

T形头单向螺栓连接T形件-钢管节点抗拉性能研究

董鹏刚^{1,2}, 孙乐乐^{1*}, 张晋³, 王思琦¹

(1. 哈尔滨工程大学烟台研究院, 山东烟台 264003; 2. 中铁二十局集团市政工程有限公司, 兰州 730030; 3. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要: 新型T形头单向螺栓能够有效解决传统高强螺栓无法直接应用于端板连接钢梁-钢管柱节点的问题,且其施工较为简便。然而,采用此类新型螺栓连接的梁柱节点中各组件承载机理尚不明确,有待进一步研究。传统高强螺栓连接梁柱节点与T形头单向螺栓连接节点的主要不同之处在于端板及钢管柱壁上的螺栓孔形状。为探究此类新型连接节点中钢管组件的力学响应与承载机理,本文基于组件法,通过有限元分析软件ABAQUS对T形件-钢管节点的抗拉性能开展了系统的数值分析。首先建立了精确的节点三维有限元模型,研究了T形头单向螺栓连接T形件-钢管节点中柱壁屈服线模式,并开展了广泛的参数分析。最后基于虚功原理及屈服线理论,给出新型屈服线模式下柱壁承载力计算公式。

关键词: 钢管节点; 螺栓连接; T形头单向螺栓; 屈服线理论; 承载力计算公式

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0010-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240629001

Tensile Performance of T-Stub to Steel Tube Joints with T-Head One-Side Bolts

DONG Penggang^{1,2}, SUN Lele^{1*}, ZHANG Jin³, WANG Siqi¹

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264003, China; 2. China Railway 20th Bureau Group Municipal Engineering Co.Ltd., Lanzhou 730030, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

*Corresponding author: lelesun117@hrbeu.edu.cn

Abstract: The novel T-head one-side bolt can effectively solve the problem that the traditional high-strength bolt cannot be directly applied to the endplate connection of beam to steel tube column joints, and the construction is relatively simple. However, the bearing mechanism of each component in the beam-column joint with this novel bolt is still unclear and needs to be further explored. The main difference between the traditional high-strength bolted joints and the T-head one-side bolted ones is the shape of the bolt holes on the endplate and tube column. To explore the mechanical response and bearing mechanism of the tube column component in this novel bolted connection, the finite element analysis software ABAQUS was used to carry out a systematic numerical analysis on the tensile performance of the T-stub to steel tube joints based on the component method. The main research contents and conclusions are as follows: An accurate three-dimensional finite element model of the joint was established, and the yield line pattern of

收稿日期: 2024-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(52408166), 山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2024QTA024), 山东省住房城乡建设科技计划(2024KYKF-JZGYH101), 中央高校基本科研业务费(3072024JJ2701)

作者简介:

董鹏刚(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事装配式结构方面的研究。E-mail: 88997060@qq.com。

通信作者:

孙乐乐(1995—), 男, 博士, 副教授, 主要从事装配式钢结构和组合结构抗震方面的研究。E-mail: lelesun117@hrbeu.edu.cn。

the column wall in the T-head one-side bolted joint was studied. Finally, the calculation formula of the bearing capacity for the column wall under the novel yield line pattern was given based on the principle of virtual work and the yield line theory.

Keywords: steel tube joint; bolted connection; T-head one-side bolt; yield line theory; calculation formula of bearing capacity

钢结构具有轻质高强、工业化程度高等特点,是最适合装配式建筑的结构形式。梁柱节点是框架结构的关键区域,决定了结构中荷载的传递与分配。钢结构梁柱节点的连接方式有焊接和栓接,其中焊接工作量大、施工作业不便、易受外界环境影响。此外,焊缝热影响区脆性增加,易在动力荷载下出现断裂。美国北岭地震^[1]和日本阪神地震^[2]中都出现了焊接节点断裂这一典型脆性破坏,曾造成大量人员伤亡和财产损失。相对来讲,螺栓连接节点延性较好,往往会表现出更优的动荷载承载能力^[3]。

相比工字形钢柱,钢管柱在承载性能和装饰装修方面具有优势,但是封闭截面导致此类构件螺栓连接难以实现。单向螺栓连接是解决钢管结构螺栓连接的重要方法之一。李国强等^[4]对不同种类的国产单向螺栓进行了轴向拉伸试验,评估了各类单向螺栓的力学性能和适用条件。徐婷等^[5]介绍了国外单向螺栓的锚固原理、基本构造和安装方法。陈珂璠等^[6]对单向螺栓连接节点的研究成果进行了综述,强调必须进行合理的设计以确保单向螺栓连接的可靠性。本文针对研究较多的几类单向螺栓进行了讨论,包括对拉螺栓、套管锚固单向螺栓、折叠垫片单向螺栓以及T形头单向螺栓。

对拉螺栓^[7]穿透钢管柱并在外侧完成紧固,其构造简单且强度高,但是预紧力的施加会造成钢管柱变形。套管锚固单向螺栓^[8]技术成熟、研究广泛、力学性能优异。但其作为进口产品,使用成本较高,单价达到传统高强螺栓的十倍以上。此外,此类螺栓可变形套管长度的选取受钢管厚度的限制。折叠垫片单向螺栓^[9]不存在明显的薄弱部件,其力学性能可与传统螺栓连接相媲美。T形头单向螺栓^[10]兼具一定程度的安装效率与较好的力学性能,可为用户提供新的选择。但目前针对T形头单向螺栓连接节点的研究较为匮乏,节点中各组件的承载机理尚未明确。因此,本文重点研究了T形头单向螺栓连接的力学性能。

本文基于欧洲规范^[11]中的组件法,聚焦于钢管柱组件,对采用厚端板的T形件-钢管柱节点进行研究。本文首先通过有限元分析软件ABAQUS对T形头单向螺栓连接T形件-钢管节点开展研究,并进行系统的参数分析以评估不同参数对节点力学响应的影响,从而评估节点的应用可行性。之后基于数值分析结果,结合屈服线理论完善节点设计方法,为进一步推动工程应用提供参考。

1 有限元模型

1.1 模型建立

T形件-钢管节点组件包括由钢梁翼缘和端板简化而成的T形件、钢管以及T形头单向螺栓。由于本文所研究节点的几何形状、边界条件和施加荷载均对称,因此仅建立T形件-钢管节点模型(只取1/8部分)以节约计算成本,如图1所示。

数值模型各部件均采用C3D8R实体单元模拟。为聚焦研究对象于钢管壁,T形件翼缘厚度取30 mm以避免发生变形。长圆形螺栓头长短轴长度比选择1.7,且T形件和钢管壁中长圆形螺栓孔尺寸均相同,较螺栓头长短轴长度均增大2 mm。有限元模型中螺栓及螺栓孔网格尺寸均为3 mm,柱壁和T形件网格尺寸均为5 mm。

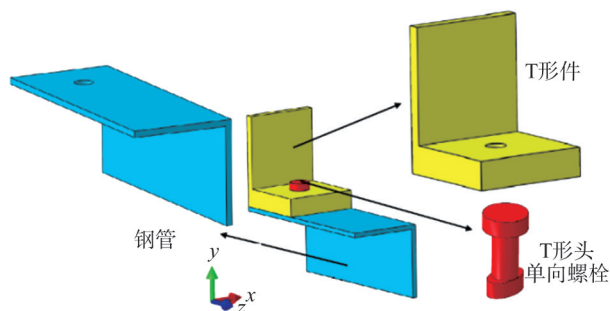


图1 T形件-钢管节点有限元模型(取1/8部分)

Fig. 1 Finite element model of T-stub to steel tube joint

多位学者^[12-14]研究表明采用双折线模型能够准确模拟低碳钢和合金钢材料的应力应变关系,其数学表达式见式(1):

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & (\epsilon \leq \epsilon_y) \\ f_y + 0.01 E_s (\epsilon - \epsilon_y) & (\epsilon > \epsilon_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; f_y 为钢材屈服强度; ϵ_y 为屈服应变,本文选取参数见表1。考虑节点对称的有限元模型边界及荷载条件如图2所示。

1.2 模型验证

本节采用WANG等^[15]中的试验结果进行数值模型验证。对文献[15]中的4个传统高强螺栓连接T形件-钢管节点进行了单向拉伸荷载下的数值模拟研究,荷载-位移曲线对比结果如图3所示。从图中可以看出,试件BC-ST16-5-60(数字含义依次为螺栓直径、管壁厚度、螺栓列距)和BC-ST16-5-90的模拟曲线与试验曲线的初始

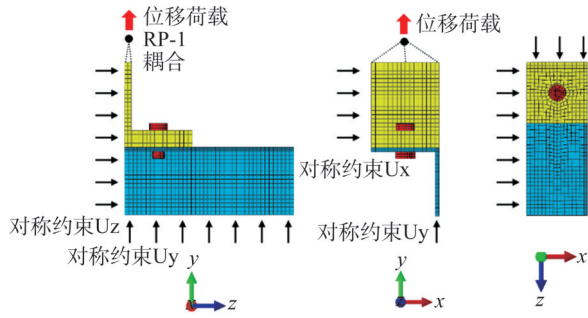


图2 有限元模型边界及荷载条件

Fig. 2 Boundary and load conditions of finite element model

表1 各组件材性

Table 1 Material properties of components

组件	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa
T形件	235	375	2.06×10^5
钢管柱	235	375	2.06×10^5
T形头单向螺栓	660	830	2.06×10^5

刚度吻合良好,而试件 BC-ST16-8-60 和 BC-ST16-8-90 的初始刚度拟合有一定偏差。以上现象一方面是因为试件 BC-ST16-8-60 和 BC-ST16-8-90 的极限位移较小,横坐标范围较小,从而更凸显刚度拟合差异;另一方面是因为节点 BC-ST16-8-60 和 BC-ST16-8-90 的试验曲线上升段存在刚度增大的现象,使其与数值模拟结果曲线产生分离趋势。总之,有限元分析所得荷载-位移曲线与试验结果表现出良好的一致性,尤其是本文研究重点节点屈服承载力与试验结果吻合较好,表明本节所建立有限元模型具有准确性与可靠性。

2 节点抗拉性能

2.1 破坏模式

LI等^[16]以及WANG^[17]等的研究表明当不考虑T形

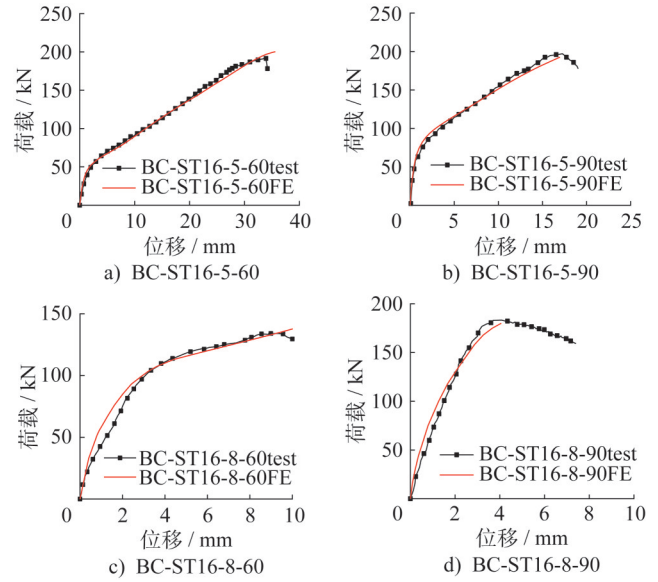


图3 荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of load-displacement curves

件失效时,螺栓连接T形件-钢管节点可能出现以下破坏模式:(1)柱壁完全屈服破坏;(2)螺栓断裂伴随柱壁屈服;(3)螺栓断裂。考虑到T形头单向螺栓连接节点与传统高强螺栓连接节点的不同之处在于柱壁的螺栓孔形状,故本文主要关注破坏模式(1)下柱壁的力学性能。T形头单向螺栓采用8.8级M20高强螺栓,其螺栓横向间距、竖向间距均为100mm。钢管柱外包截面尺寸为200mm×200mm,长度为500mm。钢管柱与T形件均采用Q235钢,各组件材性按表1取值。需要强调的是,本文研究重点在于钢管柱壁新型屈服线模式及其承载力计算公式,其中屈服线模式不受钢材强度影响,承载力与钢材强度呈正相关关系。节点钢管柱壁厚从4mm增加至14mm,各模型尺寸及分析结果见表2。表2中, b_c 、 l_c 、 p 、 g_2 、 D 、 t_c 分别表示钢管柱截面宽(高)度、钢管柱长度、螺栓竖向间距、螺栓横向间距、螺栓直径、钢管柱壁厚度。节点编号含义为“C- p - g_2 - t_c ”。

表2 模型尺寸及分析结果

Table 2 Model dimensions and analysis results

节点模型编号	b_c /mm)	l_c /mm	p /mm	g_2 /mm	D /mm	t_c /mm	破坏模式	屈服承载力/kN
C-100-100-4	200	500	100	100	20	4	(1)	46.2
C-100-100-6	200	500	100	100	20	6	(1)	76.3
C-100-100-8	200	500	100	100	20	8	(1)	137.9
C-100-100-10	200	500	100	100	20	10	(1)	212.5
C-100-100-12	200	500	100	100	20	12	(1)	296.0
C-100-100-14	200	500	100	100	20	14	(1)	416.5

2.2 钢管壁屈服线模式及影响因素分析

本节以柱壁厚度8 mm的节点C-100-100-8为基准节点,分别改变其螺栓竖向间距及螺栓横向间距以探究其屈服线模式。

2.2.1 螺栓横向间距 g_2 的影响

在不同螺栓竖向间距下将螺栓横向间距从80 mm增大至120 mm,所得各组节点荷载-位移曲线如图4所示。随着螺栓横向间距的增大,柱壁承载能力随之提高。这是因为螺栓横向间距增大使得螺栓靠近钢管侧壁,使钢管侧壁的承载力得到提高。

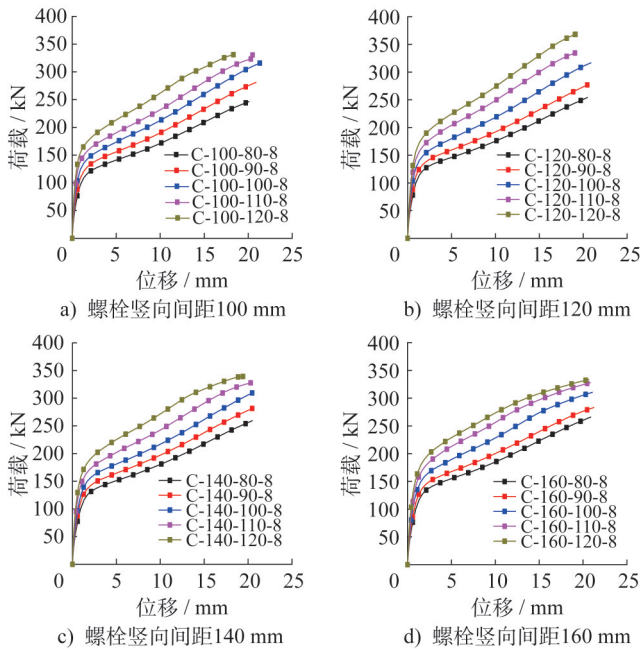


图4 不同螺栓横向间距下节点荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curves of joints with different bolt horizontal spacings

经典的柱壁屈服线模式有两种,分别是Gomes屈服线模式及Yeomans屈服线模式^[15]。本节所有节点柱壁屈服区域分布如图5所示,屈服区域沿钢管连接面呈对称带状分布。当螺栓横向间距较小时,钢管连接面两侧屈服带相互连通,此时管壁更接近Yeomans屈服线模式。随着螺栓横向间距增大,钢管连接面两侧屈服带断开连接,此时现有的屈服线分布模式无法描述此类分布。因此,本节推出能够描述此类屈服区域分布的新型梯形屈服线模式,如图6c)所示。螺栓孔间区域为刚性区,其带动周围区域发生不同程度的鼓曲变形,在钢管侧壁边缘及连接面中部区域形成负屈服线。

2.2.2 螺栓竖向间距 p 的影响

图7展示了螺栓横向间距80 mm和120 mm情况下,

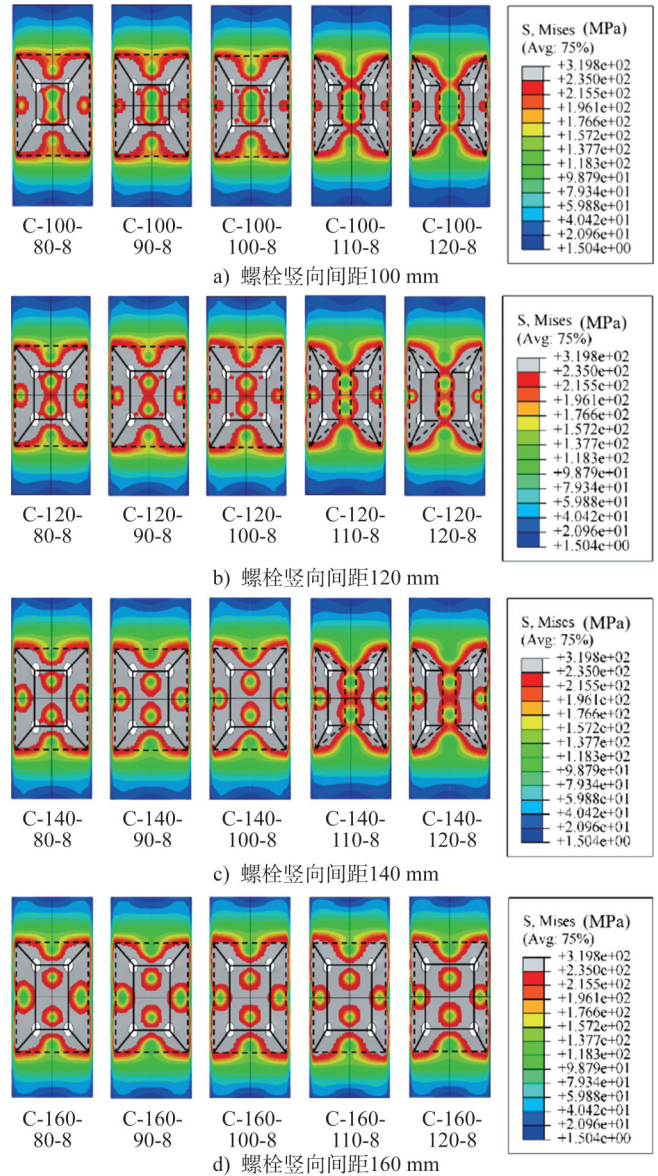


图5 不同螺栓横向间距的柱壁屈服线模式
(单位:MPa)

Fig. 5 Yield line patterns of column walls with different bolt horizontal spacings (unit: MPa)

螺栓竖向间距对节点荷载-位移曲线的影响。由图可见,改变螺栓竖向间距对节点承载能力影响较小。螺栓竖向间距对钢管壁屈服线模式影响如图8所示。当螺栓横向间距较小时($g_2=80$ mm),屈服线保持为Yeomans屈服线模式;当螺栓横向间距较大时($g_2=120$ mm),增大螺栓竖向间距可使柱壁屈服线模式由梯形屈服线模式转变为Yeomans屈服线模式。

3 T形头单向螺栓连接节点参数分析

3.1 螺栓孔布置方向

本节对长圆形螺栓孔三种不同布置方案下的节点抗拉性能进行对比分析。三种布置方案如图9所示。

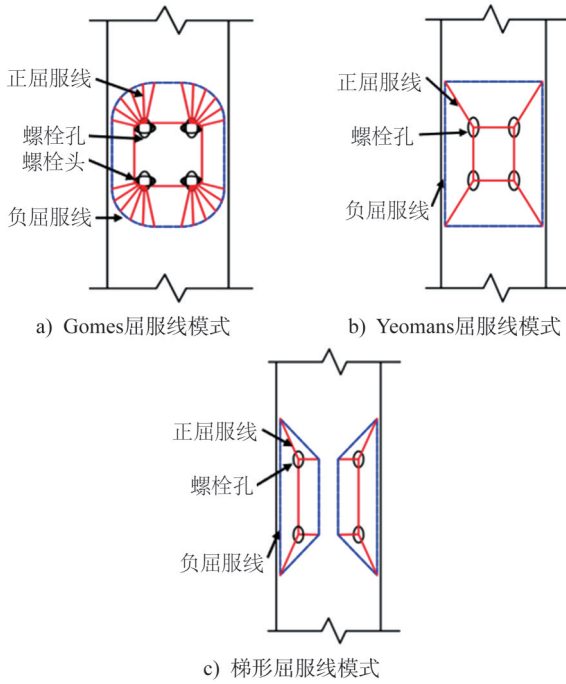


图6 不同的柱壁屈服线模式

Fig. 6 Different yield line patterns of column walls

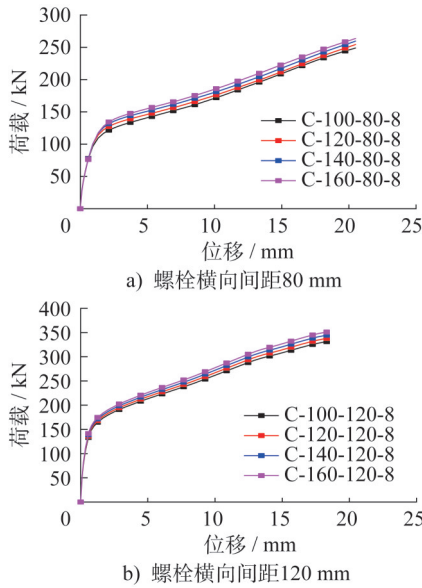


图7 不同螺栓竖向间距下T形件钢管节点的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of T-stub to steel tube joints with different bolt vertical spacings

选取节点 C-100-80-8 为基准节点。三种螺栓孔布置形式下节点的荷载-位移曲线如图 10 所示。螺栓孔竖向布置的节点具有最大承载能力,螺栓孔混合布置次之,而螺栓孔横向布置的节点承载力最低。工程实践中推荐采用螺栓孔竖向布置方案以达到最优力学性能。

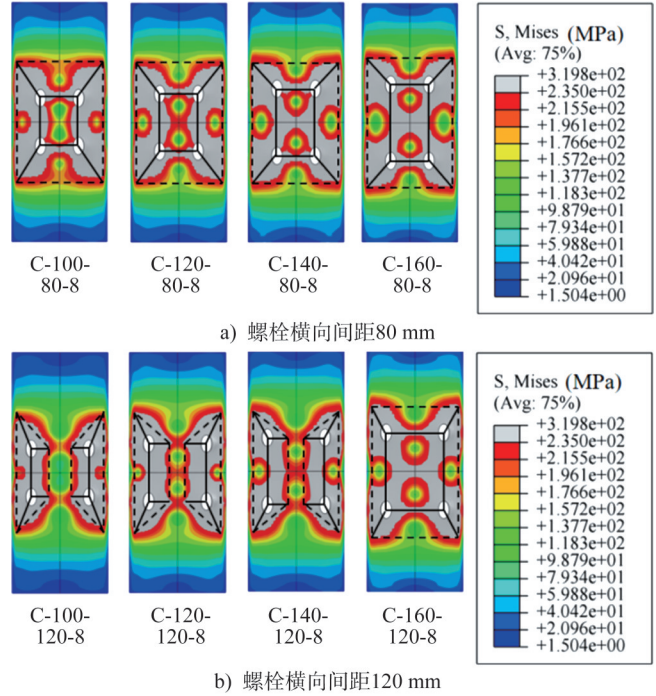


图8 不同螺栓竖向间距下柱壁屈服线模式 (单位:MPa)

Fig. 8 Yield line patterns of column walls with different bolt vertical spacings (unit: MPa)

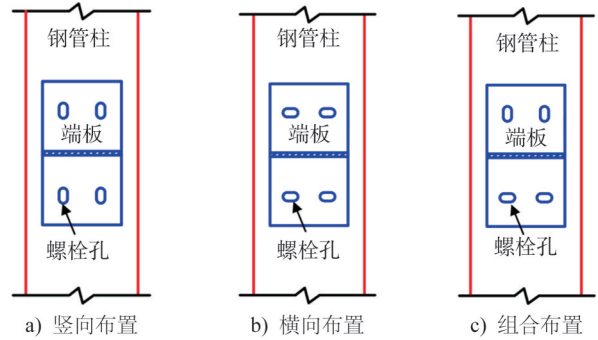


图9 不同的螺栓孔布置方案

Fig. 9 Different types of bolt hole layout

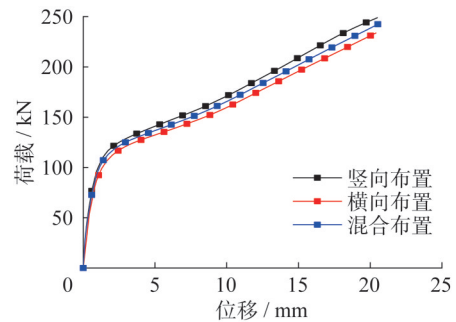


图10 不同螺栓孔布置方式下节点荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement curves of joints with different bolt hole layouts

3.2 螺栓安装间隙 δ_b

以 C-100-80-8 为基准节点, 研究栓杆与栓孔安装间隙大小对节点抗拉性能的影响。图 11 为不同安装间隙下节点荷载-位移曲线。由图可见, 安装间隙由精装配 1 mm 增大至粗装配 4 mm 时可使节点屈服承载力降低 2.1%, 对节点屈服承载力影响较小。因此, 在适当情况下可采用粗装配^[18]提高施工效率。

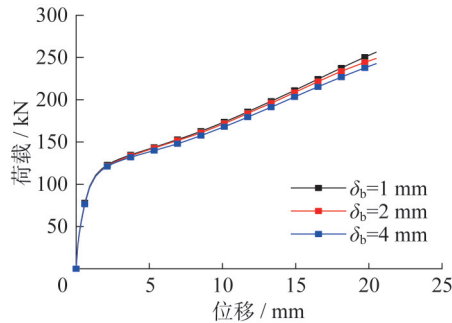


图 11 不同安装间隙下节点荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of joints with different installation gaps

3.3 螺栓旋转角 α_b

栓杆定位完成后, 螺母的施拧可能带动栓杆一同绕栓杆轴旋转, 导致出现旋转偏差 α_b 。本节以 C-100-80-8 为基准节点, 对旋转偏差角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的节点抗拉性能进行对比分析, 结果如图 12 所示。由图可见, 节点荷载-位移曲线完全重合, 表明 20° 以内的旋转偏差角几乎不会影响节点的抗拉性能。

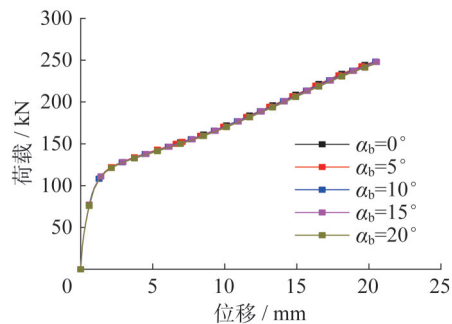


图 12 不同旋转偏差角下节点荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of joints with different rotating deviation angles

3.4 螺栓孔内偏移 λ

T形头单向螺栓安装时可能发生孔内偏移, 如图 13 所示。M20 螺栓配套中等装配精度下, 螺栓孔内最大偏移距离为 8 mm。

选取 C-100-80-8 为基准节点, 螺栓偏移对节点力学

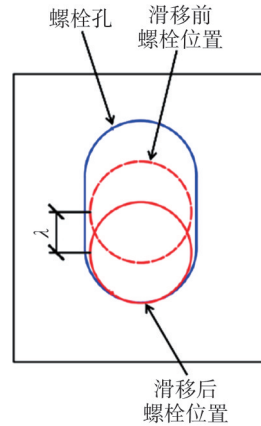


图 13 孔内螺栓竖向偏移

Fig. 13 Vertical offset of bolt in hole

性能影响如图 14 所示, 可见螺栓偏移对节点整体抗拉性能基本无影响。图 15 为孔内螺栓偏移距离 0 mm 和 5 mm 节点在 10 mm 拉拔位移下的变形云图, 该图表明栓杆孔内偏移导致节点变形不均匀, 在工程实践中应避免发生螺栓孔内偏移。

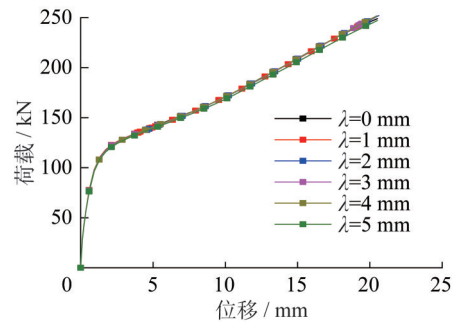


图 14 不同偏移距离下节点荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves of joints with different offset distances

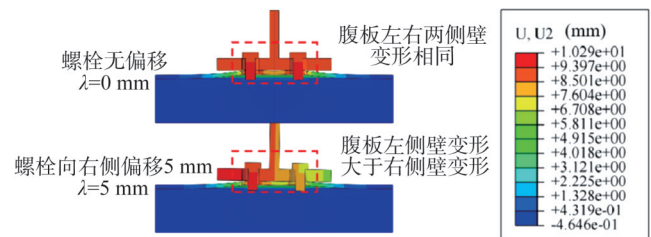


图 15 不同偏移距离下 T 形件-钢管节点变形(单位: mm)

Fig. 15 Deformation of T-stub to steel tube joints with different offset distances (unit: mm)

4 节点承载力理论分析

4.1 公式推导

T形头单向螺栓连接钢管典型屈服线模式如图 16 所示。图 16a) 为典型 Yeomans 屈服线模式, 相应的承载力

计算公式如下所示:

$$F_y = \frac{f_y t_c^2 f(k)}{1 - \frac{g_2}{b_0 - t_c}} \left[\frac{2p}{b_0 - t_c} + 4 \left(1 - \frac{g_2}{b_0 - t_c} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

式中, f_y 、 b_0 分别为钢管屈服强度和截面宽度; $f(k) = 1.0$ 。

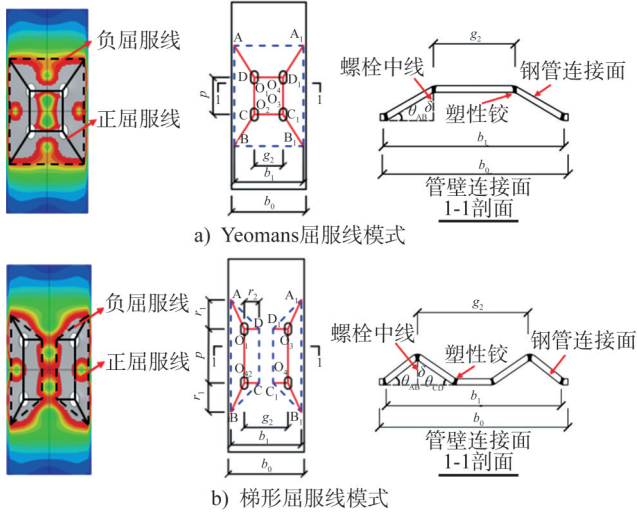


图 16 柱壁典型屈服线模式分析模型

Fig. 16 Analytical models for typical yield line patterns of column wall

图 16b) 为本文提出的新型梯形屈服线模式, 目前尚无理论公式计算相应承载力, 图中 b_1 为钢管侧壁净距。本节根据虚功原理对此屈服线模式下钢管壁承载力的计算公式进行推导。计算均遵守以下基本假设:

- (1) 忽略螺栓在拉力作用下的轴向变形;
- (2) 节点屈服前管壁面外变形视为小变形;
- (3) 屈服线截面处于完全屈服状态, 即 $m_y = f_y t_c^2 / 4$, m_y 为单位长度屈服线的塑性极限弯矩;
- (4) 任意两条屈服线间区域为刚性区。

假设节点屈服承载力为 F_y , F_y 作用下钢管壁面外竖向位移为 δ , 则外力做功 $E_{外}$ 为:

$$E_{外} = F_y \delta \quad (3)$$

该节点内力做功为各屈服线做功总和, 即:

$$E_{内} = 2(E_{AB} + E_{BC} + E_{CD} + E_{AD} + E_{O_1A} + E_{O_2B} + E_{O_2C} + E_{O_1O_2}) \quad (4)$$

式中: 各符号下角标代表相应屈服线两端点, 如 E_{AB} 为屈服线 AB 做功。

由几何关系可得屈服线 AB 转角为:

$$\theta_{AB} \approx \tan \theta_{AB} = \frac{2\delta}{b_1 - g_2} \quad (5)$$

$$b_1 = b_0 - t_c \quad (6)$$

得到屈服线 AB 做功为:

$$E_{AB} = \theta_{AB} m_y l_{AB} = \frac{2\delta}{b_1 - g_2} \frac{f_y t_c^2}{4} (p + 2r_1) \quad (7)$$

在管壁平面内过点 O_1 做直线 AD 的垂线, 其长度 l_{O_1-AD} 可由几何关系求解:

$$\frac{r_2}{\sqrt{\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2}} = \frac{l_{O_1-AD}}{r_1} \quad (8)$$

$$l_{O_1-AD} = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2}} \quad (9)$$

得屈服线 AD 转角:

$$\theta_{AD} \approx \tan \theta_{AD} = \frac{\delta \sqrt{\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2}}{r_1 r_2} \quad (10)$$

则屈服线 AD、BC 做功为:

$$E_{AD} = E_{BC} = \theta_{AD} m_y l_{AD} = \frac{\delta \left[\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2 \right] \frac{f_y t_c^2}{4}}{r_1 r_2} \quad (11)$$

屈服线 CD 转角及做功为:

$$\theta_{CD} \approx \tan \theta_{CD} = \frac{\delta}{r_2} \quad (12)$$

$$E_{CD} = \theta_{CD} m_y l_{CD} = \frac{\delta f_y t_c^2}{r_2} \frac{p}{4} \quad (13)$$

为求解屈服线 O_1A 两侧板件相对转角, 在管壁平面过点 O_1 作垂直于 O_1A 投影的垂线, 该垂线与直线 AB、AD 相交, 设直线 AB、 O_1A 之间垂线长度分别为 η_1 , 直线 AD、 O_1A 之间垂线长度为 η_2 , 则可由几何关系分别求得其长度:

$$\frac{\eta_1}{\frac{b_1 - g_2}{2}} = \frac{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2}}{r_1} \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{b_1 - g_2}{2r_1} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} \quad (15)$$

$$\sqrt{r_1^2 + \left[\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right]^2} \eta_2 = r_2 r_1 \quad (16)$$

$$\eta_2 = \frac{r_2 r_1}{\sqrt{r_1^2 + \left[\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right]^2}} \quad (17)$$

则屈服线 O_1A 与 O_2B 转角为:

$$\theta_{O_1A} = \theta_{O_2B} \approx \tan \theta_{O_1A} = \frac{\delta}{\eta_1} + \frac{\delta}{\eta_2} =$$

$$\frac{\delta}{\frac{b_1 - g_2}{2r_1} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2}} + \frac{\delta \sqrt{r_1^2 + \left[\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right]^2}}{r_2 r_1} \quad (18)$$

相应屈服线做功为:

$$E_{O_1A} = E_{O_2B} = \theta_{O_1A} m_y l_{O_1A} = \left[\frac{\delta}{\frac{b_1 - g_2}{2r_1} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2}} + \frac{\delta \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2}}{r_2 r_1} \right] \frac{f_y t_c^2}{4} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} =$$

$$\left\{ \frac{2\delta r_1}{b_1 - g_2} + \frac{\delta \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2}}{r_2 r_1} \right\} \frac{f_y t_c^2}{4} \quad (19)$$

在管壁平面延长 O_1O_2 , 线段两端分别与 AD、BC 相交, 设直线 AD 与直线 O_1D 在管壁平面投影直线间线段长为 η_3 , 该长度可由几何关系求解:

$$\frac{\eta_3}{r_1} = \frac{r_2}{\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2} \quad (20)$$

$$\eta_3 = \frac{r_1 r_2}{\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2} \quad (21)$$

则屈服线 O_1D 与 O_2C 转角为:

$$\theta_{O_1D} = \theta_{O_2C} \approx \tan \theta_{O_1D} = \frac{\delta}{\eta_3} = \frac{\delta \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)}{r_1 r_2} \quad (22)$$

相应的屈服线做功为:

$$E_{O_1D} = \theta_{O_1D} m_y l_{O_1D} = \frac{\delta \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)}{r_1} \frac{f_y t_c^2}{4} \quad (23)$$

屈服线 O_1O_2 的相对转角等于屈服线 AB 与 CD 转角之和, 即:

$$\theta_{O_1O_2} = \theta_{AB} + \theta_{CD} = \frac{2\delta}{b_1 - g_2} + \frac{\delta}{r_2} \quad (24)$$

相应的屈服线做功为:

$$E_{O_1O_2} = \theta_{O_1O_2} m_y l_{O_1O_2} = \left(\frac{2\delta}{b_1 - g_2} + \frac{\delta}{r_2}\right) \frac{f_y t_c^2}{4} p \quad (25)$$

代入可以求得总内力做功为:

$$E_{内} = \delta f_y t_c^2 \left\{ \frac{1}{b_1 - g_2} (p + 2r_1) + \frac{\left[\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2\right]}{r_1 r_2} + \frac{1}{2r_2} p + \frac{2r_1}{b_1 - g_2} + \frac{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2}}{r_2 r_1} + \frac{b_1 - g_2 + r_2}{r_1} + \left(\frac{1}{b_1 - g_2} + \frac{1}{2r_2}\right) p \right\} \quad (26)$$

内力做功与外力做功相等, 即:

$$E_{内} = E_{外} \quad (27)$$

$$F_y \delta = \delta f_y t_c^2 \left\{ \frac{1}{b_1 - g_2} (p + 2r_1) + \frac{\left[\left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2 + r_1^2\right]}{r_1 r_2} + \frac{1}{2r_2} p + \frac{2r_1}{b_1 - g_2} + \frac{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2} + r_2\right)^2}}{r_2 r_1} + \frac{b_1 - g_2 + r_2}{r_1} + \left(\frac{1}{b_1 - g_2} + \frac{1}{2r_2}\right) p \right\} \quad (28)$$

观察式(28)发现存在两个变量 r_1 和 r_2 , 该式难以进一步求解。因此作出简化, 令 $r_2 = g_2/2$, 屈服承载力 F_y 的

表达式可简化为:

$$F_y = f_y t_c^2 \left\{ \frac{1}{b_1 - g_2} (p + 2r_1) + 2 \frac{\left(\frac{b_1}{2}\right)^2 + r_1^2}{r_1 g_2} + \frac{p}{g_2} + \frac{2r_1}{b_1 - g_2} + \frac{2 \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2}\right)^2} \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{b_1}{2}\right)^2}}{g_2 r_1} + \frac{b_1}{2r_1} + \left(\frac{1}{b_1 - g_2} + \frac{1}{g_2}\right) p \right\} \quad (29)$$

根据势能驻值原理, 必然存在某一确定的 r_1 使得该结构体系势能最小, 即在确定的位移 δ 下 F_y 的值最小。

对 F_y 关于 r_1 求导, 并令其等于 0, 可得:

$$\frac{dF_y}{dr_1} = f_y t_c^2 \left\{ \frac{4}{b_1 - g_2} + \frac{2}{g_2} - \frac{b_1^2}{2r_1^2 g_2} - \frac{b_1}{2r_1^2} + \frac{(g_2 - b_1) \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2r_1}\right)^2}}{4r_1^2 \sqrt{1 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2r_1}\right)^2}} - \frac{b_1 \sqrt{1 + \left(\frac{b_1 - g_2}{2r_1}\right)^2}}{4r_1^2 \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2r_1}\right)^2}} \right\} = 0 \quad (30)$$

考虑到上式求解较为复杂,选用 Mathematica 软件进行求解,得到如下唯一符号解:

$$r_1 = \frac{\sqrt{b_1(b_1 - g_2)}}{2} \quad (31)$$

将式(31)计算结果代入式(29)即可求解节点屈服承载力。

针对屈服线模式的选取,本文建议当 g_2 大于等于 p 时,采用新型梯形屈服线模式;反之则采用 Yeomans 屈服线模式。

4.2 承载力计算公式验证

图 17 为 T 形件-钢管节点承载力的计算结果与有限元分析结果对比。可见理论计算结果与有限元分析结果吻合程度较高,大部分节点误差控制在 10% 以内。T 形件-钢管节点屈服承载力误差范围为 -14.9%~5.6%,误差平均值为 3.7%,误差标准差为 4.4%。标准差较小表明该计算公式具有良好的稳定性。另考虑到各组件分析模型简化等方面的影响,认为该误差在可接受的范围之内。

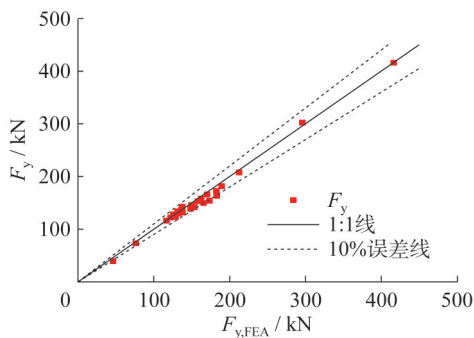


图 17 计算结果与有限元分析结果对比

Fig. 17 Comparison between calculated results and finite element analysis results

5 结论

本文首先基于组件法思想,对简化 T 形件-钢管节点的力学性能及承载机理开展数值模拟研究,通过大量有限元参数分析对节点力学性能进行评估。最后,通过理论分析建立此类节点屈服承载力的承载力计算公式。主要结论如下:

(1) T 形头单向螺栓连接 T 形件-钢管节点中钢管壁出现两种典型屈服线模式,分别为经典的 Yeomans 屈服线模式以及本文提出的新型梯形屈服线模式。

(2) 螺栓孔竖向布置方案可使新型节点具有最佳力学性能;栓杆孔内旋转偏差小于 20° 时对节点力学性能无影响;栓杆孔内偏移对节点力学性能基本无影响,但会导致节点受力和变形不均;特殊情况下可推荐采用粗装配提高节点安装效率。

(3) 基于屈服线理论预测 T 形件-钢管节点的屈服承载力,并与有限元分析结果对比,验证了力学模型和计算公式的准确性和稳定性。误差与标准差较小表明其能够进一步为工程实践提供参考。

参考文献:

- [1] MILLER D K. Lessons learned from the northridge earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20 (4/5/6): 249-260. DOI: 10.1016/S0141-0296(97)00031-X.
- [2] TREMBLAY R, FILIATRAULT A, BRUNEAU M, et al. Seismic design of steel buildings: Lessons from the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(3): 727-756. DOI: 10.1139/196-885.
- [3] 何团结. 全装配式方钢管梁柱节点抗震性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
HE Tuanjie. Seismic performance test of fully assembled square steel tube beam-column joints [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] 李国强, 张杰华, 蒋蕴涵, 等. 钢结构用国产自锁式 8.8 级单向螺栓承载性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(1): 9-16.
LI Guoqiang, ZHANG Jiehua, JIANG Yunhan, et al. Bearing performance of domestic class 8.8 self-lock one-side bolt for steel structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(1): 9-16. (in Chinese)
- [5] 徐婷, 王伟, 陈以一. 国外单边螺栓研究现状[J]. 钢结构, 2015, 30(8): 27-33. DOI: 10.13206/j.gjg201508006.
XU Ting, WANG Wei, CHEN Yiyi. A review on foreign research status of one-side bolt [J]. Steel Construction, 2015, 30(8): 27-33. DOI: 10.13206/j.gjg201508006. (in Chinese)
- [6] 陈珂瑶, 李宇晗, 陆金钰. 单边紧固螺栓在结构工程中的应用的研究进展[J]. 江苏建筑, 2016(1): 27-30.
CHEN Kefan, LI Yuhan, LU Jinyu. Research progress on the application of blind bolts in structural engineering [J]. Jiangsu Construction, 2016(1): 27-30. (in Chinese)
- [7] 王先铁. 新型方钢管混凝土柱-钢梁节点性能研究及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
WANG Xiantie. Behavior research and aseismic design

- criteria on new type connections of concrete-filled square tubular column and steel beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] KOROL R M, GHOBARAH A, MOURAD S. Blind bolting W-shape beams to HSS columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119 (12) : 3463-3481. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3463).
- [9] HOSSEINI S M, MAMUN M S, MIRZA O, et al. Behaviour of blind bolt shear connectors subjected to static and fatigue loading [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110584. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110584.
- [10] SUN L L, LIU M, LIU Y J, et al. Studies on T-shaped one-side bolted connection to hollow section column under bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106359. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106359.
- [11] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-8: Design of Joints: EN 1993-1-8[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [12] 孙乐乐. T形方颈单边螺栓连接钢梁-方钢管柱节点力学性能与设计方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
SUN Lele. Study on structural performance and design method of T-head square-neck one-side bolted beam to SHS column joints[D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [13] LIU L, CHEN H C, SUN L L, et al. Behavior of thread-fixed one-side bolts bolted T-stubs with arc-shaped flange to steel tube under tension [J]. *Engineering Structures*, 2023, 279: 115647. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115647.
- [14] WULAN T Y, WANG P J, LI Y, et al. Numerical investigation on strength and failure modes of thread-fixed one-side bolted T-stubs under tension [J]. *Engineering Structures*, 2018, 169: 15-36. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.029.
- [15] WANG Z Y, WANG Q Y. Yield and ultimate strengths determination of a blind bolted endplate connection to square hollow section column [J]. *Engineering Structures*, 2016, 111: 345-369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.058.
- [16] LI Y L, ZHAO X L. Experimental study on stainless steel blind bolted T-stub to square hollow section connections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 167: 108259. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108259.
- [17] WANG P J, SUN L L, ZHANG B X, et al. Experimental studies on T-stub to hollow section column connection bolted by T-head square-neck one-side bolts under tension [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 178: 106493. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106493.
- [18] 国家标准局. 紧固件 螺栓和螺钉通孔: GB/T 5277—1985 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
National Bureau of Standards. Fasteners-Clearance Holes for Bolts and Screws: GB/T 5277—1985 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1985. (in Chinese)