

橡胶大变形不可压缩方法试验数据处理

伍开松¹,徐大萍¹,严永发²,林发权²,胡芳婷²,康浩¹

(1. 西南石油大学 机电工程学院,四川 成都 610500;2. 塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000)

摘要:为提高本构关系的精度,提出用橡胶大变形不可压缩的方法来处理试验数据。根据橡胶材料单轴压缩试验数据,分别采用 GB/T 7757 方法和新提出的数据处理方法进行处理,得到橡胶材料的两种本构关系,并分别将其导入 ABAQUS 有限元分析软件模拟试验过程。研究表明,采用新方法计算的试样最大轴向变形量与试验测试数据的误差为 20.4%,而 GB/T 7757 方法的误差为 34.7%。大变形不可压缩方法可明显提高处理橡胶本构关系的精度。

关键词:橡胶;不可压缩;大变形;本构关系;有限元分析

中图分类号:TQ330.7⁺3;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2013)07-0400-04

橡胶材料由于其特殊性能在各行业中扮演着重要的角色^[1]。为使橡胶材料更好地满足工程要求,一些研究者在化学改性、塑料共混改性以及不同橡胶材料共混改性方面进行了尝试,从而使橡胶性能有了较大幅度的提高和变化^[2]。

描述橡胶本构关系的理论模型很多且基本趋于成熟,其中比较有代表性的有 Mooney-Rivlin, Yeoh, Ogden 和 Gent 等本构模型。不同的本构模型适用于不同的橡胶材料,所反映的精度也有一些差异。除本构关系的理论研究外,本构关系的测试方法和测试数据的处理方法对橡胶本构关系精度的影响也一直是橡胶本构关系研究的热点之一。

人们已经发现根据 GB/T 7757—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩应力应变性能的测定》处理橡胶材料的试验数据所得到的橡胶本构关系用于有限元分析时,导致的误差高达 30% 以上,使有限元分析在橡胶工程中的应用受到一定限制。为此,本文提出大变形不可压缩的处理橡胶材料试验数据的方法,以期提高橡胶本构关系的精度。

1 单轴压缩试验

采用防喷器用的丁腈橡胶制做 5 个圆柱体试样,直径为 (29.0±0.5) mm,高度为 (12.5±

0.5) mm^[3]。试样与夹具的接触面涂石墨粉,以减小摩擦力。

采用微机控制的电子万能试验机,在室温条件下以 10 mm·min⁻¹ 的速度压缩试样,直到应变达到 44% 为止,再以相同速度放松试样;如此反复、连续地压缩和放松试样,共重复 4 次。4 次压缩循环中,前 3 次可视为机械调节,记录 4 次的试验结果,但只对最后一次进行数据处理。试验数据如表 1 和图 1 所示。

表 1 单轴压缩试验数据

负荷/N	变形量/mm	负荷/N	变形量/mm
0	0	1 420.060	3.436
207.951	0.597	1 805.363	4.070
407.159	1.122	2 283.133	4.675
610.114	1.636	2 990.784	5.272
850.538	2.218	3 266.818	5.457
1 120.311	2.831		

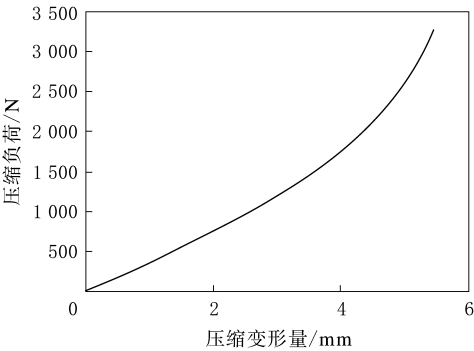


图 1 单轴压缩试验曲线

作者简介:伍开松(1961—),男,湖北仙桃人,西南石油大学教授,博士后,主要从事有限元分析、现代设计方法、机械系统动力学仿真、岩石破碎学和石油机械等研究工作。

2 试验数据处理

2.1 GB/T 7757 方法

GB/T 7757 方法的基础是材料小变形理论。当材料受到轴向压缩时,假设试样的横截面积不变或改变很小,可以忽略不计。因此试样受到压缩时,压缩应力(σ)和压缩应变(ϵ)可以根据下式计算:

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

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

式中, P 为施加在圆柱试样上的轴向压缩负荷, S_0 为试样的原始横截面积, ΔL 为试样的轴向压缩变形量, L_0 为试样的原始轴向长度。

用式(1)和(2)处理表 1 中的试验数据可以得到橡胶材料的本构关系曲线,如图 2 所示。

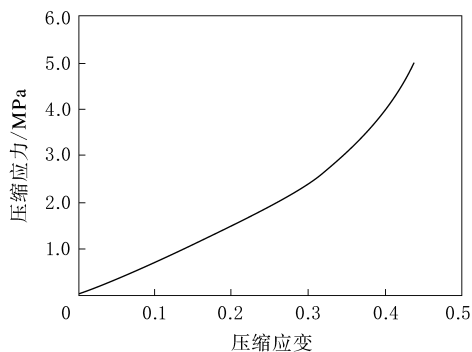


图 2 GB/T 7757 方法处理的本构关系曲线

2.2 大变形不可压缩方法

由于特殊的分子结构,橡胶材料具有受力变形量大但体积压缩变形量小的特点,且橡胶材料的有限大变形通常是不可忽略的。为能得到橡胶材料比较精确的应力-应变关系,本研究提出在处理试验测试数据时应考虑橡胶大变形特征的影响。

假设橡胶材料各向同性、体积不可压缩及圆柱体试样的上、下表面与夹具之间的摩擦力忽略不计,则橡胶单轴压缩试验前、后的体积可以表示为

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} L_0 \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} (L_0 - \Delta L) \quad (4)$$

式中, V_0 和 V_1 分别为压缩前、后试样的体积; d_0

和 d_1 分别为圆柱形试样压缩变形前、后的横截面直径。

根据橡胶试样压缩前、后体积不变的假定,则有 $V_0 = V_1$,将式(3)和(4)代入并整理可以得到

$$d_1 = \sqrt{\frac{d_0^2 L_0}{L_0 - L_1}} \quad (5)$$

因此,橡胶试样的真实压缩应力可以表示为

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d_1^2} = \frac{4P(L_0 - L_1)}{\pi d_0^2 L_0} = \frac{P}{S_0} \epsilon \quad (6)$$

真实压缩应变的表达同式(2)。

根据式(6)和(2)处理单轴压缩试验数据得到橡胶本构关系曲线,如图 3 所示。

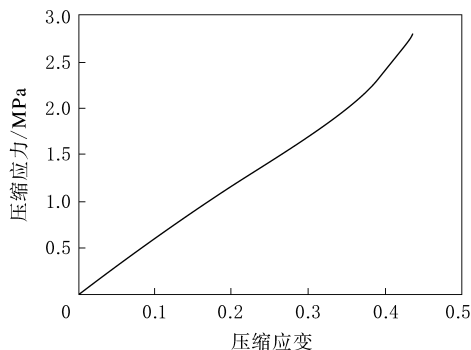


图 3 大变形不可压缩方法处理的橡胶本构关系曲线

3 基于 Yeoh 模型模拟计算对比

3.1 Yeoh 本构模型

橡胶为各向同性材料,其应变能密度(U)可分解成应变偏量能和体积应变能两部分^[4]:

$$U = f(I_1 - 3, I_2 - 3) + g(J - 1) \quad (7)$$

式中, I_i 为应变不变量, J 为橡胶变形前后的体积比。

令 $g = \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$, 并进行泰勒展开,取

$N=3$ 时减缩多项式的特殊形式,即 Yeoh 模型^[5-6]为

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{10} (I_i - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (8)$$

式中, N 为选择的多项式阶数, D_i 的值决定材料是否可压缩, C 为模型材料常数。

这里假设橡胶变形前后体积不发生变化,即 $J=1$,因此式(8)可变为

$$U = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_2 - 3)^2 +$$

$$C_{30}(I_3 - 3)^3 \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned}$$

式中, λ_i 为主伸长率。

当橡胶材料不可压缩时, $I_3 = 1$ 。根据 NBR 材料的性能分析, 其本构关系利用 Yeoh 模型进行模拟是合理的^[7]。

3.2 模拟计算对比

取 ABAQUS 有限元分析软件的几何模型、边界约束和施加负荷等条件与橡胶单轴压缩试验的条件完全相同^[8]。分别将 GB/T 7757 和大变形不可压缩两种方法处理橡胶单轴压缩试验数据所得到的本构关系导入 ABAQUS 软件^[9], 进行有限元模拟分析, 解算后选取最大轴向位移变形量与试验测定值的误差作为评价标准^[10], 判断两种处理方法的优劣。

单轴压缩试验的有限元力学模型如图 4 所示, 下部夹具施加完全固定约束, 上部夹具施加向下的轴向负荷(3 266.818 N), 橡胶试样与夹具接触面设为光滑接触面, 中间橡胶试样受上部夹具的单轴压缩作用产生变形。

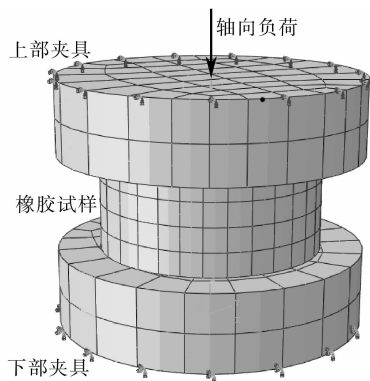


图 4 单轴压缩试验有限元模型

用 GB/T 7757 方法处理试验原始数据^[3], 将得到的本构关系数据导入 ABAQUS 软件, 利用 Yeoh 模型拟合得到: $C_{10} = 1.156\ 198\ 29\ \text{MPa}$, $C_{20} = 1.189\ 088\ 83\ \text{MPa}$, $C_{30} = 0.340\ 784\ 687\ \text{MPa}$, 泊松比(μ)取为 0.5。模拟解算得到橡胶试样的最大轴向压缩位移变形量为 3.566 mm, 单轴压缩试验实测值为 5.457 mm, 模拟与试验结

果的偏差为 34.7%。

再用大变形不可压缩方法对试验原始数据进行处理, 将处理好的本构关系数据导入 ABAQUS 软件, 利用 Yeoh 模型拟合得到 $C_{10} = 1.109\ 423\ 87\ \text{MPa}$, $C_{20} = 0.109\ 4118\ 96\ \text{MPa}$, $C_{30} = 0.333\ 224\ 613\ \text{MPa}$, μ 取为 0.5。模拟解算得到橡胶试样的最大轴向压缩位移变形量为 4.343 mm, 单轴压缩试验实测值为 5.457 mm, 模拟与试验结果的偏差为 20.4%。

这主要是由于橡胶材料在实际情况下具有一定的体积压缩变形、试验过程中橡胶试样与试验夹具之间虽有石墨粉但仍存在一定的摩擦力及 Yeoh 本构模型理论上可能也存在少量误差。这些因素综合影响导致大变形不可压缩方法的模拟计算结果与试验的偏差仍然还有 20.4%。

4 结语

针对采用 GB/T 7757 方法处理橡胶力学性能试验数据所得到橡胶本构关系精度较低的问题, 本文提出橡胶大变形不可压缩处理方法。以防喷器胶芯材料(胶种为丁腈橡胶)的单轴压缩试验测试数据为基础, 用上述方法处理试验数据得到两种橡胶材料本构关系, 再将它们导入 ABAQUS 软件进行模拟分析, 所得到的试样最大轴向压缩变形量与相应的测试结果对比发现, 橡胶大变形不可压缩方法的计算误差为 20.4%, 而 GB/T 7757 方法的计算误差为 34.7%, 前者相对于后者的计算精度提高了 14.3%。

由此可见, 采用橡胶大变形不可压缩方法处理试验数据所得到本构关系精度有较大幅度的提高。

致谢: 本工作得到石油天然气装备教育部重点实验室(西南石油大学)和塔里木油田分公司的资助, 特此致谢。

参考文献:

- [1] 纪奎江, 邓本诚, 李俊山. 丁腈橡胶加工和应用[M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1978: 19-21.

[2] 弗雷克利 K, 佩恩 P K, 等. 橡胶在工程中应用的理论与实践[M]. 杜承泽, 唐宝华, 罗东山, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 1985: 96-146.

[3] 硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩应力应变性能的测试[S]. GB/T 7757—2009.

[4] Yeoh O H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.

[5] 朱艳峰, 刘峰, 黄小清, 等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业, 2006, 53(7): 119-125.

[6] Yeoh O H. Characterization of Elastic Properties of Carbon Black Filled Rubber Vulcanizates[J]. Rubber Chemistry and

Technology, 1990, 63(5): 792-805.

[7] 伍开松, 袁新生, 翟志茂, 等. 合理选择丁腈橡胶胶筒本构模型探讨[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 141-144.

[8] Guangdi H. Panagiotopoulos P D. Adaptive Finite Element Analysis of Fractal Interfaces in Contact Problems[J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 82(1-2): 44-46.

[9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 125-164.

[10] 伍开松, 余月明, 张新政, 等. 用接触有限元研究胶筒系统的力学行为[J]. 石油矿场机械, 2006, 35(3): 23-26.

收稿日期: 2013-01-08

Data Processing Method of Rubber Testing Based on Incompressible Large Deformation Analysis

WU Kai-song¹, XU Da-ping¹, YAN Yong-fa², LIN Fa-quan², HU Fang-ting², KANG Hao¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of rubber constitutive relation, a new method based on incompressible large deformation analysis was presented for the data processing of rubber testing. Based on the uniaxial compression test data of rubber materials, the data were processed by GB/T 7757 method and the new method to get two rubber material constitutive relations, and the testing process was simulated by importing the two constitutive relations into ABAQUS finite element analysis software, respectively. The results showed that, compared to the test data, the error of the maximum axial deformation of test specimen calculated by the new method was only 20.4%, and lower than that by GB/T 7757 method, which was 34.7%. The accuracy of rubber constitutive relation could be significantly improved by using the incompressible large deformation method.

Key words: rubber; incompressible; large deformation; constitutive relation; finite element analysis

我国气门嘴芯行业进入微长时代

中图分类号: U463.345 文献标志码: D

2012 年我国气门嘴芯行业产量、销售收入及出口创汇等主要经济指标呈现小幅增长, 这是我国气门嘴芯行业连续两年微长, 标志着我国气门嘴芯行业在经历十几年高速增长后进入微长时代。

中国化工装备协会气门嘴芯专业委员会对我国 13 家主要气门嘴芯企业统计显示: 2012 年气门嘴芯销售收入 15.85 亿元, 同比增长 1.0%; 气门嘴产量 14 亿套, 同比增长 1.5%; 气门芯产量 22.6 亿支, 同比增长 1.4%; 出口交货值 6.87 亿元, 同比增长 0.1%。

据介绍, 2012 年我国气门嘴芯行业表现出 4 个明显特点。①内销比例增大。由于世界汽车行

业不景气, 同时欧美强制性推广汽车轮胎气压监测系统, 导致气门嘴芯出口需求减少, 企业不得不加大内销力度。②气门嘴芯企业大力拓展非气门嘴芯领域业务。在气门嘴芯微长时代, 气门嘴芯企业利用自身特点将产品向汽车配件延伸。③我国汽车轮胎气压监测系统产业发展迅速, 自主研发的气压监测系统产品具有静态和高速可靠接收、即时反应、低功耗、长寿命等特点, 达到了国际先进水平。实现其产业化将大大提高我国气门嘴芯的科技含量和水平。④我国气门嘴芯行业自动化程度快速提高。近年来劳动力成本大幅增加, 汽车行业对气门嘴芯稳定性要求提高, 气门嘴芯企业不得不加大技术改造力度, 提高自动化水平。

(桂林橡胶机械厂 陈维芳)