

局部腐蚀后单肢连接 Q355 等边角钢抗拉性能试验研究

闫慧强^{1,2}, 黄兴³, 何松洋³, 康少波^{1,2*}, 韩大刚³, 刘翔云³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610056)

摘要: 输电塔作为一种长期暴露在大气环境中的结构, 其中所用的角钢在服役期间易遭受腐蚀作用。文中针对输电塔结构中常用的 Q355 单肢连接等边角钢开展了受拉试验, 通过机械切削的方法来模拟角钢遭受腐蚀, 共设计了 21 根试件, 包括 1 组无损对照、2 组螺栓孔腐蚀和 4 组端部腐蚀试件, 研究了不同螺栓孔直径、腐蚀位置和腐蚀深度对角钢受力性能的影响规律, 并提出了角钢腐蚀后剩余抗拉承载力的实用计算方法。结果表明: 试件均在端部螺栓孔处发生断裂破坏; 试件的抗拉承载力因局部腐蚀程度的不同而有所降低, 且腐蚀深度越大, 抗拉承载力的降幅越显著; 连接肢内侧端部局部腐蚀深度为 2 mm 的角钢, 其抗拉承载力降幅最大, 较无损角钢降低了 17.1%。然而, 螺栓孔腐蚀对角钢抗拉承载力的影响较小, 其中螺栓孔直径为 27.5 mm 的角钢抗拉承载力较无损角钢抗拉承载力的最大降幅仅为 2.6%, 可忽略不计。行业相关设计规范尚未考虑局部腐蚀作用对角钢抗拉承载力的影响, 可能导致计算结果偏于不安全; 文中所提出的公式能够较为准确地预测腐蚀后角钢的极限抗拉承载力。

关键词: 输电塔结构; 等边角钢; 单肢连接; 局部腐蚀; 抗拉性能; 试验研究; 剩余承载力

中图分类号: TU391, TM75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2025)07-0001-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240305001

Experimental Investigation on Tensile Behavior of Q355 Equal-Angle Steel with Single-Sided Connections Subjected to Local Corrosions

YAN Huiqiang^{1,2}, HUANG Xing³, HE Songyang³, KANG Shaobo^{1,2*},
HAN Dagang³, LIU Xiangyun³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering and Consulting Group, Chengdu 610056, China)

*Corresponding author: kang0119@cqu.edu.cn

Abstract: As a structure that is exposed to atmospheric conditions, steel angle in transmission towers may become corroded during service. This study conducted tensile tests on Q355 equal-leg steel angle with single-sided connections, commonly used in transmission tower structures. Local corrosion was simulated by mechanically cutting the steel

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51578089)

作者简介:

闫慧强(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事输电塔角钢腐蚀性能方面的研究。E-mail: yhq17839925675@163.com。

黄兴(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事设计工作与输电线路方面的研究。

通信作者:

康少波(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事高性能钢结构方面的研究。E-mail: kang0119@cqu.edu.cn。

angle, and 21 specimens were designed, including one comparison group without damage, two groups with bolt hole corrosion, and four groups with end corrosion. The study investigated the effects of different bolt hole diameters, corrosion locations, and corrosion depths on the tensile performance of steel angle and proposed a practical calculation method for the residual tensile capacity of corroded steel angle. The results showed that all steel angles fractured at the bolt hole. The tensile capacity of the specimens decreased due to different types of localized corrosion, with greater corrosion depth resulting in a more significant reduction in tensile capacity. The most pronounced decrease was observed in the steel angle with a 2 mm deep end corrosion on the inner side of the connected leg, showing a 17.1% reduction compared to the undamaged specimen. The impact of bolt hole corrosion on the tensile capacity of steel angle was minimal, and the steel angle with a bolt hole diameter of 27.5 mm exhibited the largest reduction of only 2.6%, which can be considered negligible. Relevant design codes do not account for the impact of localized corrosion on the tensile capacity of steel angle, may lead in unconservative result. The formula proposed in this study can accurately predict the ultimate tensile capacity of corroded steel angle.

Keywords: transmission tower structures; equal-angle steel; single-sided connection; local corrosion; tensile behavior; experimental study; residual load capacity

输电塔作为电力传输系统的骨架,是保证高压电力线路安全稳定运行的关键,与电网的可靠性和经济性^[1]有着密切的联系。目前,输电塔普遍采用钢结构塔,对于电压等级为500 kV及以下的输电塔,一般采用单角钢作为塔材即可满足输电塔的承载力需求。然而,由于输电塔长期在自然环境中运行,经常面临各类气象环境的影响和大气的腐蚀^[2],因此塔材极易遭受不同程度的腐蚀。腐蚀会导致钢材的性能劣化直至失效,严重威胁输电塔的使用安全,并可能造成巨大的经济损失^[3]。确定在役输电塔构件腐蚀后的力学性能是开展其安全评估的基础,具有重要的理论意义和工程应用价值。但现行规范^[4-6]仅对建筑材料的腐蚀性进行了分级,根据腐蚀等级可对钢结构构件的截面选择和构造措施提出建议,同时对不同类型钢结构的防腐措施和使用年限作出了规定和说明,仍缺乏对腐蚀后构件力学性能的量化评估方法。

在试验研究方面,SARVESWARAN等^[7]通过分析腐蚀钢结构梁的实测数据,提出了腐蚀损伤钢构件可靠度的计算方法,并指出构件腐蚀深度是可靠度分析的重要指标。CHEN等^[8]基于大量的试验数据建立了钢材腐蚀量的经验估算模型,并通过静力非线性分析研究了大气腐蚀对结构构件应力和钢结构安全性的影响,但由于模型具有局限性,所得结果可能不适用于其他结构。BEAULIEU等^[9]通过将角钢浸泡于饱和硫酸铜溶液中的方法加速腐蚀了16个角钢试件,通过受压试验研究了长细比、宽厚比以及腐蚀程度对角钢抗压性能的影响,将试验结果与三种不同规范的计算结果进行对比发现ASCE10-97能够较为准确地估算被腐蚀角钢构件的承载力,但试验结果并不完整,缺少腐蚀程度在0%~20%之间的数据,同时该试验所得的腐蚀类型与实际工程中的腐蚀类型之间的相似性也有待商榷。张春涛等^[10]通过模拟静力试验研究了不同腐蚀环境对Q355等边角钢

抗震性能的影响,并建立了相应的退化模型,但其研究的腐蚀环境为酸雨腐蚀,不具有普适性,且未研究整个腐蚀试件的力学性能退化规律。高超等^[11]采用有限元法定量分析了4种常见的腐蚀类型对角钢力学性能的影响,但由于文章缺少试验数据作为对比,其有限元分析结果的准确性有待验证。叶继红等^[3]以锈蚀率相等为基础,建立了人工加速腐蚀试验与海洋大气条件下Q235钢构件腐蚀情况的转换关系,并提出了点蚀钢构件力学性能劣化分析的实用计算方法,但由于其研究对象为点蚀钢管,研究结果是否适用于角钢需要进一步讨论。王雪飞^[12]采用数值模拟的方法研究了局部腐蚀的表面密集度、蚀坑深度、腐蚀范围、腐蚀位置和构件长细比对局部腐蚀Q420角钢构件力学性能的影响,并提出了抗拉极限承载力和抗压极限承载力的评估计算公式,但由于没有相应的试验数据,计算结果的准确性也有待验证。

综上所述,迄今为止国内外学者大多通过数值模拟或在特定环境中,针对特定构件进行试验分析以形成经验性公式,关于腐蚀角钢力学性能的试验研究还较少,尚未形成系统的腐蚀角钢力学性能计算方法。为此,本文采用输电塔常用的Q355等边角钢构件,研究了螺栓孔腐蚀和局部腐蚀对其抗拉性能的影响。基于试验结果,通过线性拟合的方法,提出了不同腐蚀类型下角钢抗拉极限承载力的实用计算方法。

1 试验概述

1.1 试件设计

本文试验选取输电塔常用的Q355强度等级、L75 mm×8 mm型号的角钢作为研究对象,采用机械加工的方法来模拟角钢的局部腐蚀,即通过机器在角钢上加工出不同直径的螺栓孔或在角钢180 mm长的外表面切削一定深度,试件如图1所示。OSZVALD等^[13]通过

机械加工的方法将腐蚀损伤模拟为试件厚度的减小,得出了试件厚度减小的程度与试件破坏模式之间的关系,并可根据 b/t (b 为角钢肢宽, t 为试件厚度)的预期行为模式预测试件的剩余承载力,最后建立了设计方程来计算受压角钢的剩余承载力,并证明了机械加工模拟腐蚀的方法可用来分析试件在腐蚀状态下的破坏模式和承载力发展规律。

本试验共设计了7组拉伸试件,每组包括3根角钢,各组试件设计参数完全一致,共计21根试件。试验分为三种类型:1组无损对照试验,螺栓孔直径为21.5 mm;2组螺栓孔腐蚀试验,螺栓孔腐蚀通过将螺栓孔直径扩大至23.5 mm和27.5 mm进行模拟,螺栓孔位于试件的两端(图1b));4组端部局部腐蚀试验,腐蚀位置分别位于角钢连接肢内侧和非连接肢外侧的端部(图1c)),腐蚀长度为180 mm,腐蚀深度为1 mm或2 mm。试验中,螺栓孔直径的变化范围为21.5~27.5 mm,端部局部腐蚀深度的范围为0~2 mm。

表1列出了试件的具体参数,试件编号中各字母的具体含义如下:N表示无损;H表示螺栓孔;E表示端部;U表示非连接肢内侧;O表示非连接肢外侧;1和2分别表示腐蚀深度为1 mm和2 mm。试件实测长度为1 092 mm,且试件的有效计算长度为1 192 mm,长细比 λ 根据有效计算长度 l_0 按最小回转半径计算,角钢的长细比为80。试件的名义尺寸与试验的实测尺寸如表2所示,表2中: L 为试件纵向长度,取两肢长度测量值的平均值; ω 为试件的截面宽度,取试件两端横截面上4肢宽度测量值的平均值; t 为试件厚度,取试件上中下三部分厚度测量结果的平均值; D 为螺栓孔直径,取两端6个螺栓孔测量值的平均值。试件两端各开3个螺栓孔,通过直径为20 mm的8.8级高强螺栓与连接件相连,并由试验机施加拉力。

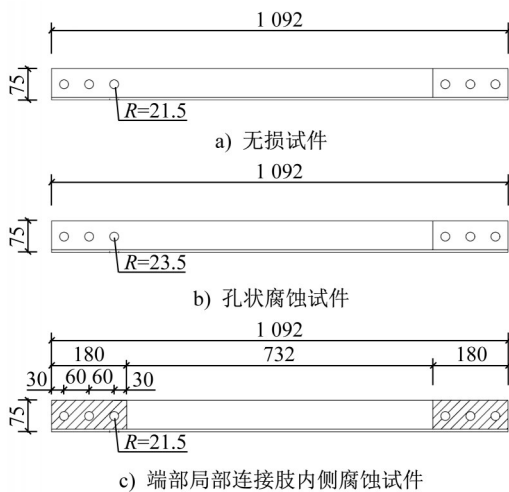


图1 试件示意(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of specimens (unit: mm)

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens mm				
编号	材料规格	腐蚀位置	腐蚀几何参数	长度
N		无	无	
H23.5		连接肢	$D=23.5$	
H27.5		连接肢	$D=27.5$	
E1	L75×6	连接肢 内侧	$L=180, t=1$	1 092
E2		连接肢 内侧	$L=180, t=2$	
EU1		非连接肢 内侧	$L=180, t=1$	
EO2		非连接肢 外侧	$L=180, t=2$	

表2 试件名义尺寸和实测尺寸

Table 2 Nominal and measured dimensions

of the specimens mm						
编号	名义尺寸			实测尺寸		
	L	ω	t	L	ω	腐蚀参数
N-1				1 091.7	75.5	$t=5.87$
N-2				1 092.5	75.2	$t=5.92$
N-3				1 092.2	75.7	$t=5.94$
H23.5-1				1 092.1	75.3	$D=23.58$
H23.5-2				1 091.9	75.8	$D=23.66$
H23.5-3				1 092.3	75.1	$D=23.42$
H27.5-1				1 092.7	75.9	$D=27.56$
H27.5-2				1 092.0	75.4	$D=27.68$
H27.5-3				1 091.8	75.6	$D=27.62$
E1-1				1 092.6	75.0	$t=5.06$
E1-2	1 092	75	6	1 092.4	75.7	$t=5.10$
E1-3				1 092.8	75.2	$t=4.98$
E2-1				1 091.6	75.6	$t=4.02$
E2-2				1 092.7	75.3	$t=4.03$
E2-3				1 092.3	75.1	$t=4.05$
EU1-1				1 092.2	75.8	$t=5.03$
EU1-2				1 091.9	75.4	$t=4.99$
EU1-3				1 092.5	75.9	$t=5.01$
EO2-1				1 092.1	75.0	$t=4.01$
EO2-2				1 091.8	75.5	$t=3.98$
EO2-3				1 092.6	75.3	$t=4.05$

1.2 材性试验

本试验材性试件的取样位置根据《钢及钢产品力学

性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)中的相关规定确定。材性试件的几何尺寸根据《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)中的相关规定确定。试验的加载装置采用电子万能材料试验机CMT5305。试验共取3根材性试件进行拉伸试验,将每根材性试件的应力、应变进行均值处理绘制如图2所示实测材性试件的应力-应变曲线。取试验结果的平均值作为材性试件的强度值,结果如表3所示。

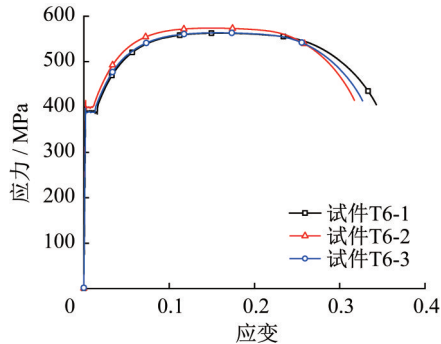


图2 材性试验应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for material property test

表3 材性试验结果

Table 3 Results of material property test MPa				
试件编号	屈服强度 f_y	屈服强度平均值	极限强度 f_u	极限强度平均值
T6-1	384.8		562.8	
T6-2	384.3	380.3	541.5	555.9
T6-3	371.8		563.5	

1.3 试验装置

角钢拉伸试验的加载装置如图3所示。在试验过程中,竖向拉力通过100 t液压千斤顶施加。为了确保试件

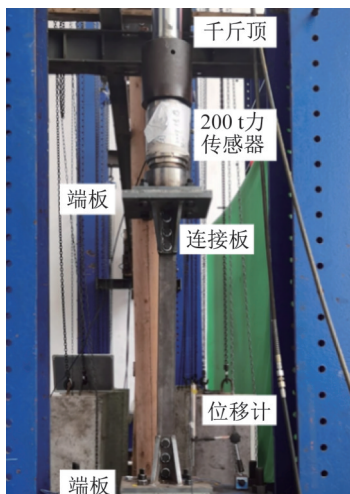


图3 加载装置

Fig. 3 Loading setup

两端受力均匀,在试件两端设置了两块端板,并与试验机相连。端板的上下表面均经过铣平处理,以保证传力平顺。上部端板与200 t力传感器相连,力传感器再与液压千斤顶连接。

为了实现角钢与试验机的相连,选用两块连接板,通过螺栓将其与角钢连接,同时将连接板焊接于端板上。上下两块端板及连接板的尺寸和形状完全一致。为了防止拉力过大导致连接板过早屈服,采用加劲肋对连接板进行了加强。

1.4 测点布置及加载制度

为测量试件在加载过程中的竖向变形,在与角钢平行的垂直平面内布置了1个拉线式位移计,位移计绳子末端与试验机上部相连,如图4a)所示。分别在试件的两端和中间关键位置布置应变片,以获得试验中角钢的变形特征。应变片布置位置如图4b)、c)(分别用E、M表示应变片,E代表应变片布置在中上部;M表示应变片布置在中部)所示,两端和中间位置处分别布置了4个应变片,共计12个应变片。

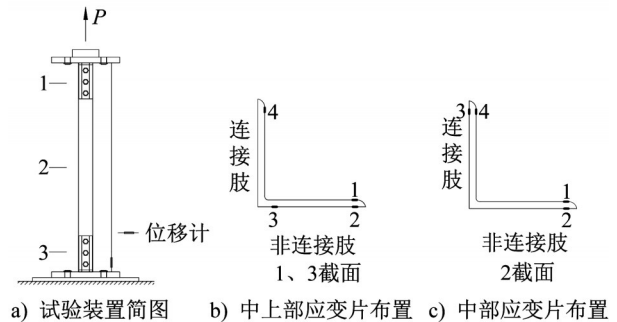


图4 位移计和应变片布置

Fig. 4 Arrangement of displacement meters and strain gauges

试件安装时,采用激光水准仪进行几何对中操作,确保试件竖直摆放。本试验采用液压千斤顶对试件进行加载,以力控制的方式分级施加荷载,且整个试验保持匀速加载,尽可能保证角钢受力均匀,从而获得平滑的试验结果曲线。加载分为两个阶段:在第一阶段,当施加的荷载不超过按《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)(以下简称《规程》)计算的理论承载力80%时,按 $2 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加载速度施加;在第二阶段,当施加的荷载大于理论计算承载力的80%时,按 $1 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加载速度施加,直至试件破坏。试验过程中的力、位移和应变数据通过DH3816N静态应变仪进行实时采集。

2 试验结果与分析

2.1 试件的破坏模式

试验结束后,每组试验的3根试件的最终破坏模式

基本相同,如图 5a)所示。从图 5b)中可以观察到,所有试件均在端部的第 3 个螺栓孔处发生断裂,这是由于螺栓孔处角钢的净截面面积减小,而拉力仍较大,且连接板和端部局部存在腐蚀会引起应力集中,使得此处的应力显著高于其他部分的应力,导致角钢首先在此处发生断裂。

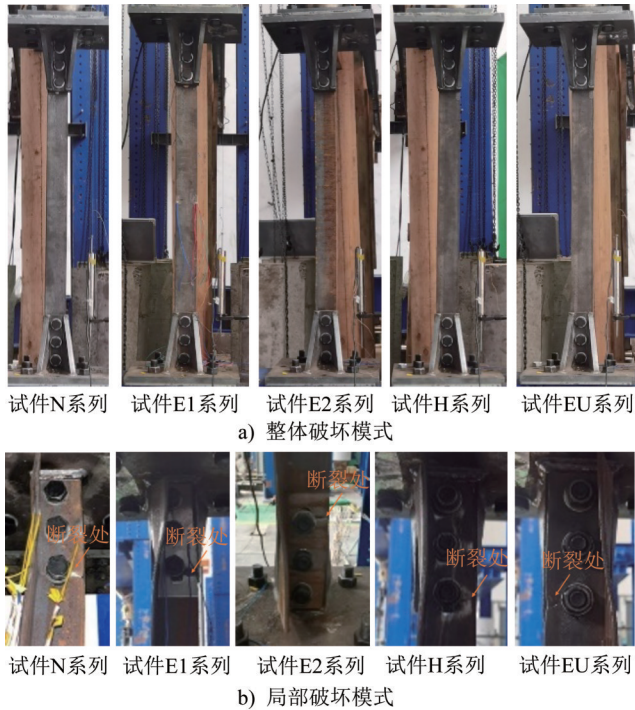


图 5 试件破坏模式

Fig. 5 Failure modes of specimens

2.2 极限承载力对比

表 4 中给出了等边角钢抗拉极限承载力的试验值与设计值的对比结果。其中,设计值 N 可根据《规程》按式(1)计算得到。

$$\frac{N}{A_n} \leq \frac{\eta f_u}{1.25 \gamma_R} \quad (1)$$

式中: N 为轴心拉力设计值; A_n 为试件净截面面积,按式(2)计算; f_u 为钢材的抗拉强度最小值; γ_R 为钢材的抗力分项系数,Q355 钢材取 1.15; η 为试件强度折减系数,对于单肢连接的角钢构件(两颗及以上螺栓连接),取 0.70。

对于直线型断裂面试件的净截面面积,可按式(2)计算。

$$A_n = A - n_0 d_0 t \quad (2)$$

式中: d_0 为螺孔直径; n_0 为破坏面上的螺孔个数; t 为角钢肢厚。

角钢试件的抗拉极限承载力试验值大于其抗拉极限承载力计算值,试验值与设计值的平均比值为 1.42,变异系数为 4.1%。由此可见,《规程》建议的设计方法能够较

表 4 受拉试件试验值与计算值对比

Table 3 Comparison between experimental and calculated results of tensile specimens

编号	极限承载力试验值 P	极限承载力平均值	设计值 N	试验值/设计值
N-1	281.0			
N-2	282.7	283.3	203.3	1.39
N-3	286.2			
H23.5-1	280.1			
H23.5-2	276.0	278.1	200.0	1.39
H23.5-3	278.3			
H27.5-1	271.4			
H27.5-2	283.5	275.8	193.5	1.43
H27.5-3	272.4			
E1-1	274.1			
E1-2	289.0	278.6	190.4	1.46
E1-3	272.8			
E2-1	243.5			
E2-2	228.6	234.8	177.6	1.32
E2-3	232.2			
EU1-1	280.4			
EU1-2	287.0	284.8	190.4	1.50
EU1-3	286.9			
EO2-1	250.6			
EO2-2	228.6	255.2	177.6	1.44
EO2-3	286.4			

为保守地计算局部腐蚀后角钢的抗拉极限承载力。

2.3 荷载-竖向位移曲线

将每个试验组试件所测得的荷载和位移进行均值处理,并绘制无损试件的荷载-竖向位移曲线如图 6 所示。从图中可以看出,开始加载后,曲线近似呈直线上升,试件处于弹性阶段;当累计施加荷载达到 227.0 kN 时,荷载增长速率逐渐减缓,竖向位移增加较快,试件进入弹塑性阶段;当施加的荷载达到 283.3 kN 时,试件在端部第 3 个螺栓孔处发生断裂,此时竖向位移为 18.6 mm,同组 3 根试件的荷载-竖向位移曲线变化趋势基本一致。图 7 和图 8 分别为螺栓孔腐蚀和端部局部腐蚀试件的荷载-竖向位移曲线。从图中可以看出,腐蚀角钢和无损角钢的荷载-竖向位移曲线变化趋势相近。

如图 9 所示,螺栓孔腐蚀角钢的极限荷载-螺栓孔直径关系曲线表明,螺栓孔腐蚀对单肢连接角钢抗拉性能的影响较小。螺栓孔直径为 21.5 mm 无损试件的抗

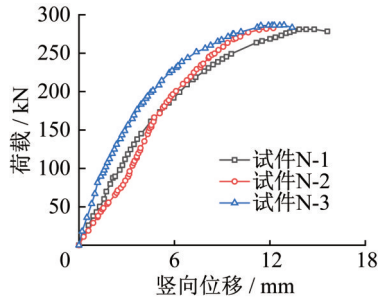


图6 无损试件荷载-竖向位移曲线

Fig. 6 Load-vertical displacement curves of non-destructive specimens

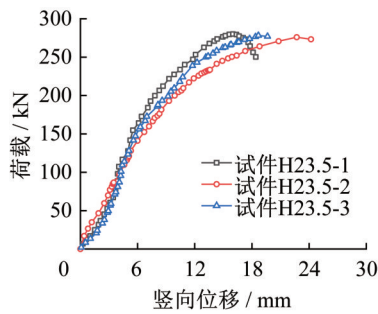


图7 试件H23.5系列荷载-竖向位移曲线

Fig. 7 Load-vertical displacement curves of specimen H23.5 series

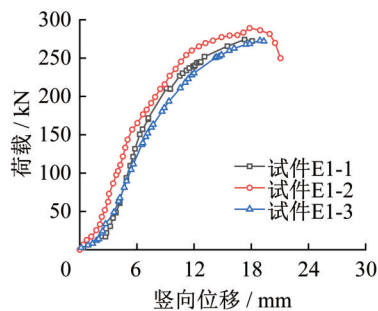


图8 试件E1系列荷载-竖向位移曲线

Fig. 8 Load-vertical displacement curves of specimen E1 series

拉极限承载力为 283.3 kN, 而螺栓孔直径为 27.5 mm 角钢的极限承载力为 275.8 kN, 与无损试件相比, 仅降低了 2.6%。因此, 当螺栓孔直径由 21.5 mm 增加至 27.5 mm 时, 螺栓孔腐蚀对试件抗拉极限承载力的影响可忽略不计。

如图 10 所示, 从端部腐蚀角钢的极限荷载-腐蚀深度曲线可以看出, 当连接肢局部腐蚀深度为 2 mm 时, 试件的极限承载力为 234.8 kN, 比无损试件的极限承载力降低了 17.1%; 当非连接肢局部腐蚀深度为 2 mm 时, 试件的极限承载力为 255.2 kN, 较无损试件降低了 9.9%。因此, 在其他变量相同的情况下, 试件的抗拉极限承载力

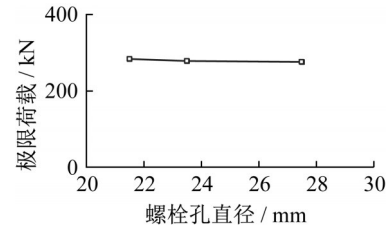


图9 角钢极限荷载-螺栓孔直径曲线

Fig. 9 Ultimate load-hole diameter curve of steel angle

随端部局部腐蚀深度的增加呈降低趋势。此外, 局部腐蚀位于非连接肢试件的极限承载力整体大于局部腐蚀位于连接肢试件的极限承载力, 且随着局部腐蚀深度的增加, 二者的极限承载力差距越大。当腐蚀深度为 1 mm 时, 二者仅相差 2.2%, 而当腐蚀深度为 2 mm 时, 二者相差 8.0%。

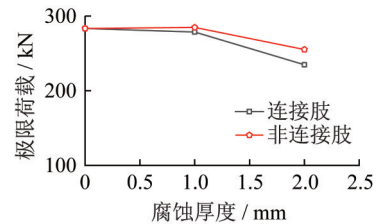


图10 角钢极限荷载-腐蚀深度曲线

Fig. 10 Ultimate load-corrosion depth curves of steel angle

2.4 荷载-应变曲线

将每个试件组所测的荷载和应变进行均值处理, 并绘制如图 11~13 所示的无损、螺栓孔腐蚀和端部局部腐蚀部分试件的荷载-应变曲线。从图中可以看出, 不同腐蚀类型的角钢在同一位置的总体应变发展规律相似, 角钢在受拉过程中上部(E1-E4)和中间位置(M1-M4)处的应变有着不同的发展趋势。由于 E1 和 E2 位于靠近加载点的非连接肢上, 从开始加载到加载结束一直表现为压应变; 而 M1 和 M2 位于远离加载点的非连接肢上, 这两处的应变在开始加载时表现为压应变, 但随着荷载的增大逐渐变为拉应变。这表明, 单肢连接的等边角钢在承受较小拉力时, 由于荷载偏心产生的弯矩效应显著, 导致部分截面处于受压状态; 而随着荷载的增大, 轴向拉力开始起主导作用, 角钢全截面开始承受拉力的作用, 但连接肢的拉应变数值较非连接肢的拉应变数值大。

如图 11a)、12a) 和 13a) 所示, 随着施加荷载的增加, 上部角钢的应变也不断增加, 处于连接肢的 E3 和靠近连接肢的 E4 其应变始终表现为拉应变。由于远离加载点, E1 和 E2 在施荷初期的应变较小, 但在接近极限荷载时, 二者的变化趋势相反, 通过观察破坏模态可知此处发生了较小的扭转变形。在图 11b)、12b) 和 13b) 中可以看

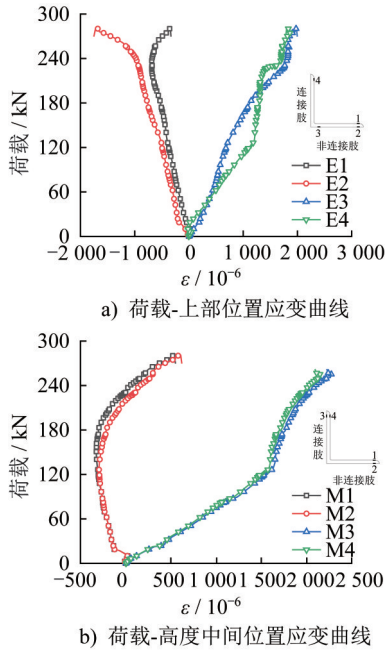


图 11 角钢 N-1 荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of steel angle N-1

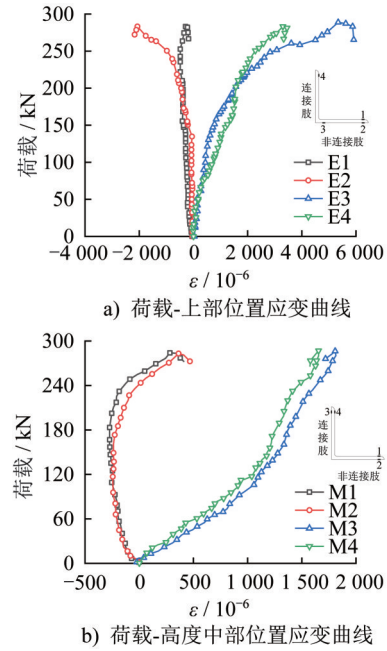


图 13 角钢 E1-2 荷载-应变曲线

Fig. 13 Load-strain curves of steel angle E1-2

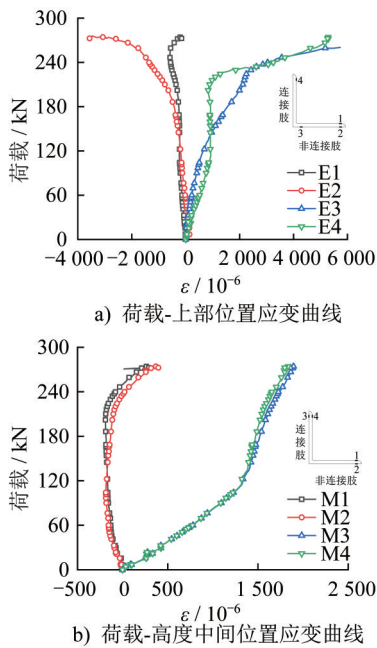


图 12 角钢 H27.5-1 荷载-应变曲线

Fig. 12 Load-strain curves of steel angle H27.5-1

出,当施加的荷载即将达到试件的极限荷载时,M1和M2的应变逐渐从压应变转变为拉应变,而M3和M4的拉应变仍随着施加荷载的增加而增加。

通过观察试件的荷载-应变曲线发现,在不同的腐蚀类型下,E4和M3、M4几乎在相同的荷载水平处出现拐点,如试件N-1为126 kN,试件H27.5-1为119 kN,试件E1-2为163 kN。在出现拐点后,各试件中部非连接肢的M1和M2压应变增长呈变缓趋势,并逐渐转变为拉

应变。

这一现象可以由角钢的受拉特性来解释:角钢单肢受拉时,拉力作用线与截面形心轴不重合,拉力偏心会使试件产生弯曲变形,尤其是在试件的中间处。在加载初期,拉力较小,而荷载偏心引起的弯矩较大,导致非连接肢产生压应变。随着拉力逐渐增大,试件高度中部的弯矩增加缓慢,弯矩引起的压应变逐渐被拉力引起的拉应变所补偿,M1和M2测得的总压应变增长缓慢甚至逐渐减小,同时截面上M3和M4测得的拉应变增量主要是由拉力引起的,这也导致了连接肢拉应变增长缓慢,最终在荷载-应变曲线上呈现出明显的拐点。

3 承载力分析

根据试验所得数据,考虑腐蚀参数对试件抗拉极限承载力的影响,通过线性拟合的方法,提出了角钢在腐蚀情况下抗拉极限承载力的计算方法。具体步骤如下:

(1) 关键参数的确定:试验结果表明,腐蚀率是影响试验试件抗拉极限承载力的关键参数。陈梦成等^[14]对模拟酸雨腐蚀后的钢材开展了单向拉伸试验,得到了不同腐蚀类型下钢材的力学性能指标,并根据试验结果提出了腐蚀前后钢材力学指标的关系式。

本文提出的计算方法采用与文献[14]类似的形式,见式(3)。

$$P = (1 - R\eta_s)P_0 \quad (3)$$

式中: P 为腐蚀后试件的极限承载力; R 为厚度折减系数; P_0 为无损试件极限承载力。

(2) 腐蚀率 η_s 的计算:陈梦成等^[14]在文章中提到,钢

材体积的变化可换算为钢材厚度的变化。依据重量的物理意义,可用角钢截面厚度减少量来表示腐蚀率。王雪飞^[12]认为钢构件腐蚀可以看作是对构件厚度的折减,可直接采用厚度折减的方法对腐蚀后角钢的剩余承载力进行评估计算,该方法将局部腐蚀构件转化为均匀腐蚀构件进行承载力计算,如图14所示。因此,端部局部腐蚀试件的腐蚀率可由式(4)~(6)计算。孔状腐蚀的腐蚀率可由式(7)计算。

$$\eta_s = \frac{x_z}{t} \quad (4)$$

$$x_z = \frac{(1 - D_V) \times (2Bt - t^2) + t^2 - 2Bt}{2t - 4B} \quad (5)$$

$$D_V = \frac{\text{腐蚀体积}}{\text{总体积}} \quad (6)$$

$$\eta_s = \frac{D - D_0}{D_0} \quad (7)$$

式中: x_z 为角钢折减厚度; B 为角钢肢宽; t 为角钢肢厚; D_V 为腐蚀损伤体积率; D 为螺栓孔直径; D_0 为无损试件的螺栓孔直径,本试验中取21.5 mm。

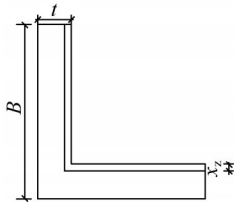


图14 角钢厚度折减示意图

Fig. 14 Equivalent reduction in steel angle thickness

(3) 根据试验结果计算厚度折减系数 R :通过观察不同腐蚀类型试件的极限承载力发现,试件的极限承载力随腐蚀率的增加呈下降趋势,试验数据基本上保持在线性范围内,因此可以通过线性拟合的方法得出各个腐蚀类型下试件的厚度折减系数 R 。具体方法为:构建函数 $Y = (1 - RX)P_0$,其中因变量 Y 为试验极限承载力,自变量 X 为腐蚀率, P_0 为无损角钢极限承载力。将试验数据代入构建的函数中进行线性拟合,得出 R 值。

螺栓孔腐蚀试件的抗拉极限承载力可采用式(9)计算。其中, η_s 可由式(7)计算得到。

$$P = (1 - 0.10514\eta_s)P_0 \quad (8)$$

端部局部腐蚀试件的抗拉极限承载力可采用式(9)或式(10)计算。其中, η_s 可由式(4)~(6)计算得到。

$$\text{连接肢内侧: } P = (1 - 5.357965\eta_s)P_0 \quad (9)$$

$$\text{非连接肢: } P = (1 - 2.88181\eta_s)P_0 \quad (10)$$

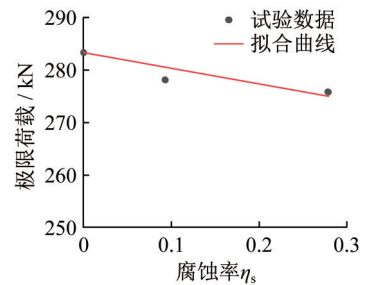
需要说明的是,本文推导的计算公式仅适用于具有螺栓孔腐蚀和端部局部腐蚀的角钢。若局部腐蚀位于

角钢中部,则需要更多的试验数据来验证计算公式。

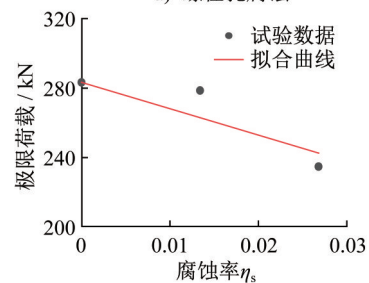
将每组试件计算得到的腐蚀率和极限荷载进行均值处理,并绘制如图15所示的不同腐蚀类型下角钢的试验数据与相应公式计算结果的对比曲线。3条拟合曲线的 R^2 值分别为0.78、0.79和0.65。结果表明,对于存在螺栓孔腐蚀和连接肢内侧端部局部腐蚀的角钢,曲线拟合效果较好, R^2 值分别为0.78和0.79,说明这些模型能够解释78%和79%的数据变异,具有较高的预测精度,适用于实际工程分析和应用。而对于非连接肢端部局部腐蚀的角钢, R^2 值为0.65,表明该模型能解释65%的数据变异,对实际过程分析也具有一定的参考价值。

通过对比发现,螺栓孔腐蚀角钢、连接肢内侧端部局部腐蚀角钢、非连接肢端部局部腐蚀角钢的抗拉极限承载力试验值与计算值的平均比值分别为1.00、1.01和1.01。

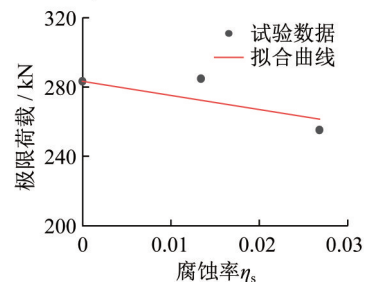
这一结果表明,局部腐蚀后单肢连接等边角钢的抗拉极限承载力的试验结果与计算结果基本一致,本文所提出的计算方法能够较为准确地预测其抗拉承载力。



a) 螺栓孔腐蚀



b) 连接肢内侧端部局部腐蚀



c) 非连接肢端部局部腐蚀

图15 角钢腐蚀率-极限荷载拟合曲线

Fig. 15 Fitting curve of corrosion rate-ultimate load of steel angle

4 结论

本文主要针对局部腐蚀后单肢连接Q355等边角钢的抗拉性能开展了试验研究。基于试验结果,分析对比了不同腐蚀类型对角钢抗拉性能的影响规律,提出了角钢在局部腐蚀后的抗拉极限承载力计算方法,并通过与试验结果的对比,验证了该计算方法的准确性。本文的主要结论如下:

(1) 不同腐蚀类型不影响角钢的受拉破坏模式。无论是否被腐蚀,角钢均在端部的第3个螺栓孔处发生断裂。

(2) 孔状腐蚀对角钢的抗拉承载力影响不大。当螺栓孔直径从21.5 mm增加至27.5 mm时,角钢的承载力仅降低了2.6%。

(3) 端部局部腐蚀深度的增加会导致试件抗拉极限承载力显著降低。其中,连接肢内侧端部局部腐蚀角钢的抗拉极限承载力较无损角钢的抗拉极限承载力下降最多,在腐蚀深度为2 mm时,降低幅度高达17.1%。此外,连接肢上端部局部腐蚀对角钢抗拉极限承载力的影响比非连接肢上端部局部腐蚀对角钢抗拉极限承载力的影响更大,且随着局部腐蚀深度的增加,二者的抗拉极限承载力差距也增大。当端部局部腐蚀深度从1 mm增加至2 mm时,二者的抗拉极限承载力差距从2.2%增加至8.8%。

(4) 根据试验结果,提出了计算角钢螺栓孔腐蚀和端部局部腐蚀剩余抗拉极限承载力的拟合公式,该公式能够较为准确地估算腐蚀后角钢的抗拉极限承载力。

参考文献:

- [1] 黄耀,苏志钢,朱彬荣,等. 腐蚀对架空输电线路铁塔承载力特性影响[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(5): 723-731. DOI:10.13264/j.cnki.ysjksx.2024.05.012.
HUANG Yao, SU Zhigang, ZHU Binrong, et al. Influence of corrosion on bearing capacity characteristics of overhead transmission line tower [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15(5): 723-731. DOI: 10.13264/j.cnki.ysjksx.2024.05.012. (in Chinese)
- [2] 何长华. 输电线路铁塔用钢的发展趋势[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 45-48. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2010.01.012.
HE Changhua. Development trend of steel used for transmission towers [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2010.01.012. (in Chinese)
- [3] 叶继红,申会谦,薛素铎. 点蚀孔腐蚀钢构件力学性能劣化简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 70-75. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.009.
YE Jihong, SHEN Huiqian, XUE Suduo. Simplified analytical method of mechanical property degradation for steel members with pitting corrosion [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 70-75. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.009. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局

- 局. 工业建筑防腐蚀设计标准: GB/T 50046—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Anticorrosion Design of Industrial Constructions: GB/T 50046—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑防腐蚀工程施工规范: GB 50212—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Construction of Building Anticorrosive Engineering: GB 50212—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑防腐蚀工程施工质量验收标准: GB/T 50224—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Acceptance of Construction Quality of Anticorrosive Engineering of Buildings: GB/T 50224—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [7] SARVESWARAN V, SMITH J W, BLOCKLEY D I. Reliability of corrosion-damaged steel structures using interval probability theory [J]. Structural Safety, 1998, 20(3): 237-255. DOI:10.1016/S0167-4730(98)00009-5.
- [8] CHEN B, XU Y L, QU W L. Evaluation of atmospheric corrosion damage to steel space structures in coastal areas [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(16-17): 4673-4694. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2005.02.004.
- [9] BEAULIEU L V, LEGERON F, LANGLOIS S. Compression strength of corroded steel angle members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(11): 1366-1373. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.05.006.
- [10] 张春涛, 范文亮, 李正良. 腐蚀环境中Q345等边角钢构件拟静力试验研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(11): 53-62. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0505.
ZHANG Chuntao, FAN Wenliang, LI Zhengliang. Quasi-static test of Q345 equal-angles in corrosion environment [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(11): 53-62. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0505. (in Chinese)
- [11] 高超, 刘建军, 郑逸川, 等. 锈蚀对输电塔角钢力学性能的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(8): 32-38. DOI:10.11973/fsyfh-202008007.
GAO Chao, LIU Jianjun, ZHENG Yichuan, et al. Effects of corrosion on mechanical properties of transmission tower angle steel [J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(8): 32-38. DOI:10.11973/fsyfh-202008007. (in Chinese)