

锈蚀钢材表面重建方法及其受拉性能分析

张 衡, 江文强*, 郭玉程, 高 飞
(华北电力大学 机械工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 锈蚀是户外服役钢结构力学性能退化的主要原因, 本研究从输电铁塔角钢构件上取样, 开展加速锈蚀试验。选取不同锈蚀程度的试件作为研究对象, 借助三维扫描仪采集了试件表面形貌数据, 分析了锈蚀宏观指标(锈蚀层厚度)和微观指标(分形维数)随锈蚀程度的变化规律。根据锈蚀试件表面的分形性质, 提出以锈蚀率、锈蚀层厚度及分形维数为指标, 通过随机中点位移法构造分形布朗曲面, 实现对钢结构锈蚀表面的精准模拟。结合锈蚀试件三维轮廓曲面统计数据, 建立了锈蚀试件的三维模型, 并利用ABAQUS软件对模型的受拉性能进行了数值模拟。计算结果表明: 所提出基于分形布朗运动(FBM)的锈蚀钢材受拉性能分析方法, 能够有效将锈蚀指标引入锈蚀模型中, 为评估非均匀锈蚀钢材的受拉性能提供了可行的方法。

关键词: 输电铁塔; 非均匀锈蚀; 加速锈蚀试验; 分形理论; 表面重建; 随机模型; 受拉性能

中图分类号: TM75, TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0064-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240425002

Surface Reconstruction Method and Tensile Property Analysis of Corroded Steel

ZHANG Heng, JIANG Wenqiang*, GUO Yucheng, GAO Fei

(Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

*Corresponding author: wenqiang.jiang@ncepu.edu.cn

Abstract: Corrosion is the main cause of mechanical property degradation of steel structure. Therefore, an accelerated corrosion test was carried out using samples from the angle steel of the transmission tower. Samples with different degrees of corrosion were selected as the research objects. The surface morphology data of the samples were collected with the help of three-dimensional scanner, and the variation rule of the macroscopic corrosion index (thickness of rust layer) and the microscopic index (fractal dimension) with the corrosion degree was analyzed. According to the fractal properties of the surface of corroded specimens, a method was proposed to simulate the surface of corroded specimens by using random midpoint displacement method to construct fractal Brownian surface with corrosion rate, thickness of rust layer and fractal dimension as indexes. Based on the statistical data of the three-dimensional contour surface of the corroded specimen, three-dimensional models of the corroded specimens were established, and the mechanical properties of the models were simulated by ABAQUS software. The results show that the proposed method based on fractal brownian motion (FBM) can effectively introduce the corrosion index into the corrosion model and provide a feasible method for evaluating the tensile properties of non-uniformly corroded steel.

Keywords: transmission tower; non-uniform corrosion; accelerated corrosion test; fractal theory; surface reconstruction; stochastic model; tensile property

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目(C20231056)

作者简介:

张 衡(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事锈蚀角钢检测与评估方面的研究。E-mail: 3150918017@qq.com。

通信作者:

江文强(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事输电线路工程防灾减灾方面的研究。E-mail: wenqiang.jiang@ncepu.edu.cn。

锈蚀是造成在役输电铁塔结构力学性能退化的主要耐久性问题之一,由于输电铁塔长期暴露在外界恶劣的环境中,铁塔上的钢构件如角钢等极易发生锈蚀,造成铁塔的承载性能下降,严重时甚至有倒塔风险^[1-4]。

在实际锈蚀环境中,钢结构构件的锈蚀程度和锈蚀位置均是随机发生的。当构件发生均匀锈蚀时,若材料与环境确定,在评定时可以直接对构件截面进行折减;而对于非均匀锈蚀,由于该锈蚀是局部材料的损失,加上发生概率的不确定性,即便确定了材料和环境,其锈蚀发生的位置及锈蚀程度仍具有随机性。越来越多的研究表明,锈蚀构件表面的不规则几何特征是造成其力学性能退化的主要原因^[5]。因此,如何评定非均匀锈蚀对钢材力学性能的影响是评估中的重点。而钢材表面非均匀锈蚀形貌的表征方法是评估非均匀锈蚀的一个难点,使用以往的方法难以对其做出正确评价。

建立锈蚀表面模型是将锈蚀统计特征模型化,也是实现锈蚀表面模拟和重建的前提^[6]。陈梦成等^[7]采用均匀减少壁厚的方法模拟酸雨锈蚀,并在材料的本构公式里考虑了锈蚀对材料性能造成的影响,但该方法忽略了钢管锈蚀的细观特征,未考虑蚀坑对钢管力学性能的影响。钟乐鸣等^[8]根据角钢锈蚀后的宏观损伤形态将锈蚀进行分类,对锈蚀的几何形状和位置进行了定量描述。但此种对锈蚀模拟的方法无法体现实际锈蚀过程中蚀坑随机分布的特性。QIN等^[9]采用逆向建模方法建立了考虑钢材表面形貌的有限元模型,但该方法对试验设备要求较高,虽能最大程度还原锈蚀形貌,但成本较高、可重复性较差。

关于锈蚀环境下钢材强度的研究表明:钢材剩余强度与锈蚀程度间存在较强的相关性。徐善华等^[10]认为通过最大截面损失率、有效截面厚度及体积损失率等参数可以准确预测锈蚀钢材的剩余强度。李欣栾等^[11]研究了网架结构在均匀锈蚀和非均匀锈蚀两种状态下的受力情况和稳定性能,得到了随着锈蚀程度增加,构件最大应力呈二次曲线增大,但稳定承载力显著降低的结论。

综上所述,现有锈蚀表面模型模拟的方法均存在较大局限性,为研究锈蚀钢材表面的重建方法和力学性能退化规律,本文结合人工加速锈蚀试验,采用三维扫描仪获得了锈蚀试件实测表面的统计数据,研究了锈蚀指标随锈蚀程度的变化规律,建立了以锈蚀率、锈蚀层厚度及分形维数为指标,以还原锈蚀特征的锈蚀模型,还提出了锈蚀钢材力学性能的分析方法。

1 锈蚀试件制备

1.1 人工加速锈蚀试验

本试验研究的是输电铁塔角钢构件在大气环境下发

生锈蚀的过程。因此,试验所用试件为以铁塔常用的角钢构件为原材料切割而成的钢板。同时,为便于后续测量试件的力学性能,将钢板加工成如图1所示的标准拉伸试件,试验所用试件的材料为Q235钢材。

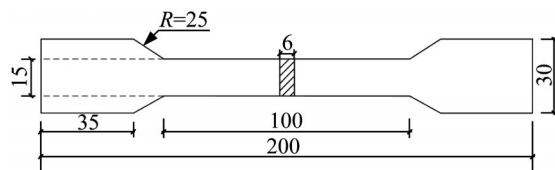


图1 输电铁塔角钢试件(单位:mm)

Fig. 1 Transmission tower angle steel specimen (unit: mm)

为了缩短试验时间,本试验采用喷洒饱和氯化钠(NaCl)溶液的方法来模拟高盐分大气环境,并结合干湿交替处理,模拟大气自然环境下的锈蚀过程。采用塑料薄膜与支架搭建简易盐雾室(图2),用于开展加速锈蚀试验,并内置试样放置架,在放置架的两侧设置定时定量的盐雾喷洒喷头。试验过程中,每次喷洒盐水的时间间隔为6 h,时长为1 min,喷水体积为5.5 L。同时为了确保试件两面的锈蚀状况一致,每5 d定期将试件进行翻面。



图2 加速锈蚀试验装置

Fig. 2 Setup of accelerated corrosion test

为研究锈蚀程度对试件表面形貌的影响,将60个试件平均分为A、B、C、D四组进行试验,对应的加速锈蚀时长分别为30 d、50 d、70 d、90 d,试件编号分别为A1-A15、B1-B15、C1-C15及D1-D15。在试件达到预定的锈蚀时间后,将其取出,通过酸洗去除试件表面的锈蚀产物,经洗净、干燥后备用。

1.2 锈蚀表面形貌

为了获得锈蚀试件表面详细的形貌数据,在每组试件中随机选取4个试件,共计16个锈蚀试件,使用采样间隔为10 μm的CHOTEST-VJ1010S激光3D轮廓测量仪对试件表面进行形貌扫描试验,试验过程如图3所示。其中,扫描仪纵横向扫描间隔均为10 μm,扫描范围分别为横向100 mm,纵向31 mm,扫描速度为12 mm·s⁻¹。



图3 锈蚀试件表面轮廓测量

Fig. 3 Surface profile measurement of corroded specimens

2 锈蚀表面形貌特征分析

钢材表面形貌可定性反映其锈蚀程度,而锈蚀程度的定量评估则需依赖具体的锈蚀评价指标。锈蚀评价指标可分为宏观指标和细观指标两类,宏观指标是指从宏观整体层面上来描述锈蚀程度的评价指标,如锈蚀率便是最常用的宏观指标之一。细观指标则是从表面细节上描述形貌特征的评价指标,通常认为,细观指标更适用于锈蚀表面细观特征的定量表征^[12]。因此,本文选取宏观特征锈蚀率来表征试件的锈蚀程度,研究锈蚀层厚度和细观特征分形维数随锈蚀程度的变化。

2.1 锈蚀形貌扫描结果

将锈蚀试件表面形貌的扫描试验数据导入 Geomagic Design X 64 软件中,依次开展噪声处理、降低数据间隔、删除边界外数据等预处理操作。由于试件中间尺寸为 100 mm×15 mm 的矩形区域为其承载段,因此选取预处理后的数字模型中间矩形区域内均匀分布的数据点作为分析对象,建立锈蚀表面数字高程模型。分别从 A、B、C、D 各组试件中选取一个试件为例,结果如图 4 所示。

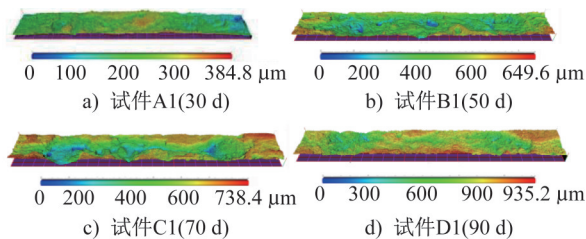


图4 不同锈蚀天数试件表面3D扫描结果

Fig. 4 Surface 3D scanning of corroded specimens under different corrosion days

可见,随着锈蚀时长的增加,试件表面的蚀坑逐渐由 A 组锈蚀表面的小蚀坑演变为 D 组锈蚀表面的大蚀坑,且蚀坑的深度逐渐增加。这表明试件的表面形貌特征与锈蚀程度之间存在着较强的相关性。此外,锈蚀时间越

长,试件表面蚀坑的形态与复杂度也越高。目前常用的锈蚀坑简化模型(如圆柱体、圆锥体模型),难以全面、有效地表征蚀坑的复杂形貌特征。

2.2 锈蚀层厚度

锈蚀层厚度是表征钢材锈蚀后表面形貌的重要指标。一般可将钢材锈蚀后的表面结构划分为:因锈蚀作用导致钢材基体整体均匀减薄所形成的锈蚀区域,称为均匀锈蚀层;钢材表面轮廓中,峰顶与峰谷之间因局部腐蚀形成的非连续锈蚀区域,为非均匀锈蚀层;钢材内部未受锈蚀作用的基体部分,则为未锈蚀层,各层厚度分别记为 h_1 、 h_2 、 h_3 。如图 5 所示为锈蚀试件横截面区域划分示意图。

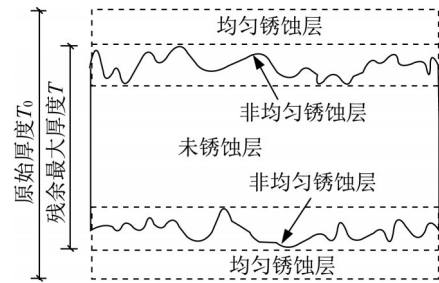


图5 锈蚀试件横截面锈蚀层划分

Fig. 5 Division of corroded layer in cross section of corroded specimen

结合锈蚀层定义和三维表面扫描结果计算各锈蚀层的厚度。将锈蚀表面上最低点所在平面定为基准面,该面以下即为未锈蚀层;锈蚀表面最高点所在平面以上即为均匀锈蚀层;最高点和最低点之间的部分为非均匀锈蚀层。计算各试件的表面厚度, T_0 为未锈蚀前的初始厚度,得到锈蚀试件的各层占比 $h_1(h_2/h_3)/T_0$ 与锈蚀率 η 的关系如图 6 所示。

使用一阶指数衰减函数对 $h_1(h_2/h_3)/T_0$ 与 η 的关系进行拟合得:

$$h_1/T_0 = 1.23 \times 10^{-3} e^{\left(\frac{-\eta}{3.16}\right)}, R^2 = 0.9809 \quad (1)$$

$$h_2/T_0 = -0.4e^{\left(\frac{-\eta}{8.02}\right)} + 0.42, R^2 = 0.9604 \quad (2)$$

$$h_3/T_0 = 0.403e^{\left(\frac{-\eta}{8.61}\right)} + 0.581, R^2 = 0.9604 \quad (3)$$

式中: R 是衡量因变量与预测变量之间线性相关性的指标,取值范围为 -1 到 1,其中 1 表示完全正相关, -1 表示完全负相关, 0 表示无相关性; R^2 是为了判断回归直线与此模型拟合的优劣, R^2 越接近 1, 表示模型的拟合程度越好。 e 在数学中是自然对数的底数,约等于 2.718 28 的无限不循环小数。

由拟合的关系式可知,锈蚀试件各锈蚀层厚度的占比与其锈蚀率有着极为密切的联系,随着锈蚀率的增大,

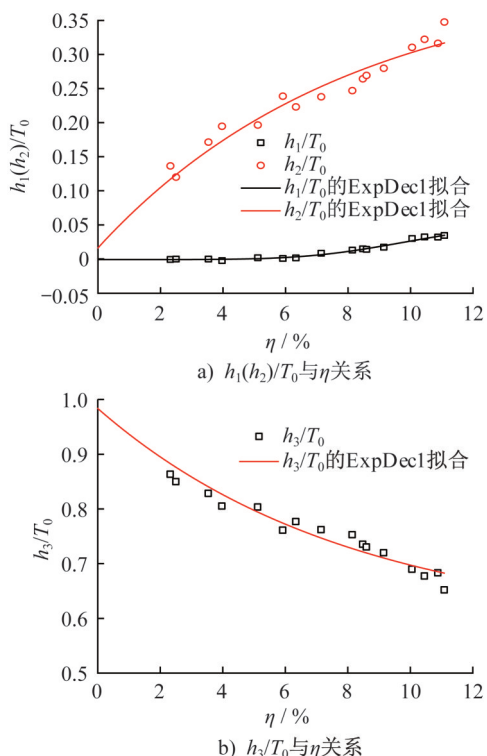


图6 各层厚度占比与锈蚀率关系

Fig. 6 Relation between thickness ratio of each layer and corrosion rate

均匀锈蚀层厚度增加的幅度减小,但增速加快;非均匀锈蚀层厚度增加的幅度增大,但增速减缓;未锈蚀层厚度持续减小,但减小的幅度减缓。这说明在锈蚀初期,蚀坑沿着纵向发展,但随着锈蚀程度的增大,锈蚀深度也随之增大,逐渐增多的锈蚀产物开始阻碍锈蚀介质如水、空气等与钢材基体的接触,使得锈蚀反应难以在试件的更深处进行,锈坑的发展由纵向转为横向。

2.3 锈蚀表面分形维数

为了定量描述自然界中具有自相似性的不规则形态,Mandelbrot提出并创立了名为分形几何的数学理论,有效解决了自然界中凹凸不平、表面粗糙且形态不规则的复杂结构描述难题。

关于三维粗糙表面分形维数的计算方法,Mandelbrot曾提出用粗糙表面剖面线的分形维数加1的方式来近似表示整个粗糙表面形貌特征的分形维数。现在常用的分形维数有豪斯道夫维数、盒维数、容量维数和信息维数^[13],其中,盒维数因算法实现较为简便而得到了广泛应用。

如图7所示,在利用盒维数法计算粗糙曲面的分形维数时,采用多个封闭的立方体盒子完全覆盖于粗糙曲面。根据盒子尺寸确定由角点组成的网格数据后,可以将 (x,y) 矩阵平面划分为单元长度为 δ 的网格,并将 z 坐

标作为该网格的高程值,即可将三维曲面的空间模型用 (x,y,z) 坐标值表示。网格单元编号为 (i,j) (其中 $1 \leq i,j \leq N-1$, N 为 x 方向及 y 方向上的网格角点个数)。四个角点的高程值可分别表示为 $z_1=z(i,j)$ 、 $z_2=z(i+1,j)$ 、 $z_3=z(i,j+1)$ 、 $z_4=z(i+1,j+1)$,通过计算 z_1,z_2,z_3,z_4 中最大值和最小值的差值,可以确定使用以 δ 为棱长的立方体盒子完全覆盖该网格单元所需的盒子个数 $N_{i,j}$,表示为:

$$N_{i,j} = \text{INT} \left\{ \frac{1}{\delta} \left[\max(z_1, z_2, z_3, z_4) - \min(z_1, z_2, z_3, z_4) \right] + 1 \right\} \quad (4)$$

式中: $\delta=2^n$,其中, $n=0,1,2,3 \dots$ 分别表示使用不同棱长的立方体盒子对粗糙表面进行覆盖;INT为取整函数。

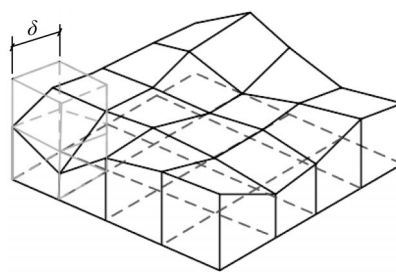


图7 盒维数法示意

Fig. 7 Schematic diagram of box dimension method

遍历所有网格单元后累计得到的总盒子数即为 $N(\delta)$,表示为:

$$N(\delta) = \sum_{i,j=1}^{N-1} N_{i,j} \quad (5)$$

盒维数 D 可表示为:

$$\ln(N(\delta)) = D \ln(\delta^{-1}) + C \quad (6)$$

式中: δ 为立方体盒子棱长; $N(\delta)$ 为以 δ 为棱长的盒子完全覆盖曲面所需要的最少数量。

采用最小二乘法拟合出不同棱长 δ 条件下 $\ln(N(\delta)) \sim \ln(\delta^{-1})$ 的斜率,即为该粗糙表面的三维分形维数。

利用盒维数法对扫描得到的锈蚀表面数据进行分形维数计算,锈蚀试件的分形维数与锈蚀率的关系如图8所示。二者关系式为:

$$D = 2.17\eta^{-0.03} + 0.314, R^2 = 0.9645 \quad (7)$$

从式(7)可以看出,分形维数与锈蚀率近似呈现幂关系,随着锈蚀率的增大,分形维数逐渐减小。这主要是因为锈蚀初期,试件表面分布有大量小尺寸蚀坑,这类蚀坑结构精细,其表面形貌的高频特征占主导地位。但随着锈蚀程度增大,在锈蚀面横向可观察到尺寸较小的蚀坑互相合并的现象,且在合并后逐渐演变为较大的蚀坑;在纵向可观察到锈蚀深度逐渐增大,且试件表面起伏较大,其表面形貌的低频特征占主要部分,正符合了分形理

论中表面结构越精细分形维数越大的理论。

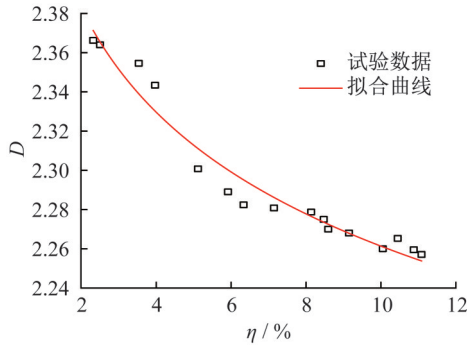


图8 分形维数与锈蚀率的关系

Fig. 8 Relation between fractal dimension and corrosion rate

3 锈蚀钢材表面重建方法

随机锈蚀表面模型是对钢材锈蚀表面的关键统计特征的数字模型化表达,同时也是实现锈蚀钢材表面模拟与重建的前提。在分形几何中,分形布朗曲面可以模拟具有随机性的不规则曲面,目前已经广泛应用于地形学、损伤识别、图象处理等领域中^[14-16]。由于布朗曲面和锈蚀表面具有相同的数学特性,因此本文通过采用分形布朗运动方法构建钢材锈蚀表面的模型。

经过多年发展,分形布朗运动已形成适用于粗糙表面生成的模拟方法。其中,随机中点位移法具有计算量小、算法实现简单的特点,因此得到了广泛使用^[17]。本文采用随机中点位移法中的钻石-方块法来生成曲面,因为该方法能够构建与有限元网格相似的规则矩形网格,为后续有限元模型在节点处赋予对应的锈蚀层厚度值提供便利。

随机中点位移法表述如下:

$$X(D) = \frac{1}{4} [X(O) + X(A) + X(B) + X(C)] + D_i \quad (8)$$

$$X(E_1) = \frac{1}{4} [X(B) + X(C) + X(D) + X(F)] + D_i \quad (9)$$

$$D_i \sim N \left(0, \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^{2H} \sigma_0^2 \right) \quad (10)$$

式中: $X(\)$ 表示该点处高度值;偏置参数 $D_i(i=0,1,2,\dots)$ 为一服从正态分布的随机偏移量。

随机中点位移法以正方形四个顶点的已知高程值为基础,通过不断对原始模型进行递归细化,最后得到数字高程模型,其建模过程如下:

(1) 在边长为 a 的正方形 $OABC$ 平面范围内,给原始正方形的四个顶点 $OABC$ 设置初始高度值。

(2) 计算正方形中心 D 的高度值。结合式(8),将正方形四个顶点的高程值与高斯随机偏移量 D_i 进行耦合计

算,可确定正方形中心构造点的高程值;同时,高斯随机偏移量 D_i 的大小会随所构建正方形边长的变化而相应调整。

(3) 计算正方形边界中点的高度值。对于正方形边界上的中点,假定虚拟构造点 F 的高度值为其余三点高度的均值,此时由 $B、D、C、F$ 四点围成的菱形,其中点 E_1 的高度由式(9)确定。按此方式计算四条边的中点高度值。

通过上述步骤便完成了一次迭代,如图9所示,由边长为 a 的正方形产生了4个边长为 $a/2$ 的小正方形。

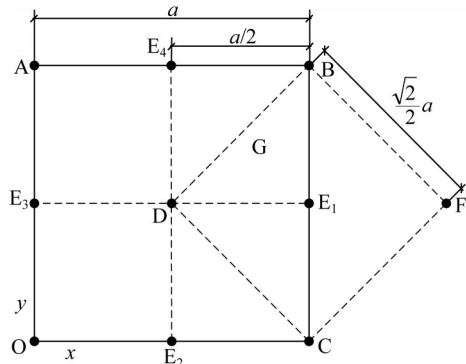


图9 随机中点位移法示意

Fig. 9 Schematic diagram of random midpoint displacement method

在新生成的小正方形中重复步骤(2)和(3),使正方形网格不断细化,最终得到所要求的曲面。在实际模拟过程当中,偏置参数 D_i 是一个高斯随机偏移量,对边长为 $(\sqrt{2}/2)^i a (i=0,1,\dots)$ 的正方形或菱形内构造点的随机偏置参数的设置如下:

$$D_i = d_i^H \sigma \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \text{randgauss}() \quad (11)$$

式中: $\text{randgauss}()$ 为服从标准正态分布的随机数; $H、\sigma$ 为模拟前输入的随机参数; i 为迭代的次数; d_i 为经过 i 次细分后的网格边长。由式(11)可知, $H、\sigma$ 的取值决定了曲面的局部细节特征和整体的起伏程度,对曲面具有重要影响。调整参数后生成的随机曲面如图10所示。

根据数学定理,对于严格意义下指数为 H 的分形布朗曲面,其分形维数 $D=(3-H)$,据此可确定 H 取值。初始偏置参数 σ 可由曲面极差确定,由于本文生成的曲面锈蚀为单面锈蚀,而实际锈蚀为双面锈蚀,因此曲面极差为非均匀锈蚀层厚度 h_2 的一半。根据实际锈蚀试件的锈蚀率 η 、非均匀锈蚀层厚度 h_2 和表面分形维数 D 即可模拟生成对应的分形布朗曲面。

由于分形布朗运动生成的曲面为正方形范围内的不规则曲面,而实际钢材锈蚀曲面的空间范围呈矩形,因此在构建锈蚀曲面模型时,需依据试件的实际尺寸对生成

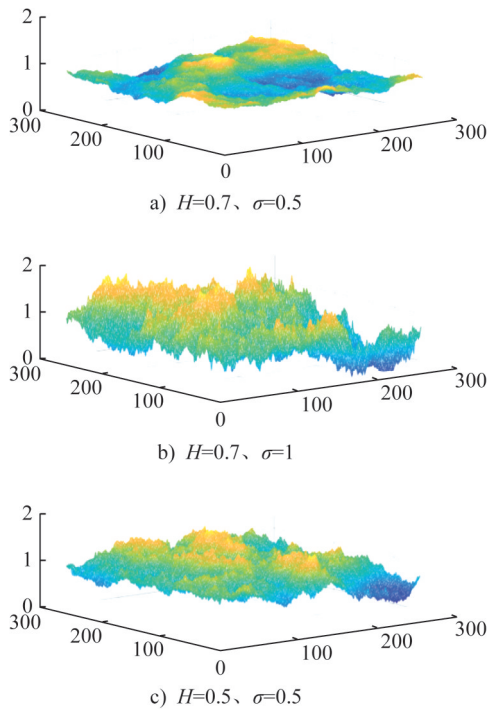


图10 模拟的分形布朗曲面

Fig. 10 Simulated fractal brownian surface

的分形布朗曲面进行裁剪处理。

在生成的分形布朗曲面上进行截取后,取曲面最低点所在平面作为0基准面,对高程数据进行调整后得到曲面 $\zeta(x,y)$,该曲面即为对非均匀锈蚀层重建得到的锈蚀曲面。

在生成锈蚀曲面时,除考虑非均匀锈蚀层的厚度外,还应考虑未锈蚀层厚度,从而确定锈蚀曲面在锈蚀模型中的位置。因此可通过式(12)、(13)、(14)计算未锈蚀层厚度,并通过式(15)进一步计算得到锈蚀模型 $Z(x,y)$ 。

$$V_1 = 2d_0^2 \left[\frac{1}{4} \sum \zeta_1(x,y) + \frac{1}{2} \sum \zeta_2(x,y) + \sum \zeta_3(x,y) \right] \quad (12)$$

$$\eta = \frac{V_0 - V_1 - V_2}{V_0} \quad (13)$$

$$h_3 = \frac{V_2}{S} \quad (14)$$

$$Z(x,y) = \zeta(x,y) + h_3 \quad (15)$$

式中: V_0 为未锈蚀层的原始体积; V_1 为非均匀锈蚀层的体积; V_2 为未锈蚀层的体积; d_0 为最小网格边长; S 为底面积; $\zeta_1(x,y)$ 为曲面四个角点的集合; $\zeta_2(x,y)$ 为边长上除角点外其余点的集合; $\zeta_3(x,y)$ 为曲面上剩余点的集合; h_3 为未锈蚀层的厚度。

4 有效性验证

为验证锈蚀表面重建方法的有效性,本文选取部分加速锈蚀试验的试件,结合三维扫描数据,构建随机锈蚀

模型。并通过数值模拟仿真得到其受拉性能参数,再对试件进行拉伸试验,最后比较本文模型、拉伸试验及厚度折减模型的受拉性能参数的差异。

4.1 锈蚀模型构建

选择加速锈蚀试验中编号为A2和D4的试件,对应的锈蚀率 η 分别为5.13%和10.24%,将其命名为EXP-1和EXP-2。同时,选择未锈蚀试件进行对照,将其命名为EXP-0。利用前述锈蚀率与分形维数、非均匀锈蚀层厚度的关系式计算得到重建模型数据,EXP-1和EXP-2对应的重建模型分别为FEM-1和FEM-2,模型信息如表1所示。

表1 试验样本及对应模型信息
Table 1 Information of test samples and corresponding models

编号	锈蚀特性	$\eta/\%$	D	$h_2/\mu\text{m}$
EXP-0	未锈蚀	0	—	—
EXP-1	非均匀锈蚀	5.13	2.297	954
EXP-2	非均匀锈蚀	10.24	2.266	1 692
FEM-1	非均匀锈蚀	5.00	2.306	1 081
FEM-2	非均匀锈蚀	10.00	2.261	1 649

根据模型信息及本文提出的随机模型重建方法,重建得到的锈蚀模型表面形貌如图11所示,从模型中可以看到:锈蚀表面由随机分布的锈蚀坑形成,部分区域因锈蚀侵蚀程度更严重,其厚度相较于周围区域存在显著差异,且差值明显更大,表明该位置存在局部较严重的锈蚀情况。红色区域表示锈蚀程度较轻的区域,且红色越深,则表明锈蚀厚度越大;蓝色区域表示锈蚀程度较严重的区域,且蓝色越深,则表明锈蚀厚度越小。在建立锈蚀模型时,由于实际锈蚀试件在宽度方向的减薄量相较于其初始宽度来说占比较小,对结果影响可忽略,因此不考虑宽度方向的减薄量对锈蚀程度所造成的影响。

为得到本文重建模型的受拉性能信息,在ABAQUS有限元软件中建立有限元模型。选取试件中间100 mm×15 mm的承载段作为计算模型。在综合考虑计算成本和计算精度后,本文选择单元尺寸为1 mm的网格对锈蚀角钢构件进行有限元分析。采用显式动力学求解,材料属性中采用延性金属损伤以表征材料断裂行为,设置断裂应变为0.169,并在损伤演化中设置失效位移为1.669 mm,当单元变形的位移达到失效位移时,该单元就会失效并且被删除。模型的边界条件设置如下:在模型一端施加位移荷载以模拟受拉工况,另一端采用全约束,限制其所有扭转自由度和平移自由度。

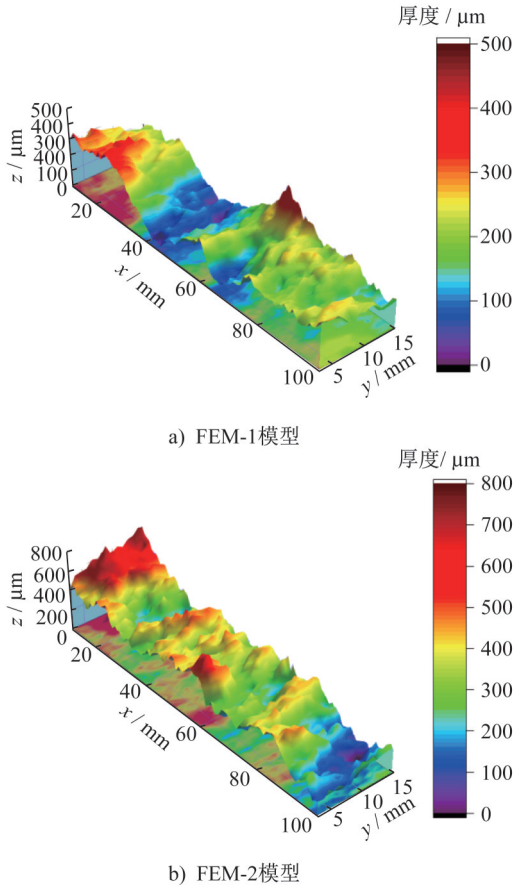


图 11 锈蚀模型表面形貌

Fig. 11 Surface morphology of corrosion models

钢的锈蚀可以看作是对厚度的折减,因此许多研究人员在对锈蚀钢材进行研究后,提出直接采用厚度折减的方法(thickness reduction method,简称 TRM)对钢材的受拉性能进行评估计算,如图 12 所示,该方法可以看作将非均匀锈蚀简化为均匀锈蚀进行计算,折减后厚度可根据式(16)进行计算。将本文构建的模型经过厚度折减计算后得到的模型分别为 TRM-1 和 TRM-2,模型信息如表 2 所示。

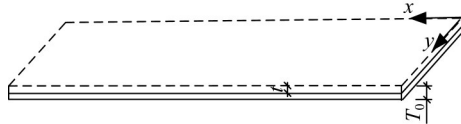


图 12 厚度折减法示意

Fig. 12 Schematic diagram of thickness reduction method

$$\eta = \frac{t}{T_0} \quad (16)$$

4.2 结果与分析

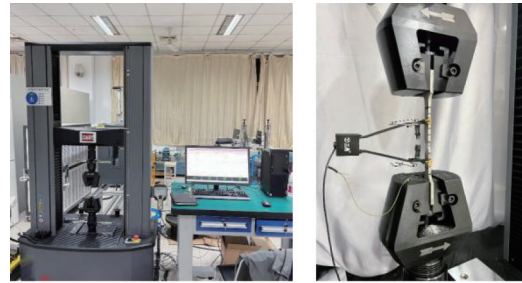
如图 13 所示,依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]中的规定,在电

表 2 厚度折减法信息

Table 2 Information of thickness reduction method

编号	锈蚀特性	$\eta/\%$	折减后厚度/mm
TRM-1	均匀锈蚀	5	5.23
TRM-2	均匀锈蚀	10	4.95

子万能试验机(型号为 MTS E45)上对试件组 EXP 的试件进行拉伸试验。

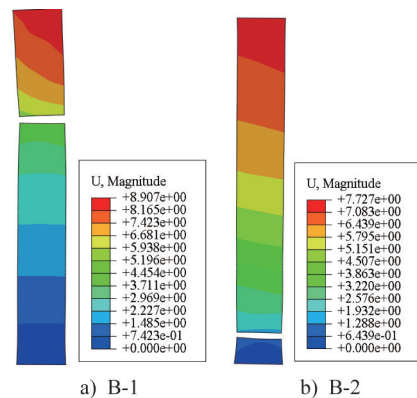


a) MTS E45型电子万能试验机 b) 试件拉伸过程

图 13 室温拉伸试验

Fig. 13 Tensile test at room temperature

对本文构建的有限元模型加载,得到拉伸破坏后的形态如图 14 所示。结合图 11 和图 14 可知:在加载过程中,模型表面锈蚀坑的边缘区域会率先出现应力集中现象,这直接导致模型内部应力分布呈现显著不均匀性;随着荷载持续增加,模型最终在锈蚀坑深度最大且分布最密集的区域发生断裂破坏。



a) B-1 b) B-2

图 14 锈蚀模型破坏模态(单位:mm)

Fig. 14 Failure modes of the corrosion models (unit: mm)

在计算本文锈蚀模型的原始横截面积时,需统一采用试件锈蚀前的初始厚度进行计算;应力计算则以施加的荷载值与该原始横截面积的比值为准;并通过位移和原长的比作为应变,得到本文重建模型仿真结果与试件拉伸试验结果的应力-应变曲线,如图 15 所示,通过对锈蚀模型有限元仿真得到的应力-应变曲线与拉伸试验实测的应力-应变曲线进行对比,可以得到,二者在弹性阶段、塑性阶段能实现较好吻合。

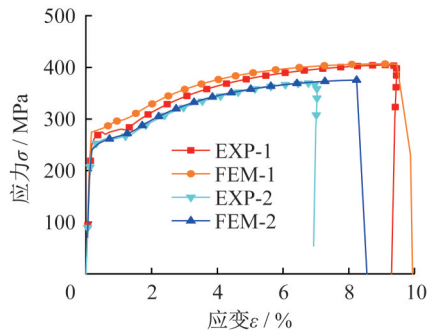


图 15 仿真与试验应力-应变曲线对比

Fig. 15 Comparison of stress-strain curves between simulation and test

表 3 给出了拉伸试验(EXP组)、本文模型(FEM组)及厚度折减模型中(TRM组)得到的受拉性能参数屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u 对比数据。由表可得,本文采用锈蚀模拟方法的计算结果与试验数据吻合良好。与拉伸试验实测结果相比,采用本文锈蚀模型开展的有限元仿真计算,其关键受拉性能参数的平均误差控制在 2% 以内;该误差水平表明,本文模型能准确反映锈蚀作用导致的钢材强度退化规律,说明通过本方法建立的锈蚀模型可以较为准确地模拟出实际锈蚀角钢的锈蚀特征。相比之下,厚度折减模型仅以锈蚀后的平均厚度折减为计算依据,未考虑锈蚀表面非均匀形貌引发的应力集中效应;因此,将其应用于锈蚀试件拉伸力学性能评估时,计算得出的关键受拉性能参数,平均比本文锈蚀有限元模拟方法的结果高出近 10%,整体计算误差显著更大。

表 3 算例数据

Table 3 Example data

编号	锈蚀特性	f_y /MPa	f_y 误差/%	f_u /MPa	f_u 误差/%
EXP-0	未锈蚀	315.40	—	452.43	—
EXP-1	随机非均匀	275.20	0	404.49	0
FEM-1	随机非均匀	270.67	1.65	406.78	0.57
TRM-1	均匀锈蚀	299.63	8.88	429.81	6.26
EXP-2	随机非均匀	258.00	0	369.56	0
FEM-2	随机非均匀	254.65	1.30	375.35	1.57
TRM-2	均匀锈蚀	283.86	10.02	407.19	10.18

5 结论

本文基于角钢的锈蚀率与表面特征数据,使用分形理论建立了锈蚀钢材模型,并对模型的受拉性能进行了仿真分析,主要的研究工作与结论如下:

(1) 锈蚀使得角钢试件表面具有复杂的形貌特征,且锈蚀形貌具有明显的分形特征,可以用分形维数来表征锈蚀曲面的微观特征。

(2) 提出了以实测锈蚀表面数据、分形理论为基础的锈蚀角钢模型建立方法,本文所构建的锈蚀模型,在精准刻画非均匀锈蚀特征随机性的同时,还实现了对实际锈蚀宏观量化指标(锈蚀层厚度、锈蚀率)与微观特征分形维数的全面覆盖。

(3) 结合试验数据重建了锈蚀模型,通过对比拉伸试验、本文模型和厚度折减模型的仿真结果发现,本文模型的计算结果与试验数据吻合良好,整体误差处于 2% 以内,验证了本文提出的锈蚀表面重建方法的有效性。同时表明,锈蚀表面形貌对受拉性能有着很大的影响,仅通过厚度折减来模拟非均匀锈蚀得到的结果会出现较大的偏差。

参考文献:

- [1] AN L Q, JIANG W Q, LIU Y P, et al. Experimental study of mechanical behavior of angles in transmission towers under freezing temperature[J]. *Advanced Steel Construction*, 2018, 14(3): 461-478. DOI: 10.18057/IJASC.2018.14.3.9.
- [2] JIANG W Q, LIU Y P, CHAN S L, et al. Direct analysis of an ultrahigh-voltage lattice transmission tower considering joint effects[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(5): 04017009. DOI: 10.1061/(ASCE)st.1943-541x.0001736.
- [3] AN L Q, GUAN Y Y, ZHU Z J, et al. Structural failure analysis of a river-crossing transmission line impacted by the super typhoon Rammasun[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 104: 911-931. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.069.
- [4] 邓长征, 郭轶磊, 张康伟, 等. 输电线路铁塔锈蚀塔腿补强措施及仿真计算[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 76-80. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2019.01.017. DENG Changzheng, GUO Yilei, ZHANG Kangwei, et al. Reinforcement measures and simulation calculation of corrosion tower leg of transmission line tower[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2019, 41(1): 76-80. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2019.01.017. (in Chinese)
- [5] 王友德, 周晓东, 马蕊, 等. 模拟近海大气环境下结构钢锈蚀表面特征随机模型[J]. *金属学报*, 2021, 57(6): 811-821. DOI: 10.11900/0412.1961.2020.00326. WANG Youde, ZHOU Xiaodong, MA Rui, et al. Stochastic model for surface characterization of structural steel corroded in simulated offshore atmosphere[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(6): 811-821. DOI: 10.11900/0412.1961.2020.00326. (in Chinese)
- [6] 宋方远, 谢旭, 张婷婷. 锈蚀表面形貌及其对钢材超低周疲劳性能的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 132-141. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.081. SONG Fangyuan, XIE Xu, ZHANG Tingting. Effect of corroded surface morphology on ultra-low cycle fatigue of steel plate[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5):

- 132-141. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.081. (in Chinese)
- [7] 陈梦成, 林博洋, 黄宏. 锈蚀圆钢管混凝土短柱轴压承载力研究[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(1): 73-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.01.009.
- CHEN Mengcheng, LIN Boyang, HUANG Hong. Research on the bearing capacity of corroded circular concrete filled steel tubular short columns [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(1): 73-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.01.009. (in Chinese)
- [8] 钟乐鸣, 高飞, 江文强, 等. 基于宏观损伤的锈蚀角钢残余承载力评估方法[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(4): 71-78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2022.04.010.
- ZHONG Yueming, GAO Fei, JIANG Wenqiang, et al. Assessment method for residual-bearing capacity of corroded angle steel members based on macroscopic damage [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(4): 71-78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2022.04.010. (in Chinese)
- [9] QIN G C, XU S H, YAO D Q, et al. Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 125: 205-217. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.06.018.
- [10] 徐善华, 王皓, 苏磊, 等. 考虑点蚀损伤的锈蚀钢板延性退化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 1257-1263. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.06.025.
- XU Shanhua, WANG Hao, SU Lei, et al. Ductility degradation of corroded steel plates with pitting damage [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 1257-1263. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.06.025. (in Chinese)
- [11] 李欣桀, 陈志华, 刘红波. 锈蚀后网架结构残余力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(3): 83-91. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.03.010.
- LI Xinlun, CHEN Zhihua, LIU Hongbo. Study on the residual mechanical properties of corroded grid structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(3): 83-91. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.03.010. (in Chinese)
- [12] 王友德, 史涛, 夏敏, 等. 基于形貌的结构钢锈蚀评价指标及提取方法[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16138-16143. DOI: 10.11896/cldb.20070143.
- WANG Youde, SHI Tao, XIA Min, et al. Corrosion evaluation indicators and extraction method of structural steel based on morphology [J]. Materials Reports, 2021, 35(16): 16138-16143. DOI: 10.11896/cldb.20070143. (in Chinese)
- [13] 宋宇, 刘保国, 任大瑞, 等. 基于分形理论构建随机粗糙节理模型的方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 101-112. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0487.
- SONG Yu, LIU Baoguo, REN Darui, et al. Study on stochastic method for modeling rough joints based on fractal theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 101-112. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0487. (in Chinese)
- [14] 苑希民, 韩超, 徐浩田, 等. 基于分形理论与SVM的河冰高分遥感影像智能识别方法研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(2): 117-126. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0212.
- YUAN Ximin, HAN Chao, XU Haotian, et al. Research on intelligent recognition method of river ice remote sensing image based on fractal theory and SVM [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(2): 117-126. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0212. (in Chinese)
- [15] 陈鑫, 朱劲松, 林阳子, 等. 基于导波多点散射的在役拱桥吊杆腐蚀损伤识别[J]. 振动与冲击, 2021, 40(19): 295-301. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.19.037.
- CHEN Xin, ZHU Jinsong, LIN Yangzi, et al. Corrosion damage identification of suspenders of arch bridges in service based on guided wave multi-point scattering [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(19): 295-301. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.19.037. (in Chinese)
- [16] 王学军, 张向东, 敬鹏飞, 等. 冻融循环作用下沥青混凝土分形断裂特性研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(1): 100-112. DOI: 10.6052/1000-0879-22-177.
- WANG Xuejun, ZHANG Xiangdong, JING Pengfei, et al. Fractal fracture characteristics of asphalt concrete under freeze-thaw cycles [J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(1): 100-112. DOI: 10.6052/1000-0879-22-177. (in Chinese)
- [17] 王悦昶, 刘莹, 李鸿举. 粗糙表面仿真方法综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 148-165. DOI: 10.3901/JME.2022.19.148.
- WANG Yuechang, LIU Ying, LI Hongju. A review of rough surface simulation methods [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 148-165. DOI: 10.3901/JME.2022.19.148. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)