

一种适用于最大偏转角度的新型柔性防水罩的研发应用

王强 华剑平 庞维林

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:土耳其博斯普鲁斯海峡三桥吊索在设计时充分考虑了桥梁在运营期间,吊索在极限位置产生了大偏转角度,要求设计柔性防水罩来密封连接吊索于索导管从而保护吊索锚具不受雨水腐蚀。本文对柔性防水罩的选材、结构进行设计,通过理论计算、ANSYS分析来验算柔性防水罩的机械性能及密封作用。

关键词:柔性 橡胶 防水罩 有限元 老化 寿命

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.02.005

1 前言

博斯普鲁斯海峡大桥是一座斜拉-悬索协作体系的公铁两用跨海大桥(见图1),该桥全长2.16km,桥设计主跨1408m,设有八个机动车车道以及两个铁路车道,桥宽59m,是世界上最宽的大桥,其322m高的塔是世界上最高主塔,是由T-engineering sa civil engineering Geneva Switzerland公司的法国设计师 Michel Virlogeux and Jean-Francois Klein设计^[1]。由于其跨度大,桥面宽,双线公路车道横挑出主塔,通过软件模拟出桥在各种不同的载荷状况及风、温度等影响因素共同作用下得知,吊索会产生极限的偏转角度,其角度超出一般悬索桥吊杆的最大偏转角度,一般连接吊索与索导管的刚性防水罩无法满足吊索产生大角度偏转时的密封要求,因此极需研发一种新型的柔性防水罩来满足设计需求,有效地阻断悬索桥主缆系统的腐蚀途径,提高悬索桥主缆系统的防腐性能。



图1 土耳其博斯普鲁斯海峡三桥效果图

2 橡胶防水罩设计

2.1 防水罩的技术要求

依据土耳其博斯普鲁斯海峡三桥设计文件^[1],该桥吊索采用 $\phi 7$ 镀锌钢丝,强度为1770MPa,其中规格为367丝的吊索设计最大使用应力为7130kN,索长为12.126m,最大空间偏摆角度为80mrad。用于此吊索的防水罩不仅需要承载吊索在极限工况下最大偏摆角度带来的拉应力,还需要保证连接吊索与索导管的密封性长期有效,同时考虑到全桥的美观度,对防水罩还提出了特殊颜色的需求——防水罩颜色必须与索体或者主梁的颜色统一,因而该桥的防水罩的技术要求远远高于一般桥梁拉索用的防水罩。

2.2 防水罩的选材

防水罩用于连接吊索和索导管之间的连接件,不仅需要承载着它们之间产生相对位移的应力,还需要起到密封吊索和索导管之间的连接间隙,阻止外界雨水进入,腐蚀吊索锚具。

一般桥梁吊索用防水罩采用钢板卷焊或者铸铁进行铸造而成,它们与吊索和索导管的连接属于刚性连接,此类防水罩无法满足土耳其博斯普鲁斯海峡三桥设计文件^[1]中吊索在极限工况下最大偏摆角度为80mrad密封效果的需求,因此需要采用一种柔性材料来制作防水罩。综合考虑,选择橡胶来制作防水罩。

桥梁拉索用防水罩安装在桥面,属于外露件,在桥梁运营过程中,它不仅长期受到吊索偏

摆产生的应力,而且受到外界的光、氧、热、昼夜温差大和化学介质等外界因素的情况下,更加容易加速橡胶的老化,大大缩短橡胶防水罩的使用寿命。为保证橡胶制作的防水罩具有很长的使用寿命和优越的压缩回弹性,经与其它橡胶特性相比,选择三元乙丙橡胶作为制作防水罩的主要原材料。三元乙丙橡胶橡胶和其他橡胶特性的比较如表1所示:

从表1中可见,与其他橡胶相比,三元乙丙橡胶具有如下几个方面的基本性能:

- (1) 具有优异的耐候性、耐臭氧性、耐疲劳性;
- (2) 制成品具有很好的耐高低温性能,使用温度范围宽,具有耐酸、碱等化学品腐蚀性;
- (3) 防水性好、压缩永久变形小;
- (4) 具有优异的密封性能、具有很高的填充性和良好的稳定性;
- (5) 具有较好的物理、机械性能和综合性能;
- (6) 适合制作成有颜色的制品^[2]。

表1 三元乙丙橡胶橡胶和其他橡胶特性的比较

性能	EPDM	IR/NR	SBR	BR	HR	CR
比重	0.86	0.93	0.94	0.91	0.92	1.23
耐候性	极优	好	好	差	优	优
耐臭氧性	极优	差	差	差	优	优
耐热性	极优	好	好~优	优	极优	优
耐寒性	优	优	好~优	极优	好	好
耐酸性	极优	优	优	优	优	好
耐碱性	极优	优	优	优	优	好
耐油性	差	差	差	差	差	优
耐磨性	优	优	优	极优	好	优
抗撕裂	好	极优	好	好	优	优
耐蒸汽	极优	优	优	优好	极优	好
气密性	好	差~好	好	差	极优	优
粘合性	差	优	优	好	好	极优
绝缘性	极优	优	优	优	极优	优
色稳定性	极优	优~极优	优	优	优~极优	差
动态特性	优	极优	优	极优	差	好
压缩变形	优	极优	极优	优	好	优
充油性	极优	优	好~优	好~优	差	好
炭黑填充性	极优	优~极优	优	优	差	好~优

2.3 结构设计

防水罩用于连接吊索和索导管之间的连接件,密封吊索与索导管之间的连接间隙,考虑到满足安装和使用要求,防水罩设计如图2所示:

当吊索处于极限工况下,达到极限偏摆角度,约 5° ,此时防水罩的工作状态如图3所示:

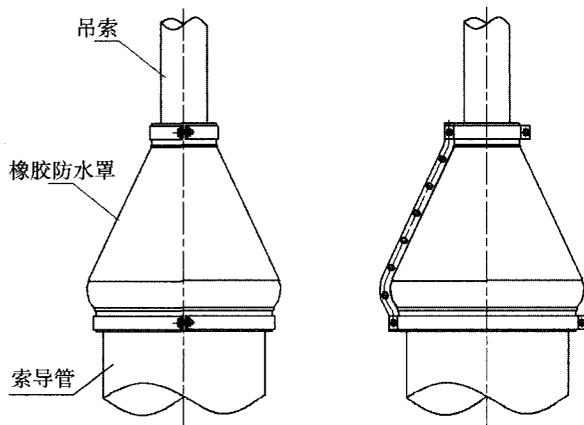


图2 吊索未偏摆时防水罩的工作状态

防水罩一侧受拉应力,一侧受压应力,吊索偏摆的位移由防水罩凸起的圆弧进行缓冲,从而确保防水罩与索体和索导管之间无相对滑移,密封无失效。

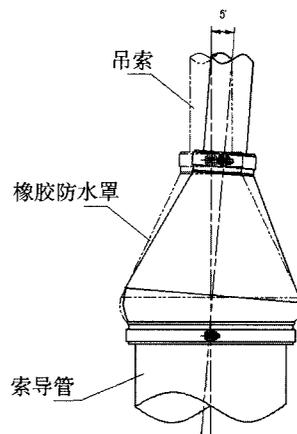


图3 吊索达到极限偏摆时防水罩工作状态

2.4 防水罩ANSYS有限元计算分析

橡胶结构的数值仿真问题是一类典型的非线性问题,涉及到材料非线性(超弹性)、边界非线性(接触)和几何非线性(大变形)等问题^[3-5]。橡胶材料属于超弹性近似不可压缩^[6],其本构关系的应变能函数是复杂的非线性函数;结构受力复杂,承载后的变形大,使得单元产生大变形。

目前,大型有限元软件可以用来模拟超弹性材料材料模型有广泛应用Mooney-Rivlin材料模型描述橡胶材料的应变能函数。橡胶防水罩采用Mooney-Rivlin材料模型进行有限元分析,此时橡胶材料被认为是超弹性近似不可压缩体,泊松比取0.5,弹性模量取7.8MPa,其力学性质表现为材料非线性和几何非线性^[7]。采用2参数的Mooney-Rivlin模型,其应变能函数表达式为:

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+1/d(J-1)^2 \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 —第一和第二Green应变不变量; C_{10} 、 C_{01} —Mooney-Rivlin材料参数; d —材料不可压缩参数,由式 $d=(1-2n)/(C_{10}+C_{01})$ 定义, n —材料泊松比。参考文献^[8],取 C_{10} 、 C_{01} —1.84MPa、0.47MPa。

有限元分析模型如图4:

通过ANSYS建模计算出,索体发生偏转时,防水罩所承受的应力和变形完全满足设计需求。

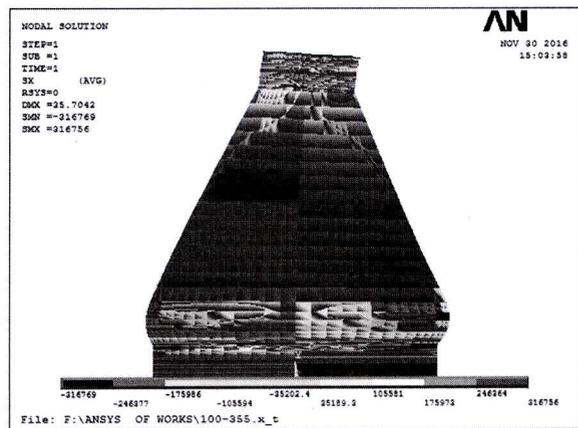
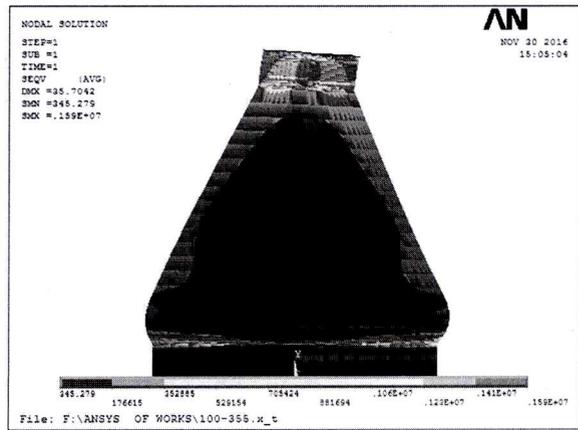
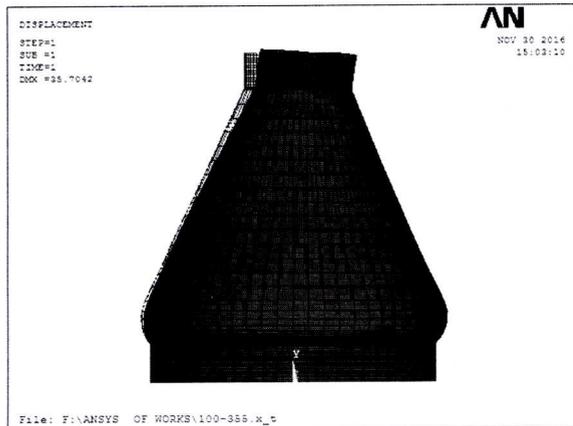
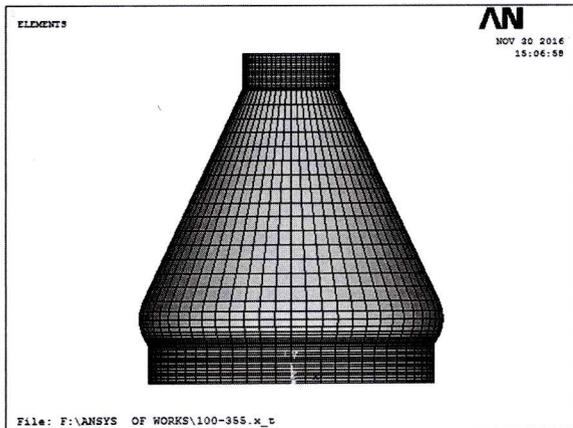


图4 防水罩有限元分析

2.5 橡胶防水罩技术参数确定

橡胶防水罩应用于桥梁工程在国内还比较少,没有统一的标准和规范。通过查阅类似和接近应用于桥梁工程橡胶制品的技术要求并结合橡胶防水罩在桥梁工程中的实际应用状况,初定橡胶防水罩的技术要求如表2:

表2 橡胶防水罩技术要求

物理机械性能	
项目	指标
硬度 (IRHD)	70 ± 4°
拉伸强度 (MPa)	≥ 14
扯断伸长率	≥ 500%
脆性温度	在-40℃低温条件下受冲击,不破坏
热空气老化	100℃ × 144h, 拉伸强度 ≥ -15%, 扯断伸长 ≥ -40%, 硬度变化 0~+10IRHD (与未老化前数值相比发生的最大变化)
臭氧老化	100pphm, 20%伸长率, 40℃ × 480h无龟裂

2.6 橡胶防水罩配方的设计及检测

2.6.1 橡胶防水罩配方的设计

综合橡胶防水罩产品的技术要求和工艺加工性能,拟定如下有代表性的配方进行研究,各配方比较如表3;

表3 不同的配方组分(重量份)

混炼胶成分				
成分	胶号	A#	B#	C#
	材料名称			
生胶	三元乙丙KEP570	100	100	100
活性体系	氧化锌	5	5	5
	硬脂酸	1	1	1
补强体系	聚乙二醇	1.5	1.5	1.5
	白炭黑	50	50	50
	炭黑	0.01	0.02	0.045
填充体系	钛白粉	15	15	15
	滑石粉	15	15	15
	群青	1	1	1
增塑体系	石蜡油	20	20	20
	防老剂MB	0	0	1
防老体系	防老剂264	0	0	1
	石蜡	0	0	1
	紫外线防护剂	0	1	
	抗氧化剂	0	1	1
促进剂	促进剂DTDM	0.8	0.8	0.8
	促进剂DM	0.25	0.25	0.25
	促进剂M	0.5	0.5	0.5
交联剂	硫磺	0.6	0.6	0.6
合计		210.66	212.67	215.69

表4 胶片性能检测结果

物理机械性能				
项目	胶号	A#	B#	C#
	邵氏硬度A		68	69
拉索强度(MPa)		8.15	11.22	10.51
扯断伸长率(%)		≥850	≥850	≥850
脆性温度(℃)		低于-40℃	低于-40℃	低于-40℃
热空气老化100℃×70h	邵氏硬度A	75	76	75
	拉索强度(MPa)	11.52	11	16.165
	扯断伸长率(%)	808.4	846.8	753.2
臭氧老化100pphm, 20%拉伸40℃×96h		无龟裂	无龟裂	无龟裂
色牢度	试片硫化160℃×25min	浅灰	浅灰	浅灰
	成品硫化160℃×200min	浅灰	浅灰	浅灰
	热空气老化100℃×70h	浅灰	浅灰	浅灰
	室外暴晒15d	浅黄色(深)	浅黄色(浅)	浅灰

2.6.2 实验检测

按照配方进行制作胶片进行性能检测,实验结果如表4;

2.6.3 分析讨论

(1) 实验结果表明, C#胶片拉伸强度满足产品要求;

(2) 从热空气老化、臭氧老化来看, 均符合性能;

(3) 从脆性温度来看, 均符合性能要求;

(4) 从色牢度来看, C#胶片抗变色能力优越;

2.6.4 成品制作

(1) 橡胶防水罩混炼胶制备根据C#配方在密炼机进行混炼;

(2) 用此配方制作产品是, 必须保证模具清洁, 为保证产品外观一致性, 模具需要进行镀铬、抛光;

(3) 按照上述优选C#配方, 选定了硫化条件进行胶片试验, 同时考察了生产工艺性能, 表明成品制作顺利, 工艺性能良好, 满足批量生产要求;

(4) 产品送到曙光橡胶工业研究院进行检测, 通过实验并取得合格报告

结论: 该橡胶配方制作的橡胶防水罩具有优良的机械性能并满足工程使用需求。

3 橡胶防水罩静态水密性实验设计

橡胶防水罩安装在吊索通过索导管的接口处, 密封彼此之间的间隙, 防止雨水顺吊索流入索导管, 进一步腐蚀锚固区的吊索锚具。目前, 吊索用橡胶防水罩的密封性能检测还没有相应的国家或者行业标准可执行, 故检验吊索用橡胶防水罩的密封性能实验只能参照GB-2005《预应力钢质拉索的验收推荐性规范》中防漏试验来进行设计。

本实验验证橡胶防水罩的静态水密性性能, 特设计如下实验进行验证;

(1) 橡胶防水罩按照图5进行安装;

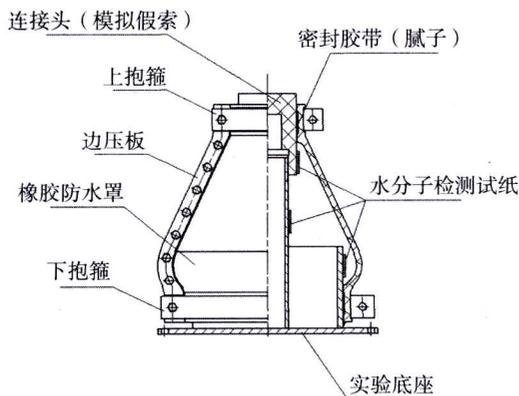


图5 橡胶防水罩安装图

(2) 整个防水罩组装件沉入水槽中, 保证沉入水深 $H \geq 3m$, 浸泡72h, 如图6所示;

(3) 取出防水罩组装件并晾干表面水分, 拆除整个组装件, 检查装置内部遇水变色试纸的颜色变化情况;

(4) 试验结果如下;

通过图7可知, 粘贴在橡胶防水罩组装件里面的遇水变色试纸没有发生颜色变化, 证明橡胶防水罩在水深 $H \geq 3m$ 工况下, 静态水密性合格, 满足产品设计的密封性能要求。

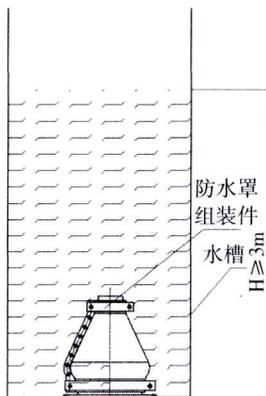


图6 橡胶防水罩沉水试验

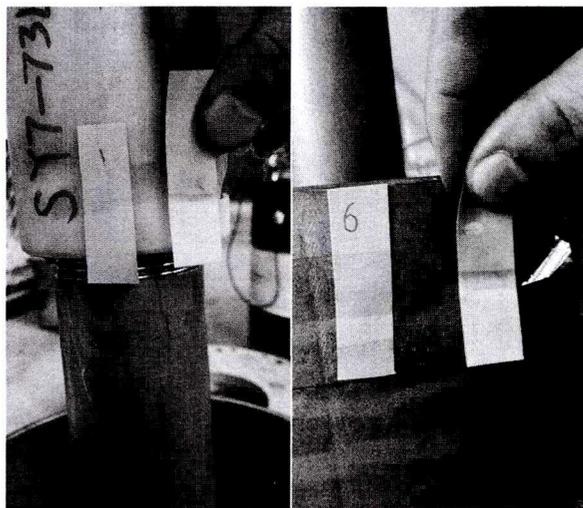


图7 试纸颜色变化

4 橡胶防水罩使用寿命理论估算

高分子材料的老化问题一直是备受关注, 特别是橡胶制品。橡胶的老化, 是要是指橡胶制品在贮存或者使用过程中, 由于受到热、氧、光、机械应力、臭氧、有害金属离子、化学介质等外界因素的影响, 使其发生物理或化学变化, 使橡胶性能劣化, 制品使用寿命缩短, 更有因为橡胶制品的老化而导致安全隐患而产生的各类严重事故, 其中热(光)氧化是橡胶防水罩老化最普遍, 最基本的形式^[10]。

目前, 国内外相关研究机构颁布的橡胶材料寿命预测的标准, 都是基于阿累尼乌斯(Arrhenius)公式进行外推计算的。根据GB/T 20028-2005/ISO 11346, 1997《硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度》进行推算, 可以较为准确地推算出三元乙丙橡胶防水罩的热老化使用寿命。

在实际使用过程中认为Arrhenius公式： $k(T) = A \cdot \exp(-Ea/RT)$ 中的指前因子 A 和活化能 Ea 在预测温度和测试温度范围内为常数，即与温度无关。但范特荷夫发现温度变化对速率常数的影响非常大，如室温附近温度每增加 10°C 可以使速率常数增大2至4倍。因而，更深层次的研究发现Arrhenius公式中的指前因子和活化能均与温度有关，得到如下Arrhenius修正公式：

$$k(T) = BT^{b/R} e^{-(Ea' + B)/RT} \quad (2)$$

此时，式中的 B 和 Ea' 。与温度无关；其中 $k(T)$ 为反应速率常数； R 为摩尔气体常数， $[8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$ ； T 为热力学温度， (K) 。

而性能与时间的关系可用以下关系式表示：

$$F_x(t) = k(T)t \quad (3)$$

其中 $F_x(t)$ 为与性能有关的函数； T 是老化反应时间。

在不同的反应温度 T_i 下，不同的反应速率 K_i ；(T_i)以不同的反应时间 t_i ；达到相同的临界值 $F_a(t_i)$ ，可得以下(4)式：

$$F_a(t_i) = K_i (T_i) t_i \quad (4)$$

把(2)式代入(4)式，得：

$$F_a(t_i) = BT^{b/R} e^{-(Ea' + B)/RT} t_i \quad (5)$$

对(5)式两边取对数、合并常数项得到(6)式：

$$\log t_i = a_m - b_{m1} \log T_i + b_{m2} / T_i \quad (6)$$

式中： a_m 、 b_{m1} 、 b_{m2} 均为与温度时间无关的常数； t_i 为老化温度 T_i 下达到临界性能时所需的活化时间。

式(6)中随机变量 $\log t_i$ 与白变量 $\log T_i$ ；和 $1/T_i$ 呈线性关系，符合二元线性回归模型^[13]。通过求解正规方程组可求得模型参数，代入(6)式中可预测某一温度下的性能变化，计算得出材料的寿命。

目前，国内对三元乙丙橡胶老化的研究主要是热老化研究，研究手段单一，但三元乙丙橡胶防水罩在实际使用过程中受光、氧、热和化学介质等多因素的综合影响，因此，在预测橡胶防水罩的老化研究工作中，应加强在实际使用环境中的老化研究，利用人工气候老化和自然气候老化

的相关性建立寿命预测模型，使其能够合理预测橡胶的使用寿命。

5 结论

本文通过对橡胶防水罩在吊索极限应力下产生大偏摆角度的受力分析及理论计算，得出如下结论：

- 1) 选择三元乙丙橡胶制作防水罩，能够很好的满足产品设计要求；
- 2) 橡胶防水罩能完全适应吊索在极限应力下产生大偏摆角度的应用；
- 3) 橡胶防水罩密封性能可靠
- 4) 橡胶防水罩使用寿命优于其他材料制作的桥梁吊索用防水罩

橡胶防水罩在国内使用于桥梁建设中还比较少，随着人们对橡胶防水罩的深入研究，它将会更好的代替其他形式的产品广泛的应用于桥梁建设之中，服务于国家工程建设。

参考文献

- [1] Third Bosphorus Bridge Design report Hangers-rotations at level. REPUBLIC OF TURKEY Ministry of Maritime Affairs And Communication, 2013.03.04.
- [2] 李铁. 三元乙丙橡胶的应用研究及其新型共混物的制备[D]. 北京化工大学, 2006,04, 15.
- [3] SidraCohen,EP.MuntzAnexperimental study of rotating micromechanical liquid O-ring pressure seals[J].Sensors and Actuators A:Physical,Volume54,Issues13 June 1996,Pages765-774.
- [4] 杨光, 胡旭林. Yx形密封圈应力与应变非线性有限元分析[J]. 煤矿机械, 2010(3); 99-101.
- [5] 于润生, 杨秀萍. Yx形液压密封圈的有限元分析及结构优化[J]. 润滑与密封, 2011(7): 66-69+74.
- [6] T.Tussman,K-J Bathe.A Finite Element Formulation for Nonlinear Incompressible Elastic and Inelastic Analysis [J].Computers and Structures,Vol.26 Nos1/2,1987,pp.357-409.
- [7] 夏卫明, 骆桂林. 橡胶结构有限元分析收敛问题的对策[J]. 机械设计与制造, 2013, 7(7): 265-267.
- [8] 谭晶, 杨卫民. O型橡胶密封圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2006(9): 65-69.
- [9] 梁星雨. 《橡胶工业手册》第三分册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [10] 杨清芝. 现代橡胶工艺学[M]. 北京: 中国石化出版社, 1997.
- [11] 王思静, 熊金平等. 橡胶老化机理与研究方法[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(2).
- [12] 李强. 三元乙丙海绵橡胶垫热老化寿命之研究[J]. 世界橡胶工业, 2011,38(5).
- [13] 盛骤, 谢式千等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [14] 吴丝竹, 易军等. 基于加速老化试验的EPDM橡胶贮存寿命预测方法[J]. 橡胶(密封)新技术交流暨信息发布会, 2008.
- [15] 赵泉林, 李晓刚等. 三元乙丙橡胶老化研究进展[J]. 绝缘材料, 2010,43(1).