

# 水工钢闸门局部腐蚀演化特征分析

蔡一平<sup>1</sup>, 杨良泽<sup>2</sup>, 许旭东<sup>1</sup>, 袁周致远<sup>2</sup>, 吉伯海<sup>2</sup>

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为研究水工钢闸门局部腐蚀的演化特征,通过检测构件表面腐蚀概况,采用盐雾试验对镀锌钢板进行试验观察,研究局部腐蚀的形貌特征,建立二维元胞自动机模型,并通过确定相关参数,对局部腐蚀的反应过程进行演化。研究表明,局部腐蚀坑会造成钢闸门构件表面穿透或厚度削减,蚀坑内部分产物在孔边堆积,抑制蚀坑在宽度方向上的扩展,蚀坑附近会产生新的点蚀坑洞,但蚀坑深度相对较浅,腐蚀速率缓慢。元胞自动机模型能够模拟腐蚀病害从坑洞萌生到厚坑洞穿透的整个演化过程。

**关键词:**水工钢闸门; 局部腐蚀; 演化过程; 元胞自动机模型; 盐雾试验

中图分类号:TV663

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)10-0056-0005

## Analysis of local corrosion evolution characteristics of hydraulic steel gate

CAI Yiping<sup>1</sup>, YANG Liangze<sup>2</sup>, XU Xudong<sup>1</sup>, YUAN Zhouzhiyuan<sup>2</sup>, JI Bohai<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the evolution characteristics of local corrosion of hydraulic steel gate, salt spray test was used to observe the surface corrosion of galvanized steel plate, study the morphology characteristics of local corrosion, establish a two-dimensional cellular automaton model, and evolve the reaction process of local corrosion by determining relevant parameters. The results show that local corrosion pits can cause surface penetration or thickness reduction of steel gate members, and some products in the pits accumulate at the edge of the holes, which inhibits the expansion of the pits in the width direction. New pitting pits will be generated near the pits, but the pits are relatively shallow in depth and the corrosion rate is slow. The cellular automata model can simulate the whole evolution process of corrosion disease from initiation of pit to penetration of thick pit.

**Key words:** hydraulic steel gate; local corrosion; evolution process; cellular artomata model; salt spray test

## 1 概 述

水工钢闸门是水利水电工程中用于调节水位的一种钢结构,常设置于水利枢纽系统的关键部

位,是水工建筑物的重要组成部分之一,主要用于控制上下游水位,以达到除沙排污、防洪灌溉、引水发电和交通运输的目的<sup>[1]</sup>。在实际运行过程中,干湿交替和水流冲刷等自然条件的长期作用会使该

收稿日期:2023-05-06

基金项目:江苏省水利科技项目(2021028)

作者简介:蔡一平(1968—),男,研究员级高级工程师,主要从事水工建筑材料检测研究。E-mail: 1465528676@qq.com

结构难以避免地发生腐蚀病害,直接影响闸门的承载能力和使用性能。水工钢闸门的腐蚀形态从影响范围上可分为均匀腐蚀和局部腐蚀,均匀腐蚀在日常的检测中能够被及时发现,而局部腐蚀往往更具有突然性和破坏性<sup>[2]</sup>。针对水工钢闸门的局部腐蚀病害,相关学者主要根据平均蚀余厚度法,采用有限元技术对腐蚀深度进行简化,可有效评估腐蚀程度较小的钢闸门的静力性能<sup>[3]</sup>。对于腐蚀严重的情况,可改变局部单元厚度或设置规则孔洞模拟实际的深度变化<sup>[4]</sup>。此外,在对水工钢闸门进行安全评估时,局部腐蚀常被包括在腐蚀因素中,作为一个重要的评价指标影响最终的判断结果。

局部腐蚀包括点蚀、应力腐蚀、缝隙腐蚀和腐蚀疲劳等,其中点蚀较复杂且具有代表性,是腐蚀模型的主要研究对象。针对点蚀损伤的演化问题,陈子光<sup>[5]</sup>提出了多种新型的模拟方法,主要有元胞自动机技术、相场模型和近场动力学模拟。其中,元胞自动机技术<sup>[6]</sup>不仅可以再现基本的物理化学过程,直观地观察到蚀坑演化,还能考虑温度、离子浓度等变量,定性分析环境因素对腐蚀进程的影响规律。相关研究有:以氯离子为代表的腐蚀性物质对金属材料表面氧化膜的穿透破坏作用<sup>[7-8]</sup>,控制其他因素不变时环境温度对金属腐蚀行为的影响<sup>[9-10]</sup>;腐蚀坑洞形状的非规则特征研究<sup>[11-13]</sup>,主要分析了腐蚀过程中蚀坑等效半径和模拟深度的比值,提出了如深度比、尺寸比等变化参数,同时引入了腐蚀速率等条件参数,综合探究蚀坑在不同环境下的反应过程和扩展情况。

本文通过实地病害检测对水工钢闸门的腐蚀发展特征进行总结阐述,采用中性盐雾腐蚀试验对局部腐蚀表观特征进行探究,同时,基于腐蚀特征建立元胞自动机模型,对局部腐蚀坑洞的演化过程进行模拟分析,通过模型参数的设定调整仿真结果,并将其与试验结果进行对比,以验证该模型的合理性。

## 2 基于现场检测的钢闸门腐蚀特征

钢闸门所处环境极其复杂,诱发腐蚀的因素也较为复杂。通过对多扇钢闸门进行现场病害检测,发现不同门体的发展特征、局部特征和腐蚀速率在时间和空间上的变化有诸多相似之处。检测过程中发现腐蚀程度较轻的闸门在不同位置会出现涂层起泡的现象,此病害可能是因为金属基体表面处理不到位,留有少量残余物,后期残留物挥发时就

会导致起泡。此外,若底漆未完全干燥就涂饰面漆,或涂饰过程中没有消除气泡,均会导致涂层起泡。钢闸门面板水位线附近是腐蚀病害较为常见的发生部位,由于大气、液体和钢构件表面在此处相交,导致该部位的腐蚀程度在病害发展初期要高于闸门面板的浸水区和裸露区。但随着反应的进行,其腐蚀速率会呈现变慢的趋势。闸门腐蚀中期,部分涂层会因为紫外线的照射或液体的浸泡而发生不均匀的颜色变化,还可能成泡破裂,导致涂层失效剥落。由于涂层失效,金属基体失去了外部保护,导致腐蚀速率加快,腐蚀坑洞迅速发展。如果在腐蚀中期没有相应的补强养护措施,任由腐蚀发展恶化,则会导致钢闸门的全面腐蚀,严重部位会出现点蚀穿透或厚度大面积削减的现象。

## 3 基于盐雾试验的局部腐蚀特征

为进一步观察钢闸门材料腐蚀坑洞的形貌特征,设计中性盐雾腐蚀试验对镀锌钢板进行为期24 d的试验观察。钢板尺寸为150 mm×100 mm×6 mm,材质为Q235B,依据国家标准《碳素结构钢》获取其主要化学成分。

当腐蚀试验进行到12 d时,表面坑洞较小且数量少,坑洞发育程度较轻,而腐蚀到24 d时,点蚀坑的数量并未过多增长,但坑洞内部溶液和盐雾混合分布在钢材表面,表明腐蚀程度逐步加剧。镀锌保护层表面点蚀坑分布较密,且坑洞会逐步扩展,这可能是因为锌层在加工时表层厚度存在杂质或厚度不均匀导致的,并且可以观察到运输过程中产生了部分划痕。为进一步观察点蚀坑的形貌,采用显微镜观察试验24 d后的试件腐蚀坑洞状态。相同尺度下,镀锌层表面蚀坑较大,并且与周围较小的蚀坑相互附着,在深度上也发展较快。此外,镀锌层坑洞附近满布锈蚀溶液,表明基体发生锈蚀反应,锈蚀产物会随着液体流出孔洞,并不会覆盖在点蚀坑表面,所以不会抑制孔洞在深度方向上的进一步腐蚀。然而,锈蚀溶液流出后附着在基体表面,会成为简易保护层影响点蚀坑在宽度方向上的扩展。通过进一步观察发现,镀锌层蚀坑附近会产生新的点蚀坑洞,但蚀坑深度会相对较浅,腐蚀速率缓慢。

## 4 元胞自动机局部腐蚀模型

### 4.1 物理模型

对于局部腐蚀而言,主要作用因素是水中的氯

离子,其半径较小,容易击破金属氧化物形成的钝化膜而接触到金属基体,从而诱发点蚀,并逐渐形成了腐蚀坑洞。在蚀坑内溶解的金属离子不易向外扩散,造成过多的正电荷积累。为维持孔内的电中性,更多的氯离子进入蚀孔内形成氯化物,而氯化物将发生水解生成金属氢氧化物和自由酸。因此,孔内产生了氢离子,蚀孔底部的酸性增加,进一步加速阳极反应。在水工钢闸门浅水富氧区,溶液介质仍保持中性,使得孔外金属作为阴极发生氧化反应。此外,二次腐蚀产物在孔口形成氢氧化亚铁,并进一步氧化成氢氧化铁,覆盖在孔口,导致孔内介质呈相对滞留状态,溶解氧难以进入,形成氧浓差电池。

#### 4.2 元胞空间

基于试验条件和自然环境下的腐蚀特征,将钢材、盐溶液和涂层等元素构成的系统定义为一个二维空间,模拟钢闸门表面与水溶液接触发生的腐蚀演化过程,如图1所示。为方便模型的构建和计算结果的可视化,将元胞空间离散成四边形网格,将金属基体的左右侧边界设定为固定型,水溶液的左右侧边界设定为周期型边界,金属基体底部和水体顶部边界设定为反射型。完整的元胞空间如图2所示,邻居类型使用Moor型,即考虑上、下、左、右、左上、左下、右上、右下8个元胞为邻居。

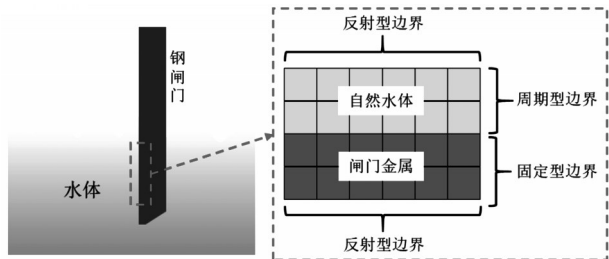


图1 简化模型示意

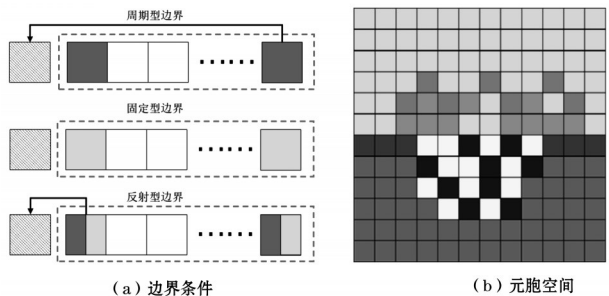


图2 元胞空间示意

元胞自动机的模拟过程是较为理想化的,特此对该模型提出如下基本假设条件:模型的演化程序

基于物理模型中的电化学反应过程,腐蚀行为依靠腐蚀性溶质的扩展和转化进行,1个格位在任意时刻只能存在1种元胞;腐蚀产物产生堆积影响反应的进行,也会一定概率溶解成中性物质。

根据盐雾试验结果可知,带有保护层的金属的腐蚀行为初期表现为点蚀,逐步发展为腐蚀坑洞,如图3所示。依据该腐蚀特征建立元胞自动机模型A,主要展示腐蚀表面,但腐蚀坑洞主要沿深度方向扩展,所以进一步建立局部腐蚀剖面模型B,研究单个坑洞的发育过程和其中的电化学腐蚀特征,如图4所示。

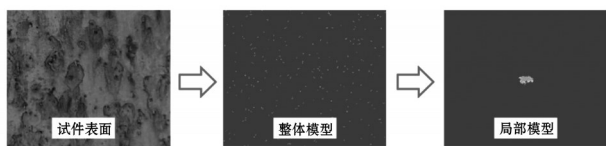


图3 腐蚀模型示意

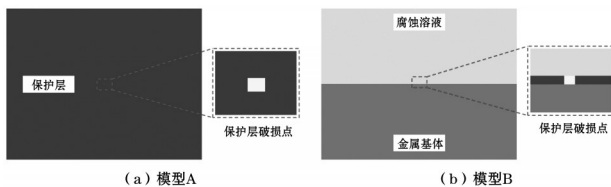


图4 局部腐蚀模型

#### 4.3 演化规则

在元胞自动机运行过程中,针对不同的工况,会有不同的元胞参与演化,需要通过演化规则调控每个位置上元胞的变化状态,从而实现元胞系统的动态仿真。因此,在相对固定的元胞空间内,不同类型的元胞在不同阶段的占比会随着各自状态和位置的改变而产生显著差异,这其中就涉及元胞的转化和扩散行为。

在每个时间步长内,元胞可以随机选择8个邻居元胞中的任意1个,主要有以下3种情况:若被选择的元胞与之能够发生反应,则两者以其设定概率发生转化;若被选择的元胞与之不能发生反应且能发生移动,则位置互换;若被选择的元胞与之不能发生反应且不能发生移动,则位置不变。

#### 4.4 模型参数研究

##### 4.4.1 腐蚀反应概率 $P_1$

与均匀腐蚀的电化学反应不同的是,局部腐蚀的阴、阳极反应过程分别在孔洞内外,孔内为阳极反应,孔外为阴极反应,坑洞形成闭塞区。由此可知,坑洞内部产生阳离子,而腐蚀性溶质主要为阴



离子,为满足坑内的电离平衡,阴离子往孔内聚集,从而促进了腐蚀反应的进行。因此,确定阳极腐蚀反应概率 $P_1$ 是仿真模型的关键点之一。以模型A腐蚀坑洞的等效半径( $E_r=50$ )和模型B孔洞的最大腐蚀深度( $M_r=50$ )为计算指标,初步设计了 $P_1=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0$ 共10个工况,分别观察仿真过程中形貌变化并记载每种工况所需要的时间步 $T$ ,以确定最终的腐蚀反应概率。

研究表明,随着腐蚀反应的增大,模型A计算等效半径所需要的时间步大致相等,说明受到的影响较小,并且腐蚀形貌均满足仿真要求,与实际孔洞形式具有较大的相似性。相比之下,模型B的数据波动较大,随着腐蚀反应概率增大而逐渐变小,这可能是因为模型B主要是靠腐蚀反应进行的,而模型A是通过腐蚀溶质元胞SC的扩散作用而反应的。进一步观察不同腐蚀反应概率下的孔洞腐蚀形貌,发现均近似于椭圆形,能得出较好的仿真结果。综合考虑,设定模型A和模型B的腐蚀反应概率 $P_1$ 为0.5。

#### 4.4.2 溶质扩散概率 $P_2$

局部腐蚀模型中各类元胞的扩散依然遵循八元胞邻居准则,即扩散到每个元胞的概率是相等的。模型A中腐蚀溶质元胞SC向邻近的每个元胞都可以扩散,且每次扩散行为之间相互独立且概率相等。根据该扩散准则,当溶质扩散概率 $P_2$ 介于0.5~1之间时,计算模型A的腐蚀溶质元胞SC在时间步 $T=1$ 内扩散的数量。当 $P_2$ 小于0.7时,腐蚀溶质元胞SC的扩散速率极快,无参考价值;当 $P_2$ 大于0.7后,扩散速率相对较慢,并逐步稳定。综合考虑确定模型A的 $P_2$ 为0.85较为合适。

对于模型B而言,由于坑洞腐蚀行为的扩散方向是沿深度方向,所以腐蚀溶质元胞SC向不同位置的扩散概率值不同,如图5所示。设定腐蚀溶质元胞SC扩散到2号位的 $P_2$ 最小,设定为0.01,其次是1、2号位为0.02,然后是4、5号位为0.05,最后是6、7、8号位最大为0.15。

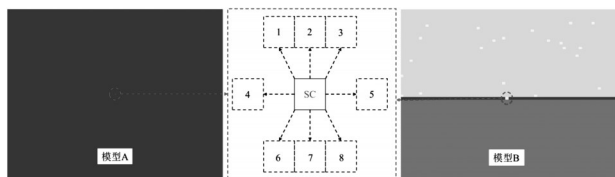


图5 腐蚀溶质元胞SC的扩散

#### 4.4.3 产物堆积概率 $P_3$

电化学反应过程中,坑洞内发生阳极反应致金

属溶解,并在阴极区域产生腐蚀产物,堆积孔洞表面以形成闭塞条件,导致内部阳离子浓度升高加速腐蚀进程。由此可知,坑洞表面合适的产物堆积量是模拟坑洞腐蚀演化规律的关键内容之一。产物堆积过多则会堵塞孔洞,影响腐蚀溶质元胞SC的扩散,抑制电化学反应的进行,若堆积过少则难以形成闭塞效应。

为进一步确定元胞自动机模型的产物堆积概率 $P_3$ ,分别对模型A和模型B进行计算。随着产物堆积概率的增加,模型A在0~0.1的区间内,等效半径 $E_r=50$ 时所用时间步是相对稳定的。当 $P_3$ 大于0.1后,模型计算时间步呈上升趋势,且表现出来的腐蚀形貌和前者相似,由此确定模型A的 $P_3$ 为0.1。同样地,依据上述方法确定模型B的 $P_3$ ,可知当 $P_3$ 介于0.4~0.5时,最大腐蚀深度 $M_r=50$ 所用的时间步较为稳定,并且坑洞剖面的腐蚀形貌也较为合理,故将模型B的 $P_3$ 设定为0.45。

#### 4.5 仿真结果分析

基于以上参数设定可以得知局部腐蚀演化结果,随着腐蚀行为的进行,坑洞内部积聚的腐蚀溶质元胞SC逐渐增多,涂层元胞CC和内部金属被破坏,腐蚀产物元胞FP堆积在孔洞表面。此外,腐蚀形貌近似圆形,并且逐步向外扩大,腐蚀表面逐渐增加。坑内腐蚀溶质的浓度不断升高,随着时间步的增大,坑洞深度不断加大,腐蚀截面积逐渐增加,同时腐蚀溶质也会向左右扩散,增大孔洞宽度,但腐蚀产物堆积在孔外。随着腐蚀反应的进行,中间产物元胞AP的数量越来越多,导致孔内电荷不平衡,从而驱使孔外阴离子向孔内转移。同时孔外表面产生阴极反应,产生部分阴离子元胞CP,并和阳离子结合生成腐蚀产物FP堆积在表面。值得注意的是,产物堆积结构较为疏松,并不会影响腐蚀溶质元胞向孔内扩散,所以该反应可以持续进行,有可能会加快腐蚀速率。

元胞自动机的仿真结果与试验结果对比见图6。模型A和模型B中腐蚀坑洞的形貌与盐雾试验中的坑洞形态具有较大的相似性,坑洞外围形状近似为圆形,且孔内外存在腐蚀产物,表明模型的仿真效果与实际接近。此外,图6(a)中采用显微镜观察到的坑洞表面并没有腐蚀产物堆积的现象,而是附着在孔洞周围,但如果直接观察试件表面,会发现坑洞上方均会有堆积起来的鼓包,用手拨开还会流淌出腐蚀溶液。由此表明,点蚀会在坑洞形成闭塞区,并可在显微镜下观察到溢出的溶液和腐蚀产物。

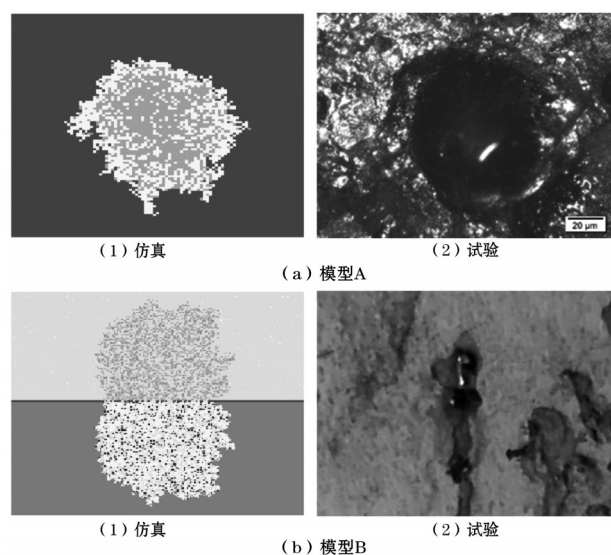


图6 仿真结果与试验结果对比

## 5 结 语

本文针对水工钢闸门的腐蚀病害,通过实地调研检测和资料收集得到钢闸门构件表面腐蚀发展过程,采用盐雾试验对镀锌钢板进行试验观察,研究局部腐蚀的特征。基于腐蚀特征建立二维元胞自动机模型,通过确定相关参数,对局部腐蚀的反应过程进行了细致的演化,得出以下主要结论:

(1)随着水工钢闸门服役时间的增长,构件表面的蚀坑会造成钢闸门构件表面穿透或厚度削减。

(2)蚀坑内部分产物会在孔边堆积,抑制蚀坑在宽度方向上的扩展,蚀坑附近会产生新的点蚀坑洞,但蚀坑深度会相对较浅,腐蚀速率缓慢。

(3)对比试验结果,局部腐蚀模型仿真结果较好,能够模拟腐蚀病害从坑洞萌生到厚度减薄或坑

洞穿透的整个演化过程。

### 参考文献:

- [1] 张雪才,王正中,孙丹霞,等.中美水工钢闸门设计规范的对比与评价[J].水力发电学报,2017,36(3):78-89.
- [2] 赵林章,董洪汉,李频,等.淡水环境中水工钢闸门腐蚀机理及影响因素研究[J].江苏水利,2018,251(3):6-10,14.
- [3] 承芳玮,张燎军,田宏吉,等.锈蚀对弧形钢闸门的强度及动力特性的影响[J].中国农村水利水电,2015,387(1):125-128.
- [4] 余向明,刘晓青.锈蚀对弧形闸门工作性态的影响分析[J].水电能源科学,2008(5):166-168.
- [5] 陈子光.腐蚀损伤模型研究进展[J].固体力学学报,2019,40(2):99-116.
- [6] JANUSZ S, DUNG D Ca, ŁUKASZ B. Corrosion-passivation processes in a cellular automata based simulation study[J]. Journal of Supercomputing, 2013, 65(2): 697-709.
- [7] 郭增伟,陈汉林,黎小刚,等.拉索钢丝电化学腐蚀进程的元胞自动机模拟方法[J].重庆大学学报,2019,42(9):19-27.
- [8] ZHANG X, HU J, WANG Y Q, et al. Simulation of pitting corrosion for Ni-based alloy using a cellular automata model[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(10): 2347.
- [9] 高士武,郭东旭,任克亮,等.金属腐蚀产物膜生长演化机理研究[J].固体力学学报,2013,33(1):132-136.
- [10] 张有宏.腐蚀环境下飞机的广义全寿命分析模型[D].西安:西北工业大学,2005.
- [11] 王慧,宋笔锋,王乐,等.蚀坑几何形貌的三维模拟[J].航空学报,2009,30(11):2185-2192.
- [12] 何乐儒,殷之平,黄其青,等.模拟金属表面局部腐蚀的CA方法[J].航空材料学报,2015,35(2):54-63.
- [13] 袁雄军,张倩,周宁,等.基于元胞自动机的地上管道点蚀模拟研究[J].工业安全与环保,2019,45(12):10-18.