

# 螺纹锚固单边螺栓端板连接节点弯剪作用性能研究

姜晓明<sup>1,3</sup> 王光伟<sup>2</sup> 张 曼<sup>3</sup> 唐丽茹<sup>1</sup> 王培军<sup>3,\*</sup>

(1. 中铁发展投资有限公司, 青岛 266000; 2. 中铁八局集团昆明铁路建设有限公司, 昆明 650000;

3. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

**摘 要** 现有研究中针对螺纹锚固单边螺栓连接节点的加载工况较为简单, 一般为纯弯、纯拉或者纯剪。实际结构节点的抗弯和抗剪承载力之间存在明显相互作用关系, 因此需要对节点在弯矩、剪力共同作用下的受力性能与计算方法进行研究。通过试验研究了弯矩和剪力共同作用对于螺纹锚固单边螺栓端板连接节点受力性能的影响, 并将单边螺栓连接节点与带螺母高强螺栓连接节点的受力性能进行了对比。借助经过验证的有限元模型补充分析了不同弯矩与剪力大小组合下节点的受力性能, 总结出剪力对节点抗弯承载力的影响规律, 并得到了节点弯矩-剪力相关承载力。结果表明, 剪力造成的钢管螺栓孔变形会进一步削弱螺纹锚固状态, 进而降低节点抗拉强度; 相较于拉力, 剪力对于螺纹锚固单边螺栓连接节点承载力的影响更大。

**关键词** 螺纹锚固单边螺栓, 有限元模拟, 试验研究, 梁柱节点, 弯剪组合作用

## Behavior of Thread-Fixed One-Side Bolted Connection under Bending Moment and Shear Force

JIANG Xiaoming<sup>1,3</sup> WANG Guangwei<sup>2</sup> ZHANG Man<sup>3</sup> TANG Liru<sup>1</sup> WANG Peijun<sup>3,\*</sup>

(1. China Railway Investment & Development Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Kunming Railway Construction Company of China Railway No.8 Engineering Group Co., Ltd., Kunming

650000, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract** The existing researches on thread-fixed one-side bolted connections are simple, generally pure bending, pure tension, and pure shear. There is an obvious relationship between the bending and shear bearing capacity of the practical structural connections, so it is necessary to study the structural performance and calculation method of the connections under the combination of bending and shear. This paper conducted experimental research on the influence of bending moment and shear force on the mechanical performance of the thread-fixed one-side bolts bolted joints and traditional nut-fixed double-sides bolted connections for comparison. Parametric analysis of thread-fixed one-side bolts bolted joints under bending moment and shear force was carried out utilizing finite element model verified by the test results. The influence of shear force against bending performance was discussed, meanwhile, the interactive relationship between bending and shear capacity was drawn. The results show that the deformation of the screwed bolt hole caused by shear force will further weaken the anchor effect of the threads, and then reduce the tensile strength of the connection. Therefore, the shear force has a greater influence on the connection bearing capacity than the tensile force.

**Keywords** thread-fixed one-side bolt, finite element simulation, experimental research, beam-to-column connection, combination of bending moment and shear load

收稿日期: 2021-07-13

作者简介: 姜晓明, 男, 高级工程师, 主要研究装配式结构。E-mail: 247931213@qq.com

\* 联系作者: 王培军, 男, 教授, 主要研究钢结构抗火、装配式结构。E-mail: pjwang@sdu.edu.cn

## 0 引言

对于钢结构建筑,钢管柱相较于H形柱具有诸多优势,如刚度大、承载力高、稳定性强,并且通过在钢管柱中浇筑混凝土可以有效提高构件受力性能及耐火性能。然而,当使用带螺母螺栓连接梁-钢管柱时,需要在钢管壁上增开孔洞,将螺母从孔洞伸入钢管内部固定螺栓后,再补焊孔洞。这不仅增加了焊接工作量,而且开设的孔洞削弱了钢管的整体性,焊接还会使结构产生残余应力,降低结构承载力。单边螺栓可以实现单侧安装、拧紧固定,施工方便,安全可靠,可代替带螺母高强螺栓连接闭合截面钢构件。

Wang等<sup>[1]</sup>、李国强等<sup>[2]</sup>、Elghazouli等<sup>[3]</sup>分别对单边螺栓平齐端板、外伸端板、角钢连接梁-钢管柱节点的受力性能进行了研究,转角-弯矩曲线表明该类型节点具有较好的转动能力,为半刚性节点。王静峰等<sup>[4-7]</sup>分析了单边螺栓钢梁-冷弯薄壁型钢组合钢管混凝土柱平端板、外伸端板连接节点在单调、低周往复加载下的受力性能,由于钢管壁较薄,节点主要发生螺栓拔出破坏,但节点刚度、承载力、延性仍满足规范要求。结果还表明在螺栓端部焊接弯钩短钢筋可防止螺栓拔出。

对于螺纹锚固单边螺栓连接节点已有较系统的研究,现有研究对节点受力形式的考虑较为简单,一般为纯弯<sup>[8]</sup>、纯拉<sup>[9-16]</sup>或者纯剪<sup>[17]</sup>,即研究节点在拉力、剪力、弯矩单独作用下的性能,认为节点抗弯性能和抗剪性能之间互不影响。但对于实际结构节点,抗弯承载力和抗剪承载力之间存在明显相互作用关系,因此需要对其相互作用影响进行合理的评估与考虑。

本文通过试验、有限元方法研究了弯矩和剪力共同作用对于螺纹锚固单边螺栓端板连接节点受力性能的影响,并将单边螺栓连接节点与带螺母高强螺栓连接节点的受力性能进行了对比,总结出剪力对节点抗弯承载力的影响规律,并得到了节点弯矩-剪力相关承载力。

## 1 试验概况

### 1.1 试验方案

梁柱端板连接中,由于端板破坏具有较大的

延性,常为设计控制破坏模式,且欧洲规范 EC3<sup>[18]</sup>已经对此类连接提供了充分的设计建议。为保证实际工程中发生延性的端板破坏,需明确其他破坏模式的承载力机理,承载力大小等,以便设计过程中避免此类破坏模式的发生,做到知己知彼。本文中,端板破坏不作为研究重点,而带有螺纹孔的钢管柱壁在弯剪共同作用下的受力性能和破坏机理被着重研究,因此钢梁端板采用厚板,避免端板提前破坏。试验节点如图1所示,试验装置如图2所示,采用对称布置,钢管两端钢梁分别放置在滚轴支座上。由于节点以受剪为主,钢梁仅考虑腹板。通过液压伺服试验机对钢管上部施加竖向荷载,两边滚轴提供向上支座反力,实现节点的弯剪共同作用。并通过调整滚轴支座距离,实现弯矩和剪力大小的不同组合。节点所受剪力 $P$ 等于压力机施加的力大小的1/2,弯矩 $M$ 等于节点所受剪力和支座反力作用点至钢管面距离的乘积。位移测点共4个,分别位于两侧钢梁端部和端板中部,转角 $\sin \theta$ 为位移计4与位移计3的示数差值和梁长的比值。

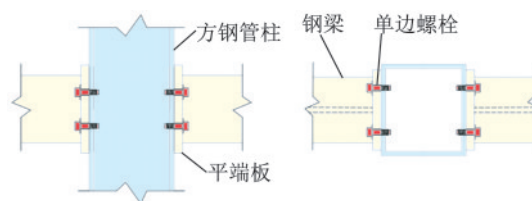


图1 螺纹锚固单边螺栓端板连接梁柱节点

Fig.1 Thread-fixed one-side bolted connection of beam to hollow square steel tube

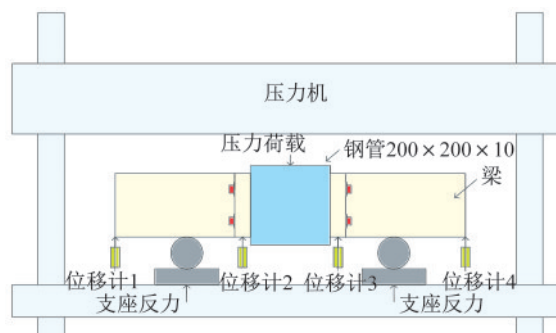


图2 试验装置

Fig.2 Test set-up

### 1.2 节点构造

本次试验共8个节点,包含两种不同的节点形式,即螺纹锚固单边螺栓节点和带有螺母高强螺

栓节点。节点构件尺寸如图3所示,柱构件截面为200 mm×200 mm×10 mm,端板尺寸为160 mm×120 mm×40 mm,梁长300 mm,构件均采用Q235钢,高强螺栓采用8.8级M10和M20两种型号,根据规范<sup>[19]</sup>,施加的螺栓预紧力分别为45 kN、120 kN。8个节点编号如表1所示,其中,S代表单边螺栓,B代表带螺母螺栓,L代表加载距离。构件材性如表2所示。

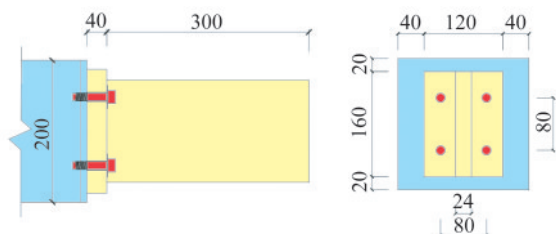


图3 节点尺寸(单位:mm)

Fig.3 Dimensions of joints (Unit:mm)

表1 节点编号

Table 1 Parameters of connections

组别	试件编号	螺栓直径	加载距离
1	S10-L120	单边螺栓 M10	120 mm
2	S10-L210	单边螺栓 M10	210 mm
3	B10-L120	带螺母螺栓 M10	120 mm
4	B10-L210	带螺母螺栓 M10	210 mm
5	S20-L120	单边螺栓 M20	120 mm
6	S20-L210	单边螺栓 M20	210 mm
7	B20-L120	带螺母螺栓 M20	120 mm
8	B20-L210	带螺母螺栓 M20	210 mm

表2 构件材性

Table 2 Material mechanical properties of plates and bolts

组件	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比
钢管	401	652	198	0.3
端板	432	662	201	0.3
梁腹板	421	640	203	0.3
单边螺栓	640	800	206	0.3

### 1.3 节点破坏模式

#### 1.3.1 螺栓破坏

发生螺栓破坏的不同节点变形形状类似,以试件S10-L210为例,试验结果如图4所示。左右两节点区变形形状基本一致。由于端板较厚,可近似为刚体,钢梁绕端板上部发生转动,钢管壁的刚度及承载力大于螺栓,当荷载到达144 kN时,

左侧节点下排螺栓受到支座反力引起的沿螺栓杆轴方向的拉力及垂直杆轴方向的剪力共同作用,在端板与钢管接触面位置突然发生断裂,断裂面有一定倾斜。此时,钢管孔内螺纹与螺栓螺纹锚固状态良好,几乎没产生变形,这说明节点极限承载力由螺栓控制。



(1)  $F=40$  kN



(2)  $F=100$  kN



(3)  $F=144$  kN

(a) 整体变形图



(1)  $F=40$  kN (2)  $F=100$  kN (3)  $F=144$  kN

(b) 螺栓破坏过程

图4 节点S10-L210破坏模式

Fig.4 Failure mode of specimen S10-L210

典型的弯矩-转角曲线和特征点如图5所示,连接件的屈服点通常定义为节点发生显著变形时的状态连接,反映在弯矩-转角曲线上则为曲线从线性到非线性的明显转折点。屈服弯矩为弹性阶段与硬化阶段的切线交点所对应的抗弯承载力,如图5中A点所示,极限弯矩为弯矩-转角曲线中节点最大抗弯承载力,如图5中B点所示。

图6汇总了破坏模式为螺栓断裂的四个节点的弯矩-转角曲线,表3对比了各节点的初始刚度,屈服弯矩,屈服转角以及极限弯矩。当节点发生螺栓破坏时,剪力对节点初始刚度影响较小。当L从120 mm增加到210 mm,节点弯矩与剪力



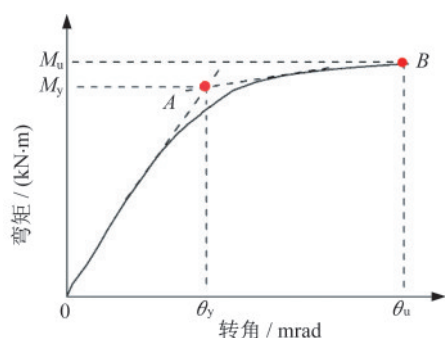


图5 典型弯矩-转角曲线

Fig.5 Typical bending moment-rotation curve

数值的比例增加75%,带螺母高强螺栓连接节点的抗弯屈服强度、抗弯极限强度分别增加了15.93%、14.12%。单边螺栓连接节点的抗弯屈服强度、抗弯极限强度分别增加了16.96%、16.89%,均小于弯矩荷载增加的比例,说明剪力对节点抗弯承载力具有较大影响。

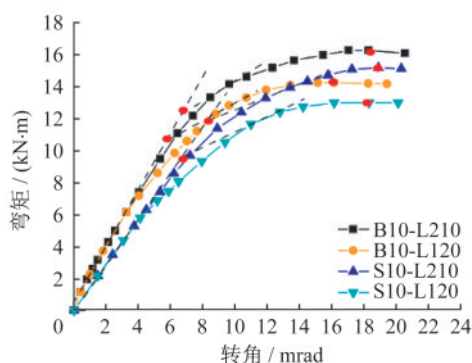


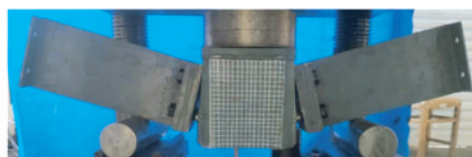
图6 螺栓破坏节点弯矩-转角曲线对比

Fig.6 Comparison of bending moment-rotation curves of bolt failure joints

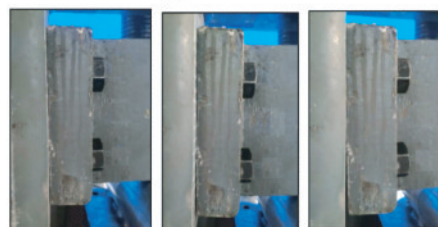
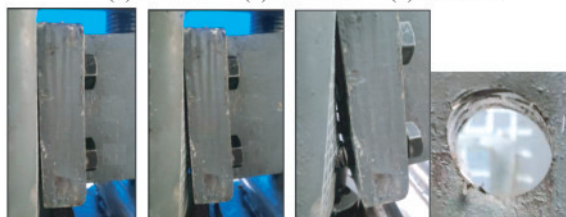
### 1.3.2 钢管破坏

发生钢管破坏的不同节点最终变形类似,整体变形如图7(a)所示。图7(b)为螺纹锚固单边螺栓节点S20-L120破坏过程图,当施加荷载到达100 kN时,钢管发生平面外变形,端板与柱壁开始分离。随着荷载的增加,端板与柱壁之间的间隙越来越大,当施加荷载到达524 kN时,随着一声巨响,钢管孔内螺纹沿根部被剪断,钢管螺纹孔在拉力方向发生面外变形的同时,在剪力方向也产生了挤压变形,孔内螺纹被螺栓拉出,失去锚固作用,节点失效。图8为带有螺母高强螺栓连接节点B20-L210破坏过程图,随着荷载的持续增加,钢管壁的面外变形不断加大,圆角及钢管侧壁发生了明显的内凹变形。螺母一直提供锚固作用,端板与柱壁未发生脱离。直至整个试件变形

过大,最终试验被迫停止。但试验结束时节点并未完全破坏,节点仍具有一定的变形能力。



(a) 整体变形图

(1)  $F=0$  kN (2)  $F=100$  kN (3)  $F=200$  kN(4)  $F=300$  kN (5)  $F=400$  kN (6)  $F=524$  kN

(b) 节点破坏过程图

图7 节点S20-L120破坏模式

Fig. 7 Failure mode of specimen S20 - L120

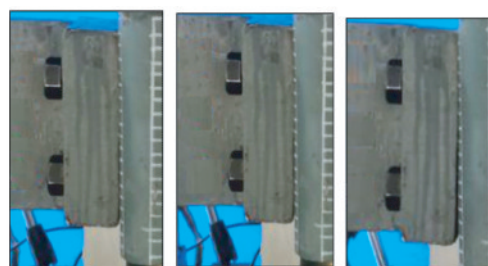
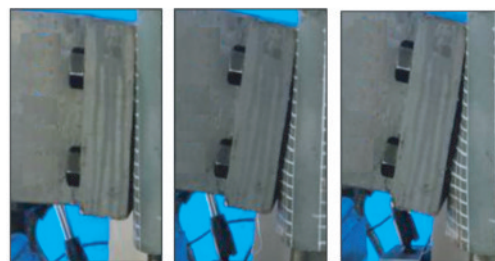
(1)  $F=0$  kN (2)  $F=100$  kN (3)  $F=200$  kN(4)  $F=300$  kN (5)  $F=400$  kN (6)  $F=544$  kN

图8 节点B20-L210破坏模式

Fig. 8 Failure mode of specimen B20 - L210

图9为发生钢管破坏的四组试件的弯矩转角对比图。表3分别列出了四组试件的初始刚度、屈服弯矩以及极限弯矩。剪力对节点初始刚度影响较小。当 $L$ 从120 mm增加到210 mm,节点弯

矩与剪力数值的比例增加 75%, 带有螺母高强螺栓连接节点的屈服强度、极限强度分别增加了 10.55%、10.59%。单边螺栓连接节点的屈服强度、极限强度分别增加了 6.67%、6.65%, 均远小于弯矩荷载的增加幅度, 说明剪力对节点抗弯性能的影响不能忽略。

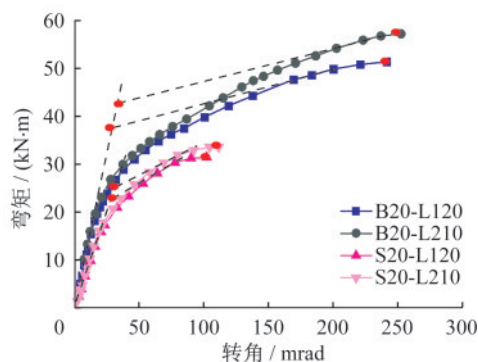


图9 钢管破坏节点弯矩-转角曲线对比

Fig.9 Comparison of bending moment-rotation curves of column failure joints

## 2 有限元模拟

### 2.1 有限元模型

有限元模型及数值分析通过大型通用有限元软件 ABAQUS 2016 实现。根据对称性, 采用四分之一模型, 并在对称截面处施加相应对称边界条件, 有限元模型如图 10 所示, 由梁、端板、带螺纹孔的方钢管和单边螺栓, 或带有圆孔的方钢管和带有螺母的高强螺栓四部分组成。钢梁-钢管各组成部件均为钢材, 所有部件均选用线性六面体缩减积分 C3D8R 单元。各部件的钢材本构模型均采用理性弹塑性模型, 并遵循 Von Mises 屈服准

则。有限元模型中各部件的材性设置与材性试验所测及出厂证明中的材性保持一致, 见表 2。模型网格划分中, 梁柱构件的单元网格尺寸约为 8 mm, 网格高度由板厚控制, 为有效模拟构件变形, 钢管以及端板厚度方向至少进行了 6 层网格划分。单边螺栓网格尺寸约为 0.6 mm, 对螺栓附近网格进行适度加密, 保证螺栓孔及螺栓的 90° 圆弧上至少分布 8 个单元。此外, 螺栓预紧力通过 ABAQUS 2016 内置荷载类型 “Bolt load” 施加。

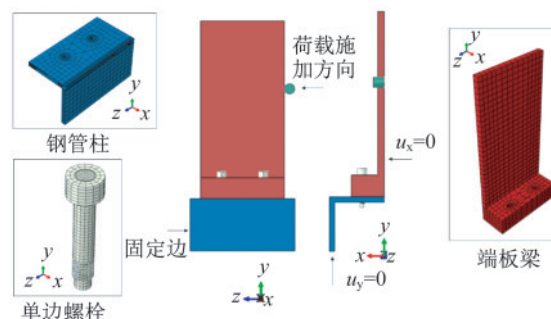


图 10 有限元模型

Fig.10 Finite element model

节点接触关系分为以下三种: 端板-螺栓, 端板-钢管柱, 钢管柱-螺栓。接触属性为: 法向硬接触, 切向可滑动, 滑动摩擦系数为 0.35。钢管下端固定, 对滚轴支座施加  $z$  方向位移荷载模拟真实受力情况。

### 2.2 模型验证

#### 2.2.1 钢管内螺纹被剪断

图 11 对比了试件 S20-L120 的试验结果与有限元结果。由图 11 可知, 二者节点最终变形形态相似, 钢梁绕端板上部发生转动, 钢管壁发生轻微面外变形。破坏模式也均为钢管螺纹孔螺纹失效, 当钢管孔内螺纹完全失效后, 有限元模型由于

表 3

试验结果

Table 3

Summary of test results

节点	初始刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{mrad}^{-1}$ )	屈服弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	极限弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	屈服转角/ mrad	破坏模式
S10-L120	1.44	9.73	12.97	6.66	螺栓断裂
S10-L210	1.45	11.38	15.16	8.02	螺栓断裂
B10-L120	1.90	10.67	14.23	5.83	螺栓断裂
B10-L210	1.91	12.37	16.24	6.67	螺栓断裂
S20-L120	0.79	23.56	31.41	29.78	螺纹破坏
S20-L210	0.79	25.14	33.52	31.82	螺纹破坏
B20-L120	1.46	38.75	51.66	26.52	钢管屈服
B20-L210	1.47	42.84	57.13	29.14	钢管屈服

收敛困难而中断,试验中钢管内螺纹则完全从根部剪断,螺纹孔锚固力丧失,下排螺栓直接被拉出。由图 12、表 4 可知,试验与有限元模拟得到的节点弯矩-转角曲线发展过程相似,有限元模拟得到的节点屈服承载力为 24.43 kN·m,极限承载力为 32.57 kN·m,分别高于试验结果 3.69%、3.69%。有限元模拟结果与试验结果吻合良好,因此,有限元模型可以较为准确地模拟该节点钢管螺纹失效破坏模式。

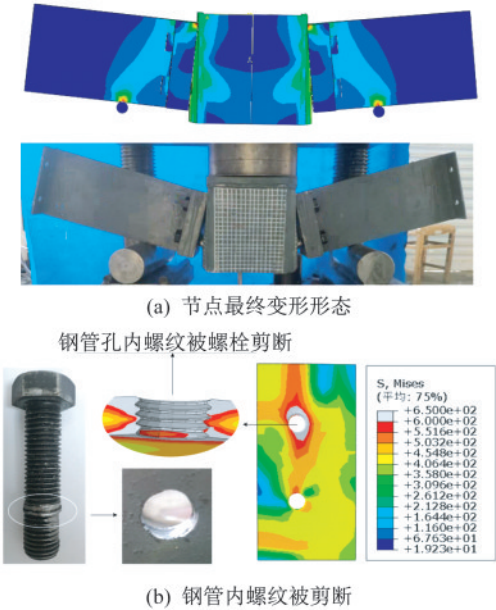


图 11 试验与有限元模型获得的节点 S20-L120 变形对比  
Fig.11 Comparison of deformation of specimen S20-L120 obtained from FEMs and tests

2.2.2 螺栓破坏

为验证有限元模型可以对节点发生螺栓断裂破坏模式进行准确模拟,本节对比了试件 S10-L210 的试验与有限元结果。由图 13 可知,二者最终变形形态相似,均为钢梁绕端板上部发生转动,钢管壁刚度以及承载力大于螺栓,因此未发生面外变形。有限元模拟时,为减少网格数量,提高计算效率,仅在螺栓杆发挥锚固作用处设置螺纹,试验结果中,螺栓因支座反力引起的沿螺栓杆轴方

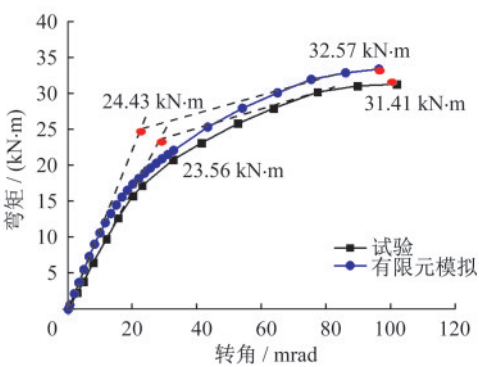


图 12 试验与有限元模型获得的节点 S20-L120 弯矩-转角曲线对比  
Fig.12 Comparison of bending moment-rotation curves of specimen S20-L120 obtained from FEMs and tests

向的拉力及垂直杆轴方向的剪力共同作用,在端板与钢管接触面位置沿倾斜方向突然发生断裂;有限元结果中,螺栓杆应力沿倾斜方向分布,最终在端板与钢管接触面位置发生紧缩。二者破坏模式较为吻合。图 14 为试验与有限元模拟得到的节点弯矩-转角曲线对比,二者走势较为一致,有限元模拟得到的屈服承载力、极限承载力与试验结果接近,分别大 3.4%、3.5%。

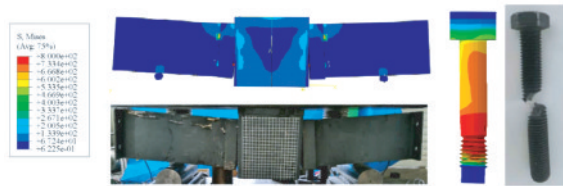


图 13 试验与有限元模型获得的节点 S10-L210 变形对比  
Fig.13 Comparison of deformation of specimen S10-L210 obtained from FEMs and tests

有限元模拟得到的承载力略微大于试验结果,可能是因为试件在加工过程中存在一些缺陷,以及有限元模型与试件的真实几何尺寸存在一定的偏差。由以上分析可知,有限元方法可以准确预测节点的变形形态、破坏模式以及弯矩-转角曲线。上述有限元建模方法适用于对节点做进一步的参数分析。

节点	试验结果		有限元模拟结果		对比	
	屈服弯矩 $M_{y,test}$ /(kN·m·mrad <sup>-1</sup> )	极限弯矩 $M_{u,test}$ /(kN·m)	屈服弯矩 $M_{y,FEM}$ /(kN·m)	极限弯矩 $M_{u,FEM}$ /(kN·m)	$\frac{M_{y,test}}{M_{y,FEM}}$	$\frac{M_{u,test}}{M_{u,FEM}}$
S20-L120	23.56	31.41	24.43	32.57	0.964	0.964
S10-L210	11.38	15.16	11.77	15.69	0.967	0.966



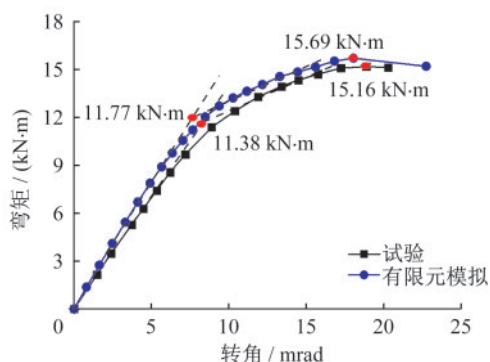


图 14 试验与有限元模型获得的节点 S10-L210 弯矩-转角曲线对比

Fig.14 Comparison of bending moment-rotation curves of specimen S10-L210 obtained from FEMs and tests

### 2.3 力作用点到钢管壁的距离 $L$ 影响分析

力作用点到钢管壁的距离,决定了节点弯矩和剪力的不同比例关系。试验仅研究了 120 mm、210 mm 两种距离。为进一步分析其相关作用机制,本节采用有限元方法分析了 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm、200 mm、300 mm、400 mm、500 mm 共 9 种距离下,四个试验节点的抗弯性能。为充分分析节点受力性能,钢管柱长度设为 800 mm。

图 15 为弯矩与剪力的比值大小对 M20 单边螺栓连接节点破坏模式的影响。当  $L=20$  mm 时,由于力作用点与钢管壁距离较小,节点主要承受剪力作用,钢管抗剪承载力大于螺栓,因此发生螺栓剪断破坏模式,剪断面位于端板与钢管壁接触面。此时,钢管内螺纹与螺栓外螺纹咬合良好,螺栓右侧螺纹与钢管发生少许脱离。随着弯矩与剪力比值的增大,弯矩对节点的作用逐渐增大。当  $L$  增加到 60 mm 时,节点破坏模式仍然为螺栓剪坏,此时,受弯矩作用影响,螺栓右侧与螺纹孔脱离增大。当  $L=80$  mm 时,节点所受弯矩引起的拉力作用大于剪力作用。由于螺栓的抗拉承载力大于螺纹,因此破坏模式变为螺纹剪坏。受力作用方向影响,螺栓左侧螺纹与钢管咬合作用优于右侧。当  $L=500$  mm 时,节点所受剪力可忽略不计,主要承受弯矩作用,破坏模式为螺纹剪坏,此时,由于剪力作用减小,内外螺纹咬合作用优于  $L=80$  mm 时的螺纹咬合作用。可以看出,当螺纹锚固单边螺栓连接节点同时受剪力和弯矩共同作用时,内外螺纹会产生进一步的脱离,进而对节点承

载力造成影响。

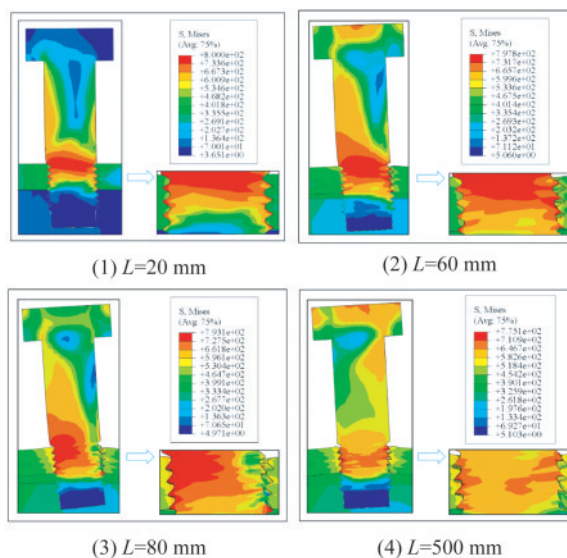


图 15 剪力对 M20 单边螺栓连接节点破坏模式的影响

Fig.15 Influence of shear force on failure modes of M20 thread-fixed one-side bolted connections

图 16 为弯矩与剪力的比值大小对带有螺母 M20 高强螺栓连接节点破坏模式的影响。当  $L=20$  mm 时,从模拟结果的应力分布情况可以看出,螺栓位于端板与钢管壁接触面附近的横截面达到极限应力,即节点发生螺栓剪断破坏模式。钢管柱螺栓孔左侧受螺杆挤压力作用,产生轻微堆积变形。当  $L=40$  mm 时,节点所受弯矩引起的拉力增大。与  $L=10$  mm 相比,螺杆达到极限应力的面积增大,且与螺杆轴线呈一定倾斜角度,说明此时螺栓受拉力与剪力共同作用。当  $L=100$  mm 时,钢管壁发生面外屈服,随后螺栓断裂。当  $L=500$  mm 时,剪力对螺栓的影响很小,螺栓主要受拉破坏。螺杆中的大部分区域轴向力达到最大值,最终颈缩位置仍发生在端板与钢管壁接触面。

图 17 为剪力对 M10 单边螺栓连接节点破坏模式的影响,由图可知,钢管螺纹孔始终提供有效锚固力,随着弯矩与剪力比值的增大,节点破坏模式由螺栓剪断变为螺栓拉断。增加钢管壁厚、减少螺栓直径或者增添加强件使螺纹锚固长度足够时,可以有效避免螺纹破坏。

图 18—图 21 为剪力对节点弯矩-转角曲线的影响,结合上述分析可知,当弯矩与剪力比值较小时,节点主要承受剪力荷载,节点最终的破坏模式与极限承载力与纯剪作用下相似。随着弯矩与剪力比值的增大,节点抗弯承载力增大,此时,节点

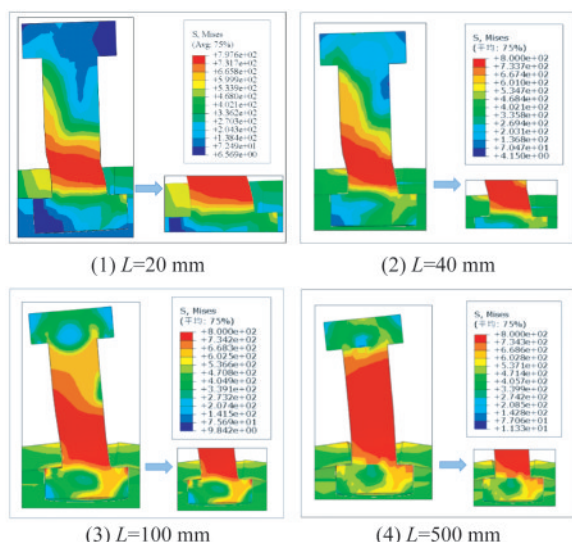


图16 剪力对带螺母M20高强螺栓连接节点破坏模式的影响

Fig.16 Influence of shear force on failure modes of M20 nut-fixed double-sides bolted connections

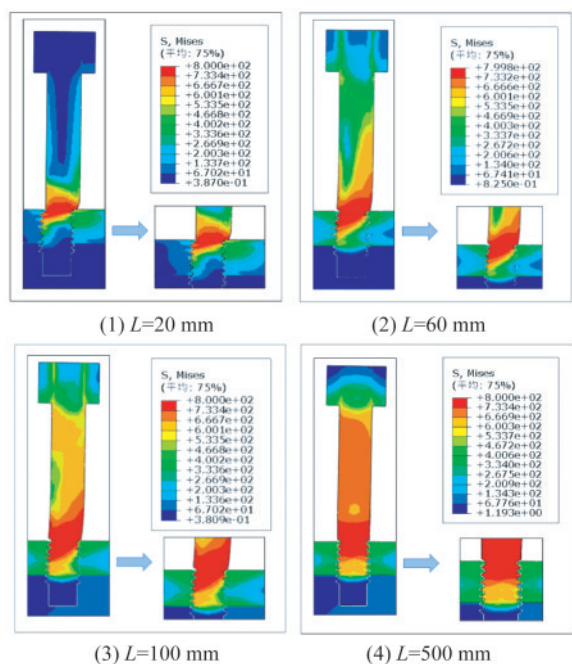


图17 剪力对M10单边螺栓连接节点破坏模式的影响

Fig.17 Influence of shear force on failure modes of M10 thread-fixed one-side bolted connections

受剪力与弯矩共同作用。当比值大于某一值时,剪力荷载对于节点受力的影响较小,可忽略不计。节点主要受弯矩作用,节点抗弯承载力基本保持不变。

节点弯矩-剪力相关承载力如图22、表5所示,当节点发生螺栓断裂破坏模式时,螺纹锚固单边螺栓连接节点与带螺母高强螺栓连接节点承载

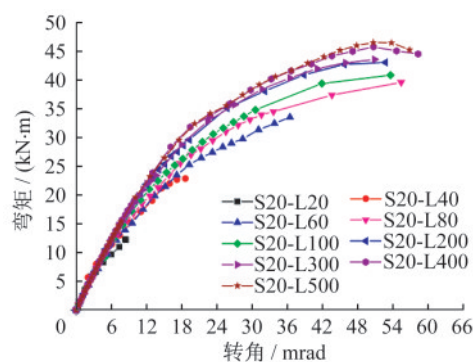


图18 剪力对M20单边螺栓连接节点弯矩-转角曲线的影响

Fig. 18 Influence of shear force on bending moment-rotation curves of M20 thread-fixed one-side bolted connections

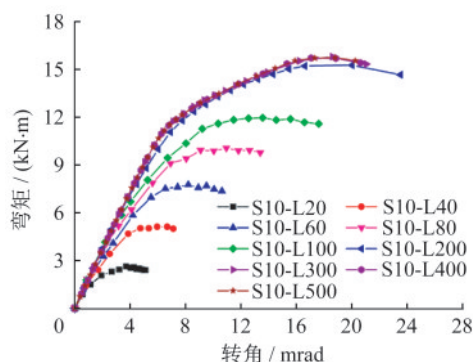


图19 剪力对M10单边螺栓连接节点弯矩-转角曲线的影响

Fig.19 Influence of shear force on bending moment-rotation curves of M10 thread-fixed one-side bolted connections

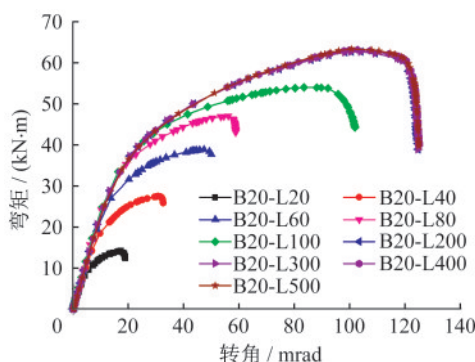


图20 剪力对带螺母M20高强螺栓连接节点弯矩-转角曲线的影响

Fig.20 Influence of shear force on bending moment-rotation curves of M20 nut-fixed double-sides bolted connections

力相近。当节点发生钢管破坏时,二者承载力差别较大。原因,对于带螺母螺栓连接节点,螺栓孔壁承受剪力荷载,螺母锚固防止螺栓拉出;对于螺纹锚固单边螺栓连接节点,拉力荷载由钢管螺纹锚固力平衡,剪力荷载造成的钢管螺栓孔变形



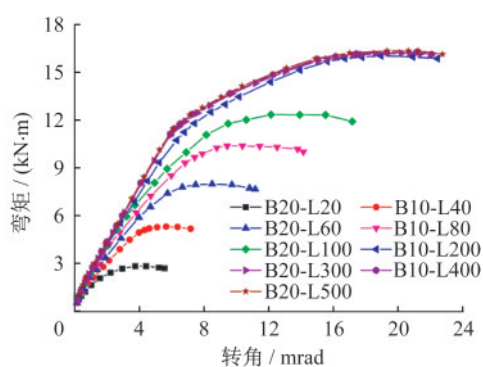


图21 剪力对带螺母M10高强螺栓连接节点弯矩-转角曲线的影响

Fig.21 Influence of shear force on bending moment-rotation curves of M10 nut-fixed double-sides bolted connections

会进一步削弱螺纹锚固状态,进而降低节点抗拉强度,因此剪力对于螺纹锚固单边螺栓连接节点承载力的影响更大。

### 3 结 论

(1) 通过试验得到了螺纹锚固单边螺栓连接钢梁-钢管节点弯矩-剪力承载力相关关系。当弯矩与剪力比值较小时,节点主要承受剪力荷载,随着弯矩与剪力比值的增大,节点抗弯承载力增大,

表5

弯矩-剪力相关承载力

Table 5

Bending moment-shear capacities

距离 L	弯矩/(kN·m)				剪力/kN			
	S20-L	B20-L	S10-L	B10-L	S20-L	B20-L	S10-L	B10-L
20	8.87	10.67	1.98	2.12	443.5	533.43	99	106.08
40	16.63	20.64	3.89	3.97	415.75	516.01	97.25	99.30
60	25.12	29.19	5.82	5.98	418.67	486.51	97	99.67
80	29.67	35.33	7.55	7.77	370.87	441.58	94.38	97.13
100	30.60	40.54	8.98	9.24	305.99	405.41	89.78	92.39
200	32.26	47.10	11.42	12.00	161.31	235.51	57.09	59.99
300	32.65	47.10	12.06	12.13	108.84	157.01	40.2	40.43
400	34.30	47.44	12.10	12.17	85.76	118.59	30.25	30.43
500	34.82	47.59	12.12	12.23	69.65	95.18	24.24	24.46

(2) 对于带螺母螺栓连接节点,螺栓孔壁承受剪力荷载,螺母锚固防止螺栓拉出;对于螺纹锚固单边螺栓连接节点,拉力荷载由钢管螺纹锚固力平衡,剪力荷载造成的钢管螺栓孔变形会进一步削弱螺纹锚固状态,进而降低节点抗拉强度,因此剪力对于螺纹锚固单边螺栓连接节点承载力的影响更大。

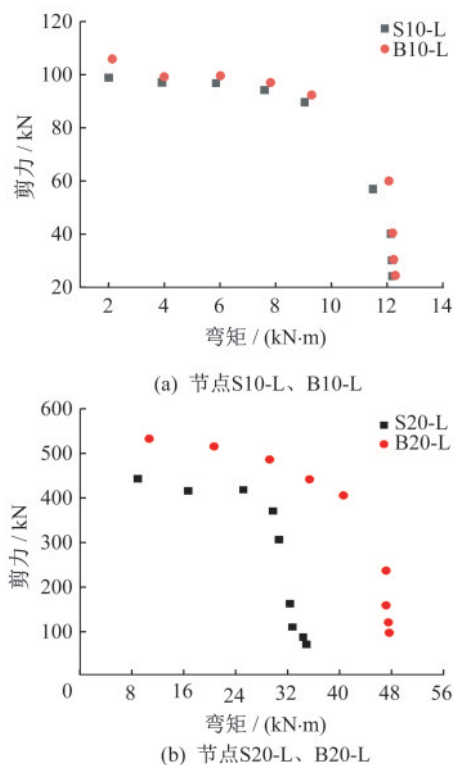


图22 节点弯矩-剪力相关承载力

Fig.22 Bending moment-shear capacity of connections

此时,节点受剪力与弯矩共同作用。当比值大于某一值时,节点抗弯承载力基本保持不变。

### 参 考 文 献

- [1] Wang J, Han L, Uy B. Behaviour of flush end plate joints to concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (4):925-939.
- [2] 李国强,段炼,陆烨,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. (in Chinese).
- [3] Elghazouli A, Malaga-Chuquitaype C, Castro J, et al. Experimental monotonic and cyclic behaviour of blind-bolted angle connections [J]. Engineering Structures, 2009, 31(11): 2540-53.
- [4] Wang J, Chen X, Shen J. Performance of CFTST column to steel beam joints with blind bolts under cyclic loading [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 69-84.
- [5] Wang J, Guo S. Structural performance of blind bolted end plate joints to concrete-filled thin-walled steel tubular columns [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 54-68.
- [6] Wang J, Wang J, Wang H. Seismic behavior of blind bolted CFST frames with semi-rigid connections [J]. Structures, 2017, 9: 91-104.
- [7] 王静峰, 郭水平, 陈莉萍. 带肋薄壁钢管混凝土框架梁柱端板连接节点试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(8): 69-78.
- Wang Jingfeng, Guo Shuiping, Chen Liping. Experimental study on behavior of beam-column endplate joints of concrete-filled thin-walled steel tube frame with ribs [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 69-78. (in Chinese).
- [8] Wang P, Sun L, Liu M, et al. Experimental studies on thread-fixed one-side bolted connection of beam to hollow square steel tube under static bending moment [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110655.
- [9] Liu M, Zhu X, Wang P, et al. Tension strength and design method for thread-fixed one-side bolted T-stub [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 918-33.
- [10] Zhu X, Wang P, Liu M, et al. Behaviors of one-side bolted T-stub through thread holes under tension strengthened with backing plate [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 134: 53-65.
- [11] Wulan T, Wang P, 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.
- [12] Zhang Y, Liu M, Ma Q, et al. Yield line patterns of T-stubs connected by thread-fixed one-side bolts under tension [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166: 105932.
- [13] Wulan T, Ma Q, Liu Z, et al. Experimental study on T-stubs connected by thread-fixed one-side bolts under cyclic load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 169: 106050.
- [14] Zhang Y, Wang P, Liu M, et al. Numerical studies on yield line patterns of thread-fixed one-side bolted endplate connection to square hollow section column under tension [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106262.
- [15] You Y, Liu M, Liu Y, et al. Experimental studies on thread-fixed one-side bolted T-stubs in tension at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106139.
- [16] Wang P, You Y, Liu M, et al. Behavior of thread-fixed one-side bolted T-stubs with backing plates at ambient and elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106093.
- [17] Wang P, Wulan T, Liu M, et al. Shear behavior of lap connection using one-side bolts [J]. Engineering Structures, 2019, 186: 64-85.
- [18] BS EN 1993-1-1-2005. Eurocode3. Design of steel structures, Part1-8: Design of joints [S]. European Committee for Standardization. 2005.
- [19] 中冶建筑研究总院有限公司. GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- China Metallurgical Construction Research Institute Limited. GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)