

水工钢闸门构件剩余寿命估算和可靠性分析

李浩

浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020

[摘要] 钢闸门构件是水利工程设施中极为重要的构成元件, 而在长期使用会出现锈蚀现象, 若锈蚀严重则构件的使用寿命和可靠性均会受损。为此, 文中本着提高水工钢闸门使用价值, 提高其应用可靠度的目的, 开展了水工钢闸门构件剩余寿命的估算和可靠性分析工作, 希望能为相关工作人员提供帮助。

[关键词] 水利工程; 钢闸门构件; 剩余寿命; 可靠性

DOI: 10.33142/hst.v3i2.1721

中图分类号: TV663.4

文献标识码: A

Residual Life Estimation and Reliability Analysis of Hydraulic Steel Gate Components

LI Hao

Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou, Zhejiang, 310020, China

Abstract: Steel gate components are very important components in hydraulic engineering facilities and corrosion will occur in long-term use. If corrosion is serious, the service life and reliability of components will be damaged. Therefore, in order to improve use value and reliability of hydraulic steel gate, the paper carries out the estimation and reliability analysis of residual life of hydraulic steel gate components, so as to provide help for relevant staff.

Keywords: water conservancy project; steel gate component; residual life; reliability

引言

对于水利工程之中的建筑物而言, 水工钢闸门长期处于水位变动区域, 所以极容易出现锈蚀, 而一旦此构件被严重锈蚀就会导致使用寿命缩短、应用可靠性降低。那么, 为了保证水工钢闸门作用的有效发挥, 相关工作人员不仅要做好喷漆保养工作, 更要明确估算水工钢闸门剩余寿命和可靠性的方法。

1 水工钢闸门构件剩余寿命估算

1.1 概念综述

在保障水工钢闸门有效应用的环节中, 开展剩余寿命估算至关重要。对水工钢闸门构件的剩余寿命进行估算时, 需要先明确两个名词的内涵。其一是平均锈蚀量, 也就是钢材的年平均锈蚀速度, 其单位为 mm/a, 在估算环节往往以 α 代指。大部分水工钢闸门构件的制作原材料都是普通碳素钢, 其平均锈蚀量为 0.04mm/a。其二是剩余寿命, 钢闸门构件的剩余寿命是基于其设计使用寿命而提出的, 剩余寿命的数值与设计使用寿命和实际使用寿命之差相等^[1]。而钢闸门构件的实际使用寿命, 就是从投入使用到进入安全使用极限状态的时间, 在这段时间内构件的应力会不断增强, 可能会因进入塑性状态而变形, 进而影响使用。

1.2 典型构件的剩余寿命估算

水工钢闸门典型构件包括其压拉构件、受弯构件和型钢构件, 而在估算这些构件的寿命时, 相关工作人员需要先做好条件假设: 构件的腐蚀过程均匀, 平均锈蚀速率为 α mm/a, 在分析时只考虑锈蚀对构件厚度方面的影响, 而不考虑长、宽方向上的影响; 而且闸门的规定使用期间, 腐蚀问题并不会影响钢材性能, 也不会出现荷载随机变化的情况。

1.2.1 压、拉构件

水工钢闸门拉、压构件是最为常见的一种水利工程零件, 相关工作人员可根据其受力特征以及使用情况来估算其剩余使用寿命。比如, 将其轴心受拉应力定义为 N , 单位为 N; 构件宽 b mm、厚 t mm, 所以其截面面积为 $A=bt$; 在构件尚未被腐蚀时, 其设计应力为 $\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{bt}$, 所以 $N = \sigma bt$ 。而当压拉构件经过 T 年使用并发生锈蚀后, 其锈蚀损失为 αT mm, 钢板厚度为 $(t - \alpha T)$ mm。在钢板达到屈服状态时, 其断面应力应该增加到了 σ_s , 所以断面有效手里面积为 $b(t - \alpha T)$,

则 $\sigma_s = \frac{N}{A} = \frac{N}{b(t - \alpha T)}$, 可推断出该构件的轴心拉、压力 $N = \sigma_s b(t - \alpha T)$ 。

由此可得出压拉构件的使用寿命计算公式：

$$T = \frac{t}{a} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}\right)$$

1.2.2 受弯构件

在水工钢闸门应用环节，受弯构件会随着钢闸门承受的静水压力变化而变化，若压力过大则会导致构件变形。如今，将受弯构件所受的弯矩设定为 M ，而其板构件宽度为 b 、厚度为 t ，那么可计算出截面抵抗矩 $W = \frac{(bt^2)}{6}$ 。该构件未被锈蚀时的设计应力是 $\sigma = M/W = 6M/(bt^2)$ ，基于此可知受弯构件的锈蚀屈服应力为 $\sigma_s = \frac{6M}{[b(t-\alpha T)]^2}$ ，那么从这些等式中可以推断出在受弯构件的使用寿命计算表达式为：

$$T = \frac{t}{\alpha} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{1/2}\right]$$

1.2.3 型钢构件

型钢构件的断面可以被看做是由个体板构件组合构成的，而在构件受拉、受压或受剪，其应力计算公式为 $T = \frac{t}{a} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}\right)$ ，只不过在受弯工况上存在差异^[2]。通常来说，型钢构件受弯时，其断面边缘的最大应力 σ 应该为 M/W ，其中 W 是截面的抵抗矩。在大多数的型钢断面之中，断面的面积 A 与其截面抵抗矩 W 之间存在特定关系，表现为 $W = KA^m$ ，等式中的 K 和 m 都属于修正系数；对于双轴对称工字型断面型钢（如图1）而言， $K=1.45$ ，而 $m=1.5$ 。



图1 双轴对称工字型断面型钢

如果将型钢各个断面的几何尺寸设定为 $b_1, t_1, b_2, t_2, \dots, b_n, t_n$ ，那么，在构件锈蚀之前，其断面面积和设计应力分别为：

$$A = b_1 t_1 + b_2 t_2 + \dots + b_n t_n = \sum_{i=1}^n b_i t_i$$

$$\sigma = \frac{M}{K \left(\sum_{i=1}^n b_i t_i\right)^m}$$

而在构件被锈蚀以后则其断面面积和断面应力分别为：

$$A' = \sum_{i=1}^n b_i t_i - \alpha T \sum_{i=1}^n b_i$$

$$\sigma_s = \frac{M}{K \left(\sum_{i=1}^n b_i t_i - \alpha T \sum_{i=1}^n b_i\right)^m}$$

基于型钢构件设计应力和断面应力的计算公式，可以推断出在弯矩作用之下，型钢构件的使用寿命计算公式为：

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n b_i t_i}{\alpha \sum_{i=1}^n b_i} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{1/m}\right]$$

2 水工钢闸门剩余寿命估算要点

在开展水工钢闸门构件剩余寿命估算工作时，相关工作人员必须明确设计应力的数值，通常来说在水工钢闸门的设计环节设计人员会依照行业规范，将控制值设定为构件的容许应力 $[\sigma]$ 。当然，世界各国在容许预应力与钢材屈服强度比值上设定上存在差异，依据我国水工钢闸门设计规范，二者的规定比值为 0.67。在设计环节，设计师必须根据实际的

作业环境、防腐条件和养护水平等因素，计算闸门面板厚度，不过常规情况下钢板厚度应保持在 6mm，而且为了提高钢板的适应性，应该预留 2-4mm 的腐蚀裕度^[3]。依照水利工程建设规定和相关评价标准来看，如果大中型闸门构件的最小使用寿命为 30a，则其在达到折旧年限的极限值时，应该对其进行更换以免影响水利建设项目的整体使用安全性。此外，相关工作人员在开展估算工作前一定要牢记，锈蚀发生的部位具有随意性，而锈蚀的速度也并非定量，所以水工钢闸门的锈蚀量属于随机变量，取平均值来反映锈蚀情况并开展剩余寿命估算，是一种可行性操作，但是为了提高其运行安全和使用寿命，还需要进一步应用可靠度理论和概率统计理论，基于随机变换的锈蚀量开展研究工作。

3 水工钢闸门构件剩余寿命的可靠性分析

3.1 公式推导

在分析水工钢闸门构件剩余寿命的可靠性问题上，相关工作人员需要先明确钢材的特征锈蚀量概念以及数值。闸门构件的特征锈蚀量是可以被直接检测和测量的，在实践环节应采集其最小值、平均值和最大值，依据数值了解钢材的锈蚀严重程度。在闸门运行环节，构件的锈蚀量数值并非一成不变，只有实测才能获得准确数据，在测量后按照 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 计算出平均锈蚀量，其中 x_i 为锈蚀检测结果， $i \geq 1$ 。当然，在分析时相关工作人员还需要掌握锈蚀量数值在其平均值周围的分布程度，此时引入锈蚀量方差 S^2 ，其表达式为 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ；当锈蚀量 X 的数值在其平均值附近集中时，锈蚀量方差 S^2 较小，若远离平均值而分布，则方差较大。

相关工作人员应该基于分析闸门构件使用寿命可靠性而提出假设：锈蚀过程存在随机性，锈蚀量是正态分布的随机变量，不考虑构件宽度方向的锈蚀影响，而且使用期间闸门的腐蚀问题并不能影响钢材性能，也不会随意出现荷载变化。在构件受拉可靠性进行分析时，可先设定结构抗力为 R 、结构荷载效应为 S 且二者相互独立；以 t 为板厚、以 σ_s 为屈服点、以 α 为锈蚀速度、以 T 为使用年限、 A 为锈蚀前板面积、以 A_0 为锈蚀后板面积，得到功能函数 $Z = \sigma_s b (t - \alpha T) - bt [\sigma]$ ，进而推导出基于钢材特征锈蚀量的板件受拉状况时，构件的使用寿命计算公式，实现对其可靠性的分析。该公式表现为：

$$T = \frac{1 - [\sigma]}{\beta \sigma_\alpha + \mu_\alpha} t$$

3.2 举例分析

某水利工程弧形钢闸门的安全运行极限值为 31a，为实现对其剩余寿命及可靠性的分析，相关工作人员开展了实地测量和调查工作。获得数据表 1。该闸门最薄区域的钢板厚 8mm，依据我国水工钢闸门设计规范其容许预应力与钢材屈服强度的比值为 0.67，然后代入上述公式开展计算和分析。经过计算后可知，该闸门构件的受拉和受弯可靠度指标为 1.83 与 1.602。虽然目前并没有明确的可靠度指标，但是在分析过大量的资料分析以后发现，基于正常的保养条件，当水工钢闸门的安全运行极限值为 30a 时，其可靠指标能达到 1.6 左右。

表 1 水工钢闸门测量数据

锈蚀量均值	锈蚀量方差	锈蚀速度均值	锈蚀速度方差
1.0238mm	0.802mm	0.033mm/a	0.0289mm/a

4 结论

总而言之，水工钢闸门的运行环境恶劣，被腐蚀的可能性极高，在使用环节其可靠性和长久性都难以得到保证。为了实现对水工钢闸门可用性的正确评估，相关工作人员应该掌握估算水工钢闸门构件剩余寿命和可靠性的方法，进而能根据实际情况展开科学分析，实现对水工钢闸门构件的最佳养护。

[参考文献]

- [1] 燕林. 金属腐蚀形态分类[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2005(03): 29-30.
 - [2] 郭建斌, 郑圣义. 钢闸门腐蚀安全研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006(1): 72-75.
 - [3] 赵林章, 董洪汉, 李新凯. 水工钢闸门腐蚀检测技术与剩余寿命预测研究[J]. 人民长江, 2018(1): 237-240.
 - [4] 李佳子. 水工钢闸门的可靠度分析[J]. 黑龙江水利科技, 2018(04): 53-55.
 - [5] 管滑松, 杨登俊, 杜鹏程. 浅析沿海涵闸水工钢闸门的管理与维护[J]. 水电站设计, 2017(02): 111-112.
- 作者简介：李浩（1986-），男，水利水电专业，毕业于合肥工业大学，现就职于浙江省水利河口研究院。