

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.021

## 焊缝补强型栓焊并用连接受剪性能研究

李翔<sup>1</sup>, 王成刚<sup>1</sup>, 沈奇罕<sup>1,2</sup>, 陈安英<sup>1,3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工大共达工程检测试验有限公司, 安徽 合肥 230051)

**摘要:**为研究塞焊缝、侧焊缝、端焊缝 3 种焊缝补强型栓焊并用连接的受剪性能和破坏机理, 文章对 11 个单一连接试件和 10 个焊缝补强型栓焊并用连接试件进行静力拉伸试验, 通过对变形和承载性能的系统分析, 明确不同焊接形式对螺栓连接受剪性能的补强效果。结果表明:侧焊缝补强型连接的破坏模式为栓杆滑移, 有较好的变形能力, 属延性破坏;端焊缝补强型连接的破坏模式为焊缝断裂, 属脆性破坏, 但承载性能高;塞焊缝补强型连接的破坏模式为塞焊缝被剪断, 属脆性破坏, 但方形塞焊缝对 2 种连接方式承载力利用率最大, 因此根据不同加固要求给出了不同补强方式的建议。

**关键词:**栓焊补强连接; 受剪性能; 破坏机理; 承载性能; 变形能力

**中图分类号:**TU392.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0713-08

### Study on shear performance of bolted joints reinforced with welds

LI Xiang<sup>1</sup>, WANG Chenggang<sup>1</sup>, SHEN Qihan<sup>1,2</sup>, CHEN Anying<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 3. Hefei University of Technology Gongda Engineering Inspection and Testing Co., Ltd., Hefei 230051, China)

**Abstract:** In order to further study the shear performance and failure mechanism of the bolted joints reinforced with plug-weld, side-weld and end-weld, a static tensile experimental study was carried out by testing eleven single type connection joint specimens and ten weld reinforced bolted joint specimens. The strengthening effect of various welds on the shear performance of the bolted joints was revealed by comparing their deformation and bearing capacities. The results showed that the failure mode of the side-weld reinforced bolted joint was the slipping of bolt rod, which had a good deformation capacity, and it belonged to the ductile failure. The failure mode of the end-weld reinforced bolted joint was the weld fracture, which had a high load bearing capacity, but it belonged to the brittle failure. The failure mode of the plug-weld reinforced bolted joint was the shear failure of the weld, and it belonged to brittle failure as well, while the square plug-weld reinforcement type had the largest utilization rate on the strengths of the two connection types. Therefore, suggestions for different reinforcement methods were given according to various strengthening requirements.

**Key words:** weld reinforced bolted joint; shear performance; failure mechanism; bearing capacity; deformation capacity

钢结构连接中最重要的连接形式是螺栓连接和焊缝连接, 钢结构连接设计中一般仅作单一连接设计。对出现由于设计、施工使用管理不当、材

料质量不达标、使用功能改变及耐久性不足等原因的钢结构建筑, 常常需要对钢结构节点中已承载的摩擦型高强度螺栓采用不同形式焊缝进行

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 安徽省住房和城乡建设科学技术计划资助项目(2021-YF33); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2022GDSK0062)

作者简介: 李翔(1999—), 男, 安徽肥东人, 合肥工业大学硕士生;

王成刚(1974—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: 767717839@qq.com.

加固补强,这被称为焊缝补强型栓焊并用连接。

目前,对于焊缝补强型栓焊并用连接的受剪性能和破坏机理,已有一些试验和模拟研究。文献[1]主要分析不同焊脚尺寸和焊缝长度的侧焊缝与高强摩擦型螺栓并用连接试件的承载性能和破坏模式;文献[2]分析端焊缝和不同焊脚尺寸的侧焊缝补强试件的破坏形式,并与规范对比分析;文献[3]探究高强螺栓、侧焊缝、端焊缝 3 种连接方式的不同组合的并用效率和变形协调性;文献[4]探究不同尺寸的高强螺栓与不同焊脚尺寸的侧焊缝并用连接试件的破坏模式和承载力,分析栓焊比对并用试件的影响;文献[5]分析纯螺栓连接试件在不同受损程度下采用相同焊缝加固,以及在相同受损程度下采用不同焊脚尺寸和焊缝长度的侧焊缝加固的承载力性能和变化规律。综合分析已有研究成果,对于焊缝补强型栓焊并用连接的研究,目前多数仅考虑了个别参数对补强型试件的影响,而焊缝形式、焊脚尺寸、焊缝长度、施焊前螺栓的受载程度等参数对补强加固试件的系统研究报道较少。

因此,本文设计 11 个单一连接试件和 10 个焊缝补强型栓焊并用连接试件进行静力拉伸试验,进一步探究不同类型焊缝补强型试件的受剪

性能和破坏模式。通过分析各个参数的影响,对 3 种不同形式焊缝补强型栓焊并用连接试件的变形和承载力优劣进行分析,给出不同条件下的补强施工建议。研究结果旨在为焊缝补强型栓焊并用连接节点在实际工程中的应用提供科学依据。

## 1 试验概括

### 1.1 试验设计与加工

试件加工共 21 套,均采用单盖板拼接形式,其中 1<sup>#</sup>~11<sup>#</sup> 是单一连接试件,12<sup>#</sup>~21<sup>#</sup> 是焊缝补强型试件。本文采用 Q235B 钢材,其中芯板厚为 16 mm,盖板厚为 20 mm。螺栓采用大六角头高强度螺栓 M16(10.9 级)和 M20(10.9 级),螺栓孔尺寸分别为芯板孔和盖板孔直径均 18 mm,芯板和盖板孔直径均 22 mm,避免摩擦型高强度螺栓连接时孔壁承压。螺栓预紧力通过扭矩扳手进行施加,对连接板接触面进行喷砂处理,依据 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》<sup>[6]</sup>,各类试件设计参数见表 1 所列。表 1 中:SW 为圆形塞焊缝;CF 为方形塞焊缝;CW 为侧焊缝;DW 为端焊缝;其后缀为焊缝尺寸或螺栓规格;塞焊缝焊缝孔深为 8 mm; $N_v$  指摩擦型高强度螺栓连接试件的滑移荷载力。

表 1 各试件设计参数

试件编号	试件连接规格	试件连接形式
1 <sup>#</sup>	SW-24	圆形纯塞焊缝连接(焊孔尺寸为 24 mm)
2 <sup>#</sup>	SW-26	圆形纯塞焊缝连接(焊孔尺寸为 26 mm)
3 <sup>#</sup>	CF24-40	方形纯塞焊缝连接(焊孔尺寸为 24 mm×40 mm)
4 <sup>#</sup>	CF26-40	方形纯塞焊缝连接(焊孔尺寸为 26 mm×40 mm)
5 <sup>#</sup>	CW6. 5-80	侧面角焊缝纯焊连接(焊脚尺寸为 6.5 mm,长度 80 mm)
6 <sup>#</sup>	CW6. 5-120	侧面角焊缝纯焊连接(焊脚尺寸为 6.5 mm,长度 120 mm)
7 <sup>#</sup>	CW8-80	侧面角焊缝纯焊连接(焊脚尺寸为 8.0 mm,长度 80 mm)
8 <sup>#</sup>	DW6. 5-120	端面角焊缝纯焊连接(焊脚尺寸为 6.5 mm,长度 120 mm)
9 <sup>#</sup>	DW6. 5-180	端面角焊缝纯焊连接(焊脚尺寸为 6.5 mm,长度 180 mm)
10 <sup>#</sup>	B4M16	摩擦型高强度螺栓纯栓连接(螺栓直径为 16 mm)
11 <sup>#</sup>	B4M20	摩擦型高强度螺栓纯栓连接(螺栓直径为 20 mm)
12 <sup>#</sup>	B4M16+CW6. 5-80(0.5 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.5 $N_v$ 拉力下与侧焊缝并用
13 <sup>#</sup>	B4M16+CW6. 5-80(0.8 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.8 $N_v$ 拉力下与侧焊缝并用
14 <sup>#</sup>	B4M20+CW6. 5-80(0.5 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.5 $N_v$ 拉力下与侧焊缝并用
15 <sup>#</sup>	B4M20+CW6. 5-80(0.8 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.8 $N_v$ 拉力下与侧焊缝并用
16 <sup>#</sup>	B4M20+DW6. 5-120(0.5 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.5 $N_v$ 拉力下与端焊缝并用
17 <sup>#</sup>	B4M20+DW6. 5-120(0.8 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.8 $N_v$ 拉力下与端焊缝并用
18 <sup>#</sup>	B4M20+SW24(0.5 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.5 $N_v$ 拉力下与塞焊缝并用
19 <sup>#</sup>	B4M20+SW24(0.8 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.8 $N_v$ 拉力下与塞焊缝并用
20 <sup>#</sup>	B4M20+CF24-40(0.5 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.5 $N_v$ 拉力下与槽焊缝并用
21 <sup>#</sup>	B4M20+CF24-40(0.8 $N_v$ )	摩擦型高强度螺栓在 0.8 $N_v$ 拉力下与槽焊缝并用

加工控制过程中所有板件均去除孔边的毛刺,连接板都已压平,板边侧边均刨平,装配时画

出中心线并对尺寸精度严格控制。

试件制作时,采用三面围焊焊缝连接对非破

坏试验端进行处理,确保该端头在试验中不发生破坏。对于摩擦型高强度螺栓纯栓连接试件,通过螺栓将上拼接板与盖板连接起来,再通过扭矩扳手对施加螺栓预紧力,最后检测每个螺栓预紧力达到试验要求;对于纯焊缝连接试件,通过不同形式焊缝将上拼接板与盖板连接起来,然后对不同焊缝质量及强度进行检测,确保各焊缝质量及强度满足试验设计要求;对于焊缝补强型试件,先通过摩擦型高强度螺栓将上拼接板与盖板连接起来后,使用扭矩扳手施加螺栓预紧力,检测结果表明预紧力达到试验要求。最后待试验加载至目标荷载,再对试件进行施焊,并严格控制焊缝焊接工艺,探伤检测结果表明各补强型焊缝质量达到试验要求。

试件加工尺寸如图 1 所示。

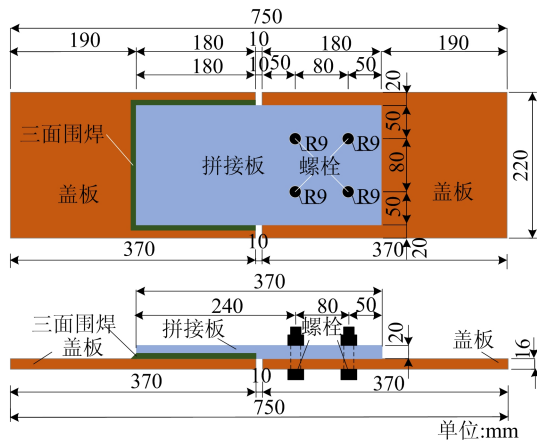


图 1 试件加工尺寸

## 1.2 材料性能试验

### 1.2.1 连接副扭矩系数试验

取大六角高强度螺栓连接副 M16×70 及 M20×70 各 8 套,采用高强度螺栓检测仪 YJZ-500EII 分别进行连接副扭矩系数试验,试验结果见表 2 所列。

表 2 螺栓连接副的扭矩系数试验数据

试件编号	扭矩系数	
	M16×70	M20×70
1	0.117	0.143
2	0.115	0.133
3	0.119	0.134
4	0.111	0.129
5	0.109	0.130
6	0.118	0.130
7	0.105	0.128
8	0.102	0.140

根据 GB 50017—2020《钢结构设计规范》<sup>[7]</sup>可知,一个 M16(10.9 级)摩擦型高强度螺栓的预拉力为 100 kN,一个 M20(10.9 级)摩擦型高强度螺栓的预拉力为 155 kN。由表 2 可知。M16 和 M20 螺栓扭矩系数平均值分别为 0.112、0.133。根据 GB/T 1231—2006《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》<sup>[8]</sup>可知,扭矩系数计算公式为:

$$K = T / (Pd) \quad (1)$$

其中: $T$  为施拧扭矩; $P$  为螺栓预拉力; $d$  为螺栓的螺纹公称直径。

由扭矩系数公式可得:1 个 M16 高强度螺栓的施拧扭矩为 179.2 N·m,取值为 180 N·m;1 个 M20 高强度螺栓的施拧扭矩为 412.3 N·m,取值为 415 N·m。通过扭矩扳手对高强度螺栓施加预紧力。

### 1.2.2 Q235B 钢板材性试验

设计制作 3 个板厚为 16 mm 的材料性能试件,使用 CMT5105 型电子万能试验机进行拉伸试验,试验加载制度和测量装置依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[9]</sup>,在试件中部平直段贴应变片实测应变,再换算为截面应力。

由钢材拉伸试验可得,16 mm 厚 Q235B 钢板屈服强度为 271 MPa,极限强度为 417 MPa,伸长率为 32%。

### 1.2.3 塞焊缝打孔深度试验

为确定塞焊缝的最优打孔深度,试验以圆形塞焊缝为例,设计了 2、6、8、12 mm 这 4 种塞焊缝深度,分别占腹板厚度的 1/8、3/8、4/8、6/8,并对相应的试件进行静力拉伸试验。从试验数据得出纯塞焊缝单一连接试件的承载力及位移见表 3 所列。

表 3 中,SW 为圆形塞焊缝,其前缀为塞焊缝打孔深度,其后缀为塞焊缝焊孔尺寸。

表 3 纯塞焊缝单一连接试件的破坏形式及承载力

试件连接规格	破坏形式	承载力/kN	位移/mm
2-SW-24	塞焊缝断裂	180.12	0.53
12-SW-24	塞焊缝断裂	159.69	0.54
8-SW-24	塞焊缝断裂	195.04	0.55
6-SW-24	塞焊缝断裂	150.04	0.43
8-SW-24	塞焊缝断裂	185.04	0.46

由表 3 可知:5 个不同嵌入深度塞焊缝连接试件的破坏形式相同,都为塞焊缝断裂,破坏时变

形相差不大,峰值承载力有一定的区别,其中 2 个深度为 4/8 板厚的塞焊缝峰值承载力最大,其次是深度为 1/8 板厚的塞焊缝,6/8 板厚和 3/8 板厚的塞焊缝。因此为防止打孔深度过小,导致焊接区域粘结力不足,或打孔深度过大,加大焊接难度,影响深层焊接质量,故塞焊缝的打孔深度取腹板厚度的 1/2 比较合理。

### 1.3 试验装置

采用 WAW-1000EW 万能试验机进行加载, DH3818Y 静态应变测试仪收集应变数据,应变式位移传感器测量变形,试验加载及量测装置如图 2 所示。

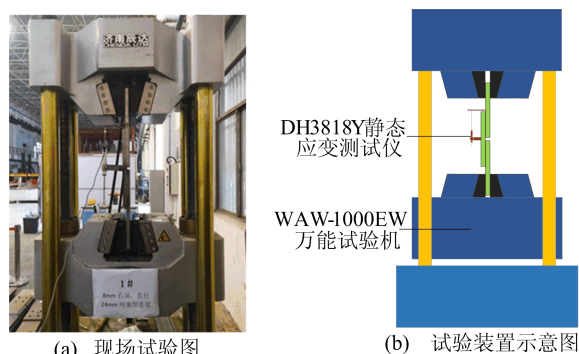


图 2 试验加载及量测装置

### 1.4 试验加载制度

对于单一连接试件,试验轴向拉伸荷载的加载采用力和位移混合控制的加载制度。在正式开始试验前,先对节点进行预加载制。采用荷载控制加载,以试件预估屈服荷载的 15% 为一级进行逐级增加,直到荷载达到预估屈服荷载的 85% 为

止,为方便采集各级荷载下节点位移数据,每加一级荷载持荷 2 min。节点屈服荷载达到预估荷载的 85% 后改为位移控制,以 0.05 mm/min 的速度进行加载,直至荷载-位移曲线出现下降。即焊缝被拉断或高强度螺栓出现滑移时,认为节点已经破坏,即可停止试验。

对于焊缝补强型试件,焊缝补强型试件也采用力和位移混合控制加载制度,在正式开始试验前,先对节点进行预加载制。试验开始先采用荷载控制加载,加载到摩擦型高强度螺栓滑移荷载的 50% 或者 80% 后,开始持荷 1 h,然后对试件进行施焊,待焊缝冷却 24 h 后,采用位移控制继续加载,以 0.05 mm/min 的速度进行加载,直至荷载-位移曲线出现水平阶段。即摩擦型高强度螺栓出现滑移或焊缝断裂,认为节点已经破坏,即可停止试验。

## 2 试验现象与破坏特征

### 2.1 试件试验过程及现象

由表 1 可知:单一连接试件有 11 个,共 4 种不同形式的连接;焊缝补强型试件有 10 个,共 3 种不同形式的连接。

同种形式连接试件的破坏过程和破坏状态基本相同,因此从每种形式连接试件中选取一个典型试件,分别介绍同类型连接的试验过程和破坏现象,如图 3 所示,图 3 给出了 1#、5#、8#、10# 这 4 个单一连接试件和 14#、16#、19# 这 3 个补强型试件的试验照片。

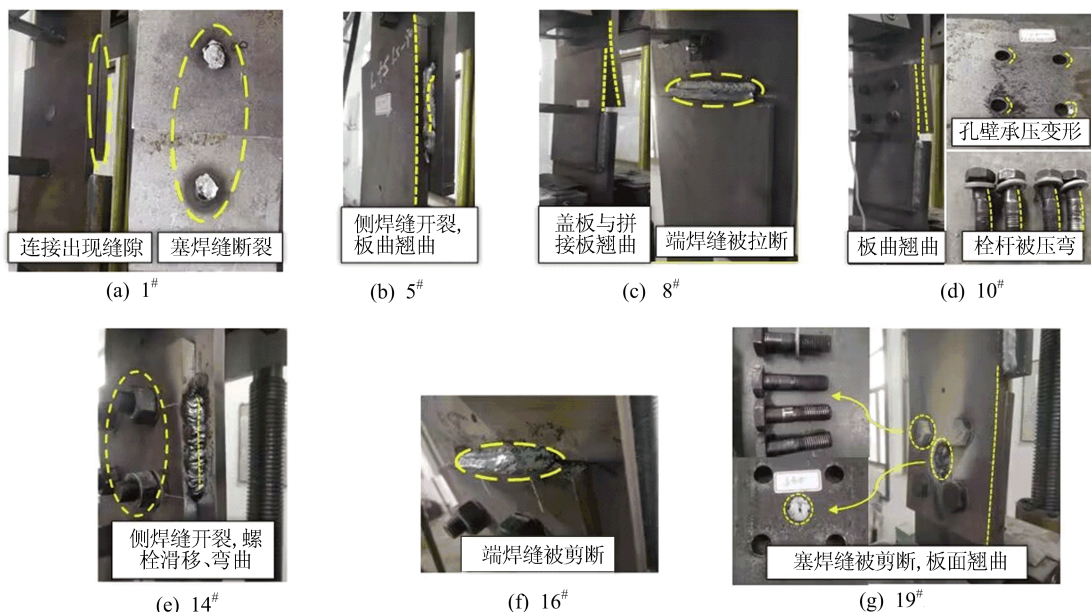


图 3 试件破坏形态

1) 1<sup>#</sup>圆形纯塞焊缝连接试件的破坏如图3a所示。当荷载加载到约峰值荷载的75%时,盖板与上连接板拼接位置处出现细微空隙。荷载继续增大到195 kN,相应位移为0.46 mm时,盖板与上连接板拼接位置处空隙变大。随后荷载下降,塞焊缝突然被剪断,试件破坏,试验加载结束。

2) 5<sup>#</sup>侧面角焊缝纯焊连接试件的破坏如图3b所示。当荷载加载到约峰值荷载的85%时,盖板与上下连接板拼接位置处出现轻微的翘曲现象。当荷载继续增大到425 kN、相应位移为0.56 mm时,可观察到侧焊缝出现细微裂缝。随后荷载下降,盖板与上下连接板拼接位置翘曲越加明显,侧焊缝的裂缝继续变长加深,最终侧焊缝断裂,试件破坏,试验加载结束。

3) 8<sup>#</sup>端面角焊缝纯焊连接试件的破坏如图3c所示。当荷载加载到约峰值荷载的75%时,盖板与上下连接板拼接位置处出现较大的翘曲现象。当荷载继续增大到390 kN、相应位移为0.45 mm时,可观察到端焊缝出现细微裂缝。随后荷载下降,端焊缝的裂缝继续变长加深,盖板与上下连接板拼接位置翘曲越加明显,最终端焊缝断裂,试件破坏,试验加载结束。

4) 10<sup>#</sup>摩擦型高强度螺栓纯栓连接试件的破坏如图3d所示。当荷载加载到约螺栓滑移荷载的80%时,盖板与上下连接板拼接位置处均出现了翘曲现象。当荷载加大至摩擦荷载的最大值205 kN、相应位移为0.48 mm时,外力不再提升,说明螺栓已产生滑移破坏,且板件表面有滑动过的痕迹。此后螺栓芯杆与孔壁接触,栓杆承压弯曲,试验加载结束。

5) 14<sup>#</sup>试件的破坏如图3e所示。在施加侧焊缝补强之前,仅4个M20摩擦型高强度螺栓连接受力,荷载逐级加载到预估承载力的0.5倍,试件各部分无明显变化。此时开始持荷1 h,施加侧焊缝补强措施,焊接完毕后,待焊缝冷却24 h,并进行探伤检测合格后,开始继续加载。当荷载加载到约峰值荷载的80%时,盖板与上下连接板拼接位置处均出现轻微翘曲现象。荷载继续增大至503 kN,相应位移为0.47 mm时,螺栓产生滑移,可认为试件已破坏,试验加载结束。

6) 16<sup>#</sup>试件的破坏如图3f所示。同样施加端焊缝补强,当荷载加载到约峰值荷载的75%时,盖板与上下连接板拼接位置处均出现翘曲现象。当荷载继续增大至530 kN、相应位移为0.45 mm时,端焊缝突然出现贯穿裂缝,随后外力

不可增加,螺栓产生滑移,可认为试件已破坏,试验加载结束。

7) 19<sup>#</sup>试件的破坏效果如图3g所示。同样施加塞焊缝补强,其中持荷大小为预估承载力的0.8倍。当荷载加载到约峰值荷载的75%时,盖板与上下连接板拼接位置处均出现轻微翘曲现象。当荷载继续增大至316 kN、相应位移为0.46 mm时,出现塞焊缝断裂的声音,随后外力不可增加,螺栓产生滑移,可以认为试件已遭受破坏,试验加载结束。

## 2.2 试件破坏特征

试验表明焊缝补强型栓焊并用连接试件破坏时,盖板与拼接板出现翘曲、空隙,或螺栓产生滑移现象,最终破坏形态为焊缝的破坏或栓杆滑移。翘曲是由于试件只设置了一侧拼接板,受力点与连接截面存在偏心距,在受拉时产生弯矩,发生翘曲现象。

单一连接试件和焊缝补强型试件这2种不同连接形式的破坏过程和特征存在一定的差异,分述如下。

单一连接方式的破坏模式为:①塞焊缝连接的破坏形式表现为盖板与拼接板连接之间出现缝隙,并且缝隙逐渐变大,最终塞焊缝横截面剪切破坏;②侧焊缝连接的破坏形式表现为盖板与拼接板连接位置出现轻微翘曲,最终侧焊缝出现裂缝,裂缝由细微裂缝变为贯穿裂缝直至断裂;③端焊缝连接的破坏形式表现为盖板与拼接板连接位置出现较大翘曲,最终端焊缝突然断裂;④纯高强度螺栓连接的破坏形式表现为盖板与拼接板连接位置出现翘曲现象,栓杆滑移,板件表面有滑移痕迹,最终栓杆与孔壁接触挤压弯曲。

焊缝补强型栓焊并用连接方式的破坏模式为:①侧焊缝补强试件的破坏形式表现为盖板与拼接板连接处出现轻微翘曲现象,最终栓杆产生滑移破坏,随后侧焊缝出现裂缝;②端焊缝补强试件的破坏形式表现为盖板与拼接板连接处出现较大翘曲现象,最终端焊缝突然断裂,栓杆滑移;③塞焊缝补强试件的破坏形式表现为盖板与拼接板连接处出现轻微翘曲现象,最终出现塞焊缝突然断裂的声音,栓杆滑移。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 荷载-位移曲线对比分析

将单一连接试件荷载-位移曲线与焊缝补强型试件曲线进行对比,相关曲线如图4所示。

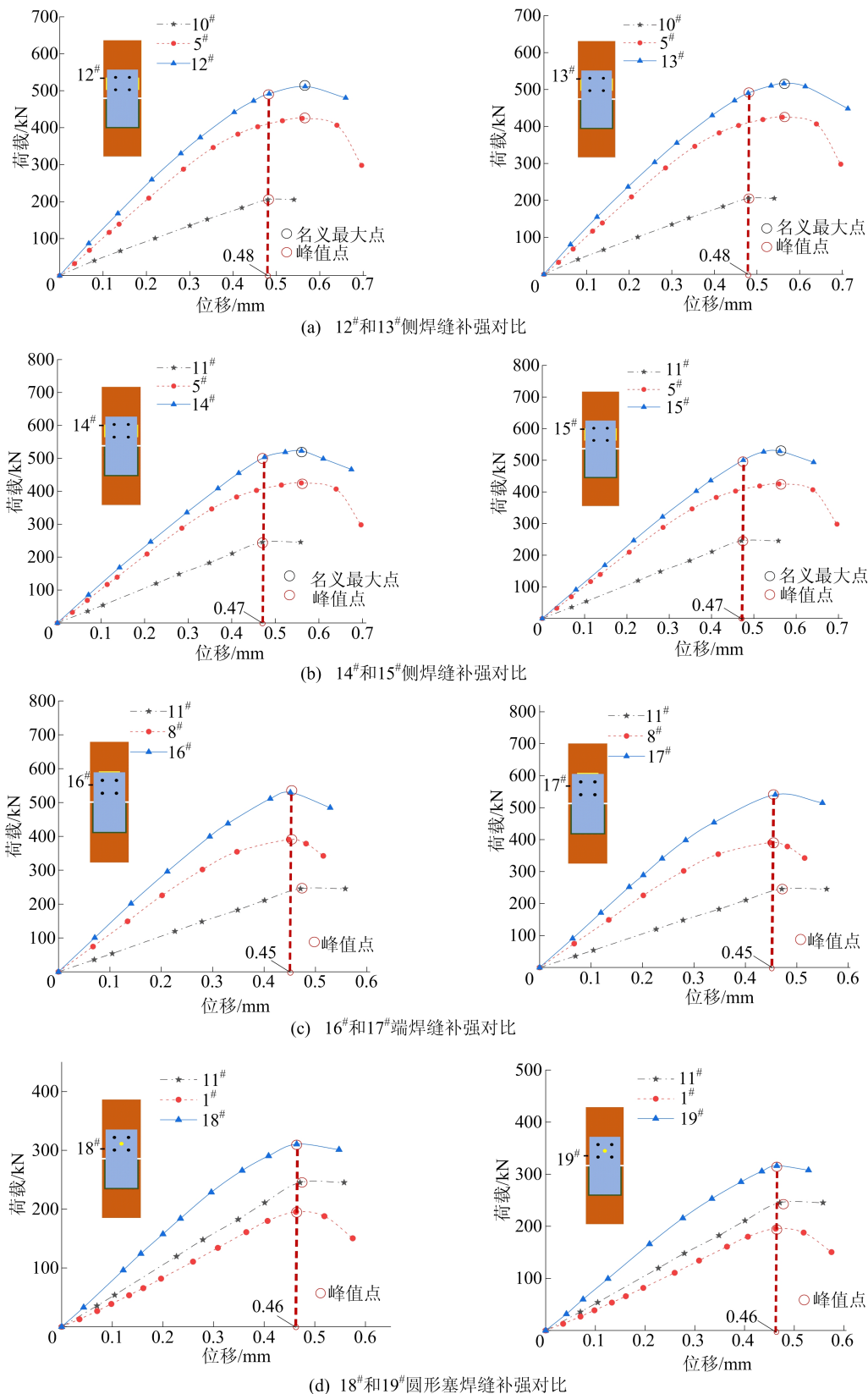


图 4 焊缝补强型试件与单一连接试件的荷载-位移曲线对比

侧焊缝补强试件具有较好的延性,这是因为纯侧焊缝连接试件的变形能力比纯高强摩擦型螺栓连接试件的变形能力大,所以侧焊缝补强型试

件的破坏特征为先栓杆滑移破坏,随后侧焊缝断裂。图 4a、图 4b 中侧焊缝补强型试件的峰值位移与纯螺栓连接试件的峰值位移一致,但比纯侧

焊缝连接试件的峰值位移要小,进一步验证了试验结果的正确性。当栓杆滑移后,即认为结构就已经发生了破坏,但侧焊缝还未达到峰值位移,依然可以发挥承载作用,侧焊缝补强型试件承载力和变形依然可以增大,直至侧焊缝也出现断裂破坏,因此侧焊缝补强型试件的名义最大点与纯侧焊缝连接试件的峰值点一致。

端焊缝补强试件的破坏具有脆性特征,这是因为纯端焊缝连接试件的峰值位移比纯高强摩擦型螺栓连接试件的峰值位移小,所以端焊缝补强型试件的破坏特征为先端焊缝突然断裂破坏,随后栓杆产生滑移。图4c中端焊缝补强试件的峰值位移与纯端焊缝连接试件的峰值位移一致,与试验结果相吻合。

塞焊缝补强试件的破坏也具有脆性特征,这是因为纯塞焊缝连接试件的峰值位移比纯高强摩擦型螺栓连接试件的峰值位移小,所以塞焊缝补强型试件的破坏特征为塞焊缝脆性断裂,随后栓杆产生滑移。

上述通过荷载-位移曲线分析所得的结果与试验现象一致,说明栓焊并用连接试件当其中一种连接方式破坏时,即认为结构发生破坏。侧焊缝补强型试件在不损失原有螺栓承载力的情况下具有较好的延性,端焊缝、塞焊缝补强型试件属于脆性破坏,但螺栓承载力得到了充分发挥,从变形角度分析侧焊缝补强型试件更优。

### 3.2 承载力对比分析

#### 3.2.1 焊缝补强型试件承载力的影响因素分析

各焊缝补强型并用连接试件的峰值承载力较纯高强螺栓连接试件11#的峰值承载力及其变化率见表4所列。由表4可知:

1) 在 $0.5N_v$  时进行焊缝补强,侧焊缝补强、端焊缝补强、圆形塞焊缝补强、方形塞焊缝补强型试件峰值承载力比纯高强摩擦型螺栓连接试件峰值承载力分别高出105.3%、116.3%、26.5%、92.7%。其中端焊缝补强对原结构承载力提高最大。当预拉力提高到 $0.8N_v$  时,峰值承载力分别提高104.1%、120.8%、29.0%、91.8%。其中端焊缝补强对原结构承载力提高最大。

2) 在侧焊缝补强型试件中,随着高强螺栓等级的增大,试件的承载力分别增加了2.2% ( $0.5N_v$ )、2.0% ( $0.8N_v$ )。说明同种焊缝补强型试件的承载力受高强摩擦型螺栓等级的影响不大。

3) 试件在 $0.5N_v$  和 $0.8N_v$  时进行焊缝补强

的峰值承载力相差不大,说明试件在不同受载程度下进行焊缝补强对试件的受剪性能影响不大。

上述分析表明,影响焊缝补强型试件峰值承载力的因素主要为焊缝补强的种类,其中端焊缝补强对原结构峰值承载力提升最大。

表4 焊缝补强型并用连接试件的峰值承载力对比

试件编号	试件连接规格	承载力/kN	变化率/%
11#	B4M20	245	
14#	B4M20+CW6.5-80( $0.5N_v$ )	503	105.3
15#	B4M20+CW6.5-80( $0.8N_v$ )	500	104.1
16#	B4M20+DW6.5-120( $0.5N_v$ )	530	116.3
17#	B4M20+DW6.5-120( $0.8N_v$ )	541	120.8
18#	B4M20+SW24( $0.5N_v$ )	310	26.5
19#	B4M20+SW24( $0.8N_v$ )	316	29.0
20#	B4M20+CF24-40( $0.5N_v$ )	472	92.7
21#	B4M20+CF24-40( $0.8N_v$ )	470	91.8

#### 3.2.2 补强型与单一连接试件承载力对比分析

通过对焊缝补强型试件的破坏模式进行分析得到,侧焊缝补强型试件破坏模式为栓杆滑移,端焊缝补强型试件破坏模式为端焊缝断裂,塞焊缝补强型试件破坏模式为塞焊缝被剪断。针对不同补强试件的破坏模式进行承载力对比分析,结果见表5所列。

表5中: $N$  为焊缝补强型试件极限承载力; $N_b$  为高强摩擦型连接抗滑移极限承载力; $N_{fs}$  为圆形纯塞焊缝连接极限承载力; $N_{fc}$  为方形纯塞焊缝连接极限承载力; $N_{fb}$  为纯侧焊缝连接极限承载力; $N_{fd}$  为纯端焊缝连接极限承载力。

破坏模式为螺栓滑移的补强试件,认为高强摩擦型螺栓发挥100%承载力,补强焊缝只发挥了部分承载力,因此采用公式 $(N-N_b)/N_f$  计算补强焊缝发挥的承载力大小。破坏模式为焊缝断裂的补强试件,认为补强焊缝发挥100%承载力,高强摩擦型螺栓只发挥部分承载力,采用公式 $(N-N_f)/N_b$  计算螺栓发挥的承载力大小。

承载力分析结果表明,无论使用哪种焊缝补强方式,一种连接方式都会率先达到100%承载力,另一种连接方式都会达到50%以上承载力。其中方形塞焊缝补强型试件对2种连接方式利用率最大,超80%以上,其次是端焊缝补强型试件、侧焊缝补强型试件、圆形塞焊缝补强型试件。

通过分析位移和承载力可知:侧焊缝补强型试件具有较好的延性,变形能力较好;端焊缝补强型试件对原结构峰值承载力提升最大;方形塞焊缝补强型试件对2种连接方式的承载力利用率最

大,圆形塞焊缝补强型试件对 2 种连接方式的承载力利用率最小。

在实际使用过程中需要综合考虑结构的变形、结构的承载力、承载力使用情况及适用性,因此当条件允许时,建议使用侧焊缝补强的方式对原结构进行加固补强;当环境受限而无法采用侧焊缝或端焊缝补强时,建议使用塞焊缝补强。侧焊缝补强的破坏模式为延性破坏,端焊缝补强对

原结构承载力提高最大,但破坏模式为脆性破坏,因此条件允许时,建议使用侧焊缝补强,不建议使用端焊缝补强。塞焊缝补强由于需要在原试件上重新开孔补强,因此适用于因环境受限而无法采用侧焊缝或端焊缝补强。且方形塞焊缝在保护高强摩擦型螺栓不受破坏的基础上,对螺栓承载力的利用率也最大,在环境受限时能极大提高螺栓的利用率。

表 5 焊缝补强型试件与单一连接试件峰值承载力对比

破坏模式	试件编号	N/kN	连接极限承载力	$[(N-N_b)/N_t]/\%$	$[(N-N_t)/N_b]/\%$
螺栓滑移	12#	492	$N_b=205\text{ kN}, N_{fb}=425\text{ kN}$	67.5	32.7
	13#	490	$N_b=205\text{ kN}, N_{fb}=425\text{ kN}$	67.1	31.7
	14#	503	$N_b=245\text{ kN}, N_{fb}=425\text{ kN}$	60.7	31.8
	15#	500	$N_b=245\text{ kN}, N_{fb}=425\text{ kN}$	60.0	30.6
焊缝断裂	16#	530	$N_b=245\text{ kN}, N_{fd}=390\text{ kN}$	73.1	57.1
	17#	541	$N_b=245\text{ kN}, N_{fd}=390\text{ kN}$	75.9	61.6
	18#	310	$N_b=245\text{ kN}, N_{fs}=195\text{ kN}$	33.3	46.9
	19#	316	$N_b=245\text{ kN}, N_{fs}=195\text{ kN}$	36.4	49.4
	20#	472	$N_b=245\text{ kN}, N_{fc}=260\text{ kN}$	87.3	86.5
	21#	470	$N_b=245\text{ kN}, N_{fc}=260\text{ kN}$	86.5	85.7

## 4 结 论

1) 焊缝补强型栓焊并用连接试件主要有 3 类补强试件:侧焊缝补强试件破坏模式为栓杆滑移破坏;端焊缝补强试件破坏模式为端焊缝出现贯穿裂缝;塞焊缝补强试件破坏模式为塞焊缝被剪断。3 种类型补强型试件破坏模式均呈现单一破坏模式。

2) 焊缝补强型栓焊并用连接试件当一种连接方式破坏时,即认为结构发生破坏。

3) 侧焊缝补强型试件属延性破坏;端焊缝补强型试件属脆性破坏,但承载性能最好;方形塞焊缝补强对 2 种连接方式承载力利用率最大,但需对原结构开孔处理。

4) 条件允许时,建议侧焊缝补强加固。环境受限时,推荐塞焊缝补强加固。

## [参 考 文 献]

[1] 孙磊. 栓焊并用连接节点试验及有限元分析研究[D]. 北京:中冶集团建筑研究总院,2007.

[2] 王元清,杨文,石永久. 加固用栓焊并用连接受力性能有限元分析[J]. 钢结构,2006,21(4):23-27.

[3] 石永久,王磊,王元清,等. 加固用钢结构栓焊并用连接承载性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(6):175-180.

[4] 王俊姣,石永久,王元清,等. 摩擦型高强度螺栓与侧焊缝并用连接承载力有限元分析[J]. 建筑科学,2013,29(1):15-19.

[5] 麻建锁,王元清,李敏峰,等. 焊缝补强型栓焊并用连接承载性能试验研究[J]. 钢结构,2018,33(4):13-16.

[6] 中冶建筑研究总院有限公司. 钢结构高强度螺栓连接技术规程:JGJ 82—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:32-37.

[7] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:101-105.

[8] 中国机械工业联合会. 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件:GB/T 1231—2006[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:15-22.

[9] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验第 1 部分 室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021:22-27.

(责任编辑 吴 亮)