

# 铝合金板式节点承载性能试验研究

郭小农<sup>1</sup>, 熊哲<sup>1</sup>, 罗永峰<sup>1</sup>, 徐晗<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中天建设集团 浙江钢构有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘要:** 考虑了节点板厚度、抗剪键、加载模式的影响, 对 14 个铝合金板式节点的承载力性能进行试验分析. 详细介绍了试验过程, 描述了试验现象. 试验结果表明, 铝合金板式节点的主要破坏模式为块状拉剪破坏和节点板局部屈曲破坏; 以弯矩为主要控制的荷载作用下, 节点板主要承受环向应力; 节点板厚度的增加能有效提高节点承载力; C 类抗剪键能显著提高节点的整体性, 改善节点受力性能.

**关键词:** 铝合金板式节点; 试验分析; 块状拉剪破坏; 节点板局部屈曲; 承载力

**中图分类号:** TU395

**文献标志码:** A

## Experimental Research on Load-bearing Behavior of Aluminum Alloy Gusset Joint

GUO Xiaonong<sup>1</sup>, XIONG Zhe<sup>1</sup>, LUO Yongfeng<sup>1</sup>, XU Han<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhongtian Construction Group, Zhejiang Steel Structure Co. Ltd., Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** Taking the influence of thickness of joint plate, shear connector and loading scheme on the load-bearing behavior of aluminum alloy gusset joint into consideration, experiments including 14 aluminum alloy gusset joint specimens were carried out. First, the experimental program was introduced in detail. Subsequently, the collapse phenomena of joint specimens are described. It is found that their failure modes mainly involve the block shear rupture of the top plate and the local buckling of the bottom plate. The joint plate is mainly subjected to hoop stress when the joint is under primary bending moment. The increase of thickness of joint plate can enhance the load-bearing capacity of joint effectively. The shear connector C can improve the global behavior of joint efficiently.

**Key words:** aluminum alloy gusset joint; experimental research; block shear rupture; local buckling; load-bearing capacity

节点是空间结构的关键组成之一. 目前, 铝合金网格结构的主要节点类型有 3 种: 嵌入式毂节点、螺栓球节点和板式节点<sup>[1]</sup>. 其中板式节点由两块圆形薄板通过不锈钢螺栓或铆钉与各杆件的翼缘紧密连接, 由节点板传递杆件内力. 板式节点最早由美国 Temcor 公司研发<sup>[2]</sup>, 专门应用于铝合金网格结构, 尤其是大跨度铝穹顶, 其设计依据是《美国铝合金设计手册》<sup>[3-4]</sup>. 然而国外规范并无针对该类节点的设计方法, 其破坏模式、承载能力及抗弯刚度等特征均无研究成果可借鉴<sup>[5]</sup>; 国内对板式节点的研究尚在起步阶段, 有关破坏模式的分类和承载能力的计算尚无统一意见, 更缺乏试验比较和验证<sup>[6-9]</sup>.

为探究板式节点的破坏模式、节点承载力及节点刚度等性能, 本文进行了 14 个铝合金板式节点试验, 分析了试验的破坏现象, 归纳了其在各种加载形式下的应力分布状况及发展规律, 总结了板式节点的荷载传递方式, 并计算出其极限承载力, 为后续的节点承载力研究和节点刚度研究提供参照.

## 1 试验简介

### 1.1 试件设计

本文共设计了 14 个板式节点试件, 如图 1 所示. 每个节点均连接 6 根 H 型杆件, 相邻杆件角度均为 60°, 杆件编号依次为 L1~L6. 所有杆件的截面规格均为 H100×50×4×5, 长度为 890 mm; 节点板均采用直径为 280 mm 的平板. 杆件及节点板的材料均为国产 6063-T5 挤压型铝材. 连接螺栓材质为奥氏体不锈钢, 性能等级为 A2-70, 规格为 M6. 单根杆件单侧翼缘与单块节点板的连接螺栓数量为 10 枚, 螺栓孔径为 6.5 mm.

收稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(50908168)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 熊哲(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: 123superpanda@tongji.edu.cn

试件按无抗剪键、B 类抗剪键和 C 类抗剪键类型分为 A, B, C 3 种类型. B 类抗剪键为 2 块平板, 仅连接 1 组相对杆件, C 类抗剪键为 6 块角钢, 连接

所有杆件, 如图 2,3 所示. 表 1 给出了所有试件的具体信息.

为描述方便, 对节点板的 4 个表面进行区分命

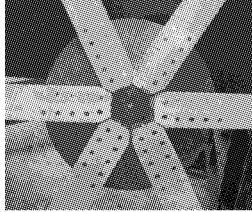


图 1 板式节点试件示意图  
Fig.1 Gusset joint specimen

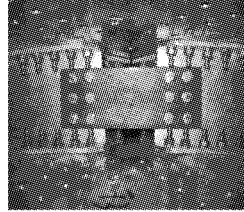


图 2 B 类抗剪键示意图  
Fig.2 Shear key (B type)



图 3 C 类抗剪键示意图  
Fig.3 Shear key (C type)

表 1 板式节点模型试件汇总表

Tab.1 Information of gusset joint specimens

试件 编号	节点板厚度/ mm	抗剪键	加载模式	加载杆件	试件 编号	节点板厚度/ mm	抗剪键	加载模式	抗剪键连 接杆件	加载杆件
A1	6.00	无	6 杆加载	全部	B1	2.25	B 类	6 杆加载	L3,L6	全部
A2	5.00	无	6 杆加载	全部	B2	2.25	B 类	3 杆加载	L3,L6	L1,L3,L5
A3	5.00	无	2 杆加载	L3,L6	B3	2.25	B 类	2 杆加载	L3,L6	L3,L6
A4	2.70	无	6 杆加载	全部	C1	6.00	C 类	6 杆加载	全部	全部
A5	2.25	无	6 杆加载	全部	C2	2.25	C 类	6 杆加载	全部	全部
A6	2.25	无	3 杆加载	L1,L3,L5	C3	2.25	C 类	3 杆加载	全部	L1,L3,L5
A7	2.25	无	2 杆加载	L3,L6	C4	2.70	C 类	2 杆加载	全部	L3,L6

名:  $U_t$  和  $U_b$  分别表示上节点板的外表面和内表面;  $D_t$  和  $D_b$  分别表示下节点板的内表面和外表面, 如图 4 所示. 另外, 将上、下节点板分为 3 类区域: 连接区, 即节点板与杆件接触的区域; 中心区, 即杆件未伸入的节点板中部区域; 自由区, 即节点板未与杆件接触的区域 (除去中心区外). 连接区用“c+对应杆件编号”表示, 中心区用“i”表示, 自由区用“f+两个相邻杆件编号”表示, 如图 5 所示.

## 1.2 加载方案

本次试验主要考察铝合金板式节点在节点板平面外弯矩和剪力作用下的承载性能, 这需通过对杆件施加面外横向荷载的方法来实现. 为保证试验的可控性和对场地的适应性, 反力架设计为自平衡反力架, 并以刚度为设计控制因素. 反力架由 6 根工字钢梁和短柱组成, 其中工字钢梁环绕焊接成正六边形, 并由工字钢短柱支撑, 同时在 6 根短柱上焊接千

斤顶支座. 反力架整体呈中心对称, 如图 6 所示. 杆件端部采用一枚 M24 高强螺栓与反力架上的耳板铰接, 千斤顶加载点与杆端的水平距离为 500 mm. 为避免节点因不平衡弯矩引起面外扭转, 试验时采用中心对称的 3 种加载方式, 即 6 杆同时加载、3 杆同时加载和 2 杆同时加载, 如图 7 所示. 加载时, 所有千斤顶都连接到一台油泵, 使得各根杆件同步承受相等荷载, 如图 8 所示.

## 1.3 测点布置

所有试件的杆件采用相同的测点布置方案 (图 9). 在每根杆件靠近节点域的截面布置 4 枚单向应变片 ( $P1 \sim P4$ ), 并在靠近约束端的截面布置 4 枚单向应变片 ( $P5 \sim P8$ ), 应变片分别位于杆件上、下翼缘的左右两端. 应变片  $P1 \sim P4$  用来监测加载点是否存在偏心并用于计算杆端弯矩和轴力;  $P5 \sim P8$  用于计算约束端内力.

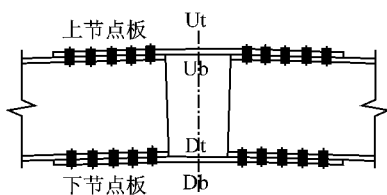


图 4 节点板表面命名  
Fig.4 Name of the plate's surface

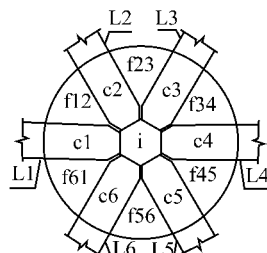


图 5 节点板分区  
Fig.5 Partitions of the plate

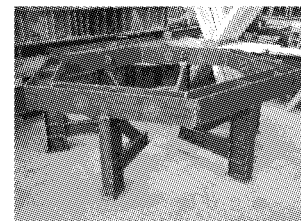


图 6 试验用反力架  
Fig.6 Reaction frame

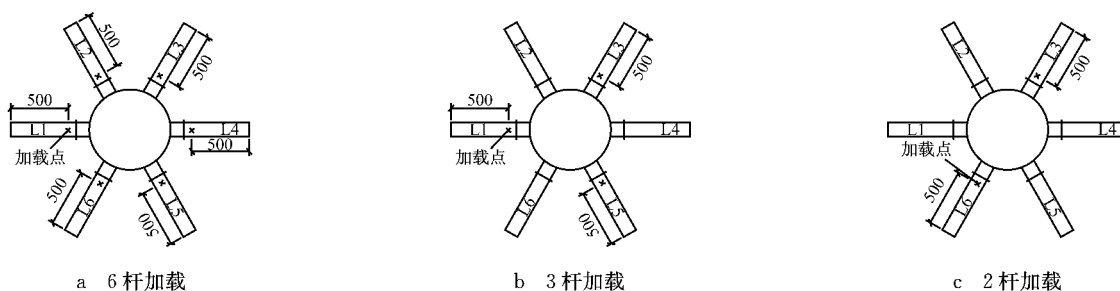


图 7 加载方案(单位:mm)

Fig.7 Loading schemes(unit:mm)

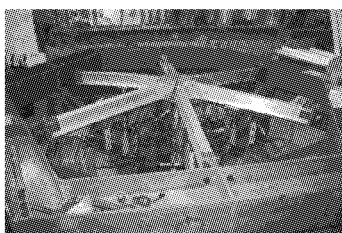


图 8 加载过程

Fig.8 Loading process

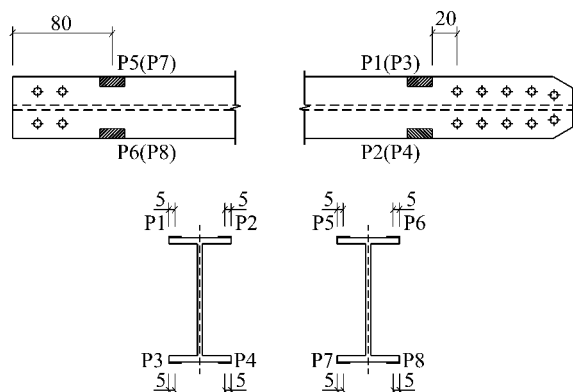


图 9 杆件测点布置图(单位:mm)

Fig.9 Strain gauging point arrangement on members (unit: mm)

因测点数量有限,为获得节点板整体应力分布规律,各试件节点板的测点布置采用了不同的方案,但都遵循同一原则:在节点板自由区的外表面布置环向和径向应变片或应变花,并在内表面对应位置布置环向应变片;在连接区的外表面布置径向应变片;在中心区的外表面布置环向和径向应变片,并在内表面对应位置布置环向应变片.图 10 给出了试件 A5 的节点板应变测点布置图.图 10 中,应变片的命名规则为“节点板区域+D/R”,其中 D 代表径向应变片,R 代表环向应变片;应变花的命名规则为“节点板区域+H-d//r/s”,其中 H 代表应变花,d 代表径向,r 代表环向,s 代表斜向.如“f45R”代表位于杆件 L4 和 L5 之间的节点板自由区的环向应变片;

“f12H-d”表示位于杆件 L1 和 L2 之间的节点板自由区的径向应变花.为表达清晰,图 10 中未画出螺栓孔.

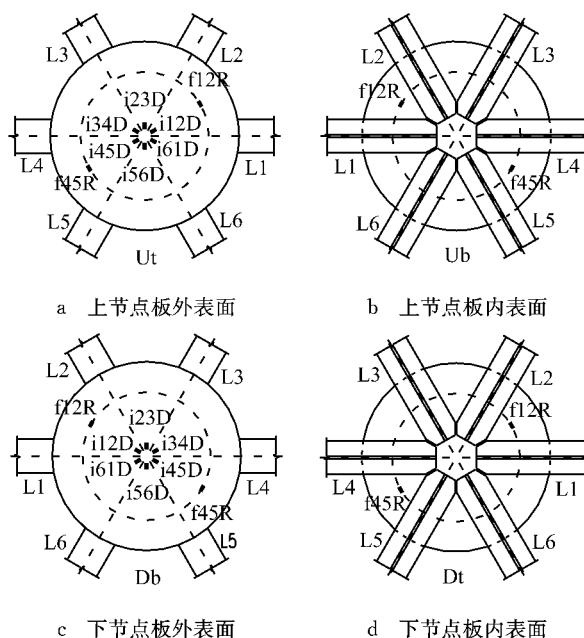


图 10 试件 A5 节点板应变测点布置图

Fig.10 Strain gauging point arrangement plan on joint plate of Specimen A5

#### 1.4 材性试验

试验前从同批次的杆件、节点板上分别取样,共制作了 6 个材料拉伸试样,拉伸试验结果如表 2 所示.另外,试验前还对不锈钢螺栓进行了拉伸试验,得到了其抗拉强度平均值为 725 MPa.

表 2 材性试验结果

Tab.2 Results of tensile test			
材性	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
节点板	69 088	184.40	213.58
H 型材	65 364	177.40	206.80
不锈钢螺栓 A2-70	206 000	470.00	725.00

## 2 试验现象简述

试验完成后,将试件拆卸观察,发现所有螺栓均

无明显变形.根据试件的破坏现象可以归纳出各试件的破坏模式列于表 3.表 3 中,最大荷载为试件破坏时千斤顶荷载.部分试件破坏时的照片如图 11 所示.

表 3 试验结果汇总

Tab.3 Results of the tests

试件	加载类型	主要破坏现象	破坏模式	最大荷载/kN
A1	6 杆加载	杆件 L1 外端净截面拉裂	杆件净截面破坏	10.146
A2	6 杆加载	杆件 L2 局部承压失效,部分杆件外端净截面濒临失效	杆件净截面破坏	9.752
A4	6 杆加载	上节点板连接区 c4,c5,c6 及自由区 f45,f56 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	6.663
A5	6 杆加载	上节点板连接区 c4,c5 及自由区 f45,f56 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	5.548
B1	6 杆加载	上节点板连接区 c4,c5 及自由区 f45 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	5.924
C1	6 杆加载	杆件 L3 及 L4 外端净截面拉裂	杆件净截面破坏	10.940
C2	6 杆加载	上节点板连接区 c6,c1,c2 及自由区 f61,f2 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	6.045
A6	3 杆加载	上节点板连接区 c4 块状拉剪破坏;下节点板自由区 f61,f34 及中心区屈曲	节点板块状拉剪破坏 节点板中心区屈曲破坏 节点板自由区屈曲破坏	11.405
B2	3 杆加载	上节点板连接区 c4,c5 及自由区 f23,f34,f45 块状拉剪;下节点板自由区 f61 及中心区局部屈曲	节点板块状拉剪破坏 节点板中心区屈曲破坏 节点板自由区屈曲破坏	12.200
C3	3 杆加载	上节点板连接区 c5,c6,c1,c2 及自由区 f56,f61,f12 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	10.239
A3	2 杆加载	杆件 L6 局部承压失效,进而引起杆件整体弯扭屈曲,杆件 L1 外端净截面濒临失效	杆件局部及整体屈曲	24.976
A7	2 杆加载	下节点板自由区 f34,f56 及中心区屈曲	节点板中心区屈曲破坏 节点板自由区屈曲破坏	14.778
B3	2 杆加载	下节点板自由区 f12,f56 及中心区屈曲	节点板中心区屈曲破坏 节点板自由区屈曲破坏	14.487
C4	2 杆加载	上节点板连接区 c6,c1 及自由区 f61,f12 块状拉剪破坏	节点板块状拉剪破坏	16.991

## 3 试验结果分析

### 3.1 承载力汇总

表 4 列出了所有试件破坏时的杆端截面内力,为后续的理论研究提供数据基础,表 4 同时还列出了节点板所受的沿各杆件方向的螺栓群的剪力.表 4 中, $N_{xi}$ 代表杆件  $i$  的杆端轴力, $M_{yi}$ 代表杆件  $i$  的杆端弯矩.在平截面假定和 Ramberg-Osgood 本构关系模型<sup>[10]</sup>的理论基础上,杆端轴力和弯矩可根据测点应变(P1~P4)计算得到.

分析表 4 可知:① 各试件杆端轴力较小,且较为离散,无规律可循;相对而言,试件破坏时,各杆端弯矩较为接近.② 结合表 3 的破坏模式及表 4 的承载力数据可知,发生净截面破坏的杆件大都受到较大的轴向拉力和弯矩;发生节点板块状拉剪破坏的试件,拉剪块大都受到较大的面内拉力;发生节点板局部屈曲的试件,节点板大都受到较大的面内压力.③ 比较 4 个 2 杆加载试验的承载力可以发现,厚板试件 A3 加载杆的弯矩比非加载杆小,而各薄板试件加载杆弯矩比非加载杆大,可见节点板厚度对节点的

内力分布有显著影响.

### 3.2 节点板实测荷载-应变曲线

图 12 为部分试件节点板的荷载-应变曲线.

图 12a 为试件 A2 的上节点板外表面和下节点板外表面的自由区测点的荷载-应变曲线,图中 H-d,s,r 分别代表应变花中的径向、斜向和环向,如 Db-f12H-r 代表布置在下节点板外表面的环向应变片(位置处于杆件 L1 和 L2 之间的自由区).从图中可以看出,当采用 6 杆加载时,上、下节点板相应测点的荷载-应变曲线在各阶段呈现较好的对称性,说明节点的杆端轴力很小,可近似忽略.节点板自由区的环向应变大于斜向应变大于径向应变,径向应变相对于环向应变非常小,可忽略不计,说明节点板自由区的最大主应力沿节点板环向.

图 12b 为试件 A1 节点板中心区及自由区环向测点的荷载-应变曲线.分析图 12b 可知,中心区的环向应变明显大于自由区的环向应变,由此可推测节点板破坏应首先出现在中心区边缘螺栓孔应力集中处.各条荷载-应变曲线均发生两次转折,曲线斜率由大变小,之后又有所回升.

图 12c 为试件 A1 上节点板自由区内、外表面环

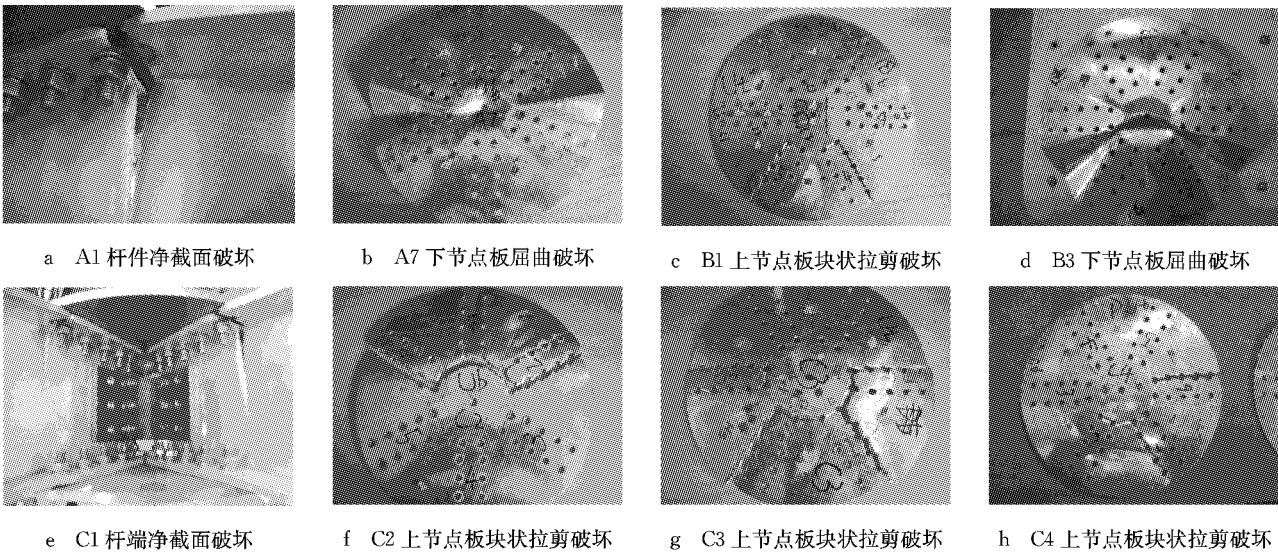


图 11 试件破坏时照片  
Fig.11 Photos of specimens after testing

表 4 试件节点承载力汇总

Tab.4 Information of bearing capacity of all the specimens

试件 编号	$N_{xi}/kN$						$M_{yi}/(kN \cdot m)$					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
A1	4.819	-2.577	8.501	7.414	-3.958	9.152	5.828	5.591	2.982	4.346	5.841	5.514
A2	-2.782	-13.086	2.791	-0.850	1.161	-15.856	5.585	3.853	4.013	3.446	3.987	4.036
A4	1.118	-1.052	4.284	3.500	2.928	4.485	2.279	3.013	2.574	2.831	2.721	2.778
A5	-10.131	1.606	1.983	2.123	3.633	-1.613	1.842	2.527	2.285	2.495	2.388	2.508
B1	0.908	-2.105	-0.740	-3.760	1.273	-0.774	2.799	2.427	2.578	2.543	2.546	2.437
C1	-6.073	-5.467	8.093	-4.442	-9.139	-0.116	5.369	5.827	5.979	5.997	5.265	3.616
C2	1.373	0.794	1.845	0.382	0.018	0.318	2.621	2.647	2.478	2.653	2.696	2.428
A6	2.771	-0.656	2.371	4.295	1.038	-1.097	2.564	2.415	2.528	2.490	2.541	2.429
B2	4.298	-1.518	3.647	1.688	4.756	-2.338	2.884	2.460	3.081	2.294	2.863	2.518
C3	1.037	1.940	0.900	3.362	1.699	1.576	2.098	2.602	1.860	2.526	2.227	2.406
A3	12.858	28.044	4.084	11.414	18.247	1.052	4.505	4.232	2.885	4.131	4.620	3.200
A7	1.303	0.242	4.466	1.223	1.781	4.360	1.881	2.175	2.525	2.163	2.023	2.669
B3	-2.039	1.028	2.359	2.593	3.727	3.631	2.325	2.532	2.293	2.187	2.734	1.944
C4	-0.215	1.749	4.141	3.618	2.372	0.490	2.409	3.142	2.328	2.322	2.910	2.323
试验 编号	上节点板螺栓群剪力/kN						下节点板螺栓群剪力/kN					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
A1	60.69	54.62	34.07	47.17	56.44	59.72	-55.87	-57.20	-25.57	-39.75	-60.39	-50.56
A2	54.46	31.99	41.52	34.03	40.45	32.43	-57.24	-45.07	-38.73	-34.88	-39.29	-48.29
A4	23.35	29.60	27.88	30.06	28.68	30.02	-22.23	-30.66	-23.60	-26.56	-25.75	-25.54
A5	13.35	26.07	23.84	26.01	25.70	24.27	-23.48	-25.13	-21.86	-23.89	-22.07	-25.89
B1	28.44	23.22	25.41	23.55	26.10	23.98	-27.54	-25.32	-26.15	-27.31	-24.82	-24.76
C1	50.65	55.54	63.84	57.75	48.08	36.10	-56.73	-61.00	-55.74	-62.19	-57.22	-36.22
C2	26.90	26.87	25.70	26.72	26.97	24.44	-25.52	-26.07	-23.86	-26.34	-26.95	-24.12
A6	27.03	23.82	26.47	27.04	25.93	23.74	-24.26	-24.48	-24.10	-22.75	-24.89	-24.83
B2	30.99	23.84	32.64	23.79	31.01	24.01	-26.69	-25.36	-28.99	-22.10	-26.25	-26.35
C3	21.50	26.99	19.05	26.94	23.12	24.85	-20.46	-25.0	-18.15	-23.58	-21.42	-23.27
A3	51.48	56.34	30.89	47.01	55.33	32.52	-38.63	-28.30	-26.81	-35.60	-37.08	-31.47
A7	19.46	21.87	27.48	22.24	21.12	28.87	-18.16	-21.63	-23.02	-21.02	-19.34	-24.51
B3	22.23	25.83	24.11	23.17	29.20	21.25	-24.27	-24.80	-21.75	-20.58	-25.48	-17.62
C4	23.99	32.30	25.35	25.02	30.29	23.47	-24.20	-30.55	-21.21	-21.41	-27.92	-22.98

注:螺栓群剪力正值表示使节点板面内受拉,负值表示使节点板面内受压。

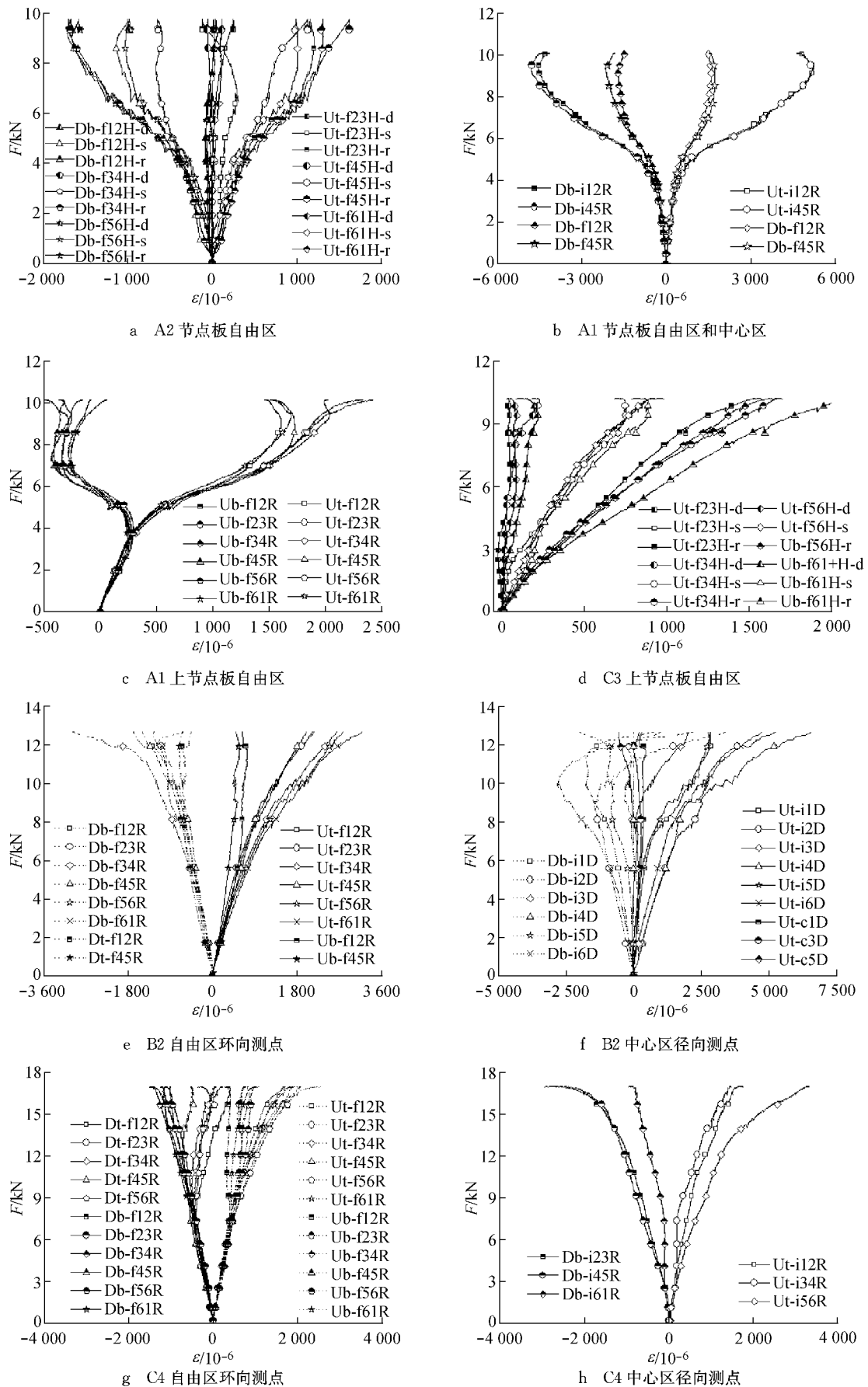


图 12 节点板荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curves of the joint plate

向测点的应变曲线. 图 12c 中各条曲线也发生了两次转折, 说明内力的传递方式发生两次改变: 加载初期, 节点域在各杆端荷载作用下有整体拱曲的变形趋势, 但又受到螺栓群与板件表面接触挤压的抑制, 此阶段杆端弯矩主要由螺母与板件表面的挤压应力及两块节点板的薄膜内力传递; 加载中期, 螺母和螺栓头接触的板件表面局部挤压屈服, 使螺栓与板件发生错动变形, 荷载通过接触摩擦由螺栓传递到节点板, 而螺栓和板件的错动使节点板发生整体面外翘曲, 节点板出现环向面外弯矩, 节点板内、外表面荷载-应变曲线开始分叉, 节点刚度降低; 加载后期, 随着螺栓和板件的错动, 各螺杆与孔壁陆续接触顶紧, 螺栓进入“扣紧”状态, 荷载通过螺栓孔壁承压传递, 节点板弯曲变形再度受到抑制, 节点刚度略有回升.

图 12d 为试件 C3 上节点板自由区外表面应变花测得的应变曲线. 分析图 12d 可知, 采用 2 杆加载与采用 6 杆加载时相似, 杆端内力以弯矩为主, 总体上节点板中心区应变最大, 自由区次之, 连接区最小. 节点板自由区的最大主应力沿环向.

图 12e~12h 给出了部分典型测点的荷载应变曲线. 对比图 12e~12h 可知, 对于 C 类试件, 在 2 杆加载情况下, 其下节点板中心区的径向压应变较自由区的环向应变小, 这与 A 类试件在 6 杆加载的情况下类似; 而 B 类试件在 3 杆加载情况下, 其下节点板中心区的径向应变明显较自由区的环向应变大, 说明 C 类抗剪键可以有效优化节点整体变形性能, 改善内力分布.

## 4 结论

通过 14 个铝合金板式节点试验, 归纳出板式节点的破坏模式主要有: 节点板块状拉剪破坏; 节点板局部屈曲; 杆端净截面破坏. 对试验结果进行初步分析表明, 当节点板厚度较大时, 节点的破坏模式为杆件净截面失效; 当节点板厚度较小时, 节点的破坏模式主要为节点板面内块状拉剪破坏或节点板局部屈曲. 分析节点板的应变分布可知, 节点板的主应力沿节点板环向, 且中心区的应力大于自由区的应力. 比较试件的承载力可知, 当试件节点板发生面内拉剪

或受压屈曲破坏时, 增大节点板厚度能提高节点的承载力; C 类抗剪键能显著提高节点的整体性, 改善节点受力性能.

## 参考文献:

- [1] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100.  
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100.
- [2] 杨联萍, 韦申, 张其林. 铝合金空间网格结构研究现状及关键问题[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 1.  
YANG Lianping, WEI Shen, ZHANG Qilin. Aluminum reticulated spatial structures: state of the art and key issues [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 1.
- [3] Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. 8th ed. Washington D C: Aluminum Association, 2005.
- [4] Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. 9th ed. Washington D C: Aluminum Association, 2010.
- [5] Bulson P S. Aluminum structural analysis: recent European advances [M]. London: Routledge, 1990.
- [6] 曾银枝, 钱若军, 王人鹏, 等. 铝合金穹顶的试验研究[J]. 空间结构, 2000, 6(4): 47.  
ZENG Yingzhi, QIAN Ruojun, WANG Renpeng, *et al.* Test research on the aluminous-alloy dome [J]. Spatial Structures, 2000, 6(4): 47.
- [7] 郭小农, 邱丽秋, 罗永峰, 等. 铝合金板式节点受弯承载力试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 11(4): 47.  
GUO Xiaonong, QIU Liqiu, LUO Yongfeng, *et al.* Experimental research on the bending capacity of aluminum alloy gusset joints [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 11(4): 47.
- [8] 钱基宏, 赵鹏飞, 郝成新, 等. 大跨度铝合金穹顶网壳结构的研究[J]. 建筑科学, 2000, 16(5): 7.  
QIAN Jihong, ZHAO Pengfei, HAO Chengxin, *et al.* Development study on large span aluminum alloy dome structure [J]. Building Science, 2000, 16(5): 7.
- [9] 张竞乐, 赵金城, 许洪明. 单层网壳板式节点的刚度分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(4): 88.  
ZHANG Jingle, ZHAO Jincheng, XU Hongming. Analysis of stiffness of gusset-type joints for single-layer reticulated shells [J]. Industrial Construction, 2005, 35(4): 88.
- [10] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 110.  
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, *et al.* Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 110.