

引用本文:王文达,易练波,范家浩.中空夹层圆钢管混凝土构件内外法兰连接受弯性能分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):42-51.  
WANG Wen-da, YI Lian-bo, FAN Jia-hao. Analysis of Bending Performance of Inner and Outer Flange Connections of Circular Concrete-filled Double Skin Steel Tubular(CFDST) Member[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 42-51.

DOI:10.19815/j.jace.2019.10035

## 中空夹层圆钢管混凝土构件内外法兰连接 受弯性能分析

王文达,易练波,范家浩

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为研究中空夹层圆钢管混凝土内外法兰连接的受弯性能,用 ABAQUS 软件建立了该节点的力学模型,分析了中空夹层圆钢管混凝土内外法兰节点受弯时节点中和轴和旋转轴的位置,并分析了内外法兰错开间距、螺栓预紧力、空心率、法兰板厚度、混凝土强度、螺栓内外边距比值等参数对节点极限承载力、最大螺栓拉力的影响。结果表明:节点的中和轴和旋转轴随弯矩变化,在外法兰板底端最大螺栓屈服前,旋转轴位置大约为  $0.6R$  ( $R$  为外钢管半径),并且节点的中和轴和旋转轴不在同一截面;外圈最大螺栓拉力随法兰板厚度、内外法兰错开间距、螺栓内外边距比值增大而减小,随空心率、螺栓预紧力增大而增大;混凝土强度对最大螺栓拉力影响不大,可以不作为主要参数进行分析。

**关键词:**法兰连接;中空夹层圆钢管混凝土构件;受弯性能;旋转轴;最大螺栓拉力

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0042-10

### Analysis of Bending Performance of Inner and Outer Flange Connections of Circular Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Member

WANG Wen-da, YI Lian-bo, FAN Jia-hao

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** In order to study the bending performance of the inner and outer flange connections of the circular concrete-filled double skin steel tube, the mechanical model of the joint was established using ABAQUS software. The positions of the neutral axis and the rotation axis of the joint when the inner and outer flange connections of the circular concrete-filled double skin steel tube were bent were analyzed. The influences of the parameters such as the inner and outer flange stagger distance, bolt pre-tightening force, hollow ratio, flange thickness, concrete strength, bolt inner and outer margin ratio on the ultimate bearing capacity of the joint and the maximum bolt tension were analyzed. The results show that the neutral axis and rotation axis of the joint change with the bending moment. Before the maximum bolt at the bottom of the outer flange plate yields, the position of the rotation axis is approximately  $0.6R$  ( $R$  is outer steel pipe radius), and the neutral axis and rotation axis of joint are not in the same section. The maximum

收稿日期:2019-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51768038);甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-08)

作者简介:王文达(1976-),男,甘肃天水人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangwd@lut.edu.cn.

bolt tension decreases with the increase of the thickness of flange plate, the inner and outer flange staggered distance, and the bolt inner and outer margin ratio. It increases with the increase of the hollow ratio and the bolt pre-tightening force. Concrete strength has little effect on the maximum bolt tension, so it can not be used as the main parameter for analysis.

**Key words:** flange connection; circular concrete-filled double skin steel tubular member; bending performance; rotation axis; maximum bolt tension

## 0 引言

中空夹层圆钢管混凝土(CFDST)构件<sup>[1-3]</sup>由于抗弯刚度大、受力性能好等优点,在输电塔、风力发电机支撑柱及海洋平台柱等工程中广泛应用。此构件在输电塔法兰节点中往往受到由风荷载引起的较大弯矩和拉力,若按传统钢管刚性法兰<sup>[4]</sup>设计,仅在外钢管法兰外圈布置 1 圈螺栓,具体构造见图 1,为了满足承载能力设计要求,螺栓直径、法兰板厚度往往会很大,大直径高强度等级的螺栓除了给施工拧紧带来不便外,较厚法兰板也会出现层状撕裂的危险,采用此方法设计节点会降低整个结构的安全度。

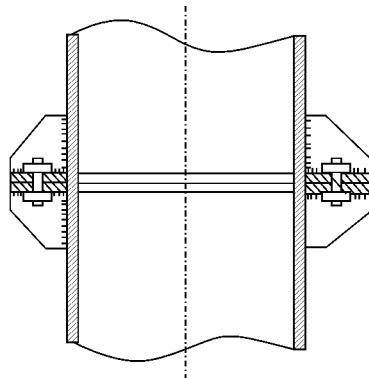


图 1 传统钢管刚性法兰

Fig. 1 Traditional Steel Tube Rigid Flange

为了解决大直径螺栓和较厚法兰板带来的弊端,本文提出在内钢管再布置 1 圈螺栓,此节点构造通过在内外钢管之间采用定位板来保证内外钢管同心要求。同时内外钢管与内外法兰板在同一位置焊接,焊接后用螺栓将其连接成一个整体,之后在内外钢管中间空隙处填充 C50 混凝土,从而保证内外法兰节点连接处混凝土的连续性,具体构造如图 2 所示。基于现有的研究成果可知:改进后的节点满足承载能力设计要求,且节点受力合理,同时螺栓直径、法兰板厚度、加劲肋尺寸、焊缝尺寸都可以相应减小、相比于传统钢管内外法兰<sup>[5]</sup>,由于混凝土的存在,可以较好地限制内外钢管的屈曲,节点表现出较好的塑性和韧性,能很好地满足结构的抗风、抗震性

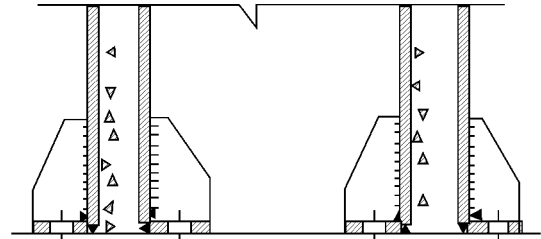


图 2 中空夹层圆钢管混凝土内外法兰

Fig. 2 Inner and Outer Flange of Circular Concrete-filled Double Skin Steel Tube

能要求。

目前,针对内外法兰节点的相关研究成果相对较少。邓洪洲等<sup>[6]</sup>对钢管内外法兰进行轴拉、轴压静力试验,得到了外、内圈螺栓拉力比值为 1.0;陈哲等<sup>[7]</sup>对中空夹层圆钢管混凝土内外法兰受弯性能进行了试验研究,得到旋转轴位置为  $0.75R$  ( $R$  为外钢管半径);黄誉等<sup>[8]</sup>对钢管内外法兰受弯性能进行了试验研究和有限元分析,建议计算最大螺栓拉力时,旋转轴位置距钢管中心  $0.7R$ ;陈勇等<sup>[9]</sup>对钢管内外法兰在压弯组合荷载下的承载力进行了试验研究,得出了内外法兰在大偏心受压荷载下,节点表现为法兰板破坏,而在小偏心受压荷载下,节点表现为钢管屈曲破坏;薛滨等<sup>[10]</sup>基于平截面假定,运用半解析法推导了钢管内外法兰受拉弯时最大螺栓拉力的计算公式,孙传琦等<sup>[11]</sup>对钢管内外法兰进行了受弯试验和有限元分析,结果表明旋转轴位于外钢管  $0.6R$ , Cao 等<sup>[12]</sup>对传统钢管法兰受轴向拉力荷载时,提出了计算螺栓拉力的具体计算公式。对于中空夹层圆钢管混凝土内外法兰节点受弯性能有限元分析目前未见报道。

## 1 有限元模型

### 1.1 有限元模型验证

为了验证建模方法的可靠性,对已有试验的 3 个中空夹层圆钢管混凝土受弯构件和 3 个圆钢管内外法兰节点拉弯构件进行数值模拟。构件的主要参数如表 1, 2 所示,其中  $D_i$ ,  $D_o$  分别为内钢管和外钢管直径,  $t_i$ ,  $t_o$  分别为内钢管和外钢管壁厚,  $L$  为构件

表1 中空夹层圆钢管混凝土构件

Tab.1 Circular Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Member

构件编号	$D_o/mm$	$t_o/mm$	$L/mm$	$D_i/mm$	$t_i/mm$	$f_{cu}/MPa$	$f_{yo}/MPa$	$f_{yi}/MPa$	$\chi$	数据来源
C1	114	3	1 500	32	3	58	294.5	422.3	0.30	文献[13]
C2	114	3	1 500	58	3	58	294.5	374.5	0.54	
C3	114	3	1 500	88	3	58	294.5	370.2	0.81	

表2 圆钢管内外法兰节点构件

Tab.2 Round Steel Pipe Inner and Outer Flange Joint Member

构件编号	$D_o/mm$	$t_o/mm$	$F_o/mm$	$F_i/mm$	$t/mm$	加劲肋尺寸	螺栓等级	$e/mm$	$a/mm$	$b/mm$	数据来源
T1	600	12	740	440	24	155 mm×70 mm×12 mm	M20/2×10	29.5	35	35	文献[14]
T2	600	12	740	440	24	155 mm×70 mm×12 mm	M20/2×10	71.5	35	35	
T3	600	12	740	440	24	155 mm×70 mm×12 mm	M20/2×10	141.5	35	35	

长度,  $f_{yo}, f_{yi}$  分别为内外钢管屈服强度,  $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度,  $\chi$  为空心率,  $\chi = D_i / (D_o - 2t_o)$ ,  $F_o, F_i, t$  分别为法兰外径、内径、厚度,  $e$  为偏心距,  $a, b$  为螺栓内外边距。如图 3, 4 所示, 节点的极限承载力与有限元模拟有较好的一致性, 在此建模方法的基础上, 建立中空夹层圆钢管混凝土内外法兰模型进行有限元分析。

1.2 典型算例

通过典型算例分析中空夹层圆钢管混凝土内外法兰节点的受力全过程, 根据《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》(送审稿) 中规定的要求, 合理确定内外钢管直径和壁厚、内外法兰板直径和厚度、加劲肋尺寸、螺栓与内外钢管壁距离。基本参数为:  $D_o = 800$  mm,  $D_i = 600$  mm,  $t_o = t_i = 12$  mm,  $F_o = 940$

mm,  $F_i = 460$  mm,  $t = 20$  mm, 加劲肋尺寸为 160 mm×70 mm×12 mm, 螺栓内外边距  $a = b = 35$  mm, 空心率  $\chi = 0.77$ , 构件长度  $L = 3\ 200$  mm, 剪跨比  $\lambda = 1.125$ 。

1.3 节点有限元计算模型

法兰板之间的接触、法兰板与螺母、螺帽的接触、螺杆与螺孔的接触界面摩擦因数参考文献[8]取 0.3, 加载夹具与构件面面接触, 界面摩擦因数为 0.25, 内外钢管与混凝土之间界面的相互作用通过定义切向和法向接触来实现, 其中法线方向为“hard”接触, 切线方向为库仑摩擦模型, 摩擦因数为 0.25<sup>[3]</sup>。为保证变形协调一致性, 加劲肋与内外钢管、法兰板、钢管与法兰板之间以及上下端板与内外钢管建立 tie 绑定, 模型各部件采用实体单元, 内

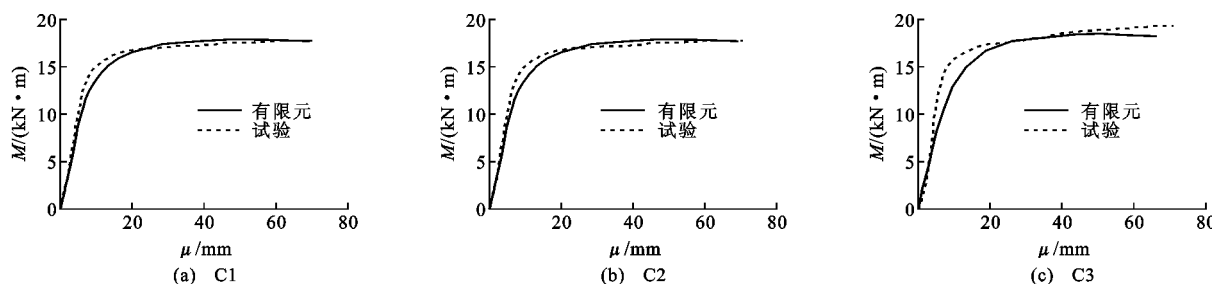


图3 中空夹层圆钢管混凝土构件弯矩-跨中挠度(M-μ)曲线

Fig.3 Moment-mid-span Deflection ( $M-\mu$ ) Curves of Circular Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Member

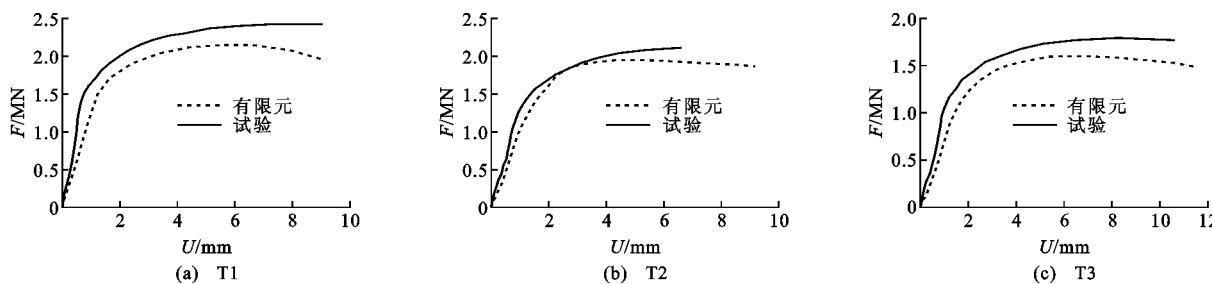


图4 圆钢管内外法兰节点拉弯荷载-法兰板张开量(F-U)曲线

Fig.4 Tensile Bending Load-flange Plate Opening ( $F-U$ ) Curves of Inner and Outer Flange Joints of Circular Steel Tube

外钢管、核心混凝土以及上下端板、加载夹具、加劲肋、螺栓、法兰板都采用 C3D8R 单元。

钢管、法兰板和加劲肋的本构关系采用二次塑性流模型,钢材弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比取 0.3,混凝土的本构关系采用塑性损伤模型,混凝土弹性阶段的泊松比取 0.2,具体表达式见参考文献[15],高强螺栓 8.8sM20 的本构关系采用直接强化的多线性等向强化模型,具体表达式参考文献[16],上下端板和加载夹具在模拟受弯过程中处于弹性范围内,变形极其微小,近似视为刚体,弹性模量  $E_s = 1 \times 10^{12}$  MPa,泊松比取  $1 \times 10^{-6}$ 。

为模拟节点实际受弯,在左右两侧一定距离处模拟加载夹具施加相等力 ( $F_1 = F_2$ ),同时左端约束  $U_1, U_2, U_3$ ,右端约束  $U_1, U_2$ ,节点模型采用六面体扫掠化结构网格划分技术进行网格划分;内外法兰节点的网格划分关键在于合理划分法兰板、螺栓、加劲肋的网格,本节将螺栓、加劲肋设置成非独立实体,在 part 功能模块中划分,法兰板、内外钢管、混凝土为独立实体,在 mesh 功能模块中划分;为了使螺栓受力集中处受力均匀过渡,在内外法兰板上下面切分和螺母大小相等的圆形截面,在其表面通过设置局部种子使法兰板与螺母接触面网格均匀对齐,具体加载方式和网格划分如图 5 所示。

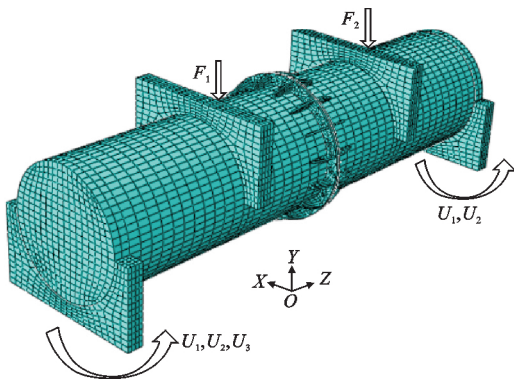


图 5 加载方式和网格划分示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Loading Mode and Meshing

## 2 有限元模型计算结果

### 2.1 破坏过程分析

开始受力阶段混凝土首先开裂,具体表现为从底部开始,其开裂高度随着荷载的增加而增加,混凝土开裂导致法兰截面受拉区的混凝土失效,截面拉力由螺栓承担,因此相对于螺栓承担的弯矩,混凝土承担的部分弯矩可以忽略不计。随着荷载增加,从外法兰板底部螺栓开始,法兰截面受拉区的螺栓沿

着截面高度方向依次屈服,当外弯矩为 1 946 kN·m 时,内外法兰节点发生破坏,节点最终破坏形态如图 6 所示。由图 6 可知:节点破坏时,法兰板受拉区底部螺栓出现颈缩拉伸破坏,外法兰板张开,混凝土露出,外钢管受压区出现轻微鼓曲。

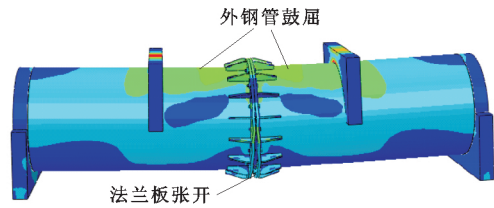


图 6 内外法兰节点破坏形态

Fig. 6 Failure Mode of Internal and External Flange Joint

为了进一步描述节点的破坏过程,图 7 给出了节点  $M-\mu$  关系曲线,并将中空夹层圆钢管混凝土内外法兰节点受弯过程大致分为 3 个阶段:弹性阶段(OA)、弹塑性阶段(AC)、塑性阶段(CD)。

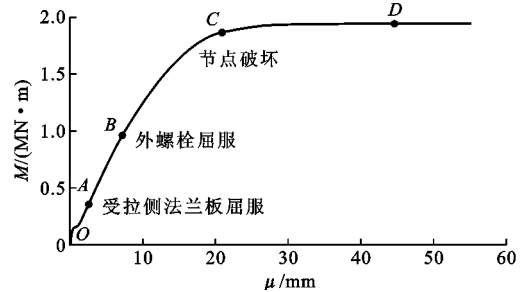


图 7  $M-\mu$  曲线

Fig. 7  $M-\mu$  Curve

弹性阶段(OA 段):节点在 OA 段  $M-\mu$  曲线基本呈线性增长,弯矩的增幅远大于挠度的增幅,在 A 点时,弯矩大约为 450 kN·m 时,内外法兰板、内外钢管、螺栓、加劲肋均处于弹性阶段,仅混凝土受拉侧开裂,不影响节点总体刚度。

弹塑性阶段(AC 段):节点的弹塑性阶段分两部分进行,节点在 AB 段的  $M-\mu$  曲线斜率缓慢变小,主要原因是随着弯矩的增大,螺栓拉力传递给法兰板,由于螺栓的屈服强度远远大于法兰板的屈服强度,导致受拉侧法兰板首先屈服;在 AB 段内外螺栓都处于弹性阶段,直到 B 点,弯矩大约为 1 100 kN·m 时,外法兰板底部最大螺栓开始屈服,之后受拉区内外螺栓沿着高度方向将依次屈服;在 BC 段挠度的增长速率明显大于弯矩的增长速率,同时截面中和轴逐渐向受压区上移,节点处于弹塑性状态。

塑性阶段(CD 段):由于混凝土的存在,节点破坏在 CD 段不出现下降,随着各构件依次屈服,节点

的承载力大小保持不变,说明中空夹层圆钢管混凝土内外法兰节点表现出良好的延性和塑性。

### 2.2 内外法兰板屈服应力、接触应力和接触状态

节点在受弯过程中,螺栓拉力主要靠法兰板承担,而压力不能靠受压区螺栓传递,主要靠受压区混凝土和内外法兰板相互挤压传递,图 8 为内外法兰

板在弯矩-跨中挠度曲线对应 A,B,C 三点的屈服应力、接触应力、接触状态云图,分析内外法兰板的屈服应力发展、接触应力分布和接触状态。

内外法兰板屈服应力首先在外法兰板受拉侧最底端出现,以螺栓中点向周围发展,之后向法兰受压区发展,内外法兰板表现出良好的塑性发展特征。

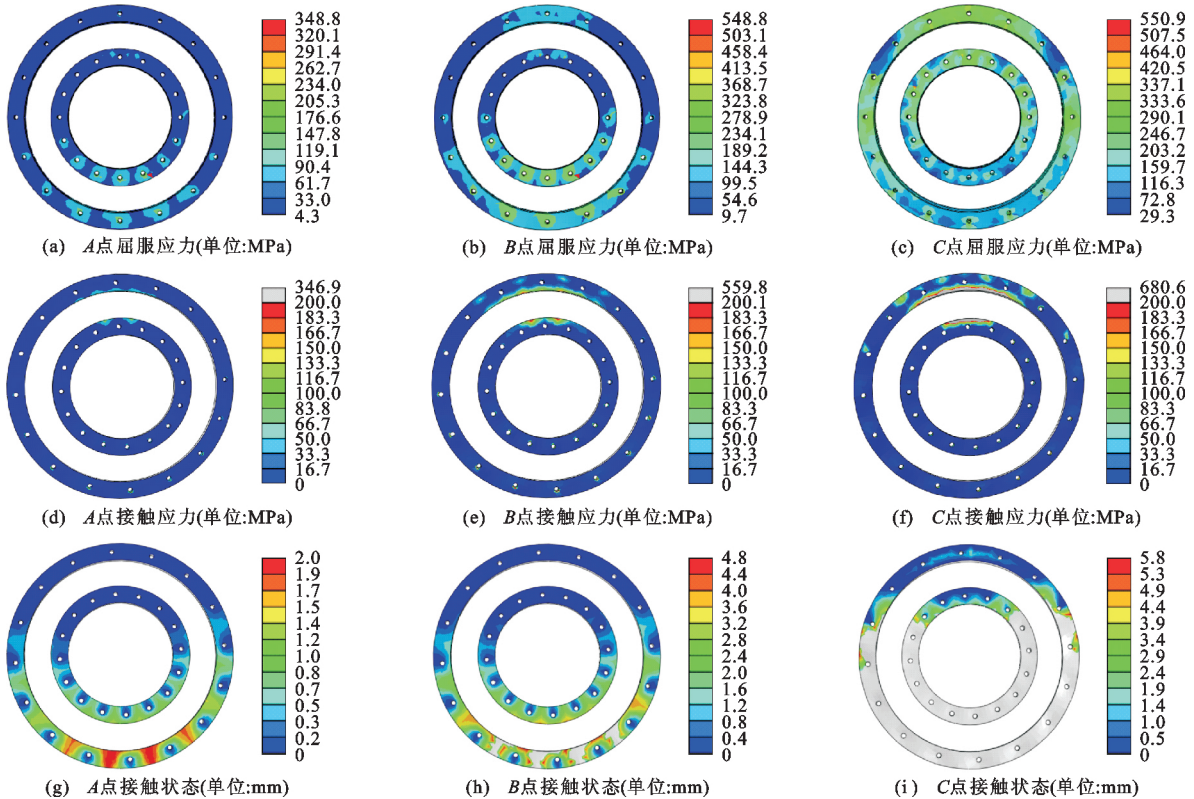


图 8 内外法兰板屈服应力、接触应力和接触状态

Fig. 8 Yield Stress, Contact State and Contact Stress of Inner and Outer Flange

随着受拉侧内外螺栓依次屈服,接触应力出现在内外法兰板受压侧最上端,并且内外法兰板接触应力集中于靠近钢管壁侧,之后向内外钢管壁侧两边发展。

内外法兰板首先在加劲肋两侧张开,在外法兰板底端最大螺栓屈服时,外法兰板底端最大螺栓两侧都张开,但张开量不同,靠近钢管壁侧最大值为 4.8 mm,远离钢管壁侧为 2.0 mm,从而可知螺栓受力不均匀。

### 2.3 螺栓屈服应力分布

图 9 为内外法兰板底端最大内外螺栓屈服应力云图。由图 9 可知:靠近钢管壁侧的螺栓屈服应力大于远离钢管壁侧,主要原因是由于螺栓两侧内外法兰板张开量不一致,靠近钢管壁侧的法兰板张开量大于远离钢管壁侧,导致螺栓不仅受到拉力,还受到附加弯矩;另外,由于受压区高度的不同,外圈螺

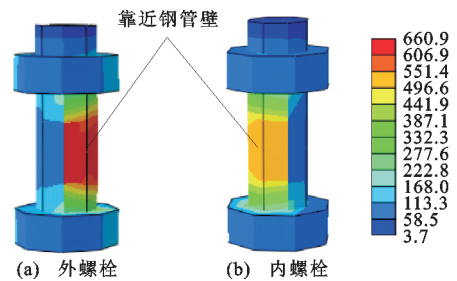


图 9 内外法兰板底端最大螺栓屈服应力云图(单位:MPa)

Fig. 9 Maximum Bolt Yield Stress at Bottom of Inner and Outer Flange Plates (Unit:MPa)

栓屈服应力发展大于内圈螺栓,具体表现为外圈最大螺栓屈服时,外弯矩大约为 1 100 kN·m,内圈最大螺栓屈服时,外弯矩大约为 1 300 kN·m,节点破坏时,内外螺栓均发生颈缩的受拉破坏。

### 2.4 内外钢管、混凝土纵向应力分布

图 10,11 为节点处内外钢管、混凝土在弯矩-跨



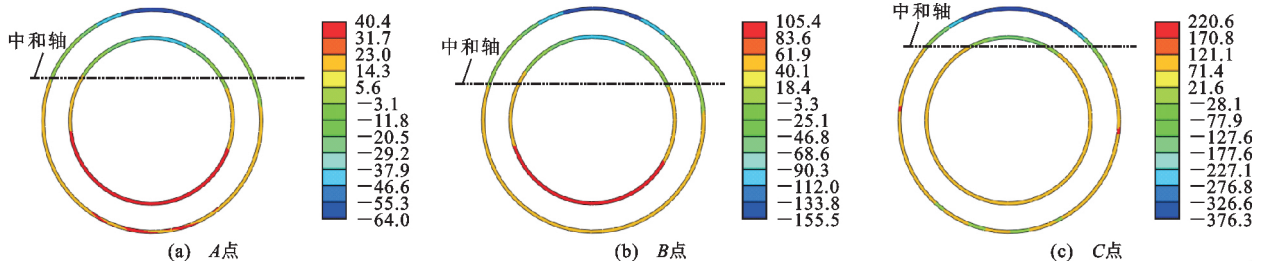


图 10 节点处内外钢管纵向应力(单位:MPa)

Fig. 10 Longitudinal Stress of Inner and Outer Steel Tube at Joint (Unit: MPa)

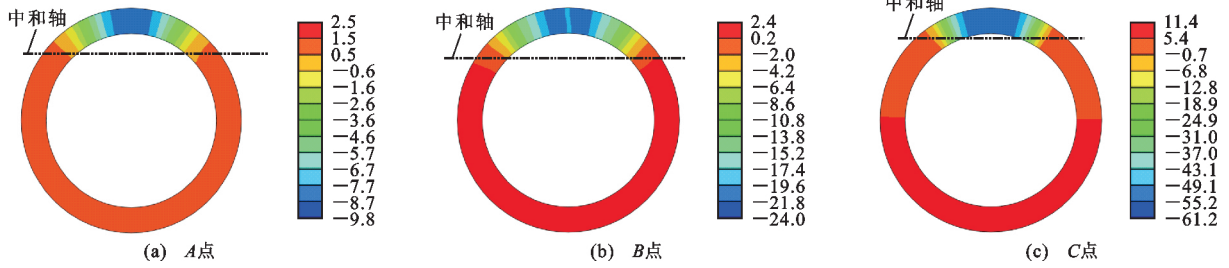


图 11 节点处核心混凝土纵向应力(单位:MPa)

Fig. 11 Core Concrete Longitudinal Stress at Joint (Unit: MPa)

中挠度曲线对应 A, B, C 三点的纵向应力云图。由图 10, 11 可知: 内外钢管纵向应力与混凝土纵向应力分布基本一致, 在截面中线上都存在 1 条中和轴(中和轴以下受拉, 以上受压), 并且在外法兰板底端最大螺栓屈服前, 中和轴位置保持不变, 最大螺栓屈服后, 中和轴向上移。

### 3 内外法兰旋转轴和中和轴位置

#### 3.1 内外法兰旋转轴计算理论

钢管刚性法兰受弯, 计算最大螺栓拉力时, 取钢管外壁切线为旋转轴。内外法兰最大螺栓拉力的计算可以借鉴传统钢管刚性法兰力学模型。在本文内外法兰旋转轴计算理论中, 混凝土开裂后不再承担拉力, 因此计算旋转轴时不计入混凝土所受拉力, 同时假设各内外螺栓拉力大小与螺栓位置到受压侧法兰板的距离成正比, 依据文献[11]螺栓计算理论, 分析最大螺栓拉力左右两侧的纵向应力, 取平均求最大螺栓拉力。

由图 12 可知: 在 A 点之前, 最大螺栓拉力增加很小, 主要原因是刚开始混凝土承担了较大拉力, 随后混凝土开裂, 退出工作, 全部拉力由内外螺栓承担, 因此计算内外法兰旋转轴位置时, 可忽略混凝土拉力, 最终根据最大螺栓拉力大小多次迭代计算反推螺栓群旋转轴的位置。

分析其中 3 个数据的最大螺栓拉力大小与弯矩的关系, 由表 3 可知: 随着弯矩的增大, 旋转轴有增

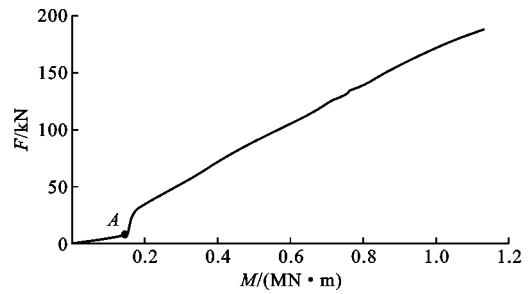


图 12 最大螺栓拉力-弯矩曲线

Fig. 12 Maximum Bolt Tension-bending Moment Curve

表 3 旋转轴位置模拟

Tab. 3 Rotation Axis Position Simulation

弯矩 $M/(kN \cdot m)$	最大螺栓拉力/kN	旋转轴位置
712.2	125.7	0.611R
863.3	150.2	0.613R
1 065.8	180.2	0.614R

大的趋势, 高强螺栓 8.8sM20 屈服时, 对应螺栓拉力为 186 kN, 初步得出在外法兰板底端最大螺栓屈服前, 内外法兰节点旋转轴位置大约位于 0.6R。

#### 3.2 内外法兰中和轴位置

由前文内外钢管、混凝土纵向应力云图可知: 内外法兰中和轴随着弯矩的增大而上移, 根据平截面应变假定, 分析节点处截面高度方向上外钢管和外加劲肋随弯矩变化时的平均纵向应力, 确定内外法兰节点的中和轴位置。

图 13, 14 分别为外钢管和外加劲肋纵向应力  $\sigma$  在节点处截面高度方向上随弯矩大小变化的分布情

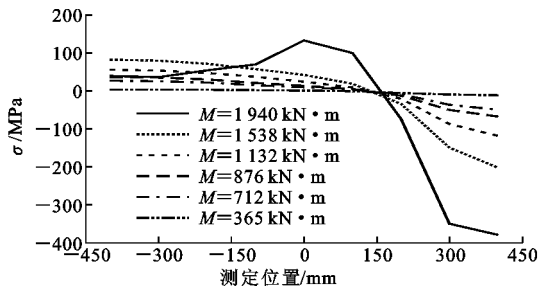


图 13 外钢管纵向应力

Fig. 13 Longitudinal Stress of Outer Steel Tube

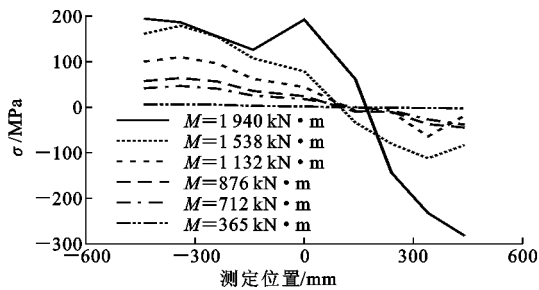


图 14 外加劲肋纵向应力

Fig. 14 Longitudinal Stress of Outer Stiffener

况。由图 13, 14 可知: 外钢管和外肋板两者纵向应力所确定的截面中和轴基本一致, 在外法兰底端最大螺栓屈服前, 内外法兰中和轴几乎保持不变, 内外法兰节点中和轴大约位于  $0.35R$ ; 当截面弯矩达到一定值时, 中和轴向上移, 主要原因是下部螺栓受拉依次屈服所致, 当发生屈服螺栓的数量较多时, 法兰中和轴有往上移的趋势, 内外法兰节点达到极限荷载时, 中和轴大约位于  $0.5R$ 。

## 4 参数分析

本文主要对中空夹层钢管混凝土内外法兰节点受弯进行有限元参数分析, 考察相关参数对节点极限承载力和最大螺栓拉力的影响。取典型算例试件进行研究, 相关参数如下: 混凝土强度  $f_{cu}$  为  $30 \sim 50$  MPa, 螺栓预紧力  $P$  为  $0 \sim 125$  kN, 内外法兰错开间距  $d$  为  $0 \sim 600$  mm, 法兰板的厚度  $t$  为  $16 \sim 24$  mm, 空心率  $\chi$  为  $0.64 \sim 0.84$ , 螺栓的内外边距比值  $z$  为  $0.75 \sim 1.3$ 。

### 4.1 参数对弯矩-挠度曲线的影响

#### 4.1.1 混凝土强度

图 15(a) 为混凝土强度对节点  $M-\mu$  曲线的影响。混凝土强度由  $f_{cu} = 30$  MPa 增加到  $f_{cu} = 50$  MPa 时, 节点的极限承载力由  $1900$  kN·m 增加到  $1946$  kN·m, 增加了  $2.4\%$ , 混凝土强度对节点的抗弯刚度和极限承载力影响不大, 主要原因是混

土受拉承载力相对于螺栓拉力可以忽略不计。

#### 4.1.2 螺栓预紧力

采用有限元软件 ABAQUS 模拟施加螺栓预紧力, 方法具体参考文献[17], [18], 8.8 级 M20 高强螺栓施加预紧力大小参考文献[19]。

图 15(b) 为螺栓预紧力对节点  $M-\mu$  曲线的影响。螺栓预紧力大小由  $0$  kN 增加到  $125$  kN 时, 节点的极限承载力几乎保持不变, 节点的初始刚度有较小的提高, 从而可知法兰节点连接过程中, 节点受荷载之前, 高强螺栓在法兰节点施加一定的预紧力可以防止连接节点出现滑动。

#### 4.1.3 内外法兰错开间距

为避免内外法兰节点的薄弱部分出现在同一截面, 将内外法兰之间错开一定的距离。

图 15(c) 为内外法兰错开间距对节点  $M-\mu$  曲线的影响。节点错开间距由  $0$  mm 增加到  $600$  mm 时, 节点的极限承载力由  $1970$  kN·m 增加到  $2950$  kN·m, 增加了  $49.7\%$ , 内外法兰错开间距的增加提高了节点的抗弯刚度和极限承载力, 主要原因是随着内外法兰错开间距的增加, 内外法兰节点错开部位类似于中空夹层钢管混凝土构件, 承担较大弯矩, 但节点的延性和安全富余系数减小, 因此在满足节点承载力、刚度和延性的条件下, 内外法兰存在最适宜的错开间距。

#### 4.1.4 法兰板厚度

图 15(d) 为法兰板厚度对节点  $M-\mu$  曲线的影响。法兰板厚度由  $16$  mm 增加到  $24$  mm 时, 节点极限承载力由  $1940$  kN·m 增加到  $2000$  kN·m, 增加了  $3.1\%$ , 主要原因是法兰板厚度的增加提高了节点的抗弯刚度和极限承载力, 但较厚法兰板的节点会出现层状撕裂的危险, 因此内外法兰板厚度在满足承载力要求下尽量减小。

#### 4.1.5 空心率

图 15(e) 为空心率对节点  $M-\mu$  曲线的影响。空心率由  $0.64$  增加到  $0.84$  时, 节点的极限承载力由  $2050$  kN·m 减少到  $1900$  kN·m, 减少了  $7.9\%$ , 空心率的增加降低了节点的抗弯刚度和极限承载力, 主要原因是空心率的增加使中空夹层钢管混凝土构件抗弯模量减小, 从而使节点极限承载力下降。

#### 4.1.6 螺栓内外边距比值

图 15(f) 为螺栓内外边距比值对节点  $M-\mu$  曲线的影响。螺栓离钢管壁距离由  $30$  mm 增加到  $40$  mm 时, 节点的极限承载力由  $1930$  kN·m 增加到  $1970$  kN·m, 增加了  $2\%$ , 由此可知螺栓至管壁的

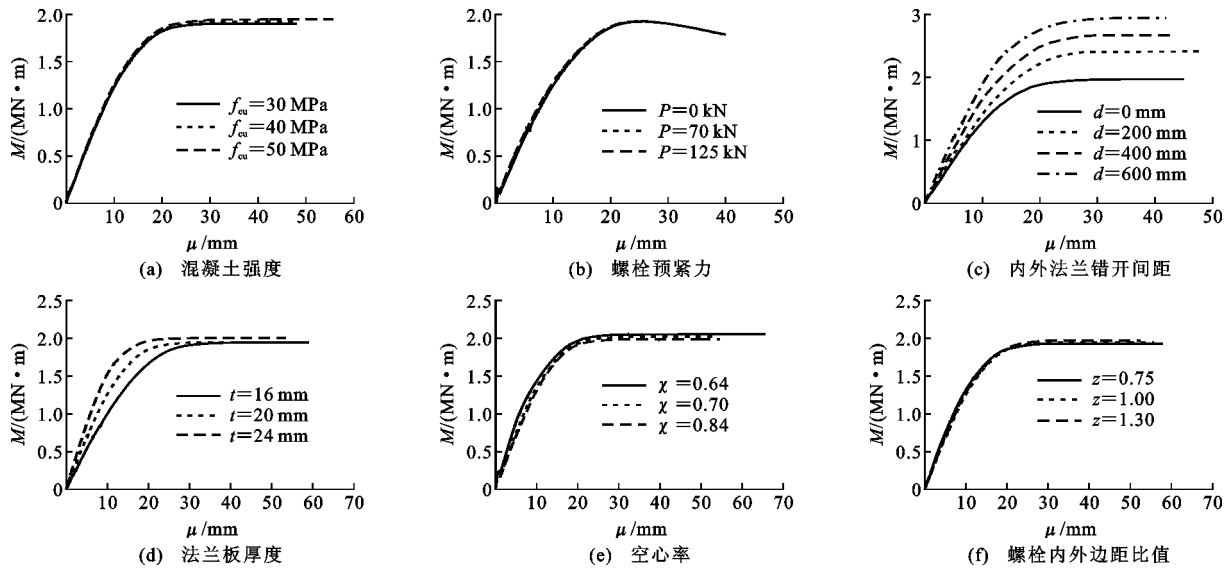


图 15 弯矩-跨中挠度曲线

Fig. 15 Bending Moment-mid-span Deflection Curves

距离对节点承载力有一定的影响,但影响程度较小。

4.2 参数对弯矩-最大螺栓拉力曲线的影响

4.2.1 混凝土强度

图 16(a)为混凝土强度对节点  $M-F$  曲线的影响。混凝土强度由  $f_{cu} = 30$  MPa 增加到  $f_{cu} = 50$  MPa 时,最大螺栓拉力大小几乎不变,主要原因是混凝土承受的拉力相比于螺栓可以忽略不计。

4.2.2 螺栓预紧力

图 16(b)为螺栓预紧力对节点  $M-F$  曲线的影响。螺栓预紧力大小由 0 kN 增加到 125 kN 时,最大螺栓拉力出现先下降后增加的现象,主要原因是节点施加预紧力后,弯矩引起的螺栓拉力可以抵消螺栓受拉侧节点初始施加的螺栓预紧力,在外法兰板底端最大螺栓屈服前,预紧力的存在增加了最大螺栓拉力。

4.2.3 内外法兰错开间距

图 16(c)为法兰错开间距对节点  $M-F$  曲线的影响。节点错开间距由 0 mm 增加到 600 mm 时,最大螺栓拉力减小,导致节点处所受弯矩降低,从而降低了最大螺栓拉力。

4.2.4 法兰板厚度

图 16(d)为法兰厚度对节点  $M-F$  曲线的影响。法兰板厚度由 16 mm 增加到 24 mm 时,最大螺栓拉力减小,主要原因是法兰板厚度提高了节点的抗弯刚度,减小了螺栓在法兰板产生变形的同时受到的撬力,从而降低了最大螺栓拉力。

4.2.5 空心率

图 16(e)为空心率对节点  $M-F$  曲线的影响。空

心率由 0.64 增加到 0.84 时,最大螺栓拉力增加,主要原因是空心率的增加降低了节点的抗弯刚度和极限承载力,从而增加了最大螺栓拉力。

4.2.6 螺栓内外边距比值

图 16(f)为螺栓内外边距比值对节点  $M-F$  曲线的影响。螺栓离钢管壁距离由 30 mm 增加到 40 mm 时,最大螺栓拉力减小,主要原因是螺栓布置远离钢管壁侧,可以减小法兰板起撬引起的螺栓附加弯矩,从而减小了最大螺栓拉力。

5 结 语

(1)节点的抗弯承载力主要由内外螺栓受拉承担,具体表现为颈缩拉伸破坏,混凝土所提供的拉力相对较小,因此相对于螺栓承担的弯矩,混凝土承担的部分弯矩可以忽略不计。

(2)在节点受弯过程中,外法兰螺栓先于内法兰螺栓进入屈服,螺栓不仅受到拉力,还受到附加弯矩,在外法兰板底端最大螺栓屈服前,节点旋转轴位置大约为  $0.6R$  处,中和轴位置大约位于  $0.35R$  处,中和轴和旋转轴不在同一截面。

(3)节点外法兰板底端最大螺栓屈服时,弯矩大约为  $1\ 100$  kN·m,节点极限承载力为外法兰板底端最大螺栓屈服承载力的 1.76 倍左右,当以外法兰板底端最大螺栓屈服作为节点极限承载力时,节点具有较大的安全富余系数。

(4)节点的极限承载力随法兰板厚度、内外法兰错开间距增大而增大,随空心率的增加而减小,而螺栓预紧力、螺栓内外边距比值和混凝土强度对节点



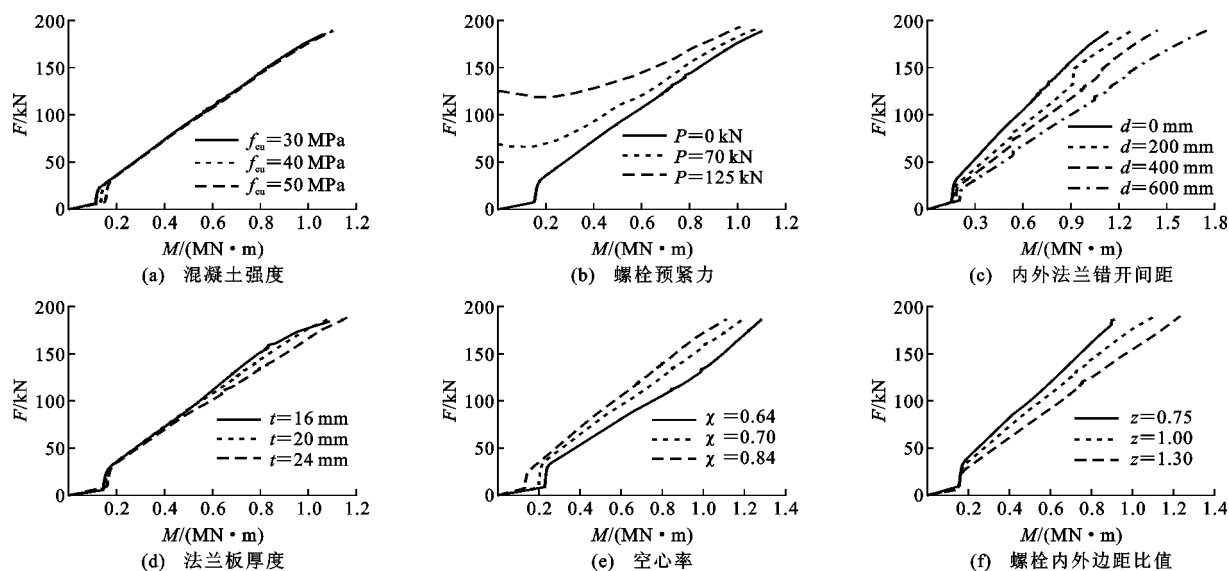


图 16 弯矩-最大螺栓拉力曲线

Fig. 16 Bending Moment-maximum Bolt Tension Curves

极限承载力影响不大。外圈最大螺栓拉力随法兰板厚度、内外法兰错开间距、螺栓内外边距比值增大而减小,随空心率、螺栓预紧力增大而增大。

#### 参考文献:

#### References:

- [ 1 ] 史艳莉,张 宸,王景玄,等.圆锥形中空夹层钢管混凝土压弯构件抗震性能[J].建筑科学与工程学报,2019,36(5):80-88.  
SHI Yan-li, ZHANG Chen, WANG Jing-xuan, et al. Seismic Behavior of Tapered Concrete-filled Double Skin Steel Tube Compression-bending Members[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5):80-88.
- [ 2 ] 王文达,张超峰,王景玄,等.圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱受力机理分析[J].建筑科学与工程学报,2019,36(3):37-45.  
WANG Wen-da, ZHANG Chao-feng, WANG Jing-xuan, et al. Analysis on Mechanical Behavior of Tapered Concrete-filled Double Steel Tubular Short Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(3):37-45.
- [ 3 ] 黄 宏,陶 忠,韩林海.圆中空夹层钢管混凝土柱轴压工作机理研究[J].工业建筑,2006,36(11):11-14,36.  
HUANG Hong, TAO Zhong, HAN Lin-hai. Mechanism of Concrete-filled Double-skin Steel Tubular Columns (CHS Inner and CHS Outer) Subjected to Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2006, 36(11):11-14,36.
- [ 4 ] WANG Y Q, ZONG L, SHI Y J. Bending Behavior and Design Model of Bolted Flange-plate Connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 84:1-16.
- [ 5 ] DENG H Z, SONG X Q, CHEN Z H, et al. Experiment and Design Methodology of a Double-layered Flange Connection in Axial Loads [J]. Engineering Structures, 2018, 175:436-456.
- [ 6 ] 邓洪洲,黄 誉,金晓华.钢管塔新型内外法兰节点试验研究与有限元分析[J].建筑结构学报,2009,30(5):140-148.  
DENG Hong-zhou, HUANG Yu, JIN Xiao-hua. Experimental Research and Finite Element Analysis on a New-type Flange Joint Used in Steel Tube Towers [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5):140-148.
- [ 7 ] 陈 哲,邢月龙,郭 勇,等.中空夹层钢管混凝土刚性双层法兰受弯性能试验研究[J].钢结构,2015,30(7):6-11,18.  
CHEN Zhe, XING Yue-long, GUO Yong, et al. Experimental Study on Flexural Performance of Rigid Double-ring Flange Connected to Concrete-filled Double-skin Steel Tube [J]. Steel Construction, 2015, 30(7):6-11,18.
- [ 8 ] 黄 誉,邓洪洲,金晓华.钢管杆塔新型内外法兰受弯性能试验研究及有限元分析[J].建筑结构学报,2011,32(10):73-81.  
HUANG Yu, DENG Hong-zhou, JIN Xiao-hua. Experimental Research and Finite Element Analysis on Flexural Performance of Innovative Flange Joint Used in Steel Poles [J]. Journal of Building Structures,

- 2011,32(10):73-81.
- [9] 陈勇,陈聪,薛滨,等.不同偏心距下内外刚性法兰压弯承载力性能试验研究[J].钢结构,2017,32(3):16-22.  
CHEN Yong, CHEN Cong, XUE Bin, et al. Experimental Study of the Bearing Capacity of Internal-external Flange Joints Subjected to Pressure and Bending Loading with Various Eccentricities [J]. Steel Construction, 2017, 32(3): 16-22.
- [10] 薛滨,陈勇,陈聪,等.拉弯荷载下钢管杆塔内外法兰设计计算方法[J].工程力学,2017,34(10):76-86.  
XUE Bin, CHEN Yong, CHEN Cong, et al. Calculation Method for Design of Inner-and-outer Flange Joints Subjected to Tension and Bending Loads in Tubular Towers and Poles [J]. Engineering Mechanics 2017, 34(10): 76-86.
- [11] 孙传琦,高志林,邢月龙,等.大跨越钢管塔内外法兰连接节点纯弯承载力特性试验研究[J].钢结构,2018,33(11):21-25,6.  
SUN Chuan-qi, GAO Zhi-lin, XING Yue-long, et al. Experimental Research on the Bearing Capacity of Inner-outer Double Layered Flange of a Long-span Steel Tubular Tower Under Pure Bending [J]. Steel Construction, 2018, 33(11): 21-25, 6.
- [12] CAO J J, BELL A J. Determination of Bolt Forces in a Circular Flange Joint Under Tension Force [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 68(1): 63-71.
- [13] 黄宏,陶忠,韩林海.圆中空夹层钢管混凝土纯弯力学性能研究[J].工业建筑,2006,36(11):15-18,61.  
HUANG Hong, TAO Zhong, HAN Lin-hai. Flexural Behavior of Concrete Filled Double-skin (CHS Inner and CHS Outer) Steel Tubes [J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 15-18, 61.
- [14] 陈聪.输电铁塔多环板加劲节点及内外双层法兰节点承载力研究[D].杭州:浙江大学,2017.  
CHEN Cong. Research on Bearing Capacity of Multi-plates-reinforced Joint and Inner-and-outer Flange Joint in Transmission Tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [15] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016.  
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] 宗亮,王元清,石永久.钢管结构法兰连接节点抗弯承载性能的有限元分析[J].中北大学学报:自然科学版,2011,32(4):431-436.  
ZONG Liang, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Finite Element Analysis of Load-carrying Properties of Flange-plate Connections of Steel Tubular Structures Under Bending Moment [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2011, 32(4): 431-436.
- [17] HUANG F, ZHANG D, HONG W, et al. Mechanism and Calculation Theory of Prying Force for Flexible Flange Connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 97-107.
- [18] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.  
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. Detailed Explanation of ABAQUS Finite Element Example [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [19] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].  
GB 50017—2017, Standard for Design of Steel Structures [S].