

# 硫化橡胶应变能的计算方法

李道豫<sup>1</sup>, 樊艳艳<sup>2</sup>, 邱志远<sup>1</sup>, 冯文昕<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>, 王振<sup>3</sup>

[1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司 贵阳局, 贵州 贵阳 550081; 2. 西北橡胶塑料研究设计院有限公司 国家橡胶密封制品质量监督检验中心, 陕西 咸阳 712023; 3. 中国南方电网超高压输电公司 检修试验中心, 广东 广州 510000]

**摘要:** 利用硫化橡胶拉伸试验数据和EXCEL软件, 采用梯形网格法和曲线拟合法两种方法计算硫化橡胶应变能(硫化橡胶在拉伸或压缩过程中功转化成的内能)。两种方法所得结果均准确、可靠。原始数据采集密度越大, 硫化橡胶应变能计算结果越准确。

**关键词:** 硫化橡胶; 应变能; 梯形网格法; 曲线拟合法; EXCEL软件

**中图分类号:** TQ330.1/.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2019)12-0948-03

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.12.0948



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

硫化橡胶应变能是指其在拉伸或压缩变形过程中功转化成的内能。由于硫化橡胶是弹性体, 伴随弹性变形, 其可以积蓄能量, 从而具备对外界做功的潜在能力, 这种形式的能量被称为弹性应变能。

硫化橡胶应变能描述的是形变过程中总的能量<sup>[1-2]</sup>, 反映其在力的作用下抵抗变形的能力, 可以表征刚度、模量等性能。应变能更适用于表征减震类橡胶产品的力学性能<sup>[3]</sup>。

对于橡胶行业内经常进行的拉伸性能测试, 应变能是指从加载开始一直到断裂, 材料吸收能量特性的度量, 等于力-位移曲线下的全部面积, 是韧度的一种度量。

本工作以硫化橡胶拉伸性能测试为例, 对其拉伸应变能进行计算。以应变能作为硫化橡胶的性能表征参数, 可反映其弹性变形能力。

## 1 实验

试样为1型哑铃状硫化橡胶。

采用CMT4203型SANS微机控制电子万能试验机[美特斯工业系统(中国)有限公司产品]

**作者简介:** 李道豫(1983—), 男, 贵州贵阳人, 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司高级工程师, 学士, 主要从事高压直流输电运维的研究。

**E-mail:** 36920089@qq.com

按照GB/T 528—2009进行测试, 拉伸速度为500 mm·min<sup>-1</sup>。

试验数据存储在应用程序安装位置Sample文件夹下, 文件为Access数据库, 力-位移数据在OriginalData数据表中, 如图1所示。

ID	TestNo	Force	LoadRate	Position	ForceRate
1	62113	0.016	1.232066	0.0881444	
2	62113	0.047	1.38406	0.1147317	
3	62113	0.094	1.538441	0.168878	
4	62113	0.125	1.695838	0.2250752	
5	62113	0.156	1.859231	0.2776584	
6	62113	0.187	1.993104	0.3313171	
7	62113	0.218	2.166339	0.3819024	
8	62113	0.25	2.345951	0.4609488	
9	62113	0.281			

图1 力-位移试验数据存储位置

## 2 应变能的计算

将拉伸力-位移试验数据导入EXCEL软件中, 得到力-位移曲线, 如图2所示。

硫化橡胶的应变能可用图2中曲线与横坐标围成的区域面积来表示。

### 2.1 梯形网格法

梯形网格法在地质学中多有运用, 本工作将其引入对硫化橡胶的弹性应变能分析计算<sup>[4-5]</sup>。

将力-位移曲线与横坐标围成的区域网格化,

如图3所示。

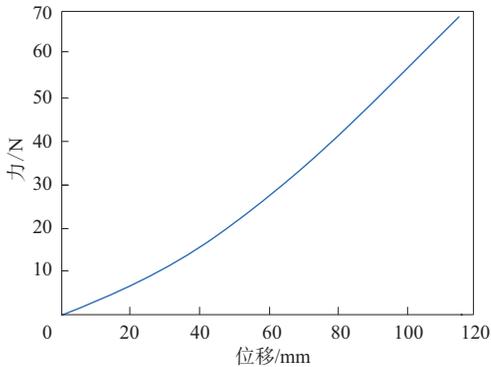


图2 试样力-位移曲线

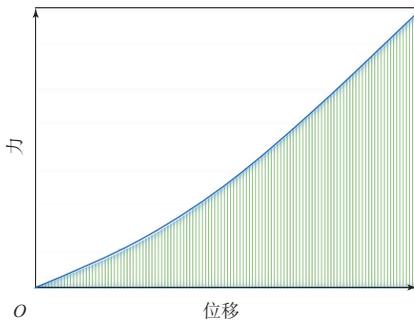


图3 力-位移曲线的条形网格

力-位移曲线与横坐标围成的总面积,等于所有网格面积的总和。单个网格的形状近似于梯形,将每个梯形的面积计算出来,然后相加就能计算出总面积。网格划分的越精细,计算得到的面积越精确,具体计算如下。

试验数据的第2点和第1点围成的单个梯形网格的面积可在单元格(D4)中输入“ $= (C4+C3)/2 * (B4-B3)$ ”(见图4)计算得到,其他梯形的面积可通过填充公式到对应的梯形面积单元格计算得到。对所有单个梯形面积的单元格求和,即得到力-位移曲线与横坐标围成的面积。

对所有梯形面积求和,得到本工作硫化橡胶应变能为3.345 298 J。

### 2.2 曲线拟合法

曲线拟合是构造一条曲线或数学函数的过程,该曲线或数学函数最适合一系列可能受约束的数据点。拟合曲线可以作为数据可视化的辅助工具,在没有数据的情况下能够推断函数的值,并总结两个或多个变量之间的关系。给定类型的拟



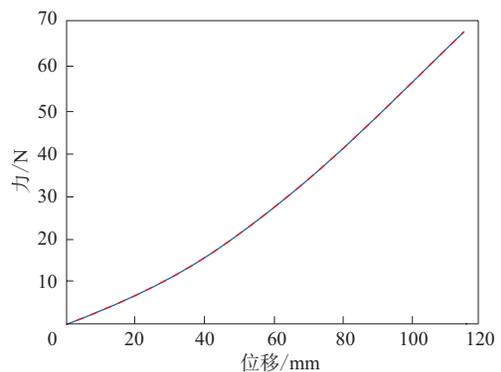
图4 EXCEL中单个梯形面积的计算

合曲线通常不是唯一的<sup>[6-7]</sup>。

利用EXCEL中的趋势线工具<sup>[8]</sup>,对图2中力-位移曲线做趋势线。设置趋势线格式如图5所示。利用EXCEL趋势线工具对图2的力-位移曲线进行拟合,如图6所示。



图5 趋势线格式设置



—力-位移曲线; - - -拟合曲线。

图6 EXCEL中趋势线工具对力-位移曲线的拟合

图6中力-位移拟合曲线的拟合程度越接近于1,曲线拟合的效果越好。一般趋势线工具的顺序选择为6时,拟合程度就达到理想效果。

拟合公式为

$$f(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 + b_6x^6 \quad (1)$$

式中,  $b_1 \sim b_6$  为常数。

对式(1)进行积分, 得到力-位移曲线面积的计算公式为

$$\int f(x) dx = b_0x + b_1x^2/2 + b_2x^3/3 + b_3x^4/4 + b_4x^5/5 + b_5x^6/6 + b_6x^7/7 \quad (2)$$

将位移最大值代入式(2), 可求得曲线与横坐标围成的面积。

图6中力-位移趋势线公式为

$$f(x) = 0.0191 + 0.3257x - 1.639 \times 10^{-3}x^2 + 1.221 \times 10^{-4}x^3 - 1.338 \times 10^{-6}x^4 + 6.700 \times 10^{-9}x^5 - 1.405 \times 10^{-11}x^6 \quad (3)$$

对应积分公式为

$$\int f(x) dx = 0.0191x + 0.3257x^2/2 - 1.639 \times 10^{-3}x^3/3 + 1.221 \times 10^{-4}x^4/4 - 1.338 \times 10^{-6}x^5/5 + 6.700 \times 10^{-9}x^6/6 - 1.405 \times 10^{-11}x^7/7 \quad (4)$$

将位移最大值115.82 mm代入积分公式(4), 计算硫化橡胶应变能为3.345 315 J, 与梯形网格法得到的面积几乎一样。

### 3 结论

本工作介绍了硫化橡胶应变能的两种计算方

法。利用EXCEL的函数和趋势线工具可以方便地得到硫化橡胶的应变能。应变能计算结果的准确度受原始数据采集密度的影响, 数据采集密度越大, 计算结果越准确。

### 参考文献:

- [1] 杨迎亮, 李昱霖, 李轶男, 等. 橡胶材料拉伸强度测量结果不确定度评定[J]. 中国标准化, 2018(S1): 245-247.
- [2] Onate C A. Bound State Solutions of the Schrödinger Equation with Second Pöschl-teller Like Potential Model and the Vibrational Partition Function, Mean Energy and Mean Free Energy[J]. Chinese Journal of Physics, 2016, 54(2): 165-174.
- [3] 杜海洋. 隔震支座橡胶材料力学性能试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [4] Igor Florinsky. Derivation of Topographic Variables from a Digital Elevation Model Given by a Spheroidal Trapezoidal Grid[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(8): 829-852.
- [5] Gao Jinghui. Trapezoid Grid Finite Difference Seismic Wavefield Simulation with Uniform Depth Sampling Interval[J]. Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition, 2018, 61(8): 3285-3296.
- [6] Kumar Molugaram G, Shanker Rao. Statistical Techniques for Transportation Engineering[M]. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [7] Herbert A. Modern Computational Methods[M]. United States: CRC Press, 2019.
- [8] 徐含青. 利用EXCEL进行线性拟合的应用[J]. 上海计量测试, 2013, 40(2): 55-56.

收稿日期: 2019-09-06

## Calculation Method of Strain Energy of Vulcanized Rubber

LI Daoyu<sup>1</sup>, FAN Yanyan<sup>2</sup>, QIU Zhiyuan<sup>1</sup>, FENG Wenxin<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>3</sup>

(1. Guiyang Bureau, EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd, Guiyang 550081, China; 2. Northwest Rubber and Plastics Research and Design Institute Co., Ltd, Xianyang 712023, China; 3. Maintenance and Test Center, China Southern Power Grid EHV Transmission Company, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** The strain energy of vulcanized rubber (stored internal energy converted from the stretching or compression of vulcanized rubber) was calculated by trapezoid grid method and curve fitting method using tensile test data and EXCEL software. The results of the two methods were accurate and reliable. The higher the collected raw data density was, the more accurate the calculation results of the strain energy would be.

**Key words:** vulcanized rubber; strain energy; trapezoid grid method; curve fitting method; EXCEL software