

锈损冷弯薄壁型钢混合连接抗剪性能试验

褚云朋, 陈雪琴, 肖雅馨, 夏 琿

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:为获得锈蚀对冷弯薄壁型钢纯自攻螺钉连接与自攻螺钉-拉铆钉混合连接抗剪性能的影响,对锈蚀状态下的上述连接试件进行剪切试验。结果表明:连接钢板的力学性能指标随失重率增加呈线性下降的趋势;同失重率下,纯自攻螺钉连接试件抗剪承载力下降幅度大于自攻螺钉-拉铆钉混合连接试件,且锈蚀时间越长此现象越明显;引入锈蚀因子确定此类连接的承载力计算公式,为锈损冷弯薄壁型钢连接承载力安全评估提供相应参考。

关键词:锈蚀冷弯薄壁型钢连接;剪切试验;抗剪承载力;退化规律;计算方法

中图分类号:TU33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3476-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240206

Shear performance test of corroded cold-formed thin-walled steel hybrid connection

CHU Yun-peng, CHEN Xue-qin, XIAO Ya-xin, XIA Hui

(College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to obtain the influence of corrosion on the shear performance of pure self-tapping screw connection and self-tapping screw-pull rivet hybrid connection of cold-formed thin-walled steel, the shear test of the above connection specimens under corrosion condition was carried out. The results show that the mechanical properties of the connecting steel plate decrease linearly with the increase of weight loss rate. Under the same weight loss rate, the shear bearing capacity of the pure self-tapping screw connection specimen decreases more than that of the self-tapping screw-pulling rivet hybrid connection specimen, and the longer the corrosion time, the more obvious the phenomenon. The corrosion factor is introduced to determine the bearing capacity calculation formula of this kind of connection, which provides a corresponding reference for the safety assessment of the bearing capacity of corroded cold-formed thin-walled steel connections.

Key words: corroded cold-formed thin-walled steel connection; shear test; shear bearing capacity; degradation rule; calculation method

0 引 言

自攻螺钉常用于冷弯薄壁型钢(CFS)结构中节点连接及构件间的拼合连接中。当CFS构件所

处环境导致锈蚀严重时^[1],连接处作为关键位置,其承载可靠性尤为重要。锈蚀会导致结构连接强度降低,板材力学性能劣化^[2-6],从而降低结构的安全性与耐久性。CFS房屋结构轻柔,且构件间及构

收稿日期:2024-03-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(52268029);四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0381).

作者简介:褚云朋(1979-),男,教授,博士.研究方向:结构工程.E-mail:chuyunpeng@swust.edu.cn

件与龙骨间大量采用自攻螺钉连接。风载作用下引起的振动容易导致构件间连接发生松动,易造成自攻螺钉孔洞变大,螺钉发生拉脱破坏,导致面板与龙骨脱开,降低结构承载能力并影响耐久性的同时,冷弯薄壁型钢结构杆件壁厚较小,锈蚀后的自攻螺钉连接强度降低,螺纹与孔壁在锈蚀的影响下咬合作用下降,更易出现这种破坏。

国内外学者针对锈蚀连接问题研究主要集中于普通钢材螺栓连接,Kong等^[7]采用铜加速醋酸一盐喷雾试验获得不同腐蚀程度下的高强度螺栓连接试件,后对其进行剪切试验,结果表明随钢板质量损失率的增加,腐蚀高强度螺栓的抗滑移系数呈先增大后减小的趋势;Liao等^[8]对EAC连接进行了中性盐雾锈蚀试验,结果表明锈蚀对EAC连接剪切性能与拉拔性能均有较大的影响;徐善华等^[9]对工业环境下服役多年的锈损CFS与热轧钢进行试验,结果表明锈蚀CFS的延性和韧性性能弱于锈蚀热轧钢,锈蚀对CFS屈强比的影响也高于热轧钢,表明CFS的冷作硬化对钢材延性影响明显;Roy等^[10]对锈蚀的自攻螺钉进行抗剪强度试验,并与未锈蚀的自攻螺钉对比,表明锈蚀后的自攻螺钉连接强度降低显著。

目前国内外关于未锈蚀的CFS连接试件的抗剪承载力计算方法研究较多,而针对锈蚀自攻螺钉连接与锈蚀自攻螺钉-拉铆钉混合连接的连接试件抗剪承载力计算方法研究较少,而锈蚀是普遍存在的问题,因此有必要开展锈损状态下的CFS连接抗剪承载力计算方法研究。

为获得锈损CFS纯自攻螺钉连接与自攻螺钉-拉铆钉连接力学性能退化规律,设计并制作了30组共计120个锈蚀CFS连接试件进行剪切试验,获得其破坏模式、抗剪承载力与荷载-位移曲线等性能指标,再通过引入锈蚀因子对规范公式进行修正,确定不同锈损程度下的纯自攻螺钉连接与自攻螺钉-拉铆钉混合连接的抗剪承载力计算公式,为此类锈损连接安全评估提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

依据规范GB/T 10125—2012^[11],对试件采用规范适用的室外周期性自动喷洒盐雾加速试验,试验采用质量分数为5%的氯化钠溶液。试件与垂直方向成30°放置于试验槽内(图1(a)),钢

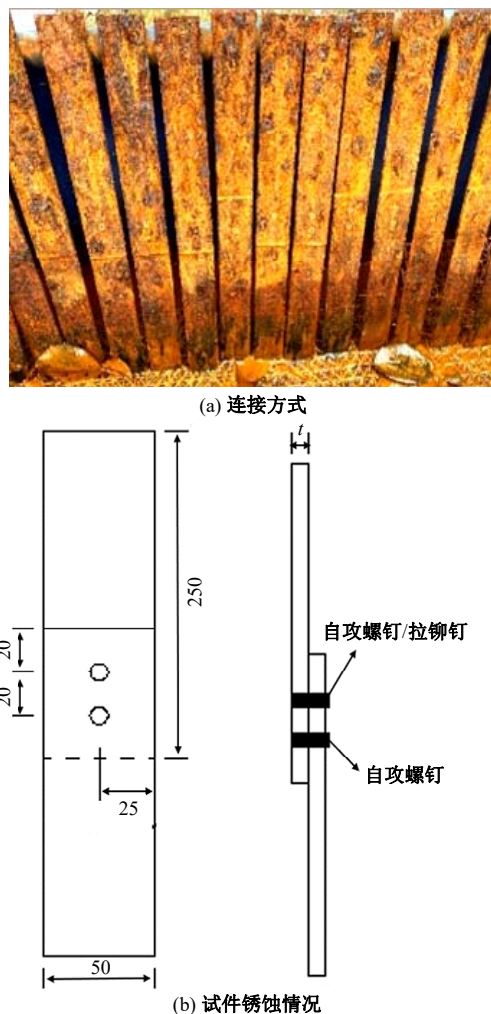


图1 试件连接方式与锈蚀现场图

Fig. 1 Connection mode and specimen corrosion site

材强度等级为Q235B镀锌钢板,按连接件类型不同,将试件分为纯自攻螺钉连接(单一连接)与自攻螺钉-拉铆钉连接(混合连接)。自攻螺钉采用ST4.2十字沉头型,直径为4.2 mm,钉长16 mm。拉铆钉为开口平头型,直径与自攻螺钉相近为4 mm,铆钉长度16 mm。根据钢板的厚度、连接方式及锈蚀时间的不同,共设计了30组试件,其中每一组至少设置4个相同试件,试件尺寸如图1(b)所示,参数如表1所示。

1.2 锈蚀钢材表面形貌

不同锈蚀时间连接试件钢板除锈前、后的表面形貌如图2所示,可看出:①锈蚀60 d的镀锌钢板锈层较为轻薄,颜色呈橘色,除锈后钢板表面分布着细小的锈坑;②锈蚀120 d的钢板表面锈层较厚,颜色多为橙色或红褐色,局部分布有小面积的疮痂,用钢板轻轻一刮,部分表面锈层即可脱落,除锈后,钢板表面锈坑直径明显增大,且部分

表 1 试件基本参数				
Table 1 Basic parameters of specimens				
组别	试件编号	锈蚀时间/d	t/mm	连接方式
1	2-0.8-d	60	0.8+0.8	单一连接
2	4-0.8-d	120	— —	— —
3	6-0.8-d	180	— —	— —
4	2-0.8-h	60	0.8+0.8	混合连接
5	4-0.8-h	120	— —	— —
6	6-0.8-h	180	— —	— —
7	2-1.0-d	60	1.0+1.0	单一连接
8	4-1.0-d	120	— —	— —
9	6-1.0-d	180	— —	— —
10	2-1.0-h	60	1.0+1.0	混合连接
11	4-1.0-h	120	— —	— —
12	6-1.0-h	180	— —	— —
13	2-1.2-d	60	1.2+1.2	单一连接
14	4-1.2-d	120	— —	— —
15	6-1.2-d	180	— —	— —
16	2-1.2-h	60	1.2+1.2	混合连接
17	4-1.2-h	120	— —	— —
18	6-1.2-h	180	— —	— —
19	2-1.5-d	60	1.5+1.5	单一连接
20	4-1.5-d	120	— —	— —
21	6-1.5-d	180	— —	— —
22	2-1.5-h	60	1.5+1.5	混合连接
23	4-1.5-h	120	— —	— —
24	6-1.5-h	180	— —	— —
25	2-2.0-d	60	2.0+2.0	单一连接
26	4-2.0-d	120	— —	— —
27	6-2.0-d	180	— —	— —
28	2-2.0-h	60	2.0+2.0	混合连接
29	4-2.0-h	120	— —	— —
30	6-2.0-h	180	— —	— —

相邻锈坑出现连通趋势;③锈蚀 180 d 的镀锌钢板表面锈层最厚,颜色呈棕褐色,部分区域锈层与母材间形成空鼓,轻微触碰锈蚀物便会大面积脱落,除锈后大部分相邻锈坑融合成更大的锈坑。

1.3 材性试验

构件在氯离子侵蚀下,侵蚀时间的长短会导致连接产生不同程度的锈蚀。取不同厚度下的锈蚀 CFS 单一与混合连接试件中的连接钢板用 12% 的盐酸溶液浸泡,经清水漂洗后,再放入石灰水中中和,最后用清水清洗干净后烘干,后分别切割成 3 个材性试验标准试件。取材性试件锈蚀前后的失重率作为锈蚀程度的量化指标,不同厚度钢材随锈蚀时间与失重率之间的关系如图 3 所示。可看出,厚度越薄的钢板在相同的锈蚀时间下,其失重率越大。越厚的钢板,越不易锈蚀。随锈蚀时间增加,较薄的钢板失重率显著上升。失重率计算方法如式(1)所示:

$$\eta=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100\%$$

(1)

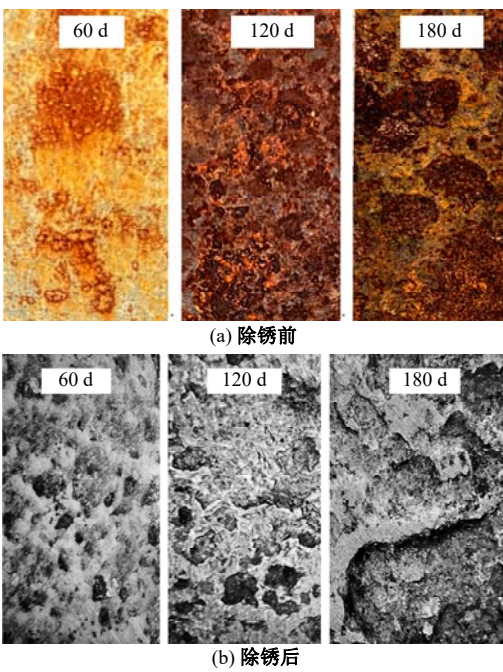


图 2 不同锈蚀时间连接钢板表面形态

Fig. 2 Surface morphology of connection steel plate with different corrosion time

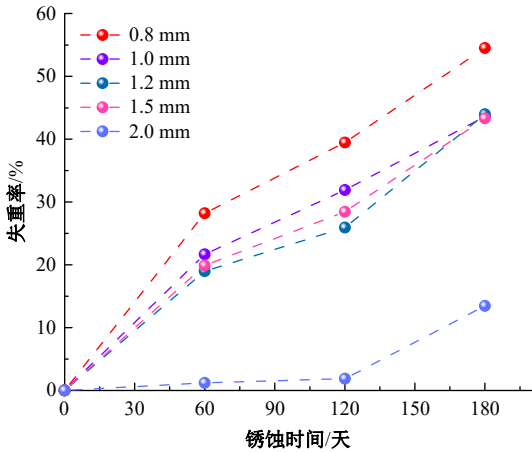


图 3 连接钢板锈蚀时间与失重率之间的关系

Fig. 3 Relationship between corrosion time and weight loss rate of connection steel plates

式中:η为失重率,m₀为试件锈蚀前的质量,m₁为试件除锈烘干后的质量。

依据《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1—2021)^[12]中的规定,经拉伸试验后,对未有明显屈服点的试件,取 0.2% 的塑性变形时的应力作为屈服强度。应力-应变曲线如图 4 所示,主要性能指标如表 2 所示。失重率与主要性能指标均为各厚度标准试件测量结果均值。由图 4 可知:锈蚀程度轻的曲线仍具有典型的 4 个阶段。各试件弹性阶段随失重率的增加逐渐变短且斜率减小;屈服阶段随失重率增加,屈服平台明显缩短或消失,是因钢板

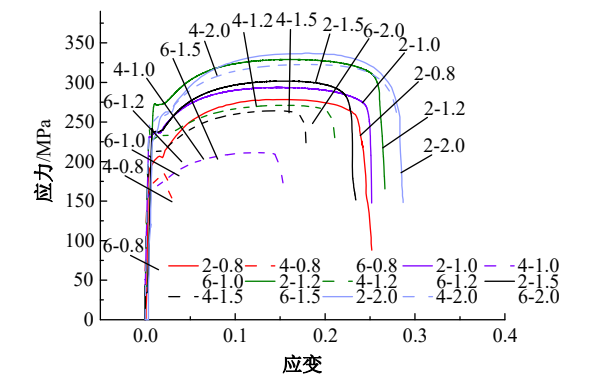


图 4 试件不同周期的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of specimens in different periods

表 2 材性试验结果

Table 2 Material mechanical test results						
t/mm	锈蚀时间/d	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	失重率/%	伸长率/%
0.8	0	272.5	360.3	200.00	0.00	30.7
	60	195.2	277.5	126.31	28.20	25.1
	120	156.3	185.2	104.32	39.47	3.1
	180	81.4	104.7	79.78	54.51	1.5
1.0	0	259.6	358.2	204.00	0.00	32.8
	60	230.0	293.7	131.40	21.66	25.2
	120	164.2	211.4	99.27	35.76	15.5
	180	152.7	185.1	82.63	43.60	6.3
1.2	0	288.2	353.4	206.00	0.00	29.5
	60	272.5	329.2	142.50	18.98	26.7
	120	225.6	271.3	130.30	25.93	21.1
	180	145.1	214.1	89.90	43.98	10.1
1.5	0	263.2	355.1	213.00	0.00	30.5
	60	235.0	301.7	140.90	19.98	23.4
	120	202.9	264.6	125.60	28.44	17.9
	180	165.1	212.4	94.90	43.31	16.5
2	0	262.4	365.8	210.00	0.00	31.2
	60	256.2	345.7	199.60	1.20	28.7
	120	244.1	322.8	185.00	1.87	28.0
	180	210.5	280.2	161.40	13.47	19.7

表面的局部蚀坑导致的应力集中,使材料过早进入塑性阶段,且随失重率增加更明显;强化阶段的峰值荷载随失重率的增加而降低;颈缩阶段随失重率增加呈下降趋势,且当锈蚀达一定程度后消失。

由表 2 可知:连接钢板的各项力学性能指标随锈蚀时间增加而降低,屈服强度、极限强度、延伸率、弹性模量最大下降幅度分别为 70.13%、70.94%、60.26% 及 60.11%,在相同锈蚀时间下,连接板越薄,力学性能劣化越明显。

1.4 连接钢板力学性能退化规律

为获得不同锈蚀时间连接钢板各项拉伸性能退化规律,引用失重率为量化指标对拉伸试验数据进行回归分析,得到不同锈蚀程度下连接钢板屈服强度、抗拉强度、弹性模量及伸长量与失重率

间的关系(图 5)。

从图 5 可知:不同锈蚀时间下连接钢板力学性能指标与失重率近似呈线性关系,各性能指标

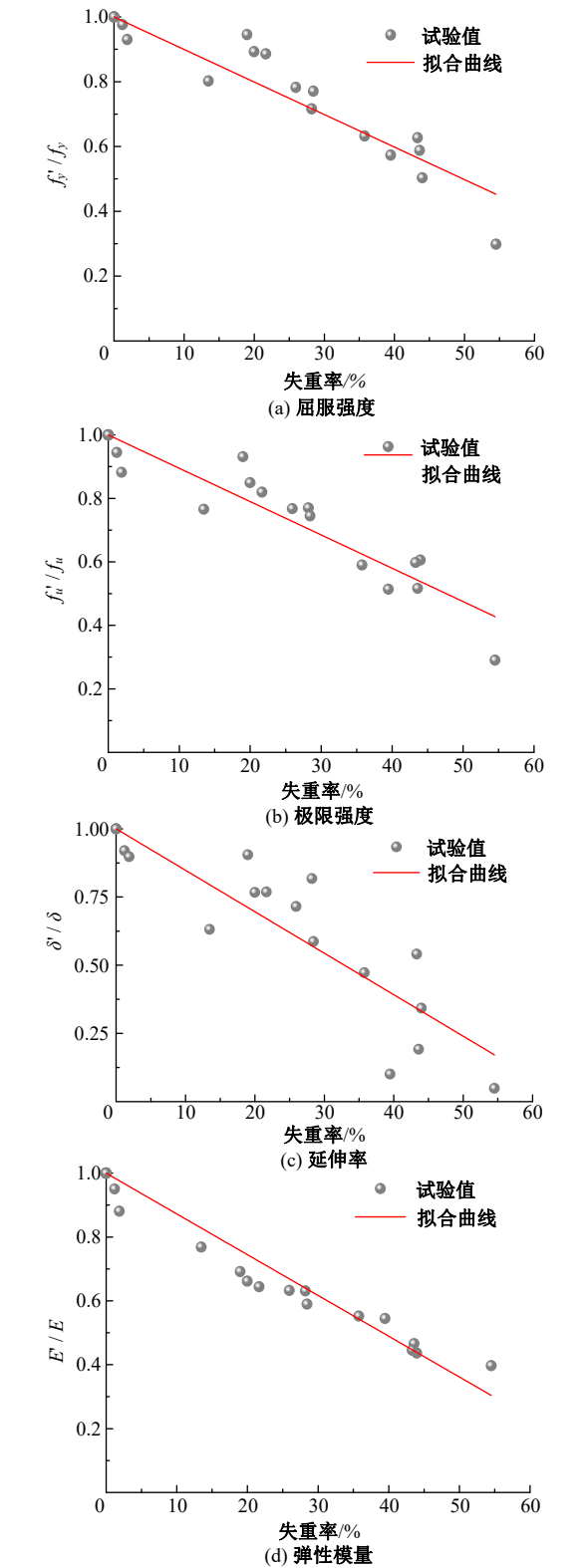


图 5 力学性能指标与失重率的关系

Fig. 5 Relationship between material mechanical and weight loss rate

随失重率增加呈现不同程度的退化规律,其数学表达式如下:

$$f_y'/f_y = 1 - 0.010\,04\,\eta \quad (2)$$

$$f_u'/f_u = 1 - 0.010\,5\eta \quad (3)$$

$$\sigma'/\sigma = 1 - 0.152\,\eta \quad (4)$$

$$E'/E = 1 - 0.012\,77\,\eta \quad (5)$$

式中: f_y 、 f_u 、 σ 、 E 、 f_y' 、 f_u' 、 σ' 、 E' 分别为钢板锈蚀前后的屈服强度、极限强度、延伸率及弹性模量。

1.5 试验装置及加载制度

试验通过万能试验机进行加载及数据采集,加载装置如图6所示。加载采用位移控制,速率为2.5 mm/min,加载前,对两端夹具调整,确保试件受力保持直线。

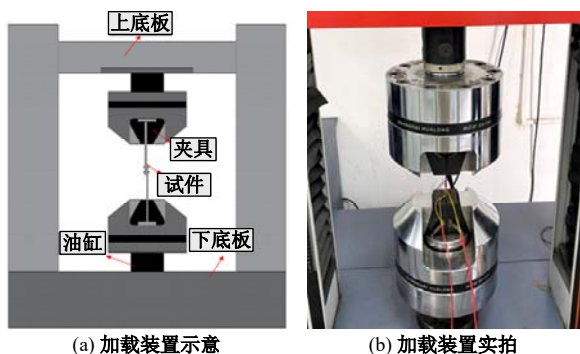


图6 加载装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading device

2 试验结果

2.1 破坏模式

单一连接与混合连接试件破坏模式如图7和图8所示,从左到右依次是锈蚀时间为0、60、120、180 d的试件。加载初期,连接板板厚为1.5 mm和2 mm的试件无明显变形,随荷载增加,自攻螺钉开始出现明显倾斜,钉孔周围的板面出现承压起鼓;当达极限荷载时,锈蚀时间为0、60、120、180 d混合连接的试件均发出“嘭”的响声,铆钉被剪断,螺钉倾斜程度小。连接板板厚为0.8、1.0、1.2 mm的试件在加载初期与连接板板厚为1.5 mm和2 mm的试件无明显区别,但随荷载增加,螺钉倾斜程度越发明显,部分试件表现为螺钉拉脱,部分表现为板面承压破坏,而锈蚀时间为160 d、连接板板厚0.8 mm的试件破坏时连接板板面出现明显撕裂。

单一连接试件破坏模式为螺钉拉脱与板面承压破坏,而混合连接的为铆钉剪断与板面承压破

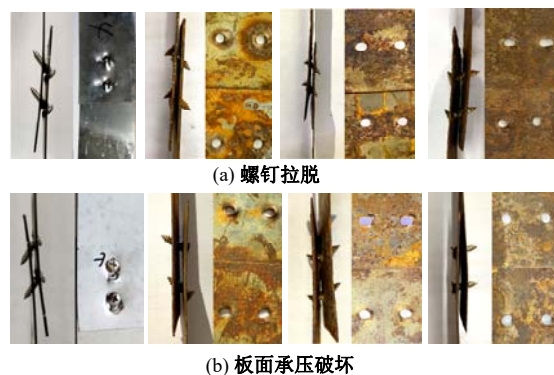


图7 单一连接破坏模式

Fig. 7 Single connection failure mode

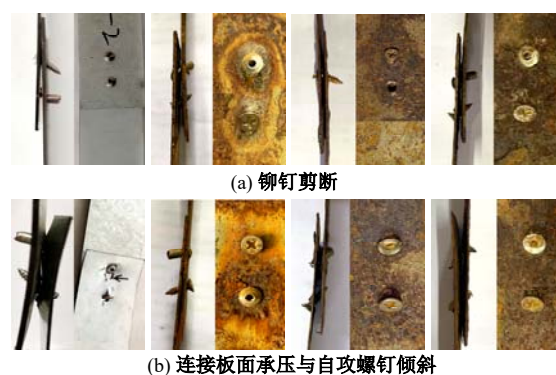


图8 混合连接破坏模式

Fig. 8 Mixed connection failure mode

坏。其中部分薄板的螺钉孔洞处有撕裂的迹象,是锈蚀导致钢材延性降低。对比不同厚度下的锈损CFS单一连接与混合连接的剪切试件,混合连接中的自攻螺钉倾斜程度相较单一的试件降低,但板端翘曲变形幅度明显大于单一连接。

2.2 荷载-位移曲线

从整体来看试件的破坏过程具有一定相似性,加载初期各试件曲线呈线性,其中不同锈蚀时间的试件,随荷载增加,位移增加不明显,但当荷载增加至某一限值时,位移突然增大。锈蚀时间越长的试件,现象越明显,是因锈蚀物将自攻螺钉、拉铆钉与板件粘结在一起,但此粘结作用是脆性的,在荷载达某一特定值前,自攻螺钉与拉铆钉几乎不参与工作,粘结作用失效后,连接件才承担荷载。

随荷载的增加,曲线由线性向非线性过渡,曲线斜率呈先增加后减小的趋势,且随失重率的增加,锈坑导致的应力集中使板件迅速进入塑性阶段,即曲线出现明显弯折。当曲线进入塑性阶段时,曲线趋于平缓,连接试件在连接区域变形加剧。

加载后期,0.8、1.0、1.2 mm的试件因自攻螺钉倾斜时,螺钉螺纹与孔壁的咬合作用使试件仍

继续承载,当自攻螺钉螺纹与钢板间咬合力不足以抵抗继续增加的外载时,螺钉逐渐滑脱钢板,使曲线出现波浪状波动,且单一连接试件表现更明显。而 1.5、2.0 mm 的试件因连接板厚度相对较厚,单一连接试件在荷载达极值后,表现为拉脱破坏,但 4-1.5-d 与 6-1.5-d 因锈蚀导致板厚减小,最终也表现为明显的波浪线趋势。混合连接的试件,在荷载达极限荷载后铆钉被剪断,故荷载达极限荷载后急剧下降,表现为脆性破坏(图 9)。

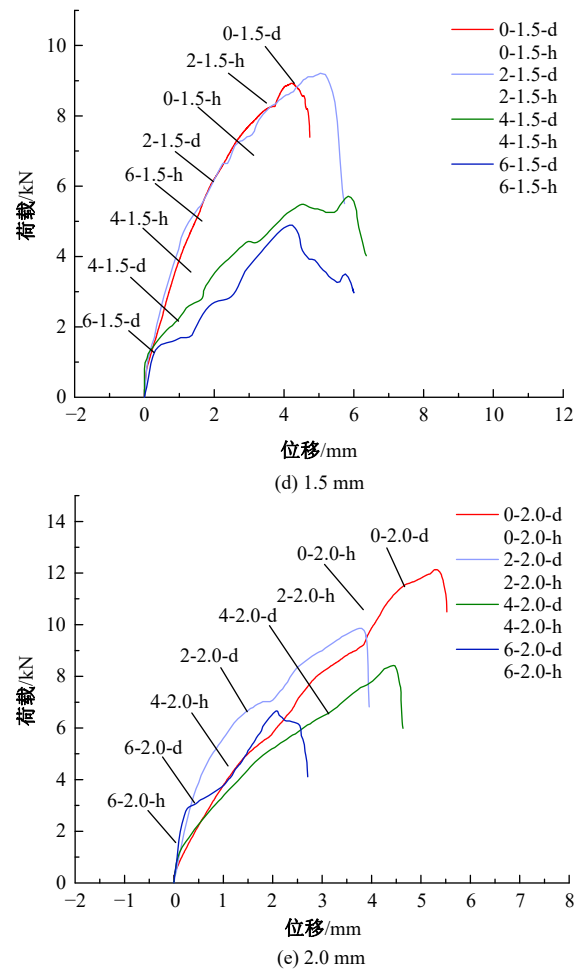
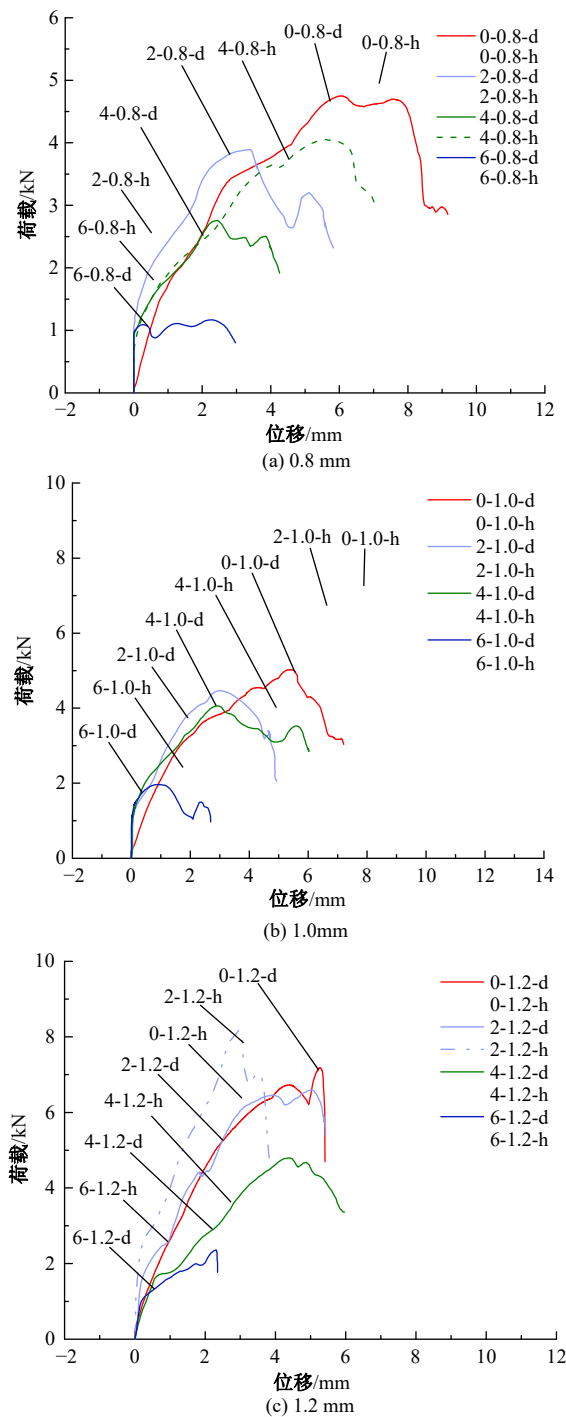


图 9 锈损试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of corroded specimen

2.3 抗剪承载力分析

表 3 中抗剪承载力试验值为不同锈蚀时间下,同编号的 3 个重复试件试验值的均值。对比可看出:未锈蚀的单一连接和混合连接的试件抗剪承载力试验值相差小,但随锈蚀时间增加,同厚度的单一连接试件相较混合连接的试件抗剪承载力下降幅度增大,说明与拉铆钉相比,自攻螺钉对锈蚀更敏感。

相较于锈蚀前,0.8 mm 的单一连接试件随锈蚀时间增加,抗剪承载力分别降低 17.89%、43.15% 及 74.74%,混合连接的试件分别降低 7.24%、24.86% 及 38.78%。1.0 mm 的单一连接试件,抗剪承载力分别降低 11.33%、23.86% 及 60.24%,混合连接试件分别降低 5.79%、38.63% 及 60.97%。1.2 mm 的单一连接试件,抗剪承载力分别降低 8.08%、33.01% 及 66.57%,混合连接的试件分别降低 8.15%、31.57% 及 51.21%。1.5 mm 等的单一连接试

表 3 抗剪承载力试验值

Table 3 Test value of shear bearing capacity kN

试件编号	0 d	60 d	120 d	180 d
0.8-d	4.75	3.90	2.7	1.20
0.8-h	5.39	5.00	4.05	3.30
1.0-d	5.03	4.46	3.83	2.00
1.0-h	7.43	7.00	4.56	2.90
1.2-d	7.18	6.60	4.81	2.40
1.2-h	8.71	8.00	5.96	4.25
1.5-d	8.93	8.30	5.73	4.90
1.5-h	9.56	9.10	7.56	6.00
2.0-d	12.14	9.35	8.44	6.70
2.0-h	11.43	10.20	9.4	7.90

件,抗剪承载力分别降低 7.53%、35.83% 及 45.13%,混合连接的试件分别降低 4.81%、20.92% 及 37.24%。2.0 mm 的单一连接试件,抗剪承载力分别降低 22.98%、32.95% 及 44.81%,混合连接的试件分别降低 10.76%、17.76% 及 30.88%。

3 抗剪承载力计算方法研究

已有研究表明,对于自攻螺钉连接,我国现行规范^[13]相关的计算方法过于保守,故在计算未锈蚀单一连接与混合连接抗剪承载力时均采用北美规范^[14](式(6)(7))计算自攻螺钉连接抗剪承载力。参考欧洲规范 EN 1999-1-4^[15]中拉铆钉连接抗剪承载力的计算方法(式(8)),对混合连接中拉铆钉部分进行计算,最后将二者进行数值累加(式(9))。计算结果表明上述方法过于保守,故需对其进行改进,当组合板厚 $t_1+t_2<3$ mm 时,混合连接抗剪承载力 P_h 由式(10)确定,当组合板厚 $t_1+t_2\geq 3$ mm, P_h 由式(11)确定,计算结果如表 4、表 5 所示。

北美规范下 AISI S100-16^[14]单颗螺钉连接等厚钢板的抗剪承载力计算方法:

$$P_{ns}=4.2(t^3d)^{1/2}F_u \quad (6)$$

$$P_{ns}=2.7tdF_u \quad (7)$$

式中: P_{ns} 为自攻螺钉的抗剪承载力, N; F_u 为极限抗拉强度, N/mm²; 当 $t_1/t_2=1$ 时, P_{ns} 取式(6)~(7)中较小值。

欧洲规范 EN1999-1-4^[15]中拉铆钉连接抗剪承载力:

$$F_b=\alpha f_u dt/\gamma_m \quad (8)$$

式中: F_b 为拉铆钉的抗剪承载力, N; f_u 为较薄板的

极限抗拉强度, N/mm²; d 为拉铆钉直径, mm; t 为连接板厚度, mm; 当连接板等厚时, 计算系数 $\alpha=3.2(t_1/d)^{0.5}$, γ_m 为影响因素系数, 取 1.25。

改进前混合连接抗剪承载力:

$$P_m=F_b+P_{ns} \quad (9)$$

改进后混合连接抗剪承载力:

$$P_h=\varphi(F_b+P_{ns}) \quad (10)$$

$$P_h=F_b+\lambda P_{ns} \quad (11)$$

式中: φ 、 λ 分别为单颗螺钉受剪承载力影响因素系数, 此处取 $\varphi=1.5$, $\lambda=1.13$ ^[16]。

表 4 未锈蚀单一连接抗剪承载力计算

Table 4 Calculation of shear capacity of uncorroded single connection

t/mm	P_{ns}	P_t	P_u/P_{ns}
0.8+0.8	4.44	4.75	1.07
1.0+1.0	6.17	5.03	0.82
1.2+1.2	8.00	7.17	0.90
1.5+1.5	11.23	8.92	0.79
2.0+2.0	15.39	12.13	0.79

表 5 未锈蚀混合连接抗剪承载力计算结果

Table 5 Calculation results of shear capacity of uncorroded hybrid connection

t/mm	P_m	P_h	P_t	P_t/P_m	P_t/P_h
0.8+0.8	3.54	5.28	5.39	1.52	1.02
1.0+1.0	4.92	7.21	7.43	1.51	1.03
1.2+1.2	6.38	9.90	8.71	1.37	0.88
1.5+1.5	8.96	12.58	9.56	1.07	0.76
2.0+2.0	13.21	11.66	11.43	0.87	0.98

采用上述方法计算的未锈蚀单一连接与混合连接的抗剪承载力计算值与试验值比值的平均值分别为 1.13、0.87, 计算值与试验值差异较小, 故该计算方法具有较高的合理性。

随失重率增加, 单一连接与混合连接的试件抗剪承载力逐渐降低, 而影响抗剪承载力的因素除板材锈蚀外, 还有连接件的锈蚀, 且二者锈蚀程度不一致, 故在考虑连接件锈蚀的影响下, 引入锈蚀因子 ϵ 对上述公式进行修正, 令锈蚀试件的抗剪承载力为 P_c (式(12)), P_t 为按相应锈蚀率进行厚度折减后的连接试件抗剪承载力, 对试验数据进行拟合得到影响因子计算公式, 即式(13)(14), 计算结果分别见表 6 和表 7。

$$P_c=\epsilon P_t \quad (12)$$

单一连接试件:

$$\epsilon=\begin{cases} 0.4976e^{0.0394\eta}, & \eta\leq 40\% \\ 0.0784e^{0.0784\eta}, & \eta>40\% \end{cases} \quad (13)$$

混合连接试件:

$$\epsilon=\begin{cases}0.643\,3\mathrm{e}^{0.036\,2\eta},\eta\leqslant 40\%\\0.013\,2\mathrm{e}^{0.114\,8\eta},\eta>40\%\end{cases}\quad(14)$$

由表 6 与表 7 可知,按上述方法计算不同锈蚀程度下的 CFS 连接试件抗剪承载力,除个别试件外,本文建议的单一连接与混合连接抗剪承载力计算方法得到的理论与试验的比值的平均值均为 1.01,计算结果与试验结果较为吻合,本文建议的公式连贯性与准确性都有较高的保证,精确度较

表 6 锈蚀 CFS 单一连接抗剪承载力计算结果

Table 6 Calculation results of shear capacity of corroded CFS single connection

<i>t</i> /mm	锈蚀时间/d	失重率/%	<i>P_c</i> /kN	<i>P_t</i> /kN	<i>P_c</i> / <i>P_t</i>
0.8	60	28.20	3.52	3.90	0.90
	120	39.47	2.62	2.70	0.97
	180	54.51	1.05	1.20	0.88
1.0	60	21.66	4.17	4.46	0.93
	120	35.76	3.12	3.83	0.81
	180	43.60	2.36	2.00	1.18
1.2	60	18.98	6.39	6.60	0.97
	120	25.93	5.55	4.81	1.15
	180	43.98	3.31	2.40	1.38
1.5	60	19.98	8.72	8.30	1.05
	120	28.44	6.58	5.73	1.15
	180	43.31	4.24	4.90	0.87
2.0	60	1.20	9.16	9.35	0.98
	120	1.87	8.64	8.44	1.02
	180	13.47	6.85	6.70	1.02

表 7 锈蚀 CFS 混合连接抗剪承载力计算结果

Table 7 Calculation results of shear capacity of corroded CFS hybrid connection

<i>t</i> /mm	锈蚀时间/d	失重率/%	<i>P_c</i> /kN	<i>P_t</i> /kN	<i>P_c</i> / <i>P_t</i>
0.8	60	28.20	4.14	5.00	0.83
	120	39.47	3.51	4.05	0.87
	180	54.51	2.56	3.30	0.78
1.0	60	21.66	6.16	7.00	0.88
	120	35.76	5.14	4.56	1.13
	180	43.60	4.50	2.90	1.55
1.2	60	18.98	7.81	8.00	0.98
	120	25.93	6.88	5.96	1.15
	180	43.98	5.24	4.25	1.23
1.5	60	19.98	9.12	9.10	1.00
	120	28.44	7.32	7.56	0.97
	180	43.31	5.82	6.00	0.97
2.0	60	1.20	10.00	10.20	0.98
	120	1.87	9.62	9.40	1.02
	180	13.47	7.86	7.90	0.99

高,说明建议的计算方法能较好地预测锈损状态下的单一连接与混合连接的 CFS 连接试件抗剪承载力。

4 结 论

(1)锈蚀导致钢板的力学性能退化明显,屈服强度与抗拉强度均随失重率增加,呈线性下降的趋势,且应力-应变曲线中弹性阶段变短、屈服点下降和屈服平台变短甚至消失。

(2)不同锈蚀程度单一连接试件的抗剪承载力下降幅度大于混合连接试件,且锈蚀时间越长此现象越明显。如当失重率为 25.1% 时,0.8 mm 的单一连接与混合连接分别降低了 17.89% 和 7.24%。

(3)随失重率增加,锈蚀前后同系列试件破坏模式无明显区别,混合连接的试件破坏模式仍为铆钉被剪断及板面承压破坏,单一连接试件均为螺钉被拉脱及板面承压破坏,但锈蚀时间为 180 d 的 0.8 mm 板在破坏时,板面有明显的撕裂。

(4)通过在规范的基础上,引入锈蚀因子对其进行修正,得到相应的锈损试件抗剪承载力计算公式,并将计算结果与试验值进行对比,其比值的平均值为 1.01,本文建议的计算方法能较好预测锈损状态下采用单一连接与混合连接的连接试件抗剪承载力。

参考文献:

[1] 黄炳生,顾彪,倪红.冷弯薄壁型钢结构事故特点与处理[J].南京建筑工程学院学报:自然科学版,2001,42(3):76-79.
Huang Bing-sheng, Gu Biao, Ni Hong. Accident characteristics and treatment of cold-formed thin-walled steel structures[J]. Journal of Nanjing Institute of Building Engineering (Natural Science Edition), 2001, 42(3): 76-79.

[2] Xu S H, Wang H, Su L. Degradation law of mechanical properties of Q235 steel plate in neutral salt spray corrosion environment [J]. Material Mechanical Engineering, 2016, 40(5): 86-91.

[3] Wang Y, Xu S, Wang H, et al. Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152:777-793.

[4] Xu S, Zhang Z, Li R, et al. Effect of cleaned corrosion surface topography on mechanical properties of

- cold-formed thin-walled steel[J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 1-14.
- [5] Nie B, Xu S, Zhang Z, et al. Experimental investigation on corroded cold-formed steel beam-columns under compression and major axis bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 169: 106026.
- [6] Zhang Z, Xu S, Li R. 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.
- [7] Kong Z, Yang F, Jin Y, et al. Experimental study on bearing capacity of corroded high-strength bolt connections under shear force [J]. Construction and Building Materials, 2021, 309: 125117.
- [8] Liao Y X, Wang Y B, Qi H Z, et al. Mechanical degradation and failure behavior of Al/steel electromagnetic assisted clinched joint in chloride salt environment[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 190: 110958.
- [9] 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(4): 177-186.
- Xu Shan-hua, Gu Ren-jun, Nie Biao, et al. Degradation law of mechanical properties of corroded cold-formed thin-walled steel sheet[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 177-186.
- [10] Roy K, Lau H H, Fang Z, et al. Effects of corrosion on the strength of self-drilling screw connections in cold-formed steel structures-experiments and finite element modeling[C]//Structures, Amsterdam, Netherlands, 2022: 1080-1096.
- [11] GB/T 10125—2021. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S].
- [12] GB/T 228.1—2021. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
- [13] GB 50018—2002. 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
- [14] AISI S100—16. North American specification for the design of cold-formed steel structural members[S].
- [15] PREN1999-1-4. Eurocode 9: design of aluminium structures, part: 1-4: supplementary rules for cold-formed sheeting[S].
- [16] 伏金蓉. 采用混合连接的冷弯薄壁型钢双肢拼合构件受力性能研究[D]. 绵阳:西南科技大学土木工程与建筑学院, 2023.
- Fu Jin-rong. Study on the mechanical properties of cold-formed thin-walled steel double-limb composite members with hybrid connection[D]. Mianyang: school of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, 2023.