



# 船闸反向弧形阀门顶止水装置改造\*

曾 维<sup>1</sup>, 陈明华<sup>1</sup>, 陶 然<sup>1</sup>, 王 新<sup>2</sup>

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002;

2. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 船闸反向弧形门日常故障主要是顶止水损坏, 主要是反向弧形门开启之初顶止水与门楣脱离形成窄缝, 止水受力恶劣, 易造成止水损坏。从提高止水固定可靠性和改善受力两方面对顶止水装置进行改造研究。通过分析止水现有固定方式存在的问题, 采用穿孔螺栓并安装两个螺母防松的方式进行固定, 提高可靠性, 并在试验装置上对止水压板增加挡水板后止水的受力情况进行测试。结果表明, 止水空化减弱, 水动力时均压力荷载减小, 并能抑制顶止水的自激振动, 止水受力状况得到改善。在 2022 年葛洲坝 3<sup>#</sup>船闸大修中对反向弧形门顶止水装置进行改造, 运行效果良好。

**关键词:** 船闸; 反弧门; 顶止水; 固定方式; 受力状况; 空化

**中图分类号:** U 643

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2023)04-0110-06

## Reconstruction of top water seal device of reversed tainter valve of ship lock

ZENG Wei<sup>1</sup>, CHEN Minghua<sup>1</sup>, TAO Ran<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structures Technology, Ministry of Transport,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The daily failure of the ship lock reversed tainter valve is the damage of the top water seal. Especially when the reversed tainter valve is opened, the top water seal and the gate lintel are separated to form a narrow gap. The stress on the water seal is terrible, causing the water seal to be easily damaged. The modification of the top water seal device from improving the fixation reliability of the water seal and the force are studied. The issues in the existing fixation methods of the water seal are analyzed. Perforated bolts and two nuts are used to fix and prevent loosening to improve reliability. Water retaining plates are added to the water seal on the test device, then the force state of the water seal is tested. The results show that the cavitation of the water seal is weakened. The hydrodynamic time-averaged pressure load is reduced. The self-excited vibration of the top water seal can be suppressed, and the force state of the water seal is improved. In the overhaul of Gezhouba No. 3 ship lock in 2022, the top water seal device of the reversed tainter valve is modified, and the operation effect is good after the modification.

**Keywords:** ship lock; reversed tainter valve; top water seal; fixation method; force state; cavitation

船闸工作门包括工作闸门和工作阀门, 工作闸门布置在闸室内, 工作阀门布置在两侧闸墙内的输水廊道上, 包括充水和泄水阀门, 通过充泄

水阀门的启闭, 实现船闸闸室与上、下游水体连通。高水头船闸工作阀门采用的是反向弧形阀门 (简称“反弧门”) 形式, 主要由门体、支铰、吊杆

**收稿日期:** 2022-07-12

**\*基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (51779151)

**作者简介:** 曾维 (1968—), 男, 正高级工程师, 从事船闸及升船机机械设备检修、改造及技术研究。

和止水装置组成，止水装置沿门叶四周布置，与门楣、侧衬、底槛埋件配合，实现封水功能，反弧门布置见图 1，包括布置在门叶顶部的顶止水、在门叶两侧的侧止水以及在门叶底部的底止水装置。顶、侧止水装置为柔性止水装置，止水材料为橡胶；底止水装置有的船闸为柔性止水装置，止水材料为橡胶，如葛洲坝 3 座船闸，而有的船闸为刚性止水装置，门体止水件与底槛止水座紧密配合，达到封水目标，如三峡船闸。

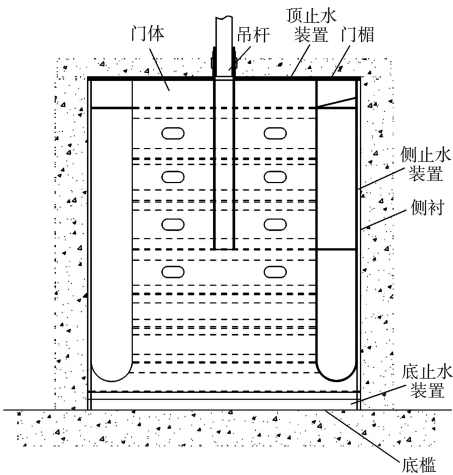


图 1 反弧门布置

反弧门在高水头时动水启闭，承受着复杂的水动力荷载作用，工作条件十分恶劣，顶止水易损坏，相对于船闸其他设备，故障率较高。反弧门检修时，船闸采用单边输水方式运行，检修不仅耗费较多的人力物力，还会影响船闸的通航效率，且长时间单边输水对输水廊道的设备设施带来不利影响。

针对反弧门顶止水易损坏的问题，从提高顶止水固定可靠性和改善受力两方面对顶止水装置进行改造，通过模型试验检测，研究受力改善方案，并在船闸检修中应用研究成果。通过对顶止水装置的改造，实现延长顶止水使用寿命的目标，解决反弧门顶止水易损坏这一船闸设备设施中存在的短板，为船闸高效运行提供有力支撑。

1 反弧门故障分析

对三峡、葛洲坝船闸反弧门 2016—2021 年故障进行统计，结果见表 1。

表 1 三峡、葛洲坝船闸反弧门故障

故障	次数	占比/%
顶止水损坏	61	75.3
底、侧止水损坏	12	14.8
其他	8	9.9

反弧门故障主要包括顶止水损坏、侧止水损坏、底止水损坏、联门轴松动和结构局部损坏等。统计结果表明，故障主要是止水损坏，占比 90.1%，且主要是顶止水损坏，占比 75.3%。顶止水损坏表现为止水撕裂和缺损。大部分顶止水更换后寿命不到 2 a 就会再次损坏，例如三峡船闸中南五反弧门 2016 年 10 月更换顶止水，2018 年 3 月该反弧门止水再次损坏等。

在三峡船闸日常检修中，2021-07-14 北四反弧门顶止水螺栓脱落、止水破损，顶止水压板变形；2018-07-24 北三反弧门顶止水中部偏右侧约 300 mm 断裂，顶止水转角处损坏，顶止水中部至右侧共 8 颗螺栓不同程度松动，如图 2 所示。



a) 顶止水中部偏右侧约 300 mm 断裂  
b) 顶止水中部至右侧共 8 颗螺栓不同程度松动

图 2 检修中发现的异常

2 反弧门顶止水损坏原因分析

反弧门工作时处于高水头的非恒定、非均匀、非连续水流中，承受着复杂的水动力荷载。反弧门开启之初顶止水与门楣脱离形成窄缝，在上下游水头差作用下发生高速射流空化。同时止水在水压下产生较大变形，高速射流与止水弹性力相互作用，导致止水像舌簧一样在高速水流中振动，

即自激振动<sup>[1-2]</sup>。

止水在高速水流脉动压力、空化冲击、自激振动等复杂荷载作用下,易发生振动、撕裂<sup>[3-4]</sup>。振动易造成止水紧固螺栓松动,带来顶止水松动,在水流作用下,顶止水安装孔径被冲击扩大,顶止水偏离原安装位置,在松动和偏离位置两种不利状态下,顶止水极易损坏。

### 3 反弧门顶止水装置改造

#### 3.1 顶止水固定方式改造

##### 3.1.1 现有技术方案及存在的问题

反弧门顶止水寿命较短,是影响反弧门可靠性的最主要因素,止水座板螺孔损坏后,处理时间较长。针对以上问题,从提高顶止水固定可靠性、改善顶止水受力状况以及检修处理简便等方面对顶止水装置进行改造研究,延长顶止水使用寿命,缩短检修时间。

现有的反弧门顶止水装置见图3。顶止水由压板、螺栓固定在反弧门止水座板上,螺栓紧固在止水座板螺孔内,三峡船闸还采用了防松措施,螺栓用钢丝两两连接互锁的方式进行防松。用钢丝连接互锁防松方式是基于两互锁螺栓若一颗向松动方向转动,通过连接钢丝会带动另一颗向紧固方向转动,通过紧固方向转动阻力限制螺栓松动。

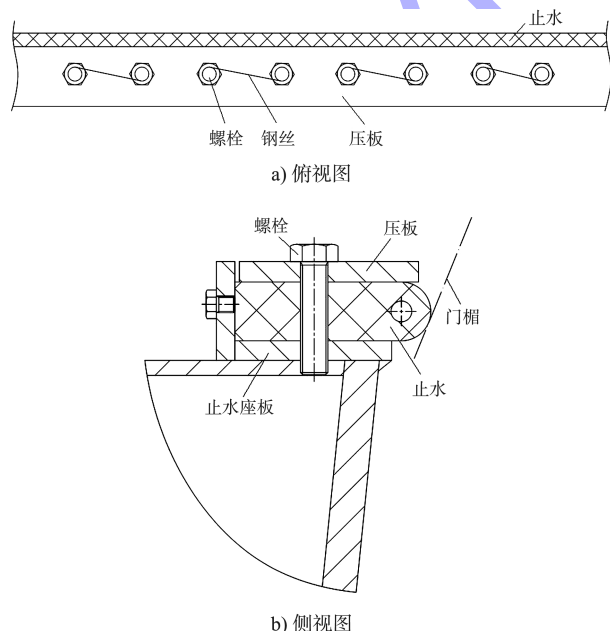


图3 船闸反弧门顶止水装置

存在的问题:1)顶止水材料为橡胶,压紧后可再继续压缩,不大的力可使螺栓继续紧固,因此在止水固定中,连接互锁方式不能起到有效防松的作用。2)螺栓松动造成压板松动,压板松动冲击螺栓,造成止水座板螺纹损坏,失去固定功能。对损坏螺孔的处理,需要在现场对其扩孔攻丝,加工更大规格的螺孔,处理时间长,随着螺孔越来越大,处理的难度也越来越大。

##### 3.1.2 拟采取的改造方案

针对顶止水固定存在的问题,采用如图4所示的改造方案。具体改造内容为:1)将止水座板螺孔改为通孔。2)将止水固定螺栓由沉头螺栓改为穿孔螺栓,采用螺栓加螺母的方式固定止水,螺栓头部安装2个螺母实现防松。3)在反弧门顶部门格封板增设操作孔,便于紧固螺栓。在阀门顶部门格封板增加操作孔,对于结构整体性较好的反弧门结构受力以及水流流态等均不存在影响。

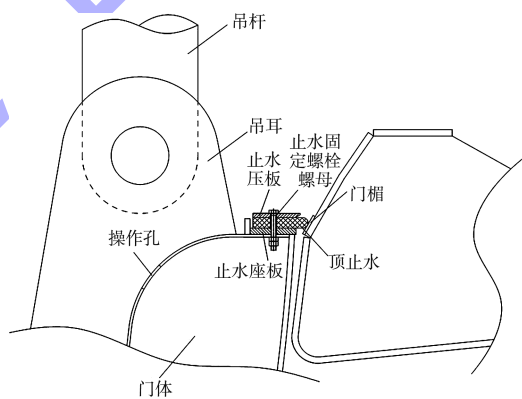


图4 反弧门顶止水安装固定改造方案

采用以上方案对顶止水固定方式进行改造,实现了:1)避免止水座板螺孔螺纹牙型不完整、精度降低造成顶止水牢固性降低,采用螺栓加螺母固定的方式,螺栓、螺母是新件,螺纹配合符合固定要求,牢固性较易得到保证。2)螺栓头部安装2个螺母可实现防松要求。3)避免止水座板螺孔螺纹损坏,须进行扩孔攻丝,大幅缩短检修时间。4)提高顶止水固定可靠性,更换简便,缩短检修工期。

#### 3.2 顶止水压板改造

##### 3.2.1 增加挡水板后进行检测

采取在压板上增加挡水板改善顶止水受力状



况。研发了无缩尺效应的高水头阀门顶止水 1:1 切片试验装置<sup>[5]</sup>, 对增加挡水板后的反弧门顶止水受力情况进行检测, 试验水头控制为 27 m(葛洲坝船闸反弧门最高运行水头), 切片厚度包含 2 个螺栓, 切面选择相邻 2 个螺栓的中间断面, 切片总厚度为 24 cm, 顶止水装置试验结构见图 5, 压力测点布置见图 6。

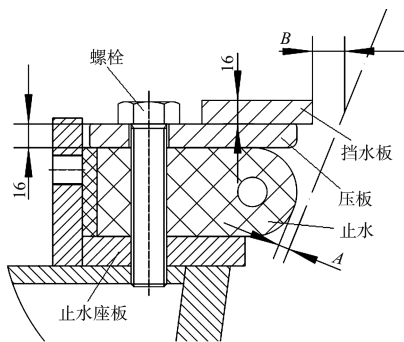


图 5 顶止水装置试验结构 (单位: mm)

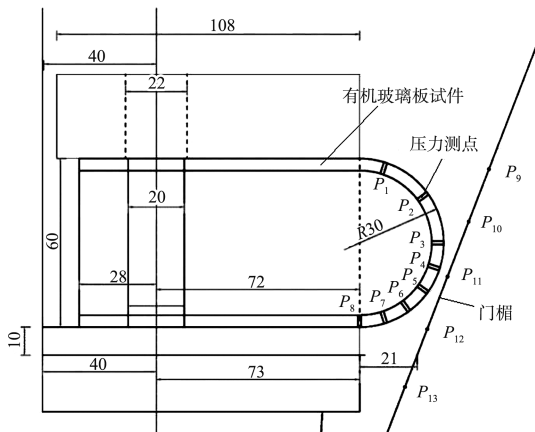


图 6 压力测点布置 (单位: mm)

试验时, 顶止水与门楣间隙 A 为 1 mm 条件下, 分别调整压板上方的挡水板与门楣间隙 B 为 8、13、18、23、28 mm 开展试验, 对应挡水板底面最窄断面缝隙为 2、7、12、17、22 mm, 对这 5 种缝隙情况下的顶止水受力情况进行试验检测。

试验结果为: 1) 不同顶止水挡水板缝隙条件下, 局部空化现象见图 7。随着挡水板逐渐向前延伸, 止水头部缝隙空化有逐渐减弱的趋势, 尤其在最窄缝隙 2 mm 工况下, 止水头部空化减弱较明显。

2) 不同挡水板缝隙条件下, 时均压力见图 8。随着顶止水增加的挡水板缝隙由 22 mm 逐渐减小,

止水上表面压力呈减小的趋势, 至缝隙约 2 mm 时, 压力较缝隙 22 mm 情况减小约 50%, 下表面压力值也有一定程度增加, 作用于顶止水的总荷载减小, 对控制止水受力变形和空化作用有利。总体上看, 止水受力向有利的方向发展。

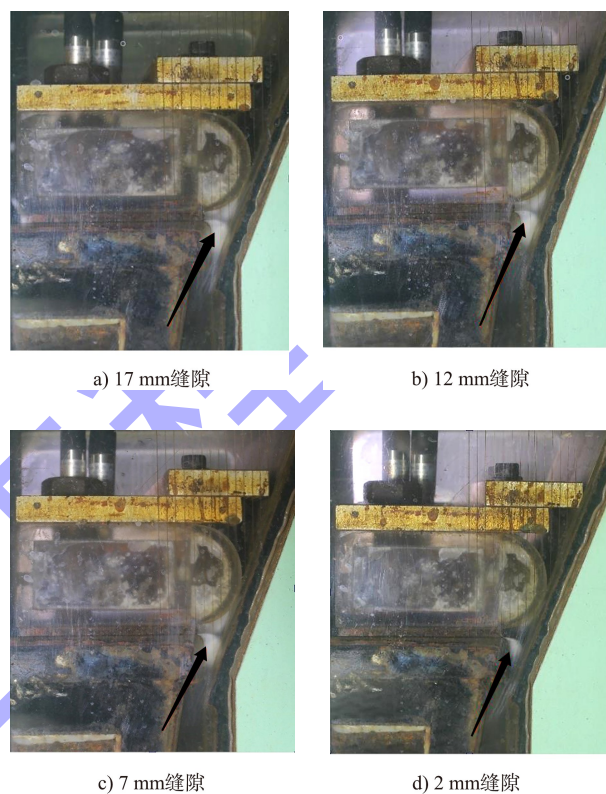
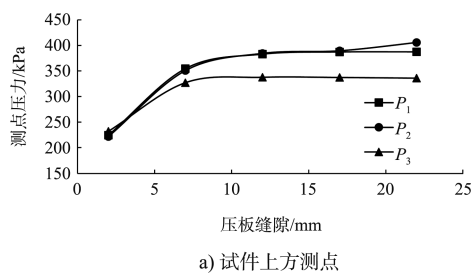
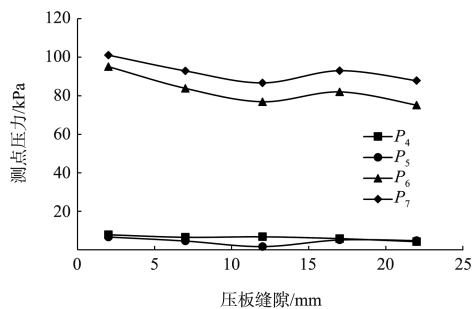


图 7 27 m 水头下不同挡水板缝隙止水空化



a) 试件上方测点



b) 试件下方测点

图 8 各测点压力与挡水板缝隙的变化关系

3) 在增加挡水板后,且在缝隙较小的情况下,止水变形量明显有所减小,随着缝隙增大,效果逐渐减小,与止水表面压力变化情况总体吻合。

4) 当不采用挡水板时,在 14~20 m 水头内均发生了较强的自激振动;当挡水板缝隙为 0 和 2 mm 时,在该水头内未发生止水自激振动;当挡水板缝隙 7 mm 时,在 18~20 m 水头内发生自激振动。可见,挡水板小缝隙时对止水在小开启或漏水情况下的自激振动有一定的抑制作用。

试验结果表明,随着顶止水挡水板缝隙减小,在缝隙为 7 mm 时,止水受力改善出现较明显的变化,缝隙越小,改善程度越大。在缝隙为 2 mm 时,止水头部空化减弱较明显,作用于顶止水的总荷载减小 50% 以上,对止水在小开启情况下的自激振动有一定的抑制作用。根据缝隙大小对止水受力改善的变化趋势可以推断,当缝隙较 2 mm 更小时,对止水受力改善的程度会更大。

### 3.2.2 顶止水压板改造

对压板进行改造,采用如图 9 所示的改造方案。具体的改造内容为:1) 在压板上增加挡水板,挡水板尾部通过铰链与压板连接,铰链焊接在压板上,反弧门全关时,挡水板头部搭接在反弧门门楣上;2) 挡水板与压板铰接,挡水板可在垂直面内旋转,适应反弧门全关位的微小变化,既保证了在反弧门全关时,挡水板与门楣缝隙为 0 mm 或很小,反弧门在小开启情况下改善顶止水受力状况,又能避免由于反弧门全关位变化,挡水板对门楣的挤压损伤;3) 在压板上设置限位板,防止关反弧门时,挡水板在水力作用下翻转,不能回位,造成反弧门全关时挡水板不能搭接在反弧门门楣上。

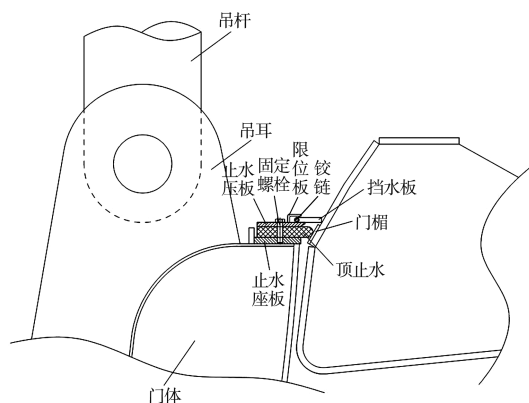


图 9 反弧门顶止水压板改造方案

## 4 工程应用

2022 年对葛洲坝 3# 船闸反弧门采用如图 10 所示的改造方案。具体的改造内容为:1) 拆除反弧门原有顶止水及其压板紧固螺栓;2) 改造顶止水座板螺孔为通孔;3) 在反弧门迎水面导流板上增设 6 处操作工艺孔,用于安装紧固顶止水螺栓和螺母;4) 顶止水放置在止水座板上,调整它与门楣之间间隙满足要求,对顶止水进行蒙孔、钻孔,在止水座板上安装反弧门顶止水及其压板;5) 将通孔螺栓依次安装在改造后的反弧门顶止水座板通孔处,通过反弧门迎水面导流板操作工艺孔,依次紧固通孔螺栓和双螺母;6) 安装挡水板、铰链及限位装置。

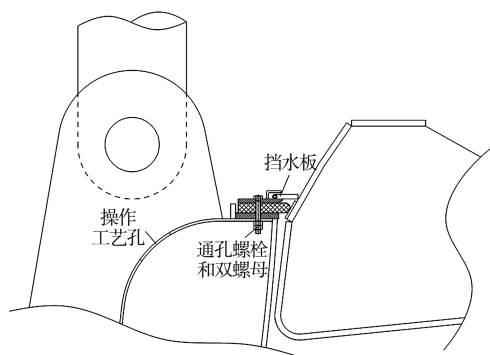


图 10 葛洲坝 3# 船闸反弧门顶止水装置改造

由于葛洲坝船闸反弧门关终位在运行中会出现微小变化,与模型试验固定挡水板不同,改造中采用的是活动挡水板,铰链结构使挡水板能够

翻转,既保证了在水压作用下挡水板与门楣贴紧,间隙接近于0 mm,又能避免挡水板对门楣的挤压损伤。3#船闸反弧门在近几次的大修中进行了换新,止水固定螺孔未出现大面积损坏,因此没有全部采用钻成通孔的形式进行改造。

固定方式、挡水板改造前后情况见图11、12。反弧门改造实施顺利,改造后至今运行效果良好。



图11 固定方式改造前后的情况

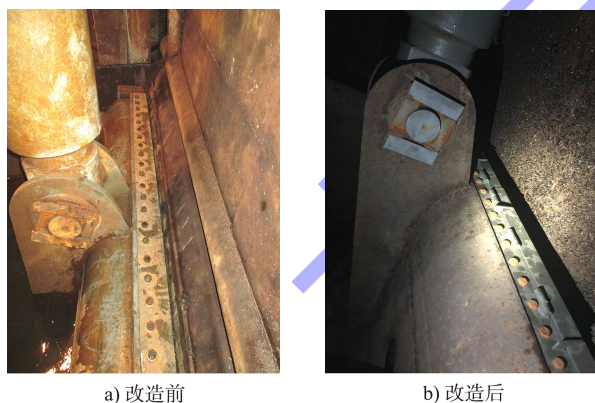


图12 挡水板改造前后的情况

## 5 结语

1) 反弧门日常故障主要是顶止水损坏,设备故障影响船闸通航效率,长时间检修对另一侧廊道内的设备设施也会带来不利影响。

2) 反弧门开启之初顶止水与门楣脱离形成窄缝,在上下游水头差作用下顶止水发生高速射流空化,受到高速水流脉动压力,产生自激振动,易造成止水损坏。

3) 对反弧门顶止水固定方式采用螺孔改为通孔、沉头螺栓改为穿孔螺栓加螺母、安装2个螺母防松的方式进行改造,提高了顶止水固定可靠性,更换便利,延长止水使用寿命,缩短检修工期。

4) 采用在止水压板上增加挡水板的方式进行改造,反弧门在小开启情况下顶止水空化减弱,水动力时均压力荷载减小,并能抑制顶止水的自激振动,改善顶止水受力状况,延长止水使用寿命。

## 参考文献:

- [1] 胡亚安,郑楚珮,凌国增.高水头船闸反弧形阀门顶缝隙流特性及其应用[J].水利水运科学研究,1995(4):352-361.
- [2] 胡亚安,郑楚珮.葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型监测[J].水科学进展,1994(3):235-241.
- [3] 连恒铎,张瑞清.水口船闸廊道输水反弧门空化成因及防范措施[J].福建电力与电工,2004(1):11-13,20.
- [4] 谢省宗,李世琴,陈文学,等.三峡永久船闸输水反向弧形阀门流激振动问题研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2003(1):38-46.
- [5] 王新,胡亚安,严秀俊,等.高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究[J].水利水运工程学报,2017,164(4):14-19.

(本文编辑 王璁)

(上接第42页)

## 参考文献:

- [1] 牛荻涛.海洋环境下混凝土强度的经时变化模型[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),1995,27(1):49-52.
- [2] 牛荻涛,王庆霖.一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J].工业建筑,1995,25(6):36-38.
- [3] 颜迎迎,高向玲.大气环境下混凝土强度经时变化规律研究进展[J].结构工程师,2011,27(6):134-140.
- [4] 高向玲,颜迎迎,李杰.一般大气环境下混凝土经时抗压强度的变化规律[J].土木工程学报,2015,48(1):19-26.

- [5] 李燕兵.内河在役直立式码头构件承载力的弱化规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [6] 程婷,应宗权.在役港工混凝土强度时变规律[J].水运工程,2015(3):136-139.
- [7] 王磊,张建仁,张克波.回弹法和钻芯法检测劣化桥梁混凝土强度相关性研究[J].中外公路,2010,30(2):101-104.
- [8] Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP Model Code 1990 Design Code[S]. London: Thomas Telford Ltd, 1993.

(本文编辑 赵娟)