

文章编号:1674-2869(2017)05-0503-05

高温振动下聚四氟乙烯垫片的松弛与泄漏测试

戴文超,郑小涛*,文翔,喻九阳,徐建民

化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉大学),湖北 武汉 430205

摘要:设计了一种高温下垫片密封性能的测试系统,研究了在100℃时小幅位移控制振动及静态松弛条件下聚四氟乙烯垫片的应力松弛和密封性能,并讨论了载荷比为0.99时3种最大压缩量对聚四氟乙烯垫片的动态应力松弛和泄漏行为的影响,以及在同上最大压缩量下的静态应力松弛和密封性能.结果表明,100℃下聚四氟乙烯垫片的动态应力松弛率随最大压缩量增大而增大,静态应力松弛率随最大压缩量增大有缓慢减小;在静态和动态试验的初始20 s阶段内,应力迅速下降,表现明显的应力松弛,而动态试验更明显;动态松弛实验前后的压差变化约是静态松弛试验的1.1倍.

关键词:聚四氟乙烯垫片;密封性能;高温;小幅振动

中图分类号:TQ 050.4³ **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.05.017

Relaxation and Leakage Test of PTFE Gasket under High Temperature Vibration

DAI Wenchao, ZHENG Xiaotao*, WEN Xiang, YU Jiuyang, XU Jianming

Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety(Wuhan Institute of technology), Wuhan 430205, China

Abstract: The testing system of sealing performance for high-temperature gasket was designed. The stress relaxation and sealing performance of polytetrafluoroethylene (PTFE) gasket under small-amplitude deformation-controlled vibration and static stress relaxation at 100℃ were investigated. The effects of maximum compression on the dynamic stress relaxation and leakage behavior of PTFE were studied. The static stress relaxation and sealing performance of PTFE gasket at load ratio of 0.99 and the maximum compression of 0.3 mm, 0.4 mm and 0.5 mm were further researched. Results show that the dynamic stress relaxation rate of PTFE increases with the maximum compression rising and the static stress relaxation rate of PTFE reduces slowly with the increase of the maximum compression deformation at 100℃. Moreover, the stress decreases rapidly during the initial 20 s in both dynamic and static tests, which shows a remarkable effect of the stress relaxation, especially in the dynamic stress relaxation experiment. The differential pressure of dynamic test is about 1.1 times that of static test.

Keywords: polytetrafluoroethylene gaskets; sealing performance; high temperature; small-amplitude vibration

螺栓法兰垫片密封结构常被用于机械、交通、石化、核能等行业,主要由螺栓、法兰和垫片组成.聚四氟乙烯因其拆卸方便、强度高、密封性能好等

特点被广泛用作密封材料.王明伟^[1]等研究了BT20钛合金热轧棒材在不同温度和初始应力下的高温应力松弛行为.桑聪^[2]和郑小涛^[3]研究柔性石

收稿日期:2017-04-15

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20161508)

作者简介:戴文超,硕士研究生. E-mail:437870333@qq.com

*通讯作者:郑小涛,博士,副教授. E-mail: xiaotaozheng@163.com

引文格式:戴文超,郑小涛,文翔,等.高温振动下聚四氟乙烯垫片的松弛与泄漏测试[J].武汉工程大学学报,2017,39(5):503-507.

DAI W C, ZHENG X T, WEN X, et al. Relaxation and leakage test of PTFE gasket under high temperature vibration [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(5): 503-507.

墨金属波齿复合垫片在高温波动载荷下的密封性能. Bouzid A 和 Nechache A 等^[4-5]对法兰连接进行瞬态和稳态两种条件下的热分析,采用理论分析和数值模拟方法研究其应力分布规律. Bouzid 等人^[6-7]提出了一种计算松弛的方法,用以评估垫片蠕变对螺栓力、垫片力松弛的影响. Alkelani 等^[8]系统研究了垫片蠕变对高温法兰连接系统应力松弛行为的影响. 许珊珊^[9]研究了 PTFE 膜材的应力松弛性能及预测模型分析,通过几种常见的粘弹性本构关系模型对应力松弛曲线进行拟合对比,得出温度和拉伸速率对应力松弛特性的影响. 张红才和喻九阳^[10-11]研究了 25Cr2MoVA 钢的应力松弛行为和高温蠕变特性. 对于聚四氟乙烯垫片在不同初始压缩量下动态应力松弛特性少有研究,特别是在高温下垫片的最大压缩量对应力松弛特性影响更是缺少研究.

1 实验部分

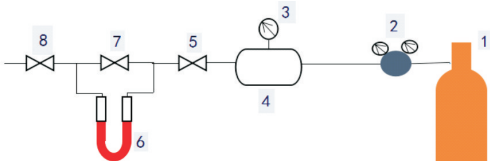
1.1 实验仪器

实验采用 PRL50 型蠕变疲劳试验机(见图 1),由长春机械院设计生产. 为了实现施加试样上的载荷均匀分布,自主设计了一套垫片夹具,夹具的上下端是可拆卸的圆柱钢块,下端钢块间采用球面接触,便于在试验加载过程中自主调节试样在夹具间接触的水平度,从而实现载荷均匀分布的目的. 检测压力变化的装置如图 2 所示,实验开始时阀门全开,通入 0.2 MPa 的氦气,待达到最大载荷时,关闭阀门 7,并开始记录压差计的读数.



图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device



1. 氦气瓶;2. 减压阀;3. 压力表;4. 储气罐;
5. 阀门 1 号;6. U 型压差计;7 阀门 2 号;8 阀门 3 号

图 2 内压检测装置

Fig. 2 Internal pressure detecting device

1.2 实验方案

根据 GB/T 12621—2008《管法兰用垫片应力松弛试验方法》^[12]的规定和要求,实验采用电阻加热炉,加热炉有上、中、下三处电阻丝,用 3 根热电偶分别测量炉内电阻丝对应处位置的温度,实验加载过程中温度允许的波动范围是 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 加载前,先通入 0.2 MPa 的氦气并对垫片加热至 100 $^{\circ}\text{C}$,然后保温 20 min,使试样充分达到热稳定状态后再施加轴向载荷^[13]. 在变形达到设定的最大压缩量时,关闭中间的阀门,通过压差计测量压差的变化.

将垫片压缩量作为控制对象. 一般情况下高温螺栓法兰垫片连接系统会承受一定的波动载荷,而垫片的预紧力一直存在,不考虑完全卸载,只是在一定的小范围内波动. 研究了 100 $^{\circ}\text{C}$ 和小幅位移控制振动条件下聚四氟乙烯垫片的应力松弛和密封性能,讨论最大压缩量分别为 0.3 mm、0.4 mm 和 0.5 mm 且载荷比为 0.99 条件下聚四氟乙烯垫片的动态应力松弛行为及泄漏行为. 作为对比研究,测试了 3 种最大压缩量下的静态应力松弛行为及密封性能. 压差计测量是以载荷加载到最大点为压差测试的时间起始点. 实验参数如表 1 和表 2 所示.

表 1 动态应力松弛实验方案

Tab. 1 Testing scheme of dynamic stress relaxation

动态试验参数 parameter of dynamic test	数值 value
升温过程中施加载荷 / N	10
垫片最大压缩量 / mm	0.4, 0.5, 0.6
垫片最小压缩量 / mm	0.396, 0.495, 0.594
加/卸载速率 / (mm·min ⁻¹)	0.06
实验温度 $t / ^{\circ}\text{C}$	100
施加内压 P / MPa	0.2

表 2 静态应力松弛实验方案

Tab. 2 Testing scheme of static stress relaxation

静态试验参数 parameter of static test	数值 value
升温过程中施加载荷 / kN	0.01
垫片最大压缩量 / mm	0.3, 0.4, 0.5
加/卸载速率 / (mm·min ⁻¹)	0.06
实验温度 $t / ^{\circ}\text{C}$	100
施加内压 P / MPa	0.2

2 结果与讨论

2.1 实验测试结果

操作工况下垫片的密封性能可通过高温螺栓法兰垫片连接系统压力差的变化量表征,而压差的变化量又与垫片应力有关. 通过动态和静态应力松弛试验,经数据处理得到应力时间曲线,发现

应力在达到最大值后的 300 s 基本趋于稳定. 这里仅考虑加载到最大压缩量开始卸载的前 300 s, 静态应力松弛实验的应力-时间曲线如图 3 所示, 小

幅振动应力松弛实验的应力-时间曲线如图 4 所示, 静态和动态应力松弛实验的压差-时间曲线如图 5 所示.

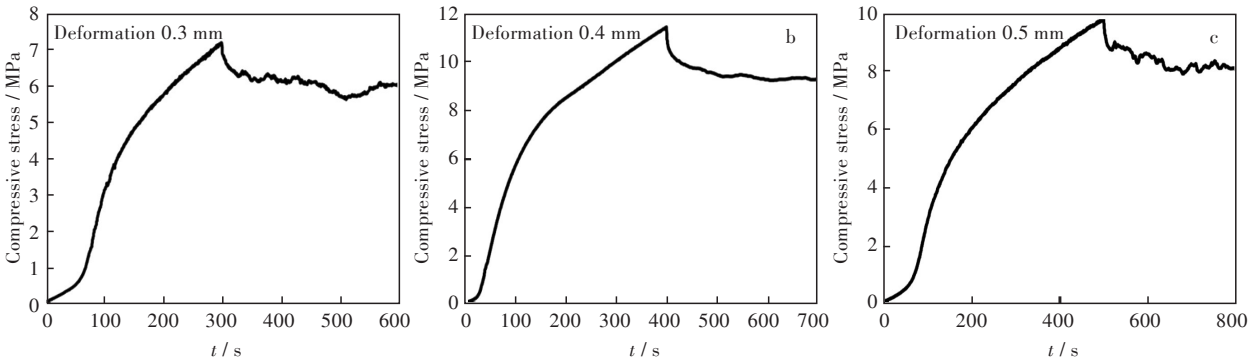


图3 PTFE 垫片在不同最大压缩量下静态应力松弛曲线
Fig. 3 The static stress relaxation curves of PTFE gasket under different maximum amounts of compression

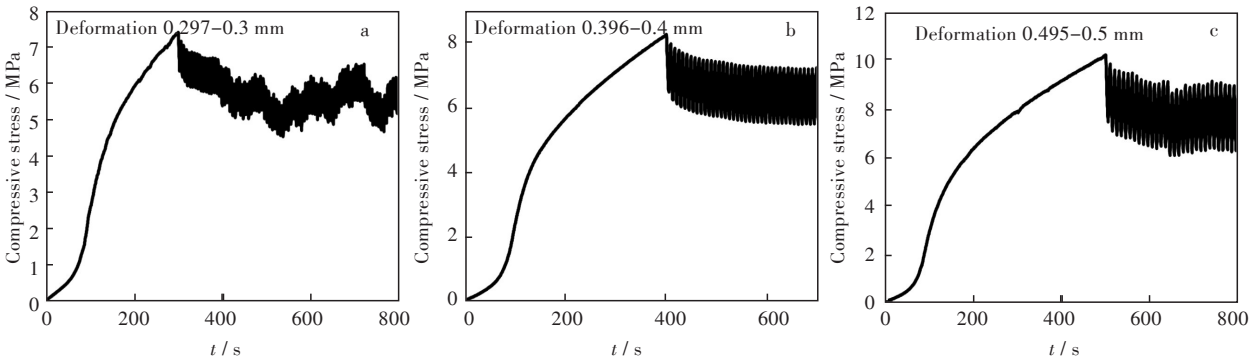


图4 PTFE 垫片在不同最大压缩量下动态应力松弛曲线
Fig. 4 Dynamic stress relaxation curves of PTFE gasket under different maximum amounts of compression

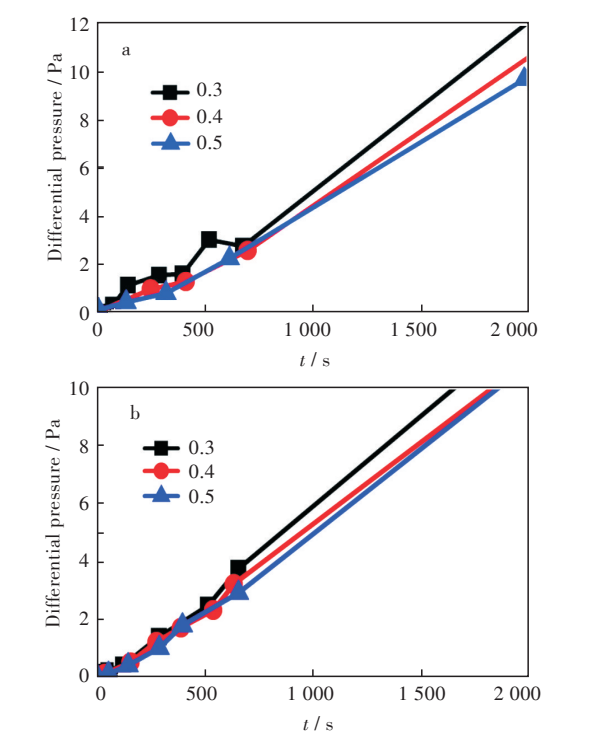


图5 PTFE 垫片在不同最大压缩量下应力松弛试验的压差-时间曲线:(a)静态;(b)动态.
Fig. 5 Difference pressure-time curves of stress relaxation test of PTFE gasket under different maximum amounts of compression:(a)Static state;(b)Dynamic state

2.2 分析与讨论

操作工况下的垫片的泄漏率由垫片应力直接影响,在本试验恒变形量条件下垫片应力由垫片的应力松弛行为决定;通过应力-时间曲线可以确定垫片最大压缩变形时的压缩垫片应力 σ_{gf} 和松弛后垫片应力 σ_{gr} ,由 σ_{gf} 和 σ_{gr} 则可以确定垫片应力松弛率. 为了详细了解垫片的性能的变化规律,下面计算出垫片的应力松弛率,计算公式(1)如下:

$$R = \sigma_{gf} / \sigma_{gr} \times 100\% \tag{1}$$

式(1)中 R 为垫片的应力松弛率, σ_{gf} 为垫片最大压缩量时的应力, σ_{gr} 为松弛后垫片的应力. 分别计算出在静态和小幅振动情况下的 3 种最大压缩量的应力松弛率如图 6 所示.

从图 6 看出在一定的加载速率和温度的条件下,动态应力松弛率随最大压缩量的增大而增大,静态应力松弛率随最大压缩量的增大缓慢减小. 说明在静态和动态下的应力松弛率都与最大压缩量有关. 由图 3 和图 4 可以看出,在初始阶段的前 30 s 内应力迅速的减小. 由于聚四氟乙烯是高分子线性聚合物,表现出明显的粘弹性^[14],对于应力松

弛行为有指数式,对数式,Maxwell式等进行数据拟合,利于计算任意时刻的瞬时应力,其中陈艳等^[15]采用了分数 Maxwell 模型对 PTFE 的应力松弛进行研究.实验采用二次延迟函数模拟聚四氟乙烯的静态应力松弛行为,利用 MATLAB 软件对实验采集的应力、时间数据进行拟合静态应力松弛方程:

$$\sigma(t)=A_{\text{c}}\text{e}^{-K_1t}+B_{\text{c}}\text{e}^{-K_2t}\tag{2}$$

式(2)中, $\sigma(t)$ 为垫片瞬时应力, t 为时间. K_1 、 K_2 、 B_{c} 、 A_{c} 均为回归系数,聚四氟乙烯垫片的回归系数及相关系数 R 如表3所示.

由图7和表3可知,用二次延迟函数模拟 PTFE 的静态应力松弛曲线有比较好的拟合效果,尤其对于应力松弛的初始阶段有比较好的拟合效果.

表 3 垫片应力松弛性能系数

Tab. 3 Coefficient of performance of gasket stress relaxation

最大压缩量 maximum compression / mm	回归系数				
	K_1	B_{c}	K_2	A_{c}	R
0.3	-0.114 2	6.351	-0.000 279 2	0.819 4	0.919 4
0.4	-0.032 38	8.298	-0.000 108 2	0.913 7	0.982 9
0.5	-0.052 83	8.411	-0.000 167 7	1.066 0	0.966 3

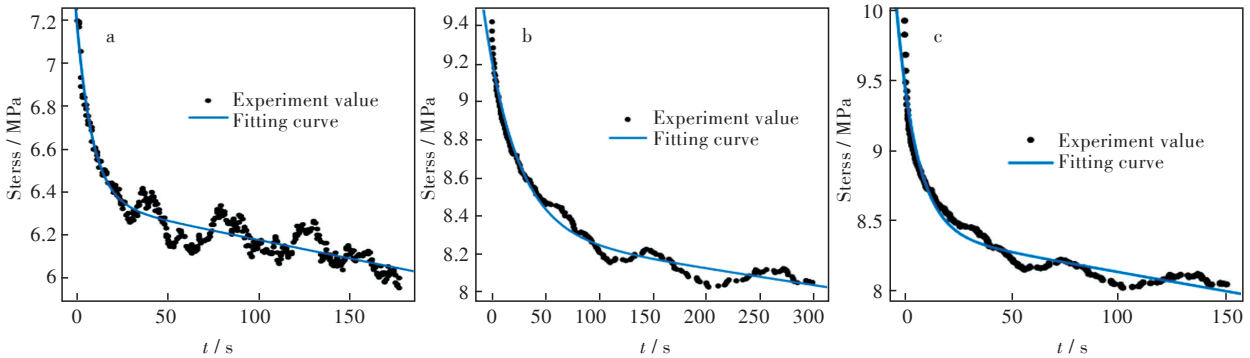


图 7 PTFE 垫片在不同最大压缩量下的应力松弛拟合曲线

Fig. 7 Stress relaxation fitting curves of PTFE gasket under different maximum amounts of compression of (a)0.3 mm, (b)0.4 mm and (c)0.5 mm

图3和图4明显表现出应力松弛,而动态应力松弛实验更为明显.与材料的应力松弛曲线特征类似,应力-时间松弛曲线可分为初始阶段和稳定阶段.在初始阶段,应力迅速的减小;随后应力以很小的速率减小.初始阶段主要发生在达到最大载荷后5 min内.可以看出,在静态松弛实验中,随着最大压缩量的增大,松弛率略有减小,说明适当的增大预紧力有利于密封;在动态条件下,随着最大压缩量的增加,松弛率迅速增大,说明振动对垫片的松弛有显著的影响.图5表明动态和静态应力松弛实验都有相同的规律,在初始阶段压差的增加速率较缓慢,随后速率增大,最终达到最大速率.高温小幅动态松弛实验测得压差大约是静态

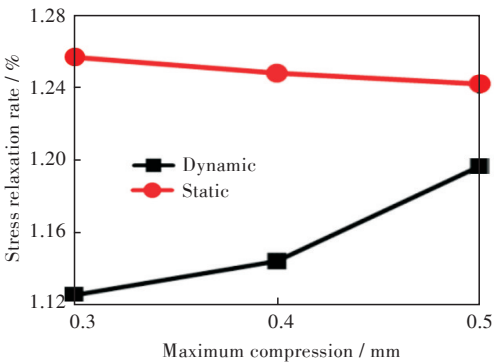


图 6 PTFE 垫片在不同最大压缩量下 PTFE 的应力松弛率
Fig. 6 Stress relaxation rate of PTFE gasket under different maximum amounts of compression

松弛实验的1.1倍.由公式(2)及回归系数即可计算出在应力松弛过程中相应最大压缩量下任意时刻的聚四氟乙烯垫片应力.由于最大压缩量影响垫片的静态应力松弛性能,综合考虑其他因素,可以得出它们与应力间的关系,推测同种类型的垫片在其他压缩量下垫片的性能.同时能够大致推断出静态松弛的时间,从而为动态的应力松弛提供参考依据.

3 结 语

在100℃和小幅振动条件下,考虑最大压缩量对聚四氟乙烯垫片应力的影响,对聚四氟乙烯垫片进行了应力松弛和泄漏测试,得到以下结论:

- 1)100 ℃下聚四氟乙烯垫片的动态应力松弛率随最大压缩量的增大而增大,静态应力松弛率随最大压缩量的增大而有所减小.
- 2)在应力松弛实验的初始阶段,应力松弛的现象最显著,动态的应力松弛现象比静态的明显.
- 3)应力松弛实验前后的压差变化,动态松弛实验的压差速率比静态的松弛试验大,大约是1.1倍.这是由于动态松弛实验材料内部的粘塑性变形增加的更快,回弹应变减小更多,导致密封性能变差,表明垫片应力仍是决定泄漏的主要因素.
- 4)根据拟合的回归系数可以推测不同最大压缩量下,该类型聚四氟乙烯垫片的应力松弛性能.

参考文献:

[1] 王明伟,王春燕,杨继新,等. BT20 钛合金高温应力松弛行为研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(3):502-505.
WANG M W, WANG C Y, YANG J X, et al. Study of high temperature stress relaxation behavior of BT20 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(3):502-505.

[2] 桑聪,郑小涛,文翔,等. 疲劳载荷下高温柔性石墨金属波齿复合垫片的实验研究[J]. 武汉工程大学学报,2016,38(1):78-81.
SANG C, ZHENG X T, WEN X, et al. Creep fluctuation behavior of high temperature flexible graphite corrugated metal gaskets under fatigue loading [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2016, 38(1):78-81.

[3] 郑小涛,陈瑶,喻九阳,等. 螺栓法兰连接系统的热应力场[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(6):37-40.
ZHENG X T, CHEN Y, YU J Y, et al. Thermal stress of bolted flanged system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(6):37-40.

[4] BOUZID A, NECHACHE A. An analytical solution for evaluating gasket stress change in bolted flange connections subjected high temperature loading [J]. Journal of Pressure Vessel Technology 2005, 127(4):414-427.

[5] BOUZID A, NECHACHE A. Thermally induced deflection in bolted flanged connections [J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(4):394-401.

[6] BOUZID A, CHAABAN A. An accurate method for evaluating relaxation in bolted flanged connections [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 119(4):10-17.

[7] NECHACHE A, BOUZID A H. On the use of plate theory to evaluate the load relaxation in bolted flanged joints subjected to creep [J]. International Journal of

Pressure Vessel and Piping, 2008, 85(7):486-497.

[8] ALKELANI AA, HOUSARI BA, NASSAR SA. A proposed model for predicting clamp load loss due to gasket creep relaxation in bolted joints [J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(2):517-522.

[9] 许珊珊,张营营,张其林. PTFE膜材的应力松弛性能及预测模型分析[J]. 应用数学和力学, 2016,37(3):266-276.
XU S S, ZHANG Y Y, ZHANG Q L. Stress relaxation properties and the prediction models for PTFE membranes [J]. Applied Mathematics and Mechanics.2016,37(3):266-276.

[10] 张红才,郑小涛,轩福贞,等. 蠕变-疲劳载荷下 25Cr2MoVA 钢的循环应力松弛行为[J]. 压力容器, 2014,31(9):23-27.
ZHANG H C, ZHENG X T, XUAN F Z, et al. Cyclic stress relaxation behavior of 25Cr2MoVA steel under creep-fatigue loadings[J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(9):23-27.

[11] 喻九阳,王明伍,张红才,等. 25Cr2MoVA 和 15CrMo 钢的高温蠕变特性[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(5):48-52.
YU J Y, WANG M W, ZHANG H C, et al. Creep behavior of 25Cr2MoVA steel and 15CrMo steel [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(5):48-52.

[12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12621-2008 管法兰用垫片应力松弛试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[13] 郑小涛,文翔,桑聪,等. 高温波齿复合垫片的循环压缩回弹性能[J]. 武汉工程大学学报,2016,38(4):382-384.
ZHENG X T, WEN X, SANG C, et al. Cyclic compression-resilience of flexible graphite corrugated metal gaskets at elevated temperature [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2016, 38(4):382-384.

[14] 罗文波,杨挺青. 固态高聚物的应力松弛行为[J]. 高分子材料科学与工程,2002,18(2):100-101.
LUO W B, YANG T Q. Stress relaxation behavior of solid polymers [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2002, 18(2):100-101.

[15] 陈艳,陈宏善,康永刚. 分数 Maxwell 模型应用于 PTFE 松弛模量的研究[J]. 高等学校化学学报, 2006,27(11):2160-2163.
CHEN Y, CHEN H S, KANG Y G. Relaxation modulus of PTFE studied by fractional maxwell model [J]. Chemical Journal of Chinese University, 2006, 27(11):2160-2163.