

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.01.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:陈刚,郑东东,郭宏超. 矩形钢管混凝土束剪力墙风机塔筒 L 型连接节点力学性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2024,40(1):143-150.

CHEN Gang,ZHENG Dongdong ,GUO Hongchao. Study on mechanical properties of L-shaped connection of fan tower with concrete-filled rectangular steel tubular beam shear wall[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024,40(1):143-150.

# 矩形钢管混凝土束剪力墙风机塔筒 L 型连接 节点力学性能研究

陈刚<sup>1</sup>, 郑东东<sup>2</sup>, 郭宏超<sup>2</sup>

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530029;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对目前风机塔筒结构发展受限于结构高度与安装效率的问题,本文提出了一种 L 型螺栓连接的矩形钢管混凝土束剪力墙风机塔筒,并且针对螺栓关键连接区域进行了力学性能研究。最后通过有限元建模的方法对塔筒单片矩形钢管混凝土束剪力墙在面外以及面内荷载下的性能表现进行了分析,并且给出了相关设计建议。研究结果表明塔筒螺栓连接区域在单轴拉伸下的破坏模式为连接板弯曲变形以及螺栓拉断。塔筒单片剪力墙的面内初始刚度及承载力要显著高于面外。综合考虑剪力墙力学性能的提升效率以及剪力墙各部件的应力分布状态,建议当螺栓直径为 20 mm 时,连接板厚度不应大于螺栓直径;建议当连接板厚取 20 mm 时,螺栓直径取其 1.2 倍。

**关键词:** 螺栓连接; L 型节点; 风机塔筒; 有限元

**中图分类号:** TU398.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2024)01-0143-08

## Study on mechanical properties of L-shaped connection of fan tower with concrete-filled rectangular steel tubular beam shear wall

CHEN Gang<sup>1</sup>, ZHENG Dongdong<sup>2</sup>, GUO Hongchao<sup>2</sup>

(1. Guangxi Communication Investment Group Corporation Ltd, Nanning, 530029, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to address the current structural development of wind turbine towers by the structural height and installation efficiency, this paper proposes an L-shaped bolted rectangular steel tube concrete bundle shear wall wind turbine tower and investigates the mechanical properties of the key bolted connection areas. Also, the performance of a single rectangular steel tube bundle shear wall is analyzed by means of finite element modelling under out-of-plane and in-plane loading, with relevant design recommendations given. The results show that the damage modes for the tower bolt connection are bending deformation of the connection plate and bolt pull-off. The initial in-plane stiffness and load carrying capacity of the single shear wall are significantly higher than those of the out-plane. Taking into account the efficiency of the shear wall mechanical properties and the stress distribution of the shear wall components, it is recommended that when

**收稿日期:** 2023-02-23; **网络首发日期:** 2023-07-18

**网络首发地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230717.1855.004.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51978571);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-41);陕西省教育厅重点实验室科研项目(18JS072)

**第一作者:** 陈刚,男,高工,研究方向为工程管理。410318661@qq.com

**通信作者:** 郭宏超,男,博士,教授,研究方向为钢结构稳定与疲劳、组合结构。E-mail: ghc-1209@163.com

the bolt diameter be 20 mm, that the thickness of the connection plate be not greater than the bolt diameter. When the connection plate thickness is 20 mm, it is recommended that the bolt diameter be 1.2 times what it is.

**Key words:** bolted connection; L-shaped joint; wind turbine towers; finite element

随着双碳目标的提出,减少对化石能源等不可再生资源的利用,提高非化石能源消费比重将成为实现双碳目标的重要手段。风能作为非化石能源的重要一种,具有广阔的发展前景与意义。为此,国内外学者对风机塔筒进行了广泛的研究。在国外,Gkantou等<sup>[1]</sup>对185 m超高钢混风机塔架进行了生命周期评估研究,并指出该塔架的生命周期主要取决于制造阶段,其次是后期拼装阶段。Stavridou等<sup>[2]</sup>对格构式风机塔架与传统塔架进行了对比研究,得出格构式塔架具有用量少、强度高和环境适应性强等优点。Al-Sanad等<sup>[3]</sup>提出了一种考虑风荷载和材料不确定性的风机塔架可靠性设计方法,并采用有限元软件对其进行了建模验证。在国内王印军等<sup>[4]</sup>通过ANSYS有限元软件,对大型垂直轴风力机塔筒上、下两端的壁厚和尺寸均进行了优化研究。结果表明:优化后的塔架,其自重明显减轻、受力特性改善。王健<sup>[5]</sup>利用有限元软件对风力发电机中的螺栓连接部件进行了非线性接触研究,同时对塔架整体稳定性进行了特征值屈曲分析。匡晓龙等<sup>[6]</sup>详细阐述了相控阵超声检测技术在风机塔筒焊缝检测上的应用现状,并与目前最常见的无损检验方式进行了对比分析。霍涛<sup>[7]</sup>基于现有观测数据,通过理论推导得出了风速风向对风机塔筒结构的动力响应和疲劳寿命影响值。

关于不同结构形式的风机塔筒力学性能,de Lana等<sup>[8]</sup>采用ABAQUS有限元软件对圆形截面预应力混凝土风机塔架的变形和受力性能进行了深入研究。结果表明:相比于八边形截面塔架,圆形截面塔架的受力性能及稳定性较好,且具有良好的经济性。张冬冬等<sup>[9]</sup>针对5MW风电机组,分别设计了三种塔架形式,经过研究对比发现正八边形预应力混凝土塔架的受力性能较好且具有较高的稳定性,此外此种塔架形式在造价、运输等方面具有不错的优势。刘海锋等<sup>[10]</sup>通过建立钢管格构式和圆筒式塔架的模型,对比得出钢管格构塔架结构可以提高风机的整体排列密度,从而可以更好地提高经济效益。顾富斌<sup>[11]</sup>对钢-混凝土组合塔架进行截面设计,并分析了该塔架在地震作用下的力学性能,但是并未对塔架上下段连接点进行具体分析。赵洁<sup>[12]</sup>

通过对两种形式的塔架进行IDA易损性分析得出格构式钢管混凝土塔架的性能要远远优于钢锥筒式塔架结构。

上述文献从塔筒研究方法以及塔筒结构力学的角度对现阶段风机塔筒结构整体或者局部进行了探索与尝试,为风机塔筒结构发展提供了技术借鉴。但是从整体发展趋势来看,随着传统风速区风能的逐步开发,未来风能开发重点将向低风速区转移,这就对风机塔筒的高度以及现场安装效率提出了更高的要求。为此本文提出了一种L型连接的矩形钢管混凝土束风机塔筒结构。该结构体系充分利用了混凝土优异的抗压性能以及钢材良好的抗拉性能,在保证材料强度充分发挥的前提下最大限度地保证了结构的稳定性。与此同时,采用高强螺栓进行各单片矩形钢管混凝土束剪力墙装配,施工高效便捷,利于产业标准化实施,具有广阔的应用前景。

## 1 试验设计

### 1.1 试件尺寸

试件原型为矩形钢管混凝土束风机塔筒,塔筒平面为8边形,每边由5片矩形钢管混凝土束剪力墙组成。其中混凝土强度等级为C30,钢材选用Q235B钢材,连接螺栓采用10.9级M20高强螺栓,节点螺栓布置符合《钢结构设计标准》(GB50017—2017)<sup>[13]</sup>的要求。本次以八分之一墙体的子模型单片墙体作为基本对象,取其中四分之一节点模型进行了单轴拉伸试验。由于塔筒结构为轴对称结构,单片剪力墙中的所含节点完全相同,因此在加载过程中只考虑了节点受力方向的边界条件。考虑到节点在螺栓连接区域发生刚度突变,容易应力集中。且在塔筒受力过程中易产生螺栓松动,因此重点对节点螺栓连接部位进行了受力分析。具体构造细节见图1。

### 1.2 材性试验

本次根据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T228.1—2010)<sup>[14]</sup>相关规范对节点钢材进行了材性试验,并且制作了尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的混凝土立方体试件,对其进行了抗压强度试验,试验结果见表1和表2。

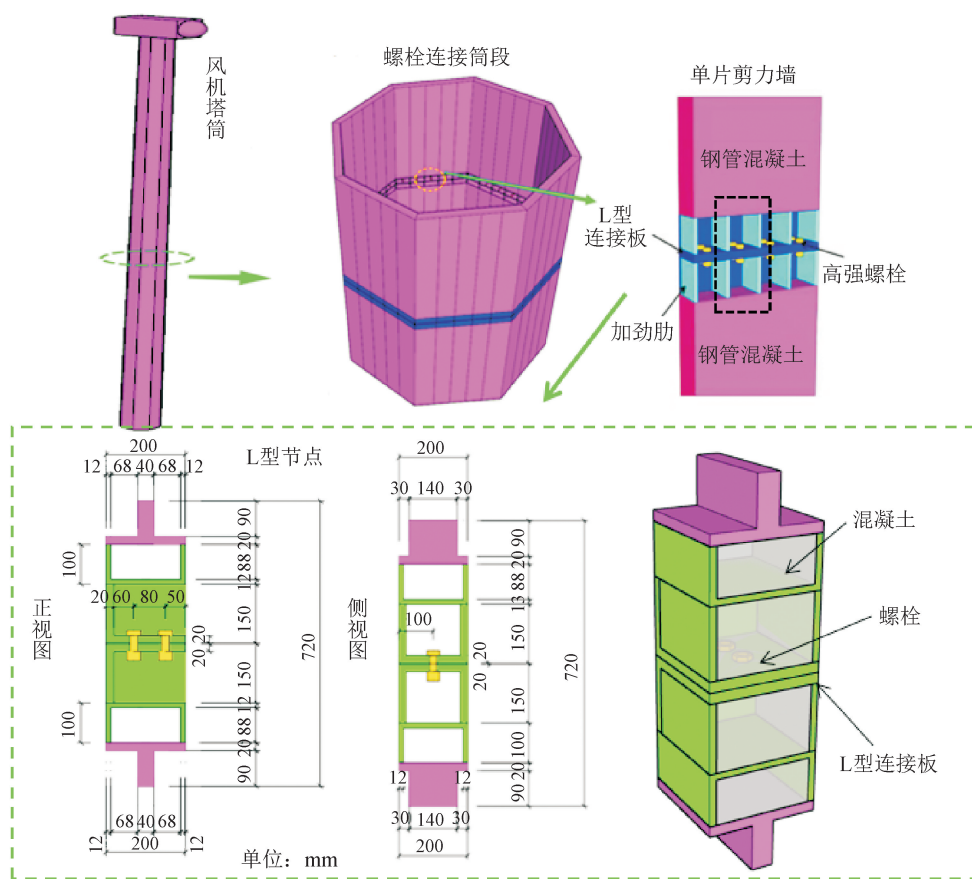


图 1 节点构造  
Fig. 1 Joint Structure

表 1 钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel

钢材型号	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E_s/10^5$ MPa	$\nu$
Q235-12	245.81	352.68	1.974	0.368
Q235-20	243.45	346.48	2.002	0.365

注: $\nu$ 为 Poisson 比。

表 2 混凝土基本力学性能

Tab. 2 Basic mechanical properties of concrete 单位:MPa

等级	$f_{cu,k1}$	$f_{cu,k2}$	$f_{ck}$	$f_{tk}$	$E_c$
C30	32.90	31.25	20.87	1.99	30 208

注: $f_{cu,k1}$ 为立方体抗压强度, $f_{cu,k2}$ 为标准试件立方体抗压强度, $f_{ck}$ 为轴心抗压强度, $f_{tk}$ 为标准立方体抗压强度, $E_c$ 为弹性模量。

### 1.3 加载装置与制度

在 MTS 万能试验机上进行试验,采用位移控制的加载方式对 L 型节点进行单轴拉伸试验,试验装置见图 2。采用位移控制的方式进行加载,初步设定位移上限值为 60 mm。在试验过程中,若试件在达到初始位移限值之前发生破坏,则可终止试验;若试件已达到规定的初始位移限值时仍未发生破

坏,则可继续增大位移限值,直到试件发生破坏为止。



图 2 加载装置  
Fig. 2 Loading device

## 2 试验结果分析

对 L 型节点进行单调加载后发现,节点的破坏模式为与上部钢塔筒连接的水平连接板中部区域发生明显弯曲变形,而下部钢塔筒的水平连接板中部区域变形轻微,钢塔筒竖向加劲肋向内侧发生轻微鼓曲,其余板件几乎未有变形产生,两根高强螺栓螺杆均被拉断,螺栓孔洞周围有少量铁屑掉落,试件破

坏模式见图 3。

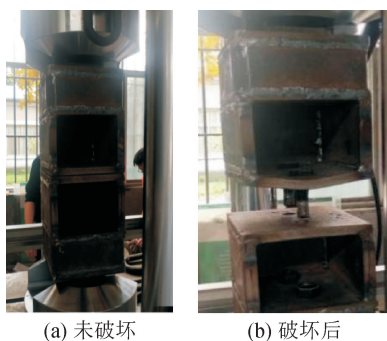


图 3 试件破坏模式  
Fig. 3 Failure mode of specimen

采用图 4 所示能量等值法对试验加载曲中的关键点进行了计算提取,包括屈服荷载点,峰值荷载点以及极限荷载点。能量等值法的具体做法为:首先作二折线 OD-DC 替代原荷载  $P-\Delta$  位移曲线,并使图中阴影部分面积  $OAB = \text{面积 } BDC$ ,此时 B 点即为试件的屈服荷载点,而 D 点为试件的极限荷载点,破坏荷载取极限荷载的 0.85 倍即可,此时对应的位移即为破坏位移。通过能量等值法所得 L 型连接节点的承载力特征值见表 3。

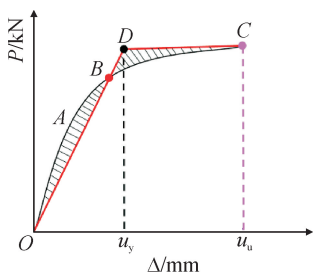


图 4 能量等值法  
Fig. 4 Energy equivalence method

表 3 L 型连接节点静力拉伸承载力特征值  
Tab. 3 Characteristic values of static tensile bearing capacity of L-shaped connection joint

试件名称	屈服荷载点		极限荷载点	
	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$
试验试件	409.90	1.60	440.74	9.26

### 3 有限元模型建立及分析

#### 3.1 参数设置

采用 ABAQUS 对节点模型进行了建模分析,有限元模型见图 5。模型单元类型为三维实体单元 C3D8R;使用 Tie 约束来模拟钢材之间的焊接作用及钢材和混凝土之间的粘结作用;螺栓与各部件交界面处的相互作用则采用面面接触来进行模拟,摩擦系数取值为 0.3。约束设置中,首先将试件底部

与参考点 RP-2 进行耦合,并且在 RP-2 点施加约束  $U_1 = U_2 = U_3 = 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 。本次模拟采用静力加载,在顶部耦合点 RP-1 上施加载荷来完成单轴拉伸。本构关系设置中,考虑到外围钢管的约束作用,混凝土采用文献[15]有关核心混凝土等效受压应力-应变曲线计算公式来进行计算,混凝土非线性过程中的刚度退化和塑性累积的行为可用塑性损伤因子  $d$  来描述<sup>[16]</sup>。钢材及螺栓应力应变关系采用采用双线性随动强化模型,钢材及混凝土力学性能参数根据材性试验所得结果进行选取。

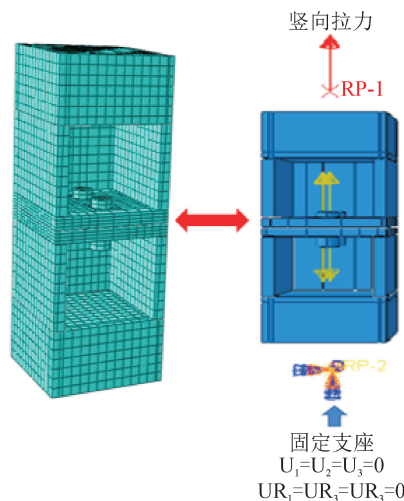


图 5 节点模型  
Fig. 5 Joint model

#### 3.2 结果分析

模拟结果与试验结果对比见图 6。由图 6 可得,模拟结果与试验结果一致,可以较好地反映节点连接区域上下连接板的弯曲变形以及螺栓拉断现象,说明本文建模分析方法准确可靠,可以反映节点的实际受力状况。对模拟和试验下的节点屈服荷载和极限荷载进行了对比,结果见表 4,两者误差在 5% 以内,进一步说明了有限元模型的准确性。

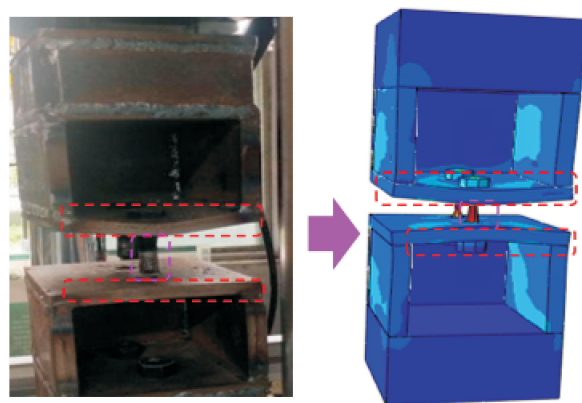


图 6 结果对比  
Fig. 6 Result comparison



表 4 特征点计算结果对比

Tab. 4 Comparison of characteristic points calculation results

试件名称	屈服荷载点		极限荷载点	
	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$
试验试件	409.90	1.60	440.74	9.26
模拟试件	410.26	1.67	464.60	14.17
误差/%	0.09	4.30	5.41	53

## 4 参数扩展分析

### 4.1 基本试件在荷载下的分析计算

由于对塔筒整体建模分析计算成本高,且无必要。因此本文选取单片剪力墙模型来进行分析计算。根据实际塔筒受力特点采用轴力  $F_z$  与  $M_x$ (面内)、 $F_z$  与  $M_y$ (面外)两种组合来对剪力墙进行荷载施加。根据塔筒结构的实际破坏模式,没有考虑塔筒结构环向力影响,仅将周边墙体的约束作用转换为面外约束力施加在受力墙体中。根据《高耸结构设计标准》(GB50135—2019)<sup>[17]</sup>可知,当对结构塔筒进行非线性分析时,自立式钢结构塔和自立式混凝土结构塔的整体水平位移角限值分别为 1/50 与 1/100,本次加载按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[18]</sup>,以 1/30 的层间位移分别对其进行平面内与平面外的位移加载。荷载示意图见图 7。

计算分析结果见表 5。由表 5 可得,剪力墙的面外刚度较小,为 4.65 kN/mm,面内刚度较大,约为面外刚度的 11 倍,为 49.27 kN/mm。且加载的整个过程中混凝土的塑性应变均小于其材料极限应变 0.015,且损伤值小于 1,说明在加载过程中混凝土

和矩形钢管可以协调受力,共同承担外部荷载。

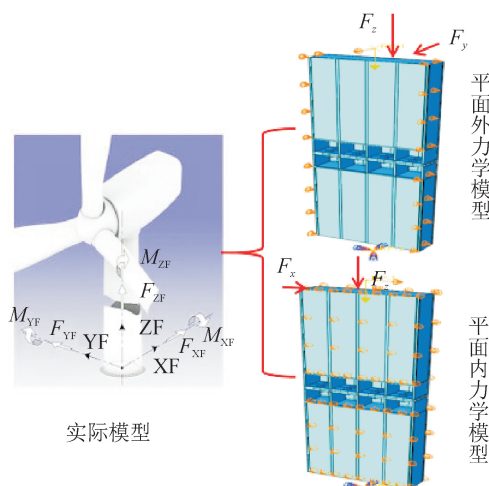


图 7 剪力墙分析模型

Fig. 7 Shear wall analysis model

表 5 连接节点在极限荷载下承载阶段的特征值

Tab. 5 Eigenvalues of connecting joint in bearing stage under ultimate load

荷载组合	初始刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	屈服荷 载/kN	屈服位 移/mm	混凝土 塑性应变	混凝土 损伤
平面外受力	4.65	122.94	26.42	0.001 20	0.926
平面内受力	49.27	519.97	10.42	0.000 47	0.980

### 4.2 参数扩展分析

参数分析中主要进行了连接板厚度以及螺栓直径对节点性能的影响。其中 L1 为基本试件尺寸, L2 和 L3 分别为在基本试件的基础上改变连接板厚度以及螺栓直径来研究这两种参数对节点性能的影响。主要参数布置见表 6。

表 6 试件设置

Tab. 6 Specimen setting

部件	钢管	L 型连接板	加劲肋	螺栓
L1	800×200×1000 壁厚 12	180×200×20×800 (高度×宽度× 厚度×长度)	160×180×12	10.9 级 M20
L2	800×200×1000	80×200× <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">20</span> ×800 (14,16,18,20,22)	160×180×12	10.9 级 M20
L3	800×200×1000	180×200×20×800 (高度×宽度× 厚度×长度)	160×180×12	10.9 级 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">M20</span> (20,24, 27,30)

注:框线标注尺寸为参数基本尺寸。

#### 4.2.1 L2 试件分析结果

对 L2 系列试件的计算结果见表 7。由表 7 可得,试件的面外刚度及承载力均小于其面内刚度及承载力,且随着连接板厚的增加,节点初始刚度和承

载力载逐渐增加。在面外荷载作用下,连接板厚从 14 mm 增加到 22 mm 时,剪力墙屈服荷载较前一级的提升幅度分别为 7.17%,14.69%,7.06%以及 4.39%;节点极限承载力较前一级增长幅度分别

为 19.53%,1.97%,9.83%,4.92%。在面内荷载作用下,剪力墙的屈服荷载较前一级的增长幅度分别为 12.5%,4.5%,8.1%,6.4%;极限荷载较上一级的增长幅度分别为 16.79%,8.80%,6.96%,5.37%。即随着连接板厚的增加,试件虽然总体承载性能在逐渐增加,但增加幅度却上下波动,这是由

于试件总体承载力是连接板和螺栓共同作用的结果。这两者之间存在某个刚度匹配临界值,当连接板厚度与螺栓直径无限接近这个临界值时,试件的总体承载力就会越大,否则就会出现连接板或者螺栓提前破坏的现象,试件承载力增长幅度也会上下波动。

表 7 不同连接板厚度下试件承载力

Tab. 7 Bearing capacity of specimens with different thicknesses of connecting plates

参数	T14		T16		T18		T20		T22	
	面外	面内	面外	面内	面外	面内	面外	面内	面外	面内
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	2.9	32.4	3.6	38.9	4.0	44.6	4.7	49.3	5.0	50.5
屈服荷载/kN	93.4	408.9	100.1	460.2	114.8	481.0	122.9	520.0	128.3	553.5
极限荷载/kN	95.6	507.9	114.3	593.2	116.2	645.4	125.6	690.3	130.3	727.4

不同连接板厚下,剪力墙各部件的应力分布状态也不相同,本次选取最大和最小厚度下的试件进行对比分析,结果见图 8。

由图 8 可得,在平面外荷载作用下,随着连接板厚的增加,剪力墙各部件的最大应力均明显增加,说明随着剪力墙连接板厚度增加,承载力的增加有赖于剪力墙各部件材料性能的充分发挥,而且随着板厚的增加,螺栓的轴向变形明显增大,这是由于随着

板厚增加,其刚度显著增加,相反螺栓刚度就会相对应减小,导致加载过程中其变形加大。当在面内荷载作用下,可以发现外围塔筒,螺栓以及混凝土的应力大小即损伤程度相差很小,但各部件的高应力分布面积存在显著差异。因此可以总结在面内荷载作用下剪力墙承载力的提高主要依赖各部件参与承载的面积,而各部件材料强度均已发挥完全,不是造成不同剪力墙承载力差异的主要因素。

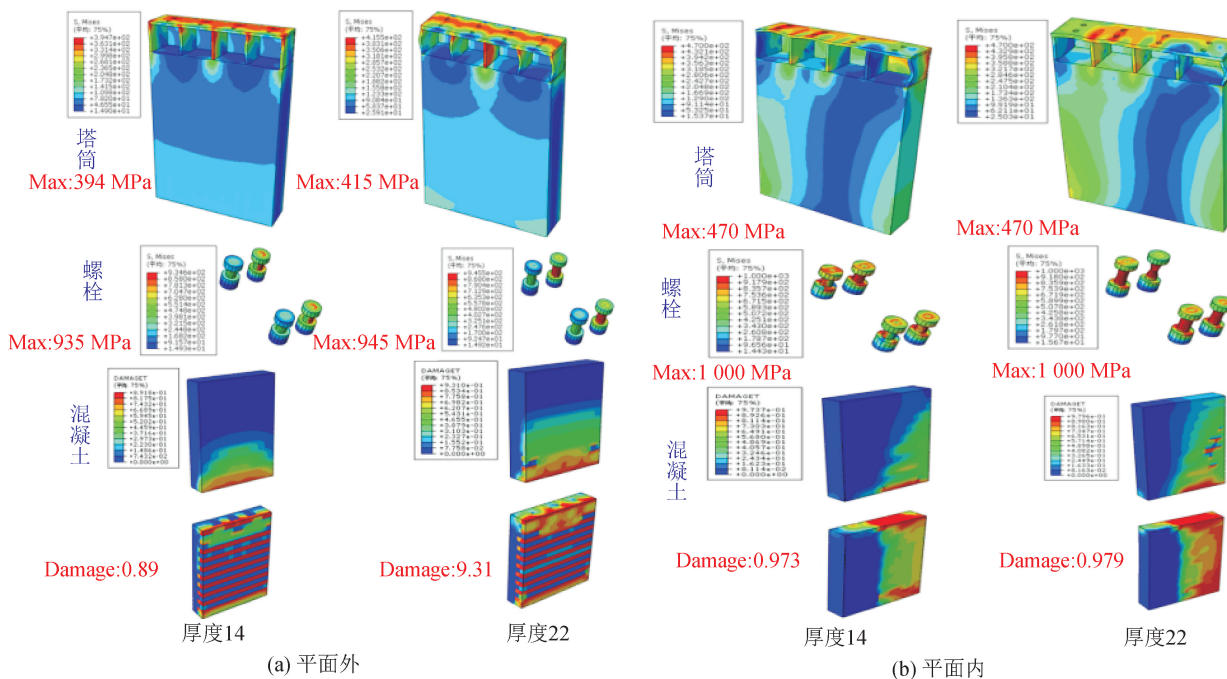


图 8 不同连接板厚下试件应力分布

Fig. 8 Stress distribution of specimens with different thicknesses of connecting plates

综合分析下当连接板厚度取 22 mm 时,会造成螺栓连接区域刚度不匹配,最终导致螺栓先于连接板受拉破坏,不利于剪力墙承载性能的发挥。结合上述剪力墙承载力提升幅度考虑,建议当螺栓直径为 20 mm 时,连接板厚度不应大于螺栓直径。

#### 4.2.2 L3 试件分析结果

改变连接螺栓直径下,各剪力墙的分析计算结果见表 8。由表 8 可得,L3 系列试件中,其面外刚度以及面外承载力仍然小于其面内刚度及承载力。在面外荷载作用下,随着螺栓直径的扩大,剪力墙的

屈服荷载较前一级的增长幅度分别为 27.1%, 14.97%, -0.35%, 极限荷载较前一级的增长幅度为 7.17%, 4.46%, 11.8%。在面内荷载的作用下, 剪力墙屈服荷载较前一级的增长幅度分别为

38.9%, 15.1%, 7.5%; 其极限荷载较前一级的增长幅度为 31.3%, 9.98%, 7.30%, 即随着螺栓直径的扩大, 剪力墙承载力虽然整体上呈现增长趋势, 但增长幅度逐渐下降。

表 8 不同螺栓直径下试件承载力  
Tab. 8 Bearing capacity of specimen under different bolt diameters

参数	D20		D24		D27		D30	
	面外	面内	面外	面内	面外	面内	面外	面内
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	4.5	48.4	4.7	49.3	4.9	49.1	5.2	48.4
屈服荷载/kN	96.7	374.3	122.9	520.0	141.3	598.7	140.8	643.9
极限荷载/kN	117.2	525.7	125.6	690.3	131.2	759.2	146.7	814.6

L3 系列试件的应力分布见图 9。本次选取最大螺栓直径与最小螺栓直径进行对比分析。由图 9 可得, 在面外荷载作用下, 随着连接处螺栓直径的扩大, 剪力墙外围塔筒应力出现轻微增长, 但当螺栓直径取 20 mm 时, 其轴向变形明显, 且应力高于直径为 30 mm 的螺栓, 说明当螺栓直径取为 20 mm 时, 其刚度相较于连接板厚度不足, 容易发展为连接区

域的薄弱部位而率先发生破坏。在面内荷载作用下, 直径为 20 mm 的螺栓轴向变形更趋严重, 导致外围塔筒材料强度无法充分发挥, 塔筒参与受力的区域面积十分有限, 最终造成剪力墙承载力较低。当螺栓直径为 30 mm 时, 加载过程中螺栓并不会发生明显的轴向变形, 螺栓连接区域刚度较高, 可以确保外围塔筒强度的充分发挥。

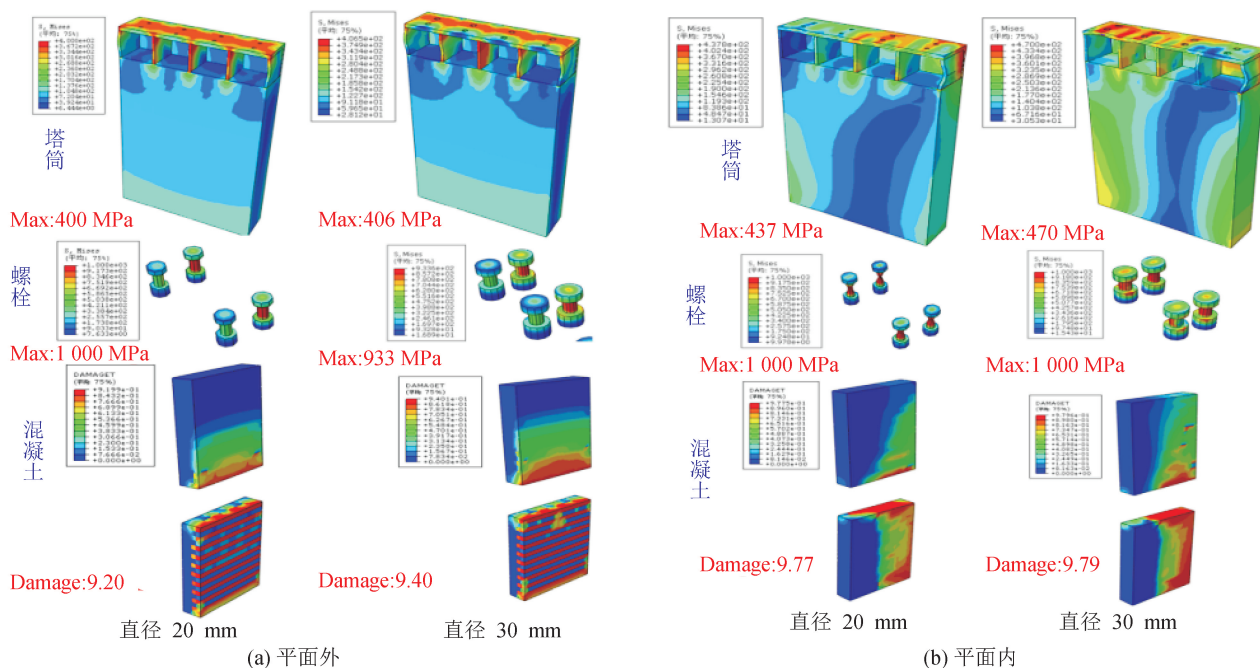


图 9 不同螺栓直径下试件应力分布

Fig. 9 Stress distribution of different bolt diameters test pieces

综合考虑螺栓连接区域的刚度匹配以及螺栓对剪力墙整体性能的提升效率, 当连接板厚取 20 mm 时, 建议本次螺栓直径设置为其 1.2 倍。

## 5 结 论

本文通过对矩形钢管混凝土束风机塔筒螺栓关键连接区域及单片剪力墙进行研究, 得到如下结论。

1) 通过对 L 型连接节点进行单轴拉伸试验可得,

塔筒破坏模式为关键螺栓连接区域的连接板的弯曲变形以及螺栓的轴向拉伸破坏, 其余板件变形较小。

2) 钢管混凝土束剪力墙面内刚度及承载力显著高于面外, 且随着连接板厚度的增大, 剪力墙的承载力逐渐增大, 各部件应力逐渐增加, 受力面积加大。综合考虑剪力墙承载力提升效率以及应力分布状况, 建议当螺栓直径取 20 mm 时, 连接板厚度取值不应大于螺栓直径。



3) 随着螺栓直径的扩大,剪力墙的初始刚度以及承载力逐渐增加,但增长幅度却显示出下降趋势。当连接板厚度取 20 mm 时,直径为 20 mm 的螺栓与连接板不匹配将会导致其率先破坏而无法发挥塔筒的承载性能。建议当连接板厚度为 20 mm 时,螺栓直径应取其 1.2 倍为宜。

#### 参考文献:

- [1] GKANTOU M, REBELO C, BANIOPOULOS C. Life cycle assessment of tall onshore hybrid steel wind turbine towers[J]. *Energies*, 2020,13(15):1-21.
- [2] STAVRIDOU N, KOLTSAKIS E, BANIOPOULOS C C. Lattice and tubular steel wind turbine towers. Comparative Structural Investigation[J]. *Energies*,2020,13(23): 1-21.
- [3] AL-SANAD S, WANG Lin, PAROL J, et al. Reliability-based design optimisation framework for wind turbine towers [J]. *Renewable Energy*, 2021, 167: 942-953.
- [4] 王印军,任勇生,孙丙磊,等. 基于 ANSYS 的垂直轴风力机塔架的力学分析及结构优化[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*,2011,30(5):96-102.  
WANG Yinjun, REN Yongsheng, SUN Binglei, et al. Mechanical analysis and structural optimization of tower frame of vertical axial fan based on ANASYS [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*,2011,30(5):96-102.
- [5] 王健. 变载荷工况下风力发电机连接部件接触强度分析研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010.  
Wang Jian, ANSYS contact analysis in the links of wind turbine suffering variational loads [D]. Urumqi: Xinjiang University,2010.
- [6] 匡晓龙,钟华兵,杨庆. 风机塔筒焊缝的相控阵超声检测工艺[J]. *无损检测*,2020,42(2):52-55,60.  
KUANG Xiaolong, ZHONG Huabing, YANG Qing. Phased array ultrasound testing technology for weld of wind power tower tube [J]. *Nondestructive Testing* 2020,42(2):52-55, 60.
- [7] 霍涛. 风速风向对风机塔筒结构动力响应和疲劳寿命的影响[J]. *建筑结构*,2020,50(18):26-33.  
HUO Tao. Influence of wind speed and wind direction on the dynamic response and fatigue life of wind turbine tower-silo structures [J]. *Building Structure*, 2020, 50 (18): 26-33.
- [8] DE LANA J A, JÚNIOR P A A M, MAGALHÃES C A, et al. Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section[J]. *Engineering Structures*,2021,227(15):111403.
- [9] 张冬冬,马宏旺,马泽. 三种 5MW 风电塔架的综合性能对比研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2015, 41(6): 133-137.  
ZHANG Dongdong, MA Hongwang, MA Ze. Comparative research on comprehensive performance of three kinds of wind turbine tower [J]. *Sichuan Building Science*,2015,2015, 41(6): 133-137.
- [10] 刘海锋,朱彬荣,张宏杰,等. 钢管格构式和圆筒式塔架对风力机尾流扰动特性对比研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(7): 2036-2044.  
LIU Haifeng, ZHU Binrong, ZHANG Hongjie, et al. Comparative study on disturbance properties of tubular latticed and pipe tower on wake of wind turbines [J]. *ACTA Energiæ Solaris Sinica*, 2019, 40 (7): 2036-2044.
- [11] 顾富斌. 风电机组用钢-混凝土组合塔架研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2009.  
GU Fubin. The research of steel-concrete hybrid tower of the wind turbine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2009.
- [12] 赵洁. 钢管混凝土格构式风电塔架地震响应分析[D]. 包头:内蒙古科技大学,2020.  
ZHAO Jie. Seismic response analysis of steel tube concrete lattice wind turbine tower [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2020.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法:GB/T228. 1—2010 [S]. 北京:中华人民共和国国家标准出版社,2010.
- [15] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.  
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression. Fuzhou: Fuzhou University,2005.
- [16] 杜国锋,别雪梦. 考虑混凝土损伤塑性的 CFST 柱轴压力学性能数值模拟[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2016, 32(3): 444-452.  
DU Guofeng, BIE Mengxue. Numerical simulation of axial compression mechanical behavior of CFST column with concrete damaged plasticity [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science*,2016, 32(3): 444-452.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 高耸结构设计标准:GB50135—2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(责任编辑 王绪迪)