

腐蚀后自攻螺钉连接件力学性能研究

高鹏^{1,2,3}, 吴曼¹, 陈明^{1,2,3,*}

1. 内蒙古科技大学, 土木工程学院, 内蒙古, 包头, 014010;

2. 内蒙古科技大学, 内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室, 内蒙古, 包头, 014010

3. 内蒙古科技大学, 内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心, 内蒙古, 包头, 014010

摘要: 本文研究腐蚀对自攻螺钉连接件强度退化的影响。模拟海洋大气环境, 进行自攻螺钉连接件腐蚀试验, 探究螺钉直径、螺钉数量和钢板厚度对连接件在腐蚀周期下的力学性能。研究表明, 单颗螺钉连接件强度退化主要因素为腐蚀程度, 两颗螺钉连接件强度退化主要因素为板材厚度, 四颗螺钉连接件强度退化主要影响因素为螺钉直径。其中, 四颗螺钉连接件腐蚀后的力学性能最优, 采用最大直径尺寸螺钉, 其腐蚀后增益作用明显, 建议优先考虑应用。

关键词: 薄壁型钢; 螺钉连接; 盐雾腐蚀; 力学性能

Study of mechanical properties of self-tapping screw joints after corrosion

GAO Peng^{1,2,3}, WU Man¹, CHEN Ming^{1,2,3,*}

1. Inner Mongolia University of Science and Technology, College of Civil Engineering, Inner Mongolia, Baotou, 014010, China

2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability in Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia, Baotou, 014010, China

3. Inner Mongolia University of Science and Technology, Engineering Technology Research Centre for Disaster Prevention and Mitigation of Building Structures in Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia, Baotou, 014010, China

Abstract: This paper investigates the impact of corrosion on the strength degradation of self-tapping screw connections. Corrosion tests on self-tapping screw connections were conducted in a simulated marine atmospheric environment to explore the mechanical properties of screw diameter, number of screws, and plate thickness on the connections under corrosion cycles. The research findings demonstrate that the primary factor contributing to strength degradation of single screw connections is the corrosion degree, while for two screw connections, it is the thickness of the plate, and for four screw connections, it is the screw diameter. Notably, four screw connections exhibit optimal mechanical properties after corrosion, with the use of the largest diameter size screw resulting in a significant gain effect, thus recommending its prioritized application.

Keywords: Thin-walled steel sections; Screw connections; Salt spray corrosion; Mechanical properties

冷弯薄壁型钢具备诸多优点, 自重轻、强度高以及抗震性能良好等, 因而在住宅、商业建筑和工业厂房中应用广泛^[1]。自攻螺钉连接作为冷弯薄壁型钢常用的连接方式, 受腐蚀影响较大, 特别是在海洋大气环境中, 会严重影响连接件的安全性与耐久性。根据 2016 年全球腐蚀调查报告可知, 世界平均腐蚀损失约占全球国民生产总值 (GNP) 的 3.4%^[2]。相较于普通热轧钢, 冷弯薄壁型钢厚度较小, 腐蚀导致的力学性能退化更为严重, 因此腐蚀后自攻螺钉连接件力学性能退化需引起重视。

目前, 国内外学术工作者^[3-5]对腐蚀后钢板的力学性能进行试验研究。为了在可接受的加工时间内获得腐蚀钢板, 提出加速腐蚀法和人工机械法^[6,7], 代替自然腐蚀。Roy K^[8]等研究了冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接件的抗剪性能。Yan 和 Yang^[9]研究了高温条件下自攻螺钉连接件的承载能力。韩

威^[10]研究了不同尺寸冷弯薄壁钢在自攻螺钉连接下的力学性能。周明^[11]研究了自攻螺钉厚板连接件的力学性能。Abhishek R 和 Jeom K P^[12]研究了腐蚀对钢结构化学和机械性能的影响。Zhang^[13]研究了腐蚀对 C 型薄壁钢力学性能的影响。如上所述,以往对冷成型钢连接件受腐蚀因素影响的研究较少,而海洋气候环境下该类连接件应用时受到的腐蚀因素不可忽视。因此本文研究腐蚀后自攻螺钉连接件强度退化规律具有重要工程实用价值。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验所采用的钢材型号为 Q355B (钢材成分见表 1), 连接方式为自攻螺钉连接, 其样式如图 1 所示。参照美国 AISI TS4-02^[14]规范, 设计冷弯薄壁钢板尺寸: 直径 300mm, 宽度 45mm, 厚度 2mm、3mm; 自攻螺钉尺寸: 5.5 × 32 mm 和 6.3 × 32 mm。自攻螺钉连接件边距和端距设计满足规范 GB 50018-2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[15]: 间距和端距不小于连接件直径的三倍, 边距不小于连接件直径的 1.5 倍。

螺钉数量是影响自攻螺钉连接件承载力退化的主要因素, 钢板厚度与螺钉直径会对冷成型钢连接件强度退化产生显著影响。因此以螺钉数量、钢板厚度、螺钉直径为参数, 研究自攻螺钉连接件腐蚀后的力学性能。试验共设计 168 个连接件, 编号如表 2 所示。

表 1 Q355B 钢材的化学成分 (质量分数, %)

Tab.1 Chemical composition (wt%) of Q355B steel

C	Si	Mn	P	S	Ti	Als
0.16	0.04	0.47	0.013	0.004	0.046	0.032

表 2 连接件编号

Tab.2 Connections of Number

试件编号	螺钉数量	板材厚度	螺钉直径	试件数量
Q355-s1-t2-d5.5	1	2	5.5	14
Q355-s2-t2-d5.5	2	2	5.5	14
Q355-s4-t2-d5.5	4	2	5.5	14
Q355-s1-t3-d5.5	1	3	5.5	14
Q355-s2-t3-d5.5	2	3	5.5	14
Q355-s4-t3-d5.5	4	3	5.5	14
Q355-s1-t2-d6.3	1	2	6.3	14
Q355-s2-t2-d6.3	2	2	6.3	14
Q355-s4-t2-d6.3	4	2	6.3	14
Q355-s1-t3-d6.3	1	3	6.3	14
Q355-s2-t3-d6.3	2	3	6.3	14
Q355-s4-t3-d6.3	4	3	6.3	14

注: “Q355”表示试验钢材型号 Q355B; “s”表示螺钉数量; “t”表示板材厚度; “d”表示螺钉直径。“Q355-s1-t2-d5.5”表示钢材为 Q355B, 螺钉数量为 1, 板材厚度 2mm, 螺钉直径 5.5mm 的螺栓连接件。

Note: "Q355" represents the test steel grade Q355B; "s" indicates the number of screws; "t" represents the thickness of the plate; "d" indicates the diameter of the screw. "Q355-s1-t2-d5.5" indicates a bolted connection component with steel grade Q355B, one screw, a plate thickness of 2mm, and a screw diameter of 5.5mm.

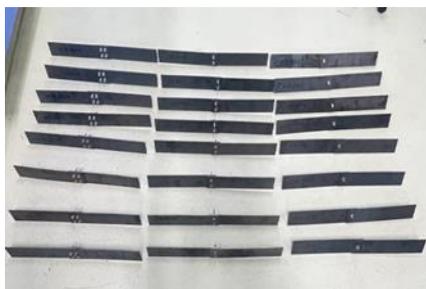


图 1 自攻螺钉连接件

Fig.1 CFS self-drilling screw connections

1.2 盐雾试验

在自然环境中，腐蚀是一个受多种因素长期交互作用而缓慢积累的过程。铜加速乙酸盐雾试验（CASS 试验）模拟的腐蚀环境虽与自然腐蚀环境存在些许差异，但可在较短时间内评估构件的耐腐蚀性。盐雾试验中使用的腐蚀溶液需参照标准《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》（GB/T 10125 - 2012）^[16]进行配制，其中氯化钠溶液浓度为 50g/L，氯化铜浓度为 $0.26\text{g/L} \pm 0.02\text{g/L}$ 。为确保盐雾箱内收集液的 PH 值保持在 3.0 至 3.3 之间，还需适当添加冰乙酸。

加速腐蚀试验在盐雾箱（见图 2）内进行，盐雾箱型号为 GP/SP-120D。试验箱各项技术指标均符合《人工气氛腐蚀试验盐雾试验》（GB/T 10125-2012）中相关规定：盐雾箱内环境温度控制在 $50\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ，进气压力控制在 0.3MPa~0.6MPa 之间；出气压力控制在 0.07MPa ~ 0.17MPa 之间。盐雾试验共设置 6 个腐蚀周期，分别为 84 h、168 h、252 h、336 h、420 h 和 504 h，每个腐蚀周期的平行试件数量为 2 个。试验过程中要定期检查和保养设备，对溶液进行及时补充。

完成腐蚀工作后，遵循规范《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》^[17]（GB/T 16545 - 2015）进行除锈工作。除锈时，先用铜刷在清水中对试件表面进行反复擦拭，将锈蚀后附着不牢或松动的腐蚀产物清除干净，再将试件浸泡于质量分数为 20% 分析纯级别的柠檬酸氢二铵水溶液中处理较为牢固的腐蚀产物，最后将试样用清水与乙醇冲净，晾干。



图 2 盐雾试验箱

Fig.2 Salt spray test chamber

1.3 连接件抗剪试验

试验选用钢研纳克生产的 GNT1000Y 万能试验机（见图 3）作为抗剪加载设备。加载方案依据美国 AISI TS4-02^[14]规范，采用位移控制方式，加载速度为 0.5 mm/min 匀速加载。由计算机控制加载速度，电子引伸计测量试件滑移位移量。试验采用匀速加载方式，持续加载直至构件发生破坏，加载过程中产生的所有试验数据，由计算机按照预设程序自动完成采集与记录。构件破坏后，拆除

电子引伸计，由位移数据换算得到试件的变形数据，并绘制出荷载-位移曲线。



图3 加载装置
Fig.3 Test Setup

2 试验研究

2.1 盐雾腐蚀试验现象

以单颗螺钉连接件为例，展示不同腐蚀周期后连接件的表面形貌。随着腐蚀程度增加，连接件表面颜色逐渐从橙红色变为黑褐色，随着腐蚀时间增加，出现鼓包并且鼓起的面积逐渐扩大，最后锈层脱落，如图4所示。除锈后会留下分布不均匀、大小不一的锈蚀坑。



(a) 84h



(b) 168h



(c) 252h



(d) 336h



(e) 420h



(f) 504h

图 4 各腐蚀周期下连接件表面特征

Fig.4 Surface characteristics of the connecting parts under each corrosion cycle

2.2 连接件抗剪试验现象

2.2.1 螺钉纯剪切破坏

纯剪切破坏出现在单颗螺钉、两颗螺钉及四颗螺钉的连接件中。该种破坏方式在发生前无明显预兆，与脆性破坏特征一致。具体破坏现象是：锈蚀钢板中螺孔未发生变形，螺钉未拔出，构件沿剪切面剪断。破坏模式的正面如图 5 所示。



图 5 剪切破坏

Fig.5 Screw shear

2.2.2 孔壁承压同时螺钉被剪断破坏

孔壁承压同时螺钉被剪断出现在两颗螺钉和四颗螺钉的连接件中。这种破坏方式在发生前有明显预兆，与塑性破坏特征一致。具体破坏现象是：钢板端部翘起，螺钉倾斜，孔壁承受压力增大，螺钉剪断。破坏模式的正面如图 6 所示。



图 6 孔壁承压同时螺钉被剪断破坏

Fig.6 Bearing of the joined materials

2.2.3 板件净截面破坏

板件净截面破坏出现在板厚 2mm 且螺钉直径为 6.3mm 的连接件。这种破坏方式与塑性破坏特征一致。具体破坏现象是：螺钉倾斜，位于远离端部的螺钉处钢板逐渐紧缩，沿螺孔发生断裂。破坏模式的正面如图 7 所示。

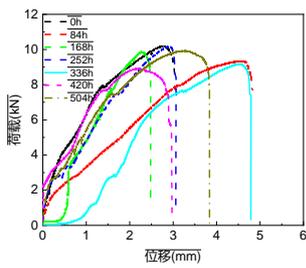


图 7 板件净截面破坏
Fig.7 Net section tension

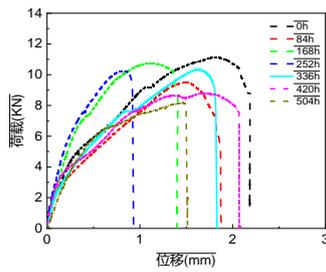
3 试验结果及分析

3.1 荷载-位移曲线

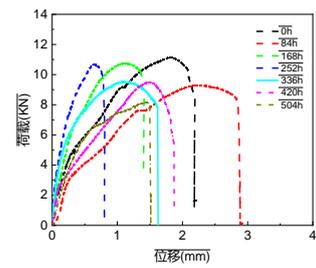
不同螺钉连接件荷载-位移曲线如图 8 所示。其中图 (a)~图 (d) 为单颗螺钉连接件，均存在螺钉剪切破坏情况（见图 5）。这类破坏模式中荷载-位移曲线表现为：当荷载达到最大时，曲线骤降，此时螺钉在受剪位置发生剪断破坏。对比图 (b) 与图 (d) 可知，螺钉直径增大，连接件耐腐蚀程度提高，位移也更大。这是由于连接件在缝隙处发生腐蚀，由此产生的摩擦力抵消一部分承载力所致。



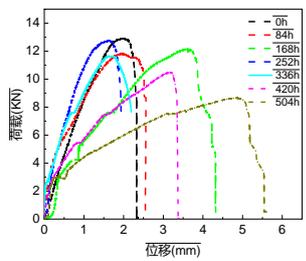
(a) Q355-s1-t2-d5.5



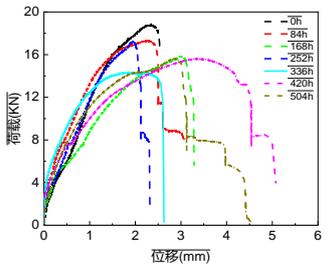
(b) Q355-s1-t3-d5.5



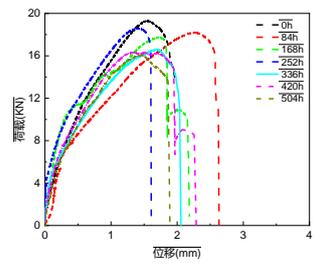
(c) Q355-s1-t2-d6.3



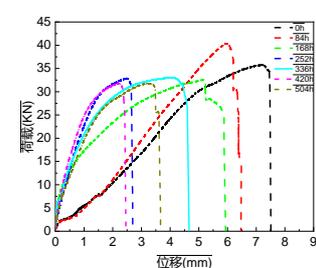
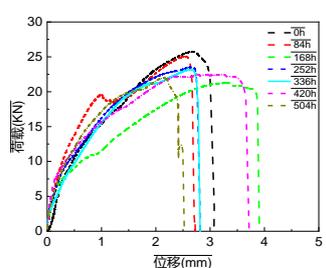
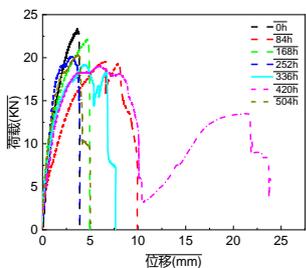
(d) Q355-s1-t3-d6.3



(e) Q355-s2-t2-d5.5



(f) Q355-s2-t3-d5.5



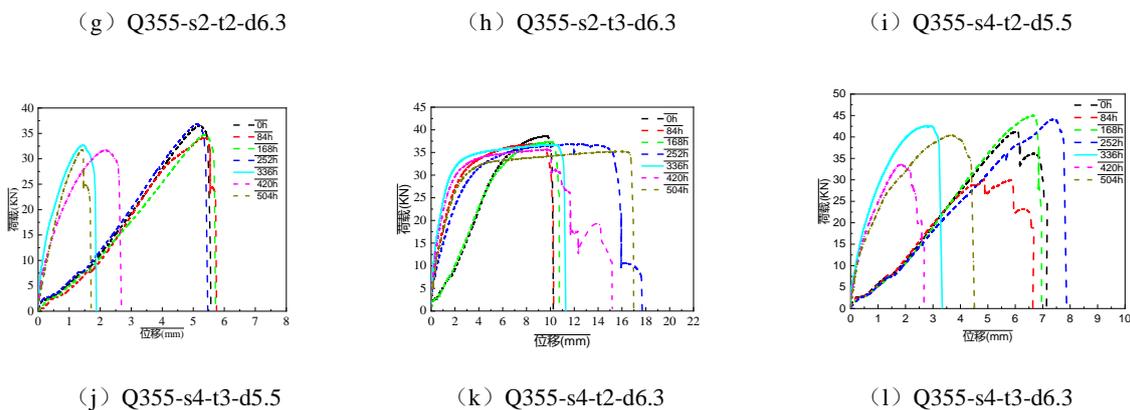


图 8 试件荷载-位移曲线
Fig.8 Tests load-deformation curves

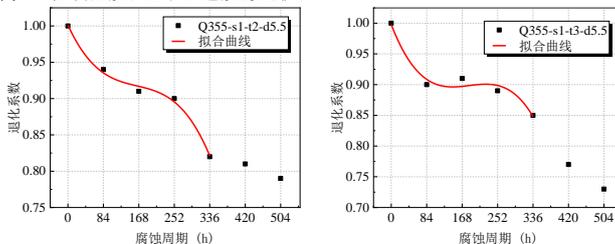
两颗螺钉连接件如图 (e) ~ (h) 所示。其中连接件 (e)、(f)、(h) 中，螺钉发生剪切破坏，连接件 (g) 中的螺钉发生孔壁承压破坏 (见图 6)。从图中可以观察到，曲线前期较为平滑，达到最大承载力时，位移的增加对承载力影响较小，曲线后期发生波形跳跃，每次波形跳跃均代表螺纹发生断裂，直至连接件破坏。与单颗螺钉相比，两颗螺钉连接件腐蚀后的位移更大，这是由于孔壁发生了变形。

四颗螺钉连接件如图 (i) ~ (l) 所示。其中连接件 (i)、(j)、(l) 中，螺钉发生剪切破坏，曲线较为平滑，在达到最大承载力之后位移增大较快，荷载增加缓慢，当荷载达到最大承载力后突然下降，下降后的每次波段表示一颗螺钉剪断。连接件 (k) 发生板件净截面破坏 (见图 7)，曲线有明显屈服阶段，表明钢板发生屈服后板件才发生断裂。

3.2 单颗螺钉连接件腐蚀后极限强度退化模型

图 9 展示了单颗螺钉连接件在腐蚀龄期内的强度退化系数变化规律。由图 9 (a) 可知，腐蚀龄期在 336 h，连接件出现强度劣化特征值，继续腐蚀至 504h，强度降低 21%。图 9 (b) 中，腐蚀龄期在 84 h 和 420 h，连接件强度骤降，形成两个劣化特征值，继续腐蚀至 504 h，强度下降 27%。对比图 9 (a) 与图 9 (b) 可以发现，强度劣化特征值的出现时间会随着钢板厚度的增加而提前。连接件中钢板越厚，强度退化越快。

图 9 (c) 在 168 h 出现强度劣化特征值，在 252 h，摩擦力对连接件产生增益效果，继续腐蚀，摩擦力抵消，连接件强度又出现衰退现象，到 504 h，强度下降 14%。鉴于此，在退化模型分析中，摩擦力对连接件的影响可不予以考虑。将图 9 (a) 与图 9 (c) 对比可知，螺钉直径增大，可延缓腐蚀后连接件承载力的衰退，螺钉直径较小，会加快连接件强度退化速度。图 9 (d) 在 420 h 强度退化突降，腐蚀至 504 h，连接件强度下降 30%。将图 9 (b) 与图 9 (d) 对比后发现，板厚为 3mm 且直径较大的连接件，其强度退化速度更快。



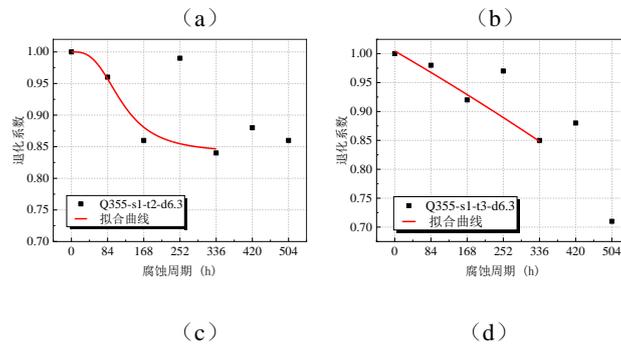


图 9 单颗螺钉连接件强度劣化模型

Fig.9 Strength degradation model for single screw joints

综合图 9 研究结果可知, 336 h 是单颗螺钉连接件的强度劣化特征值, 336 h 后腐蚀产生的摩擦力对承载力退化影响较大, 板材厚度、螺钉直径对承载力退化的影响较小。锈蚀龄期在 336h 之前, 为单颗连接件抗剪裁能力有效阶段, 此阶段拟合的强度退化模型见式 (1) ~ (4)。

$$y = 1.001 - 0.001x + 6.884 \times 10^{-6}x^2 - 1.406 \times 10^{-8}x^3 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.979$$

$$y = 0.974 - 3.189 \times 10^{-4}x - 3.206 \times 10^{-7}x^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.895$$

$$y = 0.84 + \frac{0.16}{1 + (x/117.6)^3} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.973$$

$$y = 1.005 - 4.324 \times 10^{-4}x - 9.663 \times 10^{-8}x^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.942$$

3.3 两颗螺钉连接件腐蚀后极限强度退化模型

图 10 展示了两颗螺钉连接件在腐蚀龄期内的强度退化系数变化规律。图 10 (a) 中, 当腐蚀龄期为 252 h, 连接件的抗剪承载力出现短暂增益, 一定程度上延缓了极限强度退化进程, 但这种增益效果并未对极限强度退化模型产生实质性影响, 因此在分析退化模型时, 不予考虑。当腐蚀龄期达到 336 h, 连接件强度下降 18%, 此点被定义为强度劣化特征值。

图 10 (b) 中, 腐蚀龄期为 504 h, 连接件强度下降 11%, 且在整个腐蚀过程中未出现强度劣化特征值。图 10 (c) 展示了增加螺钉直径后连接件的腐蚀龄期。在 420 h, 连接件出现强度劣化特征值, 继续腐蚀至 504 h, 强度下降 17%。

将图 10 (a) 与图 10 (c) 对比可以看出, 增加螺钉直径能够延后强度劣化特征值的出现时间, 从而提高连接件的耐久性。图 10 (d) 中连接件同样未出现强度劣化特征值。对比图 10 (c) 与图 10 (d) 可知, 在腐蚀龄期达到 336 h 之前, 两种连接件的退化系数均以相同速率减小; 在 336 h 之后, 较薄钢板连接件的强度退化系数下降速率更快。

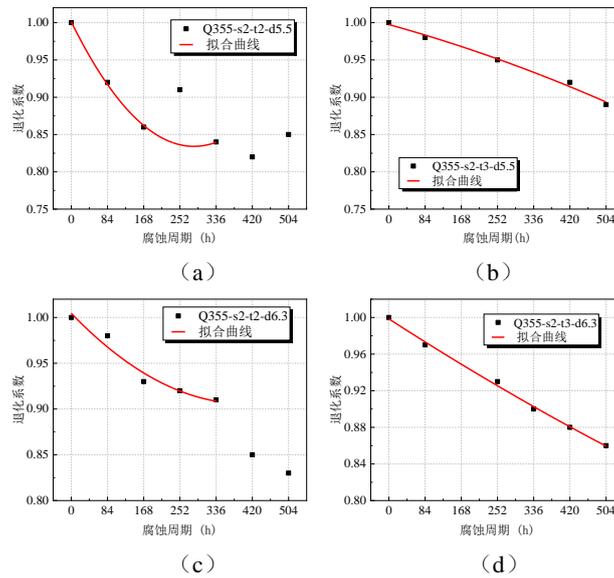


图 10 两颗螺钉连接件强度劣化模型

Fig.10 Strength degradation model for two screw joints

综合图 10 研究结果可知, 两颗螺钉的连接件, 增加钢板厚度可以延缓连接件抗剪强度退化。在强度劣化特征值出现之前, 连接件处于抗剪承载力的有效工作阶段, 拟合得到的强度退化公式为 (5) ~ (8)。

$$y = 1.001 - 0.001 \times 10^{-5} x + 2.06 \times 10^{-6} x^2 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.997$$

$$y = 0.997 - 1.60 \times 10^{-4} x - 9.16 \times 10^{-8} x^2 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.983$$

$$y = 1.005 - 4.90 \times 10^{-4} x + 6.07 \times 10^{-7} x^2 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.916$$

$$y = 0.999 - 3.04 \times 10^{-4} x + 5.57 \times 10^{-8} x^2 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.995$$

3.4 四颗螺钉连接件腐蚀后极限强度退化模型

图 11 展示了四颗螺钉连接件在腐蚀龄期内的强度退化系数变化规律。由图 11 (a) 可知, 在腐蚀周期内, 连接件退化系数总体呈现下降趋势, 当腐蚀龄期达到 336 h, 退化系数出现回升现象。这归因于腐蚀后的连接件表面摩擦力增强, 在一定程度上可延缓强度退化, 但这种短暂回升现象不会对连接件的整体退化趋势产生实质性影响。在整个腐蚀过程中, 未出现强度劣化特征值。

图 11 (b) 中, 连接件腐蚀龄期达到 252 h, 退化系数大于 1, 这表明腐蚀过程中产生的摩擦力对连接件具有一定增益作用。然而, 当腐蚀龄期超过 420 h 后, 连接件强度退化明显, 摩擦力产生的增益作用消失, 腐蚀龄期延长至 504 h, 连接件出现强度劣化特征值。

图 11 (a) 与图 11 (b) 为小直径的四颗螺钉连接件。在锈蚀发生后, 板间的摩擦力会对连接件抗剪承载力产生延缓作用。随着腐蚀周期延长, 这种连接件强度退化总体趋势并未发生改变。基于此现象, 可以推断出螺钉直径小是四颗螺钉连接件在锈蚀后强度下降的关键因素。摩擦力产生的增益效果不予考虑。

由图 11 (c) 可知, 该类连接件的强度退化趋势主要与板材强度退化有关, 受腐蚀摩擦力影响较小, 并且在整个腐蚀过程中, 未出现强度劣化特征值。图 11 (d) 为螺钉直径大但板材较厚的连接件, 在 168 h 至 336 h 以及 504 h 这两个腐蚀龄期内, 连接件退化系数大于 1, 连接件所产生的摩擦力对其产生增益作用。在整个腐蚀过程中, 此类连接件同样未出现强度劣化特征值。

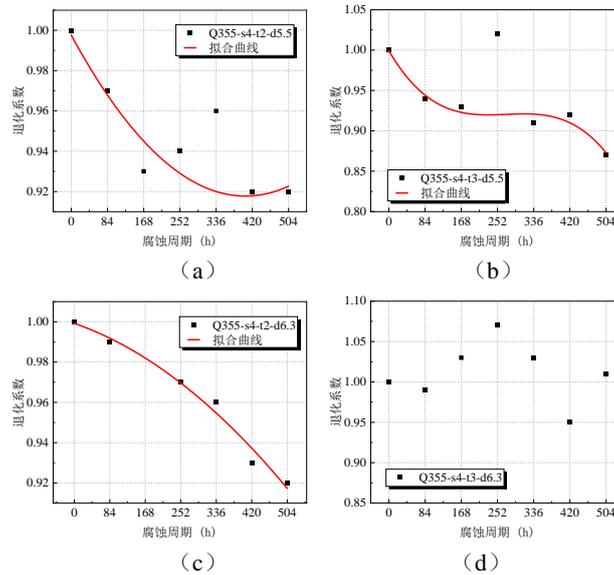


图 11 四颗螺钉连接件强度劣化模型

Fig.11 Strength degradation model for four screw joints

综合上述分析可以得出, 四颗螺钉连接件适当增大螺钉直径, 可有效延缓腐蚀引起的强度退化。在实际设计中, 当需要增加螺钉数量时, 应同步考虑增大螺钉直径。拟合得到的强度退化公式 (9) ~ (11)

$$y = 0.998 - 3.95 \times 10^{-4} + 4.89 \times 10^{-7} x^2 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.881$$

$$y = 0.999 - 9.14 \times 10^{-4} x + 3.44 \times 10^{-6} x^2 - 4.22 \times 10^{-9} x^3 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.919$$

$$y = 0.999 - 7.23 \times 10^{-5} x - 1.79 \times 10^{-7} x^2 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.970$$

4 结论

(1) 对于单颗螺钉连接件而言, 强度劣化特征值在腐蚀龄期为 336 h 时出现。腐蚀龄期超过 336 h 后, 板材厚度和螺钉直径对连接件承载力的影响不大。腐蚀仅延缓极限强度退化, 不可逆转

强度退化趋势,在实际应用设计中不予考虑。

(2) 对于两颗螺钉连接件,钢板较薄,出现强度劣化特征值,钢板较厚,不会出现强度劣化特征值。钢板厚度是影响连接件强度退化的主要因素。

(3) 对于四颗螺钉连接件,采用大直径螺钉能够延缓强度劣化特征值出现时间。Q355-s4-t3-d.6.3 腐蚀后的抗剪承载力最佳,腐蚀后摩擦力增益作用明显。因此在海洋大气环境中,建议选择四颗螺钉且螺钉直径为 6.3mm 的连接件。后续可将螺栓连接件在动态荷载、长期腐蚀效应等条件下作进一步研究,为今后自攻螺钉连接件应用提供更为精准的理论依据。

参考文献:

- [1] 钟国辉.冷弯薄壁型钢在房屋建筑中的研究与发展[J].建筑钢结构进展,2002,(04):31-38.
- [2] 侯保荣,张盾,王鹏.海洋腐蚀防护的现状与未来[J].中国科学院院刊,2016,31(12):1326-1331.
- [3] Gathimba N, Y Kitane. Effect of surface roughness on tensile ductility of artificially corroded steel plates[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021,176: 106392.1-106392.13.
- [4] 徐善华,张海江,张辙洵,等.静载作用下含中心裂纹锈蚀钢板断裂性能退化机理与退化规律[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(05):808-813.
- [5] 徐善华,古仁俊,聂彪,等.锈蚀冷弯薄壁型钢板材力学性能退化规律[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(04):177-186.
- [6] Sheng J, J Xia. Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 90-100.
- [7] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto, 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.
- [8] Roy K, Lau HH, Ting TCH, et al. Experiments and finite element modelling of screw pattern of self-drilling screw connections for high strength cold-formed steel[J]. Thin-Walled Structures. 2019, 145:106393.
- [9] Yan S, Young B. Screwed connections of thin sheet steels at elevated temperatures-Part I: Steady state tests[J]. Engineering Structures. 2012, 35:234-243.
- [10] 韩威.冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接剪力传递性能研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [11] 周明,孙国华,刘文渊.自攻螺钉厚板连接的抗剪性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(07):11-19.
- [12] Abhishek R, Jeom K P. Effects of naturally-progressed corrosion on the chemical and mechanical properties of structural steels[J]. Structures, 2021, 29:2120-2138.
- [13] Zongxing Zhang, Shanhua Xu, Rou Li. Comparative investigation of the effect of corrosion on the mechanical properties of different parts of thin-walled steel[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 146, 106450.
- [14] AISI TS-4-02, Standard test methods for determining the tensile and shear strength of screws[S]. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 2002.
- [15] 湖北省发展计划委员会.冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB 50018-2002[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [16] 中国机械工业联合会,全国金属与非金属覆盖层标准化技术委员会.人造气氛腐蚀试验 盐雾试验:GB/T 10125-2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [17] 中国钢铁工业协会委员会,全国钢标准化技术委员会.金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除:GB/T 16545-2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

基金项目:国家自然科学基金项目(52168024),内蒙古科技大学建筑科学研究所开放基金项目(JYSJJ-2021M03)

¹ **第1作者简介:**高鹏(1979-),男,博士,副教授,研究方向:钢结构。E-mail: gaop182@163.com

* **通讯作者简介:**陈明(1978-),男,博士,教授,研究方向:钢结构和空间结构的设计与理论研究。E-mail: cmlx-1978@163.com