

# 弹性件剪切模量随压力变化的试验分析

王春光<sup>1</sup> 田维平<sup>1</sup> 史宏斌<sup>2</sup> 李江<sup>1</sup> 陈聪<sup>3</sup>

(1 西北工业大学航天学院,西安 710072)

(2 中国航天科技集团公司四院四十一所,西安 710025)

(3 西安航天化学动力厂,西安 710025)

**文 摘** 通过单轴拉伸与平面拉伸试验,得到了柔性接头弹性件橡胶材料“三阶五项式”超弹本构模型参数,通过有限元计算证明了该模型的优越性。为了获得柔性接头弹性件材料剪切模量随容压的变化规律,设计了双轴加载试验装置和表征柔性接头弹性件的三重片试件,进行了压缩剪切联合加载试验及有限元数值模拟。试验结果发现,橡胶材料的剪切模量并没有随压力的升高而减小,该现象与计算结果吻合较好。

**关键词** 柔性接头,压缩剪切,剪切模量,双轴加载装置,数值分析

## Dependent of Shear Modulus of Elastomer on Different Pressure

Wang Chunguang<sup>1</sup> Tian Weiping<sup>1</sup> Shi Hongbin<sup>2</sup> Li Jiang<sup>1</sup> Chen Cong<sup>3</sup>

(1 Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072)

(2 The 41st Institute, The Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025)

(3 Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi'an 710025)

**Abstract** Planar and uniaxial tests were implemented to achieve 3rd order-5th item strain model constant of the elastomer and it is proved this model was superior to others. In order to measure the shear modulus of the elastomer at different pressure, that biaxial device and three-board sample, were designed and the shear-compression test was conducted this process was simulated. The test results show that the shear modulus of the elastomer will not decrease with enhancing compression which agreed with well with the simulation.

**Key words** Flexible joint, Shear-compression, Shear modulus, Biaxial device, Numerical analysis

### 0 引言

近年来,随着固体火箭发动机的设计工作压力不断提高,柔性接头普遍表现出摆动力矩随容压升高而减小的现象<sup>[1]</sup>。当容压上升到一定值时,摆动力矩会趋近于零或出现负力矩的情况,造成柔性接头失稳。长期以来,国内外在解释这种现象时,都认为是由于柔性接头在受到轴向压缩的情况下,弹性件橡胶材料的剪切模量减小使得弹性力矩下降,最终导致摆动力矩下降,甚至结构失稳<sup>[2]</sup>。关于在受压时橡胶剪切模量的变化规律,国内外在一些柔性接头上经过系统试验得到了一些经验公式<sup>[3-5]</sup>,但是还没有进行过有关弹性件橡胶材料受压时的剪切性能研究。

本文针对柔性接头弹性件材料,进行了单轴和平面拉伸试验,测得弹性件的材料参数<sup>[6-7]</sup>。结合四重片的单纯拉伸和压缩试验及有限元数值模拟,设计了

双轴加载试验装置和试件,测定橡胶材料剪切模量随压力的变化规律,并对试验过程进行了数值模拟,得出了摆动力矩随压力升高而减小的内在原因。

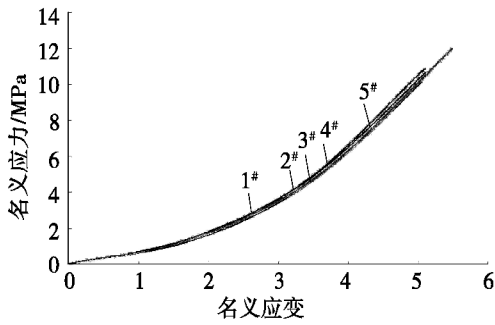
### 1 弹性件材料常数测定

通过单轴和平面拉伸试验(图1),对橡胶材料的三阶五项式本构模型<sup>[6]</sup>、一阶 Mooney 模型、Yeoh 模型进行了系数拟合。其中一阶 Mooney 模型是常用的两参数模型, Yeoh 模型是三阶 Mooney 模型的减缩形式,也是分析橡胶特性时较常用的模型,所以选取该两种模型与三阶五项式的结果进行对比,以确定橡胶材料合理的本构模型。如图1所示,是不同本构模型进行系数拟合得到的材料单轴及平面拉伸应力—应变曲线。在材料本构模型的拟合中,试验数据采用五组试件的试验数据的平均值。由图2可以看出,无论是在小应变区域还是大应变区域,三阶五项式模型都

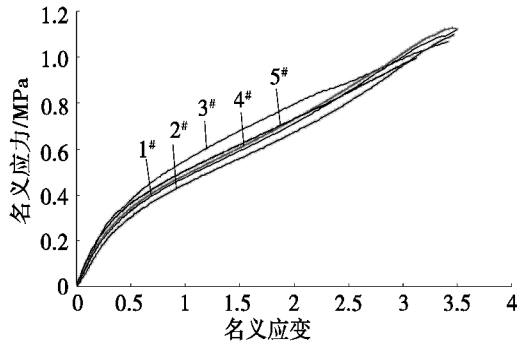
收稿日期:2011-02-15;修回日期:2011-08-19

作者简介:王春光,1985年出生,博士研究生,工程师,主要从事固体火箭发动机总体设计。E-mail:chencong0269@163.com

明显优于其他两种模型。



(a) 单轴拉伸



(b) 平面拉伸

图1 橡胶材料单轴和平面拉伸试验

Fig.1 Stress-strain curves of rubber under uniaxial and planar tests  
三阶五项式模型其应变能函数的形式如下:

$$W(J_1, J_2) = C_{10}(J_1 - 3) + C_{01}(J_2 - 3) + C_{20}(J_1 - 3)^2 + C_{11}(J_1 - 3)(J_2 - 3) + C_{30}(J_1 - 3)^3 \quad (1)$$

柔性接头弹性件三阶五项式模型常数拟合数据见表1,其中各参数都为应变能函数系数,并无具体含义。

表1 三阶五项式的材料常数

Tab.1 Material constant of 3rd order deformation model

kPa				
$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{20}$	$C_{30}$
159.445	13.883	-5.001	0.528	0.068

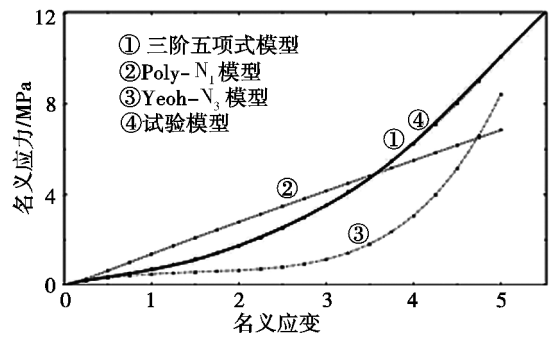
## 2 压缩剪切联合试验

### 2.1 试验设计

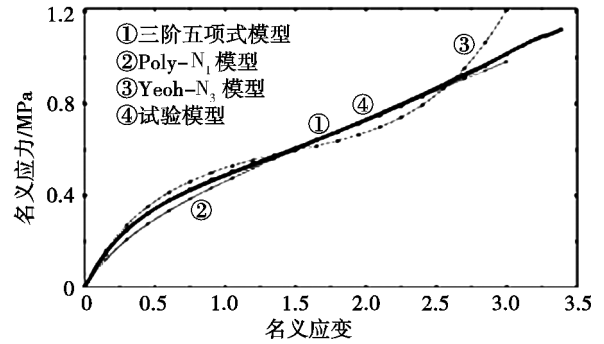
柔性接头橡胶材料剪切模量通常利用“四板剪切法”进行测量,即 Q/GB58.1—87 中的“橡胶材料剪切模量测量方法”<sup>[1]</sup>。为了能真实模拟柔性接头的实际受力形式,本文在原有“四板剪切法”基础上对试件侧面钢板加压,来表征柔性接头所承受的来自燃烧室的压力,试验原理示意图如图3所示。

### 2.2 装置设计

为表征柔性接头实际工作过程中的受力形式,设计双轴联合加载试验装置,要求该试验装置具有双轴独立加载并保持载荷大小的能力。考虑到剪切过程会对橡胶厚度方向的压力产生影响,所以要求本装置



(a) 单轴拉伸



(b) 平面拉伸

图2 不同本构模型拟合曲线与试验曲线比较

Fig.2 Stress-strain curves fitted by different models

具有提供稳定压力的能力。

装置工作过程:首先,试验机通过液压缸提供一个稳定压力,液压经过压力表直接作用到作动活塞上,作动活塞驱动钢板对试件沿橡胶板厚度方向施加压力载荷。然后,液压缸保持上述压力大小不变,在垂直方向通过独立作动器对试件施加拉力载荷。最后,试验机输出相应的拉力—位移曲线。

### 2.3 试件设计

柔性接头剪切模量的测量试件,通常分为“四板试件”和“三板试件”<sup>[1]</sup>。先进行了 Q/GB58.1—87 标准中“四板试件”的单纯压缩试验,发现随压力升高橡胶侧面挤出量不断增大,这种现象不符合柔性接头弹性件的实际变形形式。因为,柔性接头弹性件在增强件的高度约束下,侧面挤出量通常小于总体积的5%。同时,考虑到柔性接头弹性件实际厚度一般为1~2mm,因此本文运用有限元软件分别模拟了1、2mm厚度的橡胶板“三板试件”加压过程,压力根据某发动机燃烧室压力给定。两种试件的挤出量分别占各自总体积的1.5%、4.3%,所占比例小于5%,基本符合柔性接头弹性件的实际变形情况。本文对橡胶厚度为1和2mm的两种试件分别进行了压缩剪切

联合加载试验。

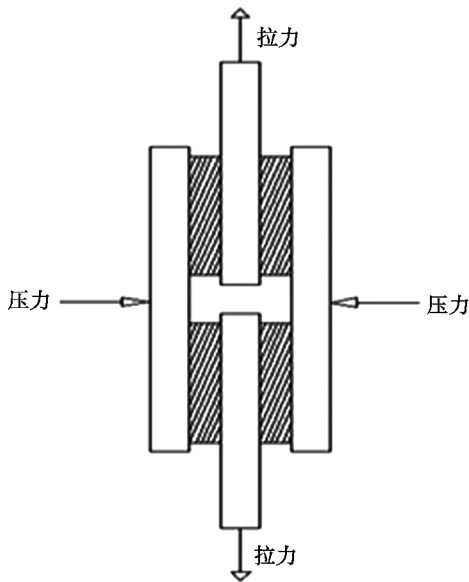


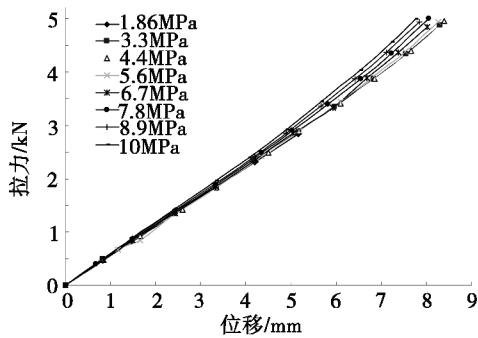
图3 压剪联合加载示意图

Fig. 3 Configuration of shear-compression test

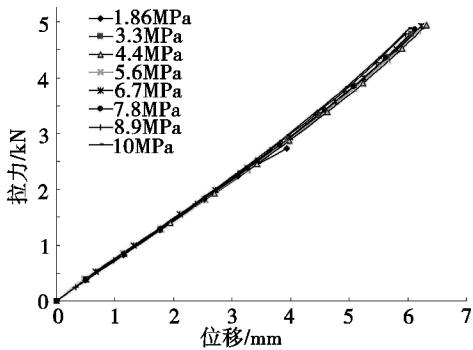
## 2.4 试验结果处理

### 2.4.1 数据处理

对试件分别进行压缩剪切联合加载,橡胶厚度为1和2 mm的试件各五个,分别将两种试件在不同压力下的五组数据平均,得到各自在不同压力下的拉伸—位移曲线见图4,计算不同压力下的橡胶剪切模量。



(a) 1 mm



(b) 2 mm

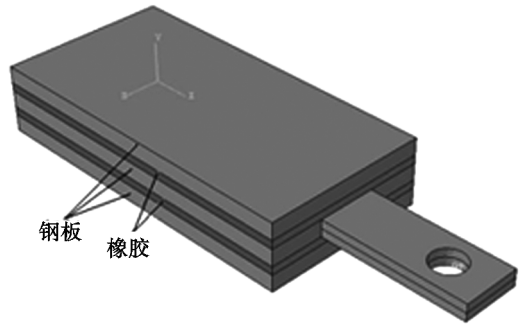
图4 拉伸位移曲线

Fig. 4 Displacement/load curves under shear-compression test

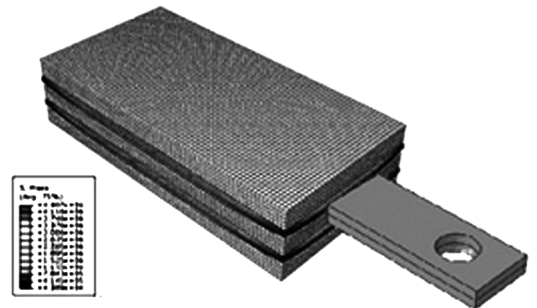
### 2.4.2 压剪试验数值模拟

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011年 第5期

利用有限元软件 ABAQUS 对两种试件的加载过程进行有限元数值模拟,计算物理模型见图5(a),上下钢板  $y$  向施加压力载荷且水平约束,圆孔处施加  $x$  方向拉力。模型共有单元约 8 000 个,弹性件橡胶材料全部采用杂交单元 C3D8H 模拟,钢板采用减缩积分单元 C3D8R 模拟,计算网格见图5(b)。分两步加载,Step-1:施加压力载荷;Step-2:保持 Step-1 中压力载荷,在圆孔处施加拉力载荷。输出最终的应力—应变曲线,计算不同压力下橡胶的剪切模量。



(a) 物理模型



(b) 计算网格

图5 物理模型及计算网格

Fig. 5 Physical model and computational grid

### 2.4.3 压力对橡胶剪切模量的影响

为了研究弹性件橡胶材料剪切模量随压力的变化规律,将有限元计算结果与试验测试结果绘制成压力—剪切模量曲线,如图6所示。两条曲线变化规律基本相同,橡胶材料的剪切模量随压力升高略有增加趋势。数值模拟计算的平均误差小于5%,造成该偏差的主要原因是:

(1)当橡胶材料处于压剪联合加载状态时,三阶五项式超弹本构模型已经不能完全真实的模拟橡胶的力学性能,必然会造成计算结果偏离真实情况;

(2)受试验条件的影响,试验装置的精度,试件制造时引入的尺寸误差,都会对试验结果造成很大的影响;

(3)橡胶材料配方的影响,参数测定时的橡胶成分与压剪联合加载试件的橡胶成分可能略有差别,将会导致有限元计算结果与实际产生偏差。

以上结果说明弹性件橡胶材料的剪切模量并没有随压力增加而减小,这与传统的经验即剪切模量随压力升高而减小<sup>[1,8-9]</sup>的观点不同,从而证明了随容压升高弹性件橡胶剪切模量减小导致弹性力矩减小的传统观点是不准确的。

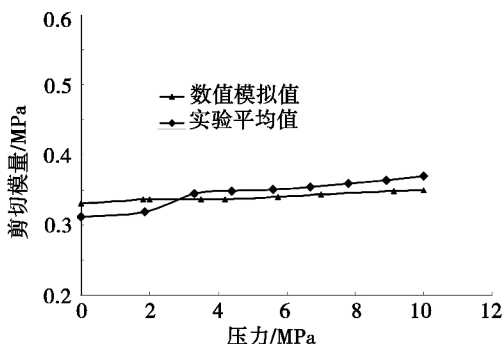


图6 剪切模量随压力变化趋势图

Fig. 6 Changes of shear modulus under different pressure

### 3 结论

(1) 利用单轴拉伸和平面拉伸试验数据可以得到柔性接头弹性件“三阶五项式”超弹本构模型的材料常数,能够为数值模拟提供参数依据。

(2) 所设计的三板试件和压缩剪切联合加载实验装置可以表征柔性接头弹性件的实际受力与变形

状态。

### 参考文献

- [1] 陈汝训,等. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京: 宇航出版社,2007
- [2] 曹翠微,陈伟民. 固体火箭发动机柔性接头的结构分析[J]. 推进技术,2006,27(5):450-454
- [3] Shimon Shani, Shlomo Putter, Arie Peretz. Development of a high-performance flexible for thrust vector control [R]. AIAA95-3047
- [4] Kearney J, Moss D. Advanced solid rocket motor nozzle thrust vector control flexseal development status [R]. AIAA92-3553
- [5] Marco Biagioni. P80 FW SRM - New Technologies for Solid Rocket Motor-Status of Development[R]. AIAA2004-4220
- [6] 徐明. 橡胶类超弹性材料非线性本构关系研究和有限元分析[D]. 北京:北京航空航天大学,1997
- [7] 黄友剑. 城市地铁轨道减振器结构及性能研究[D]. 长沙:中南大学,2004
- [8] 曹翠微,陈伟民,蔡体敏. 固体火箭发动机柔性接头弹性件力学性能研究[J]. 宇航材料工艺,2005,35(5):36-44
- [9] 阮崇智. 大型固体火箭发动机研制的关键技术[J]. 固体火箭技术,2005,28(1):23-28

(编辑 吴坚)

## 欢迎订阅 2012 年《化学推进剂与高分子材料》

《化学推进剂与高分子材料》是由黎明化工研究院主办,中国聚氨酯工业协会、全国化学推进剂信息站协办的国内外公开发行的化工科技期刊,是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊,《万方数据—数字化期刊群》全文收录期刊,《中国核心期刊(遴选)数据库》来源期刊,《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊。本刊主要报道聚氨酯、胶黏剂、涂料、工程塑料等高分子材料,化学推进剂原材料以及精细化工等相应专业研究论文、专论与综述、生产实践经验总结、新产品和新知识介绍、国内外科技信息及市场动态等。本刊在全国化工系统中有一定影响。在 1993,1996,2002 年全国石化系统化工期刊评比中连获优秀期刊奖。2006 年荣获第六届全国石油和化工行业优秀期刊(专业技术类)二等奖,2011 年被评为“全国石油和化工行业优秀报刊(一等奖)”,“河南省一级期刊”。

本刊为双月刊。国内刊号为 CN 41-1354/TQ,国际刊号为 ISSN 1672-2191,广告经营许可证号为 4103002000011。采用国际标准大 16 开,由专业印刷厂精心承作。彩色封面印刷,设计装潢精美,正文内容及插页广告均用铜版纸。内地:每期定价 15 元,全年定价 90 元;港澳台:50 美元/年(400 港元/年);国外:60 美元/年。皆含邮资。国内读者可在全国各地邮局订阅(邮发代号 36-399),也可通过银行或邮局汇款至本编辑部订阅,同时本刊又参加了全国非邮发报刊联合发行等,以方便单位和个人订阅。竭诚欢迎订阅者随时来电来函索取订单。

本刊地址:河南省洛阳市王城大道 69 号(471000) 联系人:徐梅青 王喜荣

联系电话:0379-62301694 62303751 户名:黎明化工研究院

传 真:0379-62307056 开户行:建设银行洛阳西工支行

E-mail:lminfo2000@yahoo.com.cn 账 号:41001504110050004145