

# 航空用三元乙丙橡胶的拉伸/压缩力学行为研究

吴 健<sup>1</sup>, 张传兵<sup>1</sup>, 王友善<sup>1</sup>, 蒋洪罡<sup>2</sup>, 陆 明<sup>2</sup>

[1. 哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所, 山东 威海 264209; 2. 中国航空发动机集团北京航空材料研究院, 北京 100095]

**摘要:**以航空用三元乙丙橡胶(EPDM)材料为研究对象,基于单轴拉伸压缩试验,采用有限元仿真方法研究在20~140 °C范围内温度对EPDM拉伸/压缩力学行为的影响。结果表明,随着温度的升高,EPDM的Mullins效应减弱,拉伸力和拉伸伸长率均显著下降。

**关键词:**航空材料; EPDM; 温度; 力学行为; 有限元仿真

**中图分类号:** TQ333.4; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2018)11-0000-04

三元乙丙橡胶(EPDM)及其复合材料以卓越的耐热、抗压、耐辐射、耐化学介质、耐老化、电绝缘、高弹性等性能在汽车轮胎、航空航天装备的密封元件、矿山开采设备的减震元件等领域发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>,特别是在航空航天领域,以EPDM为基础的密封元件虽然用量不大,但却是关系高端设备性能安全乃至整个飞行器安全的不可或缺的零部件。近年来,随着EPDM的广泛应用,国内外一些学者对EPDM的力学性能展开了一系列研究。J. Davenas等<sup>[4]</sup>采用光谱分析和拉伸试验相结合的方法研究了 $\gamma$ 光辐射对用作电缆绝缘材料的EPDM物理性能的影响。S. Akhlaghi等<sup>[5]</sup>对比分析了纳米氧化锌和常规氧化锌对EPDM物理性能的影响。T. Šarac等<sup>[6]</sup>研究了由于热处理和 $\gamma$ 光辐射处理等而劣化的EPDM的物理性能。言克斌等<sup>[7]</sup>采用自行研制的半导体高低温调控装置进行的试验研究表明,EPDM的力学性能受温度和应变率影响明显,其刚度随着应变率的增大而提高,柔性随着温度的提高而增强。王振华等<sup>[8]</sup>试验研究了纳米氧化锌/EPDM复合材料的物理性能和导热性能,结果表明,改性纳米氧化锌/EPDM复合材料的

物理性能和导热性能均优于炭黑和白炭黑补强的EPDM胶料。

航空航天装备工作环境极为恶劣、复杂,以航空液压力为例,宽温和高压是其主要工作特点,其温度范围为-54~135 °C,压力高达34.5 MPa<sup>[9]</sup>。航空航天装备宽温化、高压化是衡量一个国家综合实力的重要标志,但由此引发的泄漏问题极为险峻,由密封橡胶材料失效导致的维修成本可能高达百千倍密封件的价格<sup>[10]</sup>,甚至导致航空航天装备的毁灭性灾难。橡胶材料的力学性能受温度影响较大,而对高温环境下EPDM的力学性能研究鲜有涉及,因此,深入研究温度对EPDM力学性能的影响是极其必要的。

本工作以航空用EPDM为研究对象,采用试验研究和仿真分析相结合的方法,分析20~140 °C温度范围内其力学行为的变化,以揭示温度对EPDM力学性能的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 试验材料和试样制备

EPDM由北京航空材料研究院提供。哑铃型拉伸试样采用I型裁刀由CP-25-II型气动冲压机提供动力源并按照GB/T 2491—2003规定的相应方法制备,其标距长度 $l_1=30$  mm,试验宽度 $b_1=5.8$  mm,厚度 $h_1=2.35$  mm。EPDM压缩试样则为北京航空材料研究院提供的圆柱体试样,其直径 $d_1=9.75$  mm,高度 $h_2=10$  mm。

**基金项目:**国家自然科学基金重大专项(51790502);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018QEE004);威海市科技计划项目(2017DXGJ011)

**作者简介:**吴健(1984—),男,浙江义乌人,哈尔滨工业大学(威海)讲师,博士,主要从事橡胶及其复合材料、轮胎力学等研究工作。

**E-mail:** wu1234jian5678@163.com

## 1.2 试验设备及条件

采用UH4204GD型高低温拉伸试验机进行拉伸压缩试验。

为进行高低温条件下的压缩试验,自行研制了拉伸转压缩的专用夹具,如图1所示。试验条件:温度分别为20,50,80,110和140℃;拉伸速度为 $500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;压缩速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。拉伸和压缩应力应变性能均根据相应的国家标准进行测试。



图1 高低温压缩专用夹具

## 2 有限元仿真模型

### 2.1 材料本构模型

以EPDM为代表的超弹性材料的非线性行为应采用应变能函数进行描述<sup>[11]</sup>,Mooney-Rivlin模型简单且能够很好地描述超弹性材料的非线性变形行为,故采用该模型对试验数据进行拟合。假设EPDM为不可压缩材料,其单轴拉伸压缩时的应变能函数式为

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \quad (1)$$

式中, $W$ 为应变能函数; $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 为Rivlin系数; $I_1$ 和 $I_2$ 分别为第一和第二应变不变量<sup>[12]</sup>。

采用Abaqus有限元分析软件对试验数据进行拟合,得到不同温度下模型参数 $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 的值,如表1所示。

表1 不同温度下本构的模型参数 MPa

温度/℃	$C_{10}$	$C_{01}$
20	0.980 1	-0.177 5
50	0.979 6	-0.186 6
80	0.945 3	-0.194 4
110	0.846 2	-0.218 6
140	0.739 3	-0.220 6

### 2.2 网格划分和边界条件

EPDM单轴拉伸二维有限元模型如图2所示,共包含610个单元、682个节点,网格单元类型为CPS4R。固定拉伸试样,约束底边3个自由度。采用位移加载方式,仅在试样上端面施加Y向正位移,约束其X向和UR1向自由度。



图2 EPDM拉伸试样有限元模型

## 3 结果与讨论

### 3.1 Mullins效应

橡胶类材料在首次拉伸和卸载后会显著发生软化,即发生Mullins效应<sup>[13]</sup>。影响Mullins效应的因素较多,主要包括胶料配方<sup>[14]</sup>、拉伸速度<sup>[15]</sup>、应变率和温度<sup>[16]</sup>等。试样经3次拉伸的Mullins效应曲线如图3所示。

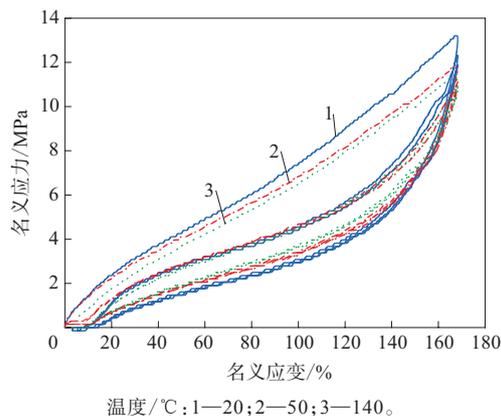


图3 Mullins效应曲线

从图3可以看出,随加载次数的增加,EPDM最大应力呈现出明显下降趋势,即出现了Mullins效应。首次加载时橡胶高分子链分布紊乱,内摩擦力较大,故滞后环较大,表现为残留变形较大,而在后续加载过程中,EPDM分子链的分布较规则,滞后环逐渐减小,直至滞后环包围面积趋于定值。另外,随着温度的提高,加载过程中最大应力逐渐减小,滞后环包围面积也随之减小。主要原因是随着温度的提高,EPDM试样内部积累的热能和熵值使橡胶高分子链易进行剧烈的热运动,甚至发生降解,在宏观上表现为试样表面发粘,从

而导致其力学性能下降。除此之外,温度也会影响橡胶高分子由于发生相对滑移而积累的应力释放,温度越高,应力释放越多,即出现随着测试温度升高Mullins效应减弱的现象。

在对试样进行单轴拉伸时,外力所做的功由两部分组成,即移动项和粘附项。移动项用以改变试样的相对位置,而粘附项则用以克服橡胶分子链间的摩擦。显然,粘附项(损耗能量)在数值上等效于应力-应变所包围的面积。由此计算出在20,50,80,110和140 °C下首次加载时的损耗能量分别为5.76,5.48,4.49,3.91和3.62 J。

由此可见,随着测试温度的升高,试样的损耗能量逐渐减小,即出现Mullins效应减弱的现象。

### 3.2 拉断伸长率

EPDM试样的拉断力和拉断伸长率随温度的变化曲线如图4所示。

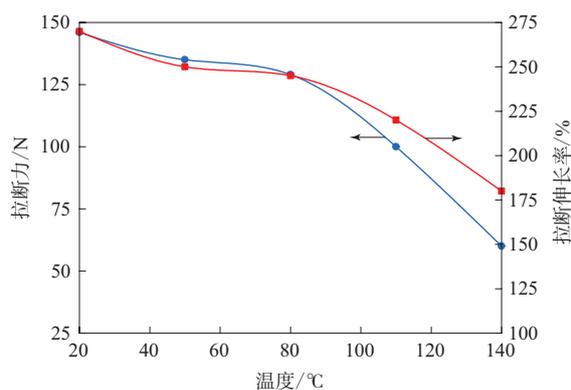


图4 拉断力和拉断伸长率随温度的变化曲线

从图4可以看出,试样的拉断力和拉断伸长率均随着试验温度的升高而降低。而在温度高于80 °C后,拉断力和拉断伸长率下降明显加快。从EPDM高分子链的角度考虑,测试温度升高改变了分子链的排列顺序并加剧分子运动。在拉伸力的作用下,橡胶分子链更容易沿应力变化方向运动,使其拉断力和拉断伸长率均随着环境温度升高而降低。

不同温度下EPDM试样的断裂位置如图5所示,温度为140 °C时拉伸过程仿真的Mises应力云图如图6所示。

从图5和6可以看出,裂纹初始位置及断裂面均处于试样对称面之上,断裂位置与有限元分析中Mises应力最大点位置一致。随着测试温度的升

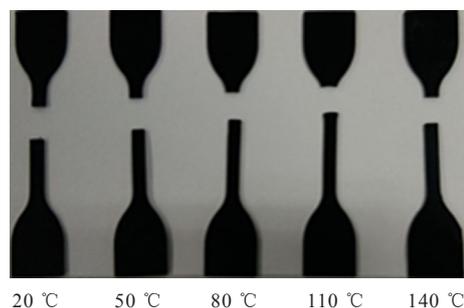


图5 EPDM试样断裂面位置

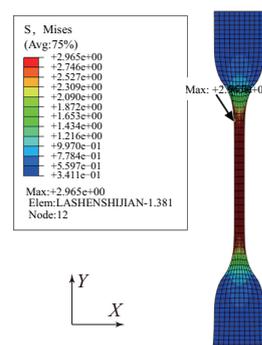


图6 温度为140 °C时的Mises应力云图

高,试样的断裂面沿Y轴方向先上升然后下降。此外,裂纹的曲率半径也随着温度的升高先增大后减小。

在拉伸应力作用下,当应力大于材料的临界应力值时,试样表面将产生垂直于拉伸方向的局部裂纹。温度对这种裂纹影响很大,严重影响橡胶制品的使用寿命。这进一步证明当温度发生变化时,EPDM的性能也随之发生规律性变化<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

环境温度对EPDM的力学行为影响较大。以航空用EPDM材料为研究对象,基于单轴拉伸压缩试验,结合有限元仿真方法对20~140 °C温度范围内橡胶力学性能的变化规律进行研究,得到如下主要结论。

(1) EPDM的Mullins效应显著,随着温度升高,试样能量损耗逐渐减小,即Mullins效应减弱。

(2) EPDM的拉断力和拉断伸长率均随着试验温度的升高而降低。当温度高于80 °C后,拉断力和拉断伸长率下降明显加快。

## 参考文献:

[1] Kim J, Bae J, Lee J, et al. Preparation and Properties of High-perfor-

- mance Recyclable Ethylene Propylene Diene Rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(44):1-9.
- [2] 余慧,何显儒,容耀强,等. 氟橡胶/三元乙丙橡胶密封材料的制备及性能研究[J]. 润滑与密封, 2013, 38(1):39-44.
- [3] 刘莹,陈垚,高志,等. 三元乙丙密封材料不同工况下的摩擦性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5):461-465.
- [4] Davenas J, Stevenson I, Celette N, et al. Influence of the Molecular Modifications on the Properties of EPDM Elastomers under Irradiation[J]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section B, 2003, 208(1):461-465.
- [5] Akhlaghi S, Kalae M, Mazinani S, et al. Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on Isothermal Cure Kinetics, Morphology and Mechanical Properties of EPDM Rubber[J]. Thermochimica Acta, 2012, 527(2):91-98.
- [6] Šarac T, Quiévy N, Gusarov A, et al. Influence of  $\gamma$ -irradiation and Temperature on the Mechanical Properties of EPDM Cable Insulation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 125:151-155.
- [7] 言克斌,黄正祥,刘荣忠,等. 温度对高应变率下三元乙丙橡胶力学性能影响的试验研究[J]. 试验力学, 2012, 27(6):684-688.
- [8] 王振华,卢咏来,张立群. 纳米氧化锌/EPDM复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业, 2009, 56(10):581-587.
- [9] Nikas G K, Almond R V, Burrigge G. Experimental Study of Leakage and Friction of Rectangular, Elastomeric Hydraulic Seals for Reciprocating Motion from  $-54$  to  $+135$  °C and Pressures from 3. 4 to 34. 5 MPa [J]. Tribology Transactions, 2014, 57(5):846-865.
- [10] Xi Zhang, Gang Wang, Peng Xia, et al. Finite Element Analysis and Experimental Study on Contact Pressure of Hydraulic Support Bud-shaped Composite Sealing Ring[J]. Advances in Mechanical Engineering. 2016, 8(10):1-9.
- [11] 吴健,张传兵,徐春财,等. 温度对胎面胶压缩力学性能的影响[J]. 橡胶工业, 2017, 64(7):422-425.
- [12] Amin A F, Wiraguna S I, Bhuiyan A. R, et al. Hyperelasticity Model for Finite Element Analysis of Natural and High Damping Rubbers in Compression and Shear[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(1):54-64.
- [13] Mullins L J. Effect of Stretching on the Properties of Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1948(2):281-300.
- [14] 李庆,杨晓翔. N330炭黑增强天然橡胶材料力学性能的试验研究[J]. 试验力学, 2014, 29(1):42-50.
- [15] 王鹭,付宾,杨晓翔. 炭黑增强天然橡胶Mullins效应的影响因素研究[J]. 机电工程, 2016, 33(1):37-42.
- [16] Cui T, Chao Y J, Zee J W V. Thermal Stress Development of Liquid Silicone Rubber Seal under Temperature Cycling [J]. Polymer Testing, 2013, 32(7):1202-1208.
- [17] Derham C J. Transient Effects Influencing Sealing Force in Elastomeric O Ring Seals[J]. Plastics Rubber & Composites Processing & Applications, 1997, 26:130-136.

收稿日期:2017-08-23

## Research on Tensile/Compression Mechanical Behavior of EPDM for Aviation

WU Jian<sup>1</sup>, ZHANG Chuanbing<sup>1</sup>, WANG Youshan<sup>1</sup>, JIANG Honggang<sup>2</sup>, LU Ming<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Taking EPDM material for aviation as a researching object, based on uniaxial tensile/compression experiment, the influence of temperature in range of  $20\sim 140$  °C on tensile/compression mechanical behavior of EPDM was studied by finite element method (FEM). The results indicated that the Mullins effect weakened, and tensile force and tensile elongation at break of EPDM decreased significantly with the increase of temperature.

**Key words:** aviation material; EPDM; temperature; mechanical behavior; finite element simulation