

不锈钢螺栓连接节点抗剪性能试验

段文峰^{1,2}, 赵 龙^{1,2}, 刘文渊³, 邓泽鹏^{1,2}, 蔡 斌^{1,2}

(1. 吉林建筑大学土木工程学院, 吉林 长春 130118; 2. 吉林省结构与抗震科技创新中心, 吉林 长春 130118; 3. 南京理工大学泰州科技学院, 江苏 泰州 225300)

摘 要 目的 研究端距、边距及板厚等因素对不锈钢螺栓连接节点抗剪承载力的影响, 为后续提出不锈钢螺栓连接承载力设计方法提供试验依据。方法 设计 10 个不锈钢螺栓盖板连接节点试件进行拉伸试验, 考虑端距、边距、螺栓中距和板厚等参数, 通过粘贴的应变片数值变化快慢及总应变大小来判断螺栓连接节点的破坏模式。结果 在其他因素不变情况下, 端距小于 $2d$ 时易发生冲切破坏, 边距小于 $1.5d$ 时易发生净截面破坏, 螺栓中距小于 $3d$ 时两螺栓之间板件易发生冲切破坏或承压破坏; 且当板厚小于 4 mm 时, 盖板平面外易发生翘曲。结论 满足螺栓中距应不小于 $3d$ 、端距不小于 $2d$ 和边距不小于 $1.5d$ 的构造才是经济安全的; 建议板厚大于 4 mm 为厚板, 小于 4 mm 为薄板, 薄板易发生翘曲, 且端距越大越容易发生; 当发生翘曲时, 翘曲部位受力由受压变为受拉, 会导致连接节点承压强度发生折减。

关键词 不锈钢; 螺栓连接; 破坏模式; 翘曲

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Experimental Research on Bearing Performance of Stainless Steel Bolted Joints

DUAN Wenfeng^{1,2}, ZHAO Long^{1,2}, LIU Wenyuan³, DENG Zepeng^{1,2}, CAI Bin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, China, 130118; 2. Jinlin Structure and Earthquake Resistance Technology Innovation Center, Changchun, China, 130118; 3. Taizhou Institute of Science & Technology, Nanjing University of Science and Technology, Taizhou, China, 225300)

Abstract: This paper studies the influence of the end distance, edge distance and the thickness of the plate on the shear bearing capacity of the stainless steel bolt joint, which provides the experimental basis for the design method of the bearing capacity of the stainless steel bolt connection. Using ten stainless steel bolt cover joints tensile test specimens, considering end distance, edge distance, bolt spacing and thickness of the plate, the strain gauge pasted numerical change rate and the total strain size to determine the failure modes of bolted joints. In other factors unchanged, end dis-

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378238); 吉林省教育厅十二五科学技术研究项目(90701303)

作者简介: 段文峰(1968—), 男, 教授, 主要从事钢结构方面研究。

tance less than $2d$ prone to punching failure, edge distance less than $1.5d$ prefer to net section margins damage, the bolt distance less than two $3d$ between the bolt plate make for punching failure or bearing failure; and when the plate thickness is less than 4 mm, the flat plane are ape to curling. The bolt distance should not be less than $3d$ and not less than $2d$ from the end distance and edge distance not less than $1.5d$ is economic security; and the plate thickness is greater than 4 mm thick, less than 4 mm when the sheet, for heavy plate, curling is difficult to occur, and prone to curling of thin plate, and the bigger end distance prone to curling; when curling happened, parts of the force by compression to tension, resulting in pressure and strength reduction.

Key words: stainless steel; bolted connection; failure mode; curling

与碳素钢相比,不锈钢材料具有较好的耐腐蚀性、耐久性、耐火性以及后期维护费用低等特点;尽管不锈钢材料由于含镍生产成本较略高,但不锈钢在建筑结构中仍然应用广泛^[1-2]. 近年来,由于不锈钢材料的在各行各业中应用普及,国内外学者对其进行大量的科学研究,国内也于 2015 年 12 月正式颁布《不锈钢结构技术规范》^[3]. 文献[4-5]将国内规范与几个发达国家规范进行对比分析,发现各国规范设计理念基本相同,只是在相关参数的取值上有所区分. 文献[6-7]对不锈钢材料的应力-应变本构模型进行研究,发现不锈钢材料与碳素钢有很大区别,其没有明显的屈服点,应变硬化强,甚至在较低荷载下都表现非线性. 文献[8-13]对不锈钢螺栓连接节点进行大量的试验研究和有限元模拟分析,考虑了承载能力极限状态和正常使用极限状态,并采用了变形准则来判断螺栓连接的破坏模式,最后推出相关承载力设计公式. 文献[14-16]对盖板为薄板的不锈钢螺栓连接进行了研究,指出当盖板为薄板($t < 4$ mm)时,翘曲的发生会引起不锈钢螺栓连接承载力下降. 文献[17-18]对高强不锈钢螺栓承压型和摩擦型连接进行试验分析,研究指出:当连接采用高强螺栓时,其设计方法可与普通螺栓连接一致,但建议采用承压方式连接,对于摩擦型螺栓连接,摩擦系数有待进一步研究. 还有其他学者对不锈钢材料焊缝连接,接触问题,及构件受弯、受压

等方面进行了研究^[19-21]. 基于此,笔者主要对不同端距、边距、螺栓中距、板厚的 10 个不锈钢螺栓盖板连接节点进行拉伸试验,通过粘贴的应变片数值变化快慢及总应变大小来判断螺栓连接节点的破坏模式,以此来确定螺栓连接的构造要求及研究螺栓翘曲发生条件,为后续承载力设计方法提供试验依据.

1 试验方案设计

1.1 试验目的

- (1)测定不锈钢螺栓连接节点承压性能;
- (2)判断螺栓连接节点的破坏模式;
- (3)确定螺栓连接的构造要求;
- (4)研究盖板平面外的翘曲发生条件.

1.2 试件设计

(1)材料选择

试验板件采用的是奥氏体 30408 不锈钢,相应的中国牌号为 06Cr19Ni10. 螺栓为正国标 304 不锈钢内六角螺丝圆柱头螺钉,组别 A2,性能等级 70.

(2)试件设计

采用单排螺栓双剪连接形式(含两螺栓和四螺栓两种情况),连接示意图见图 1 所示. 为防止加载过程中试件滑落,且便于试验机夹具夹住试件,采用图 1(a)所示的端部扩大的构造措施.

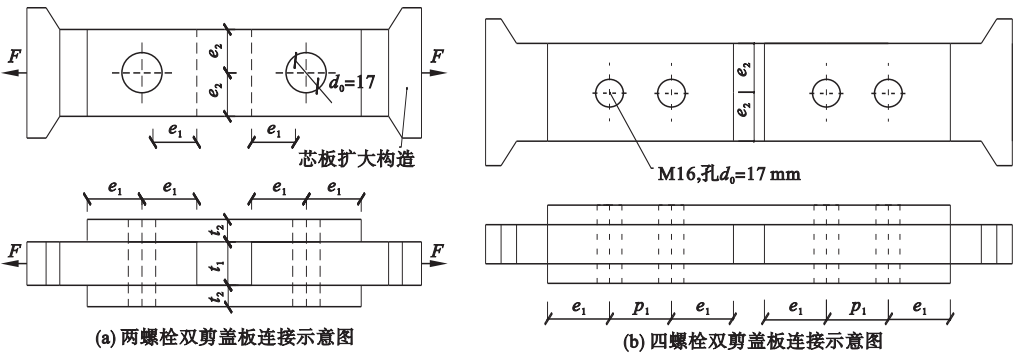


图1 盖板连接示意图

Fig. 1 Bolt connection diagram with two bolts and four bolts

螺栓连接中考虑边距、端距和板件厚度等参数,未考虑螺栓杆直径的变化(试验中螺栓直径均为 16 mm,螺栓孔径为 17 mm),设计三组 10 个双剪连接试件,试件具体尺寸见表 1,图中 e_1 和 e_2 为端距和边距,其他参数见表 1. 三组试件分别为:(a)在边距比不变的情况下,考虑端距变化对试件承载力的影响,设计 T1、T2 和 T5、T6 和 T7 试件;(b)在端距比不变的情况下,考虑边距变化对试件承载力的影响,设计 T3、T4 和 T5 试件;(c)在端距比、边距比不变的情况下,考虑螺栓中距变化对试件承载力的影响,设计 T8、T9 和 T10.

表1 双剪连接试件尺寸参数

Table 1 Double shear connection specimen size parameters

编号	螺栓直径 d/mm	端距比 e_1/d	边距比 e_2/d	螺栓中距 p_1/mm	芯板厚度 t_1/mm	盖板厚度 t_2/mm
T1	16	1.0	2.0	—	6/5.48	4/3.60
T2	16	1.5	2.0	—	6/5.48	4/3.60
T3	16	2.0	1.0	—	6/5.48	4/3.60
T4	16	2.0	1.5	—	6/5.48	4/3.60
T5	16	2.0	2.0	—	6/5.48	4/3.60
T6	16	3.0	1.5	—	6/5.48	2/1.86
T7	16	4.0	1.5	—	6/5.48	2/1.86
T8	16	2.0	2.0	32	6/5.48	4/3.60
T9	16	2.0	2.0	40	6/5.48	4/3.60
T10	16	2.0	2.0	48	6/5.48	4/3.60

注:/后为试件的实际测量厚度,经游标卡尺测量三次取平均值.

(3)加载及量测

本试验采用 WAW - 600kN 微机控制电液伺服万能试验机加载. 试验时为精确的测得不锈钢螺栓连接的抗剪性能,在盖板相应部位粘贴应变片,通过测得应变的具体变化情况,再结合荷载施加情况,来判断连接的破坏模式. 通过 D3819 无线静态应变测试系统采集应变数据,应变测试系统和试验机见图 2(a)和(b)所示.

1.3 粘贴应变片

本试验的难点在于判断连接试件的破坏形式,为此在螺孔周围粘贴应变片,基于采集应变大小及变化速率的快慢,来判断螺栓连接的破坏模式,粘贴应变片示意图见图 3. 应变片从左到右依次编号为 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 和 K. 由图 3(a)可知,应变片 A 和 G 是对称的,B 和 F,C 和 E 是反对称的;由图 3(b)可知,应变片 A 和 K,E 和 I 是对称的,C 和 J,F 和 H 是反对称的.

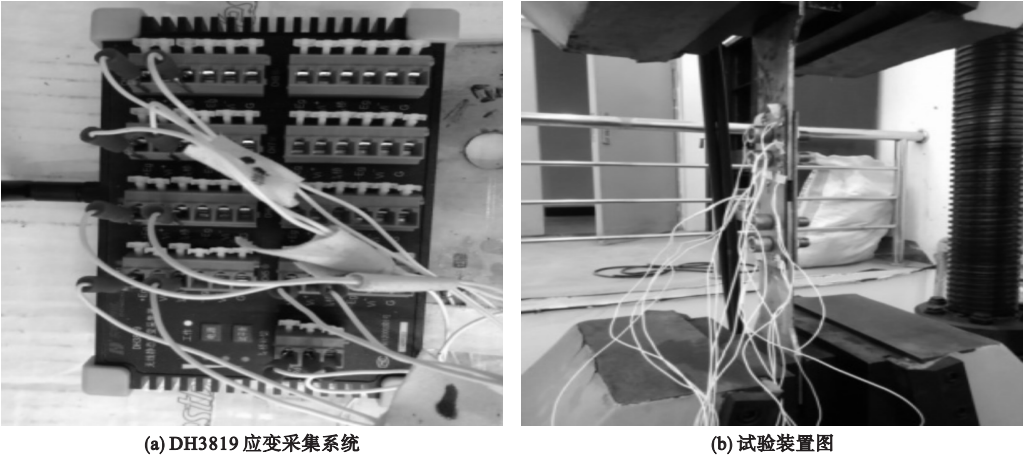


图2 DH3819应变采集系统和试验装置图

Fig. 2 DH3819 strain collection system and test apparatus

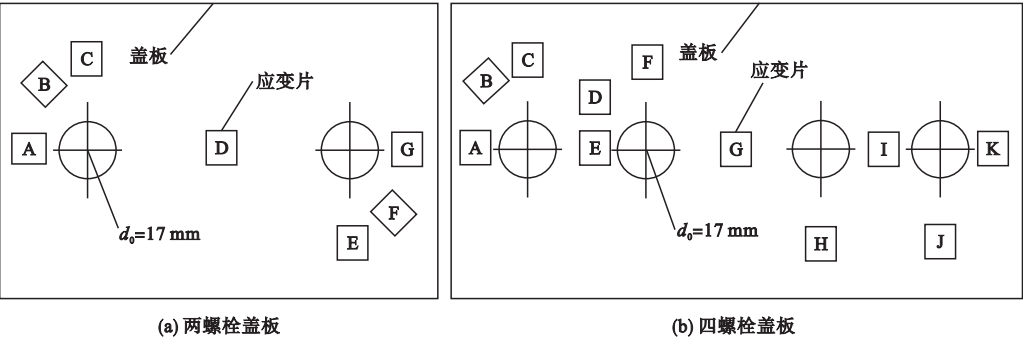


图3 盖板应变片粘贴示意图

Fig. 3 Paste diagram of strain gages with cover connection

采用的应变片型号为 BX120 - 3AA, 测量范围为 $15\,000 \times 10^{-6}$, 实际采购的应变片质量参差不齐, 有些应变片测量到 $30\,000 \times 10^{-6}$ 左右仍未破坏, 具体内容见后文介绍.

2 不锈钢螺栓连接节点抗剪性能试验过程

笔者研究的是板件的承压性能, 故试验中螺栓只是用扳手拧紧即可. 试验采用位移加载, 不锈钢材料的延性较好, 且应变硬化较强^[6], 即便螺栓孔处发生较大变形, 也不出现承压荷载下降现象. 因此, 未加载至试件完全破坏, 只确保区分破坏模式.

D3819 静态应变测试系统可采集应变片处的时间 - 应变数据, 万能试验机可采集时间 - 荷载数据, 汇总即可得到粘贴应变片处

的荷载 - 应变曲线. 表 2 给出了试验加载速度、粘贴应变片数量和初步判断的试件破坏模式等信息, 具体分析见下节.

表 2 试验信息汇总

Table 2 Test information				
编号	加载速度/ (mm·s ⁻¹)	粘贴应变 片数/个	破坏 模式	备注
T1	0.02 ~ 0.05	3	冲切	—
T2	0.05	5	冲切	—
T3	0.05	3	净截面	芯板拉断
T4	0.05	5	净截面	—
T5	0.05	7	承压	—
T6	0.05	5	净截面	发生翘曲
T7	0.05	5	净截面	发生翘曲
T8	0.05 ~ 0.1	8	—	—
T9	0.05 ~ 0.1	8	—	—
T10	0.05 ~ 0.1	8	—	芯板拉断

3 螺栓连接节点承压性能试验结果分析

3.1 试验结果分析

3.1.1 T1 ~ T5 试验结果分析

图4为试件T1~T5的荷载-位移曲线,除了T3外,其他试件都随着变形的增大而承压荷载持续增加.

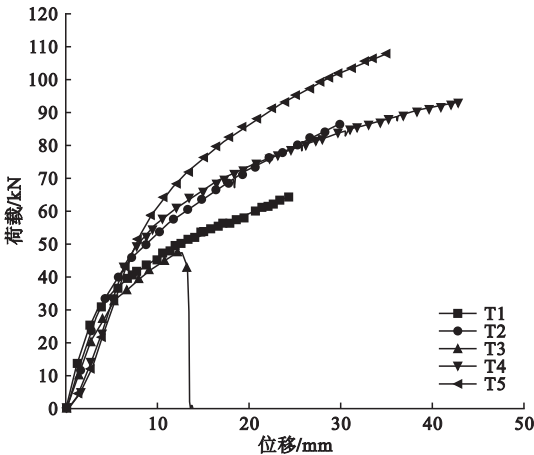


图4 T1~T5 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load displacement curves of specimen T1 ~ T5

应变片的读数如图5(a)~(e)所示,从图中可知应变数值随荷载的增加而增大,但加载初期增长比较缓慢,后期一些应变片数值增长渐渐加快. 正对称和反对程的应变片A和G、B和F、C和E,除了T2试件中C应变片失效外,正反对称的应变片测得的数据很接近,吻合较好. 形成偏差的主要原因

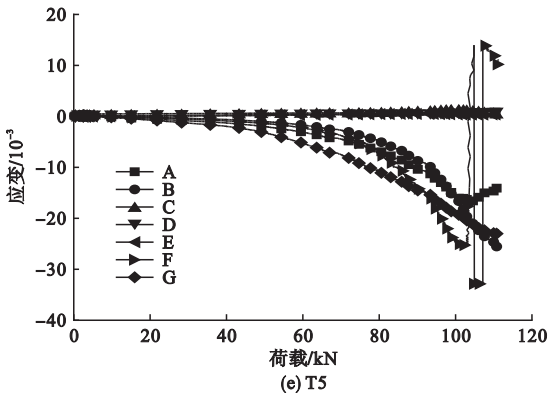
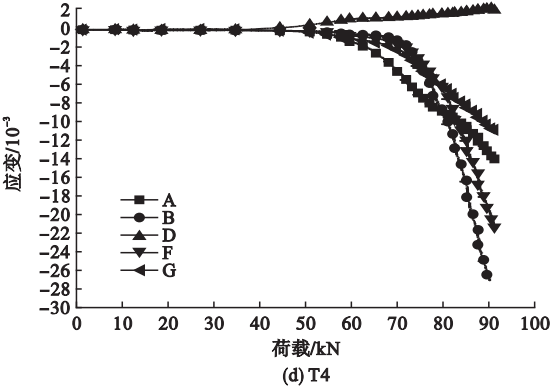
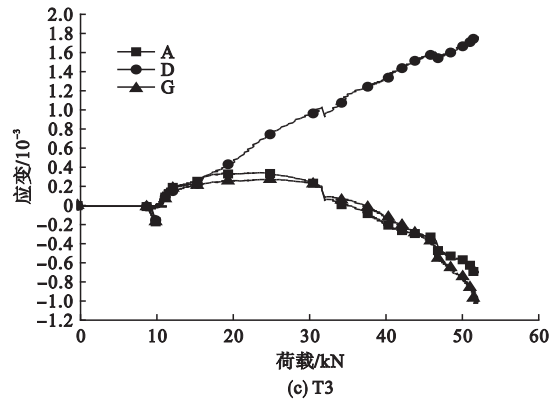
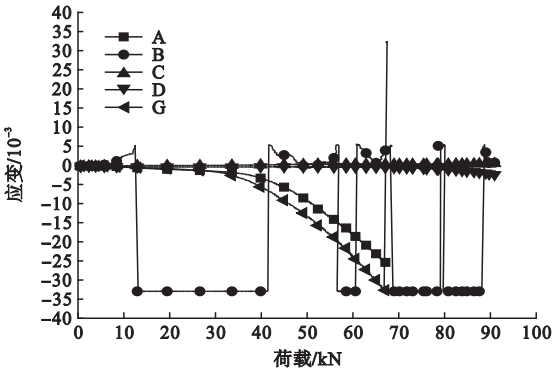
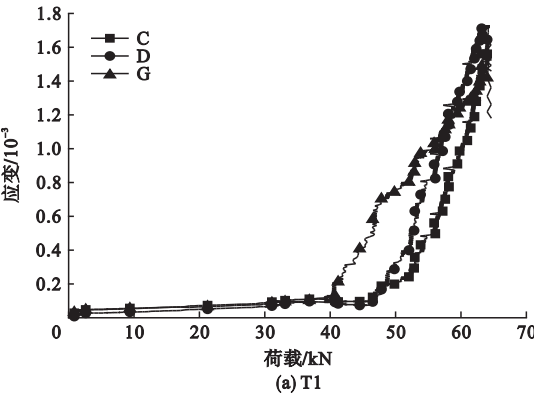


图5 试件T1~T5 荷载-应变曲线

Fig. 5 Load strain curves of specimen T1 ~ T5

是:1) 试件加工时存在较大初始偏心;2) 粘贴应变片位置存在偏差。

D 应变片在 T1 和 T3 中受力较大, 在 T2、T4 和 T5 中, 应变片数据变化较小, 说明板件中间基本无应变, 该部分板件只是传递荷载。T2 应变片 B 失效, T5 应变片 F 在试验后期超过测量范围失效。T1 ~ T5 试件中应变片的具体粘贴部位及试验后盖板、芯板的变形见图 6、图 7。试件的破坏模式判断:1) 对 T1 试件, 由图 5(a) 可知, C 和 E 应变片读数显示两者均受拉, 说明盖板端部承受拉力作

用, 且应变增长较快, 结合图 7(a) 判断为冲切破坏;2) 对 T2 试件, 由图 5(b) 可知, A 和 G 应变片的数据值最大, 结合图 7(b), 判断为冲切破坏;3) 对 T3 试件, 图 5(c) 可知, A、D 和 G 应变片数值相差不大, 但总应变值很小, 由于加工误差, 试件芯板过早破坏, 如图 7(c) 所示, 判断为净截面破坏;4) 对 T4 试件, 由图 5(d) 可知, B 和 F 应变片数值较大, 再结合图 7(d), 判断为净截面破坏;5) 对 T5 试件, 由图 5(e) 可知, A、G 和 B、F 应变片的数值较大, 结合图 7(e) 判断为承压破坏。

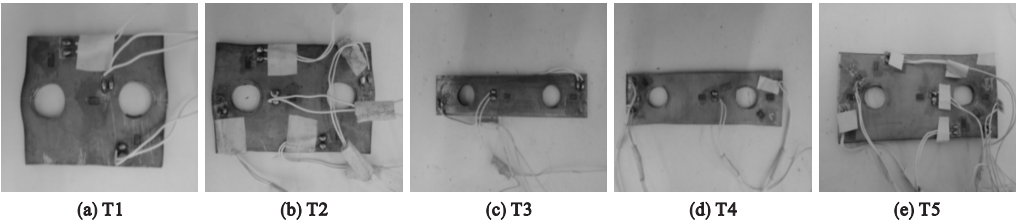


图 6 试验后盖板变形图

Fig. 6 The deformation diagram of test cover plate

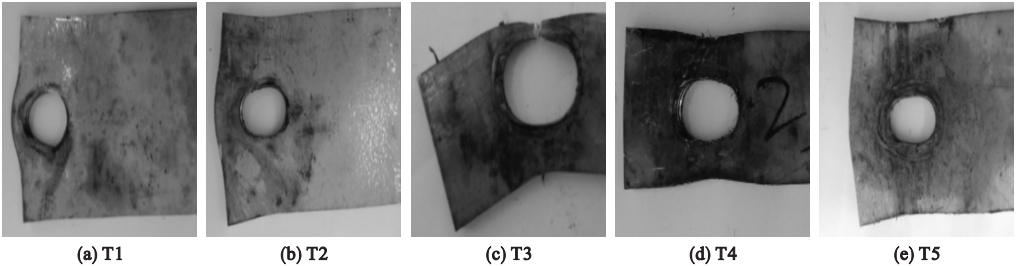


图 7 试验后芯板变形图

Fig. 7 The deformation diagram of test plate

3.1.2 T6 ~ T7 试验结果分析

T6、T7 的时间 - 荷载、时间 - 应变图如

图 8 所示。T6 试件的时间 - 荷载曲线在 60 s 左右, 承压荷载出现轻微下降, 并持续一小段

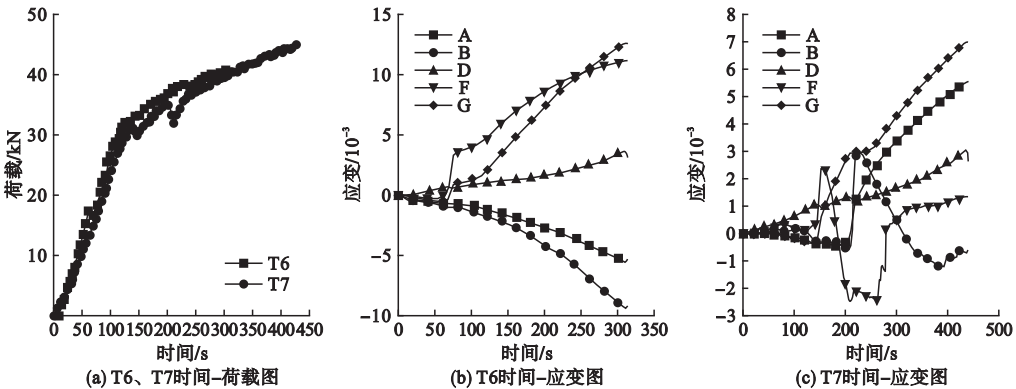


图 8 时间 - 荷载、时间 - 应变图

Fig. 8 Time-load curves and time-train curve of specimen

时间,之后承压荷载持续增加未出现下降. T7 试件在 140 s 和 200 s 左右,承压荷载出现下降,并持续一小段时间,200 s 之后承压荷载未出现下降.

T6 和 T7 应变片的读数如图 8(b) 和 (c) 所示,T6 和 T7 试件应变片 A 和 G 粘贴是对

称的,B 和 F 粘贴是反对称的,在未发生翘曲前,数据相差较小,数据吻合良好,但在发生翘曲之后,其中 T6 发生一次明显的数值变化,T7 发生两次(见图 9). 这与荷载发生下降的时间相吻合. 由于翘曲的发生,端部受力状态发生改变,由受压向受拉转变.

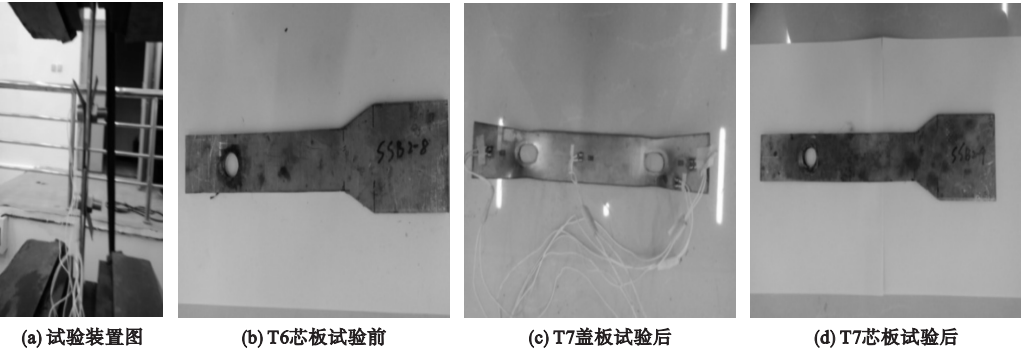


图 9 试验装置和试件试验后示意图

Fig. 9 The test device and test schematic diagram of the specimen

从图 9(b) 和 (d) 中可以看出,试验后的芯板基本未发生明显的变形,这是由于翘曲的发生,导致承压荷载降低,所以芯板变形不明显.

由于试件的初始偏心和粘贴应变片位置存在一定的误差,导致应变片数值在对称的位置变形出现一些延迟,但结果符合对称性质.

3.1.3 T8 ~ T10 试验结果分析

T8 ~ T10 试件的荷载 - 位移曲线见图 10. 由图可知,随着位移的增大,荷载持续增加,T10 试件芯板在加载后期拉断,荷载出现下降.

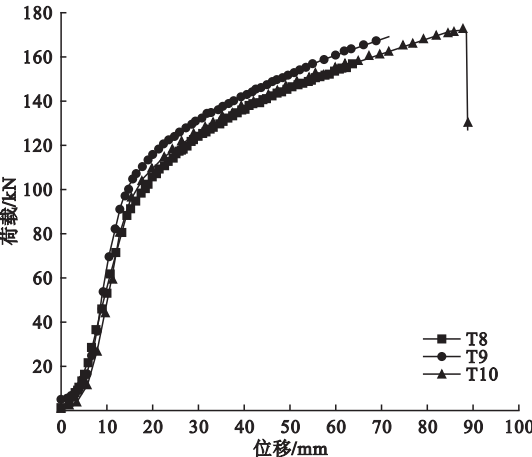


图 10 荷载 - 位移曲线

Fig. 10 The load-displacement curves

应变片的读数和粘贴部位如图 11 和图 12 所示,应变片数值在加载初期增长缓慢,加载到 90 kN 左右才增长加快. 其中应变片 A 和 K、E 和 I 粘贴是对称的,应变片 C 和 J 粘贴、F 和 H 是反对称的,对称的应变片数据相差较小,数值吻合较好.

T8 试件应变片 D 数值增长最快,很快超出应变片测量的范围,在荷载 130 kN 左右应变片失效. G 应变片随着力的增大,应变增长较缓慢,最后应变达到 0.013 时应变片失效,说明试件中央变形也较大.

T9 试件应变片 F 在荷载 135 kN 时受压状态慢慢向受拉状态转变,但在最后仍处于受压状态,说明此处先受拉力较大,之后受力慢慢减小,最后受力基本不变. G 应变片变化与 T8 相似,随着荷载的增加而增加,最后超过测量范围,应变片失效.

T10 试件 C 和 F 应变片的数据变化较小,说明这两处应变较小,到后期才渐渐增大,说明没发生净截面破坏,承压破坏可能性大.

此外,结合图 13(a)、(b) 和 (c) 所示的 T8 ~ T10 试件的芯板试验后的变形图,判断

芯板靠近里边的螺孔部位呈净截面破坏。

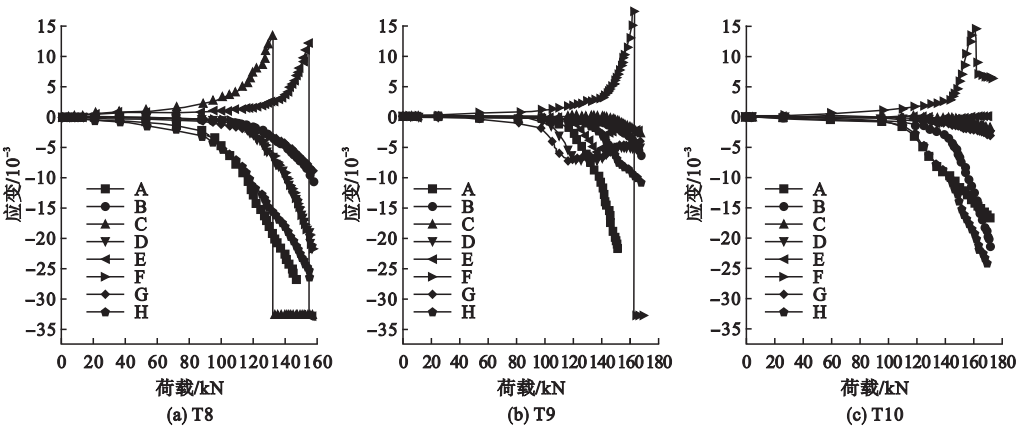


图 11 荷载 - 应变曲线
Fig. 11 The load-strain curves

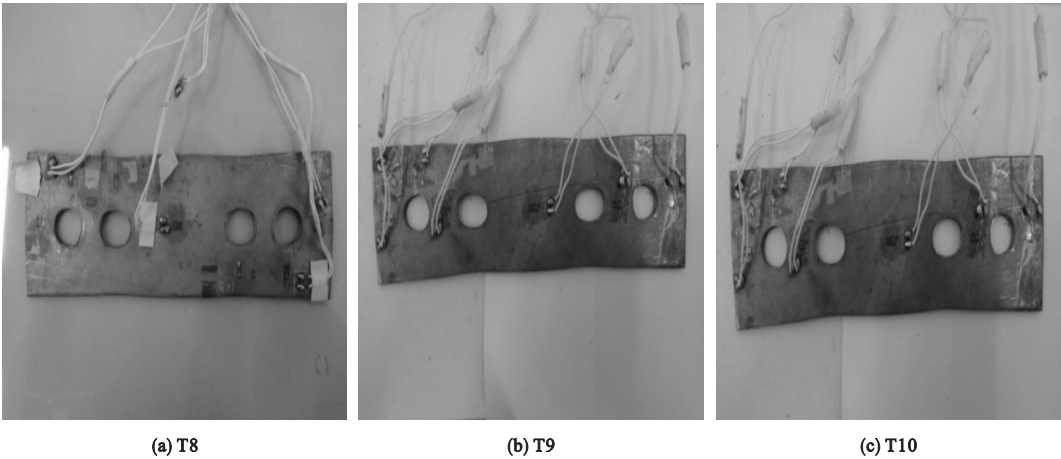


图 12 盖板试验后变形图
Fig. 12 The deformation diagram of test cover plate

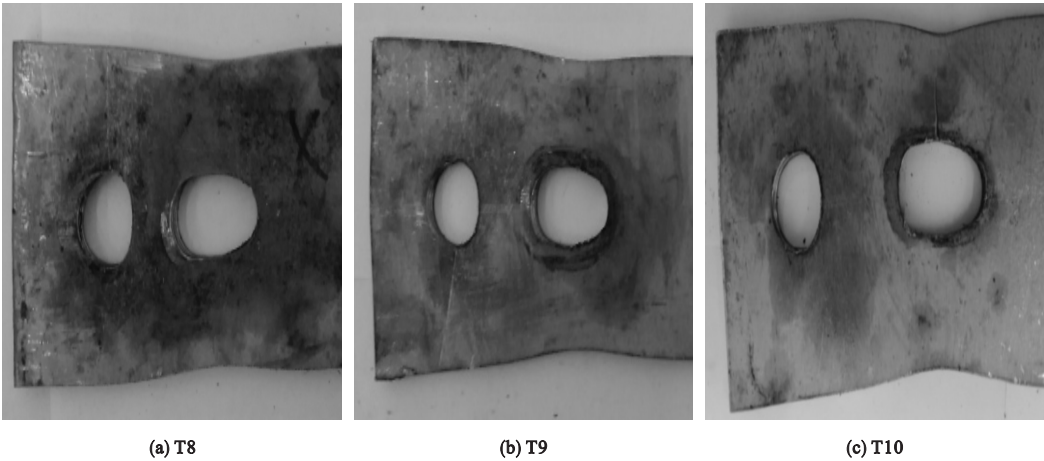


图 13 芯板试验后变形图
Fig. 13 The deformation diagram of test plate

3.2 对比分析

由上面的试验分析得到:

(1)从 T1、T2 和 T5 试验后盖板图中可以看出,其他参数不变,随着端距比的增大,板件的破坏形式从冲切破坏向承压破坏模式转变;

(2)从 T3、T4 和 T5 试验后盖板图可以看出,其他参数不变,随着边距比的增大,板件的破坏形式从净截面破坏向承压破坏模式转变;

(3)从 T6 和 T7 试件的时间-应变图中可以看到,翘曲的发生导致发生翘曲部位受力方向的转变,端部受力情况由受压向受拉转变;

(4)综合 T6 和 T7 试件试验后的时间-荷载和时间-应变图,可以看到发生翘曲的时间吻合,由此可见,翘曲的发生导致试件承载力的明显下降,这在设计中予以注意.

(5)从 T8、T9 和 T10 试验后盖板图中可以看出,其他参数不变,随着螺栓中距的增大,板件的破坏形式从承压破坏向净截面破坏模式转变;

4 结 论

(1)不锈钢材料的延性较好,即便螺栓孔处发生较大变形,承压荷载仍未下降,应变硬化较强.

(2)经试验验证,应满足螺栓的中距不小于 $3d$ 、端距不小于 $2d$ 和边距不小于 $1.5d$ 的构造要求,连接才是经济安全的.

(3)建议板厚以 4 mm 为分界线,大于 4 mm 为厚板,小于 4 mm 为薄板,当为厚板时,翘曲基本不发生,而薄板易发生翘曲.

(4)当螺栓连接设计中采用薄板作为承压试件时,需要考虑薄板发生翘曲引起的承压强度折减.

(5)薄板发生翘曲的条件是端距越大、板厚越小越容易发生,在设计时需考虑;当薄板发生翘曲时,端部翘曲部位由受压变为受拉.

参考文献

- [1] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构的应用和研究现状[J]. 钢结构,2012,25(2):1-13.
(WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, et al. A review of current applications and research of stainless steel structure [J]. Steel structure, 2012, 25(2): 1-13.)
- [2] 关建,王元清,张勇. 不锈钢连接节点及其工程应用研究[C]//中国钢结构稳定与疲劳分会第12届(ASSF-2010)学术交流会暨教学研讨会. 宁波:中国钢结构协会,2010:125-140.
(GUAN Jian, WANG Yuanqing, ZHANG Yong. Research on stainless steel connections and its application in engineering [C]//The 12th academic conference and seminar for structural stability and fatigue branch of China steel structure association. Ningbo: China Steel Construction Society, 2010: 125-140.)
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 不锈钢结构技术规范:CECS 410—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
(Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technical specification for stainless steel structure: CECS410—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.)
- [4] 关建,王元清,张勇,等. 不锈钢螺栓连接节点设计方法比较[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(1):115-120.
(GUAN Jian, WANG Yuanqing, ZHANG Yong, et al. Comparisons of design methods for bolted connection of stainless steel structures [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2012, 29(1): 115-120.)
- [5] 邹若梦,董军,章金旭. 美欧不锈钢结构连接设计规范比较[J]. 工业建筑,2012,42(5):63-66.
(ZOU Ruomeng, DONG Jun, ZHANG Jinxu. A comparison of connection design in stainless steel structures between American and European codes [J]. Industrial building, 2012, 23(15): 1830-1833.)
- [6] 朱浩川,姚谏. 不锈钢材料的应力-应变模型[J]. 空间结构,2011,17(1):62-69.
(ZHU Haochuan, YAO Jian. Stress-strain model for stainless steel [J]. Spatial structures, 2011, 17(1): 62-69.)
- [7] QUACH W M, TENG J G, CHUNG K F.

- Three-stage full-range stress-strain model for stainless[J]. Journal of structural engineering, 2008, 134(9):1518-1527.
- [8] AVERSENG J, BOUCHAIR A. Modeling and analysis of bolted stainless steel cover plate joints[J]. European journal of environmental and civil engineering, 2009, 13(4):442-456.
- [9] SALIH E L, GARDNER L, NETHERCOT D A. Numerical investigation of net section failure in stainless steel bolted connections[J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66:1455-1466.
- [10] BOUCHAIR A, AVERSENG J, ABIDELAH A. Analysis of the behavior of stainless steel bolted connections[J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(7):1264-1274.
- [11] NETHERCOT N A, SALIH E L, GARDNER L. Behavior and design of stainless steel bolted connections[J]. Advance in structural engineering, 2011, 14(4):647-658.
- [12] SALIH E L, GARDNER L, NETHERCOT D A. Bearing failure in stainless steel bolted connections[J]. Engineering structures, 2011, 33(2):549-562.
- [13] 关建. 不锈钢构件螺栓连接节点及焊接工字形截面残余应力研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
(GUAN Jian. Research on bolted connection and residual stress in fabricated I-section in structural stainless steel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.)
- [14] KIM T S, KUWAMURA H. Numerical investigation on strength design and curling effect of mechanically fastened joints in cold-formed austenitic stainless steel[J]. Material and design, 2011, 32(7):3942-3956.
- [15] KIM T S, KUWAMURA H, CHO T J. A parametric study on ultimate strength of single shear bolted connections with curling[J]. Thin-walled structures, 2008, 46(1):38-53.
- [16] KIM T S, KUWAMURA H. Numerical investigation on strength design and curling effect of mechanically fastened joints in cold-formed austenitic stainless steel[J]. Materials & design, 2011, 32(7):3942-3956.
- [17] 关建, 王元清, 张勇, 等. 不锈钢构件高强度螺栓连接节点抗剪承载性能的影响素分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4):115-120.
(GUAN Jian, WANG Yuanqing, ZHANG Yong, et al. Influencing factors on bearing performance of high strength bolted connection in stainless steel carried shear force[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2012, 36(4):115-120.)
- [18] YOUNG B. Experimental and numerical investigation of high strength stainless steel structures[J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(11):1225-1230.
- [19] 邹若梦, 董军, 金晓兰. 不锈钢对接焊缝连接试验及设计建议[J]. 建筑结构, 2013, 43(9):83-87.
(ZOU Ruomeng, DONG Jun, JIN Xiaolan. Experiments and design suggestions for stainless steel weld connections[J]. Building structure, 2013, 43(9):83-87.)
- [20] GREINER R, KETTLER M. Interaction of bending and axial compression of stainless steel members[J]. Journal of constructional steel research, 2008(64):1217-1224.
- [21] 徐梓雯, 那景新, 张志远, 等. 螺栓连接有限元模型的弹性接触研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(15):1830-1833.
(XU Ziwen, NA Jingxin, ZHANG Zhiyuan, et al. Research on elastic contact of finite element model of bolted connection[J]. China mechanical engineering, 2012, 23(15):1830-1833.)