

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711069

筋腱连接器球形橡胶轴承刚度仿真与试验

李松羽, 王立权, 弓海霞, 运飞宏, 贾鹏

(哈尔滨工程大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为深入研究橡胶材料及结构参数对球形橡胶轴承刚度性能的影响, 采用有限元方法对 5 种不同材料或结构的球形橡胶轴承进行分析研究, 完成了球形橡胶轴承的压缩与摆动试验. 对相应橡胶材料进行了材料试验, 使用 Abaqus/Standard 建立橡胶轴承的二维轴对称模型和 1/2 三维模型, 用 Neo-Hooke、Mooney-Rivlin 和 Yeoh 超弹性本构模型进行仿真. 进行橡胶轴承的压缩与摆动试验, 对有限元仿真进行对比验证. 试验结果表明: 丁腈橡胶、氯化丁腈橡胶与天然橡胶制造的球形轴承, 压缩刚度均会随着压缩位移上升而上升, 摆动刚度均会随着摆动角度上升而下降; 球形橡胶轴承金属层数量的上升会提高其竖直刚度, 但对摆动刚度几乎没有影响; Yeoh 本构模型在两种变形情况下均可以很好地拟合试验结果; 在变形较小时, 用 Mooney-Rivlin 本构模型进行仿真也可以得到较为准确的仿真结果; 在压缩仿真中, 形变较大时, Mooney-Rivlin 本构模型无法表现出刚度迅速上升的阶段, 因此仿真结果会小于试验结果; 使用 Neo-Hooke 本构模型的仿真结果误差最大, 在摆动仿真中完全无法使用.

关键词: 筋腱连接器; 球形橡胶轴承; 层叠橡胶; 橡胶试验; 压缩刚度; 摆动刚度

中图分类号: TE937 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)11-0185-07

Simulation and experiment of the stiffness of tendon connector flexjoint

LI Songyu, WANG Liqun, GONG Haixia, YUN Feihong, JIA Peng

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Five flexjoints of tendon connector with different rubber material or structure were simulated by FEM to study the effect of parameters on the stiffness of flexjoint. The flexjoints were also tested under compression and rotation load. The material tests are taken on the specified rubber, and a half 3D model and a 2D model are built by Abaqus/Standard software. Neo-Hooke, Mooney-Rivlin and Yeoh constitutive model are used in the simulation. The experiments and simulation results are compared to analyze the validity and accuracy of different constitutive models, and the results show that the compression stiffness of flexjoints will increase as displacement increases, and the rotational stiffness will decrease as the angle increases. The increase in the number of the rubber layers will improve the compression stiffness but has little effect on the rotation stiffness. The results of simulation with Yeoh model can fit the experimental results very well. The Mooney-Rivlin model can also provide a relative accurate results under small deformation. The compression simulation results of Mooney-Rivlin model will be smaller than test results because that model cannot reflect the “upturn” of rubber material. The Neo-Hooke model provides the biggest error.

Keywords: tendon connector; flexjoint; laminated rubber; rubber experiment; compression stiffness; rotation stiffness

张力腿平台是一种深海海洋结构物, 筋腱与张力腿平台和海底桩基的连接由张力腿平台筋腱连接器完成^[1]. 张力腿平台在工作过程中会随着海流和海浪产生垂荡、纵荡和横荡等运动, 造成筋腱连接器产生巨大的转矩; 同时为了保证平台稳定, 在张力腿平台安装完成后筋腱内部还要保留一分预紧力, 该预紧力会对连接器造成一定的压力, 因此在连接器

中设计有球形橡胶轴承. 球形橡胶轴承是一种橡胶与金属层叠的结构, 橡胶相对较低的剪切模量为连接器提供一定的摆动柔性, 金属层叠结构使其可以承受巨大压力. 因此有必要对橡胶轴承的刚度进行分析研究.

球形橡胶轴承在很多工程领域中都有应用^[2-4]. 然而对于筋腱连接器用球形橡胶轴承, 仍缺乏相关试验研究. 由于橡胶材料的高度非线性特性, 因此使用超弹性本构模型结合有限元方法研究橡胶材料的力学特性^[5]. 为了获得材料参数, 需要对橡胶开展一系列材料试验^[6-8]. 已经有很多研究者^[9-11]用非线性有限元法对球形弹性轴承进行研究. 然而,

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(CCL2015SKGF0012);
国家自然科学基金(51305088)

作者简介: 李松羽(1989—), 男, 博士研究生;
王立权(1957—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王立权, wangliqian@hrbeu.edu.cn

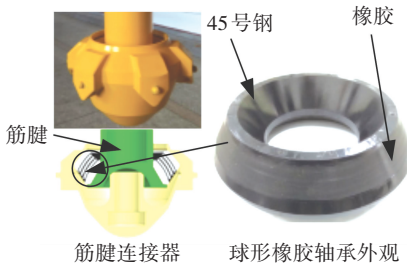
对于筋腱连接器用橡胶轴承的研究,只有 Hannus 等^[12]使用有限元法在线弹性范围内对橡胶轴承做了数值仿真。

本文研究一种球形橡胶轴承专用刚度试验系统,对 5 种不同材料或结构的筋腱连接器用球形橡胶轴承进行了压缩与摆动试验. 对相应的橡胶材料开展试验,用有限元法进行仿真. 对有限元仿真及试验结果进行了对比验证,分析了 3 种本构模型的有效性及准确性,研究了橡胶材料、金属层数对橡胶轴承压缩刚度和摆动刚度的影响。

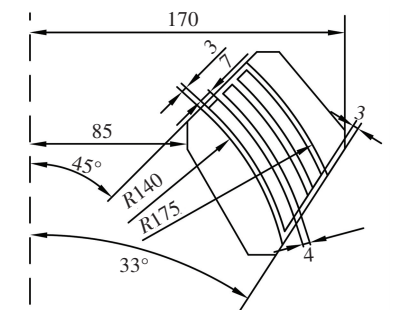
1 球形橡胶轴承试验方案

1.1 球形橡胶轴承试件三

选择 5 种球形橡胶轴承进行对比试验,橡胶材料由铁岭市银港橡胶厂提供,金属层使用 45 号钢. 该柔性体试件及与其配合的筋腱连接器内部结构如图 1 所示,可以看到柔性体底部与筋腱相连,承受筋腱上的拉伸载荷与转矩。



(a) 筋腱连接器与球形橡胶轴承



(b) 三层金属橡胶试件结构示意图(单位 mm)

图 1 筋腱连接器及柔性体试件

Fig.1 Geometry dimension and details of specimens

表 1 为 5 种球形橡胶轴承的具体尺寸参数,为了做对比试验,分别对橡胶材料和钢板层数进行控制:编号 D3、D4、D5 这 3 种球形橡胶轴承均使用相同的丁腈橡胶材料(NBR),橡胶与钢板层数不同,而橡胶与钢板的总厚度相同;编号 D3、Q3、T3 这 3 种球形橡胶轴承的橡胶分别使用了丁腈橡胶(NBR)、氢化丁腈橡胶(HNBR)与天然橡胶,橡胶与钢板的总厚度相同,层数也相同。

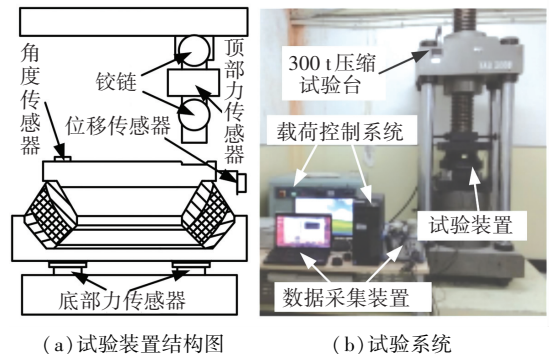
表 1 试件参数

Tab.1 Test parameters

试件编号	橡胶材料	钢板层数	各层橡胶厚度/ mm	钢板厚度/ mm
D3	NBR	3	3, 4, 4, 3	7
D4	NBR	4	2.5, 3, 3, 3, 2.5	5.2
D5	NBR	5	2, 2, 3, 3, 2, 2	4.2
Q3	HNBR	3	3, 4, 4, 3	7
T3	天然	3	3, 4, 4, 3	7

1.2 试验系统

为了测量数据及施加摆动载荷,设计了刚度试验装置,如图 2(a)所示. 该试验装置底部有 4 个最大量程为 50 t 的压力传感器,顶部有两个铰链可以将压力转化为转矩,铰链间安装了量程为 15 t 的压力传感器,此外试验装置上还设置有角度传感器和位移传感器. 如图 2(b)所示,传感器通过采集器与笔记本电脑连接,使用 Labview 软件编写了数据采集程序与界面. 该试验由长春科新 TAD3000 300T 压力试验机提供外部载荷。



(a) 试验装置结构图

(b) 试验系统

图 2 试验系统

Fig.2 Experimental system

1.3 加载方案

采用静力试验方法,对球形橡胶轴承开展压缩与摆动试验. 压缩试验机通过液压系统输出载荷,通过手动控制液压系统的送油阀和回油阀控制压力. 关闭回油阀,打开送油阀,压力机施加压缩载荷;同时关闭回油阀和送油阀,压力机保持压力不变,打开回油阀,关闭送油阀,压力机卸载。

在压缩试验中,使用压缩试验机直接对试件施加压缩载荷,使用位移控制压缩载荷,人工控制压缩速度,压缩速度约为 1 mm/min. 通过数据采集程序观察压缩位移,所有试件最大压缩位移均为 3 mm. 在试验过程中对试件反复压缩 6 次,其中前 5 次用于弱化橡胶材料的 Mullins 效应对试验结果的影响,取最后一次数据与仿真结果做对比。

在摆动试验中,压缩试验机通过两个铰链将压缩载荷转化为摆动载荷. 同样使用位移控制载荷,压缩速度约为 3 mm/min,所有试件的最大摆动角度均为 8°. 其他试验过程与压缩试验相同。

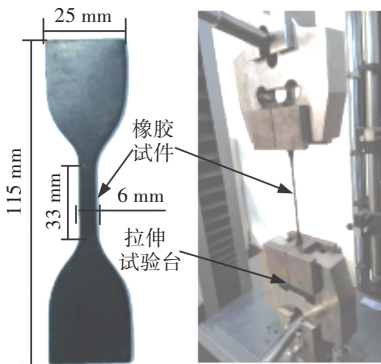
2 橡胶材料力学试验

为了使球形橡胶轴承仿真结果更为准确, 需要获得精确的橡胶材料数据. 进行橡胶的单轴拉伸试验可以得到橡胶材料参数, 但是仅有单轴拉伸试验数据无法描述复杂应力状态下的橡胶变形, 因此还需要对橡胶材料开展简单剪切试验和体积压缩试验.

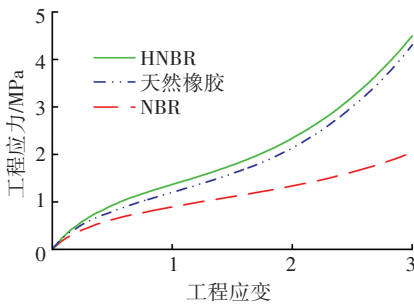
橡胶试件材料包括天然橡胶、丁腈橡胶和氯化丁腈橡胶. 为了防止橡胶性能产生差异, 橡胶材料力学试验所用试件与球形橡胶轴承试件采用相同批次的橡胶材料, 橡胶试件的制备满足 ISO 23529: 2010 国际标准. 为了防止个体差异, 每种试验制作了 5 件试件, 数据处理过程中去掉差异最大的数据, 对其余数据取平均值. 该试验在哈尔滨工程大学力学实验室进行.

2.1 单轴拉伸试验

橡胶单轴拉伸试验方案参照 GBT 528—2009^[13], 试验试件采用 1A 型片状哑铃状试件, 试件厚度 2 mm, 见图 3(a). 试验在 Zwick Z010 电子万能试验机上进行, 该试验机可以自动记录拉力与位移数据. 试验在室温下进行, 为了获得稳定的橡胶材料数据, 对试件反复拉伸 10 次, 夹具的拉伸速度为 100 mm/min, 拉伸变形范围为 0~100 mm, 取最后一次试验数据用于计算材料参数.



(a) 试验试件与装置



(b) 试验数据

图 3 单轴拉伸试验

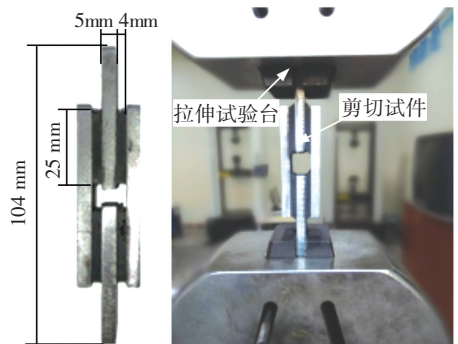
Fig.3 Uniaxial tension test

单轴拉伸试验的名义拉伸应力 σ (MPa) 与名义拉伸应变 ε 可以通过试验机记录的拉力 F_l (N) 与位移 l_l (mm) 计算得到, 对于本次试验所用试件, 应力应变可以由方程(1)得到. 图 3(b) 所示为 3 种试件单轴拉伸试验的应力应变曲线.

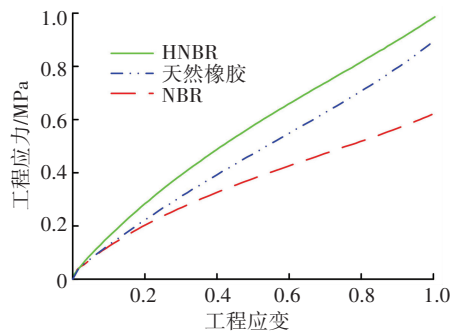
$$\sigma = F_l/12, \quad \varepsilon = l_l/33. \quad (1)$$

2.2 简单剪切试验

橡胶简单剪切试验方案参照 ISO 1827:2011^[14], 试验试件采用 4 面剪力试件, 该试件内有 4 片橡胶通过粘合剂固定在钢板上, 橡胶片宽度为 20 mm, 如图 4(a) 所示. 试验在拉压试验机上进行, 该试验机可以自动记录拉力与位移数据. 试验在室温下进行, 为了获得稳定的橡胶材料数据, 对试件反复拉伸 10 次, 夹具拉伸速度为 10 mm/min, 拉伸变形范围为 0~8 mm, 取最后一次试验数据用于计算材料参数.



(a) 试验试件与装置



(b) 试验数据

图 4 简单剪切试验

Fig.4 Simple shear test

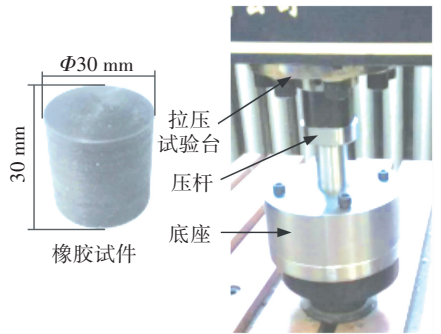
简单剪切试验的名义剪切应力 τ (MPa) 与名义剪切应变 γ 可以通过试验机记录的拉力 F_s (N) 与位移 l_s (mm) 计算得到, 对于本次试验所用试件, 应力应变可以由式(2)得到. 图 4(b) 所示为 3 种试件简单剪切试验的应力应变曲线.

$$\tau = F_s/1000, \quad \gamma = l_s/8. \quad (2)$$

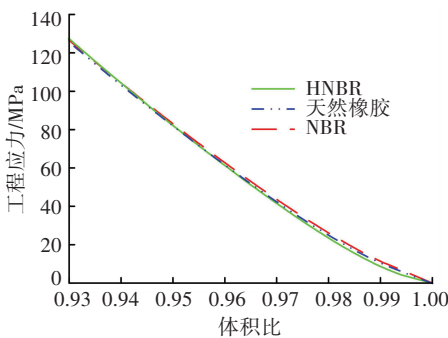
2.3 体积压缩试验

体积压缩试验方案参照 BS 903-5—2004^[15], 该试验有特殊的工装, 工装包括压杆与底座, 其中底座分为上下两部分, 通过螺栓连接, 如图 5(a) 所示.

该试验采用圆柱型试件,试件外径与底座内径大小相同. 试验过程中,将试件塞入底座中,试件表面涂抹低黏度硅油减小摩擦力对实验结果的影响. 底座放在压缩试验台上,压杆与压力机连接,对试件缓慢施加压缩载荷. 试验在拉压试验机进行,该试验机可以自动记录拉力与位移数据. 试验在室温下进行,为获得稳定的橡胶材料数据,对试件反复压缩 10 次,压杆的压缩速度为 1 mm/min,压缩变形范围 0~1.5 mm,取最后一次试验数据用于计算材料参数. 图 5(b) 为 3 种试件体积压缩试验的应力应变曲线.



(a) 试验试件与装置



(b) 试验数据

图 5 体积压缩试验

Fig.5 Volumetric compression test

体积压缩试验的静水压力 p_0 (MPa) 与体积比 R_v 可以通过试验机记录的的压力 F_c (N) 与位移 l_c (mm) 计算得到,对于本次试验所用试件,体积比与静水压力可以由方程(3) 得到:

$$p = F_c / (225\pi),$$

$$R_v = (30 - l_c) / 30. \quad (3)$$

3 球形橡胶轴承仿真

使用 Abaqus/Standard 对橡胶轴承进行非线性静力学仿真,当橡胶轴承承受竖直压缩载荷时,其应力状态是空间轴对称的,为了减少计算成本,因此使用二维轴对称模型进行压缩仿真;当橡胶轴承承受摆动载荷时,使用 1/2 三维模型进行摆动仿真.

使用线弹性本构模型描述 45 号钢的力学特性,其杨氏模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$. 与金属材料不同,橡胶材料具有明显的非线性特性,单纯的弹性模量不足以描述橡胶材料的特性,因此使用超弹性本构模型来描述橡胶材料的应力应变特性. Abaqus 提供了多种超弹性本构模型,其中包括: Mooney-Rivlin 模型、Neo-Hookean 模型、完全多项式模式、缩减多项式模型、Yeoh 模型和 Ogden 模型等^[16],为了获得精确的仿真结果,本论文选用了 Mooney-Rivlin 模型、Neo-Hookean 模型和 Yeoh 模型进行对比.

由于 Abaqus 自带的曲线拟合工具无法拟合简单剪切试验结果,因此使用 ANSYS APDL 曲线拟合工具确定本构模型参数,结合图 3~5 所给出的材料试验数据,得到最终的本构模型参数如表 2 所示.

表 2 本构模型参数

Tab.2 Constitutive model parameters

材料	Neo Hooke 模型		Mooney Rivlin 模型			Yeoh 模型					
	C_{10} / MPa	D_1 / MPa ⁻¹	C_{10} / MPa	C_{01} / MPa	D_1 / MPa ⁻¹	C_{10} / MPa	C_{20} / MPa	C_{30} / MPa	D_1 / MPa ⁻¹	D_2 / MPa ⁻¹	D_3 / MPa ⁻¹
NBR	0.505	0.001 40	0.193	0.139 0	0.001 39	0.307	-0.010 9	0.000 476	0.001 68	1.29e-5	-1.45e-7
HNBR	0.882	0.001 56	0.387	0.117 0	0.001 56	0.496	-0.019 6	0.001 200	0.002 18	7.37e-6	-7.14e-8
天然橡胶	0.796	0.001 45	0.359	0.084 2	0.001 45	0.440	-0.017 4	0.001 150	0.001 84	1.04e-5	-1.09e-7

图 6 为 3 层金属橡胶试件两种模型的网格划分图. 二维模型中两种材料均采用轴对称单元,金属材料部分采用 CAX4R 单元,橡胶材料部分采用 CAX4RH 单元. 在三维模型中两种材料均采用实体单元,金属材料部分采用 C3D8R 单元,橡胶材料部分采用 C3D8RH 单元. 对于近似不可压缩材料,在仿真过程中可能发生沙漏和体积锁定的问题. 虽然使用二阶单元可以解决这些问题,但是在橡胶发生大变形时,这些单元会严重畸变. 使得计算难以收

敛,并且结果也不准确.

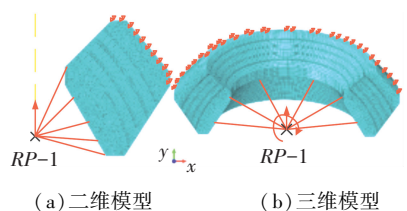


图 6 3 层金属橡胶试件的有限元模型

Fig.6 FE model of sample with 3 rubber layers
在所有模型的仿真中均设置一个载荷步,增量

步固定为 0.05, 打开大变形开关. 如图 6 所示, 橡胶轴承顶板固定, 在球心处设置参考点 $RP - 1$, 在相互作用模块中使该参考点与橡胶轴承底板耦合. 在 2D 分析中, 该参考点上施加 3 mm 的 y 方向上的位移. 在 3D 分析中在该参考点上施加绕 z 方向摆动的 0.14 rad 的角度, 并在对称面上施加对称约束.

4 试验与仿真结果对比与分析

4.1 压缩刚度试验

在压缩刚度试验中压力机直接压缩试件, 此时球形橡胶轴承所承受的压力 F_c 由 4 个底部力传感器测量得到, 压缩位移 d_c 由位移传感器测量得到, 因此球形橡胶轴承压缩刚度 K_c 可以表示为

$$K_c = \frac{F_c}{d_c}$$

图 7 为具有不同金属层数的球形橡胶轴承压缩试验与仿真曲线, 其中虚线为试验结果, 其他曲线为仿真结果. 在最大位移处, 使用不同模型的仿真结果 (R_s) 相对于试验结果 (R_t) 的误差如表 3 所示, 该误差通过公式 $(R_t - R_s) / R_t$ 计算得到. 由试验数据发现, 丁腈橡胶的球形橡胶轴承压缩刚度会随着位移增加而上升; 随着金属层数的增加, 每一层橡胶的厚度变薄, 使橡胶层的形状系数增加, 因此轴承压缩刚度也会上升, 并且具有更多金属层数的橡胶轴承刚度上升梯度更大.

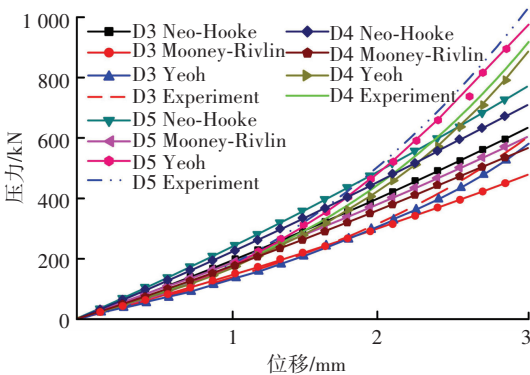


图 7 不同层数橡胶轴承压缩试验与仿真结果

Fig.7 Compression test and simulation results of flexjoints with different layer quantity

表 3 不同层数橡胶轴承压缩仿真误差

Tab.3 Error of compression simulation results of flexjoints with different layer quantity %

层数	仿真误差		
	Neo Hooke	Mooney Rivlin	Yeoh
3	-3	20	3
4	23	37	3
5	24	42	5

图 8 为具有不同橡胶材料的球形橡胶轴承压缩试验与仿真曲线. 在最大位移处, 使用不同模型的仿真结果误差如表 4 所示. 由试验数据可以发现, 随着位移增加, 另外两种材料的球形橡胶轴承压缩刚度也会上升. 与橡胶材料试验结果类似, 使用氢化丁腈橡胶与天然橡胶的橡胶轴承压缩刚度比较接近; 根据材料试验结果可知, 由于氢化丁腈橡胶的杨氏模量最大, 丁腈橡胶的杨氏模量最小, 因此天然橡胶轴承的压缩刚度略小于氢化丁腈橡胶轴承, 而略大于丁腈橡胶轴承.

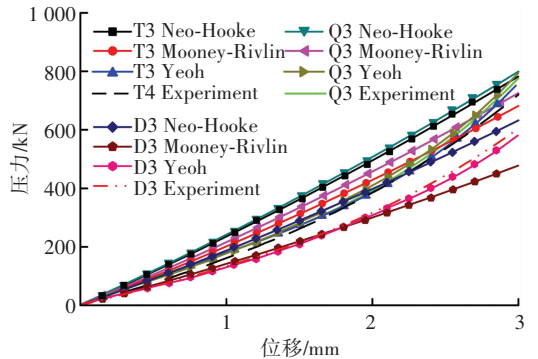


图 8 不同材料橡胶轴承压缩试验与仿真结果

Fig.8 Compression test and simulation results of flexjoints with different rubber material

表 4 不同材料橡胶轴承压缩仿真误差

Tab.4 Error of compression simulation results of flexjoints with different rubber material %

材料	仿真误差		
	Neo Hooke	Mooney Rivlin	Yeoh
天然橡胶	-8	6	-6
NBR	-3	20	3
HNBR	-3	8	-1

对比压缩试验与仿真结果发现, 使用 Yeoh 本构模型的仿真结果可以很好地拟合试验结果. 当位移较小 (本试验 ≤ 1.5 mm) 时, 使用 Mooney-Rivlin 本构模型也可以得到比较接近的结果, 该结果略大于试验结果; 使用 Neo-Hooke 本构模型的仿真结果略大于其他两种本构模型的结果. 当位移更大时, Mooney-Rivlin 本构模型无法表现出刚度迅速上升的阶段, 因此仿真结果会小于试验结果.

4.2 摆动刚度试验

在摆动刚度试验中, 可以通过顶部力传感器测得压力 F_r , 并使用图 2 所示的角度传感器测量橡胶轴承的转动角度 α . 图 9 为摆动试验的受力分析图, 当球形橡胶轴承转动时, 铰链两侧的二力杆与竖直方向的虚线可以组成左上角所示的三角形. 该三角形中距离 S 与转动角度 α 已知, β 角是 α 的函数, 因此通过解该三角形可以得到垂直于橡胶轴承顶端的

力 F_c 与 F_r 和 α 的关系,转动圆形 O 与 F_c 作用方向的距离为 l ,将 F_c 与 l 相乘即可得到转矩 T_r . 因此球形橡胶轴承摆动刚度 K_r 可以表示为

$$K_r = \frac{114.5 \sin(0.87\pi - \alpha) F_r}{\alpha \cos \alpha / 2}$$

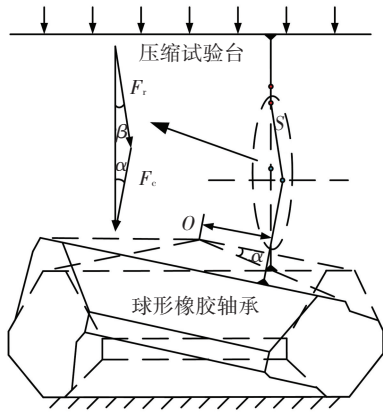


图 9 摆动试验受力分析

Fig.9 Force analysis of rotation test

图 10 为具有不同金属层数的球形橡胶轴承摆动试验与仿真曲线. 在最大转角处,使用不同模型的仿真结果误差如表 5 所示.

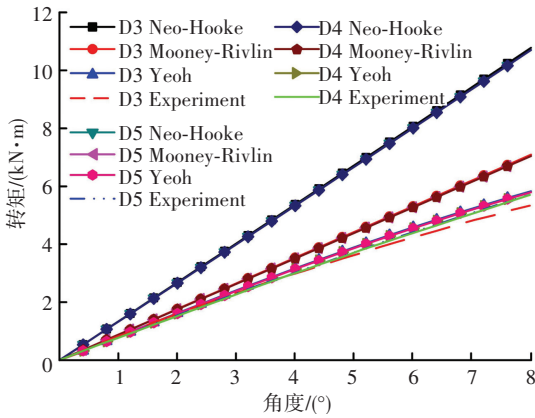


图 10 不同层数橡胶轴承摆动试验与仿真结果

Fig.10 Rotation test and simulation results of flexjoints with different layer quantity

表 5 不同材料橡胶轴承压缩仿真误差

Tab.5 Error of compression simulation results of flexjoints with different rubber material %

层数	仿真误差		
	Neo Hooke	Mooney Rivlin	Yeoh
3	-93	-29	-4
4	-101	-36	-9
5	-93	-29	-4

由试验数据发现,丁腈橡胶的球形橡胶轴承摆动刚度会随着转角增加而下降;金属层数对轴承摆动刚度几乎没有影响.

图 11 所示为具有不同橡胶材料的球形橡胶轴

承压缩试验与仿真曲线. 在最大转角处,使用不同模型的仿真结果误差如表 6 所示. 由试验数据可以发现,随着角度增加,另外两种材料的球形橡胶轴承摆动刚度也会下降. 与橡胶材料试验结果类似,使用氢化丁腈橡胶与天然橡胶的橡胶轴承压缩刚度比较接近,由于与压缩刚度关系相同的原因,氢化丁腈橡胶的轴承转动刚度略大于天然橡胶轴承,丁腈橡胶的轴承转动刚度最小.

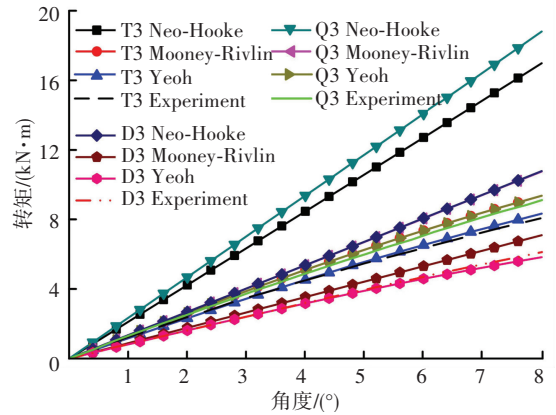


图 11 不同材料橡胶轴承摆动试验与仿真结果

Fig.11 Rotation test and simulation results of flexjoints with different rubber material

表 6 不同材料橡胶轴承压缩仿真误差

Tab.6 Error of compression simulation results of flexjoints with different rubber material %

材料	误差		
	Neo Hooke	Mooney Rivlin	Yeoh
天然	-113	-15	-1
NBR	-93	-29	-4
HNBR	-109	-20	-2

通过对比摆动试验与仿真结果发现,使用 Yeoh 本构模型的仿真结果可以很好地拟合试验结果. 当摆动角度较小(本试验 $\leq 2^\circ$)时,使用 Mooney-Rivlin 本构模型与试验结果拟合效果也很好. 而使用 Neo-Hooke 本构模型的仿真结果远大于试验结果,误差极大.

5 结论

本文设计了刚度试验台,对 5 种不同材料或结构形式的球形橡胶轴承进行了压缩与摆动试验,并对橡胶轴承所用橡胶进行了材料性能试验,将试验结果输入有限元软件进行了仿真. 通过对试验数据与仿真结果进行对比分析,得到如下结论:

1) 丁腈橡胶、氢化丁腈橡胶与天然橡胶制造的球形轴承,压缩刚度均会随着压缩位移上升而上升,摆动刚度均会随着摆动角度上升而下降;

2) 球形橡胶轴承中金属层数的增加会提高其

压缩刚度, 而对摆动刚度几乎没有影响, 因此当需要较高压缩刚度及较低摆动刚度时, 只需要增加金属层数即可;

3) 使用 Yeoh 本构模型对球形橡胶轴承进行压缩与摆动载荷下的仿真, 可以得到很好的仿真结果; 使用 Mooney-Rivlin 本构模型进行仿真, 在变形较小条件小也可以得到较为准确的仿真结果; 使用 Neo-Hooke 本构模型进行仿真, 仿真结果误差最大, 其中摆动载荷下的结果完全不可接受.

参考文献

- [1] CHAKRABARTI S. Handbook of Offshore Engineering [M]. Oxford: Elsevier, 2005
- [2] CHEN Gaosheng, YANG Yan. Stiffness design, simulation and test of laminated spherical elastomeric bearing[J]. Hangkong Dongli Xuebao/journal of Aerospace Power, 2015, 30(6): 1512. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2015.06.029
- [3] RAM M V. Design, modelling and experimental validation on a typical flex bearing joint of rocket motor nozzle[D]. Hyderabad: Jawaharlal Nehru Technological University, 2012
- [4] ZHANG Xiaoguang, LIU Yu, REN Junxue, et al. Nonlinear finite element analysis of the SRM flexible joint [C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 301. DOI: 10.2514/6.2012-1453
- [5] GENT A N, CAMPION R P. Engineering with rubber: how to design rubber components[M]. Munich: Hanser Gardner Publications, Carl Hanser Publishers, 2001
- [6] KOPROWSKI N, JOHLITZ M, DIEBELS S. Compressible rubber materials: experiments and simulations[J]. Archive of Applied Mechanics, 2012, 82(8): 1117. DOI: 10.1007/s00419-012-0616-6
- [7] CROCKER L, DUNCAN B. Measurement methods for obtaining volumetric coefficients for hyperelastic modelling of flexible adhesives [R]. Teddington: National Physical Laboratory, 2001
- [8] MOREIRA D C, NUNES L C S. Comparison of simple and pure shear for an incompressible isotropic hyperelastic material under large deformation[J]. Polymer Testing, 2013, 32(2): 240. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2012.11.005
- [9] KUMAR A E, MURTHY V B, MOHAN R C, et al. Study of non-linear static behavior of flex seal of rocket nozzle by varying number of shims[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4): 1613. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.063
- [10] LAMPANI L, ANGELINI F, BERNABEI M, et al. Finite element analysis of a solid booster flexible bearing joint for thrust vector control[J]. Aerotecnica & Spazio, The Journal of Aerospace Science, Technology and Systems, 2012, 91(1): 53. DOI: 10.19249/ams.v91i1-2.79
- [11] CHEN Gaosheng, ZHANG Lianhong, LI Fuping, et al. finite element analysis for the influence of spherical layered elastomeric bearing structure on the mechanical behavior[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 53(10): 15. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4381.2009.10.004
- [12] HANNUS K. A flexelement analysis [C]// 23rd Annual Offshore Technology Conference. Dallas: OTC Program Committee, 1991: 187. DOI: 10.4043/6581-MS
- [13] 中橡集团沈阳橡胶研究设计院. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定:GBT 528-200[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2009
- [14] British Rubber Manufacturers' Association Ltd. Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of shear modulus and adhesion to rigid plates-Quadruple shear methods: BS ISO 1827:2011[S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2011
- [15] British Rubber Manufacturers' Association Ltd. Guide to the application of rubber testing to finite element analysis: BS 903-5:2004[S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2004
- [16] HIBBITT H, KARLSSON B, SORENSEN P. Abaqus analysis user's manual[M]. Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2016

(编辑 杨波)