-289.
WEI Yintao, YANG Tingqing, DU Xingwen. On the large deformation rubber like materials: Constitutive laws and finite element method[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1999, 20(4): 282-289.
- [9] 龚科家,危银涛,叶进雄.填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J].工程力学,2009,26(6): 193-198.
GONG Kejia, WEI Yintao, YE Jinxiong. Constitutive parametric experiment of tire rubber hyperelastic laws with application[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 193-198.
- [10] 国家标准化管理委员会.硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定:GB/T528—2009[S].北京:国家标准化管理委员会,2007.
China Standardization Administration. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties: GB/T528—2009[S]. Beijing: China Standardization Administration, 2007.
- [11] 伍开松,徐大萍,严永发,等.橡胶大变形不可压缩方法试验数据处理[J].橡胶工业,2013,60(7): 400-403.
WU Kaisong, XU Daping, YAN Yongfa, et al. Data processing method of rubber testing based on incompressible large deformation analysis[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(7): 400-403.
- [12] 陈小敏.橡胶单轴拉伸试验数据处理方法研究[J].世界橡胶工业,2017,44(10): 34-38.
CHEN Xiaomin. Research on data processing method of rubber uniaxial tensile test[J]. World Rubber Industry, 2017, 44(10): 34-38.

(编辑:张蓓)