

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.03.003

铝合金环槽铆钉连接节点弯矩-转角关系

冯若若,张铮,邵珂珂

(福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118)

摘要:采用有限元分析方法考察梁和柱的截面尺寸、角型连接件尺寸、铆钉直径及端距等对节点性能的影响,根据计算得到的弯矩-转角曲线拟合出三参数模型中形状系数 n 值的近似计算公式。结果表明,柱翼缘厚度和角型件厚度对节点初始刚度和极限承载力影响显著,梁高和铆钉端距的影响次之。形状系数建议公式计算结果与试验结果吻合较好,可为该类连接节点设计方法提供理论依据。

关键词:铝合金;梁柱节点;环槽铆钉;影响因素;形状系数;有限元分析

中图分类号: TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)03-0219-06

Study on moment-rotation relationship of aluminum alloy swag-locking pins

FENG Ruoruo, ZHANG Zheng, SHAO Keke

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The effects of beam and column section size, angle connector size, the diameter and end distance of bolt holes on the joints' properties were investigated by finite element analysis method. According to the obtained moment-rotation curves, the approximate calculation formula for the value of the shape coefficient in the three-parameter power model was fitted. Results show the thickness of column flange and that of angle member have significant effects on the initial stiffness and ultimate bearing capacity of the joint, followed by beam height and end distance of bolt holes. The calculated results of the proposed shape coefficient formula are in good agreement with the experimental results, which provides a theoretical basis for the design method of this type of connection.

Keywords: aluminum alloy; beam-column joints; swage-locking pins; influence factors; shape coefficient; finite element analysis

由于热输入影响,铝合金焊接热影响区内材料强度显著下降^[1],故铝合金结构一般采用机械连接,主要包括高强螺栓连接与环槽铆钉连接。铝合金与钢材直接接触会发生电化学腐蚀从而降低节点的耐久性,不锈钢制成的环槽铆钉更适用于铝合金梁柱节点的连接。

目前,铝合金结构环槽铆钉连接节点的研究取得一定成果,多集中在板式节点上^[2-4]。近年来国内学者针对铝合金框架环槽铆钉连接梁柱节点开展了相关试验研究。王中兴等^[5-6]对 T 型件及铝合金框架环槽铆钉连接梁柱节点分别进行拉伸与单调加载试验,研究了 T 型件破坏模式和几何构造参数及不同材料对梁柱节点破坏模式和初始刚度的影响。邓华等^[7]对工程常用铝合金板件环槽铆钉搭接连接试件进行静力试验,考察铆钉孔径、端距、边距等参数对承载力的影响。张天熊等^[8]对国产新型高强度不锈钢环槽铆钉连接进行一系列试验研究,给出了环槽铆钉单钉预紧力设计值及铆接顺序原则。由于框架结构在进行半刚性连接节点设计时,需保证节点的构造与假定的弯矩-转角曲线相符^[9],而现阶段对铝合金框架环槽铆钉连接节点弯矩-转角关系的研究还不充分。

收稿日期: 2022-04-12
基金项目: 建设部国家标准《铝合金结构技术标准》编制项目(建标[2016]248号);福建工程学院科技发展基金(GY-Z17159)
第一作者简介: 冯若若(1997—),女,河南信阳人,硕士研究生,研究方向:钢结构和新型结构体系。
通信作者: 张铮(1978—),男,河南焦作人,教授,博士,研究方向:钢结构和新型结构体系。

建立有限元模型对节点进行数值分析,在验证有限元模型准确性及有效性的基础上分析不同参数对节点力学性能的影响,基于三参数模型得出形状系数近似计算公式,为工程应用提供参考。

1 建立有限元模型

利用有限元软件 ABAQUS 建立铝合金框架环槽铆钉连接梁柱节点数值模型。梁、柱均采用 6061-T6 牌号铝合金。截面尺寸均为 H280 mm×160 mm×8 mm×10 mm,长度 1 500 mm。角型连接件和环槽铆钉为 S304 不锈钢材料。环槽铆钉整体构造复杂,故在有限元软件中选用简化模型^[6]。节点构造和环槽铆钉简化模型见图 1 和图 2。

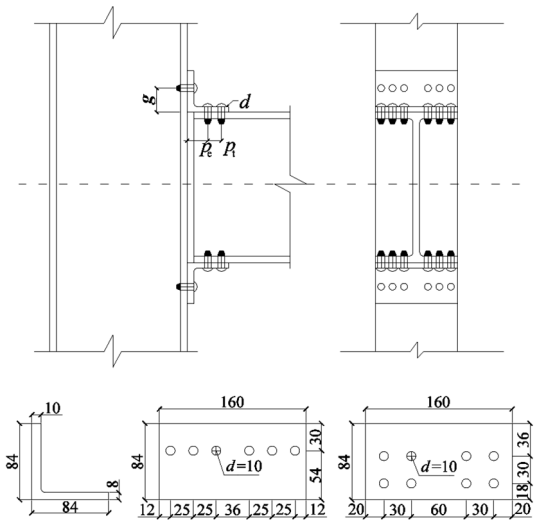


图 1 节点构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the joint's construction

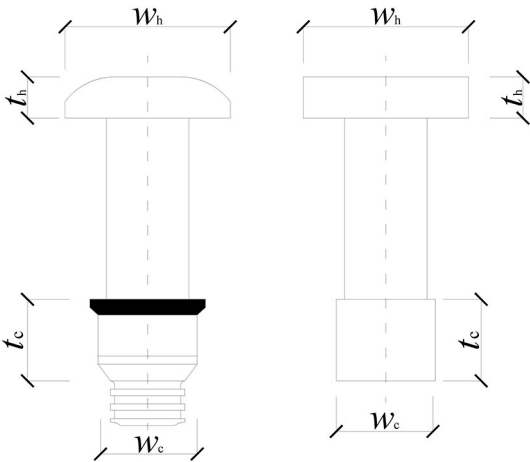


图 2 环槽铆钉简化模型

Fig.2 Simplified model of swag-locking pin

1.1 材料本构关系

铝合金材料的应力-应变关系采用 Ramberg-Osgood 模型来描述:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

式中, n 为应变硬化系数,一般根据 Steinhardt 的建议^[10]取 $n = \sigma_{0.2}/10$; $\sigma_{0.2}$ 为残余应变 0.2% 时对应的应力,MPa; E 为初始弹性模量,GPa。

对于不锈钢材料,Rasmussen 进一步提出了基于公式(1)的修正模型^[11]。

当 $\sigma \leq \sigma_{0.2}$ 时

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (2)$$

当 $\sigma > \sigma_{0.2}$ 时

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \frac{\sigma_{0.2}}{E} + 0.002 \quad (3)$$

其中, $n = \ln 20 / \ln (\sigma_{0.2} / \sigma_{0.01})$; $E_{0.2}$ 为残余应变 0.2% 时对应的弹性模量, $E_{0.2} = E / (1 + 0.002nE / \sigma_{0.2})$; m 为应力大于 $\sigma_{0.2}$ 时的材料应变硬化系数, $m = 1 + 3.5\sigma_{0.2} / \sigma_u$; σ_u 为极限应力,MPa; ε_u 为极限应力对应的极限应变, $\varepsilon_u = 1 - \sigma_{0.2} / \sigma_u$ 。

1.2 单元选取、网格划分与选定

有限元模型选用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),该实体单元求解比较精确,但存在沙漏问题,需要通过细化网格。为避免出现网格扭曲失效现象,在铆钉孔四周对部件进行切割处理。节点有限元模型网格如图 3 所示。

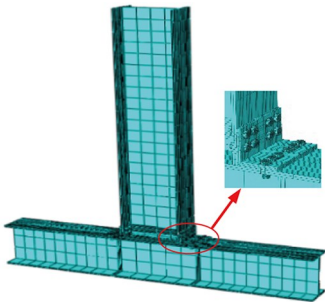


图 3 节点有限元模型网格划分

Fig.3 Joint's finite element model meshing

1.3 相互作用及边界条件

节点中存在很多接触,包括铆钉上下表面与梁、柱翼缘、铆钉与铆钉孔、角型件与梁、铆钉与角型件接触等。节点接触类型为面-面接触,法向

采用“硬接触”,切向采用库伦摩擦,摩擦系数设置为 0.3^[6]。施加预紧力时,可沿中部截面将铆钉分为两部分,在该切分面上施加铆钉预紧力,设定铆钉预紧力为 18.85 kN^[12]。

节点柱端设置为铰接,梁端截面约束耦合点的面外位移及转角,模拟试验中设置侧向支撑的情况。

1.4 模型验证

选取文献[5]中试验模型 TSAC-S1 进行建模分析。将有限元所得结果与试验的弯矩-转角曲线进行比较,如图 4 所示,极限承载力误差为 3.3%。通过对比可知,有限元模型计算结果与试验吻合较好。

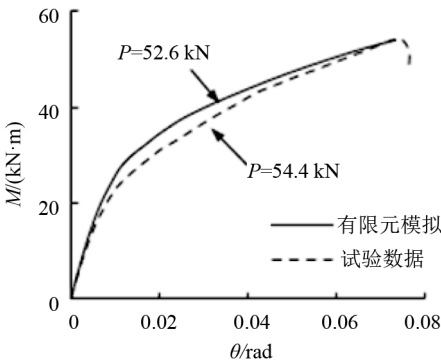


图 4 弯矩-转角曲线对比

Fig.4 Moment-rotation curve comparison

由于节点有限元计算所得弯矩-转角曲线无明显下降段,因此,顶底角型件受拉区的应力或柱翼缘核心区应力接近或刚达到材料的极限强度时,以出现局部塑性屈服区域为判定准则^[13],认为此时节点发生破坏。

2 有限元参数分析

对 32 个模型进行参数化分析,表 1 给出了部分有限元模型的尺寸,1 为基准模型,其他都是在基准模型的基础上改变参数得到。以下仅给出改变柱翼缘厚度(CFT 试件)、梁截面高度(BH 试件)、连接件翼缘厚度(AFT 试件)和铆钉端距(SD 试件)等影响较大的参数的结果与讨论。

除表 1 给出的部分参数取值外,其余参数取值分别为角型件翼缘 t_{af} 厚度取 6~14 mm,梁截面高度 h_b 取 240~280 mm,角型件与柱翼缘连接的铆钉中心到梁翼缘的距离 g 取 44~64 mm,铆钉直径 d 取 10~14 mm,梁翼缘厚度 t_{bf} 取 6~12 mm,梁腹板厚度 t_{bw} 取 6~12 mm,角型件与梁翼缘连接处螺栓的中心距 p_t 取 25~35 mm,角型件与梁翼缘连接处螺栓端距 p_e 取 31~41 mm。

表 1 节点参数分析截面尺寸

Tab.1 Joint parameter analysis of cross-section dimensions

| 模型 编号 | 柱截面尺寸 | 梁截面尺寸 | 角型件截面 | d | g | p_t | p_e |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----|-----|-------|-------|
| | $H \times B \times t_w \times t_f$ | $H \times B \times t_w \times t_f$ | $H \times B \times t_w \times t_f$ | | | | |
| 1 | H280×160×8×10 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 2 | H280×160×8×6 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 3 | H280×160×8×8 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 4 | H280×160×8×12 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 5 | H280×160×8×14 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 6 | H280×160×6×10 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 7 | H280×160×10×10 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |
| 8 | H280×160×12×10 | H280×160×8×10 | └ 84×84×8×10 | 10 | 54 | 30 | 36 |

注:表中 H 为高度, B 为梁、柱和角型件翼缘宽度, t_w 为腹板厚度, t_f 为翼缘厚度。

2.1 柱翼缘厚度

为研究柱翼缘厚度变化对节点连接性能的影响,设计了 CFT 系列试件,其中 CFT10 为基准试

件。CFT 系列试件的有限元计算结果见表 2。

由表 2 可见,柱翼缘厚度变化对节点的承载力和刚度有明显影响。CFT8、CFT10 与 CFT6 试

件相比,初始刚度分别提高 12.2%、33.1%,极限承载力分别提高 26.8%、53.4%。随着柱翼缘厚度的增加,节点承载力变化很小,节点的初始刚度随厚度增大而增大。CFT14 试件的极限承载力相对于 CFT12 试件仅提高 0.9%。当柱翼缘厚度足够大时,角型连接件被拉弯,翼缘与腹板交接处先形成塑性铰,随后产生裂缝断裂。柱翼缘厚度较小时,发生撕裂破坏,破坏模式改变,成为影响节点连接性能的关键因素。

表 2 CFT 试件计算结果

Tab.2 CFT test piece calculation results

| 试件 编号 | $R_{in}/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$ | $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | θ/rad | 破坏 模式 |
|----------|---|----------------------------------|---------------------|----------|
| CFT6 | 2 911 | 34.3 | 0.033 | 柱翼缘受弯破坏 |
| CFT8 | 3 265 | 43.5 | 0.034 | 柱翼缘受弯破坏 |
| CFT10 | 3 873 | 52.6 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |
| CFT12 | 4 127 | 55.5 | 0.072 | 角型件翼缘破坏 |
| CFT14 | 4 304 | 56.0 | 0.072 | 角型件翼缘破坏 |

注:表中 R_{in} 为节点的初始转动刚度, M_u 为节点极限弯矩, θ 为节点极限转角,下表同。

2.2 梁截面高度

为研究梁截面高度变化对节点连接性能的影响,设计了 BH 系列试件,计算结果见表 3。

表 3 BH 试件计算结果

Tab.3 BH test piece calculation results

| 试件 编号 | $R_{in}/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$ | $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | θ/rad | 破坏 模式 |
|----------|---|----------------------------------|---------------------|----------|
| BH240 | 2 722 | 44.7 | 0.071 | 角型件翼缘破坏 |
| BH250 | 2 950 | 46.9 | 0.071 | 角型件翼缘破坏 |
| BH260 | 3 165 | 49.2 | 0.072 | 柱翼缘受弯破坏 |
| BH270 | 3 481 | 51.2 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |
| BH280 | 3 873 | 52.6 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |

由表 3 可见,增加梁高对连接的初始刚度和极限承载力有一定影响。BH250、BH260 与 BH240 试件相比,初始刚度分别提高了 8.4%、16.3%,极限承载力分别提高 4.9%、10.1%。BH270、BH280 与 BH260 试件相比,初始刚度分

别增加 10.0%、22.4%,极限承载力分别增长 4.1%、6.9%。梁截面高度增加时,其转动能力减小,承载力和初始刚度提高。

2.3 角型件翼缘厚度

为研究角型件翼缘厚度变化对节点连接性能的影响,设计了 AFT 系列试件,有限元计算结果见表 4。

表 4 AFT 试件计算结果

Tab.4 AFT test piece calculation results

| 试件 编号 | $R_{in}/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$ | $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | θ/rad | 破坏 模式 |
|----------|---|----------------------------------|---------------------|----------|
| AFT6 | 3 102 | 39.4 | 0.073 | 角型件翼缘破坏 |
| AFT8 | 3 418 | 45.4 | 0.066 | 角型件翼缘破坏 |
| AFT10 | 3 873 | 52.6 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |
| AFT12 | 3 911 | 54.0 | 0.061 | 柱翼缘受弯破坏 |
| AFT14 | 3 962 | 54.7 | 0.058 | 柱翼缘受弯破坏 |

由表 4 可见,角型件翼缘厚度变化对初始刚度和极限承载力有较大影响。AFT8、AFT10 与 AFT6 试件相比,初始刚度分别提高了 10.2%、24.9%,极限承载力分别提高 15.2%、33.5%。AFT12、AFT14 与 AFT10 试件相比,初始刚度分别增加了 1.0%、2.3%,极限承载力分别增长了 2.6%、3.8%,随着角型件翼缘厚度的增加,节点的初始刚度和极限承载力增长不明显。因此角型件翼缘应采取合适厚度,不宜过薄或过厚。

2.4 铆钉端距

为研究角型件与柱翼缘连接的铆钉中心到梁翼缘的距离变化对节点连接性能的影响,设计了 SD 系列试件,有限元计算结果见表 5。

表 5 SD 试件计算结果

Tab.5 SD test piece calculation results

| 试件 编号 | $R_{in}/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$ | $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | θ/rad | 破坏 模式 |
|----------|---|----------------------------------|---------------------|----------|
| SD-64 | 3 190 | 45.0 | 0.074 | 角型件翼缘破坏 |
| SD-59 | 3 519 | 50.5 | 0.073 | 角型件翼缘破坏 |
| SD-54 | 3 873 | 52.6 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |
| SD-49 | 4 152 | 58.2 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |
| SD-44 | 4 456 | 61.3 | 0.067 | 柱翼缘受弯破坏 |

由表 5 可见,角型件与柱翼缘连接的螺栓中心到梁翼缘的距离越小,初始刚度和极限承载力越大。SD-59、SD-54 与 SD-64 试件相比,初始刚度分别提高了 6.2%、10.8%,极限承载力分别提高了 12.2%、16.9%。SD-49、SD-44 与 SD-54 试件相比,初始刚度分别增加 4.2%、7.8%,极限承载力分别增长 10.6%、16.5%。因此采用较小的端距有利于提高连接节点的初始刚度和承载能力。

3 三参数幂函数模型

用三参数模型模拟框架节点的弯矩-转角关系,能较好地模拟出 $M-\theta$ 的非线性特征,且表达形式简单。函数模型表达式为:

$$M = \frac{R_{ki}\theta}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}}$$

(4)

其中, R_{ki} 为连接的初始刚度, $\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$; θ_0 为参考塑性转角, $\theta_0 = M_u/R_{ki}$; M_u 为连接的极限弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; n 为形状系数。

三参数模型中 R_{ki} 和 M_u 可通过数值分析求得,但形状系数 n 不具备具体的物理含义,可通过数值分析得到模型的弯矩-转角曲线,利用最小二乘法原理,拟合出形状系数 n 的值。表 6 给出

32 个环槽铆钉连接梁柱节点有限元模型的形状系数 n 的拟合值。

将表 6 中形状系数 n 的拟合值和所对应的参考塑性转角值 θ_0 进行整理,如图 5 所示。利用最小二乘原理,拟合出一条直线来近似求解形状系数 n 的数值,该直线方程为:

$$n = 1.04 + 19\theta_0$$

(5)

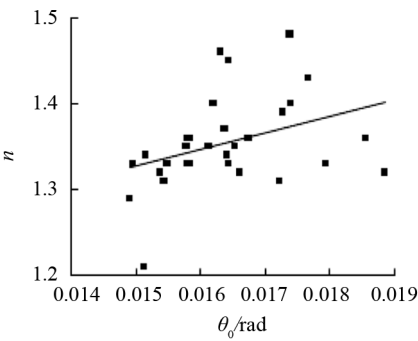


图 5 形状系数 n 的散点分布及近似解

Fig.5 Scatter distribution of shape coefficient n and its approximate solution

选取试验数据^[5]与拟合的弯矩-转角曲线进行比较分析,如图 6 和图 7 所示,得到的形状系数近似计算公式与试验结果吻合良好。

表 6 形状系数 n 的拟合值和近似值

Tab.6 Fitted and approximate values of the shape coefficient n

| 模型编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n 的拟合值 | 1.40 | 1.32 | 1.37 | 1.35 | 1.34 | 1.40 | 1.31 | 1.29 |
| n 的近似解 | 1.35 | 1.36 | 1.35 | 1.34 | 1.33 | 1.37 | 1.33 | 1.32 |
| 模型编号 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| n 的拟合值 | 1.21 | 1.45 | 1.46 | 1.43 | 1.39 | 1.35 | 1.33 | 1.33 |
| n 的近似解 | 1.33 | 1.35 | 1.35 | 1.38 | 1.37 | 1.35 | 1.32 | 1.34 |
| 模型编号 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| n 的拟合值 | 1.48 | 1.33 | 1.32 | 1.36 | 1.31 | 1.32 | 1.36 | 1.36 |
| n 的近似解 | 1.37 | 1.38 | 1.40 | 1.39 | 1.37 | 1.33 | 1.36 | 1.34 |
| 模型编号 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| n 的拟合值 | 1.33 | 1.33 | 1.35 | 1.34 | 1.35 | 1.33 | 1.35 | 1.36 |
| n 的近似解 | 1.33 | 1.35 | 1.35 | 1.33 | 1.35 | 1.34 | 1.34 | 1.34 |

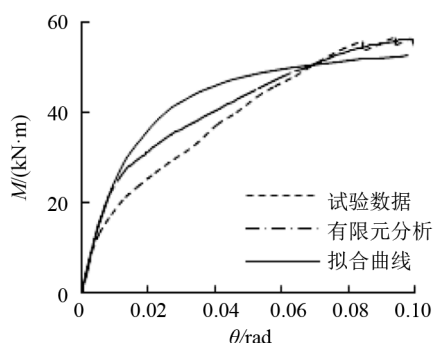


图 6 试件 TSAC-S2

Fig.6 Test piece TSAC-S2

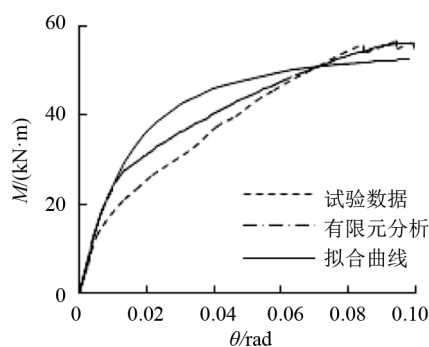


图 7 试件 TSAC-S3

Fig.7 Test piece TSAC-S3

4 结论

1) 采用的有限元方法在初始刚度、极限承载力和破坏模式等方面与试验结果吻合良好,可以较好地用于铝合金框架环槽铆钉连接梁柱节点的力学性能研究。

2) 柱翼缘厚度和角型连接件翼缘厚度对节点初始刚度及承载能力影响显著。柱翼缘厚度较小时,其厚度每增加 2 mm,节点的初始刚度提高 10% 左右,极限承载力提高 20% 以上;厚度较大时,继续增加柱翼缘厚度对提高节点承载力的作用不明显。角型件翼缘厚度较小时,其厚度每增加 2 mm,节点的初始刚度提高 10% 左右,极限承

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范:GB 50429—2007[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
- [2] GUO X N, XIONG Z, LUO Y F, et al. Experimental investigation on the semi-rigid behaviour of aluminium alloy gusset joints[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 87: 30–40.
- [3] 张颖, 王元清, 张俊光, 等. 铝合金网壳结构箱型-工字型盘式节点单肢受力性能有限元分析[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 130–138.
- [4] 刘小蔚, 欧阳元文. 南京牛首山佛顶宫大穹顶铝合金板式节点试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(11): 59–63.
- [5] WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG Y, et al. Experimental investigation on the behaviour of aluminium alloy beam-to-column joints connected by swage-locking pins[J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110578.
- [6] WANG Z X, WANG Y Q, YUN X, et al. Numerical modelling of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins: FE validation and parametric study[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106926.
- [7] 邓华, 陈伟刚, 白光波, 等. 铝合金板件环槽铆钉搭接连接受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 143–149.
- [8] 张天雄, 王元清, 陈志华, 等. 高强度不锈钢短尾环槽铆钉力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(S1): 151–158.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] STEINHARDT O. Aluminum constructions in civil engineering[J]. Aluminum, 1971, 47: 131–139, 254–261.
- [11] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of constructional steel research, 2003, 59(1): 47–61.
- [12] 陈伟刚. 平板型铝合金格栅结构板式节点的受力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] 陈爱国. 钢框架腹板双角钢梁柱抗剪连接在循环荷载作用下的破坏机理及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.

(责任编辑: 陈雯)