

# 随机点锈蚀下圆形钢管轴压承载能力

赵中伟<sup>1,2</sup>, 张宏伟<sup>2</sup>, 吴刚<sup>1</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 针对随机点锈蚀对圆形钢管轴压承载能力的影响, 以质量损失率为因变量, 研究轴压承载力在随机点锈蚀影响下随质量损失率的变化规律。通过引入轴压承载力折减系数, 揭示了锈蚀深度、锈蚀坑平面尺寸、钢材等级以及钢管壁厚对折减系数的影响规律。在大量随机有限元分析的基础上, 提出了折减系数的理论计算公式。该公式可根据质量损失率精确预测钢管在随机点锈蚀影响下钢管轴压承载力的折减系数。

**关键词:** 圆形钢管; 点锈蚀; 锈蚀深度; 锈蚀位置; 钢材等级; 随机性

中图分类号: TU391

文献标志码: A

## Axial Bearing Capacity of Circular Steel Pipes with Random Pitting Corrosion

ZHAO Zhongwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongwei<sup>2</sup>, WU Gang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In view of the effect of random pitting corrosion on axial bearing capacity of circular steel pipes, the changing rule of bearing capacity was revealed along with the mass loss ratio. A reduction factor was introduced to investigate the effect of corrosion thickness, pitting size, steel grade and wall thickness of steel pipes. The analytical formula for predicting the reduction factor was proposed. This formula can exactly predict the reduction factor of corroded steel pipes which is affected by random pitting corrosion.

**Key words:** circular steel pipe; pitting corrosion; corrosion thickness; corrosion position; steel grade; randomness

圆形截面钢管目前已被广泛地应用于各种工业输送管道以及空间网格结构。对于钢结构而言, 服役期间的锈蚀现象是不可避免的。锈蚀严重减小钢构件的有效厚度, 降低构件的承载能力, 从而引起局部的失稳鼓曲。我国在20世纪七八十年代兴建了一大批钢结构, 至今已有40余年的服役期。由于维护工作的不到位, 这些结构都发生了不同程度的锈蚀。

锈蚀会严重降低钢构件的承载能力, 同时锈蚀也是一个非常复杂的电化学过程。很多学者从微观角度对锈蚀的机理进行研究。Han等<sup>[1]</sup>通过试验研究了G20Mn5QT铸钢与Q345d钢材对接连接的锈蚀现象。还有很多学者从宏观角度研究了锈蚀对钢筋混凝土<sup>[2-4]</sup>以及钢构件<sup>[5-6]</sup>力学性能的影响。徐善华等<sup>[7]</sup>对中性盐雾环境锈蚀H型钢柱的抗震性能进行了试验研究, 基于试验数据建立了锈蚀H型钢柱位移延性系数的退化模型以及累积滞回耗能与循环次数的关系。Ok等<sup>[8]</sup>对点锈蚀影响下的钢板进行了256次非线性有限元分析, 研究了点锈蚀位置以及大小的影响, 通过多元回归方法得到了局部锈蚀下平板极限承载能力的理论计算公式。郑山锁等<sup>[9-11]</sup>对锈蚀后钢结构以及钢筋混凝土的抗震性能进行了一系列的深入研究。

已有研究结果<sup>[12-14]</sup>表明, 随着锈蚀程度的增加, 钢材的剩余强度逐渐降低, 但是目前并没有锈蚀钢管轴压承载能力降低程度与锈蚀程度之间的定量关系。钢管在大跨空间网格结构中有着广泛的应用并且以受轴力为主。随着我国一大批钢结构即将进入加固修复期, 研究锈蚀钢管的轴压承载能力显得很有必要, 因此重点研究了锈蚀参数, 包括锈蚀深度、质量损失率、锈蚀坑大小以及钢材强度等级对锈蚀

收稿日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1511900); 江苏省博士后科研资助计划(2020Z356)

第一作者: 赵中伟(1986—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为既有钢结构性能评估。

E-mail: zhaozhongwei@ntu.edu.cn

通信作者: 吴刚(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为既有工程结构高效加固新技术。

E-mail: g.wu@seu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

后钢管轴压承载能力的影响。

## 1 数值模型的建立

基于商业有限元软件 Ansys 建立了带有随机锈蚀缺陷的钢管有限元模型。随机有限元分析通常需要进行数万次的计算分析。采用 Shell181 单元建立钢管的数值模型,同时通过减小单元的厚度以模拟锈蚀缺陷的影响<sup>[15]</sup>。Shell181 单元尺寸设定为 5 mm,该尺寸足以精确描述锈蚀坑的形状。实际工程中的锈蚀坑非常复杂,典型的锈蚀坑形状如图 1 所示。图 1 中,  $W_c$  表示锈蚀坑的表面尺寸(即锈蚀坑表面的直径),  $T_c$  表示锈蚀深度。文献[16]中的计算结果表明,圆柱形的锈蚀坑对钢管承载能力的影响最为不利,同时也为了简化,本研究中将锈蚀坑的形状设定为圆柱形。文献[17]的研究结果表明,将锈蚀坑的形状设定为圆柱形是切实可行的。

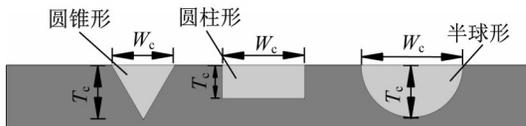


图1 锈蚀坑的不同形状

Fig. 1 Shapes of corrosion pit

锈蚀的本质特征是随机性,首先就是位置的随机性,锈蚀坑的发生位置随机地分布在钢管的表面。利用随机函数来模拟锈蚀坑位置的随机性。为了简化,锈蚀坑在钢管表面每一个位置发生的概率相等,也就是锈蚀坑的位置服从均匀分布。在锈蚀坑发生的位置,壳单元的厚度被指定为  $t(1 - T_c/t)$ 。其中,  $T_c$  指锈蚀深度,  $t$  指钢管的初始厚度。

为便于施加轴向荷载,在钢管顶面的中心位置建立加载点,通过建立 MPC184 刚性梁单元将钢管顶端节点与加载点相连接;同时,将钢管底面所有节点的平动自由度进行约束。带有随机初始缺陷的钢管数值模型如图 2 所示。图 2 中,  $F$  表示所施加的轴力,  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_z$  表示钢管底部节点沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的线位移。

## 2 数值模型的验证

### 2.1 试件设计

为了验证所建立数值模型计算结果的可靠性,设计了 5 个带有人工点锈蚀的试件。试件统一采用外径和厚度分别为 108 mm 和 4 mm 的空心钢管。由

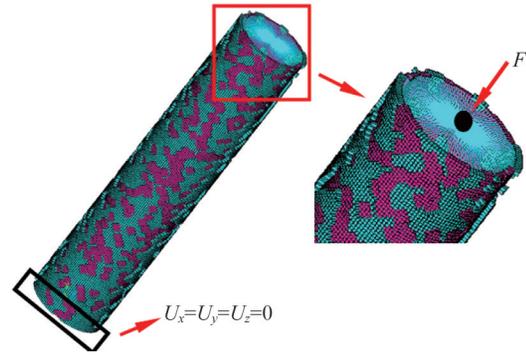


图2 随机点锈蚀钢管数值模型

Fig. 2 Numerical model of steel pipe with random pitting corrosion

于是研究钢管的轴压承载能力,因此将钢管的长度设计为 150 mm,以减小初弯曲以及二阶效应对轴压承载能力的影响。构件的初弯曲以及二阶效应可以在整体结构中进行考虑<sup>[18-19]</sup>。采用人工钻孔的方式模拟锈蚀的影响。随机锈蚀的位置不易确定,因此采用简化的人工锈蚀,即锈蚀坑的位置预先指定。锈蚀孔的直径设定为 15 mm。各试件的示意图以及编号如图 3 所示,试件的照片如图 4 所示。试件 A-1 并未进行钻孔,代表未锈蚀的构件。试验在 200 t 万能压力机上进行,以位移控制的形式进行加载,加载速度设定为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 2.2 试验结果对比分析

为了验证所建立数值模型的准确性,将试验所得荷载-位移曲线与数值模型所得结果进行对比。有限元所采用的钢材本构模型如图 5a 所示。该模型为由工程应力( $\sigma_e$ )、应变( $\epsilon_e$ )按照式(1)和式(2)所转换的真实应力( $\sigma_t$ )、应变( $\epsilon_t$ ),如下所示:

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \epsilon_e) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2)$$

5 个试验构件的荷载-位移曲线的对比结果如图 5 所示。从对比结果可以看出,采用 Shell181 单元所建立的带有锈蚀缺陷的数值模型可以准确模拟钢管的初始刚度、屈服荷载以及轴压承载能力。试件 A-1 所得结果的计算误差最大为 8.6%,其他试件的结果吻合较好。试件 A-1 属于强度破坏,误差来源为钢材本构的误差。该误差主要存在于强度退化阶段,并不影响本研究结论。试件的破坏模式如图 6 所示。从图 6 可以看出,有限元模型中试件的破坏模式与试验结果一致。所建立的数值模型考虑了由于锈蚀所引起的应力集中效应,从而可以精确预测带有锈蚀缺陷钢管的轴压承载能力。

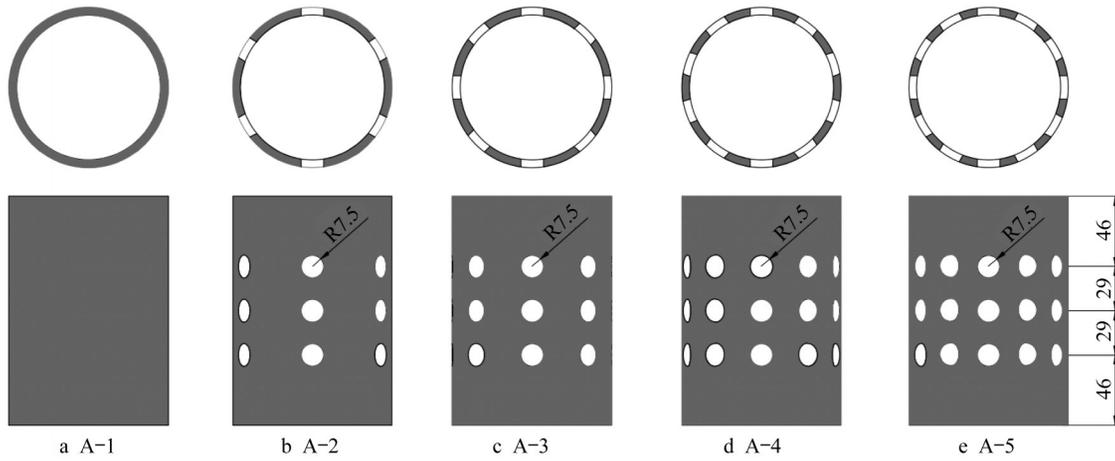


图3 试件示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of test specimens(unit:mm)



图4 试件照片

Fig. 4 Photo of test specimens

### 3 轴压承载力的影响因素

为了更好地描述锈蚀对钢管轴压承载能力的影响,采用折减系数 $R_c$ 来描述锈蚀后钢管轴压承载力的降低程度。折减系数 $R_c$ 定义为锈蚀后钢管轴压承载力与锈蚀前钢管轴压承载力的比值,如下所示:

$$R_c = F_{u,c} / F_u \quad (3)$$

式中: $F_{u,c}$ 是锈蚀后钢管轴压承载力; $F_u$ 是锈蚀前钢管轴压承载力。

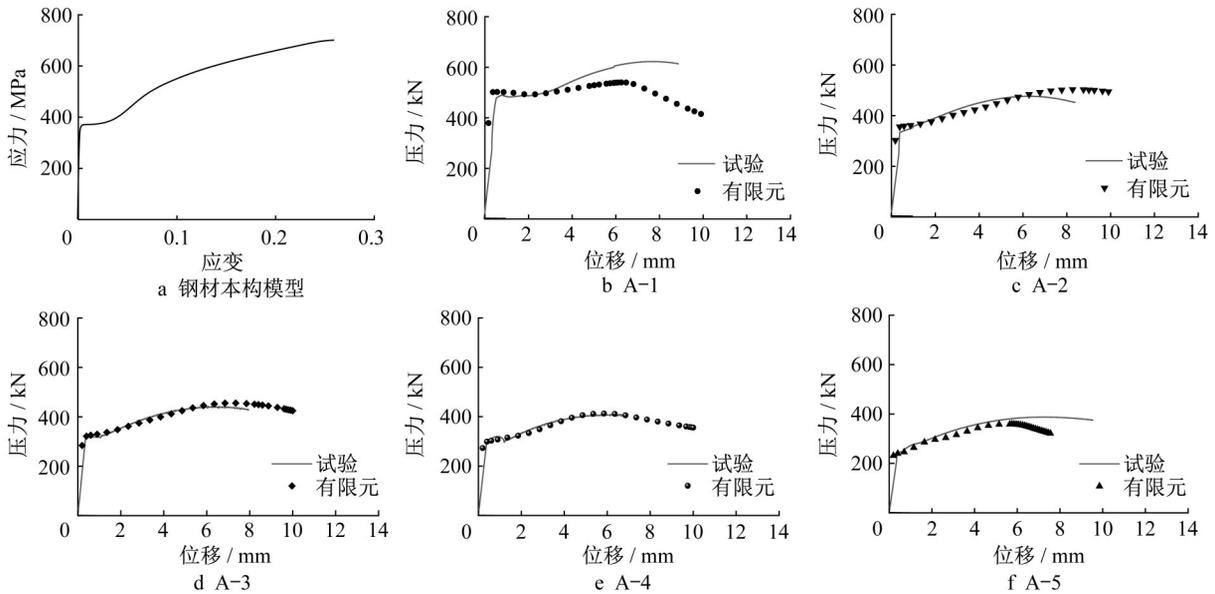


图5 试验结果

Fig. 5 Test results

采用折减系数的优点在于:当钢管的锈蚀参数确定以后,可以直接根据未锈蚀钢管的承载力 $F_u$ 和折减系数 $R_c$ 确定锈蚀钢管的极限承载力。在以下参

数化分析中,钢材材料选用理想弹塑性本构模型。钢材的弹性模量 $E$ 、屈服强度 $f_y$ 、切线模量 $E_t$ 分别为 $2.06 \times 10^5$  MPa、235 MPa和0。

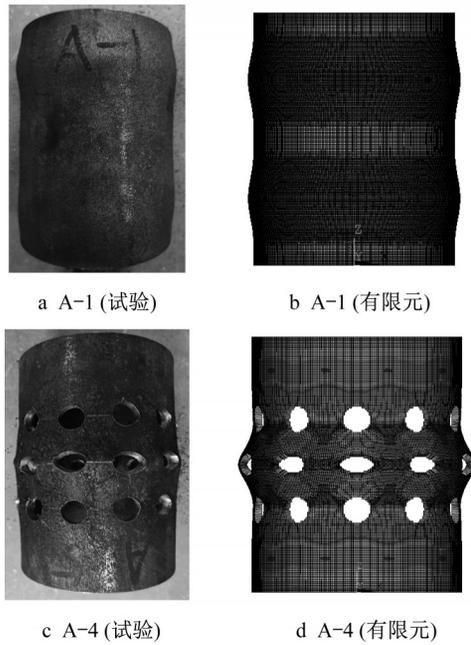


图6 破坏模式

Fig. 6 Failure mode

3.1 锈蚀深度对折减系数的影响

3.1.1 均匀锈蚀深度

在实际工程中,钢管不同位置的锈蚀深度  $T_c$  是随机分布的,为了简化,将  $T_c$  假定为常数,即钢管表面任意位置的锈蚀深度都是相同的,以揭示锈蚀深度对钢管轴压承载能力的影响。在本节计算中,锈蚀参数  $W_c$  的取值为 10 mm。钢管的外径  $D$ 、厚度  $t$  的取值分别为 100 mm 和 6 mm。所分析钢管的长度为 300 mm。为了使所得结论具有普适性,使用量纲一参数  $T_c/t$  来代表锈蚀深度,将  $T_c/t$  分别假定为 0.30、0.40、0.45、0.50、0.70 和 0.90。所得折减系数  $R_c$  随质量损失率  $\chi$  的变化曲线如图 7 所示。图 7 中,黑实线代表均匀锈蚀时(即钢管厚度均匀减小),钢管轴压承载力折减系数的变化曲线。从图 7 可以看出,当  $T_c/t$  为常数时,钢管的最大质量损失率为  $T_c/t$ ,此时钢管已由点锈蚀转变为均匀锈蚀,因此和图 7 中代表均匀锈蚀的直线相交。相交点的纵坐标即  $R_c$  值为  $(1 - T_c/t)$ ,横坐标最大质量损失率为  $T_c/t$ 。该结论与实际情况相符,进一步验证了计算结果的可靠性。

另外,从计算结果可以看出,点锈蚀所引起的折减系数在与均匀锈蚀对应的黑实线以下,说明点锈蚀不可以简单地简化为均匀锈蚀,否则所得折减系数  $R_c$  偏大,偏于不安全。

通过图 8 可知,  $R_c - \chi$  曲线与纵轴的交点代表未锈蚀钢管的折减系数,此时  $R_c$  的值为 1,  $R_c - \chi$  曲线的终点坐标为  $(T_c/t, 1 - T_c/t)$ 。基于  $R_c - \chi$  曲线的形

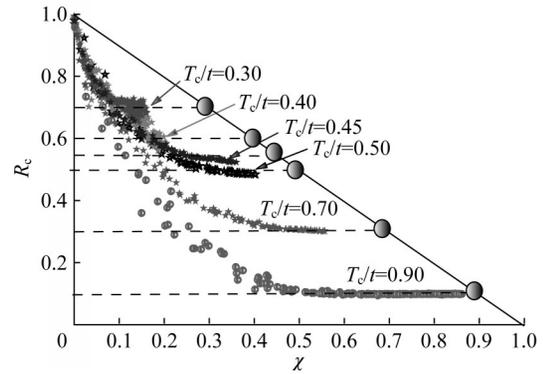


图7 均匀锈蚀下  $R_c - \chi$  曲线

Fig. 7 Curves of  $R_c - \chi$  corresponding to uniform corrosion

状,将其数学方程假定为幂函数,根据终点坐标,则  $R_c$  的计算式如下所示:

$$R_c = k \left( \frac{T_c}{t} - \chi \right)^\lambda + \left( 1 - \frac{T_c}{t} \right) \quad (4)$$

当  $\chi$  为 0 时,  $R_c$  为 1,由此可进一步确定系数  $k$  的取值,计算式如下所示:

$$R_c = \left( \frac{T_c}{t} \right)^{1-\lambda} \left( \frac{T_c}{t} - \chi \right)^\lambda + \left( 1 - \frac{T_c}{t} \right) \quad (5)$$

式(5)中只有一个待确定的指数  $\lambda$ 。通过试算,将指数  $\lambda$  设定为 5 时,结果吻合最好,结果对比如图 8 所示。图 8 中,黑实线代表理论计算结果。从结果对比可以看出,所提出的理论公式可以根据质量损失率  $\chi$  精确预测均匀锈蚀厚度下钢管轴压承载力的折减系数,如下所示:

$$R_c = \left( \frac{T_c}{t} \right)^{-4} \left( \frac{T_c}{t} - \chi \right)^5 + \left( 1 - \frac{T_c}{t} \right) \quad (6)$$

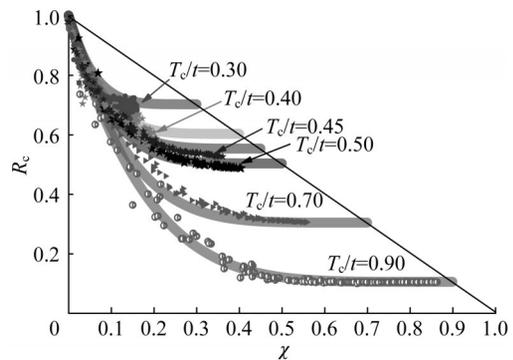


图8 理论结果与有限元结果对比

Fig. 8 Comparison between analytical and FE results

3.1.2 随机锈蚀深度

在实际工程中,不同位置的锈蚀深度是随机分布的,也就是说  $T_c/t$  是随机变量。为了研究  $T_c/t$  对

$R_c$ 分布规律的影响,假定  $T_c/t$  服从  $(0 \sim (T_c/t)_{\max})$  的均匀分布,  $(T_c/t)_{\max}$  指最大锈蚀深度。锈蚀参数  $W_c$  和钢管几何参数与上节相同。将  $(0 \sim (T_c/t)_{\max})$  设定为  $(0 \sim 0.40)$ 、 $(0 \sim 0.60)$ 、 $(0 \sim 0.80)$  和  $(0 \sim 0.90)$ 。由于  $T_c/t$  服从均匀分布,因此  $\chi$  的最大值为  $(T_c/t)_{\max}/2$ 。

随机锈蚀深度所对应的折减系数分布如图9所示。从图9可以看出,随机锈蚀深度所对应的  $R_c$  分布与均匀锈蚀深度存在很大不同。当锈蚀深度服从  $(0 \sim 0.40)$  的均匀分布时,最小  $R_c$  为 0.68,并不等于 0.60,也不等于均匀锈蚀深度为  $(T_c/t)_{\max}/2$  时的 0.80。同样,锈蚀深度服从  $(0 \sim 0.60)$ 、 $(0 \sim 0.80)$  和  $(0 \sim 0.90)$  时的最小  $R_c$  分别为 0.55、0.41 和 0.31。通过观察可以看出,随机锈蚀深度  $(0 \sim (T_c/t)_{\max})$  与均匀锈蚀深度  $3/4 \times (T_c/t)_{\max}$  等效,即当锈蚀深度服从  $(0 \sim (T_c/t)_{\max})$  的均匀分布时,可以将其简化成锈蚀深度为  $3/4 \times (T_c/t)_{\max}$  的均匀分布。此时,式(6)中的  $T_c/t$  需转化为其等效锈蚀深度  $3/4 \times (T_c/t)_{\max}$ ,则式(6)仍可适用于随机锈蚀深度的计算。为了验证式(6)对于随机锈蚀深度下  $R_c$  计算的可靠性,将均匀锈蚀深度  $T_c/t$  等于 0.300、0.450、0.600 和 0.675 时的  $R_c$  与随机锈蚀深度  $T_c/t$  所对应的  $R_c$  进行对比,如图9所示。从计算结果可以看出,所提方法可以精确预测随机锈蚀深度下  $R_c$  的分布规律。

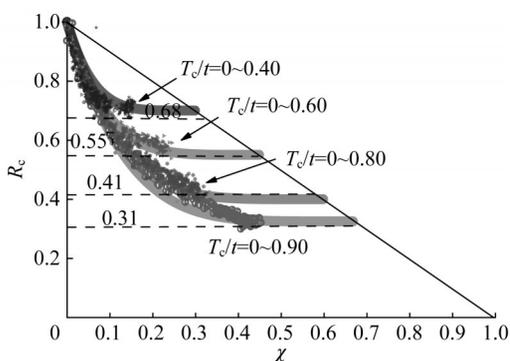


图9 随机锈蚀下  $R_c - \chi$  曲线

Fig. 9 Curves of  $R_c - \chi$  corresponding to random corrosion

### 3.2 点锈蚀大小对 $R_c$ 的影响

在实际工程中,钢结构表面锈蚀坑的平面尺寸也是随机分布的,而上述分析中将锈蚀坑的表面尺寸简化为常数,即  $W_c = 10$  mm。为了研究这一简化对分析结果的影响,将  $W_c$  设定为 10 mm、15 mm 和 20 mm。锈蚀深度  $T_c/t$  分别设定为 0.50 和 0.90。钢管的外径  $D$ 、厚度  $t$  的取值以及所分析钢管的长度与

前述分析相同。

基于不同  $W_c$  所得到的  $R_c$  随质量损失率  $\chi$  的分布规律如图10所示。从计算结果可以看出,在锈蚀深度  $T_c/t$  相同的前提下,基于不同  $W_c$  所得到的  $R_c$  随  $\chi$  的分布规律完全相同。也就是说,表面锈蚀坑的尺寸大小并不影响钢管轴压承载力折减系数的分布规律。这也说明前述分析基于  $W_c = 10$  mm 所得到的结论可以适用于随机  $W_c$  的实际情况。

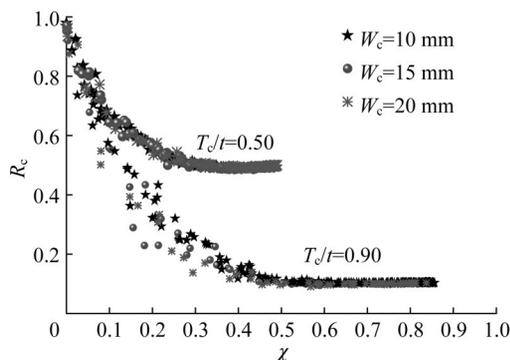


图10  $W_c$  对  $R_c - \chi$  曲线的影响

Fig. 10 Effect of  $W_c$  on  $R_c - \chi$  curves

### 3.3 钢材等级对 $R_c$ 的影响

以上结论均是基于  $f_y = 235$  MPa 得到,而实际工程中会选用不同等级的钢材,因此为了研究本结论对于不同强度等级钢材的适用性,将钢材的屈服强度设定为 235 MPa、345 MPa 以及 390 MPa。不同屈服强度下折减系数  $R_c$  随  $\chi$  的变化规律如图11所示。从图11可以看出,不同屈服强度所对应的折减系数随  $\chi$  的变化规律完全相同,因此所得结论可以适用于不同强度等级的钢材。

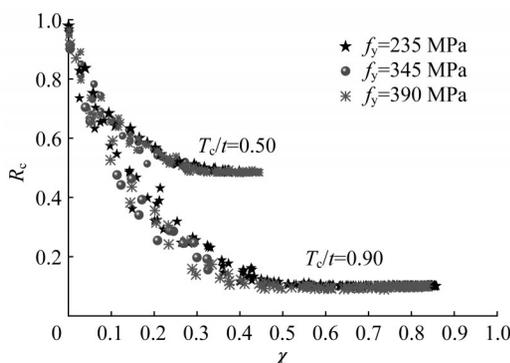


图11  $f_y$  对  $R_c - \chi$  曲线的影响

Fig. 11 Effect of  $f_y$  on  $R_c - \chi$  curves

### 3.4 钢管厚度对 $R_c$ 的影响

实际工程中所采用的钢管具有不同的半径或者厚度。为了研究所得结论对不同尺寸钢管的适用

性,研究了钢管径厚比 $D/t$ 对 $R_c-\chi$ 曲线的影响。在本节进行的分析中,钢管外径为100 mm,通过改变钢管壁厚来改变钢管径厚比 $D/t$ 的大小。将钢管的厚度设置为1 mm、3 mm和6 mm。在钢管壁厚较薄或者钢材强度较高时可能会出现局部失稳的问题,因此将钢材强度设置为390 MPa。

不同径厚比所对应的 $R_c-\chi$ 分布曲线如图12所示。从图12可以看出,钢管壁厚为1 mm时所对应的 $R_c$ 要小于壁厚为3 mm和6 mm,当 $T_c/t$ 的取值为0.90时,这一现象更为明显。原因是当钢管壁厚太薄时(壁厚小于1 mm),会出现局部失稳的现象,从而降低了钢管的承载力。这可以从如图13所示的失效模式得到。局部失稳使钢管的失效由强度问题转化为稳定问题,使钢管在材料强度完全发挥出来之前失效,进而降低了 $R_c$ 。当 $t$ 和 $T_c/t$ 的取值分别为1 mm和0.90,质量损失率增加到0.90时,钢管壁厚的有效值为0.1 mm, $D/t$ 的值为1 000,这种大径厚比的钢管不会应用于实际结构,尤其是空间网格结构。当 $t$ 和 $T_c/t$ 的取值分别为6 mm和0.90时,钢管壁厚的有效值为0.6 mm,此时 $D/t$ 的值为167。从图12a可以看出,当 $D/t$ 的值为167时,所得结论完全适用。因此,本研究结论只适用于径厚比小于167的轴压锈蚀钢管。

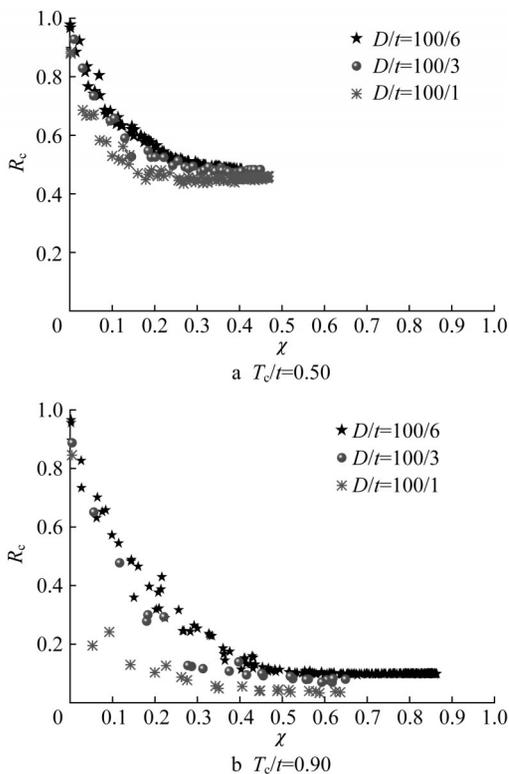


图12  $D/t$ 对 $R_c-\chi$ 曲线的影响

Fig. 12 Effect of  $D/t$  on  $R_c-\chi$  curves

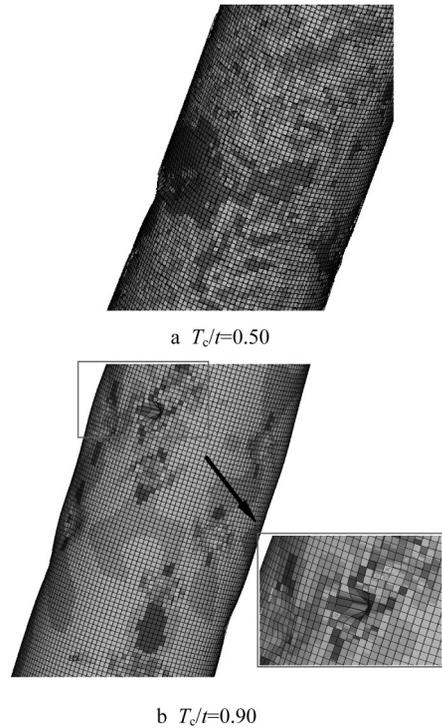


图13 薄壁钢管失效( $t=1$  mm)

Fig. 13 Failure of thin-walled steel pipe ( $t=1$  mm)

我国空间网格结构技术规程规定,杆件截面的最小尺寸应根据跨度和网格大小确定,网架和双层网壳空心球的外径与壁厚之比宜取25~45,单层网壳空心球的外径与壁厚之比宜取2.0~3.5,空心球外径与主钢管外径之比宜取2.4~3.0,空心球壁厚与主钢管的壁厚之比宜取1.5~2.0。因此,实际空间网格结构工程中所采用的钢管径厚比通常为12.5~37.5,该值远小于167。对于承受轴心拉力的锈蚀钢管,由于不存在局部稳定问题,因此本研究结论也是完全适用的。

## 4 结论

(1) 试验与有限元计算结果对比表明,所建立的数值模型可以准确预测带有几何缺陷钢管的轴压承载力。

(2) 均匀锈蚀深度与随机锈蚀深度下折减系数的分布规律不同,对于随机锈蚀深度,其等效均匀锈蚀深度为均匀锈蚀深度最大值的3/4。

(3) 对于径厚比小于167的轴心受压构件以及受拉构件,所提出的理论计算公式可以准确预测随机锈蚀厚度下点锈蚀的承载力折减系数。

(4) 锈蚀坑平面尺寸、钢材等级、钢管厚度对 $R_c$ 没有影响,因此所得结论可以推广到具有不同几何

尺寸和不同锈蚀程度的钢管。

### 作者贡献声明:

赵中伟:负责模型建立和论文修改。

张宏伟:进行数值分析和试验,结果总结,论文写作。

吴刚:负责总体理论研究方向把控与评价。

### 参考文献:

- [1] HAN Qinghua, WANG Xin, LIU Yan. Experimental investigation on the corrosion behavior of G20Mn5QT cast steel and butt weld with Q345D steel[J]. Corrosion Science, 2018, 132: 194.
- [2] 陈梦成, 方苇, 黄宏, 等. 锈蚀圆钢管再生混凝土轴压短柱受压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 67.  
CHEN Mengcheng, FANG Wei, HUANG hong, *et al.* Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 67.
- [3] 张海鹏, 陈驹, 金伟良, 等. 栓钉锈蚀的钢-混凝土组合梁疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 89.  
ZHANG Haipeng, CHEN Ju, JIN Weiliang, *et al.* Fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded stud [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 89.
- [4] 徐善华, 牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土筒支梁斜截面抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 98.  
XU Shanhua, NIU Ditao. The shear behavior of corroded simply supported reinforced concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(5): 98.
- [5] ZHAO Zhongwei, LIU Haiqing, LIANG Bing. Probability distribution of the compression capacity of welded hollow spherical joints with randomly located corrosion [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 137: 167.
- [6] 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.  
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.
- [7] 徐善华, 张宗星, 苏超, 等. 中性盐雾环境锈蚀H型钢柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 49.  
XU Shanhua, ZHANG Zongxing, SU Chao, *et al.* Experimental study on seismic behavior of corroded H-shaped steel columns under neutral salt spray environment [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 49.
- [8] OK D, PU Y, INCECIK A. Computation of ultimate strength of locally corroded unstiffened plates under uniaxial compression [J]. Marine Structures, 2007, 20: 100.
- [9] 郑山锁, 李强强, 秦卿, 等. 锈蚀低矮钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8): 79.  
ZHENG Shansuo, LI Qiangqiang, QIN Qing, *et al.* Experimental study on seismic behaviors of corroded squat reinforced concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(8): 79.
- [10] 郑山锁, 董立国, 左河山, 等. 人工气候环境下锈蚀RC框架柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 28.  
ZHENG Shansuo, DONG Ligu, ZUO Heshan, *et al.* Research on a seismic damage model of steel frame columns considering corrosion [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 28.
- [11] 郑山锁, 王晓飞, 孙龙飞, 等. 酸性大气环境下多龄期钢框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 20.  
ZHENG Shansuo, WANG Xiaofei, SUN Longfei, *et al.* Experimental research on seismic behavior of multi-aged steel frame joint under acidic atmospheric environment [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 20.
- [12] 陈辉, 张伟平, 顾祥林. 高应变率下锈蚀钢筋力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 869.  
CHEN Hui, ZHANG Weiping, GU Xianglin. Experimental study on mechanical properties of corroded steel bars under high strain rates [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 869.
- [13] GARBATOV Y, GUEDES SOARES C, PARUNOV J, *et al.* Tensile strength assessment of corroded small scale specimens [J]. Corrosion Science, 2014, 85: 296.
- [14] 赵中伟, 吴刚. 锈蚀焊接空心球节点随机抗压承载力研究[J]. 工程力学. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0472.  
ZHAO Zhongwei, WU Gang. Random compression capacity of corroded WHSJs [J]. Engineering Mechanics. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0472.
- [15] ZHAO Zhongwei, LIU Haiqing, LIANG Bing. Probability distribution of the compression capacity of welded hollow spherical joints with randomly located corrosion [J]. Thin-walled structures, 2019, 137: 167.
- [16] ZHAO Zhongwei, WU Jinjia, LIU Haiqing, *et al.* Influence of pitting-corrosion on bending capacity of thin-walled circular tubes [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(11): 548.
- [17] ZHANG Jing, SHI Xinghua, GUEDES SOARES C. Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression [J]. Engineering Structures, 2017, 152: 70.
- [18] ZHAO Zhongwei, CHEN Zhihua, YAN Xiangyu, *et al.* Simplified numerical method for latticed shells that considers member geometric imperfection and semi-rigid joints [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(4): 689.
- [19] ZHAO Zhongwei, ZHENG Chenyang, ZHANG Jianing, *et al.* Influence of random pitting corrosion on moment capacity of thin-walled circular tubes subjected to compression force [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 189: 104260.