

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.122



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉 连接性能试验研究

熊刚<sup>1</sup>, 折志伟<sup>1</sup>, 李环宇<sup>1</sup>, 石宇<sup>1</sup>, 刘宜丰<sup>2</sup>, 姜雪<sup>2</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610041)

**摘要:** 开展冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接抗剪性能试验研究, 完成35个典型试件单调拉伸及低周往复加载试验, 分析结构防火一体板厚度、螺钉直径、螺钉端距及加载角度等因素对其抗剪性能的影响。结果表明: 不同加载角度及螺钉端距的试件呈现不同的破坏模式, 主要包括板材端部撕裂破坏、板材孔壁承压破坏、板材被拉断破坏等, 且破坏时试件的自攻螺钉存在不同程度的倾斜。对于试验端分别采用直径为4.8、5.5 mm螺钉的试件, 试件的峰值荷载及延性系数与螺钉直径无明显相关性, 弹性刚度随着螺钉直径增大而显著提升; 随着螺钉端距由15 mm增大至25 mm, 试件的弹性刚度无明显变化, 而峰值荷载和延性系数提高了约35%; 随着板厚由12 mm增大到20 mm, 试件的峰值荷载提高了约40%, 弹性刚度提高了约90%, 延性系数降低了约30%; 与加载角度为0°的试件的特征参数相比, 加载角度为45°时, 试件弹性刚度提高了约100%, 峰值荷载及延性系数无明显差别; 加载角度为90°时, 试件弹性刚度及峰值荷载无明显差别, 延性系数降低了约40%。

**关键词:** 冷弯薄壁型钢; 结构防火一体板; 螺钉连接; 抗剪性能; 低周往复荷载

**中图分类号:** TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0134-10

## Experimental study on self-tapping screw connection performance of cold-formed thin-walled steel-structure fireproof integrated board

XIONG Gang<sup>1</sup>, SHE Zhiwei<sup>1</sup>, LI Huanyu<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, LIU Yifeng<sup>2</sup>, JIANG Xue<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of Mountain Town Construction and New Technology of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Southwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** The shear test of self-tapping screw connection of cold-formed thin-walled steel-structure fireproof integrated board was carried out, and the monotonic tensile and low-cycle reciprocating loading tests of 35 typical specimens were completed, and the effects of structural fireproof integrated plate thickness, screw

**收稿日期:** 2023-08-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(52378132)

**作者简介:** 熊刚(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构研究, E-mail: xionggang76@126.com。

石宇(通信作者), 女, 博士, 教授, E-mail: shiyu7811@163.com。

**Received:** 2023-08-04

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52378132)

**Author brief:** XIONG Gang (1976-), PhD, professor, main research interest: steel structures, E-mail: xionggang76@126.com.

SHI Yu (corresponding author), PhD, professor, E-mail: shiyu7811@163.com.

diameter, screw end distance and loading angle on their shear resistance were analyzed. The results show that the specimens with different loading angles and screw end distance showed different failure modes, mainly including tear failure at the end of the plate, pressure failure of the hole wall of the plate, and the failure of the plate to be pulled off, etc., and the self-tapping screws of the specimens had different degrees of inclination during the failure. For test pieces with screws with a diameter of 4.8 mm and 5.5 mm respectively at the test end, the peak load and ductility coefficient of the specimen have no obvious correlation with the screw diameter, and the elastic stiffness increases significantly with the increase of the screw diameter. With the increase of screw end distance from 15 mm to 25 mm, the elastic stiffness of the specimen did not change significantly, while the peak load and ductility coefficient increased by about 35%. With the increase of plate thickness from 12 mm to 20 mm, the peak load of the specimen is increased by about 40%, the elastic stiffness is increased by about 90%, and the ductility coefficient is reduced by about 30%. Compared with the specimen with a loading angle of 0°, when the loading angle is 45°, the elastic stiffness of the specimen is increased by about 100%, and the peak load and ductility coefficient do not change significantly. When the loading angle is 90°, the elastic stiffness and peak load of the specimen do not change significantly, and the ductility coefficient is reduced by about 40%.

**Keywords:** cold-formed thin-walled steel; structural fireproof integrated panel; screw connection; shear resistance; low cycle reciprocating load

冷弯薄壁型钢墙体结构主要由冷弯薄壁型钢龙骨和镁晶板、定向刨花板 and 水泥纤维板等墙面板通过自攻螺钉连接而成。现有研究表明,钢龙骨和覆面板材之间螺钉连接的损坏是造成剪力墙损坏的重要因素,墙体抗剪强度与钢龙骨和覆面板材之间的自攻螺钉连接的细部抗剪性能有关。

Peterman等<sup>[1]</sup>通过对定向刨花板和石膏板与轻钢龙骨自攻螺钉连接的试验研究,发现自攻螺钉连接的滞回性能主要受面板材质和龙骨壁厚影响,并基于试验结果回归分析出了一种恢复力模型。Kou等<sup>[2]</sup>采用Folz公式拟合了竹-钢板螺钉连接试验的荷载滑移曲线。卢林枫等<sup>[3-4]</sup>通过试验研究发现螺钉间距及数目是影响“螺钉群效率系数”的主要因素,并基于大量试验数据提出了一个适用性更强的计算自攻螺钉群连接名义抗剪承载力的设计公式。邓露等<sup>[5]</sup>通过有限元分析发现螺钉双面剪切连接构件的破坏模式有承压破坏、承压-剪切破坏和剪切破坏3类。石宇等<sup>[6]</sup>研究发现钢板-非钢板自攻螺钉连接件的抗剪承载力主要由螺钉孔边板的承压强度控制。李元齐等<sup>[7]</sup>进行了冷弯薄壁型钢龙骨与OSB板螺钉连接件在单调和低周往复加载下抗剪试验研究,分析了加载速率、螺钉端距、龙骨厚度和面板布置方向等因素对其抗剪性能的影响。陈一笑<sup>[8]</sup>通过对秸秆板-轻钢龙骨自攻螺钉连接进行抗剪试验与数值模拟研究发现,连接件的抗剪性能主要由螺钉间距、钢龙骨壁厚和秸秆板规格控制。赵孟圆<sup>[9]</sup>对4种类型的覆面板材-冷成型钢龙骨自攻螺钉连接件的力学性能进行了试验及数值模拟研究,分析

了板材类型、螺钉端距、螺钉直径、龙骨厚度、加载方式及板材布置方向等因素对连接件破坏模式及抗剪性能的影响。陈伟等<sup>[10]</sup>对冷成型钢龙骨-波特板自攻螺钉连接件进行抗剪试验,分析了波特板密度、螺钉数量和螺钉边距对其抗剪性能的影响。刘佳迪等<sup>[11]</sup>进行了钢板-OSB板和钢板-杨木胶合板单颗自攻螺钉连接的抗剪试验,试验结果表明:两种板材与钢板的自攻螺钉连接主要发生螺帽嵌入木材的延性破坏,并且在循环荷载作用下强度刚度退化明显,由杨木胶合板制成的连接承载力高于OSB板制成的连接。Buonopane等<sup>[12]</sup>根据对轻钢结构墙体的数值模拟分析结果发现:在水平荷载作用下,墙体边柱处的自攻螺钉所承担的剪力作用方向近乎平行于板边,而位于墙体上导轨部位的自攻螺钉所承担的剪力作用方向近乎垂直板边。

结构防火一体板是一种玄武岩纤维改性的碱式硫酸镁复合材料板材,防火性能优异,为A级不燃材料,其力学性能接近或优于常用的结构用定向刨花板,在轻钢体系中具有良好的应用前景。笔者开展了冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接件的单调拉伸及低周往复试验研究,考察板材厚度、加载角度、螺钉直径和螺钉端距等因素对连接件抗剪性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件由冷弯薄壁型钢与结构防火一体板(以下简称防火板)通过自攻螺钉连接组合而成,为考察

螺钉直径、螺钉端距和板材厚度对连接件抗剪性能的影响,设计了如图1所示的试件1。防火板长度为235 mm,宽度为200 mm,板材厚度 $t$ 有12、16、20 mm三种。4片冷弯C型钢长度为200 mm,截面尺寸为89 mm $\times$ 40 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.0 mm(腹板 $\times$ 翼缘 $\times$ 卷边 $\times$ 厚度),钢材等级S350。防火板与冷弯

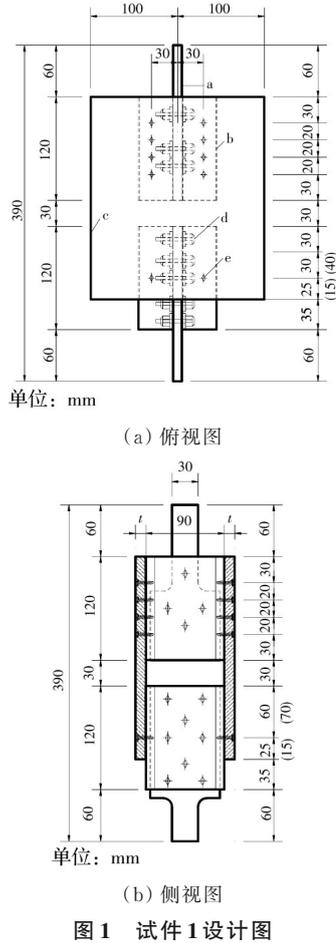


图1 试件1设计图

Fig. 1 Design drawing of the specimen 1

C型钢采用自攻螺钉进行连接,上端为固定端,下端为试验端。固定端每侧采用8颗ST4.8螺钉连接,横向间距60 mm,纵向间距20 mm。试验端根据工况每侧采用两颗ST4.8或ST5.5螺钉连接,横向间距60 mm。螺钉距防火板端部边缘为15、25 mm两种情况,螺钉间距为60 mm。加载角度为加载方向与试验端螺钉与防火板边缘最短垂直距离方向的夹角。为考察加载角度对连接件抗剪性能的影响,在试件1的基础上,设计了试件2和试件3,分别如图2、图3所示,图中a、b、c、d和e分别代表钢板夹具、冷弯C型钢、防火板、螺栓和自攻螺钉。

试件通过两端的“T”形钢板与加载装置夹头进行连接,“T”形钢板厚度为10 mm,固定端“T”形钢板与冷弯C型钢通过4颗M10螺栓进行连接,试验端“T”形钢板与冷弯C型钢通过8颗M10螺栓进行连接。试件分类情况见表1,试件编号规则见图4。

以编号S1.0-12-4.8-MT-B15-1的试件为例,“1.0”代表加载速率为1.0 mm/min,“12”代表防火板板厚为12 mm,“4.8”代表试验端螺钉直径为4.8 mm,“MT”代表加载方式为单调拉伸,“D15”代表试验端螺钉与防火板端部距离为15 mm,“1”代表该试件为该组的第一个重复试件。

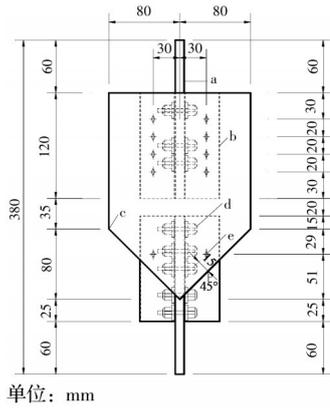
## 1.2 试验装置与加载制度

试验采用微机控制电子万能试验机,试验机型号为CMT5305,准确度等级为0.5级,最大试验力为300 kN,试验装置及试件见图5。该试验机的采集系统可以按照预先设计的程序进行全程自动控制加载,并采集实时数据绘制试验时的荷载-滑移曲线。试验时荷载由试验机两端力传感器测得,试件滑移量由型号为YSJ-C5015的电子应变引伸计测得。引伸计两测点分别布设于上下两片C形钢腹板

表1 试件分类

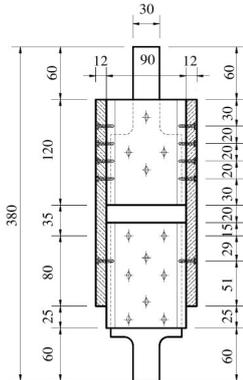
Table 1 Specimens classification

试件编号	加载速率/(mm/min)	面板厚度/mm	螺钉直径/mm	加载方式	螺钉端(边)距/mm	试件数量
S1.0-12-4.8-MT-D15	1.0	12	4.8	单调拉伸	15	1
S1.0-12-4.8-CL-D15	1.0	12	4.8	低周往复	15	4
S1.0-16-4.8-MT-D15	1.0	16	4.8	单调拉伸	15	1
S1.0-16-4.8-CL-D15	1.0	16	4.8	低周往复	15	4
S1.0-20-4.8-MT-D15	1.0	20	4.8	单调拉伸	15	1
S1.0-20-4.8-CL-D15	1.0	20	4.8	低周往复	15	4
S1.0-12-5.5-MT-D15	1.0	12	5.5	单调拉伸	15	1
S1.0-12-5.5-CL-D15	1.0	12	5.5	低周往复	15	4
S1.0-12-4.8-MT-D25	1.0	12	4.8	单调拉伸	25	1
S1.0-12-4.8-CL-D25	1.0	12	4.8	低周往复	25	4
S1.0-12-4.8-MT-B15	1.0	12	4.8	单调拉伸	15	1
S1.0-12-4.8-CL-B15	1.0	12	4.8	低周往复	15	4
S1.0-12-4.8-MT-DB15	1.0	12	4.8	单调拉伸	15	1
S1.0-12-4.8-CL-DB15	1.0	12	4.8	低周往复	15	4



单位: mm

(a) 俯视图

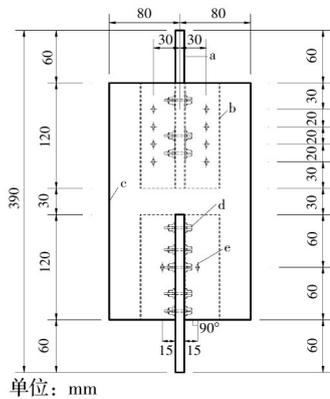


单位: mm

(b) 侧视图

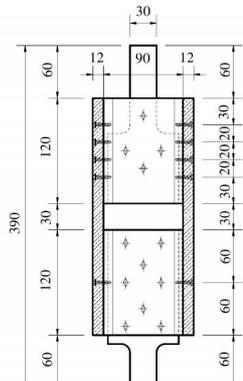
图 2 试件 2 设计图

Fig. 2 Design drawing of the specimen 2



单位: mm

(a) 俯视图



单位: mm

(b) 侧视图

图 3 试件 3 设计图

Fig. 3 Design drawing of the specimen 3

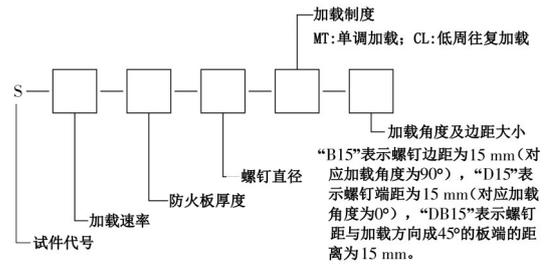


图 4 试件编号规则

Fig. 4 Specimens numbering scheme

位置,测点间距为 50 mm,量程为 ±25 mm。加载时 T 形夹具和 C 形钢之间通过螺栓连接,以确保在拉压往复荷载作用下试件与夹具不发生相对滑动。同时在试件固定端布置自攻螺钉数量足够多,可以忽略固定端的变形对试验结果的影响。



图 5 试验装置及试件图

Fig. 5 Test device and specimen drawing

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[13]</sup>分别进行单调拉伸和低周往复加载,从试件开始加载至破坏均保持相同的加载速率,加载速率均为 1.0 mm/min。

单调加载时保持加载速率恒定,在试件屈服前采用荷载控制进行分级加载,荷载级差为 1 kN,加载至接近屈服荷载时减小荷载级差,试件屈服后采用位移控制分级加载,每级荷载持续约 3 min,直至试件破坏。低周往复加载时,在正式试验前先进行预加反复荷载试验两次,预加载值不超过试件屈服荷载的 30%。低周往复加载按试件的单调加载试验结果计算的位移量控制,在结构屈服前采用力控制分 5 级单循环加载至构件屈服,再以屈服位移的 50% 为级差,每个位移级循环加载 3 次至试件荷载下降到峰值的 85% 时试验终止,低周往复加载制度见图 6。

## 2 试验结果

### 2.1 试验现象

冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接的破坏模式主要有防火板孔壁承压变形、板边撕裂、螺钉倾斜及板材被拉断等。

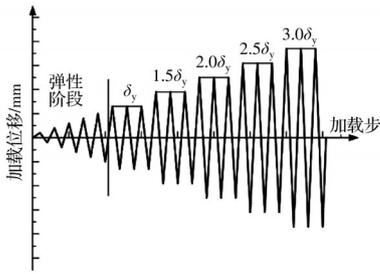
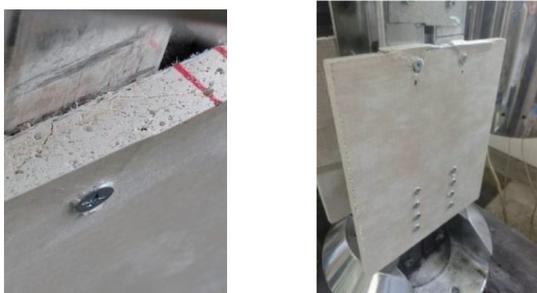


图 6 低周往复加载制度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the low-cycle reciprocating loading system

对于端距为 15 mm 的试件,破坏模式为防火板板边撕裂;对于端距为 25 mm 的试件,破坏模式为防火板孔壁承压变形破坏;对于加载角度为 90°的试件,破坏模式为防火板板材被拉断;对于加载角度为 45°的试件,破坏模式为防火板板边撕裂后板材最终被拉断,且以上 4 种情况都伴随螺钉倾斜现象。在循环加载试验中,防火板表现出明显的脆性特点,加载过程中形成的裂纹表现出与单调加载结果中观察到相似的特征。随着施加的位移不断增加,裂纹处的防火板分离并向上移动,导致试样的剪切能力降低,因此,仅对低周往复加载下部分试件的试验现象进行分析。关于 4 种不同类型连接件的试验现象及主要破坏特征表述如下。

以编号为 S1.0-12-4.8-CL-D15 的试件为例,随着荷载增加,防火板端部侧面出现裂纹并持续扩展,逐渐延伸至防火板表面钉孔位置处(图 7(a));



(a)防火板端部侧面裂纹扩展 (b)防火板钉孔处裂缝贯通



(c) 试验端螺钉倾斜 (d) 防火板端部板边撕裂

图 7 螺钉端距较小试件破坏现象

Fig. 7 Failure of specimens with small screw end distance

当荷载到达峰值时,从螺钉孔位置形成 30°~60°裂缝并向着防火板端部侧面及表面贯通(图 7(b)),同时迅速发展为防火板端部的撕裂状豁口,破坏区域形状为三角形;随着位移的进一步增大,试验端螺钉明显倾斜,防火板端部板边被完全撕裂(图 7(c)、(d))。

以编号为 S1.0-12-4.8-CL-D25 的试件为例,在加载初期,试件无明显变化;随着荷载的增加,螺钉上方防火板表面出现鼓包,呈灯泡状(图 8(a));在往复荷载作用下,鼓包区域面积不断扩大,钉头部分沉入防火板中(图 8(b));随着位移继续的增大,螺钉明显倾斜,从螺钉孔位置形成 30°~60°裂纹并逐渐向着板材的边缘发展;当荷载到达峰值时,防火板端部与钉孔间形成约 45°的贯通裂缝(图 8(c)),其间持续发出螺钉与防火板挤压的清脆响声,破坏时防火板孔壁处有较明显的承压变形,端部较为平整,无明显鼓出。



(a) 螺钉上方防火板表面出现鼓包



(b) 螺钉钉头沉入防火板



(c) 防火板端部与钉孔间形成贯通裂缝

图 8 螺钉端距较大试件破坏现象

Fig. 8 Failure of specimens with large screw end distance

以编号为 S1.0-12-4.8-CL-B15 的试件为例,在往复荷载作用下,自攻螺钉钉头处防火板表层纤维被挤碎,挤碎区域面积沿往复加载方向不断扩大(图 9(a));随着变形的不断增大,钉头处产生沿边距方向发展的表层裂纹(图 9(b));当荷载到达峰值时,钉头处沿边距方向发展为贯通板边的裂缝(图 9(c)),其间持续发出螺钉与防火板挤压的清脆响声,

螺钉略微倾斜;随着位移的继续增大,钉头处水平裂纹向边距反方向扩展,板材出现沿水平裂纹断裂的趋势(图9(d)),螺钉明显倾斜(图9(e));随着位移的进一步增大,部分螺钉滑脱钢龙骨,防火板被拉断(图9(f))。



(a) 钉头位置处防火板表层纤维被挤碎



(b) 钉头处产生沿边距方向发展的表层裂纹



(c) 钉头处沿边距方向发展为贯通板边的裂缝



(d) 钉头处水平裂纹向边距反方向扩展



(e) 试验端螺钉倾斜



(f) 防火板被拉断

图9 螺钉边距较小试件破坏现象

Fig. 9 Failure of specimens with small screw margins

以编号为S1.0-12-4.8-CL-DB15的试件为例,随着荷载增加,自攻螺钉与防火板间发出挤压声;在往复荷载作用下,自攻螺钉钉头处防火板表层纤维被挤碎,挤碎区域向螺钉孔四周扩展(图10(a));随着位移继续增大,荷载到达峰值,钉头处出现与板边垂直的细微表层裂纹(图10(b));随着位移继续增大,钉头处与板边垂直的表层裂纹继续发展;当位移达到约1.5 mm时,钉头处与板边垂直的裂纹贯穿板边(图10(c)),其间持续发出螺钉与防火板挤压的清脆响声,此时螺钉无明显倾斜;随着位移继续增大,试验端每侧的两颗螺钉间产生水平裂

纹(图10(d)),板材出现沿水平裂纹断裂的趋势;随着位移的进一步增大,两颗螺钉间产生的水平裂纹贯穿板材,形成一块三角状的断裂区(图10(e));当位移超过2 mm时,防火板断裂,螺钉明显倾斜(图10(f))。



(a) 钉头处防火板表层纤维被挤碎



(b) 钉头处出现与板边垂直的细微表层裂纹



(c) 钉头处与板边垂直的裂纹贯穿板边



(d) 试验端每侧的两颗螺钉间产生水平裂纹



(e) 两颗螺钉间产生的水平裂纹贯穿板材



(f) 防火板断裂,螺钉明显倾斜

图10 加载角度为45°试件破坏现象

Fig. 10 Failure of the specimens with a loading angle of 45°

## 2.2 荷载-位移曲线

由于所有试件荷载-位移曲线相似,故图11仅给出4个典型试件的滞回曲线及骨架曲线,定义试件受拉时荷载为正值,受压时荷载为负值。

试件每侧防火板的被测试部位处各有2颗螺钉,两侧共对称布置4颗螺钉,数据处理时荷载采用4颗螺钉连接的承载能力之和,螺钉连接的滑移变形采用位移引伸计所测位移值来反映。

根据承载力及变形的取值方法,得到了冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接件的荷载与

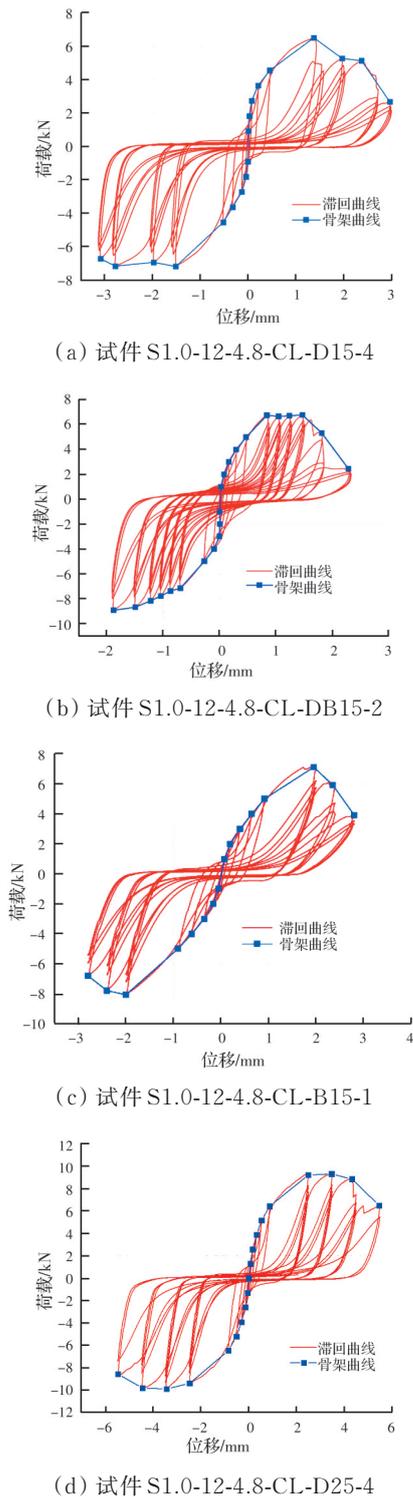


图 11 典型试件的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of typical test specimens

位移之间的关系曲线,见图 11。从图 11 可以看出,开始加载时曲线近似呈现为线性,但线性段非常短,之后曲线斜率变小,刚度明显降低,在经过较长的上升段后,刚度再一次下降并迅速达到荷载峰值点,此时因钉孔周围防火板几乎完全开裂,螺钉开始倾斜,承载力下降。对于端距为 25 mm 的试件,承载力下降段较为平缓,主要原因是较大的端距提

供了良好的塑性发展空间。对于边距为 15 mm 的试件,达到峰值荷载后的曲线下降较快,主要原因是加载方向垂直于螺钉边距方向,板材沿边距方向开裂后立刻与螺钉脱离,并沿边距相反的方向将防火板剪断。

### 2.3 特征参数的确定

根据 ECCS<sup>[14]</sup>建议,取荷载-位移曲线上上升段荷载为 40% 峰值荷载  $F_m$  对应点为弹性点。弹性点对应荷载为弹性荷载  $F_e$ ,对应位移为弹性位移  $\delta_e$ 。弹性点的割线刚度为弹性刚度  $K_e = F_e / \delta_e$ 。

屈服点根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[13]</sup>确定(以下简称规程),屈服荷载  $F_y$  按照骨架曲线所包面积互等的办法确定,相应的变形为屈服变形  $\delta_y$ 。取荷载-位移曲线上的最高点作为峰值点,相应的荷载为峰值荷载  $F_m$ ,位移为峰值变形  $\delta_m$ 。破坏荷载  $F_u$  及相应变形  $\delta_u$  取试件在最大荷载出现之后,随位移增加而荷载下降至最大荷载的 85% 时的相应荷载和位移。

根据规程<sup>[13]</sup>,延性系数  $\mu$  为极限变形与屈服变形之比,即  $\mu = \delta_u / \delta_y$ 。按该方法得到的冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接的特征参数见表 2。

## 3 自攻螺钉连接性能影响因素分析

对表 2 中的试验结果进行分析时,主要将所有重复试件在低周往复加载时的弹性刚度、峰值荷载及延性系数的均值进行比较分析。

### 3.1 螺钉端距的影响

图 12 对比了试件在螺钉端距为 15、25 mm 时弹性刚度、峰值荷载以及延性系数的大小,随着螺钉端距增大,试件的峰值荷载、弹性刚度及延性系数均呈上升的趋势。图 12 分别给出了两种螺钉端距下冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接特征参数的比较情况,增加螺钉端距对于试件弹性刚度没有明显影响,且峰值荷载与延性系数提高不明

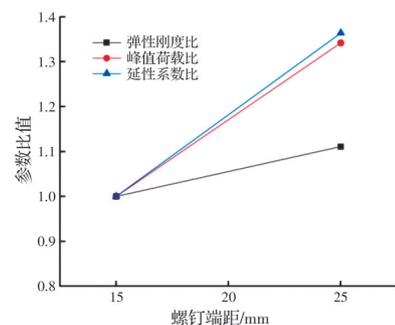


图 12 不同螺钉端距下的特征参数对比

Fig. 12 Comparison of characteristic parameters at different screw end distance

显。两种螺钉端距下的试件弹性刚度的比值为1.111,峰值荷载的比值为1.342,延性系数的比值为1.364。螺钉端距为25 mm的试件对比螺钉端

距为15 mm的试件,试件的绝对变形能力得到大幅提升,试件破坏时螺钉连接的性能已得到有效发挥。

表2 主要试验结果  
Table 2 Main test results

试件编号	序号	$K_e$ /(kN/mm)	$\delta_y$ /mm	$F_y$ /kN	$\delta_m$ /mm	$F_m$ /kN	$\delta_u$ /mm	$F_u$ /kN	$u$
S1.0-12-4.8-MT-D15	1	9.96	0.97	6.68	2.02	6.73	2.51	5.72	2.59
	1	8.35	1.07	4.99	1.61	5.91	3.68	5.03	3.43
S1.0-12-4.8-CL-D15	2	13.44	0.92	5.24	1.60	6.53	2.77	5.55	3.01
	3	10.01	0.49	5.48	0.84	7.00	1.83	5.94	3.70
	4	12.24	0.55	4.34	1.37	6.44	1.87	5.47	3.40
S1.0-16-4.8-MT-D15	1	18.03	1.09	6.29	1.76	7.73	2.74	6.57	2.51
	1	16.47	0.54	6.34	0.74	7.44	1.51	6.32	2.79
S1.0-16-4.8-CL-D15	2	17.51	0.93	5.65	1.19	6.88	2.64	5.85	2.84
	3	15.69	0.74	6.47	1.25	7.76	1.94	6.60	2.63
	4	18.99	1.00	6.47	1.51	7.89	2.81	6.71	2.81
S1.0-20-4.8-MT-D15	1	16.54	2.06	7.93	2.28	9.25	4.08	7.86	1.98
	1	17.94	1.21	7.39	1.84	9.20	2.86	7.82	2.35
S1.0-20-4.8-CL-D15	2	24.75	1.01	6.93	1.73	8.68	2.93	7.37	2.89
	3	17.66	1.42	7.92	2.61	9.17	3.28	7.80	2.30
	4	23.39	1.09	6.33	1.85	8.77	2.48	7.45	2.26
S1.0-12-5.5-MT-D15	1	33.15	0.52	7.18	0.99	8.63	1.43	7.33	2.75
	1	41.37	0.26	6.96	0.59	8.56	1.01	7.28	3.83
S1.0-12-5.5-CL-D15	2	42.50	0.51	7.45	1.15	9.30	1.85	7.90	3.64
	3	31.92	0.46	6.46	0.81	7.78	1.80	6.61	3.91
	4	32.74	0.42	6.81	0.85	7.66	1.47	6.51	3.50
S1.0-12-4.8-MT-D25	1	16.74	1.81	7.39	3.44	8.98	7.42	7.63	4.09
	1	12.26	1.36	6.66	2.46	8.21	6.41	6.98	4.71
S1.0-12-4.8-CL-D25	2	10.32	1.54	6.57	2.54	8.01	6.73	6.81	4.37
	3	14.10	0.97	7.09	1.83	9.06	4.94	7.70	5.08
	4	12.24	0.99	7.46	2.32	9.44	4.27	8.03	4.31
S1.0-12-4.8-MT-B15	1	9.02	0.97	5.79	1.32	7.07	1.98	6.01	2.04
	1	7.89	1.25	6.01	1.88	7.1	2.32	6.04	1.85
S1.0-12-4.8-CL-B15	2	10.12	1.00	5.87	1.48	6.97	1.91	5.92	1.90
	3	8.89	1.47	5.38	2.10	6.26	2.98	5.32	2.02
	4	10.02	1.27	4.63	1.39	6.55	2.86	5.57	2.25
S1.0-12-4.8-MT-DB15	1	23.05	0.65	6.22	1.36	7.27	1.65	6.18	2.55
	1	20.59	0.88	5.48	2.07	6.82	2.30	5.79	2.61
S1.0-12-4.8-CL-DB15	2	20.60	0.56	5.52	1.47	6.77	1.73	5.76	3.08
	3	21.79	1.10	4.88	1.91	6.05	3.63	5.14	3.30
	4	23.53	0.40	5.83	1.17	7.19	1.34	6.11	3.36

### 3.2 面板厚度的影响

图13为3种面板厚度下冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接特征参数的比较情况。对比12 mm板厚试件的抗剪性能,防火板厚为16 mm的试件组弹性刚度的比值为1.559,峰值荷载的比值为1.158,延性系数的比值为0.818;对比12 mm板厚试件的抗剪性能,防火板厚为20 mm的试件组弹性刚度的比值为1.901,峰值荷载的比值为1.384,延性系数的比值为0.724。通过对比分析可

以发现,防火板厚度每增加4 mm,试件的弹性刚度提升约45%,弹性刚度提升约20%,延性系数降低约15%。试件的防火板厚度与试件的峰值荷载和弹性刚度呈现明显的线性正相关性,与试件的延性系数呈现明显的线性负相关性,原因是随着面板厚度的增加,面板对螺钉的嵌固作用越来越好,螺钉更不易发生倾斜,整体滑移变形小,试件延性降低。

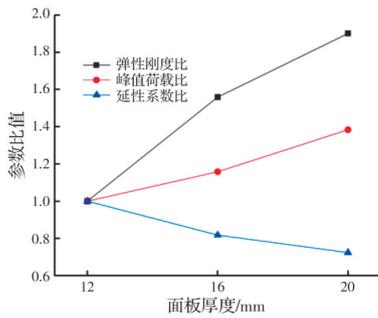


图13 不同板厚下的特征参数对比

Fig. 13 Comparison of characteristic parameters at different plate thicknesses

### 3.3 螺钉直径的影响

图14为不同螺钉直径下自攻螺钉连接件的弹性刚度、峰值荷载及延性系数的对比情况。试验端采用5.5 mm直径螺钉的试件对比试验端采用4.8 mm直径螺钉的试件,弹性刚度比值为3.373,峰值荷载的比值为1.287,延性系数的比值为1.099。整体来看,螺钉直径越大,孔壁承压的面积越大,峰值荷载提升;钉头与防火板表面接触面积越大,嵌固作用更好,螺钉在加载早期更不易发生倾斜,弹性刚度大幅提升;延性系数变化不明显。

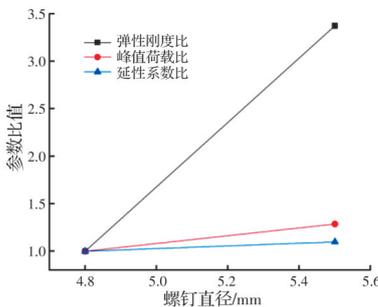


图14 不同螺钉直径下的特征参数对比

Fig. 14 Comparison of characteristic parameters under different screw diameters

### 3.4 加载角度的影响

对试件分别进行了螺钉与防火板边缘最短垂直距离均为15 mm时3种加载角度(0°、45°和90°)情况下自攻螺钉连接的低周往复加载试验,分析了加载角度对自攻螺钉连接抗剪性能的影响。试件的特征参数对比结果如图15所示,加载角度为45°的试件与加载角度为0°的试件弹性刚度的比值为1.964;峰值荷载未有明显差别,其比值为1.037;延性系数呈下降的趋势,其比值为0.912。加载角度为90°的试件对比加载角度为0°的试件弹性刚度的比值为0.838;峰值荷载未有明显差别,其比值为1.039;延性系数下降,其比值为0.592。不同加载角度试件破坏现象存在一定差异性,故特征参数的大小与加载角度的大小无明显相关性。

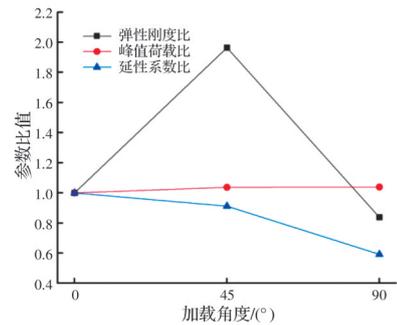


图15 不同加载角度下的特征参数对比

Fig. 15 Comparison of characteristic parameters at different loading angles

## 4 结论

针对冷弯薄壁型钢-结构防火一体板自攻螺钉连接进行抗剪试验研究,得到如下主要结论:

1)对于试验端分别采用直径为4.8、5.5 mm螺钉的试件,试件的峰值荷载及延性系数与螺钉直径无明显相关性,弹性刚度随着螺钉直径增大而显著提升。

2)试件的弹性刚度随着螺钉端距由15 mm增大到25 mm无明显变化,而峰值荷载和延性系数均提高了约35%;随着防火板厚由12 mm增大到20 mm,试件的峰值荷载提高了约40%,弹性刚度提高了约90%,延性系数降低了约30%。

3)加载角度为45°的试件对比0°试件的特征参数,弹性刚度提高了约100%,峰值荷载及延性系数无明显变化;加载角度为90°的试件对比0°试件的特征参数,弹性刚度及峰值荷载无明显差别,延性系数降低了约40%。

4)加载角度为0°的试件主要呈现防火板端部撕裂破坏,螺钉端距为25 mm时试件主要呈现防火板孔壁承压破坏;加载角度为90°的试件主要呈现板材被拉断破坏;加载角度为45°的试件主要呈现防火板板边撕裂后板材最终被拉断;大部分试件的自攻螺钉存在倾斜现象。

## 参考文献

- [1] PETERMAN K D, NAKATA N, SCHAFER B W. Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 254-264.
- [2] KOU Y F, TIAN L M, HAO J P, et al. Lateral resistance of the screwed connections of original bamboo [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103601.
- [3] LU L F, WANG D, WANG W, et al. Shear bearing capacity of self-drilling screw group connections of CFS sheets [J]. Structures, 2022, 35: 160-171.

- [4] 卢林枫, 张亚平, 方文琦, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗剪性能试验研究及数值分析 II: 数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3493-3502.  
LU L F, ZHANG Y P, FANG W Q, et al. Experimental investigation and numerical analysis on shear-bearing capacity for self-drilling screw connections of cold-formed thin-walled steel II: Numerical analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3493-3502. (in Chinese)
- [5] 邓露, 刘文豪, 刘定荣, 等. 自攻螺钉双面剪切连接抗剪性能研究[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 81-94.  
DENG L, LIU W H, LIU D R, et al. Research on the shear performance of self-drilling screw double-sided shear connections [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 81-94. (in Chinese)
- [6] 石宇, 王身伟, 刘永健. 冷弯薄壁型钢单颗自攻螺钉抗剪连接性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 57-64.  
SHI Y, WANG S W, LIU Y J. Research on shear behavior of single tapping screw connection in cold-formed thin-wall steel structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 57-64. (in Chinese)
- [7] 李元齐, 马荣奎, 何慧文. 冷弯薄壁型钢与结构用 OSB 板自攻螺钉连接性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 48-56.  
LI Y Q, MA R K, HE H W. Experimental study on behavior of screw connections for cold-formed thin-walled steel and structural OSB boards [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 48-56. (in Chinese)
- [8] 陈一笑. 秸秆板-轻钢龙骨自攻螺钉连接抗剪性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
CHEN Y X. Study on shear behavior of straw board-light steel keel tapping screw connection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [9] 赵孟圆. 冷弯薄壁型钢连接件力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
ZHAO M Y. Study on mechanical properties of cold-formed thin-walled steel connectors [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [10] 陈伟, 叶继红, 姜健, 等. 冷成型钢龙骨-覆面板材自攻螺钉连接力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(Sup1): 418-425.  
CHEN W, YE J H, JIANG J, et al. Experimental study on mechanical behavior of cold-formed steel stud-to-sheathing screw connections [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup1): 418-425. (in Chinese)
- [11] 刘佳迪, 张安玲, 陈志华, 等. 钢木组合构件自攻螺钉连接抗剪性能试验及理论模型研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(7): 680-689.  
LIU J D, ZHANG A L, CHEN Z H, et al. Experimental and theoretical model study on the shear behavior of the self-tapping screw connections of steel-timber composite members [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(7): 680-689. (in Chinese)
- [12] BUONOPANE S G, BIAN G, TUN T H, et al. Computationally efficient fastener-based models of cold-formed steel shear walls with wood sheathing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 110: 137-148.
- [13] 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Specification of test methods for earthquake resistant building: JGJ/T101—1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [14] ECCS Technical Committee 1, Technical Working Group 1. 3. Recommended testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cyclic loads [S]. Brussels: ECCS, 1985.

(编辑 胡玲)