

# 宽温域柔性接头弹性件本构模型适用性研究

王 才 史宏斌 屈转利

(西安航天动力技术研究所,西安 710025)

**文 摘** 针对宽温域丁异戊橡胶弹性件开展了-55、-40、20、65℃下的单轴拉伸试验与剪切试验,研究其在不同温度下本构模型的适用性,验证了本构模型由一种变形对其他变形的预测能力,在此基础上采用有限元方法分析了各模型的计算误差,确定了丁异戊橡胶在不同温度不同应变下所适用的本构模型。结果表明,阶数越高的本构模型预测能力越差,低阶的 Neo-Hookean 模型预测能力最好,同时在丁异戊橡胶弹性件的有限元计算中,-55~20℃本构模型采用 Yeoh 模型与三阶五项式模型最好,20~65℃采用 Yeoh 模型计算精度最高。

**关键词** 宽温域,柔性接头,丁异戊橡胶,本构模型

中图分类号:V435.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.05.003

## Applicability of Constitutive Models of Flexible Joint Elastomer Under Wide Temperature Range

WANG Cai

SHI Hongbin

QU Zhuanli

(Xi'an Institute of Aerospace Solid Propulsion and Technology, Xi'an 710025)

**Abstract** Uniaxial tensile test and shear test were operated on wide temperature butyl isoprene rubber under -55, -40, 20 and 65℃ to study the applicability of constitutive models. The ability of the constitutive model to predict other deformations was verified. On this basis, the finite element method was used to analyze errors of constitutive models and the applicability of models to butyl isoprene rubber at different temperatures and strains were determined. The results show that the higher order of constitutive model corresponds the worse prediction ability and low-order Neo-Hookean model has best prediction ability. At the same time, Yeoh model and third-order-five-term model are adopted when working temperature is between -55℃ and 20℃, and Yeoh model is chosen when the temperature is between 20℃ and 65℃ in finite element calculation of butyl isoprene rubber in flexible joint.

**Key words** Wide temperature range, Flexible joints, Butyl isoprene rubber, Constitutive model

### 0 引言

战术导弹要求具备全天候作战能力,以适用于高原、沙漠、海洋等各种复杂环境下的部署和使用,因此要求发动机能承受高低温环境的影响。柔性接头是发动机柔性喷管的关键部件,由金属前法兰、后法兰、金属或非金属增强件与弹性件交替黏接而成,具有结构简单、可全轴摆动、重复性好等优点,常被选为发动机的推力矢量控制方式<sup>[1-4]</sup>。针对宽温域(-55~

65℃)条件下工作的柔性接头,要求橡胶弹性件应具备优异的高低温性能,目前能满足此温度要求的橡胶有硅橡胶和丁异戊橡胶。硅橡胶高低温性能优异, $T_g$  低至-110℃,文献[5]进行了硅橡胶柔性接头的高低温性能试验,-50~70℃弹性比力矩稳定且数值较小,但硅橡胶力学性能差,与增强件黏接难度大,在工程研制中出现过摆动撕裂的情况,不适应大摆角的工况;丁异戊橡胶 $T_g$  可达-104℃,-50℃时伸长耐寒系

数达 0.8 以上,其耐寒性能接近硅橡胶,而力学性能优于硅橡胶<sup>[6]</sup>,已用于俄罗斯白杨 M 导弹、美国 MX II 级、侏儒导弹等发动机的柔性接头,近些年来我国在丁异戊橡胶的研制上也取得了一定成果<sup>[7]</sup>,但尚未见对其本构模型在有限元计算中适用性的研究报道。当下有限元分析是研究柔性接头工作可靠性最常用的方法之一,确定恰当的本构模型是有限元计算的基础,宽温域条件下柔性接头工作环境恶劣,不同温度下柔性接头摆动偏差大,采用不同本构模型的计算精确度不同,因此研究宽温域条件下丁异戊橡胶弹

Yeoh:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (3)$$

三阶五项式:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (4)$$

四阶八项式:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + C_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + C_{40}(I_1 - 3)^4 \quad (5)$$

Ogden:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (6)$$

式中,  $C_{ij}$ 、 $\mu_i$ 、 $\alpha_i$  为模型参数,  $\lambda_i$  为主伸长比<sup>[8]</sup>。

Neo-Hookean 模型仅需要一个模型参数,适用于模拟橡胶应变在 30% ~ 40% 下的单轴拉伸和应变在 80% ~ 90% 下的纯剪切力学行为; Mooney-Rivlin 模型有两个模型参数,适用于模拟橡胶材料应变在 150% 以内的小变形单轴拉伸行为,且不能预测多轴向拉伸试验<sup>[9]</sup>; Yeoh 模型考虑了高阶项,适用于模拟炭黑填充橡胶的变形,且在中到大变形范围内模拟精度较高<sup>[10]</sup>; James 和 Green 提出了五项到九项多项式展开模型,如三阶五项式模型、四阶八项式模型,这些高阶模型比低阶模型能更好的拟合试验数据,但对输入范围以外的试验数据的预测能力不如那些形式简单的模型; Ogden 模型的应变能函数由三个方向的主伸长比定义,且可自由调整项数以拟合试验数据,适用于模拟橡胶大变形行为,但不同试验所确定的模型参数很可能不协调。

对于具备高弹性能的橡胶弹性件,其力学性能受温度、应变、材料种类的影响较大<sup>[11-13]</sup>,本构模型的适用范围也随之改变。多种文献中对橡胶的本构模型进行了描述,但大都未提及本构模型的适用范围。文献[14-15]对橡胶常用的本构模型使用仅说明了模糊的应变范围,对橡胶材料未作说明,且对使用温度未展开描述;文献[16]模拟了天然橡胶材料的单轴拉伸试验与剪切试验,推荐采用二阶与三阶的多项式模型,但忽略了温度对本构模型适用性的影响。同

性件的本构模型适用性很有意义。

## 1 橡胶材料本构研究

橡胶材料常用的本构模型有 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、三阶五项式模型、四阶八项式模型、Ogden 模型等,应变能函数表达式如下:

Neo-Hookean:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (1)$$

Mooney-Rivlin:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

一种本构模型在不同温度下的模型参数不同,有限元计算时的收敛性差别也很大,并且在不同应变范围内,不同本构模型的精确度也不相同,因此研究宽温域橡胶在不同温度不同应变下本构模型的适用性具有重要价值。

综上,目前尚没有对宽温域橡胶材料的本构模型适用性的研究报道,为获得不同温度下柔性接头的工作特性,本文针对高低温性能优异的丁异戊橡胶弹性件材料,在-55、-40、20、65℃下分别开展单轴拉伸试验与四重片剪切试验,针对柔性接头弹性件工作时应变一般在 150% ~ 300% 之间,本文取 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、三阶五项式模型、四阶八项式模型作对比分析,采用最小二乘法拟合各个温度状态下本构模型的模型参数,并通过有限元方法确定各个状态下本构模型的适用范围,为宽温域下柔性接头的有限元计算提供依据。

## 2 橡胶材料的力学性能试验

橡胶材料的力学性能试验包括单轴拉伸、双轴拉伸、平面拉伸及体积压缩四种。柔性接头弹性件在工作过程中受到拉伸、压缩与剪切载荷的综合作用,因此本文选择单轴拉伸试验与剪切试验来获得丁异戊橡胶的力学性能数据。

### 2.1 单轴拉伸试验

单轴拉伸试验试样件制作执行标准 GB/T528—1998,试验在 INSTRON4505 万能材料试验机上进行,在-55、-40、20、65℃下对试样件进行单轴拉伸,试样件以 50mm/min 匀速加载,图 1 为各温度下试验的应力应变曲线,不同温度的应力应变曲线有一定差别,

在-55 ~ 65℃之间,应变为 400%、600%、800% 时的偏差依次达到了 51.9%、45.9%、47.9%,达到相同应变下,温度越高,应力越小,可见温度对橡胶性能影响较大。

胶材料的力学性能,故而也影响着橡胶材料的本构模型参数及计算精度,仅用一种温度下的数据去分析其他温度下的变形会造成较大的误差。由于橡胶本构模型参数随温度的变化而改变,同一本构模型在不同温度下的计算误差及收敛性不同,因此研究不同温度下本构模型的适用性是有意义的。

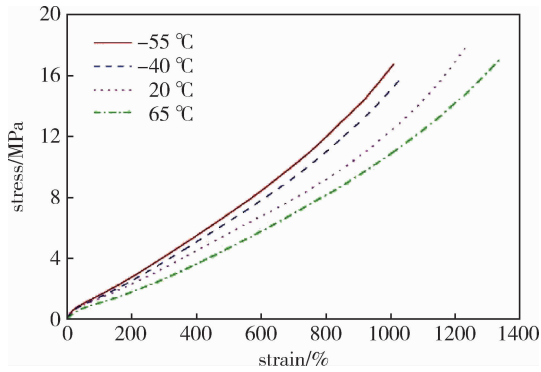


图1 不同温度下单轴拉伸试验应力—应变曲线  
Fig.1 Stress-strain curves of uniaxial tensile test under different temperatures

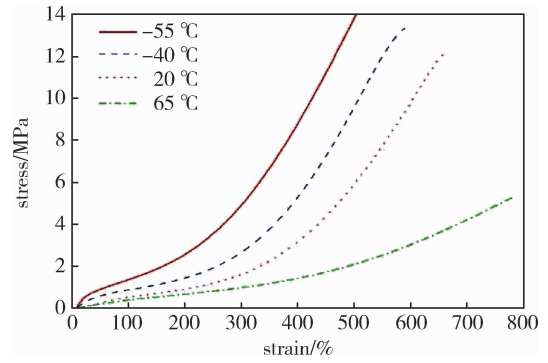


图2 不同温度下剪切试验应力—应变曲线  
Fig.2 Stress-strain curves of four-slice shear test under different temperatures

### 2.2 四重片简单剪切试验

根据 Q/Gb58.1—87 硫化橡胶剪切模量试验方法,试验在 INSTRON4505 万能材料试验机上进行,在-55、-40、20、65℃下对该试件进行了四重片剪切试验。试样件加载速率 25mm/min,图2为试验的应力应变曲线,与单轴拉伸情况类似,在-55 ~ 65℃之间,应变为 300%、400%、500% 时的偏差依次达到了 385%、518%、600%,达到相同应变下,温度越高,应力越小,存在高温软化现象,同样温度对橡胶力学性能的影响较大。

### 3 橡胶本构模型参数确定

#### 3.1 单轴拉伸试验与剪切试验模型参数的确定

本文采用最小二乘法拟合单轴拉伸试验数据,得到丁异戊橡胶在不同温度下各本构模型的模型参数,见表1,图3为-40℃时单轴拉伸试验数据的最小二乘法拟合曲线,从图3可以看出,模型阶数越高,拟合相关度越接近1,对试验结果拟合也越精确,三阶的 Yeoh 模型与三阶五项式模型及四阶的四阶八项式模

从单轴拉伸曲线与剪切曲线可知,温度影响着橡

表1 不同温度下单轴拉伸试验的本构模型参数

Tab.1 Constitutive model parameters of uniaxial tensile of different temperature

温度/℃	N-H 模型		M-R 模型		Yeoh 模型	
	C10	C10	C01	C10	C20/10 <sup>-4</sup>	C30/10 <sup>-6</sup>
-55	0.648903	0.771712	-0.908760	0.483926	13.567	-1.4769
-40	0.600597	0.713961	-0.851797	0.446617	12.634	-1.5729
20	0.556582	0.657339	-0.912663	0.431033	3.7144	1.1179
65	0.494148	0.604967	-1.05679	0.332169	8.0852	-0.62264

温度/℃	三阶五项式模型				
	C10	C01	C11/10 <sup>-2</sup>	C20/10 <sup>-3</sup>	C30/10 <sup>-6</sup>
-55	0.215056	0.359750	3.6844	-3.8849	7.7844
-40	0.204563	0.341936	3.6310	-3.8856	7.3636
20	0.184067	0.295512	2.6564	-2.8651	5.1389
65	0.110992	0.295874	2.4016	-1.9355	2.3563

温度/℃	四阶八项式模型							
	C10/10 <sup>-2</sup>	C01	C11/10 <sup>-2</sup>	C20/10 <sup>-2</sup>	C02/10 <sup>-3</sup>	C21/10 <sup>-4</sup>	C30/10 <sup>-5</sup>	C40/10 <sup>-9</sup>
-55	-57.0	1.37	12.3	-3.20	140	15.1	-11.2	86.9
-40	-40.9	1.12	14.7	-2.02	102	7.18	-3.71	10.4
20	8.82	0.527	9.316	-3.20	-135	11.5	-6.52	31.3
65	1.46	0.447	4.66	-0.682	-9.81	1.58	-0.53	1.32

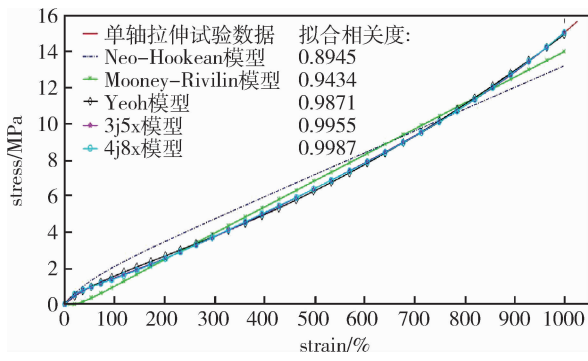


图3 -40℃下单轴拉伸试验数据拟合

Fig.3 Uniaxial tensile test data fitting at -40℃

型拟合曲线几乎与试验曲线重合;而低阶 Neo-Hookean 模型与 Mooney-Rivlin 模型拟合相关度相对较低,拟合精度也较差。

同样采用最小二乘法拟合剪切试验数据,得到丁异戊橡胶在不同温度下各本构模型的模型参数,见表 2,图 4 为-40℃时剪切试验数据的最小二乘法拟合曲线,由图 4 可见,同单轴拉伸情况一样,高阶的 Yeoh 模型、三阶五项式模型、四阶八项式模型拟合相关度很接近 1,对试验数据的拟合也很精确,而低阶的 Neo-Hookean 模型与 Mooney-Rivlin 模型拟合精度相对较差。

表 2 不同温度下剪切试验的本构模型参数

Tab.2 Constitutive model parameter of shear at different temperatures

温度/℃	N-H 模型		M-R 模型			Yeoh 模型	
	C10	C10	C01	C10	C20/10 <sup>-3</sup>	C30/10 <sup>-7</sup>	
-55	0.772207	0.386104	0.386104	0.187542	15.604	-1.6616	
-40	0.758434	0.379217	0.379217	0.186866	14.192	-7.4905	
20	0.572798	0.286399	0.286399	0.110987	8.2972	197.61	
65	0.246090	0.122920	0.122920	0.122745	1.5556	23.700	

温度/℃	三阶五项式模型				
	C10/10 <sup>-2</sup>	C01/10 <sup>-2</sup>	C11/10 <sup>-3</sup>	C20/10 <sup>-3</sup>	C30/10 <sup>-7</sup>
-55	9.37712	9.37712	7.80184	7.80185	-166.162
-40	9.34330	9.34330	7.09621	7.09621	-7.49049
20	5.54933	5.54933	4.14861	4.14861	197.607
65	6.12067	6.12067	0.786521	0.786522	21.5536

温度/℃	四阶八项式模型							
	C10	C01	C11/10 <sup>-2</sup>	C20/10 <sup>-2</sup>	C02/10 <sup>-2</sup>	C21/10 <sup>-3</sup>	C30/10 <sup>-3</sup>	C40/10 <sup>-7</sup>
-55	2.034	-1.90	33.7	29.7	-125.2	-210	1474	-286
-40	1.705	-1.384	17.1	45.6	-124.3	-266	187	-394
20	1.26	-1.26	14.3	5.74	-48.0	-40.2	27.9	-37.1
65	0.413	-0.305	1.38	1.75	-9.62	-6.33	4.36	-3.00

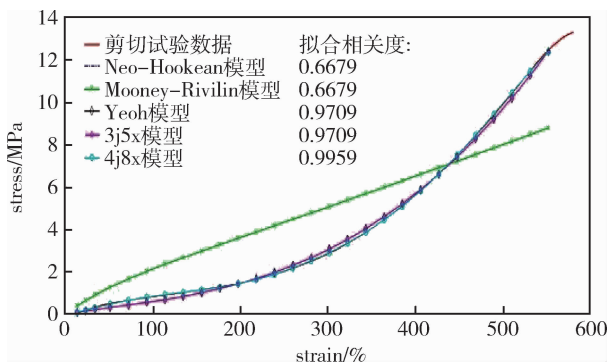


图4 -40℃下剪切试验数据拟合

Fig.4 Shear test data fitting at -40℃

### 3.2 本构模型预测能力分析

有时由于试验条件的限制,模型参数仅从单一的单轴拉伸试验或剪切试验获得,此时基于一种变形去预测其他变形的结果同样具有重要意义。

以 20℃下的单轴拉伸试验数据为例,不同本构模型的对试验数据的拟合曲线见图 5,并以拟合得到的模型参数来预测 20℃时的剪切试验结果。从图 6 各模型对剪切试验结果的预测可以看出,Neo-Hookean 模型的预测曲线与试验数据的相关系数为 0.654 3,是最接近 1 的,高阶模型如四阶八项式模型的相关系数为-3.805,说明预测曲线与试验曲线偏差较大,因

此高阶模型如三阶五项式模型、四阶八项式模型对剪切试验结果的预测精度不如低阶的 Neo-Hookean 模型。

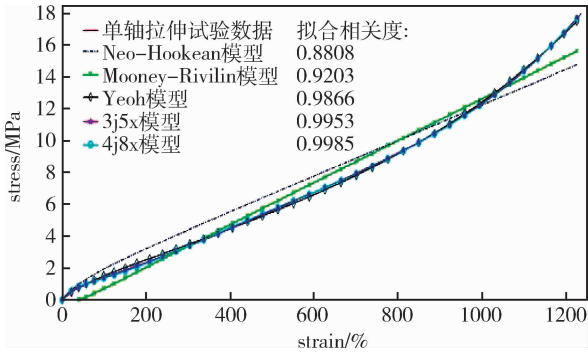


图 5 20°C 下单轴拉伸试验数据拟合

Fig. 5 Data fitting of uniaxial tensile test at 20°C

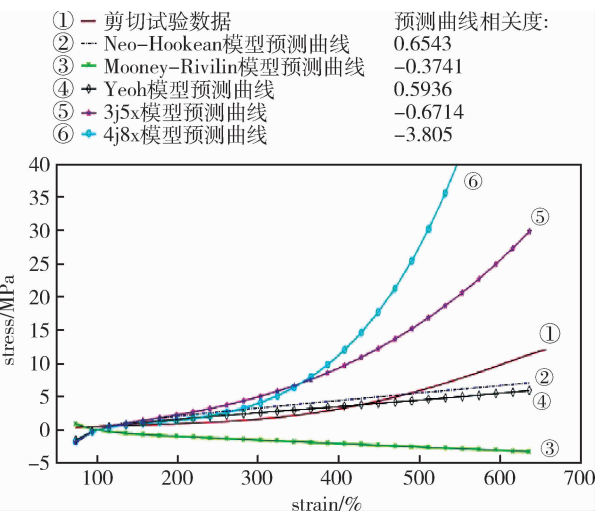


图 6 20°C 下单轴拉伸试验数据预测剪切试验

Fig. 6 Uniaxial tensile test data predict shear test at 20°C

同样,针对 20°C 下的剪切试验数据,不同本构模型的拟合曲线见图 7,并以拟合得到的模型参数来预测 20°C 时的单轴拉伸试验结果,从图 8 可知,模型阶数越高,模型的预测曲线与试验数据的相关系数值越小,对单轴拉伸试验结果的预测能力也越差,而低阶的 Neo-Hookean 模型相关系数为 0.8230,是各模型中最接近 1 的,因而预测精度最高。分析原因认为这与本构模型的模型参数有关,本构模型的阶数越高,其所含的模型参数就越多[式(1)~(5)],由一种变形得到的试验数据拟合得到的模型参数对该变形的模拟是越精确的;但当用于其它变形的预测时,由于变形的不同而导致应力与应变的函数关系发生了改变,模型参数越多则应力应变关系的变化程度就越大,反而使得预测精度下降,低阶的 Neo-Hookean 模型仅有一个模型参数 C10,不同变形间应力应变的函数关系相差不大,因而预测精度较高。

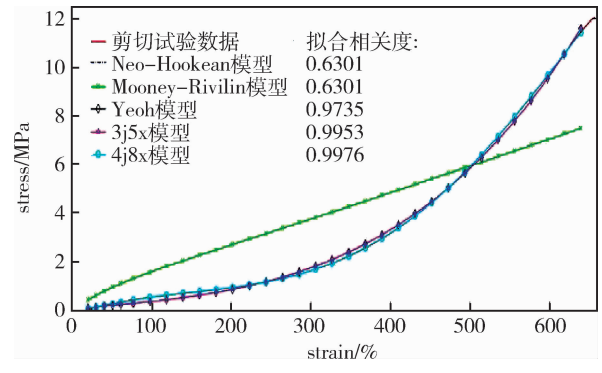


图 7 20°C 下剪切试验数据拟合

Fig. 7 Data fitting shear test at 20°C

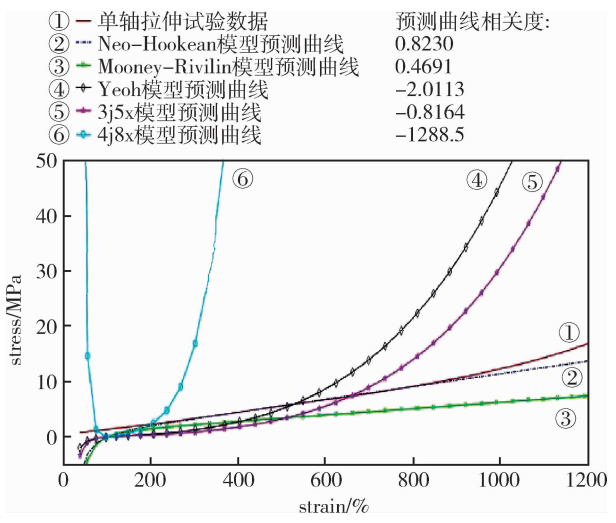


图 8 20°C 下剪切试验数据预测单轴拉伸试验

Fig. 8 Shear test data predict uniaxial tensile test at 20°C

从图 6 和图 8 还可以得出,对于预测精度最高的 Neo-Hookean 模型,利用单轴拉伸试验数据预测剪切试验时相关系数为 0.6543,而利用剪切试验数据预测单轴拉伸试验时相关系数达到了 0.8230,更接近 1,说明剪切试验预测单轴拉伸试验的精度比单轴拉伸试验预测剪切试验的精度高,因此当试验条件受限时优先考虑剪切试验,既可以节省试验成本,又可以减少时间,提高工作效率。

总之,对于橡胶材料的各本构模型,基于一种变形对其他变形的结果预测中,阶数越高的模型预测能力越差,而低阶的 Neo-Hookean 模型预测精度最高,当试验条件受限时优先考虑开展剪切试验。

#### 4 有限元数值模拟

利用表 1、表 2 中的模型参数,通过 ABAQUS 软件再现单轴拉伸试验和四重片简单剪切试验,以确定丁异戊橡胶在不同温度不同应变下本构模型的适用性。试样件有限元模型如图 9 所示,对于单轴拉伸试验的模拟,标距段网格沿长、宽、高方向依次划分 50

等份、14 等份、4 等份,由于橡胶材料具有大变形特点,故单元类型采用大变形常用的杂交单元 C3D8H,模拟受载时试样一端固定,一端施加拉力;对于四重片剪切试验的模拟,单个橡胶片网格沿长、宽、高方向依次划分 25 等份、20 等份、10 等份,单元类型同样采用模拟大变形的杂交单元 C3D8H,金属板为金属材料,单元类型采用普通的减缩积分单元 C3D8R,模拟受载时固定一端金属板,对另一端金属板施加拉力。

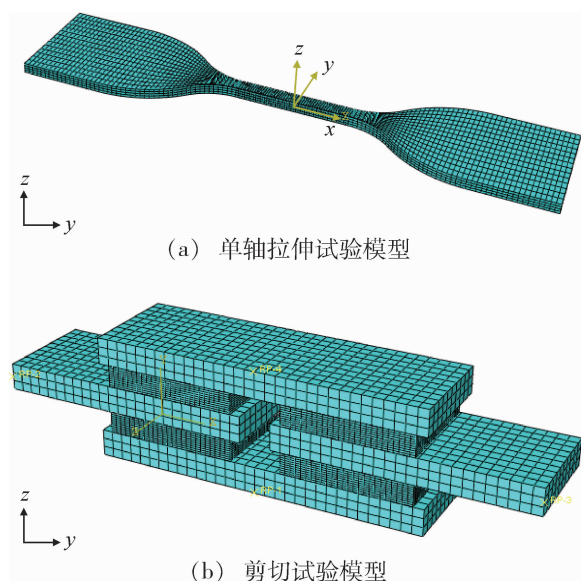


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

#### 4.1 单轴拉伸试验模拟结果

ABAQUS 有限元计算结果与试验结果比较见图 10。-55、-40、20、65℃ 下, Yeoh 模型、三阶五项式模型、四阶八项式模型的模拟结果曲线与试验曲线最为接近, Neo-Hookean 模型整体计算的精度较差, 而单轴拉伸情况下 Mooney-Rivlin 模型拟合的模型参数在  $\gamma=15\%$  左右有限元计算就发散了, 因此在该情况的分析中忽略该本构模型。

应力应变图中按应变划分不同区域比较各模型的计算误差, 见图 11。可以得到, 单轴拉伸下, 应变小于 30% 内, -55 ~ 65℃ 下 Neo-Hookean 模型计算误差最小, 四阶八项式模型次之, 误差均控制在 15% 以内, 各模型误差随温度的升高先减小后增大, 0℃ 附近获得的模型参数计算误差最小, 最符合实际情况; 应变在 30% ~ 50% 内, -55 ~ 65℃ 下四阶八项式模型误差最小, 控制在 15% 以内, 各模型误差同样随温度的升高先减小后增大; 应变在 50% ~ 400% 内, -55 ~ 65℃ 下三阶五项式模型与四阶八项式模型误差几乎相近, 都在 5% 以内, Yeoh 模型误差控制在 10% 附近, 各模型受温度影响较小; 应变大于 400% 下, -55 ~ 65℃ 下 Yeoh 模型与三阶五项式模型计算误差几乎相等, 且受温度影响较小, 均在 4% 附近, 而四阶八项式模型的计算误差随温度升高而减小, 适用于高温下的计算。

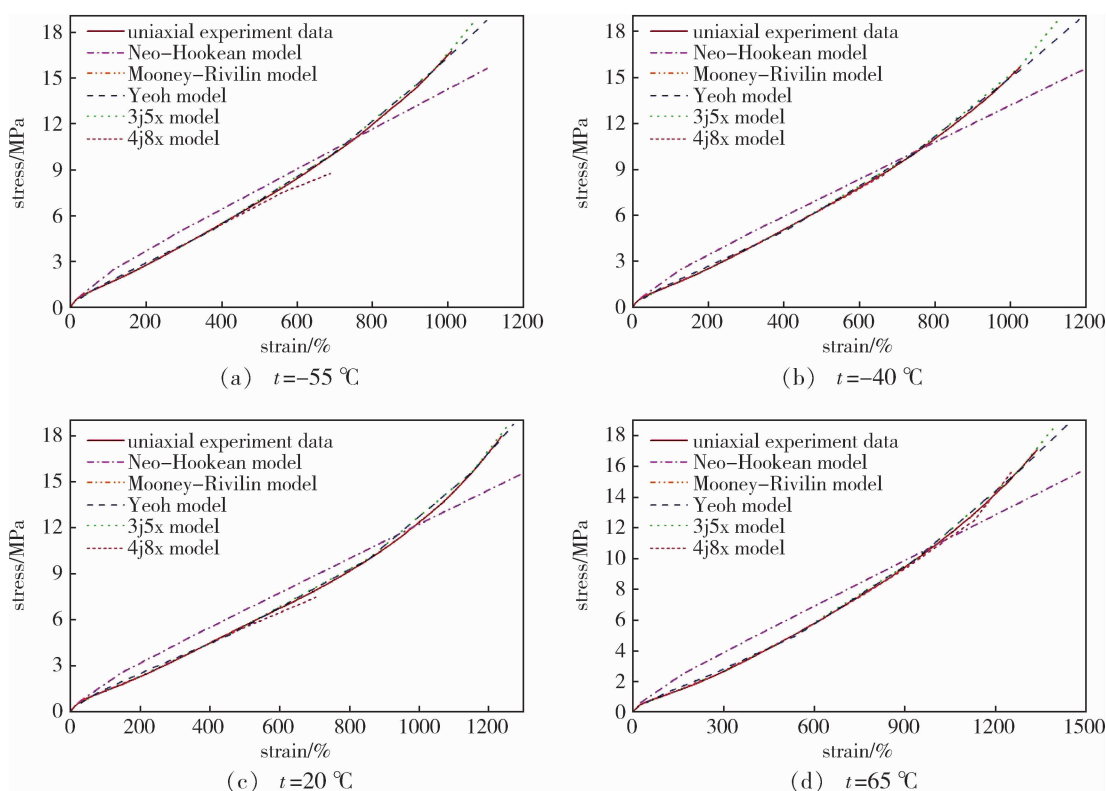


图 10 丁异戊橡胶单轴拉伸下试验与计算结果对比

Fig. 10 Comparison of uniaxial tensile test and numerical simulation of butyl isoprene rubber

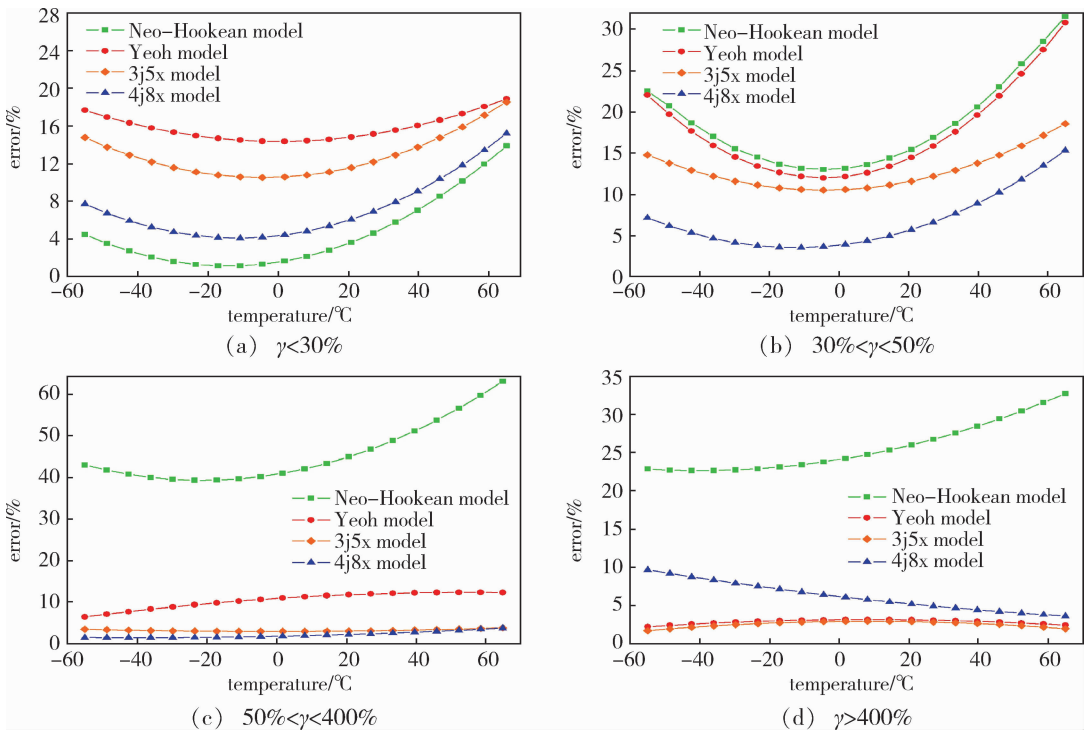


图 11 单轴拉伸下各本构模型有限元计算误差  
 Fig. 11 Finite element calculation error of models under uniaxial tension

#### 4.2 四重片剪切试验模拟结果

ABAQUS 有限元计算结果与试验结果对比见图 12。可以看到, Yeoh 模型的结果曲线与试验曲线最为接近, 其次是三阶五项式模型, 三阶五项式模型同 Yeoh 模型一样都能准确描述橡胶材料的变形趋势, 三阶五项式要求更多的材料参数, 并且计算精度也没有 Yeoh 模型的好, 但三阶五项式也有优点, 它比 Yeoh 模

型更容易计算收敛, 能描述 Yeoh 模型不能描述的更大变形; Neo-Hookean 模型与 Mooney-Rivlin 模型在大变形下精度是很差的, 只能大体说明橡胶材料在小应变区域内的变化趋势; 四阶八项式模型要求更多的材料参数, 但通过 ABAQUS 软件只能计算到  $\gamma=30\%$  左右, 而它描述的是大变形情况, 针对有限元模拟难以收敛, 在该情况的分析中忽略该本构模型。

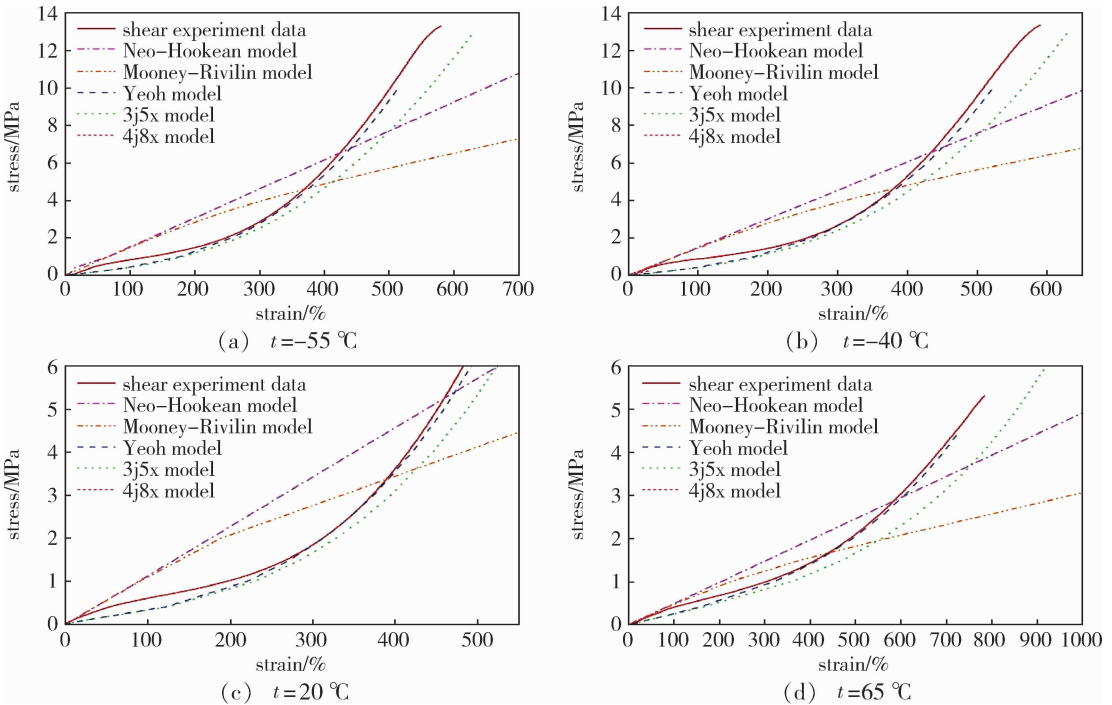


图 12 丁异戊橡胶剪切下试验与计算结果对比

Fig. 12 Comparison of shear test and numerical simulation of butyl isoprene rubber

同样,在应力应变图中按应变划分不同区域,比较各模型的计算误差(图13)。简单剪切下,应变小于50%内,-55~65℃下 Neo-Hookean 模型与 Mooney-Rivlin 模型的计算误差最小,且模型计算误差有随温度升高而减小的趋势;应变在50%~250%内,-55~20℃下 Yeoh 模型与三阶五项式模型计算

误差相当,而在20~65℃下 Yeoh 模型计算误差明显低于三阶五项式模型;应变大于250%时,-55~65℃下 Yeoh 模型计算误差稳定且控制在10%以内,而三阶五项式模型误差在20%左右,二者计算误差随温度变化不大。

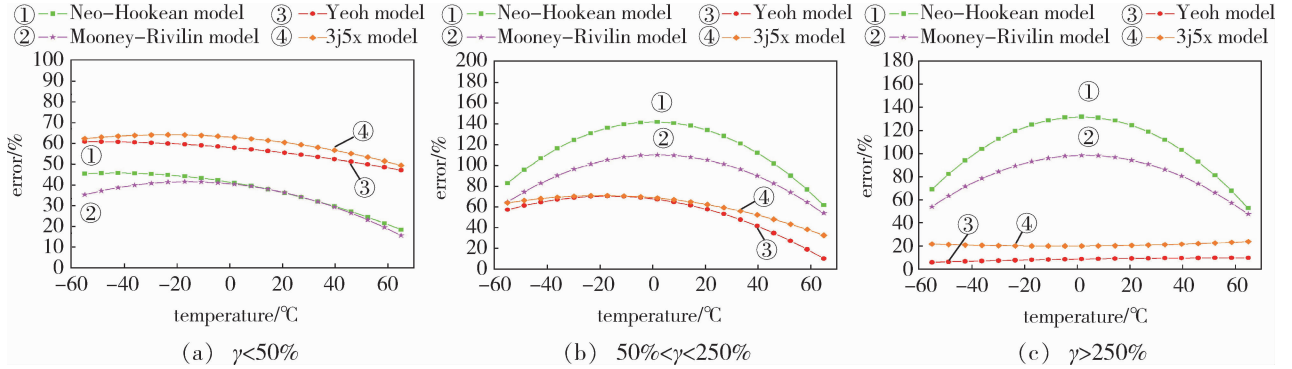


图13 剪切下各本构模型有限元计算误差

Fig. 13 Finite element calculation error of models under shear test

根据以上的误差分析,得到丁异戊橡胶在不同温度不同应变范围本构模型的适用范围,见表3。柔性接头弹性件的剪切应变一般在150%~300%之间,因此,针对宽温域下以丁异戊橡胶为弹性件

的柔性接头有限元计算,丁异戊橡胶本构模型选择如下:在-55~20℃内,Yeoh 模型与三阶五项式模型都可采用,在20~65℃内 Yeoh 模型计算精度最高,推荐使用。

表3 不同温度不同应变下丁异戊橡胶本构模型适用性

Tab. 3 The applicability of constitutive models of butyl isoprene rubber at different temperatures and strains

温度/℃	单轴拉伸				剪切		
	$\gamma < 30\%$	$30\% < \gamma < 50\%$	$50\% < \gamma < 400\%$	$\gamma > 400\%$	$\gamma < 50\%$	$50\% < \gamma < 250\%$	$\gamma > 250\%$
-55 ~ 20	N-H	四阶八项式	三阶五项式、 四阶八项式	Yeoh、 三阶五项式	N-H、 M-R	Yeoh、 三阶五项式	Yeoh
20 ~ 65						Yeoh	

## 5 结论

(1) 基于一种变形对其他变形的结果预测中,阶数越高的本构模型预测能力越差,低阶的 Neo-Hookean 模型预测精度最高,当试验条件受限时优先考虑开展剪切试验。

(2) 单轴拉伸试验数据拟合的 Mooney-Rivlin 模型参数与剪切试验数据拟合的四阶八项式模型参数在有限元计算中均不易收敛,因此不建议采用 Mooney-Rivlin 模型拟合单轴拉伸试验数据及四阶八项式模型拟合剪切试验数据。

(3) 针对丁异戊橡胶材料,-55~20℃内,应变小于50%内 Neo-Hookean 模型是首选,应变在50%~250%内采用三阶五项式模型,应变大于250%时 Yeoh 模型最精确,20~65℃内应变小于50%内 Neo-Hookean 模型最好,应变在50%~300%时 Yeoh 模型

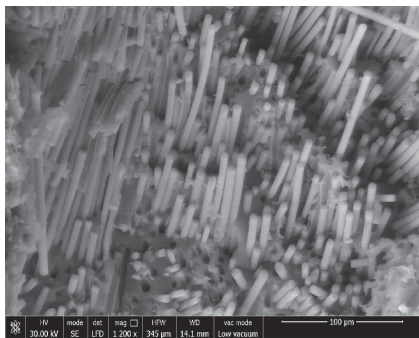
与三阶五项式模型都可选择,应变大于300%时 Yeoh 模型最精确。

(4) 在宽温域下弹性件为丁异戊橡胶的柔性接头有限元计算分析中,弹性件本构模型选择如下:在-55~20℃内,Yeoh 模型与三阶五项式模型都可采用,在20~65℃内 Yeoh 模型计算精度最高,推荐使用。

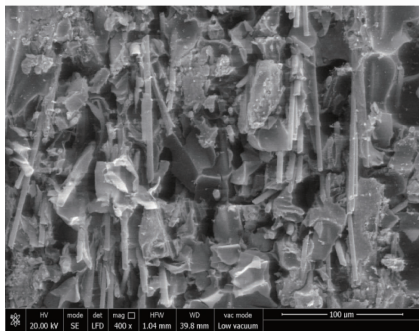
## 参考文献

[1] 任全彬,等. 固体火箭发动机设计技术基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2016.  
 [2] 阮崇智. 战术导弹固体发动机的关键技术问题[J]. 固体火箭技术,2002,25(2):8-12.  
 [3] CAVENY L H, GEISLER R L, ELLIS R A, et al. Solid rocket enabling technologies and milestones in the United States [J]. Journey of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1038-1066.





(a) 高硅氧/酚醛树脂



(b) 高硅氧/酚醛泡沫

图5 复合材料断面的SEM照片

Fig.5 SEM images of composites section

### 3 结论

(1) 酚醛泡沫与酚醛树脂的化学结构基本相同,

但两者的物理形态结构差异明显,酚醛泡沫的孔隙率显著高于酚醛树脂;

(2) 酚醛泡沫与酚醛树脂的残重率、热失重温度和固化反应温度相当,说明两者的耐热性能和固化工工艺条件相近;

(3) 相对于高硅氧/酚醛树脂复合材料,高硅氧/酚醛泡沫复合材料的密度更低、隔热性能更好,但是力学性能较低,适用于承力要求较低且防隔热要求较高的应用环境。

### 参考文献

[1] 张宗强,匡松连,尚龙,等. 树脂基复合材料长时间烧蚀防热的应用研究[J]. 宇航材料工艺,2007,37(6):29-31.

[2] 郭梅梅,匡松连,尚龙,等. 树脂基复合材料的分解防热效率[J]. 宇航材料工艺,2012,42(2):58-60.

[3] 孙冰,林小树,刘小勇,等. 硅基材料烧蚀模型研究[J]. 宇航学报,2003,24(3):282-287.

[4] 王富鑫. 酚醛泡沫塑料应用及制备[J]. 热固性树脂,2002,17(4):36-38.

[5] 张莉. 酚醛泡沫绝热材料的常温制备及性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.

[6] 杨彦峰,何继敏,陈同海. 玻璃纤维/芳纶纤维混杂增强酚醛泡沫的研究[J]. 中国塑料,2014,28(1):17-21.

[7] 宋寒,吴晓青. 短玻璃纤维/K2Ti6O13晶须改性酚醛泡沫的性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(4):62-65.

(上接第20页)

[4] UHRIG G, ROUSSILLE C. Design drivers and technologies for solid propulsion of interceptors[R]. Arcachon, France: 1st AAAF International Conference in Missile Defence, 2003.

[5] 张晓光,刘宇,任军学,等. 小型柔性接头推力矢量性能试验[J]. 航空动力学报,2012,27(12):2836-2841.

[6] 张林军,崔万继,曾金芳,等. 柔性接头弹性件用橡胶材料的研究现状及发展趋势[J]. 弹性体,2017,27(3):77-82.

[7] 余惠琴,刘晓红,张金明,等. 耐高低温耐压橡胶弹性材料[J]. 宇航材料工艺,2014,44(3):42-45.

[8] 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,2002.

[9] 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):50-28.

[10] YEOH O H. Some forms of the strain energy for rubber[J]. Rubber Chemistry and technology, 1993,66(5):754-771.

[11] 余惠琴,宋义斌,刘晓红. 宽温域柔性接头用硅橡胶弹性材料研究[J]. 固体火箭技术,2008,31(1):92-95.

[12] 吕亚男,郭玲梅,邓志方,等. 基于自动网格法的硅橡胶温度相关的拉伸力学行为[J]. 高分子材料科学与工程,2016,32(2):104-108.

[13] 严永明. 低温环境下橡胶材料超弹性本构模型探究[D]. 北京:燕山大学,2016.

[14] 陈家照,黄闽翔,王学仁,等. 几种典型的橡胶材料本构模型及其适用性[J]. 材料导报:纳米与新材料专辑,2015(1):118-120.

[15] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业,2014,61(8):453-457.

[16] 曹翠微,陈伟民,蔡体敏,等. 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(6):36-40.