



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.026

杨斌, 刘宏敏, 刘礼华. 大型船闸移动工作门伸缩式止水水密性验证方法[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 163-166, 172. YANG Bin, LIU Hongmin, LIU Lihua. Research on water tightness test method of telescopic water seal in large ship lock mobile working gate[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 163-166, 172. (in Chinese)

# 大型船闸移动工作门伸缩式止水水密性验证方法

杨斌<sup>1</sup>, 刘宏敏<sup>1</sup>, 刘礼华<sup>2</sup>

(1. 湖北水利水电职业技术学院, 武汉 430070; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**摘要:** 伸缩式止水是大型船闸移动工作门的新型止水方法, 它一改以往预压式止水间隙适应性差、局部容易漏水、材料磨损快等缺点, 有着良好的封水性能和耐久性能。本文首次结合三个止水面的“U”型止水装置, 通过仿真计算和模型试验, 给出了止水的特性—静水水密性规律的获取方法。该研究方法简便、科学, 对伸缩式止水设计阶段的断面选取具有重要的参考价值和借鉴意义。

**关键词:** 伸缩式止水; 有限元; Mooney Rivlin 公式; 模型试验; 静水水密性

**中图分类号:** TV131.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0163-04

## Research on water tightness test method of telescopic water seal in large ship lock mobile working gate

YANG Bin<sup>1</sup>, LIU Hongmin<sup>1</sup>, LIU Lihua<sup>2</sup>

(1. Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430070, China;

2. School of Civil & Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Telescopic water seal is a new sealing method of large ship gate, it overcomes the shortcomings of traditional pre pressure seal such as poor gap adaptability, local leakage, and quick material wear, with good sealing performance and durability. In this paper, combined with the "U" type sealing device which has three checks, through simulation calculations and model experiments, we studied the obtaining method of static water tightness which is the key characteristic of water seal. In this study, the method is simple, scientific, and has important reference value and reference meaning to the section selection in the design stage of telescopic water seal.

**Key words:** telescopic water seal; finite element; Mooney-Rivlin formula; model experiment; static water tightness

在水利水电工程中, 闸门发生漏水不仅引起水资源损失, 而且影响闸门的工作环境, 导致建筑物空蚀和闸门振动, 威胁工程安全, 因此止水装置是闸门的重要元件。目前, 大型船闸移动工作门通常采用预压式橡胶止水装置, 其存在闸门间隙适应性差、局部容易漏水、移门时封水橡胶磨损快、闸门启闭力大等缺点。

目前有一种在潜孔闸门上使用的充压式水封<sup>[3-6]</sup>, 其主要优点是对闸门间隙的适应性好, 当闸门一边间隙不均匀时也能够适应封水。由于移动工作门只能有三个止水对偶面, 工程中采用“U”型止水装置, 见图1, 为了防止两边水封顶端无约束外伸破坏, 在此处安装空腔堵头, 这样水封变形仍然是平面应变问题。

收稿日期: 2016-01-07    修回日期: 2016-02-26    网络出版时间: 2016-08-18  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.2129.011.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(50679059)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(50679059)

**作者简介:** 杨斌(1978-), 男, 湖南常德人, 副教授, 博士, 主要从事水工金属结构方面的研究。Email: yobby2002@sohu.com

**通讯作者:** 刘宏敏(1974-), 男, 湖北武汉人, 讲师, 主要从事建筑结构方面的研究。Email: llhmm01@163.com

## 1 伸缩式止水结构设计

在“U”形止水装置下部的充压腔设有进气孔和出气孔,进气孔通过阀门与放置在闸门板格内部的空压机输出端连通;出气孔通过阀门与大气连通。当进气孔向止水装置的充压腔充气增压,闸门就进入止水堵漏的工作状态;当出气孔通过阀门向外排气减压时闸门即可开启。止水装置由橡胶水封、压板和座板组成,见图 2。水封包括硬橡胶封头 and 软橡胶肢臂、翼头与肢体;压板分内压板和外压板。水封硬橡胶(封头)部分能承受较大的间隙水压力,水封软橡胶(肢臂、翼头与肢体)部分能够产生较大变形,便于闸门止水装置的伸缩操作,同时也可以提高止水元件对闸门间隙的适应性。

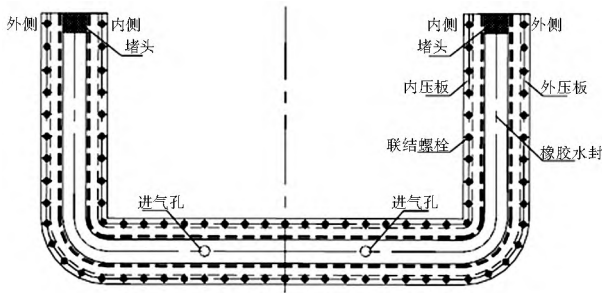


图 1 “U”形止水结构

Fig. 1 “U”-shaped sealing structure

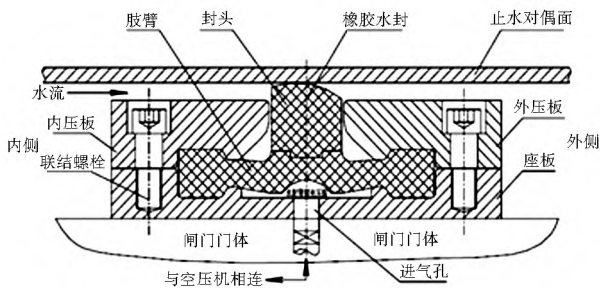


图 2 伸缩式止水横截面

Fig. 2 Telescopic sealing section

## 2 封水试验

止水装置的封水效果是闸门设计的关键技术之一。静水水密性验证在自行设计的专用大型实验台上进行,见图 3。实验台主要由承压面板、活动台板、基座、测量仪器仪表组成,并与高压水箱、加压机、稳压器和各种控制阀相连。验证选用框形止水试件,设置止水前端与钢板的预留间隙分别为 5、10、15、20、25、30 mm,由水稳压器向止水背腔充气(模拟工程中采用的气压),压力分别为 5、6、7、8、9、……、29、30 m 水头,压力稳定后向模拟库水压力的高压水箱充气,观察止水漏水或射

水发生情况。

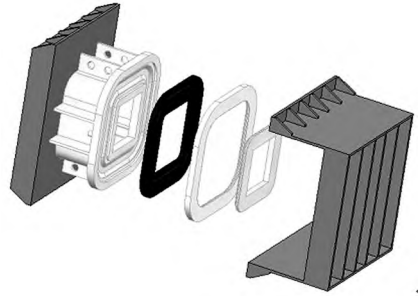


图 3 伸缩式止水大型试验台

Fig. 3 Large test bench of telescopic water seal

## 3 仿真计算验证方法

### 3.1 材料参数测定

进行仿真计算首先要测定材料的力学参数。橡胶是各向同性材料,应变能函数  $W_e$  通常写成左 Cauchy-Green 变形张量  $B$  的函数表达式,应变张量不变量分别用  $I_1, I_2, I_3$  表示,即  $W_e$  可写成:

$$W_e = W_e(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

$$I_1 = \text{tr}(B), I_2 = \frac{1}{2}((\text{tr}(B))^2 - \text{tr}(B^2)), I_3 = \det(B) \quad (1)$$

橡胶类材料可近似看作不可压缩的非线性弹性体,在不可压缩条件下,  $I_3 = 1$ , 于是有  $W_e = W_e(I_1, I_2)$ 。

取初始构型为参考构形,此构型中  $W_e = 0, [B] = [I]$ , 于是由式(1)可得:

$$I_1 = \text{tr}[I] = 3, I_2 = ((\text{tr}[I])^2 - \text{tr}[I^2])/2 = 3 \quad (2)$$

鉴于在参考构形中  $I_1 = I_2 = 3$ , 可把应变能看作是  $I_1 - 3$  和  $I_2 - 3$  的函数,用 Mooney-Rivlin 公式(3)能够较为准确的描述应变能函数<sup>[7-8]</sup>。

$$W_e = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (3)$$

再按照材料本构关系的张量表达式(4),将应变能函数显化为应力-应变关系。

$$\sigma = -pG + 2\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2}\right)B - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}B^2 \quad (4)$$

Mooney-Rivlin 公式(3)在材料单轴拉伸与压缩实验中本构关系的分量显式如式(5),在纯剪切实验中如式(6)、式(7)<sup>[6]</sup>。

$$\sigma_1 = 2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda}\right)\left(C_1 + \frac{1}{\lambda}C_2\right) \quad (5)$$

$$\sigma_1 = 2\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2}\right)\left(C_1 + C_2\right) \quad (6)$$

$$\sigma_2 = 2\left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)\left(C_1 + \lambda^2 C_2\right) \quad (7)$$

式中:  $\sigma_1$  为拉伸方向的应力;  $\sigma_2$  为垂直于拉伸方向

的应力;  $\lambda$  为实验中材料的伸长比。可以利用在实验中测出的多对应力-伸长比值拟合出材料参数  $C_1$ 、 $C_2$ 。

对水封封头硬橡胶和肢臂、翼头与肢体软橡胶进行材料参数的测定。测定中采取单轴拉伸、单轴压缩和纯剪切实验(由于实验室无法完成真正意义上的纯剪切实验,故用受限拉伸实验代替):

单轴拉伸实验采用哑铃型标准试件,每种材料采用三个试件,每个试件进行三组实验。实验方法为以砝码重量为拉伸负荷,直接加载量测各止水材料相应的拉伸比,同步计算拉伸应力,扯断时停止实验;单轴压缩实验采用标准压缩试件,在压力实验机 WE-60 上加载量测变形得到各止水材料的单向压缩特征;受限拉伸实验采用宽度比其长度大很多的橡胶薄片,将其长度方向(纵向)两端用夹具夹住,然后再横向拉伸,采用和单轴拉伸实验同样的试件分组和拉伸方法<sup>[6]</sup>。

由各实验测得的应力-伸长比值,采用最小二乘法,拟合出材料 Mooney-Rivlin 力学模型的材料参数,见表 1。

表 1 Mooney-Rivlin 模型的拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficient table of Mooney-Rivlin model

超弹性参数/MPa	橡胶止水材料	
	水封封头硬橡胶	水封翼头(肢臂、肢体)软橡胶
$C_1$	0.6689	0.3001
$C_2$	0.1286	0.2162

### 3.2 仿真计算

运用有限元方法对止水全过程进行仿真计算以验证水密性,分析安装和止水过程水封应力变化及分布情况、水封与钢夹及面板之间的接触应力,绘制关键部位的应力应变时程曲线,从而定性研究水封的止水性能<sup>[6,9]</sup>。有限元分析采用大型有限元分析软件 ABAQUS 进行。在单元选择方面,考虑到橡胶为近不可压缩材料,采用杂交单元,因其为大应变分析,涉及到非常大的网格扭曲,特采用四结点双线性平面应变四变形单元 CPE4RH,单元控制属性为减缩积分和沙漏控制。水封座板、压板采用四结点双线性平面应变单元 CPE4I,单元控制属性为非协调膜式<sup>[10-14]</sup>。考虑到水封受荷过程中止水面板与橡胶的接触问题,将可能成为接触面的水封座板、水封压板创建为主面,对应的橡胶面创建为从面,并成对地创建接触相互作用,调用接触属性。根据实际情况约束水封座板  $x$  和  $y$  方向、压板  $x$  方向位移,并在压板上施加  $y$  负向位移以模拟安装过程。安

装完成后,完全约束水封压板与水封座板  $x$  和  $y$  方向的位移,并在水封背腔施加压力模拟水封自由外伸过程。自由外伸模拟完成后,在压板和止水面板之间施加水平方向水流,模拟伸缩式止水封水过程。计算模型见图 4。

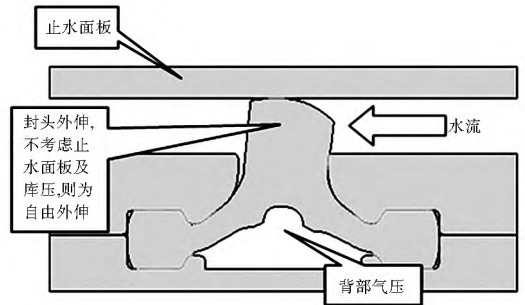


图 4 伸缩式止水计算模型

Fig. 4 Computational model of telescopic water seal

## 4 工程应用

### 4.1 工程背景

亭子口水利枢纽工程位于四川省广元市苍溪县境内,亭子口升船机下闸首工作门门槽底高程 359.5 m,闸墙顶面高程 387.0 m,门槽顺水流向宽 3.5 m,垂直水流向长 21.0 m,闸门上游面板距船厢端面 200 mm,支承跨度达到 19.6 m,由于闸门水平方向的刚度低、变形大,其止水装置设计加工是整个升船机建设的关键性技术问题之一。

### 4.2 静水水密性的仿真计算和模型试验

下闸首工作门采用的充压伸缩式水封断面见图 5。在仿真计算中,将封头与止水面板间的接触应力不小于相应的库压作为封水的经验判据,整理出一定的库压作用下所需要的封水背压,绘制封水曲线见图 6。在静水水密性试验中,观察水封漏水射水发生情况,临界封水库压记录于表 2,根据记录表绘制出的封水曲线见图 7。比较图 6 和图 7 发现仿真计算与模型试验的封水规律基本吻合(注意坐标轴对应)。

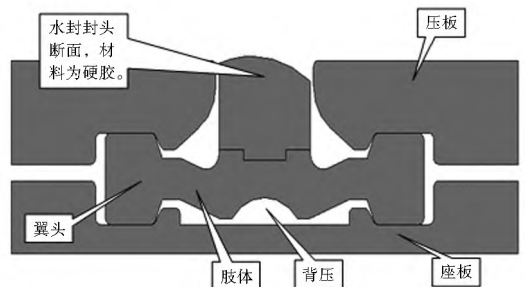


图 5 亭子口升船机移动门伸缩式止水断面

Fig. 5 Telescopic water seal section of Tingzikou mobile gate

表 2 水密性试验临界封水库压记录表

Tab. 2 Critical reservoir pressure in water tightness test

背压 / MPa	间隙 / mm					
	库压 / MPa					
	5	10	15	20	25	30
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	0	0	0	0	0	0
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0.01	0	0	0	0	0
0.10	0.04	0	0	0	0	0
0.11	0.08	0.01	0	0	0	0
0.12	0.10	0.04	0	0	0	0
0.13	0.12	0.05	0	0	0	0
0.14	0.14	0.07	0.04	0	0	0
0.15	0.17	0.08	0.05	0	0	0
0.16	0.19	0.10	0.07	0	0	0
0.17	0.21	0.12	0.09	0	0	0
0.18	0.24	0.14	0.12	0.04	0	0
0.19	0.27	0.16	0.15	0.05	0	0
0.20	0.29	0.19	0.17	0.07	0.03	0
0.21	0.32	0.22	0.20	0.09	0.04	0
0.22	0.35	0.27	0.22	0.11	0.07	0
0.23	0.37	0.30	0.25	0.14	0.08	0
0.24	0.39	0.32	0.26	0.17	0.10	0
0.25	0.41	0.34	0.27	0.20	0.12	0
0.26	0.42	0.36	0.29	0.25	0.13	0
0.27	0.44	0.39	0.31	0.27	0.15	0
0.28	0.45	0.42	0.32	0.30	0.17	0
0.29	0.46	0.44	0.35	0.31	0.19	0
0.30	0.48	0.46	0.39	0.32	0.20	0.03
0.35	0.53	0.50	0.45	0.38	0.27	0.09
0.40	0.60	0.57	0.50	0.45	0.34	0.15

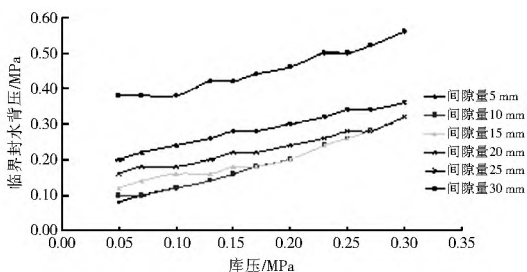


图 6 仿真计算临界封水背压曲线

Fig. 6 Critical sealing water back pressure curves obtained by simulation calculation

## 5 结语

大型船闸移动工作门伸缩式止水的工作特征可

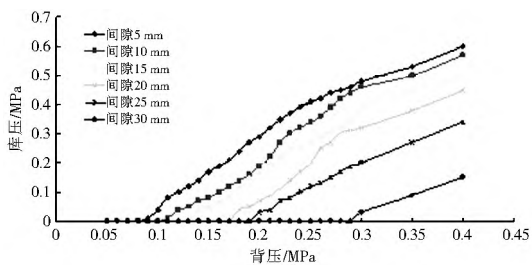


图 7 模型试验不同背压下的封水库压

Fig. 7 Reservoir pressure under different back pressure obtained by the model experiment

通过模型试验和仿真计算得到。研制了伸缩式止水的专用试验装置,也形成了精度较高的伸缩式止水的仿真计算方法。本文是对研究成果的一次总结。该套试验装置和仿真计算方法可以用来较好的模拟实际工程中大型船闸移动门伸缩式止水的变形和封水过程。研究结果,尤其是不同库压下的临界封水背压的规律对伸缩式止水设计具有重要的参考价值。

## 参考文献(References):

- [1] Alan N. Gent. Engineering with Rubber How to Design Rubber Components[M]. Carl Hanser Verlag, Munich, 2001.
- [2] 徐立, 吴桂忠. 有限元分析中橡胶应变能函数的若干形式[J]. 橡胶工业, 1999, 46(12): 707-711. (XU Li, WU Guizhong. Some forms of strain energy function for rubber with finite element analysis[J]. China Rubber Industry, 1999, 46, (12): 707-711. (in Chinese))
- [3] 朱函函, 刘礼华. 应用非线性有限元法对某止水橡皮进行仿真计算[J]. 应用力学学报, 2004(4): 134-136. (ZHU Dang dang, LIU Li hua. Simulation for the water stop rubber on the nonlinear finite element method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2004(4): 134-136. (in Chinese))
- [4] 朱函函, 刘礼华. 应用非线性有限元法对某止水橡皮进行仿真计算[J]. 应用力学学报, 2004(4): 134-136. (ZHU Dang dang, LIU Li hua. Simulation for the water stop rubber on the nonlinear finite element method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2004(4): 134-136. (in Chinese))
- [5] 刘礼华, 熊威, 张宏志, 等. 高水头闸门止水材料的粘弹性研究[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 189-192. (LIU Li hua, XIONG Wei, ZHANG Hong zhi, et al. Research on viscoelasticity of high pressure waterstop material[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24, (7): 189-192. (in Chinese))
- [6] 刘礼华, 欧珠光, 陈五一. 高压闸门水封的非线性计算理论与应用[M]. 中国水利水电出版社, 2010, 7. (LIU Li hua, OU Zhu guang, CHENG Wu yi. The nonlinear theory and application of high pressure gate water seal[M]. China Water Power Press, 2010, 7. (in Chinese))
- [7] R S Rivlin, F R Eirich, Ed Rheology. Theory and Application, Vol. 1, Academic Press, New York, 1956, Chapter 10.
- [8] R S Rivlin, D W Saunders, Phil Trans R. Soc. London, Ser. A, 243, 251(1951).

(下转第 172 页)

- and parameter research for time history of factor of safety of slopes subjected to seismic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 261-268. (in Chinese)
- [5] 王洪新. 考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2144-2152. (WANG Hongxin. Safety factor of heave resistant stability considering two and three dimensional size effects of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2144-2152. (in Chinese))
- [6] 柏俊磊, 王乐华, 王瑞红. 基于敏感性分析的加锚岩质边坡锚固参数优化设计[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 200-205. (BO Junlei, WANG Lehua, WANG Hongrui, et al. Optimization design of anchorage parameters of an anchor slope based on sensitivity analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 200-205. (in Chinese))
- [7] 文畅平. 多级支护边坡屈服加速度及因素敏感性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2889-2897. (WEN Changping. Study of yield acceleration of slope stabilized by multistage retaining earth structures and sensitivity analysis of influence factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2889-2897. (in Chinese))
- [8] 陈高峰, 程圣国, 卢应发. 基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J]. 水力学报, 2007, 37(11): 1397-1401. (CHEN Gaofeng, CHENG Shengguo, LU Yingfa. Sensitivity analysis of the slope stability based on uniform design[J]. Journal of Hydraulic, 2007, 37(11): 1397-1401. (in Chinese))
- [9] 张昊, 余巍伟, 林杭, 等. 不同安全系数对应的边坡滑动面位置分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 449-453. (ZHANG Hao, YU Weiwei, LIN Hang, et al. Analysis of location distribution of slope slip plane with different factors of safety[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 449-453. (in Chinese))
- [10] 高玮, 张鲁渝, 张飞君. 边坡临界滑动面搜索的奖惩蚁群算法研究[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 209-215. (GAO Wei, ZHANG Luyi, ZHANG Feijun. Critical slip surface searching for slope based on premium penalty ant colony optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 209-215. (in Chinese))
- [11] 李靖. 黄土边坡及其稳定分析图简介[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(2): 101-104. (LI Jing. Introduction to the loess slope and its stability analysis[J]. Journal of Northwestern Agricultural University, 1999, 27(2): 101-104. (in Chinese))
- [12] 刘志伟. 土体强度参数对边坡隧道影响数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 176-180. (LIU Zhiwei. Numerical stimulation analysis for the effects of soil mass strength parameters on the tunnels with side slopes[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(4): 176-180. (in Chinese))
- [13] 杜太亮, 张永兴, 谢强, 等. 岩体基本参数对岩质边坡变形的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 22-27. (DU Tai liang, ZHANG Yongxing, XIE Qiang, et al. Effects of rock mass parameters on rock slope deformation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 23-27. (in Chinese))
- [14] 李春忠, 陈国兴, 樊有维. 基于 ABAQUS 的强度折减有限元法边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 207-212. (LI Chunzhong, CHEN Guoxing, FAN Youwei. Strength reduction fem slope stability analysis based on ABAQUS[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation of Engineering, 2006, 26(2): 207-212. (in Chinese))
- [15] SL239 1999. 中土工试验规程[S]. SL239 1999. Specification of Soil Test[S]. (in Chinese)
- [16] 王银梅, 谌文武, 韩文峰. SH 固沙机理的微观探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 650-654. (WANG Yinmei, CHEN Wenwu, HAN Wenfeng. Microstudy on mechanism of sand fixation with SH[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 650-654. (in Chinese))
- [17] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [18] Matsui Y, Zsebo K, Hogan B L M. Derivation of pluripotential embryonic stem cells from murine primordial germ cells in culture[J]. Cell, 1992, 70(5): 841-847.
- [19] 费康, 张建伟. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 浙江大学出版社, 2009. (FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in Civil Engineering[M]. Zhejiang University Press, 2009. (in Chinese))
- [20] 杨博闻, 付刚. Q<sub>2</sub>黄土中隧道断面扩大开挖优化分析[J]. 山西大同大学学报: 自然科学版, 2011, 27(4): 59-62. (YANG Bowen, FU Gang. Optimization of section expansion stages of tunnel in Q<sub>2</sub> loess[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2011, 27(4): 59-62. (in Chinese))

(上接第 166 页)

- [9] 杨斌. 橡胶水封的变形计算理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (YANG Bin. Deformation calculation theory and application research of rubber water seal. [D] Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [10] 刘礼华, 王蒂, 欧珠光, 等. 橡胶类止水材料超弹性性能的研究与应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011(4): 199-204. (LIU Lihua, WANG Di, OU Zhuguang, et al. Application and research on the hyper elastic properties for rubber like water-stop material[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, (4): 199-204. (in Chinese))
- [11] 匡震邦. 非线性连续介质力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989. (KUANG Zhengbang. Tensor Analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1989. (in Chinese))
- [12] Pidapartimv, Mayaw. Micromechanical analysis of fatigue cracks in cord rubber composites[J]. Composite Structures, 2001, 54(2): 459-465.
- [13] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (WANG Xu cheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [14] R W Ogden, G Saccomandi, I Sgura. Fitting hyper elastic models to experimental data[J]. Computational Mechanics, 2004(34): 486.