

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.013



开放科学(资源服务)标识码OSID:



锈蚀脚手架钢管轴压稳定性试验研究

胡晓鹏^{1a,1b}, 仲帅^{1a}, 彭刚^{1a}, 范永风²

(1. 西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055;
3. 甘肃建筑职业技术学院 建筑工程系, 兰州 730050)

摘要:为研究锈蚀对扣件式脚手架体系中钢管立杆稳定性的影响,通过对不同锈蚀龄期的钢管进行表面形貌测试,分析锈蚀对钢管内、外壁表面形貌的影响;通过锈蚀钢管材料单调拉伸试验,探讨锈蚀条件下钢材力学性能的退化规律;基于锈蚀钢管的轴心受压试验结果,提出锈蚀钢管立杆稳定性的计算模型。结果表明:随着钢管失重率的增加,钢管表面坑蚀分布由独立坑向溃疡状坑群发展,外壁坑蚀率、算术平均高度和均方根高度均不同程度地高于钢管内壁;锈蚀钢材表面随机分布、大小不一的蚀坑会导致钢材强度与塑性变形能力下降、塑性变形能力劣化更明显;不同锈蚀程度的钢管轴压破坏模式均为整体弯曲失稳,锈蚀钢管的极限荷载随失重率的增加线性下降,峰值荷载对应的轴向位移值逐渐降低。

关键词:扣件式脚手架;锈蚀钢管;表面形貌;材料力学性能;轴心受压

中图分类号:TU392.3

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2022)06-0136-08

Experimental study of axial compression stability of corroded steel tube in scaffold

HU Xiaopeng^{1a,1b}, ZHONG Shuai^{1a}, PENG Gang^{1a}, FAN Yongfeng²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. Department of Architectural Engineering, Gansu Construction Vocational Technical College, Lanzhou 730050, P. R. China)

Abstract: To study the effect of corrosion on the axial compression performance of the upright tube of steel tubular scaffold with couplers, the surface morphology of steel tubes with different corrosion ages was tested to analyze the influence of corrosion on the surface morphology of the inner and outer walls of steel tubes, and the degradation law of mechanical properties of corroded steel was discussed through the monotonic tensile test of corroded steel tube. The calculated formula for the stability of the corroded steel tube was proposed through the results of the axial compression tests. The results show that the distribution of pit corrosion on the surface of

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金(51678473、52078412);长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R84)

作者简介:胡晓鹏(1980-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事工程结构可靠性与耐久性研究,E-mail: shs339@sina.com。

Received:2020-10-22

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51678473, 52078412); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of China (No. IRT_17R84)

Author brief: HU Xiaopeng (1980-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: reliability and durability of engineering structures, E-mail: shs339@sina.com.

steel tube develops from independent pits to ulcer-like pit groups with an increase of the quality loss rate of steel tube. The pit corrosion ratio, the average arithmetic height, and the root mean square height of the outer wall are higher than those of the inner wall in varying degrees. Randomly distributed and different sizes of pits will cause the decrease of the strength and plastic deformation ability of the steel. Compared with the decrease in strength, corrosion has a more severe impact on the plastic deformation ability of steel. The axial compression failure mode of steel tubes with different corrosion degrees is the overall bending instability. As the mass loss rate increases, the ultimate load decreases linearly, and the axial displacement value corresponding to the peak load point decreases gradually.

Keywords: steel tubular scaffold with couplers; corroded steel tube; surface morphology; material property; axial compression

由于施工便利、循环性高等优点,扣件式钢管脚手架在实际工程中得到了普遍应用^[1]。近年来,建筑施工过程中脚手架倒塌事故频发,造成大量人员伤亡和巨额财产损失^[2-4]。长期反复使用过程中,钢管锈蚀会导致钢管承载能力降低,是诱发脚手架体系倒塌的重要原因之一。

在锈蚀对钢材表面形貌影响方面,商钰^[5]通过比较锈蚀钢板二维轮廓和三维形貌量测结果,认为三维分析可以更加直观地反映锈蚀钢管表面形貌特征。Gathimba等^[6]对海水锈蚀条件下的钢管桩三维表面形貌进行测试,分析了不同海水锈蚀条件对表面形貌参数的影响。王友德等^[7]建立了锈蚀深度随机场模型和蚀坑随机分布模型,实现了一般大气环境下钢结构表面特征的准确模拟。基于锈蚀钢材表面形貌逆向建模的有限元模拟可以准确分析不同锈蚀程度钢构件的力学性能^[8-9]。为减少数值计算成本,Chun等^[10]基于钢材表面形貌特征,利用卷积神经网络对钢材的有效厚度进行了预测,采用有限单元法对钢材强度进行了计算。

对于钢管的轴压承载性能,学者们开展了大量研究^[11-13]。考虑复杂环境下钢管的锈蚀现象,Cinitha等^[14-15]研究了锈蚀和高温共同作用对钢管构件的破坏模式、承载能力的影响规律,认为锈蚀会导致钢管截面面积的非均匀损失、极限承载力显著降低。Nazari等^[16]以锈蚀区域深度、长度、宽度等参数表征了钢管局部锈蚀损伤,借助数值模拟研究了局部锈蚀钢管构件的轴压力学行为,结果表明,锈蚀严重部位会产生钢管局部屈曲,从而影响钢管的承载能力。宋钢^[17]对比了室外酸性盐雾周期喷淋和自然锈蚀钢管构件的表面形貌及成分,认为加速锈蚀试验能够重现钢材在自然环境下的锈蚀情况,并通过钢管轴心受压试验研究了钢管失重率对其屈服承载力和极限承载力的影响。Wang等^[18]提出了

一种局部电加速锈蚀方法,研究了钢管构件外壁局部锈蚀对钢管轴压承载力的影响。吴兆旗等^[19]采用正交试验法研究了近海大气环境下局部锈蚀参数对圆钢管轴压柱力学性能的影响,并提出了局部锈蚀圆钢管轴压承载力的计算公式。

目前,锈蚀钢管轴压力学性能的研究已取得了一定成果。但由于腐蚀环境的不同,钢管构件内、外壁的锈蚀演化存在明显差异,目前的研究未涉及这一因素;现有成果研究对象大多为长细比较小的钢管,其研究成果是否适用于长细比较大的脚手架钢管体系尚需进行深入研究。笔者通过脚手架钢管加速锈蚀后钢材的力学性能与表面形貌测试、轴心受压试验,分析脚手架钢管内、外壁锈蚀形貌演化差异及其对钢材力学性能的影响规律,建立了锈蚀钢管轴压承载性能的计算模型。

1 试验概况

1.1 钢管加速锈蚀试验

参照《建筑施工扣件式脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)中相关规定,试验采用钢管规格为 $\Phi 48 \times 3.5$ mm,长度1.2 m,钢材型号为Q235B。试验按照《金属和合金的腐蚀 户外周期喷淋暴露试验方法》(GB/T 24517—2009)的要求,采用质量分数为5%的中性氯化钠溶液作为腐蚀溶液,通过均匀布置在试件上方的喷水管道对试件进行间断喷淋,每隔2 d翻动一次试件,以确保试件处于干湿交替环境且锈蚀均匀。加速锈蚀试验过程如图1所示。

将钢管按照预定锈蚀时间分批取出,然后采用酸洗法除锈。按照加速锈蚀时间的长短,将试件分为T1~T6等6批,对应锈蚀时间分别为0、14、26、38、48、60 d,每种锈蚀批次设3个试件,其钢管失重率 η_w 按式(1)计算。锈蚀前后钢管试件的几何参数及失重率见表1。

$$\eta_w = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： m_0 为试件锈蚀前的质量，kg； m 为试件锈蚀后的质量，kg。



图 1 加速锈蚀试验

Fig. 1 Accelerated corrosion test

表 1 加速锈蚀试验结果

Table 1 Results of accelerated corrosion test

试件编号	时间/d	失重率/%	试件编号	时间/d	失重率/%
T1-1	0		T4-1	38	7.79
T1-2	0		T4-2	38	8.16
T1-3	0		T4-3	38	6.85
T1-M	0		T4-M	38	6.58
T2-1	14	2.45	T5-1	48	9.78
T2-2	14	2.30	T5-2	48	10.95
T2-3	14	2.21	T5-3	48	10.23
T2-M	14	2.28	T5-M	48	7.73
T3-1	26	4.41	T6-1	60	14.92
T3-2	26	4.64	T6-2	60	14.54
T3-3	26	5.18	T6-3	60	14.37
T3-M	26	4.21	T6-M	60	10.66

注：试件编号中的“-1”“-2”“-3”表示用于轴压试验的平行试样；“-M”表示用于材性及表面形貌测试的试样。

1.2 钢管表面锈蚀形貌测试及材性试验

对锈蚀钢管进行切割加工，制作用于表面锈蚀形貌量测及材料力学性能试验的试件，试件尺寸见图 2，用于表面形貌测量的区域为 60 mm×8 mm。钢管表面形貌测试所用仪器为美国 NANOVEA 公司 ST400 型非接触式光学轮廓仪，该仪器通过其超灵敏探测器系统接收到样品表面反射出的不同波长的漫反射光，根据准共聚焦原理得到测点距离透镜的垂直距离，再通过点扫描方式以 S 路径获得钢管的三维表面形貌特征。通过 Professional 3D 软件对扫描所得三维形貌进行后处理以获取钢管表面特征参数。参照《金属材料拉伸试验 第一部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)中相关规定，在

DNS300 型电子万能试验机上进行钢管材性试件的单调拉伸试验，加载过程中控制位移速率，试验过程中系统自动对数据进行采集，试验结束后对试件变形进行量测。

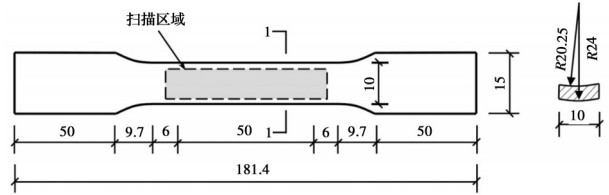


图 2 拉伸试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of tensile specimens (Unit: mm)

1.3 钢管立杆轴心受压试验

钢管试件上下两端铰接固定，在试件上方施加沿钢管轴向的荷载，当试件加载至荷载下降至峰值荷载的 80% 时，终止试验。为获得加载过程中钢管的轴向变形与侧向变形，在试件中部截面外表面沿轴向均匀布置 8 组应变片，在试件加载端布置 2 个侧向位移计及 1 个竖向位移计，在试件中部沿周长均匀布置 4 个侧向位移计。试验装置及测点布置如图 3 所示。

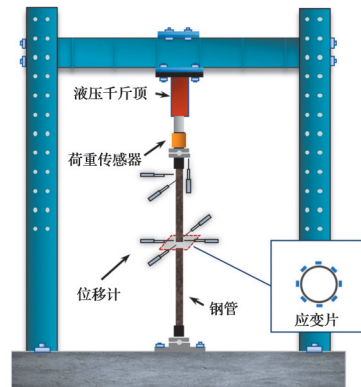


图 3 试验装置及测点布置

Fig. 3 Test device and layout of measuring point

2 试验结果分析

2.1 锈蚀钢管表面形貌

图 4 为不同锈蚀时间钢管试件内、外壁表面形貌云图。云图左侧及下侧标注有扫描区域尺寸；右侧为云图标尺，反映表面高度，单位为 μm 。由图 4 可知：当锈蚀时间较短时，钢管表面整体较为平整，散布有相互独立的小体积蚀坑；随着锈蚀时间的增加，蚀坑面积和深度逐渐增加，蚀坑间开始相互贯通，形成溃疡状蚀坑群，表面形貌起伏波动越来越大。由于腐蚀微环境存在一定的差异，钢管外壁蚀

坑发展强于内壁,且随着锈蚀时间的增加,二者差距逐渐增大。

采用失重率 η_w 描述钢管锈蚀程度,以坑蚀率 V 、算术平均高度 S_a 、均方根高度 S_q 和最大高度 S_z 等评价指标表征锈蚀钢管表面三维形貌特征,不同锈蚀程度钢管表面形貌特征参数见表 2。由表 2 可知:

1)随着锈蚀时间的增长,钢管失重率 η_w 逐渐增加。随着锈蚀程度的增加,均匀锈蚀(剥蚀)程度加深,造成钢管壁厚 t 减小。

2)坑蚀率 V 表示扫描区域锈坑体积与包围锈坑的最小长方体的比值。钢管内、外壁坑蚀率均随着失重率的提高而逐渐增加,局部锈蚀(坑蚀)程度增强。其中,外壁坑蚀率高于内壁,外壁坑蚀率增长速率较为稳定,而在 10 ~ 40 d 期间内壁坑蚀率增长缓慢;这是由于随着锈蚀程度的加深,锈蚀产物

在表面形成致密保护层,随着锈蚀时间的进一步增长,致密锈蚀产物逐渐分解剥落,锈蚀作用在坑蚀区域进一步发展,造成坑蚀率迅速增加;由于钢管外壁长期处于暴露条件,在盐雾喷淋及自然条件等因素作用下锈蚀产物更易剥落,锈蚀层对钢材表面的保护作用并未明显体现。

3)表面最大高差 S_z 仅体现表面最高点与最低点之间的高度差,由于其采样特性,导致数据离散性相对较大。

4)表面算术平均高度 S_a 和均方根高度 S_q 可在一定程度上反映采样区域试件的粗糙程度,数值越小则平面越光滑。随着失重率的增加, S_a 、 S_q 值整体呈上涨趋势,表明试样表面起伏波动更大。当失重率较小时,内、外壁 S_a 、 S_q 值差距不大;随着锈蚀率的增加,外壁 S_a 值增长更迅速。

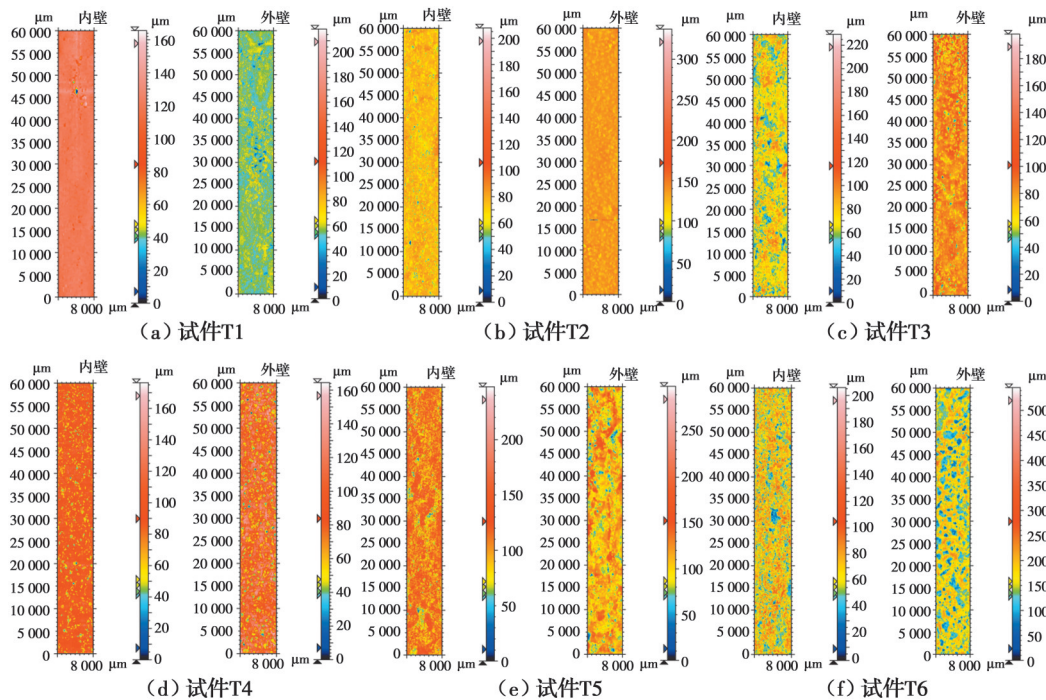


图 4 钢管表面形貌图

Fig. 4 Surface morphology of steel tubes

表 2 钢管表面形貌参数

Table 2 Surface morphology parameters of steel tubes

试件 编号	$\eta_w/\%$	t/mm	$V/\%$		$S_a/\mu\text{m}$		$S_q/\mu\text{m}$		$S_z/\mu\text{m}$	
			内壁	外壁	内壁	外壁	内壁	外壁	内壁	外壁
T1	0	3.48	0.72	1.28	3.70	5.78	6.70	8.76	165.52	219.47
T2	2.28	3.42	3.02	4.11	5.69	4.94	7.90	7.11	207.68	337.31
T3	4.21	3.38	3.27	5.53	11.74	9.20	15.37	12.13	229.35	198.12
T4	6.58	3.34	3.52	6.70	12.51	20.76	16.15	24.79	176.32	164.45
T5	7.73	3.31	5.21	8.10	20.02	17.73	25.31	22.30	247.62	299.25
T6	10.66	3.29	6.06	8.57	22.82	31.56	25.87	38.85	205.77	545.77

2.2 锈蚀钢管的材料力学性能

通过不同锈蚀时间钢管试件的单调拉伸试验,得到的钢管试件的力学性能参数见表 3,试件力学性能随失重率增加的衰减规律见图 5。对于不同失重率的试样,在拉伸过程中均出现了颈缩现象,随着锈蚀率的增加,钢材的极限强度 f_u 、屈服强度 f_y 、弹性模量 E 、断后伸长率 A 及断面收缩率 Z 近似呈线性下降,钢管的强度和塑性变形能力都有所降低,塑性变形能力的降低程度更明显;这主要是因为局部锈蚀会在钢材表面形成大小不一且随机分布的蚀坑,并且蚀坑体积随着锈蚀程度的增加而增加。在轴向拉伸时,蚀坑周围会产生应力集中现象,在蚀坑处过早地产生裂缝,随着裂缝的进一步发展,最终导致钢管材料强度和延性随失重率增加而逐渐下降。

表 3 试件的力学性能指标

Table 3 Mechanical properties of specimens

试件编号	$\eta_w/\%$	f_u/MPa	f_y/MPa	$E/10^5 \text{ MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
T1	0	440.0	331.0	2.06	30.10	50.44
T2	2.28	436.8	329.1	2.02	28.04	49.69
T3	4.21	434.7	328.0	2.03	26.82	47.43
T4	6.58	431.7	326.3	2.00	25.14	46.00
T5	7.73	426.1	323.1	1.98	22.30	45.39
T6	10.66	419.1	319.0	1.97	19.30	44.30

注:每种锈蚀程度进行 2 组材性试验,取自同一锈蚀钢管,钢材的力学性能指标为 2 次试验平均值。

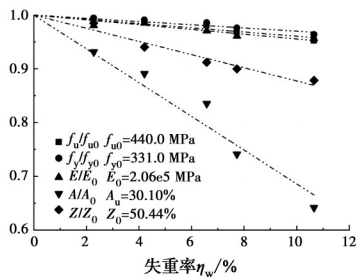


图 5 钢材力学性能参数与失重率的关系

Fig. 5 Relationship between mechanical property parameters and weight loss rate of steel

通过图 5 中回归关系,可建立锈蚀钢管材料力学性能指标与失重率 η_w 之间的定量关系,见式(2)。

$$\begin{cases} f_u/f_{u0} = 1 - 0.39\eta_w \\ f_y/f_{y0} = 1 - 0.30\eta_w \\ E/E_0 = 1 - 0.44\eta_w \\ A/A_0 = 1 - 3.14\eta_w \\ Z/Z_0 = 1 - 1.23\eta_w \end{cases} \quad (2)$$

2.3 锈蚀钢管的轴心受压试验结果

2.3.1 试验现象 试验中不同锈蚀龄期钢管的轴心受压破坏形态主要表现为整体弯曲失稳,曲率最大处均位于钢管中段。在加载初期,钢管试件侧向位移很小,钢管形态无明显变化;随着进一步加载,钢管开始表现出弯曲形态,此时对应轴向荷载值约为峰值荷载的 30%~40%,随后钢管挠度缓慢发展;当轴向荷载增加至峰值荷载的 75%~90%时,钢管侧向位移变形加剧,呈明显弯曲变形状态;在达到峰值后,轴向荷载迅速下降,钢管整体失稳,丧失承载能力。试验现象及破坏后试样形态如图 6 所示。

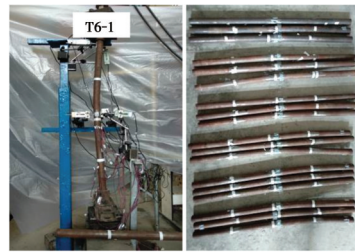


图 6 试验现象及破坏后试样形态

Fig. 6 Experimental phenomenon and failure mode of specimens

2.3.2 荷载-应变曲线 图 7 为不同锈蚀程度钢管试件跨中截面荷载-应变关系曲线,其中,拉伸应变为正,压缩应变为负。不同锈蚀钢管的跨中截面荷载-应变曲线规律基本一致,即:在加载初期,钢管应变随荷载的增加而线性增长,跨中截面各点处于弹性变形阶段,截面应变以压缩应变为主,各个方向应变值接近;随着荷载的增加,试件开始产生弯曲变形,构件出现了拉伸应变和压缩应变,且两个应变均随荷载的增加而逐渐增长,压缩应变增长速率更大;随着试件弯曲变形的加剧,跨中截面压缩应变、拉伸应变均加剧增长;试件达到峰值荷载后,跨中截面应变继续增大,试件发生整体失稳破坏。在弹性阶段,不同锈蚀程度的试件荷载-应变曲线斜率相差不大,弹性极限随锈蚀率增大而减小;在荷载下降段,锈蚀钢管跨中截面应变变化速率明显小于未锈蚀钢管。

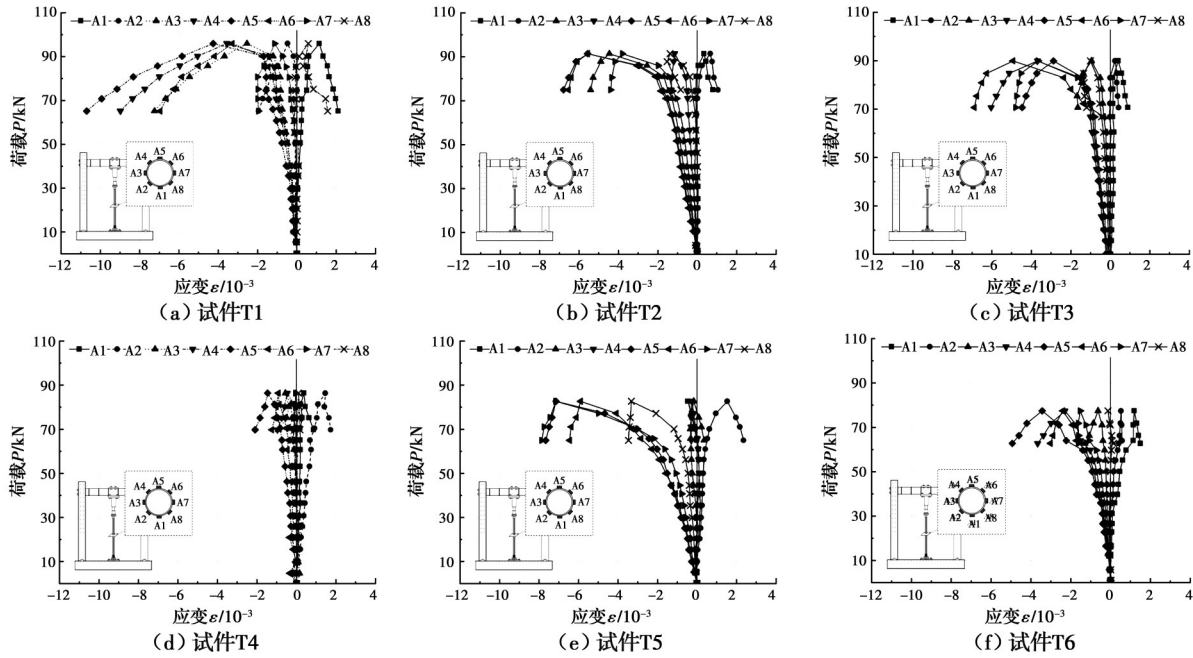


图7 跨中截面荷载-应变曲线
Fig. 7 Load-strain curves of mid-span sections

2.3.3 荷载-位移曲线 图8展示了不同锈蚀程度试件的荷载-侧向位移曲线与荷载-竖向位移曲线。其中,侧向位移为中部各方向侧向位移通过三角函数关系换算得到的跨中最大位移,在加载中后期,位移计端头滑出导致部分侧向位移采集不完整,分析其前期规律可知,锈蚀程度越高,钢管弹性变形阶段越短。荷载-竖向位移曲线大体可以分为3个阶段,即弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段。在弹性阶段,随着荷载的增大,竖向位移呈线性增长;随着荷载的增大,试件进入弹塑性阶段,荷载增长不大,而竖向位移却迅速增长,对于体系中长细比较大的脚手架钢管,这一阶段非常短暂;荷载达到峰值后,试件进入破坏阶段,竖向位移迅速增长而荷载急剧下降,此时钢管迅速失去承载能力,试件发生整体失稳破坏。对比不同锈蚀程度钢管的荷载位移曲线,可知各试件上升段斜率较为接近,即钢管整体刚度差异不大;钢管的锈蚀程度越高,试件的弹性阶段越短,且峰值荷载对应的竖向位移越小。

2.3.4 极限承载力劣化规律 试件极限承载力 P_u 与失重率关系如图9所示。由图9可知,随着钢管失重率的增加,极限承载力基本呈线性下降;钢管平均失重率由0%增加至14.61%时,极限承载力降幅达到了19.81%。钢管极限承载力降低的原因:一是由于钢材锈蚀后钢管截面面积减小;二是锈蚀导致钢材力学性能下降;三是由于腐蚀微环境

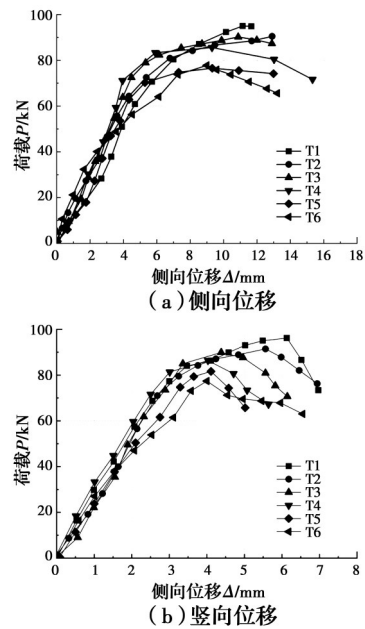


图8 荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curve

存在差异,横截面各点锈蚀会有一些的差别,导致钢管均匀性下降,钢管试件更易产生失稳破坏。

2.3.5 锈蚀钢管轴压承载力计算模型 在《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)(以下简称规范)中,钢管立杆稳定性按照式(3)进行验算。

$$N \leq \varphi A f \tag{3}$$

式中: N 为立杆轴向力设计值, N ; φ 为轴心受压构件的稳定性系数; A 为钢管截面面积, mm^2 ; f 为钢材强度设计值, N/mm^2 。

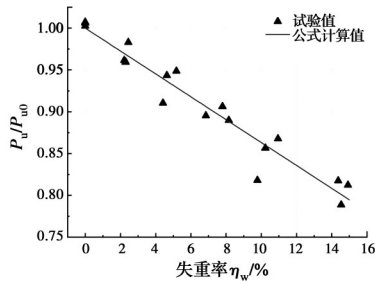


图9 荷载随失重率的变化曲线

Fig. 9 Change curve of load with weight loss rate

钢管立杆锈蚀主要包括均匀锈蚀与局部锈蚀。均匀锈蚀会导致钢管壁厚减小,改变钢管几何参数。以失重率描述钢管锈蚀程度,发现局部锈蚀程度逐渐加深,进而造成钢材性能退化。因此,锈蚀后钢管立杆稳定性系数 φ 、钢管截面面积 A 和钢材强度 f 均会出现不同程度的劣化,造成钢管立杆极限承载能力的降低。实际工程中,由于锈蚀的不均匀性,截面损伤较难准确测量,加上锈蚀钢材力学性能试验存在一定难度,计算实际工程锈蚀脚手架体系承载力时,建议不对式(3)中的3个参数进行调整,直接截取一段钢管称重计算钢管失重率,并通过锈蚀影响系数 K 对锈蚀钢管轴压承载力进行计算,计算公式为

$$N \leq K\varphi Af \quad (4)$$

式中: K 为锈蚀影响系数,可从图9中拟合得到, $K = 1 - 0.01368\eta_w$ (拟合相关系数 $R^2 = 0.954$); φ 、 A 、 f 按照未锈蚀钢管情况进行取值。

3 结论

对锈蚀钢管立杆开展表面形貌测试、材料性能试验、轴心受压试验,研究钢管内、外壁形貌特征、钢材性能退化及锈蚀钢管承载力特性,提出锈蚀钢管立杆稳定性的计算公式,得到以下主要结论:

1)随着钢管失重率的增加,钢管表面坑蚀面积和深度逐渐增加,分布方式也由独立蚀坑向溃疡状蚀坑群发展;钢管外壁蚀坑体积、粗糙程度均大于钢管内壁。

2)锈蚀导致钢材强度与塑性变形能力下降,相比于强度降低,锈蚀对钢材塑性变形能力的影响更严重。

3)不同锈蚀程度的钢管轴压破坏模式均为整体弯曲失稳。随着失重率 η_w 的增加,极限荷载 P_u 线性下降,同时,峰值荷载点对应的轴向位移值逐渐降低。钢管失重率 η_w 由0%增加到14.61%时,极限承载力降幅为19.81%。

4)通过试验结果分析,提出锈蚀钢管立杆稳定性的计算公式。在工程中,通过测定钢管失重率便可利用该公式对锈蚀钢管立杆稳定性进行验算。

参考文献

- [1] BEALE R G. Scaffold research-A review [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 98: 188-200.
- [2] MILOJKOVIC B. Factors of safety for standard scaffold structures [D]. Oxford Brookes University, 1999.
- [3] 谢建民, 肖备. 脚手架与模板倒塌事故分析与预防措施 [J]. 建筑结构, 2002, 32(4): 71-72.
XIE J M, XIAO B. Analysis and preventive measures for the collapse of scaffold and formwork [J]. Building Structure, 2002, 32(4): 71-72. (in Chinese)
- [4] BEALE R G, GODLEY M. Common causes of failure of metal scaffolds in the UK and stability checks on scaffolds [C]//Proceedings of the Technical Seminar on Metal Scaffolding (Falsework) -Design, Construction and Safety, 2003: 62-79.
- [5] 商钰. 腐蚀环境对钢结构表面锈蚀特征影响的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
SHANG Y. Study on the corrosive environment influences on the characteristics of the steel-structure surface [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] GATHIMBA N, KITANE Y, YOSHIDA T, et al. Surface roughness characteristics of corroded steel pipe piles exposed to marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 267-281.
- [7] 王友德, 徐善华, 李晗, 等. 一般大气环境下锈蚀结构钢表面特征与随机模型 [J]. 金属学报, 2020, 56(2): 148-160.
WANG Y D, XU S H, LI H, et al. Surface characteristics and stochastic model of corroded structural steel under general atmospheric environment [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(2): 148-160. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z W, XU S H, NIE B, et al. Experimental and numerical investigation of corroded steel columns subjected to in-plane compression and bending [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 151: 106735.
- [9] 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.
- SONG F Y, XIE X, ZHANG T T. 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.(in Chinese)
- [10] CHUN P J, YAMANE T, IZUMI S, et al. Evaluation of tensile performance of steel members by analysis of corroded steel surface using deep learning [J]. Metals, 2019, 9(12): 1259.
- [11] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2005.
- CHEN S F. Principles of steel structure design [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [12] ZHU J H, YOUNG B. Cold-formed-steel oval hollow sections under axial compression [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(7): 719-727.
- [13] 魏言磊, 郭咏华, 孙清, 等. Q690 高强钢管轴心受压局部稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 1-12.
- WEI Y L, GUO Y H, SUN Q, et al. Study on local stability of Q690 high-strength steel tube under axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 1-12. (in Chinese)
- [14] CINITHA A, UMESHA P K, IYER N R. An overview of corrosion and experimental studies on corroded mild steel compression members [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(6): 1735-1744.
- [15] CINITHA A, UMESHA P K, PALANI G S, et al. Compression behaviour of steel tubular members under simulated corrosion and elevated temperature [J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(1): 139-152.
- [16] NAZARI M, KHEDMATI M R, KHALAJ A F. A numerical investigation into ultimate strength and buckling behavior of locally corroded steel tubular members [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2014, 11(6): 1063-1076.
- [17] 宋钢. 考虑腐蚀效应的圆钢管轴向受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- SONG G. The research of circular steel pipe axial force performance considering the general corrosion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] WANG H J, ZHANG Z W, QIAN H L, et al. Galvanic corrosion induced localized defects and resulting strength reduction of circular steel tubes under axial compression: An experimental study [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 154: 106881.
- [19] 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.
- WU Z Q, WEI Y, WANG X T, et al. Orthogonal experimental study on axial mechanical behavior of locally corroded circular steel tubes [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 144-152. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)