

康龙,孔杰,吴一明,等.钢桥管桁架新型螺栓连接节点抗拉性能试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):73-81.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250253
KANG Long,KONG Jie,WU Yiming,et al.Experimental study on tensile performance of new bolted joints of steel bridge pipe truss [J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2026,45(1):73-81.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250253

钢桥管桁架新型螺栓连接节点抗拉性能试验研究

康龙^{1,2},孔杰¹,吴一明¹,张丁文²,孙乐乐^{1,3*}

(1. 哈尔滨工程大学 烟台研究院,山东 烟台 264000;2. 中铁山桥集团有限公司,河北 秦皇岛 066200;
3. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对钢管桁架桥螺栓连接存在的效率低、可移动性差等问题,提出一种可实现管桁架全螺栓连接的新型节点构造。通过模型试验与理论分析相结合的方法,研究该新型螺栓连接节点的抗拉性能。研究表明:该类连接主要出现管壁屈服、管壁屈服伴随螺栓孔冲切、端板屈服及螺栓破坏四种破坏模式。在管壁屈服、管壁屈服伴随螺栓孔冲切以及端板屈服破坏模式下,带有竖直和水平螺栓孔的“T”形方颈单边螺栓连接的抗拉屈服强度与抗拉极限强度,均低于传统高强螺栓连接。不同破坏模式,提出相应的“T”形方颈单边螺栓连接设计方法,建议采用修正的Gomes模型计算管壁屈服承载力。研究结论为桁架腹杆与方钢管弦杆端板螺栓连接提供理论依据。

关键词:“T”形方颈单边螺栓;方钢管;端板连接;屈服强度;破坏模式

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)01-0073-09

Experimental study on tensile performance of new bolted joints of steel bridge pipe truss

KANG Long^{1,2}, KONG Jie¹, WU Yiming¹, ZHANG Dingwen², SUN Lele^{1,3*}

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, China; 2. China Railway Shanhaiguan Bridge Group Company Limited, Qinhuangdao 066200, China; 3. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and poor mobility of bolt connection of steel pipe truss bridge, a new type of joint structure which can realize full bolt connection of pipe truss is proposed. Through the combination of model test and theoretical analysis, the tensile performance of the new bolted joint was studied. The results show that there are four failure modes of this type of connection: tube wall yield, tube wall yield accompanied by bolt hole punching, end plate yield and bolt failure. Under the failure modes of tube wall yielding, tube wall yielding with bolt hole punching and end plate yielding, the tensile yield strength and ultimate tensile strength of T-shaped square neck unilateral bolt connection with vertical and horizontal bolt holes are lower than those of traditional high-strength bolt connection. For different failure modes, the corresponding design method of T-shaped square neck unilateral bolt connection is proposed, and the modified Gomes model is recommended to calculate the yield bearing capacity of the pipe wall. The research conclusions provide a theoretical basis for bolted connections between truss web members and square steel chord members.

Keywords: T-shaped square neck unilateral bolt; hollow square steel tube; endplate connection; yield strength; failure modes

0 引言

螺栓连接因施工高效且无焊接残余应力与高

成本问题,在钢桁架弦腹杆连接中应用广泛^[1-2]。与开口截面相比,空心方钢管构件具有更优的力学性能,如抗扭刚度更大,且两对称轴的抗弯刚

收稿日期:2025-06-09 修回日期:2025-08-13 接受日期:2025-09-17 责任编辑:朱含露

基金项目:国家自然科学基金项目(52408166);山东省自然科学基金项目(ZR2024QE243);山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2024QTA024)

作者简介:康龙(1985-),男,陕西宝鸡人,博士,高级工程师,主要从事钢结构桥梁方面的研究。E-mail:1447204698@qq.com

通信作者:孙乐乐(1995-),男,内蒙古呼和浩特人,博士,副教授,主要从事钢结构、组合结构方面的研究。E-mail:lelesun117@hrbeu.edu.cn

度相同^[9]。然而,在桁架腹杆与方钢管弦杆的端板连接中,因人员无法进入管内,其应用受到限制。

由于单边螺栓可以在空心方钢管外侧安装和拧紧,实际工程中应用较多^[4-7]。JIN等^[8]提出一种可拆卸管桁架节点,采用折叠垫圈单边螺栓来连接管桁架的弦杆与腹杆。有限元分析结果表明,该类连接力学性能良好,其中槽钢连接板的抗冲切设计较为关键。YU等^[1]通过足尺模型试验,研究了采用折叠垫圈单边螺栓的“K”形钢管桁架节点的静力性能。该单边螺栓连接能够保证节点达到足够的设计强度,而与之匹配的槽孔则使节点具备较大的变形能力。ZHU等^[9]通过仿真分析了螺纹锚固单边螺栓连接在管桁架节点中的性能,发现螺纹强度对节点性能影响显著,通常需要进行局部加强。此外,SUN等^[10-13]提出一种新型“T”形单边螺栓,并针对其在方钢管柱与工字钢梁端板连接场景进行了有限元模拟。研究表明,该类单边螺栓连接梁柱节点的抗弯承载力不低於传统高强螺栓,合理设计下可替代传统高强螺栓。

上述研究表明,单边螺栓连接管桁架弦腹杆节点在可拆卸性和力学性能上均具备良好的应用前景。但该技术的推广仍存在瓶颈:可折叠垫圈单边螺栓安装复杂;螺纹锚固单边螺栓需对钢管局部加强,增加了工序;“T”形单边螺栓因部件较多使用不便。针对这些局限,提出一种构造简单、安装便捷的“T”形方颈单边螺栓。鉴于弦腹杆节点受拉是管桁架的核心受力工况,通过系统试验深入研究该类新型连接的抗拉性能,并建立相应的承载力计算方法。

1 试验方案

1.1 试验模型

采用文献[14]的组件法,以“T”形方颈单边螺栓连接的桁架弦腹杆受拉节点为研究对象,试验模型见图1。

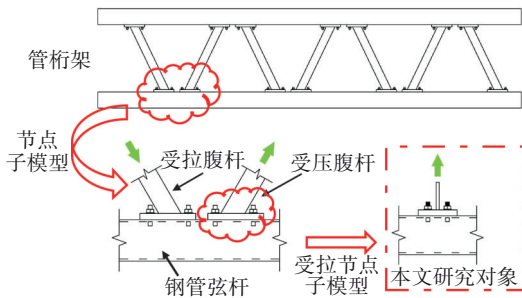


图1 试验模型

Fig.1 test model

1.2 试件及材料属性

将试件节点分为端板、方钢管和“T”形方颈单边螺栓3个组件,见图2。与传统高强螺栓连接相比,“T”形方颈单边螺栓的螺栓和栓孔形状均存在差异。试验共测试了6个“T”形方颈单边螺栓连接试件和3个传统高强螺栓连接试件,以对比两类连接的力学性能差异。需要说明的是,本次对比仅用于评估“T”形方颈单边螺栓连接的强度水平,不作为评定该新型连接可行性的依据。

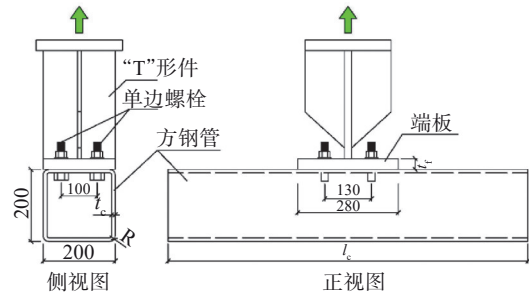


图2 试件结构(单位:mm)

Fig.2 specimen structure (unit: mm)

“T”形方颈单边螺栓由栓杆、方颈和T头3部分组成,其中T头及配套长圆孔通过正交布置实现单边锚固,方颈可在螺栓紧固时限制栓杆旋转,见图3。螺栓孔分为竖直和水平螺栓孔,见图4。

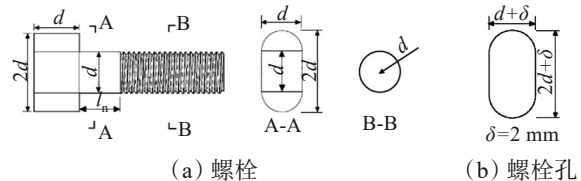


图3 “T”形方颈单边螺栓尺寸关系

Fig.3 T-shaped square neck unilateral bolt size relationship

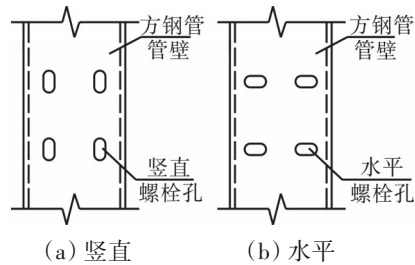


图4 竖直及水平螺栓孔布置

Fig.4 vertical and horizontal bolt hole arrangement

试件具体参数见表1。螺栓孔类型包括圆形螺栓孔(S)、竖直螺栓孔(TV)和水平螺栓孔(TH)。表1中, t_c 为方钢管的厚度; l_c 为方钢管的长度; d 为螺栓杆直径; l_n 为螺栓方颈的长度。为排除螺栓预紧力的影响,所有螺栓均施加300 N·m的扭矩。全部试件的材料属性参数见表2。

表 1 试件参数
Tab. 1 parameters of specimens

试件	端板厚度 t_f /mm	方钢管			螺栓			螺栓孔类型
		截面尺寸/(mm×mm)	t_c /mm	l_c /mm	d /mm	类型	l_n /mm	
S20-7-30	30	200×200	7	1 000	20	SHB	30	S
TV20-7-30	30	200×200	7	1 000	20	TSOB	30	TV
TH20-7-30	30	200×200	7	1 000	20	TSOB	30	TH
S20-12-10	10	200×200	12	1 000	20	SHB	15	S
TV20-12-10	10	200×200	12	1 000	20	TSOB	15	TV
TH20-12-10	10	200×200	12	1 000	20	TSOB	15	TH
S20-12-30	30	200×200	12	1 000	20	SHB	30	S
TV20-12-30	30	200×200	12	1 000	20	TSOB	30	TV
TH20-12-30	30	200×200	12	1 000	20	TSOB	30	TH

注: 试件命名方式为“螺栓孔类型及螺栓杆直径-方钢管壁厚-端板厚度”。

表 2 材料属性
Tab. 2 material properties

试件	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	杨氏模量 E /($10^5 \cdot$ MPa)
“T”形件翼缘(10 mm)	322.33	411.57	2.01
“T”形件翼缘(30 mm)	274.82	370.06	2.05
钢管(壁厚 7 mm)	380.19	501.27	2.02
钢管(壁厚 12 mm)	335.52	451.71	2.06
传统高强螺栓	781.55	984.05	2.09
T形方颈单边螺栓	740.09	833.49	1.98

1.3 试验装置

在山东大学结构实验室的 5 000 kN 反力架上开展试验, 试验装置见图 5。该装置包括反力架、液压千斤顶、连接装置和两个固定支架。液压千斤顶的额定负载为 4 000 kN, 行程为 300 mm。其顶部安装有压力传感器, 用于监测所施加的载荷。试件通过固定支架和锚栓固定于反力架上。

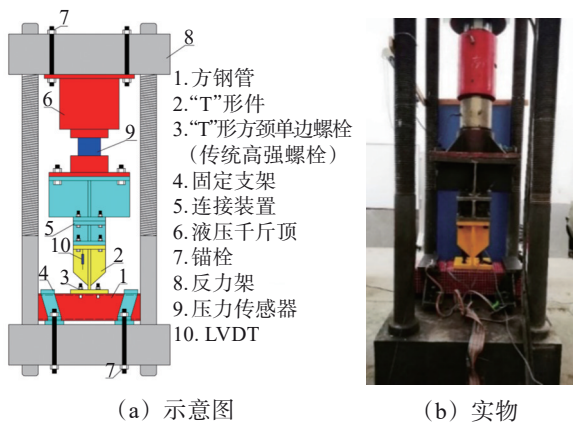


图 5 试验装置
Fig. 5 test setup

加载过程包括两个步骤^[15]: 第一步为预加载, 旨在消除试件与加载装置之间的安装间隙, 并监测加载装置的工作状态。第二步为正式加载, 所

有试件的预加载值均设为 30 kN。首先在载荷控制模式下以 5 kN/min 的速率加载至预加载值, 随后卸去载荷。之后正式加载在位移控制模式下进行, 加载速率为 0.2 mm/min。当载荷出现明显下降或试件发生大变形时, 停止加载。

2 试验现象

2.1 破坏模式 1: 管壁屈服

试件 S20-7-30 的破坏模式见图 6。该试件的方钢管连接面在螺栓拉力作用下发生了明显的平面外塑性变形, 但螺栓孔本身保持了完整, 未出现冲切破坏。但传统高强螺栓连接则呈现不同的变形特征, 由于其大六角头栓杆截面为中心对称, 对螺栓孔周围施加均匀的面外载荷, 使孔周产生中心对称的鼓胀变形。



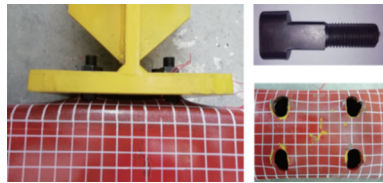
图 6 试件 S20-7-30 管壁屈服

Fig. 6 tube wall yielding of S20-7-30

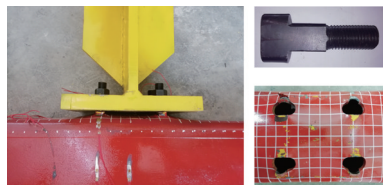
2.2 破坏模式 2: 管壁屈服且螺栓孔冲切

试件 TV20-7-30 和试件 TH20-7-30 的破坏模式见图 7。两者均发生了以“管壁屈服伴随螺栓孔冲切”为特征的破坏, 具体表现为方钢管连接面出现明显的平面外塑性变形与螺栓孔冲切, 且试件两侧壁均发生内凹变形。“T”形方颈单边螺栓与传统高强螺栓的锚固分别依赖其“T”形头和大六角头, 而螺栓孔的抗冲切承载力由螺栓头与管壁接触面的周长决定。“T”形头在长圆孔处的有效接触周长显著小于大六角头在圆孔处的接触周长,

这正是导致 TV/TH 试件发生冲切破坏, 而试件 S20-7-30 未发生该破坏的根本原因。因此, 螺栓孔是否发生冲切是区分破坏模式 1 与破坏模式 2 的本质特征。



(a) 试件 TH20-7-30



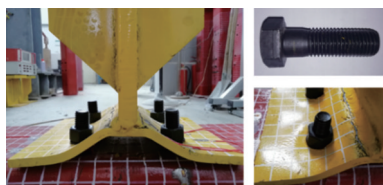
(b) 试件 TV20-7-30

图 7 管壁屈服且螺栓孔冲切

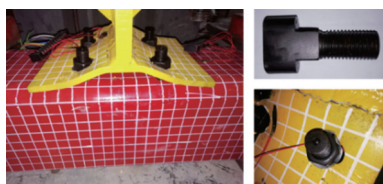
Fig.7 tube wall yielding with bolt hole punching

2.3 破坏模式 3: 端板屈服

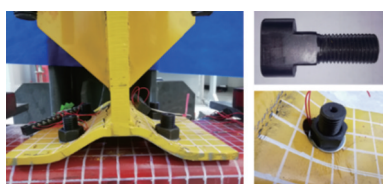
试件 S20-12-10、试件 TH20-12-10 和试件 TV20-12-10 的破坏模式见图 8。



(a) 试件 S20-12-10



(b) 试件 TH20-12-10



(c) 试件 TV20-12-10

图 8 端板屈服

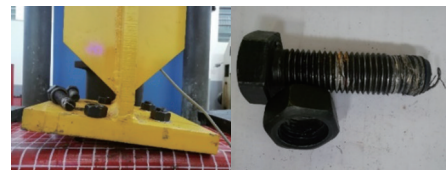
Fig.8 endplate yielding

由图 8 可见, 3 个试件均发生了端板屈服破坏, 其特征是端板出现显著塑性变形, 并形成了 SCI-P398^[6]推荐的非圆形屈服线模式中的“双线型”屈服线。对比发现, 试件 S20-12-10 的“T”形件翼

缘滑移量明显小于试件 TH20-12-10 和试件 TV20-12-10, 且其螺母在试验全程均保持夹紧状态。而 T 形方颈单边螺栓连接节点则不同, 当翼缘变形过大时, 螺母会嵌入变形的长圆螺栓孔中, 导致连接作用减弱。这主要是因为长圆孔在栓杆作用下发生变形, 加之翼缘滑移共同促使螺母陷入孔内。该机制是导致“T”形方颈单边螺栓连接在强度和刚度上均低于传统高强螺栓连接的主要原因。

2.4 破坏模式 4: 螺栓破坏

试件 S20-12-30、试件 TV20-12-30 和试件 TH20-12-30 的破坏模式见图 9。三者均表现为螺栓破坏, 其特征是螺栓突然失效, 而方钢管与端板未见明显变形。本文所述的“螺栓破坏”包括螺栓杆断裂与螺纹失效两种形式。在该破坏模式下, 两类连接节点的试验现象无明显差异, 破坏均发生于螺栓螺纹区的净截面处。



(a) 试件 S20-12-30



(b) 试件 TV20-12-30



(c) 试件 TH20-12-30

图 9 螺栓破坏

Fig.9 bolt failure

从破坏模式的性质来看, 管壁屈服与端板屈服属于延性破坏, 适合在设计中作为预期破坏模式加以控制。相比之下, 管壁屈服伴随螺栓孔冲切以及螺栓破坏均属于脆性破坏, 对结构安全不利, 在设计中应予以避免。

3 载荷位移

管壁屈服节点(包含螺栓孔冲切)、端板屈服节点和螺栓破坏节点的载荷-位移曲线见图 10。各节点的载荷-位移曲线特征值及响应位移见表 3,

其中 $S_{c,ini}$ 、 F_y 、 Δ_y 、 F_u 、 Δ_u 分别为试件的初始刚度、屈服强度、屈服位移、极限强度和极限位移。屈

服强度 F_y 为载荷-位移曲线中初始刚度切线与硬化分支切线的交点对应的载荷。

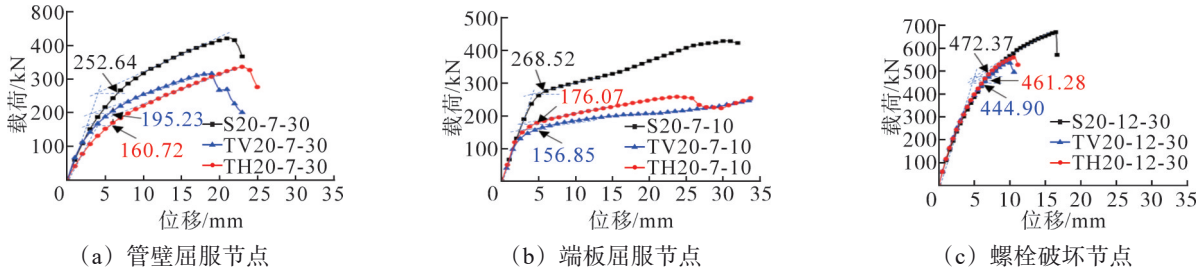


图 10 载荷-位移曲线

Fig.10 load-displacement curves

表 3 连接抗拉强度的特征值及相应位移
Tab. 3 characteristic values of connection tensile strength and corresponding displacement

试件编号	$S_{c,ini}$ (kN·mm ⁻¹)	F_y /kN	Δ_y /mm	F_u /kN	Δ_u /mm	破坏模式
S20-7-30	56.27	252.64	6.37	423.94	21.62	1
TV20-7-30	65.29	195.23	5.24	318.07	19.24	2
TH20-7-30	39.39	160.72	5.42	338.24	23.08	2
S20-12-10	67.47	268.52	5.41	430.47	31.40	3
TV20-12-10	66.82	156.85	4.50	249.05	34.02	3
TH20-12-10	67.05	176.07	4.38	258.90	23.76	3
S20-12-30	111.41	472.37	7.02	669.51	16.48	4
TV20-12-30	115.05	444.90	6.22	543.53	9.75	4
TH20-12-30	112.87	461.28	6.24	560.48	10.75	4

由图 10 和表 3 可知, 试件 TV20-7-30 和试件 TH20-7-30 的屈服强度分别为试件 S20-7-30 的 77.3% 和 63.6%, 极限强度分别为 75.0% 和 79.8%。此外, 试件 TV20-7-30 和试件 TH20-7-30 的初始刚度分别为试件 S20-7-30 的 84.0% 和 70.0%。

由图 10 (a) 可知, 带垂直螺栓孔试件的初始刚度和屈服强度均高于带水平螺栓孔试件, 但其极限强度较低。其原因为 “T” 形方颈单边螺栓的栓头锚固力并非均匀分布于长圆形栓孔周围, 而是沿垂直于孔轴线的方向呈线性分布。因此, 带垂直螺栓孔的方钢管对 “T” 形方颈单边螺栓的锚固作用主要依赖于方钢管倒角的抗弯刚度和侧壁的抗拉刚度, 而带水平螺栓孔的方钢管则主要依靠连接面的抗弯刚度提供锚固。由于方钢管连接面的抗弯刚度低于倒角的抗弯刚度与侧壁的抗拉刚度, 带垂直螺栓孔试件表现出更高的初始刚度, 但其极限强度和变形能力相对较低。

试件 TV20-12-10 和试件 TH20-12-10 的屈服强度分别为试件 S20-12-10 的 58.4% 和 65.6%, 极限强度分别为试件 S20-12-10 的 57.9% 和 60.1%。此外, 3 个试件的初始刚度相差较小, 几乎相同。从图 10 (b) 可看出, 带水平螺栓孔的试件屈服强度

和极限强度均高于垂直螺栓孔试件。这是因为受拉的端板使水平螺栓孔的内壁与 “T” 形方颈单边螺栓接触, 节点承载力来源包括端板的抗弯刚度和螺栓孔内壁在垂直于螺栓孔轴向方向上的抗压刚度。而垂直螺栓孔的内壁并不与 “T” 形方颈单边螺栓接触, 节点承载力来源变为端板的抗弯刚度和端板与方钢管之间的摩擦刚度。显然, 摩擦刚度小于螺栓孔的抗压刚度。

试件 TV20-12-30 和试件 TH20-12-30 的屈服强度分别达到试件 S20-12-30 的 94.2% 和 97.7%, 极限强度分别达到试件 S20-12-30 的 81.2% 和 83.7%。3 个试件初始刚度相差较小, 几乎相同。由图 10 (c) 可知, 3 个试件的载荷-位移曲线几乎重合, 主要区别在于传统高强螺栓连接节点较 “T” 形方颈单边螺栓连接节点能够实现更大的位移。

综上, “T” 形方颈单边螺栓在 “T” 形件-钢管连接中的承载力较传统螺栓连接降低。但是文献 [10] 的研究结果表明 “T” 形方颈单边螺栓端板连接梁柱节点承载力可与传统高强螺栓连接相当。这是因为本文 “T” 形件-钢管连接与文献 [10] 中端板连接梁柱节点结构不同, 螺栓群受力分布不同导致。两类螺栓连接差异最大化的结构形式即为本文研究的 “T” 形件-钢管连接。

虽然 “T” 形方颈单边螺栓连接的抗拉强度较传统高强螺栓连接低, 但提供了一种将钢管桁架弦杆与腹杆通过螺栓连接的方法, 这是传统高强螺栓无法实现的。通过加强方钢管的连接区域, 采用更厚的端板优化螺栓加工工艺, “T” 形方颈单边螺栓也可提供足够的强度、刚度和延性。

4 模型对比

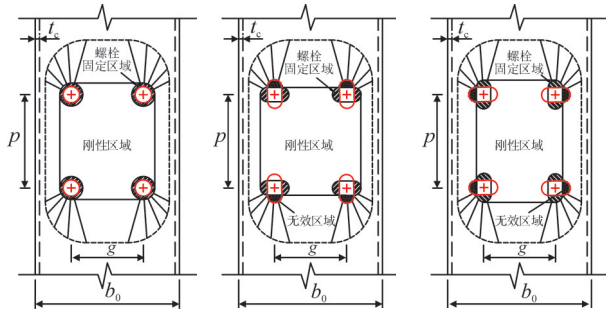
4.1 管壁屈服承载力计算

屈服线理论在板件弯曲承载力计算中应用广泛 [17-18]。在钢管柱连接中, 抗弯承载力主要取决于

连接面上屈服线的分布模式。该领域中, Gomes 模型^[19]与 Yeomans 模型^[20]较为经典常用,但在实际应用中常需结合具体结构形式进行修正。因此,本节将对上述两种模型进行适当修正,并将其应用于带长圆孔钢管柱连接的屈服承载力计算中。

(1) 修正 Gomes 模型

Gomes 模型可用于计算试件 S20-7-30 的屈服强度 F_{CG} , 分析模型见图 11 (a)。“T”形方颈单边螺栓的螺栓头形状和螺栓孔形状与传统高强螺栓不同,导致螺栓的夹紧面积和管壁上屈服线有效长度发生变化。因此,本节修正 Gomes 模型中管壁刚性区域的宽度 b' 和长度 c' , 具体见图 11 (b) 和图 11 (c)。



(a) 圆孔管壁 (b) 竖直长圆孔管壁 (c) 水平长圆孔管壁
图 11 破坏模式 1 和模式 2 的修正 Gomes 模型

Fig.11 revised Gomes model in failure modes 1 and modes 2

对于传统高强螺栓,螺栓夹紧区域完全覆盖圆形螺栓孔。但是,对于本文研究的“T”形方颈单边螺栓,螺栓孔的半圆形区域未被“T”形头夹紧,该区域无屈服线产生,如图 11 所示。

采用修改的 Gomes 模型计算“T”形方颈单边螺栓连接的管壁屈服强度^[19]为

$$F_{C,MGF} = k_m \frac{\pi \sigma_y t_c^2}{1 - \frac{b'_m}{L}} \left[\left(1 - \frac{b'_m}{L} \right)^{0.5} + \frac{2c'_m}{\pi L} \right], \quad (1)$$

$$k_m = \begin{cases} 1 & \frac{b'_m + c'_m}{L} \geq 0.5 \\ 0.7 + \frac{0.6(b'_m + c'_m)}{L} & \frac{b'_m + c'_m}{L} < 0.5 \end{cases}, \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中: σ_y 为管壁屈服强度; t_c 为管壁厚度; L 为钢管有效宽度, $L = b_0 - 2t_c - 1.5r$; b_0 为钢管外宽; r 为钢管倒角内半径; b'_m 和 c'_m 分别为管壁上刚性区域的修正宽度和长度。

针对“T”形方颈单边螺栓,考虑栓头尺寸对屈服线有限长度的影响

$$b'_m = g + 0.9d_{hg}, \quad (3)$$

$$c'_m = p + 0.9d_{hp}, \quad (4)$$

式 (3)、式 (4) 中, d_{hg} 和 d_{hp} 分别为“T”形头在 g 和 p 两个栓群方向上的长度。其大小除与“T”形头尺寸有关外,还与栓孔方向有关。栓孔竖向布置时, d_{hg} 和 d_{hp} 分别为栓头长轴和短轴长度,栓孔横向布置时反之。

考虑到钢管冲切破坏有可能出现在管壁屈服之前,因此管壁抗螺栓冲切强度可表示为

$$F_{C,MGP} = \min \left[\frac{2\sigma_y t_c (b'_m + c'_m)}{\sqrt{3}}, \frac{n_v \pi d \sigma_y t_c}{\sqrt{3}} \right], \quad (5)$$

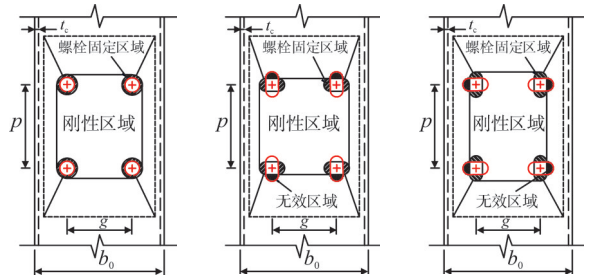
式中, n_v 为螺栓数量。

管壁计算承载力为

$$F_{C,MG} = \min [F_{C,MGF}, F_{C,MGP}] \circ \quad (6)$$

(2) 修正 Yeomans 模型

Yeomans 模型区别于 Gomes 模型的典型特征是所有屈服线均为直线。Yeomans 模型最初用于计算小直径螺栓连接的管壁塑性抗弯强度,并未考虑螺栓直径对屈服线模式的影响。因此,本文在修正 Yeomans 模型时考虑了螺栓夹紧区域直径 d 、“T”形头长度 d_{hg} 和 d_{hp} , 见图 12。



(a) 圆孔管壁 (b) 竖直长圆孔管壁 (c) 水平长圆孔管壁
图 12 破坏模式 1 和模式 2 的修正 Yeomans 模型

Fig.12 revised Yeomans model in failure mode 1 and mode 2

基于修正的 Yeomans 模型计算传统高强螺栓连接的屈服强度 $F_{C,MY1}$ 与“T”形方颈单边螺栓的连接强度 $F_{C,MY2}$, 分别为

$$F_{C,MY1} = \frac{\sigma_y t_c^2 f(k)}{1 - \frac{g + d_h}{b_0 - t_c}} \left[\frac{2(p + d_h)}{b_0 - t_c} + 4 \left(1 - \frac{g + d_h}{b_0 - t_c} \right)^{0.5} \right], \quad (7)$$

$$F_{C,MY2} = \frac{\sigma_y t_c^2 f(k)}{1 - \frac{g + d_{hg}}{b_0 - t_c}} \left[\frac{2(p + d_{hp})}{b_0 - t_c} + 4 \left(1 - \frac{g + d_{hg}}{b_0 - t_c} \right)^{0.5} \right], \quad (8)$$

式 (7)、式 (8) 中, $f(k) = 1$ 。

4.2 端板屈服承载力计算

屈服线理论因其有效性,已被 Eurocode 3^[14]和 P398^[17]推荐为计算端板弯曲屈服强度的设计方法。

Eurocode 3^[14]推荐的计算圆孔端板弯曲屈服强度的分析模型见图 13 (a), 计算公式为

$$F_{T,S} = \frac{4M_{pl}}{m - w_n/2}, \quad (9)$$

$$M_{pl} = \frac{\sum l_{eff} t_f^2 f_y}{4\gamma_{M0}}, \quad (10)$$

式 (9)、式 (10) 中: $F_{T,S}$ 为传统高强螺栓连接的抗拉屈服强度; m 为螺栓轴线与焊脚的距离; w_n 为螺母宽度; t_f 为端板厚度; f_y 为端板屈服强度; $\sum l_{eff}$ 为端板屈服线总有效长度; γ_{M0} 为分项系数, 取 1.0。

对于传统高强螺栓连接, 两条塑性铰线之间的距离为螺母外缘与端板中部焊脚之间的距离, 不会随端板变形而改变, 见图 13 (a)。

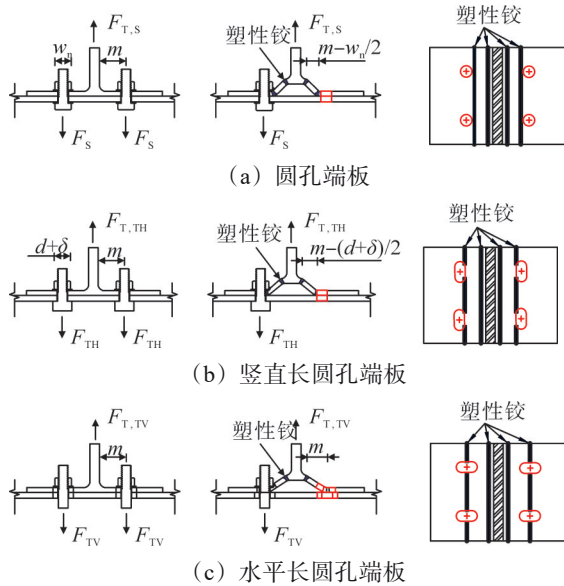


图 13 破坏模式 3 分析模型

Fig.13 analytical models for failure mode 3

但对于“T”形方颈单边螺栓, 螺母不能完全覆盖和夹紧栓孔。因此, 与圆形栓孔相比, 长圆形栓孔使端板塑性铰线间距离变大。此外, “T”形方颈单边螺栓连接屈服线穿过螺栓孔, 但传统高强螺栓未穿过。这导致屈服线有效长度减小, 降低了“T”形方颈单边螺栓的抗拉强度。“T”形方颈单边螺栓连接竖直和水平长圆孔端板弯曲屈服强度计算模型见图 13 (b) 和图 13 (c)。

带竖直方向和水平方向螺栓孔的“T”形方颈单边螺栓连接抗拉屈服强度 $F_{T,TV}$ 和 $F_{T,TH}$ 分别为

$$F_{T,TV} = \frac{4M_{pl}}{m}, \quad (11)$$

$$F_{T,TH} = \frac{4M_{pl}}{m - \frac{d+\delta}{2}}, \quad (12)$$

式 (11)、式 (12) 中: d 为螺栓杆直径; δ 为螺栓的安装间隙。

4.3 螺栓破坏承载力计算

(1) 螺栓杆断裂

传统高强螺栓连接和“T”形方颈单边螺栓连接在螺栓杆断裂情况下的分析模型见图 14。在螺栓杆断裂破坏模式下, 两种连接的屈服强度 $F_{B,y}$ 和极限强度 $F_{B,u}$ 分别为

$$F_{B,y} = \frac{\pi d^2 f_{yb}}{\gamma_{Mb}}, \quad (13)$$

$$F_{B,u} = \frac{\pi d^2 f_{ub}}{\gamma_{Mb}}, \quad (14)$$

式 (13)、式 (14) 中: f_{yb} 和 f_{ub} 分别为螺栓杆的屈服强度和极限强度; γ_{Mb} 为分项系数, 取 1.1。

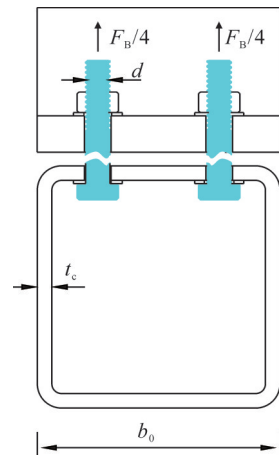


图 14 螺栓杆断裂分析模型

Fig.14 analytical model for bolt shank fracture

(2) 螺栓螺纹失效

螺栓螺纹失效下传统高强螺栓连接和“T”形方颈单边螺栓连接的分析模型可参照文献[21]。

在螺栓螺纹失效模式下, 传统高强螺栓连接和“T”形方颈单边螺栓连接的极限强度为

$$F_{S,u} = \min(\sum F_{S1}, \sum F_{S2}), \quad (15)$$

式中, F_{S1} 和 F_{S2} 分别为螺纹的抗剪和抗弯强度。

$$F_{S1} = 0.7A_{vs}f_{ub}, \quad (16)$$

$$F_{S2} = \frac{W_s f_{ub}}{b_s}, \quad (17)$$

$$A_{vs} = \pi D_s h_s, \quad (18)$$

$$W_s = \frac{\pi D_s h_s^2}{4}, \quad (19)$$

式(16)~式(19)中: A_{vs} 为螺纹抗剪面积; h_s 为螺纹根部高度; D_s 为螺纹公称直径; W_s 为螺纹根部截面的塑性弯曲模量; b_s 为螺纹宽度。

螺栓破坏极限承载力取式(14)和式(15)计算后的较小值。

表4 修正Gomes和Yeomans模型屈服强度对比
Tab.4 comparison of tensile yield strength using modified Gomes model and Yeomans model

试件	F_y/kN	修正Gomes模型		修正Yeomans模型		$(F_y - F_{C,MG})/F_y$	$(F_y - F_{C,MY})/F_y$
		$F_{C,G}/\text{kN}$	$F_{C,MG}/\text{kN}$	$F_{C,MY1}/\text{kN}$	$F_{C,MY2}/\text{kN}$		
S20-7-30	252.64	181.05		231.38		0.283	0.084
TV20-7-30	195.23		189.47		247.52	0.030	-0.268
TH20-7-30	160.72		166.70		207.83	-0.037	-0.293
平均值						0.092	-0.159
标准差						0.138	0.172

相较于修正Yeomans模型,修正Gomes模型计算得到的屈服强度的平均误差和标准差更小,其计算的“T”形方颈单边螺栓连接的屈服强度与试验结果更为接近,变化趋势也一致,且计算精度高于未修正的Gomes模型。因此,建议采用修正后的Gomes模型计算管壁屈服承载力。

5.2 端板屈服承载力模型验证

试件S20-12-10、试件TV20-12-10和试件TH20-12-10的屈服强度见表5。可知,传统高强螺栓连接与“T”形方颈单边螺栓连接在计算分析中所得到的屈服强度,均低于相应试件的实际试验结果,二者偏差范围在4.2%至18.7%之间,即安全储备为4.2%~18.7%。

表5 破坏模式3下的屈服强度计算结果
Tab.5 calculation results of tensile yield strength under failure mode 3

试件	F_y/kN	F_T/kN	$(F_y - F_T)/F_y$
S20-12-10	268.52	222.30	0.172
TV20-12-10	156.85	127.50	0.187
TH20-12-10	176.07	168.75	0.042

注: F_T 为节点抗拉屈服强度的计算值。

5.3 螺栓破坏强度模型的验证

试件S20-12-30、试件TV20-12-30和试件TH20-12-30在各自破坏模式(螺栓杆断裂和螺栓螺纹失效)下的屈服强度和极限强度的计算结果见表6。传统高强螺栓连接和“T”形方颈单边螺栓连接的计算值 $F_{B,u}$ 和 $F_{S,u}$ 与试验值 F_u 吻合较好,安全储备平均为13.8%。

表6 破坏模式4下的抗拉屈服强度的计算结果
Tab.6 calculation results of tensile yield strength under failure mode 4

试件	试验结果		模拟计算结果			对比结果		
	F_y/kN	F_u/kN	$F_{B,y}/\text{kN}$	$F_{B,u}/\text{kN}$	$F_{S,u}/\text{kN}$	$(F_y - F_{B,y})/F_y$	$(F_u - F_{B,u})/F_u$	$(F_u - F_{S,u})/F_u$
S20-12-30	472.37	669.51			1137.81			0.15
TV20-12-30	444.90	543.53	845.05	951.69		0.05	0.125	
TH20-12-30	461.28	560.48			963.72			0.14

6 结论

(1) 试验中发现4种破坏模式,即管壁屈服、管壁屈服且螺栓孔冲切、端板屈服和螺栓破坏,其中,管壁屈服和端板屈服属于延性破坏,建议作为工程设计的优先控制模式。

(2) 尽管“T”形方颈单边螺栓连接在抗拉强度方面可能低于传统高强螺栓连接,但实现了钢管桁架弦杆与腹杆间的直接螺栓连接,解决了传统高强螺栓在该类节点中无法安装的难题。

(3) 针对上述4种破坏模式,提出T形件-钢管节点承载力计算方法。其中,管壁屈服承载力建议采用修正的Gomes模型进行计算。

(4) 受限于试件数量,所提承载力计算公式的准确性和可靠度仍需要大量的试验和数值模拟进一步验证。

参考文献(References):

- [1] YU Z B, HOU C, PENG J H, et al. Experimental study on demountable CFST K-joints designed with blind bolts[J]. Thin-

- Walled Structures, 2023, 187: 110723.
- [2] POKHAREL T, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Tensile behaviour of double headed anchored blind bolt in concrete filled square hollow section under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 146-158.
- [3] WANG W, LI L, CHEN D B. Progressive collapse behaviour of endplate connections to cold-formed tubular column with novel Slip-Critical Blind Bolts[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 404-416.
- [4] 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.
XU Ting, WANG Wei, CHEN Yiyi. A review on foreign research status of one-side bolt[J]. Steel Construction, 2015, 30(8): 27-33.
- [5] TIZANI W, AL-MUGHAIIRI A, OWEN J S, et al. Rotational stiffness of a blind-bolted connection to concrete-filled tubes using modified Hollo-bolt[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 317-331.
- [6] WULAN T, 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.
- [7] WANG W, LI M X, CHEN Y Y, et al. Cyclic behavior of endplate connections to tubular columns with novel slip-critical blind bolts [J]. Engineering Structures, 2017, 148: 949-962.
- [8] JIN D, HOU C, SHEN L M, et al. Numerical performance of blind-bolted demountable square CFST K-joints[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101646.
- [9] ZHU Q Y, LIU M, LV B Y, et al. Load-carrying capacity and design method for thread-fixed one-side bolts connected CHS K-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 234: 109753.
- [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.
- [11] SUN L L, LIANG Z Q, WU L, et al. Experimental and theoretical modeling for predicting bending moment capacity of T-head square-neck one-side bolted endplate to tube column connection [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103104.
- [12] SUN L L, LIANG Z Q, WANG Q S, et al. Seismic response on T-head square-neck one-side bolted endplate connection of beam to square tubular column[J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113077.
- [13] SUN L L, LIANG Z Q, CAI M, et al. Experimental investigation on monotonic bending behaviour of TSOBs bolted beam to hollow square section column connection with inner stiffener[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46: 103765.
- [14] European Committee for Standardization. Design of steel structures- Part 1-8: Design of joints: EN 1993-1-18[S]. Brussel, Belgium: European Committee for Standardization, 2005:12-20.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 15.
- [16] The Steel Construction Institute. Joints in steel construction: Moment-Resisting Joint to Eurocode 3: P398[S]. London: Steel Construction Institute, 2014: 12-16.
- [17] 李国强, 段炼, 陆焯, 等. H型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 91-100.
LI Guoqiang, DUAN Lian, LU Ye, et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 91-100.
- [18] QUINTAS V. Two main methods for yield line analysis of slabs[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(2): 223-231.
- [19] GOMES F C T, JASPART J P, MAQUOI R. Moment capacity of beam-to-column minor axis joints[C]//Proceedings of IABSE International Colloquium on Semi-rigid Structural Connections. Istanbul, Turkey: IABSE, 1996:319-326.
- [20] YEOMANS N F. I-beam/rectangular hollow section column connections using the Flowdrill system[M]//Tubular Structures VI. London: Routledge, 2021: 381-388.
- [21] LIU M, ZHU X L, WANG P J, et al. Tension strength and design method for thread-fixed one-side bolted T-stub[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 918-933.