



松花江大顶子山航电枢纽泄水闸 弧形闸门封冻期应力检测

帅秀莲

(松花江航运枢纽建设管理中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对松花江大顶子山航电枢纽泄水闸弧形闸门数量多、冬季弧门越冬维护成本高的问题, 对坝区泄水闸弧形闸门进行了封冻期闸门应力检测。通过对获得的应力数据分析, 证实了冬季封冻期泄水闸弧门在直接承受江面冰载荷条件下, 闸门并未产生明显变形, 为大顶子山航电枢纽泄水闸无防冰措施越冬提供了数据支持。

关键词: 应力检测; 航电枢纽; 封冻期; 弧形闸门

中图分类号: TV 663+.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0129-05

Stress detection of water release radial gate for Songhuajiang Dadingzishan navigation-power junction

SHUAI Xiu-lian

(Songhua River Shipping Hub Construction Management Center, Harbin 150001, China)

Abstract: To counter the problem of the numbers and high maintenance cost of water release gate of Dadingzishan navigation-power junction in winter, we carry out stress detection on water release radial gate in the freezing period. By analyzing the stress data obtained, we confirm that the water release radial gate which bears ice load directly does not produce significant deformation. The result provides a data support for the non-measure over-winter practice of the water release gate of Dadingzishan navigation-power junction.

Key words: stress detection; navigation-power junction; freezing period; radial gate

松花江大顶子山航电枢纽工程位于松花江干流、哈尔滨市下游 46 km 处, 是松花江航道梯级开发总体规划中的 7 座枢纽之一, 是黑龙江省“十五”期间重点工程, 并列入了交通部“十五”补充计划, 是 1 座以航运、发电和改善哈尔滨市水环境为主, 同时具有交通、旅游、供水、灌溉和水产养殖等综合利用功能的航电枢纽工程^[1]。自 2007 年 10 月 27 日首台机组并网发电以来, 已安全运行 7 a。

松花江大顶子山航电枢纽工程为大(I)型工程, 工程等级为 1 等, 永久性主要建筑物为 2 级, 设计洪水标准 100 a 一遇, 校核洪水标准 300 a 一遇。枢纽总平面布置从右至左为: 船闸、10 孔泄

洪闸、河床式水电站、28 孔泄洪闸、混凝土过渡坝段、土坝及坝上公路(桥)等, 坝线全长 3 249.78 m。总装机容量 66 MW, 最大下泄流量 22 704 m³/s。泄水闸每孔宽 20 m, 各设一道弧形工作闸门。弧形闸门主框架结构为焊接结构, 采用双主横梁、斜支臂支撑。门叶和支臂材料为 Q345D 钢板及 Q235B 型钢。

弧形工作闸门运行工况多, 运行环境恶劣, 要承担常温期挡水和封冻期挡水及洪水期泄水的任务, 闸门的安全运行对于枢纽的正常运行有着举足轻重的作用。本文结合封冻河流弧门结构挡水工况的应力变形受冰压力影响的状态尚无实测

收稿日期: 2014-01-05

作者简介: 帅秀莲(1964—), 女, 高级工程师, 从事机电、金属结构设备管理工作。

资料可循的特殊性,对弧形工作闸门进行冰冻期静应力安全检测,了解弧形闸门在冰冻期的受力状态,为大顶子山航电枢纽及高寒地区水工闸门的安全运行以及设计与管理提供科学依据。

1 工程背景

大顶子山航电枢纽工程共计 38 孔泄水闸,自 2007 年投入使用以来,依据相关规范^[2-3]及设计单位的要求,每年封冻期要在每扇弧门前方 1 m 处打冰槽或者每孔弧门前增加潜水泵等扰动装置使其不受冰载荷。由于大顶子山航电枢纽的泄水闸数量较多,导致每年冬天需要投入大量的人力、物力对泄洪闸进行防冰处理,而且在防冰作业过程中,很容易发生人员坠江、设备漏电等危险。鉴于此,通过几年不断摸索、实践,在冬季选择 4 孔弧门,分别采取人工打冰、门前放置保温板隔离冰层、安装潜水泵扰动江水和直接承受冰载荷压力等 4 种方式进行试验,经肉眼观测发现直接承受冰载荷的弧门门体结构未发生变化。为了科学、真实、可靠地掌握弧门直接承受冰载荷压力情况,为今后封冻河流金属结构设备的设计、制造、安装及运行管理工作提供依据,根据航电枢纽现场情况,在冬季江面封冻期间,选取 3 号弧门和 5 号弧门进行了应力检测对比试验。其中,3 号弧门直接承受冰载荷压力,5 号弧门门前采取防冻措施而承受水压力。

2 弧形工作闸门应力检测

2.1 应力检测原理

应力检测采用电阻应变计和多通道静态电阻应变计微机检测系统。应力测点上粘贴的电阻应变计通过连接电缆与静态电阻应变计内部的精密标准电阻构成应变电桥,其输出电压随应变变量变化且为线形关系。电桥输出电压经高性能、低噪声精密仪表放大器进行补偿,电压放大后,再经过高精度 A/D 模数转换器转换为数字量送入微机,由专用软件实时动态采集记录,并且进行滤波、消噪、平均、回归等等后处理。各通道的传输、放大以及转换都分别采用等效应变源进行转换计

算式的现场标定。依据各测点、各方向的应变实测值,实测应力按如下基本公式换算:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为测点的单向应力; σ_x 和 σ_y 分别为平面测点 x 和 y 方向应力; E 为应变片粘贴处闸门材料的弹性模量,此处取 $E = 206 \text{ GPa}$; μ 为闸门材料泊松比,取 $\mu = 0.333$; ε , ε_x 和 ε_y 分别为单向测点应力值和平面测点 x 和 y 方向应力值。

检测用电阻应变计选用中航电测仪器股份有限公司生产的 BE120-10AA 胶基电阻应变计,其精度等级为 AA 级,灵敏系数 2.01,电阻为 $(120 \pm 0.1) \Omega$ 。静态电阻应变计则使用武汉优泰电子技术有限公司生产的 60 点应变静态应变测试系统 uT7160。

应变计与被测构件的粘接采用 502 胶,测试导线采用经过 ISO 认证的三芯屏蔽电缆,以提高检测系统的抗干扰能力。由于测点需要长时间工作在水中和冰层中,为保证应力测量的可靠稳定,使用 703 胶和水中胶对测点处的应变计进行了严格的密封处理,以提高测点的防潮性能和抗压强度。为消除温度差异对测试结果的影响,各测点采用了单点一对一补偿的温度补偿方式。弧形闸门应力检测系统组成见图 1。

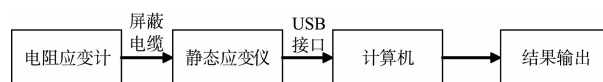


图 1 弧形闸门应力检测系统

2.2 测点分布

由于弧形闸门结构对称,静水压力、冰压力也对称,故测点主要布置在所选闸门一侧的主要构件上。根据三维有限元计算和类似工程原型观测资料^[4-6],静应力试验测点布置在弧门主要受力构件应力较大处。依据枢纽现场情况,为实现两扇弧形闸门应力检测共用保暖仪器房,同时缩短屏蔽电缆长度,将 3 号弧门测点布置在左半门,5 号弧门测点

布置在右半门, 两扇门测点共计 40 个。

1) 主横梁。在弧形闸门上、下主横梁下翼缘跨中及 1/4 跨处, 布置 4 个测点, 主横梁测点均沿主梁轴向布置 (编号为 1~4)。

2) 支臂。在弧形闸门上主框架上支臂中部沿支臂轴向共布置 3 个测点, 分别布置在上支臂腹板及外、内翼缘上, 编号为 5~7; 下主框架下支臂测点位置均与上主框架相同, 编号为 8~10。上、下主框架支臂共布置 6 个测点。

3) 纵梁。在弧形闸门中纵梁的上主横梁上方悬臂部分的中部 (编号 11) 及根部 (编号 12) 各布置 2 个测点, 在与上支臂相交的边纵梁的上主横梁上方悬臂部分的中部 (编号 13) 及根部 (编号 14) 各布置 2 个测点。纵梁测点均沿纵梁高度方向布置, 纵梁共布置 4 个测点。

4) 面板。在上主横梁上部的面板上布置了 2 个测点 (编号 15, 16), 在上主横梁下部及下主横梁上部的面板上各布置了一个直角应变花 (编号 17~20)。面板共布置 6 个测点。

2.3 应力检测工况

2.3.1 空门工况

在应力检测进行之前, 放下检修门挡住上游江水, 提升工作弧门, 放掉工作弧门和检修门之间的库水, 继续提升工作弧门至堰顶位置。此时, 弧门处于零荷载状态, 空门工况形成。弧门保持空门工况约 10 min 后, 使用 uT7160 静态电阻应变仪测读零应力文件并计算机存盘备用。

2.3.2 正常挡水工况

形成空门工况后, 在检修门挡水的情况下, 放下弧门并置于堰底。检修门局部开启, 在弧门和检修门之间充水至上游水位, 等待约 10 min 使门体受力的机械滞后效应完全消除, 水压力荷载与弧门各测点应变值完全稳定, 形成正常挡水工况。此时, 使用 uT7160 静态电阻应变仪采集测点应力并存盘备用, 然后泄水, 完成一次正常挡水应力检测过程。重复上述检测过程 3 次, 以检查试验数据的重复性。3 次检测后, 将弧门置于正常挡水工况下, 等待江面封冻。

2.3.3 封冻挡水工况 (3 号门)

封冻挡水工况下, 弧门门体同时承受上下游静冰压力和冰层以下水压力作用。由于冰压力会随冰层的厚度增加及气温、冰温等的变化而改变, 因此弧门结构的受力情况也会随着冰压力的变化而变化。从江面结冰开始跟踪观测, 每 4 h 自动记录应力检测数据 1 次, 每周安排工作人员巡视测量仪器、并现场处理停电等异常情况直到次年江面解冻。

2.3.4 封冻正常挡水工况 (5 号门)

封冻期正常挡水工况下, 弧门上游门前放置一排潜水泵, 长期抽水扰动江水使门前不结冰, 门前只承受水压力, 弧门下游仍然直接承受冰水压力。此工况下的应力检测方法与持续检测时间封冻挡水工况相同。

3 应力检测结果及分析

3.1 正常挡水应力检测结果及分析

正常挡水工况下, 3 号和 5 号弧门实测应力数据对比见表 1。

表 1 大顶子山泄水闸 3 号、5 号弧门正常挡水工况应力对比

部位	测点	应力/MPa	
		3 号门	5 号门
上主梁	中部 1	48.2	47.1
	1/4 跨 2	40.0	41.9
下主梁	中部 3	62.4	62.4
	1/4 跨 4	49.5	54.5
上支臂	内翼缘 5	35.7	35.5
	腹板 6	40.3	45.1
	外翼缘 7	35.2	37.8
下支臂	内翼缘 8	42.4	32.6
	腹板 9	22.9	16.9
	外翼缘 10	28.8	29.0
中纵梁	中部 11	0.6	0.5
	根部 12	11.8	11.5
边纵梁	中部 13	4.1	4.6
	根部 14	12.8	17.7
面板	15	13.2	11.5
	16	15.8	14.6
	17	22.4	23.7
	18	44.3	42.1
	19	30.1	22.2
	20	32.6	35.9

从表1的结果比较可知,5号门应力实测值和3号弧门应力实测值处于同一水平,且应力变化方向相同。两扇弧门主要测点应力比较接近且都处在较低的应力水平,相同点位的应力最大差值仅为9.8 MPa。这说明正常挡水工况下主要构件变形特征相同。从以上检测结果比较还可以判别出这两扇弧门主要构件尺寸、材料性能、安装质量等是基本相同的,测点处应力均远小于

Q345 钢材容许应力,弧门在正常挡水工况下有较大的安全储备,弧门结构主要构件强度满足规范要求。

3.2 封冻期挡水应力检测结果及分析

封冻期应力检测从2012年11月8日江面封冻开始,至2013年4月中旬结束。图2列出了部分时间点3号门和5号门主要测点在静冰水压力作用下的应力检测结果。

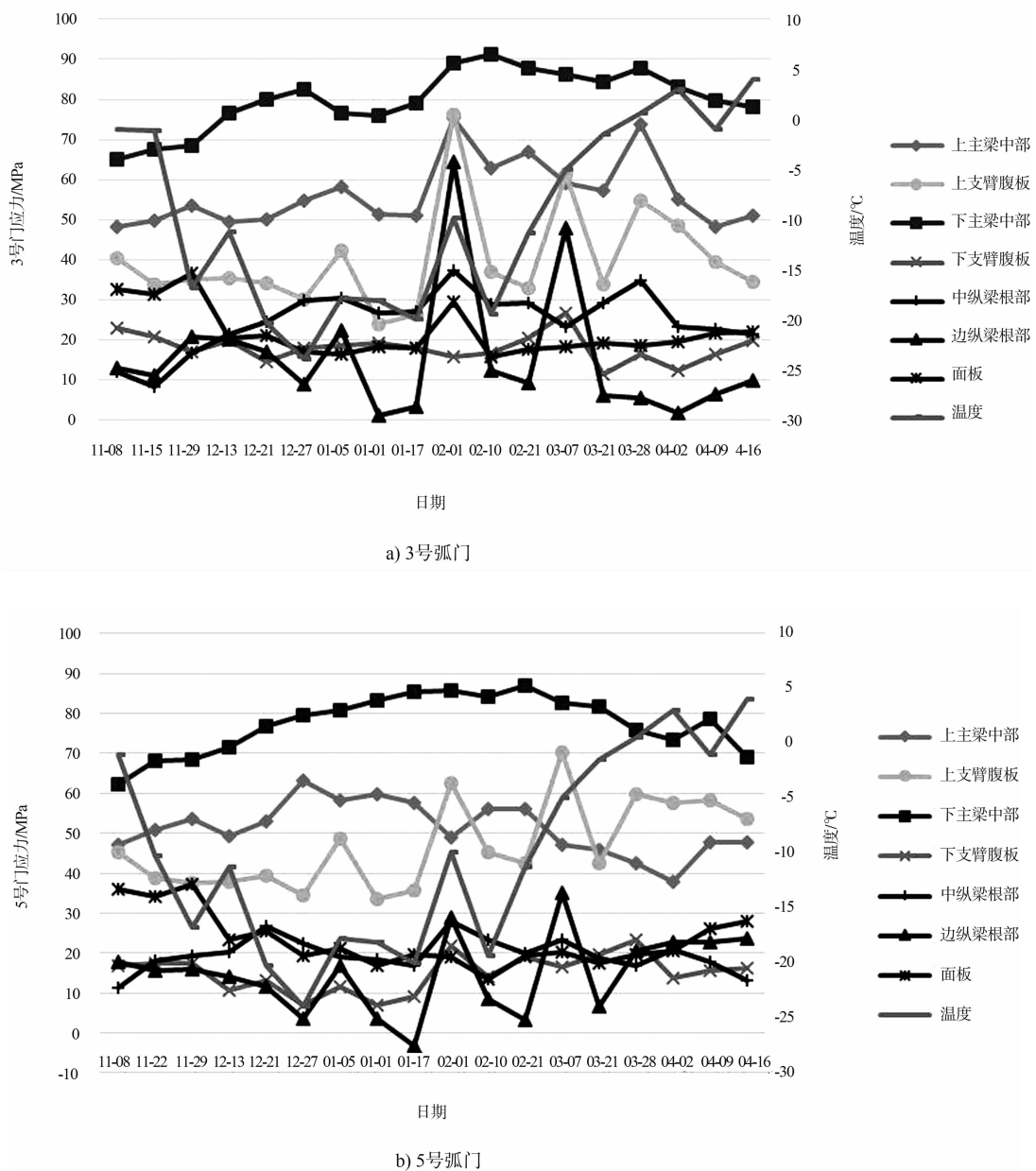


图2 主要测点应力实测值

由图2可知,在封冻期,3号门和5号门主要测点应力随温度变化情况规律基本相同。在连续观测过程中,两扇弧门主要测点应力水平均有不同程度的波动,其中,直接承受冰载荷的3号弧门的应力波动较大。冰冻期检测到同一测点最大应力变化为正常挡水应力水平的3.69倍。在前期的快速结冰期,3号和5号门的应力水平相差较小。随着气温的逐渐降低,主要测点的应力开始出现较大偏差,出现最大应力差时,3号门的应力值均大于5号门。在气温开始逐步回升时,由于冰层的膨胀导致3号弧门应力有较大波动。4月16日左右,江面冰层开始融化,上游水位上涨,将冰面抬升,致使弧门上游未融化的冰面与弧门脱开,此时弧门主要测点应力水平向初始应力水平回归,表明弧门在冰水压力作用下测点处材料在弹性范围内工作。两扇弧门各个测点的最大应力均小于Q345钢材料容许应力,并有一定的安全裕度。

4 结论

1) 在正常挡水工况下,被测的两扇弧形闸门主要构件测点应力值相差不大,都处在较低的应力水平。弧门主要构件均在弹性范围内工作,两扇弧门主要构件尺寸、材料性能、安装质量等基本相同且弧门在静水压力作用下有较大的安全储备。

2) 封冻试验期间,3号门和5号门主要测点的应力变化规律相似,在冰压力发生较大变化时,门前未做防护的3号门测点应力变化幅度均比5号门相同部位测点应力变化幅度大。弧门测点所测得的最大应力值均小于弧门材料的允许应力值,测点处材料工作在弹性范围内,由静冰压力导致的弧门弹性变形在封冻期结束后消失。

3) 弧门应力受温度影响较大。在封冻期气温开始回升之前,弧门应力波动较小,上下主横梁中部、中纵梁根部测点应力随气温降低而增大,而上下支臂腹板测点应力则随温度的降低而降低。在封冻期气温开始回升之后,上主横梁中部测点以及中纵梁下部测点应力随气温升高而降低,上下支臂腹板测点应力则随温度的升高而增大,且温度波动越大,应力波动也越大。在气温开始回升之后温度波动过程中,3号门应力变化均大于5号门应力变化。

综上所述,直接承受静冰压力的3号门在江面封冻期间并未产生明显的变形。3号门主要构件测点的应力值与采取防冰措施的5号门变化情况相似且数值相差不大,当封冻期结束冰层融化后,3号和5号弧门的应力水平均恢复到初始挡水状态。同时,检测结果表明,在高寒地区,经过合理设计的水工泄洪闸弧形闸门可以抵御封冻期静冰压力的作用而不发生损坏。

参考文献:

- [1] 刘常春,吕丽霞,王吉栋. 松花江干流大顶子山航电枢纽工程库区蓄冰处理及枢纽导冰措施研究[J]. 水运工程, 2008(5): 50-76.
- [2] SL 101—1994 水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程[S].
- [3] DL/P 5039—1995 水利水电工程钢闸门设计规范[S].
- [4] 帅秀莲,仇大龙,何文娟. 大顶子山 QMS-2 × 800/2 × 400 kN坝顶门机结构负荷试验研究[J]. 水运工程, 2008(5): 35-39.
- [5] 杨华舒,王洪,施宁,等. 西洱河四级大坝泄洪闸门应力检测分析[J]. 大坝与安全, 2003(5): 47-51.
- [6] 吴宝泉,蒋寅军,王朝晖. 大顶子山船闸人字门背拉杆预应力优化计算与调试[J]. 水电与新能源, 2010(4): 1-3.

(本文编辑 武亚庆)