

随机点蚀圆钢管柱力学性能试验与应用分析

杨明飞¹, 董悦奇¹, 程华瑞¹, 沙志平², 陈宜网³

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国二十冶集团有限公司工程设计研究院, 上海 201900;
3. 安徽圣沃建设集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 为研究随机点蚀损伤对圆形钢管柱的力学性能影响, 对带有随机点蚀损伤的构件进行了轴压试验, 试验中考虑了不同的内径和点蚀损伤强度。结果显示, 在文中所选点蚀损伤范围内, 随着点蚀损伤强度的增加, 点蚀损伤构件的屈服载荷和弹性模量均呈现线性下降趋势; 内径越小, 点蚀损伤对其屈服载荷和弹性模量影响越大; 点蚀损伤强度为4%时, 点蚀坑之间环向应变发展明显快于纵向应变发展。利用ANSYS有限元软件分别建立了无损构件和损伤构件的数值模型, 利用试验结果对数值模型进行校核, 最大误差分别为-4.17%、-11.78%, 说明文中所建立的数值模型合理。最后, 利用该数值模型分析了不同点蚀损伤区域对结构构件力学性能的影响, 研究发现当点蚀损伤区位于2L/5~3L/5柱脚处时, 构件屈服载荷降低了26.96%, 此区域为构件的随机点蚀敏感区。

关键词: 随机点蚀; 圆钢管柱; 力学性能; 点蚀损伤强度; 敏感区

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)04-020-07

Experimental Study and Application of Mechanical Properties of Circular Steel Tubular Columns with Random Pitting Corrosion

YANG Mingfei¹, DONG Yueqi¹, CHENG Huarui¹, SHA Zhiping², CHEN Yiwang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. China Mcc20 Group Co., Ltd. Engineering Design & Research Institute, Shanghai 201900, China;
3. Anhui Shengwo Construction Group Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: In order to study the influence of random pitting corrosion on the mechanical properties of circular steel tubular columns, an axial compression experiment was carried out on the components with random pitting damage, and different inner diameters and pitting damage strengths were considered. The results show that the yield load and elastic modulus of the damaged components decrease linearly with the increase of the pitting damage strength within the selected damage range. Meanwhile, the smaller the inner diameter, the greater the effect of pitting damage on the yield load and elastic modulus. The circumferential strain rate of the pitting corrosion was significantly faster than the longitudinal strain rate at 4% pitting damage strength. The numerical models of undamaged and damaged components were established by ANSYS finite element software, and were calibrated by the test results, and the maximum errors were -4.17% and -11.78% respectively, which indicated that the numerical models established in the paper were reasonable. Finally, the models were used to analyze the influences of different pitting damage areas on the mechanical properties of structural components. It was found that the component yield load decreased by 26.96% when the pitting damage area was located at 2L/5 to 3L/5 column footings, and this area can be defined as the sensitive area of random pitting damage.

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 安徽省高校自然基金重点资助项目(KJ2016A209)

作者简介: 杨明飞(1979-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 结构抗震和防灾减灾工程。

Keywords: random pitting corrosion; circular steel tubular column; mechanical property; pitting corrosion damage; sensitive area

钢的耐腐蚀性较差,尤其在潮湿环境中更容易发生腐蚀损伤,其中以点蚀损伤最为常见。点蚀又称为孔蚀,是一种集中于金属表面很小的范围并深入到金属内部的腐蚀形态。由于钢结构构件中大阴极与小阳极这种腐蚀电池的存在,使得构件局部卤素离子不断入侵,金属离子不断析出,最终形成了阳极区域局部高度集中的腐蚀形式。点蚀损伤会影响构件的屈服荷载和弹性模量等力学属性,从而影响结构的安全。从人类社会大量使用钢结构至今,许多国内外专家、学者已经对钢材发生点蚀损伤进行了大量研究^[1-4]。Nakai等^[5]分析了海洋环境中船舶的点蚀损伤,研究了腐蚀坑的形态,提出了不同腐蚀坑形状随时间的作用。马厚标等^[6]研究了高强度钢材表面的点蚀损伤对钢材力学性能的影响,得出点蚀损伤导致的局部应力集中是引起钢材屈服平台消失和力学性能衰退的主要原因。Rahbar-Ranji等^[7]采用非线性有限元方法比较了不规则腐蚀板和均匀腐蚀板的极限强度,并引入折减系数,为评价腐蚀构件的强度提供了依据。Silva等^[8]和Karagah等^[9]研究了随机腐蚀厚度分布对单轴压缩无筋矩形钢板极限强度的影响。徐善华等^[10]采用三维形貌测量技术测得不同锈蚀程度钢板表面点蚀坑几何参数,并通过单调拉伸试验和有限元数值分析研究了点蚀损伤对钢板延性的影响。吴兆旗等^[11]对局部锈蚀的圆钢管构件进行轴压力学性能正交试验,研究了环向锈蚀比例、轴向锈蚀比例和锈蚀时间等因素对圆钢管中长柱轴压性能的影响。此外,一些国内专家、学者通过试验及利用有限元软件模拟对点蚀损伤构件的力学性能做了进一步研究^[12-15]。

本文设计了随机点蚀圆形钢管柱轴压试验,考虑了内径(R_n)和点蚀损伤强度(DOP)对圆形钢管柱力学性能的影响。利用ANSYS有限元软件分别建立了损伤构件和非损伤构件的数值模型;接着进行非线性分析,通过控制点蚀参数和改变点蚀损伤位置,确定了点蚀损伤对构件屈服荷载的影响;最后,通过分析得出了一些有价值的结论。

1 点蚀损伤构件试验分析

1.1 试验参数与工况

试验中构件高度 L 为0.5 m,壁厚 T 为0.004 m。点蚀损伤构件如图1所示。



图1 点蚀损伤构件

随机点蚀损伤构件上的点蚀坑深 d 为0.003 m,半径 r 为0.004 m,点蚀区域为 $2L/5$ 柱脚。将点蚀区域进行网格划分,点蚀坑的具体位置根据ANSYS有限元软件中的随机函数确定。同时,点蚀坑的数量 P 由DOP决定,按照构件基本参数选择合理的点蚀损伤强度。这里,DOP根据式(1)计算。

$$DOP = \frac{\sum_{i=1}^P A_{pi}}{A} \quad (1)$$

$$A_{pi} = \pi d_i^2 / 4 \quad (2)$$

$$A = 2\pi(R_n + T) \cdot (2L/5) \quad (3)$$

A_{pi} 为第 i 个坑的截面积,由式(2)计算; d_i 是坑的直径; A 为局部点蚀区面积,在此截面模型中,由式(3)计算。

轴向压缩试验在安徽理工大学地下结构工程实验室电液伺服万能试验机(100 t)上进行。试验采用分级加载方法:第一阶段采用理论计算得到的设计极限荷载的1/10进行预紧。在此之后,加载速率保持在2 mm/min。当试件在经度方向的位

移达到 25 mm 时,宣告试验结束。试验结果如表 1 所示。

表 1 试验结果

试件编号	Rn/mm	DOP/%	屈服荷载 /kN	弹性模量 /GPa
N1S1	16	0	172.11	211.97
N2S1	26	0	279.87	210.72
N3S1	36	0	375.87	212.91
N1S2	16	1	163.04	204.57
N2S2	26	1	260.93	203.37
N3S2	36	1	370.11	208.92
N1S3	16	2	159.16	193.31
N2S3	26	2	267.41	197.91
N3S3	36	2	354.10	201.51
N1S4	16	3	150.93	180.34
N2S4	26	3	255.34	187.03
N3S4	36	3	358.72	197.75

注:试件编号中 N 和 S 分别代表构件内径与 DOP,数字 1、2、3、4 分别代表因素所对应水平

1.2 试验结果分析

1.2.1 屈服荷载分析

三种不同内径损伤构件的屈服荷载随 DOP 变化的曲线如图 2 所示。

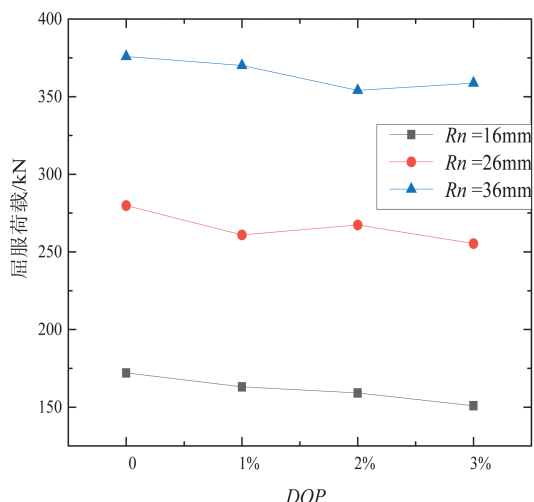


图 2 屈服荷载 -DOP 曲线

由图 2 可知,随着 DOP 的增大,三种不同内径损伤构件的屈服荷载均近似呈现线性下降趋势。

当 Rn 为 16 mm 时,随着 DOP 的增大,损伤构件的承载能力逐渐被削弱,屈服荷载分别下降了

5.27%、7.52%、12.31%,影响较为显著。当 Rn 为 36 mm 时,随着 DOP 的增大,屈服荷载下降趋势较低,屈服荷载分别下降了 1.53%、5.79%、4.56%,影响相对较小;DOP 为 3% 时的屈服荷载为 358.72 kN,屈服荷载仅下降了 4.56%,下降幅度约为前者三分之一,影响较小。构件发生点蚀损伤时,内径越小构件屈服荷载下降越大。

1.2.2 弹性模量分析

三种不同内径损伤构件的弹性模量随 DOP 变化的曲线如图 3 所示。

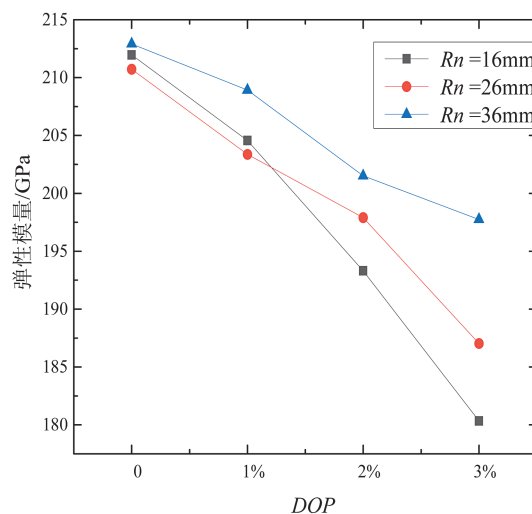


图 3 弹性模量 -DOP 曲线

由图 3 可知,随着 DOP 的增大,三种不同内径损伤构件的弹性模量均显著下降,下降趋势可以近似用线性表示。并且,弹性模量下降幅度与内径大小显著相关。

当 DOP 为 3% 时,Rn 为 16 mm 的损伤构件的弹性模量仅为 180.34 GPa,降低了 14.92%;而 Rn 为 36 mm 的损伤构件的弹性模量为 197.75 GPa,仅降低了 7.12%,下降幅度仅为前者一半左右。DOP 对内径较小损伤构件的弹性模量影响较大,对内径较大损伤构件的弹性模量影响较小。

1.2.3 应变分析

应变测点 T1 位于环向点蚀坑之间,T2 位于纵向点蚀坑之间,如图 4 所示。应变测点处布置单向应变片,并用静态应变仪测出应变值。三种内径的随机点蚀损伤构件,在 DOP 为 4% 时,对应测点应变发展趋势大致相同。以内径为 26 mm 的损伤构件为例,测点 T1、T2 的荷载 - 应变曲线如图 5 所示。



图4 测点位置

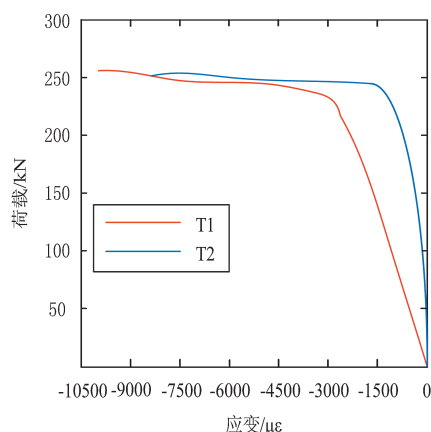


图5 荷载-应变曲线

由图5可知,环向点蚀坑之间T1的应变发展迅速,构件达到屈服状态时应变为 $-5\ 100\ \mu\epsilon$;纵向点蚀坑之间T2的应变发展较为缓慢,构件达到屈服状态时应变仅为 $-1\ 833\ \mu\epsilon$ 。构件发生随机点蚀损伤时,构件环向应变发展明显快于纵向应变发展。

2 点蚀损伤构件数值分析

2.1 无损圆形钢管柱

根据试验中的无损圆形钢管柱参数建立其数值模型,模型中钢材使用SHELL 181单元模拟,泊松比为0.3,弹性模量为206 GPa,材料假设为弹塑性体,采用双线性随动强化模型(BKIN)。

无损圆钢管柱构件试验变形情况与数值模拟结果基本一致,其中内径为36 mm的构件的荷载-位移试验曲线与数值曲线如图6所示。

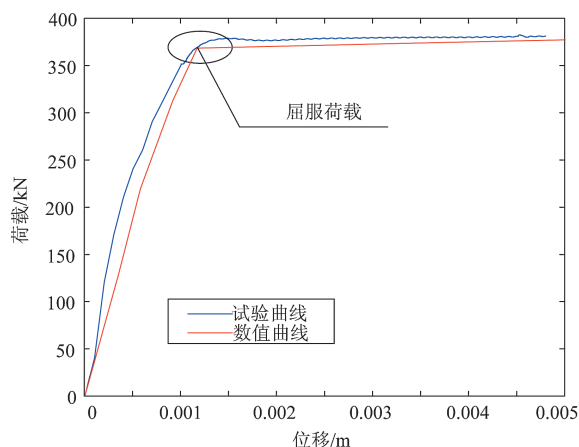


图6 荷载-位移曲线

由图6可以清楚地看出,试验构件的荷载-位移曲线与数值分析得到的曲线吻合较好。试验曲线上屈服荷载为375.87 kN,数值曲线上屈服荷载为371.36 kN。试验和数值分析的其余结果见表2。

表2 无随机点蚀损伤圆形钢管柱的屈服荷载

屈服荷载/kN	钢管内径 R_n		
	$R_n=16\text{ mm}$	$R_n=26\text{ mm}$	$R_n=36\text{ mm}$
试验值	172.11	279.87	375.87
数值	165.02	268.19	371.36
误差	-4.12%	-4.17%	-1.20%

表2中屈服荷载的试验值由荷载-位移曲线得到。当内径为26 mm时,数值与试验值的最大误差为-4.17%;同时,内径为36 mm时,数值与试验值的最小误差仅为-1.20%。从分析结果可以看出,非损伤构件的数值计算结果是可靠的。

2.2 有损伤圆形钢管柱

随机点蚀损伤构件试验变形情况与数值模拟结果基本一致,其中内径为36 mm、DOP为2%的构件试验曲线与数值曲线如图7所示。

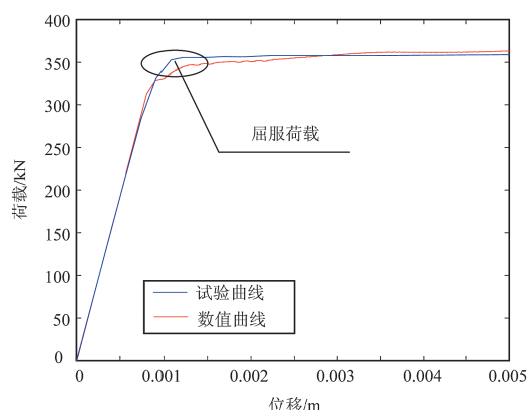


图7 荷载-位移曲线

由图7可知,当内径为36 mm,DOP为2%时,通过数值模型得到的荷载-位移曲线与试验得到的荷载-位移曲线吻合较好。试验曲线上屈服荷载为354.10 kN,数值曲线上屈服荷载为358.23 kN。试验和数值分析的其余结果见表3。

表3中屈服荷载的试验值由荷载-位移曲线得到。由表3可知,在9个误差数据中,数值与试验值的最大误差为-11.78%,最小误差仅为1.17%。从以上分析可以看出,损伤和未损伤构件的数值模型是合理的,可以用于后续的分析。

表 3 随机点蚀损伤圆形钢管柱的屈服荷载

屈服荷载 / kN	DOP=1%			DOP=2%			DOP=3%		
	Rn=16mm	Rn=26mm	Rn=36mm	Rn=16mm	Rn=26mm	Rn=36mm	Rn=16mm	Rn=26mm	Rn=36mm
试验值	163.04	260.93	370.11	159.16	267.41	354.10	150.93	255.34	358.72
数值	146.41	258.54	365.77	140.41	249.99	358.23	135.84	239.65	350.47
误差	-10.20%	-5.78%	-1.17%	-11.78%	-6.51%	1.17%	-10.00%	-6.15%	-2.30%

3 点蚀损伤构件应用分析

井架一般位于露天环境中,井架构件在长期服役过程中受到雨水冲刷等环境因素影响,易发生点蚀损伤造成构件承载能力降低,进而影响井架结构的安全性,如图 8 所示。

3.1 参量设置

在井架结构的服役过程中,其底部柱子由于接近地面,更易受到点蚀损伤。为了对柱子进行更好的防护,需要研究柱子的点蚀损伤敏感区。因此,沿纵向将损伤范围分别设为 $L/5$ 、 $2L/5$ 、 $3L/5$,如图 9 所示。

为了进一步研究随机点蚀损伤的点蚀坑半径和深度对圆形钢管柱的影响,将壁厚损伤因子 α 定义为式(4)。

$$\alpha = t / T \quad (4)$$

t 为点蚀坑深度, T 为未损坏圆形钢管柱的壁厚。

在分析中,MOLO 被定义为未损坏构件,M1L1 是 DOP 不同的损坏构件。壁厚损伤因子 α 按比例增大考虑对屈服荷载的影响。同时,根据实际结构情况,柱脚处出现局部点蚀破坏。因此,以 $L/5$ 柱脚损伤为例,所有参数设置如表 4 所示。

表 4 $L/5$ 柱脚点蚀损坏情况

模型 number	d_i/m	DOP	α	模型 number	d_i/m	DOP	α
MOLO	0	0	0	—	—	—	—
M1L1-1	0.04	5.9%	0.2	M1L1-11	0.06	13.28%	0.6
M1L1-2	0.04	5.9%	0.4	M1L1-12	0.06	13.28%	0.8
M1L1-3	0.04	5.9%	0.6	M1L1-13	0.07	18.08%	0.2
M1L1-4	0.04	5.9%	0.8	M1L1-14	0.07	18.08%	0.4
M1L1-5	0.05	9.22%	0.2	M1L1-15	0.07	18.08%	0.6
M1L1-6	0.05	9.22%	0.4	M1L1-16	0.07	18.08%	0.8
M1L1-7	0.05	9.22%	0.6	M1L1-17	0.08	23.61%	0.2
M1L1-8	0.05	9.22%	0.8	M1L1-18	0.08	23.61%	0.4
M1L1-9	0.06	13.28%	0.2	M1L1-19	0.08	23.61%	0.6
M1L1-10	0.06	13.28%	0.4	M1L1-20	0.08	23.61%	0.8

3.2 工况分析

未损坏构件 MOLO 的屈服荷载为 2 038.30 kN。当 α 为常数时,屈服荷载 -DOP 曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,当 α 为常数时,随着 DOP 的增加,不同点蚀区域下圆钢管柱的屈服荷载均呈下降趋势,但下降幅度差别显著。

当 α 为 0.2, DOP 为 23.61% 时, $L/5$ 柱脚处,屈服荷载为 2 032.13 kN,仅下降了 0.30%; $2L/5 \sim 3L/5$

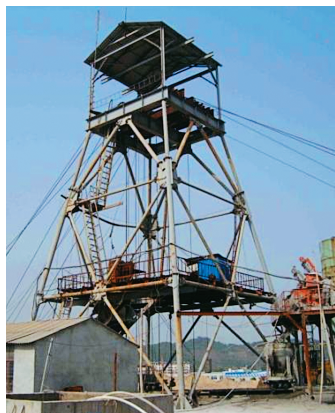


图 8 井架

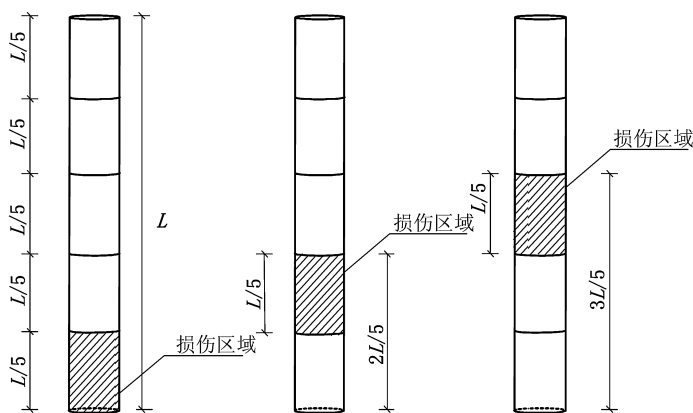


图 9 局部点蚀损伤区域

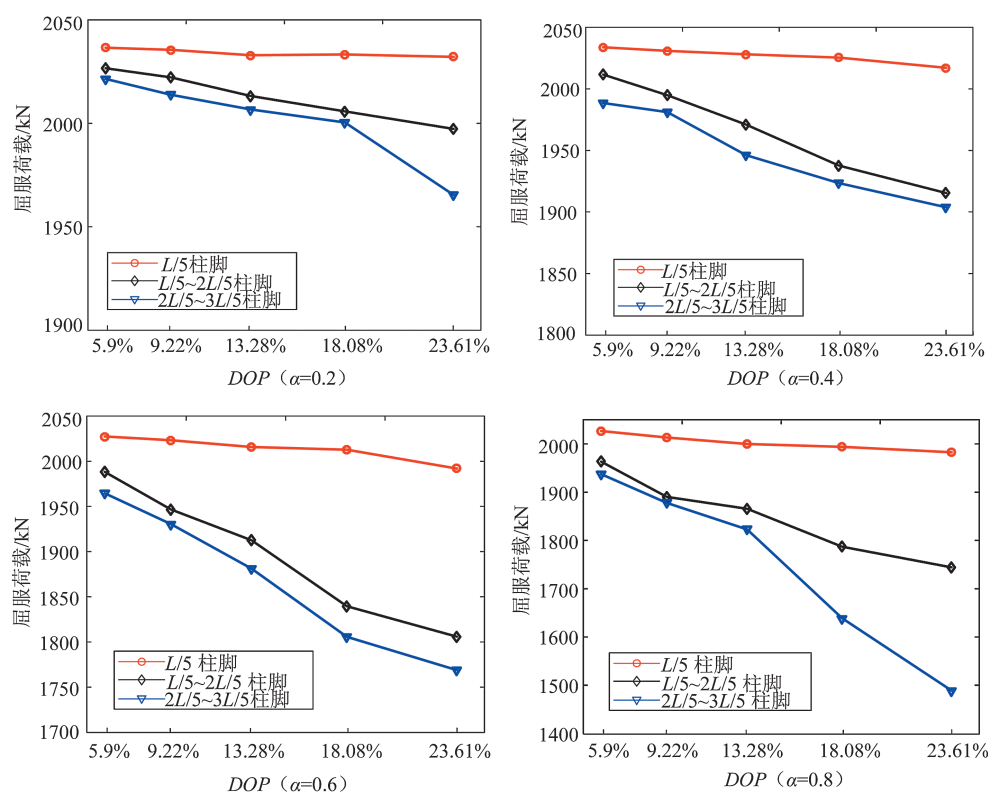


图 10 屈服荷载 -DOP 曲线

柱脚处,屈服荷载为 1 965.32 kN,下降了 3.58%,下降幅度明显大于前者。

当 α 为 0.8、DOP 为 23.61% 时, L/5 柱脚处,屈服荷载为 1 982.41 kN,仅下降了 2.74%; 2L/5~3L/5 柱脚处,屈服荷载为 1 488.80 kN,下降了 26.96%,下降幅度明显大于前者。

由图 10 及以上分析可知,构件发生点蚀损伤时,文中所选损伤区域屈服荷载的下降幅度顺序为: 2L/5~3L/5 柱脚 > L/5~2L/5 柱脚 > L/5 柱脚。2L/5~3L/5 柱脚处随机点蚀损伤对构件屈服荷载的影响最大,故 2L/5~3L/5 柱脚处是点蚀损伤的敏感区,在实际工程中应对构件的该区域重点防护。

4 结论

设计随机点蚀圆钢管柱轴压试验,考虑了不同的内径和点蚀损伤强度对圆钢管柱力学性能的影响,利用 ANSYS 有限元软件建立构件的数值模型并进行了校核。接着分析了点蚀损伤区域对构件屈服荷载的影响。得出以下结论:

(1) 在文中所选点蚀损伤范围内,随着 DOP 的增大,圆钢管柱的屈服荷载和弹性模量均近似呈现

线性下降趋势,并且 DOP 对内径较小构件屈服荷载和弹性模量的影响均较为明显。

(2) 当 DOP 为 4% 时,构件点蚀坑之间环向应变发展明显快于纵向应变发展。

(3) 根据试验构件参数,利用 ANSYS 有限元软件分别建立了无损伤构件和损伤构件的数值模型,利用试验结果对数值模型进行校核,最大误差分别为 -4.17% 和 -11.78%,说明文中所建立的数值模型合理。

(4) L/5 柱脚处随机点蚀损伤对构件屈服荷载的影响最小, 2L/5~3L/5 柱脚处随机点蚀损伤对构件屈服荷载的影响最大,说明 2L/5~3L/5 柱脚处是点蚀损伤的敏感区,在实际工程中应对构件的该区域重点防护。

参考文献:

- [1] Andreatta F, Lanzutti A, Vaglio E, et al. Corrosion behaviour of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70 (9): 1633-1645.
- [2] Leshchak R L, Babii A V, Barna R A, et al. Corrosion resistance of steel of the frames of boom sprayers[J].

- Materials Science, 2020, 56 (3): 425–431.
- [3] 王燕舞, 黄小平, 崔维成. 船舶结构钢海洋环境点蚀模型研究之一: 最大点蚀深度时变模型 [J]. 船舶力学, 2007, 11 (4): 577–586.
- [4] 王燕舞, 吴晓源, 张雨华, 等. 船舶结构钢海洋环境点蚀模型研究之二: 实船蚀坑形态与径深比时变模型 [J]. 船舶力学, 2007, 11 (5): 735–743.
- [5] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report) [J]. Marine Structures, 2004, 17 (5): 403–432.
- [6] 马厚标, 杨飏, 贾紫月. 考虑点蚀损伤的 NV-D36 海工高强结构钢拉伸性能试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39 (8): 1283–1289.
- [7] Rahbar-Ranji A. Ultimate strength of corroded steel plates with irregular surfaces under in-plane compression [J]. Ocean Engineering, 2012, 54: 261–269.
- [8] Silva J E, Garbatov Y, Soares C G. Ultimate strength assessment of rectangular steel plates subjected to a random localised corrosion degradation [J]. Engineering Structures, 2013, 52: 295–305.
- [9] Karagah H, Shi C, Dawood M, et al. Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 87: 191–199.
- [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.
- [11] 吴兆旗, 魏源, 王鑫涛, 等. 局部锈蚀圆钢管构件轴压力学性能正交试验研究 [J]. 工程力学, 2020, 37 (4): 144–152.
- [12] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33 (7): 53–60.
- [13] 林振东. 腐蚀影响下海洋平台结构的极限承载力研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [14] 秦广冲, 兰涛, 苏健兴, 等. 不同参数下锈损 H 型钢柱抗震性能数值分析 [J]. 钢结构, 2018, 33 (10): 131–135.
- [15] 徐善华, 张宗星, 何羽玲, 等. 考虑蚀坑影响的腐蚀钢板力学性能退化试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2017, 49 (2): 164–171.

(上接第 5 页)

3 结论

(1) 板-梁理论可以求解自重荷载作用下的轴压构件屈曲荷载, 并且对于长细比大于 50 的细长 T 形截面悬臂柱误差在 1.5% 以内, 精度较高。

(2) ANSYS 有限元软件中 SHELL 单元适合用于分析薄壁构件, T 形截面悬臂柱在自重荷载作用下发生弯扭屈曲, 与理论假设相一致。

(3) 板-梁理论根据经典理论将薄壁构件各板件的屈曲变形分解为平面内的弯曲变形和平面外的扭转变形, 并分别按 Timoshenko 梁和 Kirchhoff 板力学模型确定, 根据能量变分原理计算求解。相较于传统 Vlasov 理论, 物理过程清晰明确、容易理解, 适合薄壁构件的屈曲分析。

参考文献:

- [1] Mohri F, Azrar L, Potier-Ferry M. Flexural-torsional post-buckling analysis of thin-walled elements with open sections [J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39 (11): 907–938.
- [2] 郭兵, 毕研军, 李毅. 轴压 T 形钢的相关屈曲及板件宽厚比 [J]. 西安科技学院学报, 2001, 21 (2): 114–117.
- [3] 申红侠. 焊接 T 形截面轴心压杆的弯扭屈曲 [J]. 钢结构, 2006, 21 (3): 86–88, 82.
- [4] 熊晓莉. T 形截面钢压杆整体稳定计算的折算长细比法 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2013, 34 (2): 84–88.
- [5] 熊晓莉, 庞瑞. 剖分 T 型钢压杆整体失稳问题研究 [J]. 建筑结构, 2013, 43 (13): 58–62.
- [6] 吴金池, 俞栋华, 刘赞. 中美规范关于双角钢受压稳定承载力比较 [C]//. 土木工程新材料、新技术及其工程应用交流会论文集 (下册). 2019: 746–750.
- [7] 张磊, 童根树. 薄壁构件整体稳定性的有限元模拟 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45 (3): 531–538.
- [8] 张文福. 工字形轴压钢柱弹性弯扭屈曲的新理论 [C]//. 第十五届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 2015: 739–749.
- [9] 张文福. 钢结构平面内稳定理论 - 上册 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
- [10] 张文福. 钢结构平面外稳定理论 - 下册 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2019.
- [11] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2011.