

固体火箭发动机柔性接头弹性件力学性能研究

曹翠微^{1,2} 陈伟民³ 蔡体敏¹ 李敏⁴

(1 西北工业大学航天学院,西安 710072)

(2 第二炮兵驻西安地区专装军事代表室,西安 710072)

(3 中国科学院力学研究所工程科学部,北京 100080)

(4 北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京 100083)

文 摘 针对固体火箭发动机柔性接头中的橡胶材料,研究了在进行这种橡胶结构有限元计算中橡胶材料的力学行为的表征。进行了单轴拉伸与简单剪切材料力学性能试验,根据不同材料模型对试验曲线进行了拟合,并用 MSC/Marc 软件模拟了超弹性材料的单轴拉伸与简单剪切变形过程。结果表明:采用单轴拉伸试验数据预测材料剪切性能会造成明显误差,而简单剪切试验得到的模型可以比较准确描述材料的拉伸和剪切变形,针对柔性接头这种以剪切变形为主的结构,应选取剪切试验数据;当应变大于 150%时,不同材料模型与试验数据的选用范围对计算结果具有明显影响。

关键词 超弹性,橡胶,力学性能,有限元模拟,固体火箭发动机

Elastomer Analysis on Flexible Nozzle of Solid Rocket Motor

Cao Cuwei^{1,2} Chen Weimin³ Cai Timin¹ Li Min⁴

(1 College of Astronautics of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 The Representative Office of the PLA in Xi'an, Xi'an 710072)

(3 Div of Engineering Sci Res, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

(4 School of Aeronautics Sciences and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract The mechanical property of the elastomer material of solid rocket flexible nozzle for finite element simulation is studied in this paper. The axial-tension and simple shear testing are implemented. According to different material model and experimental type, the experimental data are fitted to achieve the parameters. And the hyperelastic material's deformation of single axial-tension and simple shear is simulated by MSC/Marc. The analysis results show that the estimation of material's simple shear characteristic by single axial-tension test is dangerous. The model obtained from simple shear test can properly describe the material's deformation of tension and shear. For flexible joint, it is good to apply shear experiment data. According to different material model and experimental type, the experimental data are fitted to achieve the parameters. When the strain is over 150%, there is obvious effect on calculation results by different models and experimental types.

Key words Hyperelastic, Elastomer, Mechanical property, Finite element simulation, Solid rocket motor

1 引言

柔性喷管是一种具有广泛用途和发展前景的全轴摆动喷管,这种喷管是借助于柔性接头实施摆动、

达到控制推力方向的目的。柔性接头由增强件和弹性件构成,其中弹性件材料均为天然或合成橡胶,橡胶的体积压缩模量比剪切模量大 15 000 倍左右,柔

收稿日期:2005-03-10;修回日期:2005-06-16

作者简介:曹翠微,1968年出生,博士研究生,从事固体火箭发动机的研究工作

性接头在受到较大的轴向载荷作用时,轴向变形较小,而在较小的侧向作用力的作用下,能产生较大的剪切变形,从而使喷管摆动。美国早在 20 世纪 60 年代就已经对柔性接头进行研究,当前美、俄、法国的战略导弹发动机都采用柔性喷管。对柔性接头进行结构性能分析和优化设计分析是固体火箭发动机研究的一项十分重要工作^[1]。针对柔性接头结构设计,国内外已经开展了广泛的结构分析计算工作,线性模型分析已趋成熟^[2]。文献 [3] 考虑了几何非线性和材料非线性,应用单轴拉伸试验数据,采用 Mooney-Rivlin 超弹模型。

柔性接头进行结构性能分析的关键是针对使用条件建立橡胶材料的力学模型。在橡胶结构分析中,建立和发展适合的本构关系是计算分析的基础^[4]。文献 [5~6] 分别研究了应用单轴拉伸试验和轴向压缩试验确定橡胶材料两参数模型力学性能常数。有关橡胶更多的本构模型可在 Trebar^[7] 与 Ogden^[8] 的综述中发现。获得广泛应用的广义 Mooney-Rivlin 应变能函数表达式为:

$$W = \sum_{i,j=0} C_{ij} (J_1 - 3)^i (J_2 - 3)^j$$

其中, C_{ij} 是常数, J_1 、 J_2 是 Cauchy - Green 应变张量的第一、第二主不变量。从数学的观点,该表达式可以逼近任意的连续性函数,但级数的截断阶次并无一定之规,因而在实际应用中具有一定的盲目性。另外,对于单一变形模式的材料试验数据,采用高阶模型可以提高自身的拟合精度,但得出的本构模型对其他变形模式并不一定合适。在工程分析中,获得完整的、不同变形模式的试验数据并不容易。所以,采用何种本构模型,进行哪些必要的材料性能试验是值得研究的问题。

柔性接头的橡胶件在工作中处于复杂的受力状态,本文针对柔性接头所研制的橡胶弹性件材料,研究使用单轴拉伸、简单剪切及单轴拉伸和简单剪切组合使用,比较了几种不同的本构关系,采用 MSC/Marc 有限元软件建立结构模型进行计算,以说明在柔性接头橡胶材料的结构分析中材料性能试验数据的选择方面应注意的若干问题。

2 橡胶材料力学性能试验

橡胶类超弹性材料的力学性能试验包括:单轴拉伸试验、双轴等拉试验、纯剪试验、简单剪切试验、体积压缩试验。考虑到柔性接头中橡胶材料的承载方式以及试验类型的普及程度,选择了单轴拉伸试

宇航材料工艺 2005 年 第 6 期

验与简单剪切试验获取橡胶材料的力学性能,试件符合 GB/T12830—1991 标准。

试验仪器为 NSTRON4505 材料试验机,以 50 mm/min 匀速拉伸,试样最大应变约为 600%。图 1~图 4 分别是单轴拉伸与简单剪切试验的载荷 - 位移曲线与名义应力 - 名义应变曲线,总体而言,试验数据的重合性均较好,且简单剪切的试验数据基本重合。

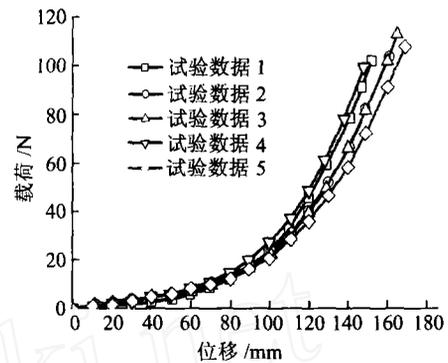


图 1 单轴拉伸试验载荷 - 位移曲线

Fig 1 Displacement/load curves for uniaxial tension

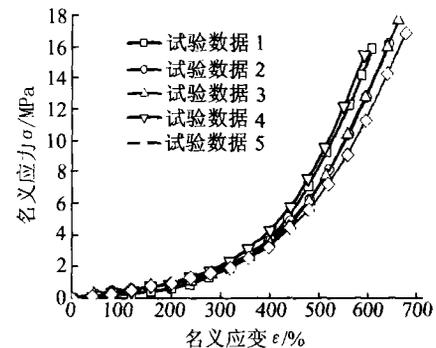


图 2 单轴拉伸试验应力 - 应变曲线

Fig 2 Nominal Stress/strain curves

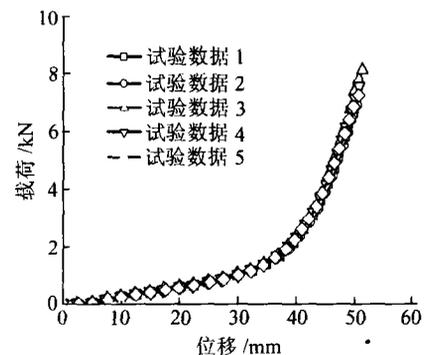


图 3 简单剪切试验载荷 - 位移曲线

Fig 3 Displacement/load curves for simple shear

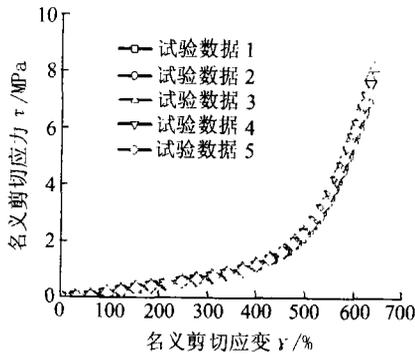


图 4 简单剪切试验应力—应变曲线
Fig 4 Nominal shear stress/strain curves

3 试验数据的拟合

使用单一类型的试验数据或其组合均可进行本构模型的系数拟合,除试验曲线本身外,拟合结果还包括其他类型的变形预测。分别利用单轴拉伸试验数据、简单剪切试验数据及其组合进行不同本构模型系数拟合,预测其他变形模式并考察其可靠性。

3.1 单轴拉伸试验数据拟合

利用单轴拉伸试验数据,不同本构模型获得的材料单轴拉伸应力—应变曲线见图 5,预测的简单剪切应力—应变曲线见图 6。从图 5 可以看出,高阶模型可以更好地模拟单轴拉伸曲线,低阶的 Neo-Hookean 与 2-constant Mooney 模型在小应变时相比试验数据偏高,而大应变时偏低。在 $\epsilon = 300\%$ 时分别偏低约 44% 与 12%。如果材料的变形模式为单向拉伸,采用 3 个常数以上的模型均可得到满意的结果。从图 6 的预测性能与试验数据的比较可以看出,高阶模型中只有 Signiorini 模型的预测结果与简单剪切试验结果接近,其他模型预测结果与试验结果差异较大;而低阶的 Neo-Hookean 模型较好地预测了简单剪切的性能。

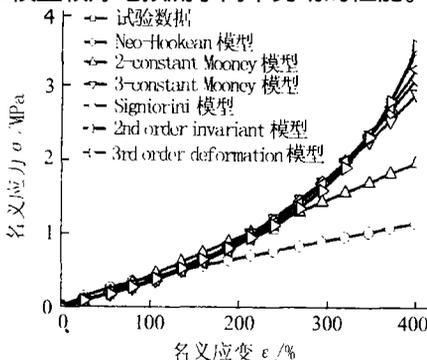


图 5 单轴拉伸试验曲线拟合
Fig 5 Uniaxial tensile experiment data fitting

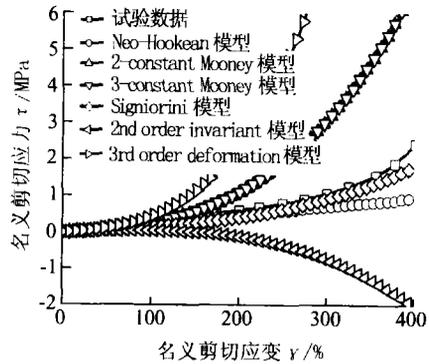


图 6 单轴拉伸试验预测简单剪切性能
Fig 6 Simple shear characteristics forecast according to uniaxial tensile experiment

3.2 简单剪切试验数据拟合

采用与 3.1 节相同的方法,利用不同本构模型对简单剪切试验曲线进行拟合,得到的结果如图 7 所示。而采用简单剪切试验数据预测的单轴拉伸性能与单轴拉伸试验数据的比较见图 8。

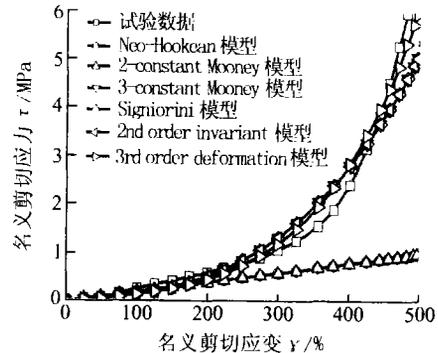


图 7 简单剪切试验数据拟合
Fig 7 Simple shear experiment data fitting

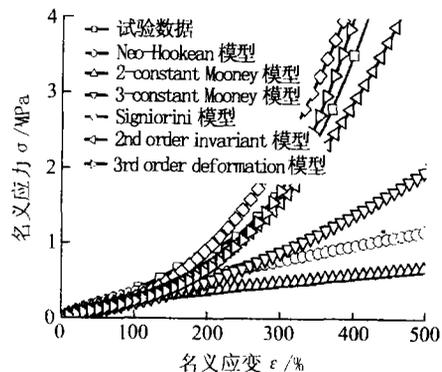


图 8 简单剪切试验预测单轴拉伸性能
Fig 8 Uniaxial tensile characteristics forecast according to simple shear experiment

仅就拟合简单剪切试验数据,高阶模型得到更好的结果是可以理解的,而低阶模型的拟合规律与前述单轴拉伸的情况类似。相对而言,同样的模型拟合简单剪切的效果不如单轴拉伸,表现在拟合曲线的斜率变化与试验曲线差异较大,尽管拟合的数据点与试验数据差异不大,其影响可能表征为不同的应变下计算结果与试验结果的偏差分布不均匀。图 8 指出,利用简单剪切的试验数据预测材料单轴拉伸性能时,大部分高阶模型表现良好,均能较为准确地预测材料的单向拉伸性能。从图 5~图 8 看出,当应变大于 150%以后,不同材料模型对计算结果影响较大。

3.3 单轴拉伸与简单剪切试验数据拟合

采用与 3.1 节相同的方法,利用不同本构模型对单轴拉伸与简单剪切试验的曲线共同进行拟合,得到的结果与单独采用简单剪切试验数据的结果非常类似,说明单轴拉伸试验数据的影响非常有限。总体看利用简单剪切的试验数据,材料的单向拉伸与简单剪切性能均能由高阶模型较好地模拟,其中 2nd order invariant 与 3rd order deformation 模型能够给出较好的材料性能模拟。

4 有限元数值模拟

单轴拉伸与简单剪切实验件有限元模型分布见图 9、图 10。

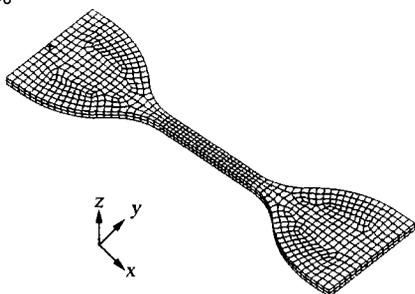


图 9 单轴拉伸试件有限元模型

Fig 9 Uniaxial tensile sample finite element model

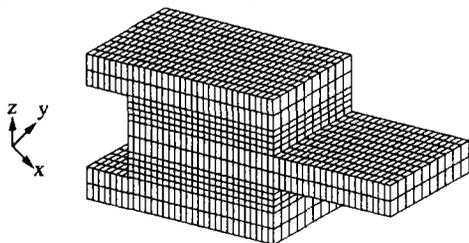


图 10 简单剪切试件有限元模型(对称半模)

Fig 10 Simple shear sample finite element model

对于单轴拉伸模拟,变形比较光滑,标距段应变最大且分布均匀。标距段的名义应力—名义应变计算值与试验数据的比较见图 11。可以发现二者吻合较好。对于简单剪切模型,应变分布比较复杂,应变较大区域接近橡胶与钢板交界处以及橡胶层侧面,由于橡胶层与钢板的粘接区域强度相对较弱,破坏应出现在这些区域。相对于单轴拉伸模拟,简单剪切变形模拟中橡胶层的应变状态比较复杂且不均匀,所以本文采用计算的载荷—位移曲线与试验曲线相比较。图 12 显示了采用 3rd order deformation 模型,以不同范围试验数据拟合得到的系数作为材料模型的计算结果与试验结果比较。

图 12 结果显示:尽管在剪切试验曲线拟合中,3rd order deformation 模型的结果非常接近试验数据,但简单剪切试验的有限元模拟结果与试验结果达不到全程吻合。原因在于真实的变形已不能严格满足简单剪切的模式。对于利用完整试验数据拟合得到的模型,有限元的计算结果在名义应变小于 450% 时与试验数据吻合较好,之后差异迅速增加;而利用名义应变小于 300% 的试验数据进行拟合得到的模型,只能模拟名义应变小于 250% 时的状况,但最终的计算结果与试验数据反而比较接近。作为柔性接头的静力分析,如果只关心工作载荷下结构的最终响应,应根据关心的应变范围调整拟合数据范围。其他的高阶模型也有类似的情况。总体来看,针对简单剪切变形模式,3rd order deformation 模型是值得推荐的。

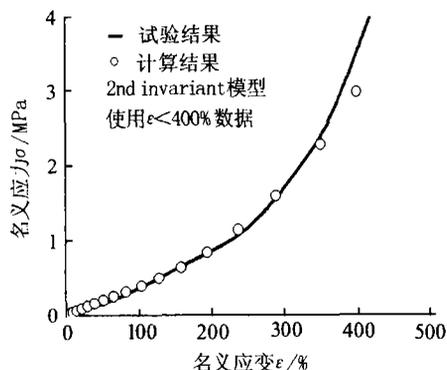


图 11 单轴拉伸计算结果与试验结果的比较

Fig 11 Compare between calculation and test results of uniaxial tensile

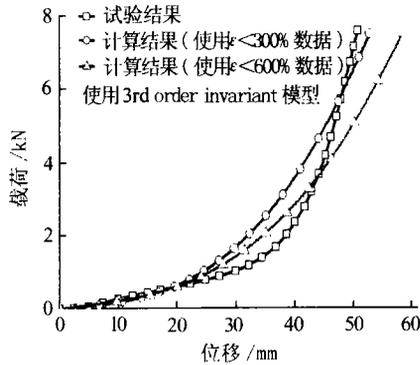


图 12 简单剪切计算结果与试验结果比较

Fig 12 Compare between calculation and test results of simple shear

5 结论

对于单轴拉伸试验,采用高阶材料模型,当应变小于 300%时,2nd order invariant 与 3rd order deformation 模型可以更为精确地描述材料拉伸变形。

简单剪切试验得到的模型可靠性相对较高,而单独使用单轴拉伸试验数据获得的模型在模拟材料的剪切变形时容易发生问题。因此对柔性接头这种以剪切变形为主的结构,应选取剪切试验数据。当应变大于 150%时,不同的计算模型对计算结果有明显影响。

对于简单剪切试验,应变状态比较复杂,有限元模拟结果与试验结果在变形过程中存在一定差异,在整体模型结构分析时,试件应变数据应大于所分析结构的应变范围。

参考文献

- 1 Keamey, Moss D. Advanced solid rocket motor nozzle development status A AA 93—2596
- 2 Meyer S, Cox P. Advanced solid rocket motor nozzle thrust vector control flexseal development status A AA 92 - 3553
- 3 安春利. 柔性接头低压摆动载荷分析和性能研究. 第二炮兵工程学院硕士学位论文, 2004
- 4 徐明. 橡胶类超弹性材料本构关系研究及其有限元分析. 北京航空航天大学博士学位论文, 2003
- 5 何春明, 郑幕桥. 测定橡胶 Mooney - Rivilin模型的一种新方法. 北京理工大学学报, 1997; 17(2): 142 ~ 145
- 6 郑明军, 王文静, 陈郑南等. 橡胶 Mooney - Rivilin模型力学性能常数的确定. 橡胶工业, 2003; 50(8): 462 ~ 465
- 7 Treloar L R G The physics of rubber elasticity Third edition, Clarendon Press, Oxford, 1975
- 8 Ogden R W. Elastic deformations of rubber—like solids, in mechanics of solids Hopkins H G, Sewell M J eds Pergamon, Oxford, 1982: 499

(编辑 李洪泉)

立方氮化硼复合聚晶刀具

本成果研制的新型超硬材料刀具,曾获航天部和贵州省多项科技奖。

本成果刀片平均硬度 HV = 6 000; 弯曲强度 CBN层为 350 ~ 580 MPa, 基底为 1.5 GPa; 压缩强度 2 ~ 3 GPa; 热导率 33.5 ~ 58.6 W / (m · K); 初始氧化温度 1 057 ~ 1 121 。和铁族元素不亲合。

由于立方氮化硼硬度高, 耐磨性好, 特别是热稳定性和化学稳定性优异, 故在各种难加工材料及自动机床切削加工中日益得到广泛的应用。

用本刀具车、铣淬硬钢, 可切削硬度 HRC70, 切削工件表面粗糙度 $R_a = 0.8 \mu\text{m}$, 切削各种冷硬、合金铸铁, 表面粗糙度 $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ 。生产率比磨削大大提高, 还避免了磨削可能产生的烧伤、裂纹等缺陷, 保证了产品的高质量。

本成果刀具广泛应用于不锈钢、钛合金、高温合金、纯镍、纯钨、热喷涂材料、硬质合金等的切削。使钛族金属的精密切削成为可能。

本成果经济效益、社会效益可观。

(首都航天机械公司, 北京 100076)

· 李连清 ·

宇航材料工艺 2005年 第6期