

海底输水管道中气阻及水击问题研究进展

俞韵祺, 万五一, 潘锦豪

(浙江大学水利与海洋工程学系, 浙江 杭州 310058)

摘要:针对海底输水管道工程中存在的对输水目标不利的驼峰气阻和水击问题,引入气泡理论和流态分析方法计算分析跨海输水管道中驼峰气阻的形成过程,采用特征线法建立输水管道中加压泵事故断电引发的水击计算模型,介绍了海底输水管道中的水击防护措施,指出空气罐在海底输水系统中有特殊的优势,和管道一体化后可实现海底封闭式供水,描述了空气罐的数学模型。认为海底管线布置应尽量保证地形平缓,应充分重视空气罐防护技术,它们是实现海底输水管道安全运行的关键。

关键词:海底输水管道;气阻;水击;空气罐

中图分类号:TV134.1; TV672 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)03-0114-05

Air lock and water hammer research progress of submarine water supply pipeline//YU Yunqi, WAN Wuyi, PAN Jinhao(*Department of Hydraulic and Ocean Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

Abstract: The existing problems of hump air lock and water hammer in the projects of submarine water supply pipeline are harmful to the water supply target. Therefore, bubble theory and flow method are used to analyze the cause of hump air lock. By using method of characteristics, we establish a water hammer model caused by pump power failure in water supply pipeline, and introduce the protective measures against water hammer in submarine water supply pipeline. In addition, we point out that the integration of air tank and pipeline is possible for the special advantage of air tank in submarine water supply system. Furthermore, we introduce the mathematical model of air tank. Likewise, we observe that it is mandatory to ensure the submarine pipeline layouts on smooth terrain and pay full attention to the air tank protect technology, which are the keys to achieve safe operation of submarine water supply pipeline.

Key words: submarine pipeline; air lock; water hammer; air tank

我国年降水量从东南向西北基本呈递减分布,降水量的季节差异和年际变化也十分显著^[1],造成水资源时空分布严重不均。为了满足各地区持续增长的淡水需求,大规模跨流域调水已经成为缓解水资源分配矛盾的重要途径。中国目前拥有 6 961 个海岛,岛屿总面积 66 910 km²,约占中国陆地面积的 7%,居住人口超过 4 000 万^[2]。作为海洋生态和海洋经济的重要组成部分,海岛的发展往往受到淡水资源缺乏的制约,铺设海底输水管道以便从大陆调水对于该困扰的解决起着举足轻重的作用。从 1954 年美国 Brown & Boot 公司在墨西哥湾铺设第 1 条海底管道开始,到被视为具有现代意义的 20 世纪 60 年代美国加州海底输水工程,再到目前广泛开展的各种海底输水工程,国外海底输水管道工程的发展已历经半个世纪^[3]。我国海底输水管道工程起步较晚,1973 年开始铺设第 1 条海底管道,海底

输水管道设计及施工技术还处于起步阶段。表 1 记录了迄今为止国内已建和在建的海底输水管道工程^[4-10]。虽然国内外建成的海底输水管道大多集中在近海地区和大陆架范围内,但随着管道技术的进步,也出现向深海发展的趋势。2009 年,Badescu 等^[11]首次采用集束管路和多级泵叠加加压方法,从潮汐和洋流中获取能量,分析了从南美洲到非洲沙漠地区构建洲际海底输水管道的可行性。

表 1 我国海底输水管道工程

工程名称	地区	日调水规模/万 t	跨海段管长/km
长山岛跨海调水工程	长山群岛	5	18.2
广州湾跨海输水管道工程	湛江	30	2.75
洞头陆域引水工程	温州	7	8
南日岛深水跨海工程	莆田	1.5	9.6
斋堂岛供水工程	胶南	0.02	1.2
翔安原水输水工程	厦门	12	20
舟山大陆引水工程	舟山群岛	6	37.33

基金项目:国家自然科学基金(51279175)

作者简介:俞韵祺(1989—),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:21212105@zju.edu.cn

1 海底输水管道的气阻问题

海底输水管道的起伏部位常有空气集中现象发生,这些部位空气形成的阻力损耗了输水系统的动力,是引起高压水击的隐患,对海底输水管道气阻机理的研究具有重要的工程意义。气阻问题的研究最早始于1917年,科学家 Rayleigh 在著名论文《液体中球形空腔崩溃时产生的压力》中给出了气泡周围水体压强和气泡半径变化率的关系^[12]:

$$\frac{p_g - p_\infty}{\rho} = r_g \frac{d^2 r_g}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr_g}{dt} \right)^2 \quad (1)$$

式中: p_∞ 为距气泡中心无穷远处的压强; p_g 为气泡内部的压强; r_g 为气泡半径; ρ 为水的密度; t 为时间。

Rayleigh 开启了液体中气阻机理的研究,但含气水流中气泡受力复杂,在流场中频繁发生着气泡的运动、破裂和聚并,不能以单独气泡的运动来描述。近一个世纪以来,国内外学者对气阻问题的研究很少,主要集中在石油天然气管道、水泵及输配水管路中气阻的防治,绝大多数研究是工程实践的经验总结^[13],缺乏气阻力学方面的理论研究。从陆地工程中得到的经验是可以设置排气阀和减压站来解决气阻问题,但海底环境条件苛刻,与陆地条件大不相同,应用这些常规方法非常困难。

海底地形复杂多变,输水管道也随之起伏变化。管道中含气水流可分为3种:①分离运动,包括层流、波状流、环状流;②间歇运动,包括团状流和气塞流;③分散流动,包括泡状流和雾状流。流态因流体的流速、含气量、管线形状等因素的改变而变化^[14]。含气水流输入后由于水流流动形态发生变化,在驼峰平行段内析出,封闭在管道的高位,不断累积后在一定的管道压强下成为压缩空气,最终在管道中形成驼峰气阻。

具体的流态可由弗劳德数 Fr 和含气率 E_1 加以判断,当 $Fr < L_1$ 时为分离运动; $L_1 < Fr < L_2$ 为间歇运动; $Fr > L_2$ 且 $Fr > L_1$ 时为分散运动^[15]。 Fr 、 E_1 、 L_1 、 L_2 的表达式分别如下:

$$Fr = \frac{v^2}{gD} \quad (2)$$

$$E_1 = \frac{Q'_g}{Q'_g + Q'_l} \quad (3)$$

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757x - 0.481x^2 - 0.0207x^3) \quad (4)$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602x - 1.609x^2 - 0.179x^3 + 0.000653x^5) \quad (5)$$

其中

$$x = \ln E_1$$

式中: v 为流速; g 为重力加速度; D 为管径; Q'_g 为气体的体积流量; Q'_l 为液体的体积流量; L_1 和 L_2 代表流型边界形式,由大量试验数据回归拟合确定。

在海底输水管道工程中,常采用提高泵的输出功率来改变水流的含气率水平,使分离运动转换为分散运动以消除气阻,该方法的缺陷是无法彻底消除气阻,同时需要人工干预并消耗大量电能。

气阻的形成和含气水流流态的变化有着显著的相关性,气体析出并形成气阻受管线形状影响很大。图1是工程实践中两种最常见的气阻类型,均由直线管线变化成弧线所造成,图1(a)表明空气会在管道上弯驼峰段积聚形成气阻,图1(b)表明下倾管道的上游水平段也会形成气阻。因此,在海底管道设计中需要认真考虑管线布置对气阻形成和消除的影响。选择海底地形平缓、土层承载力大的路线,避开海门、海沟、岩层以及流沙等不稳定区域可以有效消除气阻。

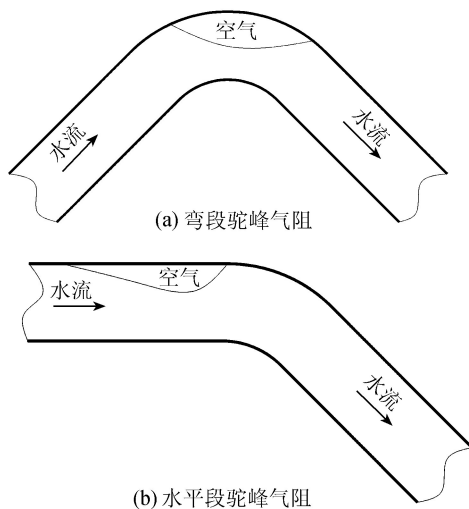


图1 两种常见的驼峰气阻

2 海底输水管道的水击问题

2.1 输水管道中的水泵水击和气阻水击

在海底输水压力管道中,由于短时间内的流速变化,以及动能与压强水头之间的能量转换,引起管路压力发生急剧交替变化,这种水力过渡现象称为水击。闸门的开启和闭合、上游流量水位的变化、加压泵站的启动和关闭等情形都有可能引发水击^[16]。水击所引起的超设计高压、水流震荡和负压问题常常是造成输水工程事故的重要原因,超设计高压水击一旦形成,轻则导致输水管道破裂,造成暂时性供水中断,重则损坏泵机、阀门及其他相关设备。海底输水管道存在的多级加压泵水击问题和管路气阻水击问题,会和管道水击问题综合作用,产生更为严重的后果。因此水泵水击和气阻气团冲击水击的研究

成为海底输水工程的两项重要课题。

2.1.1 加压泵引发的水击

海底输水管道的加压泵在事故停电时会自动停泵关阀,引起取水泵站至中继站间的管线压力突然升高,该水击的压力可达数十倍的原水压,大幅度超出设计许可,而此时如果取水泵站运行尚未停止,危害会进一步加重;如果取水泵站意外停机,则会在取水口至加压泵之间形成低压,同样会损毁管道。无论是一级泵站事故停电还是二级泵站事故停电,都会引发弥合水击和输水管道断流现象。

在事故停电计算中,对水泵的全特性曲线需作出转换,如式(6)所示^[17]:

$$\begin{cases} WH(\theta) = \frac{h}{\alpha^2 + q^2} \\ WB(\theta) = \frac{\beta}{\alpha^2 + q^2} \\ \theta = \pi + \arctan\left(\frac{q}{\alpha}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $WH(\theta)$ 及 $WB(\theta)$ 为泵的两个特性值; h 为无量纲水头; θ 为相对流动角; α 、 β 、 q 分别为无量纲转速、力矩和流量。以 θ 为横坐标, $WH(\theta)$ 及 $WB(\theta)$ 为纵坐标,就可得到水泵的全特性曲线,该曲线可以由试验数据拟合,也可由泵的制造商提供,在全特性曲线中可获得任意时刻转速、力矩和流量之间的关系。

按照集中模型准则处理后,水泵水击的计算模型如图2所示^[18]。图中 C^+ 和 C^- 分别表示管道水击状态下水流正向和负向两组相容性微分双曲线方程组; Δx 和 Δt 分别为微分管长和时间; $s-s$ 和 $p-p$ 是管道和水泵的接触截面。由于通过管道和水泵的流量相同,符合管道水击的水力相容性方程和实现水泵运行的全特性曲线方程就能共同描述整个水泵水击过程。

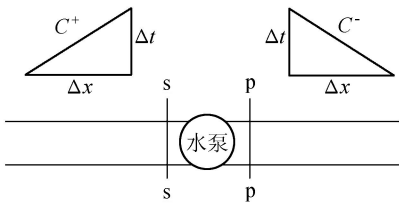


图2 水泵水击特征线计算模型

2.1.2 气阻气团引发的水击

若管道驼峰处存在截留空气,在输水管道未经排气就立即充水的情况下(如水泵突然启动或上游闸门突然开启),有压水流高速冲击气团的现象是无法避免的^[19]。由于气团的存在使得上下游间水流出现阻塞,类似于阀门的快速关闭,因为该现象是瞬时发生的,水压上升很快,极易破坏管道。由此可见,气阻不仅增大阻力,造成调水困难,消耗大量能

量,也是引起管路中压力震荡、管路破裂并危及供水安全的原因。

2.2 海底输水管道的的水击防护措施

在陆地长距离管道调水过程中,输水管道的安全防护措施主要有3类:①沿管道布置减压阀或减压池,将压力分级。②布置超压泄压阀、调压塔,以防水击造成的超压事故。③在管道中布置真空破坏阀和注气排气阀,以减轻驼峰气阻和截留气团的危害^[20]。海底输水管道工程一般可以利用中继海岛的陆地地形,参照陆地管道防护措施布置调压池和空气阀。海底环境的特殊性令常规的陆地安全防护措施难以采用,无法沿管线布置大量调压及排气设备,但空气罐在输水管道系统中能够实现和管路的一体性和密闭性,因此可以被采用^[21]。

空气罐和空气阀不同:空气阀允许外界大气缓慢流进、流出输水管道以平衡管道内的压力,减轻水击破坏,并不允许液体漏出;空气罐中所封闭的是高压空气,通过空气的压缩和膨胀来削弱水击压力波动。空气罐可分为气液分离型和气液非分离型(气囊型),气液非分离型空气罐可以防止因空气溶解于水中导致气压降低而削弱水击防护效果^[22]。

基于空气罐的缓压原理同样可以建立水击的特征线模型,空气罐对管道水击的削弱作用是可观的,其计算模型如下^[23]:

$$\begin{cases} Q_{p1} = Q_{p2} + Q_s \\ H_{p1} = H_{p2} = H_C \end{cases} \quad (7)$$

式中: H_{p1} 、 H_{p2} 、 H_C 分别为空气罐上游、下游及罐中水头; Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_s 分别为空气罐上游、下游及空气罐自身的流量。

空气罐水头方程见式(8):

$$H_C = H_s + H_w + f_s Q_s | Q_s | \quad (8)$$

其中 $H_w = \frac{P - P_a}{\rho g}$ $f_s = \frac{1}{2gA^2\varphi^2}$

式中: H_s 、 H_w 、 f_s 分别为罐中液体高度、罐内空气的相对水头和孔口损失系数; P 为罐内空气的绝对压强; P_a 为外界大气压; A 为孔口断面面积; φ 为流量系数,取值在0.6~0.8之间^[24]。空气罐的具体模型如图3所示。

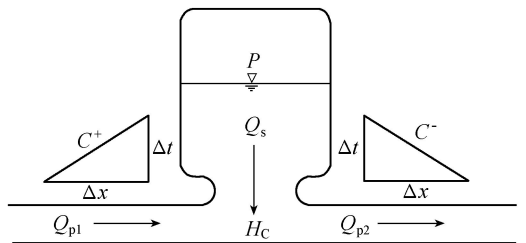


图3 空气罐计算模型示意图

气体多变过程方程如下:

$$PV^n = C \quad (9)$$

式中: V 为罐内空气体积; n 为多变指数,在1~1.4之间变化; C 为罐内气体初始状态常数。

一般认为,压缩空气体积越大,压缩空气初始压力越大,对水击的防护越有效,但过于强调这两点意味着需要体积更大的罐体以及厚度更大、强度更大的罐壁材料,而这也通常被认为是不经济的^[25]。出于该考虑, Kim^[26]使用脉冲响应法和遗传算法获得空气罐参数的优化解,优化参数包括罐体在管道中的位置、管道直径、罐体直径,并用试验验证了优化解的合理性。Wan等^[27]应用MOC方法分析输水管道中空气罐的防护效果,结果表明孔口阻力系数对水击防护也具有极高的优化价值。

在管道起伏处设置空气罐,当管道中发生水击后,管道内压力剧增,大量水体被压入空气罐中,使输水管道中压力降低,减轻了高压危害;当负压出现时,空气罐将水体反向补充给输水管道,提高了管线压力,从而保证了海底输水管道的水压稳定^[28-29]。

3 结 语

海底输水管道在地形起伏处容易形成驼峰气阻,使得输水能量损失很大,设计时应充分考虑海底地形和泵动力,改变流量、流速和含气率,控制水流形态,以减少气阻的形成,条件允许也可以通过智能系统自主调整运行。

海底管道的水击不仅与取水泵站和下游水库水位有关,也与管线沿程次级泵的运作以及形成气阻的截留气团相关,但因为无法像陆地上一样沿管线布置大量调压及排气设备,因此必须通过计算评估水击形成的危害并选择合适的安全防护措施。空气罐在海底输水系统中有着特殊的优势,和管道一体化后,能实现海底封闭式供水,在长管线范围内起到削弱水击危害的作用,适用于长距离、地形起伏多变的海底管道供水。

参考文献:

[1] 任国玉,姜彤,李维京,等.气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J].水科学进展,2008,19(6):772-779. (REN Guoyu,JIANG Tong,LI Weijing,et al. Affect comprehensive analysis of climate change on water resources situation in China [J]. Advances in Water Science,2008,19(6):772-779. (in Chinese))

[2] 王明舜.中国海岛经济发展模式及其实现途径研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.

[3] VILLA C J. California dreaming: water transfers from the pacific northwest [J]. Environmental Law,1993,23:997-

1009.

[4] 沈光,李俊,梁俊宁,等.海底PE管道边敷边埋施工技术研究[J].建筑施工,2007,29(7):547-550. (SHEN Guang, LI jun, LIANG Junning, et al. Study on construction technology for PE pipeline embedment while placement at sea bottom[J]. Building Construction,2007,29(7):547-550. (in Chinese))

[5] 严振瑞,赖瑞山.广州湾跨海输水管道方案设计的关键技术问题[J].水利规划与设计,2013(5):5-8. (YAN Zhenrui, LAI Ruishan. The key technical problems of water pipe design in Guangzhou bay sea-crossing pipeline [J]. Water Conservancy Planning and Design,2013(5):5-8. (in Chinese))

[6] 陈守庆,陈湧城,罗昊进,等.海岛县洞头陆域引供水工程输水管道海域段设计[J].中国给水排水,2013,29(14):32-37. (CHEN Shouqing, CHEN Chongcheng, LUO Haojin, et al. Design of marine pipeline diversion project in island county-Dongtou [J]. Chinese Water & Waste Water,2013,29(14):32-37. (in Chinese))

[7] 张章模,姚建友,林文介,等.南日岛深水跨海管道供水工程设计中的若干技术难题及对策[J].水利科技,2009(3):1-3. (ZHANG Zhangmo, YAO Jianyou, LIN Wenjie, et al. Several technical problems and countermeasures in the design of water supply project of deep sea pipeline in Nanri Land [J]. Hydraulic Science and Technology,2009(3):1-3. (in Chinese))

[8] 丁守业,刘树才,张钰婧.胶南市斋堂岛供水工程海底输水管道施工技术[J].山东水利,2006(9):31-42. (DING Shouye, LIU Shucai, ZHANG Yujing. The submarine water pipe construction technology in Zhaitang Island, Jiaonan City [J]. Shandong Hydraulic,2006(9):31-42. (in Chinese))

[9] 曾广德,简德武,翟作卫,等.厦门市翔安原水跨海管道工程的设计与施工[J].中国给水排水,2009,25(14):103-105. (CENG Guangde, JIAN Dewu, ZHAI Zuowei, et al. Design and construction of submarine pipeline project in Xiang'an, Xiamen [J]. China Water & Waste Water,2009,25(14):103-105 (in Chinese))

[10] 陈昱明,程焱晔.舟山大陆引水工程跨海输水管道设计[J].水运工程,2009(8):101-107,114. (CHEN Yuming, CHENG Chiye. Water pipe design of water diversion engineering in Zhoushan [J]. Port & Waterway Engineering,2009(8):101-107,114. (in Chinese))

[11] BADESCU V, ISVORANU D, CATHCART R B. Transatlantic freshwater aqueduct [J]. Water Resour Manage,2010,24:1645-1675.

[12] RAYLEIGH L. On the pressure developed in liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. Philosophical Magazine and Journal of Science,1917,34:94-98.

[13] 安金龙.长输管道排水过程中的气阻现象与气阻定律[J].石油工程建设,2010,36(5):13-16. (AN Jinlong.

Air lock phenomenon and law during long-distance pipeline dewatering [J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(5): 13-16. (in Chinese))

[14] 鞠岚, 廖柯熹, 陈莎, 等. 成品油管道落差地段水力特性研究[J]. 天然气与石油, 2011, 6(3): 14-16. (JU Lan, LIAO Kexi, CHEN Sha, et al. Hydraulic characteristics research of product oil pipeline at gap location[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 6(3): 14-16. (in Chinese))

[15] 陈家琅. 石油气液两相管流[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 20-22.

[16] 万五一. 长距离输水系统的非恒定流特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[17] 胡建永, 张健, 陈胜. 串联加压输水工程事故停泵的应急调度[J]. 人民黄河, 2013, 35(8): 74-76. (HU Jianyong, ZHANG Jian, CHENG Sheng. Emergency dispatch of pump-stop for series connection pressurization water supply project [J]. Yellow River, 2013, 35(8): 74-76. (in Chinese))

[18] 怀利 E B, 斯特里特 V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组, 译. 北京: 水利水电出版社, 1983.

[19] 郑源. 输水管道系统水流冲击截留气团与含气水击研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.

[20] 李晓燕. 长距离重力流输水管道水击防护方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

[21] 梁兴, 刘梅清, 张进国, 等. 空气罐对输水管道水击的防护研究[J]. 排灌机械, 2005, 23(6): 16-18. (LIANG Xing, LIU Meiqing, ZHANG Jinguo, et al. Protection study on water hammer of pipelines by air vessel[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(6): 16-18. (in Chinese))

[22] 龙侠义. 输配水管线水击数值模拟与防护措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[23] 童乐一, 樊红刚, 陈乃祥. 跨海引水工程的控压措施研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 71-76. (TONG

(上接第 46 页)

[10] 周秋景, 李同春, 宫必宁. 循环荷载作用下脆性材料剪切性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 573-579. (ZHOU Qiuqing, LI Tongchun, GONG Bining. Experimental study on shear behaviors of brittle materials under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 573-579. (in Chinese))

[11] GHRIB F, TINAWI R. An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams [J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 1995, 24: 157-173.

[12] 杜荣强. 混凝土静动弹塑性损伤模型及在大坝分析中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

[13] 赵兰浩. 考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.

(收稿日期: 2014-01-24 编辑: 骆超)

Leyi, FAN Honggang, CHEN Naixiang. Research on the method of control pressure of diversion project in the sea [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 71-76. (in Chinese))

[24] 龚娟, 张健, 俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 166-169. (GONG Juan, ZHANG Jian, YU Xiaodong. Optimization of impedance orifice of air vessel in high-lift water supply system[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 166-169. (in Chinese))

[25] 唐寅. 水击的研究与防护[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.

[26] KIM S H. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 629-636.

[27] WAN W, HUANG W, LI C. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014, 136(1): 871-876.

[28] 高松竹, 蒲家宁, 许萍, 等. 空气罐控制输液管道水击研究[J]. 管道技术与设备, 2004, 4: 17-19. (GAO Songzhu, PU Jianing, XU Ping, et al. Study on controlling water hammer of pipelines by air tank [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2004, 4: 17-19. (in Chinese))

[29] 王文蓉, 叶亚玲, 鞠小明. 压力空气罐对火电厂补给水系统瞬态负压的防护研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(1): 27-30. (WANG Wenrong, YE Yaling, JU Xiaoming. Protection study avoiding transient negative pressure by air vessel of thermal power station pumping system [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(1): 27-30. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-04-15 编辑: 骆超)

(上接第 70 页)

[12] 梁健伟, 房营光, 陈松. 滨海盐渍土的强度特性试验与机理分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(7): 36-40. (LIANG Jianwei, FANG Yingguang, CHEN Song. Experiment and mechanism analysis on strength characteristics of coastal saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(7): 36-40. (in Chinese))

[13] 洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 等. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 52-55. (HONG Anyu, YANG Xiaosong, DANG Jinqian, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 52-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-03-18 编辑: 郑孝宇)