

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.070



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钢拉杆螺纹套筒连接的承载性能试验研究

黄浩^{1a}, 周婷^{1b}, 杨伟², 王新妍²

(1. 天津大学 a. 未来技术学院; b. 建筑学院, 天津 300072; 2. 中铁十八局集团建筑安装工程有限公司, 天津 300308)

摘要: 钢拉杆作为大跨度悬挂结构的核心传力构件, 其套筒连接节点的可靠性直接影响整体结构安全性。为探讨拧入深度和套筒壁厚对连接节点承载性能的作用规律, 以不同拧入深度和套筒壁厚为变量, 分别设置6组试件进行拉伸性能实验, 研究不同参数组合下的典型破坏模式及其演化规律, 并结合ABAQUS有限元模型建立考虑螺纹接触的精细化数值分析体系。结果表明: 节点承载力与延性特征均呈现显著的参数敏感性, 当拧入深度不足 $1.0d$ (杆件公称直径) 时, 界面剪切应力分布不均导致螺纹拉拔破坏, 而当深度达到 $1.0d$ 及以上时, 破坏模式转为杆体主导的延性颈缩断裂, 最大承载力趋于稳定。套筒壁厚比低于 0.225 时, 套筒因应力集中发生脆性断裂, 壁厚比达到 0.225 及以上时, 套筒刚度优化应力分布促使失效模式为杆体塑性变形。通过理论模型与试验数据对比, 验证了3种破坏模式的临界条件方程, 误差率均在4% 以内。基于此提出双控制变量设计准则: 拧入深度应 $\geq 1.1d$ 且套筒壁厚比需 ≥ 0.225 , 在保证钢拉杆套筒节点的安全同时具备充分的延性。

关键词: 钢拉杆; 螺纹连接; 拧入深度; 套筒壁厚; 破坏模式

中图分类号: TU323.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Experimental study on bearing capacity of threaded sleeve connection of steel tie rod

HUANG Hao^{1a}, ZHOU Ting^{1b}, YANG Wei², WANG Xinyan²

(1a. Tianjin International Engineering Institute; 1b. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. China Railway 18th Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Tianjin 300308, P. R. China)

Abstract: As the core force transmitting component of large-span suspension structures, the reliability of the sleeve connection nodes of steel tie rods directly affects the overall structural safety. To investigate the effect of screw in depth and sleeve wall thickness on the load-bearing performance of connecting nodes, six sets of specimens were set up with different screw in depth and sleeve wall thickness as variables for tensile performance experiments. The typical failure modes and their evolution laws under different parameter combinations were studied, and a refined numerical analysis system considering thread contact was established based on the ABAQUS finite element model. The results show that both the node bearing capacity and ductility

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3805202)

作者简介: 黄浩(2001-), 男, 主要从事钢结构研究, E-mail: hao-h@foxmail.com。

周婷(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail: zhouting1126@126.com。

Received: 2025-03-25

Foundation item: National Key R & D Program (No. 2023YFC3805202)

Author brief: HUANG Hao (2001-), main research interest: steel structures, E-mail: hao-h@foxmail.com.

ZHOU Ting (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: zhouting1126@126.com.

characteristics exhibit significant parameter sensitivity. When the screw in depth is less than $1.0d$ of the nominal diameter of the member, uneven distribution of interfacial shear stress leads to thread pull-out failure. However, when the depth reaches $1.0d$ or above, the failure mode shifts to ductile necking fracture dominated by the member, and the maximum bearing capacity tends to stabilize. When the wall thickness ratio of the sleeve is less than 0.225 , the sleeve will undergo brittle fracture due to stress concentration. When the wall thickness ratio reaches 0.225 or above, optimizing the stiffness of the sleeve will promote the failure mode to be plastic deformation of the rod. By comparing theoretical models with experimental data, the critical condition equations for three failure modes were verified, and the error rates were all within 4% . A dual control variable design criterion was proposed based on this: the screw in depth should be $\geq 1.1d$ and the sleeve wall thickness ratio should be ≥ 0.225 , ensuring the safety of the steel tie rod sleeve node while having sufficient ductility.

Keywords: Steel tie-rod sleeve connection; Thread engagement depth; Sleeve wall thickness; Failure mode evolution

钢拉杆作为现代土木工程中的关键构件,具有韧性好、强度高、安全方便的特点,广泛应用于建筑结构、机场、桥梁等工程中,其主要作用是提供结构的稳定性和承载力^[1]。在实际工程中,钢拉杆节点是广泛存在的连接形式,钢拉杆的连接方式对工程结构的整体性能至关重要。螺纹连接因安装简便、承载能力强和可调节性高等优点而被广泛采用^[2-3]。

钢拉杆连接节点的力学性能受到金属套筒的强度、钢拉杆的拧入深度、套筒壁厚及螺纹等影响。Zhang^[4]等通过实验预测和有限元仿真结果,对螺纹连接在冲击疲劳下的失效行为进行分析与验证,结果表明螺纹中发生的不可逆损坏,在冲击疲劳载荷下出现在连接的整体线弹性阶段,导致机械性能逐渐退化并最终失效。De Falco 等^[5]分析了特征频率计算模型的敏感性,并研究了相关参数对特征频率的影响。Duan 等^[6]研究了不同螺纹连接的强度对大型钢拉杆力学性能影响,通过全尺寸拉伸断裂实验确定钢拉杆螺纹牙失效的最小螺纹啮合圈数。

对于钢拉杆力学性能,李思遥等^[7]通过对节点进行拉伸力学性能试验,研究了套筒式节点受拉力学性能。研究表明,套筒式节点轴拉时节点承载力相近,约为等直径等壁厚圆管的 71% 。Chen 等^[8]对钢拉杆火灾后的力学性能进行研究,发现火灾温度与冷却方式对其机械性能影响显著。刘涛等^[9]对钢拉杆试件分别进行单调受拉和低周往复拉压试验,发现在往复拉压作用下,长细比较小的钢拉杆出现循环软化现象。黄山等^[10]通过无端部镦粗处理的高强度钢拉杆节点试验,并与有限元结果进行对比分析,结果表明其节点具有良好的力学性能;石永久等^[11]对钢材试件施加多种加载制度,确定了其本构模型的关键材料参数,为计算结构在地震荷载下的反应提供了参考依据。

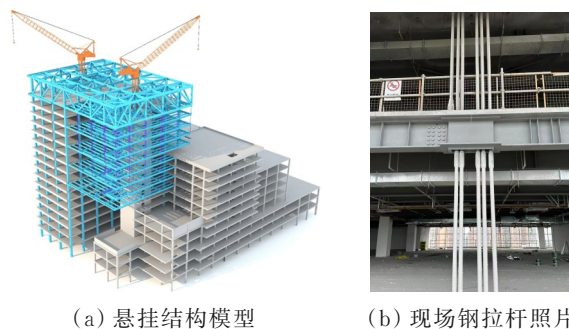
目前对螺纹节点连接与钢拉杆力学性能已有

一定研究,但对于拧入深度和套筒壁厚对钢拉杆套筒节点性能影响的研究较少。笔者以某高层悬挂结构建筑为研究对象,针对钢拉杆套筒节点拧入深度和套筒壁厚对钢拉杆力学性能的影响进行分析。

1 工程概况

工程为地下 4 层、地上 16 层的高层建筑,建筑总高度 70.75 m 。结构设计中,5~8 层连接体、9~16 层挑空区域及屋顶桁架采用钢结构体系,楼板为钢筋桁架楼承板,支承柱为钢管混凝土柱;其余部分为钢筋混凝土结构。

为满足 9~16 层挑空区的通透性要求,设计采用弱相关悬挂体系:屋顶设置转换钢桁架,各层重量通过独立钢拉杆悬挂于屋顶桁架上,悬挂楼层间无直接连接以实现受力与变形的弱相关性,得到挑空且通透的建筑效果并保证了结构安全^[12-14],如图 1 所示。



(a) 悬挂结构模型 (b) 现场钢拉杆照片

图 1 某项目弱相关悬挂体系

Fig 1 Weakly coupled suspension system

该悬挂结构各层均通过钢拉杆实现连接,钢拉杆为主要受力构件,其力学性能直接决定整体结构的安全。鉴于钢拉杆的受力集中于节点区域,对钢拉杆套筒连接节点进行力学性能研究。通过 12 组钢拉杆套筒连接试件的拉拔试验,记录其破坏过

程、破坏模式,并绘制荷载-位移曲线以分析拧入深度与套筒壁厚对钢拉杆承载力的影响,确定钢拉杆在螺纹连接不破坏时所需的最小拧入深度和套筒壁厚。

2 钢拉杆连接理论承载力计算

2.1 钢拉杆套筒尺寸

图 2 为钢拉杆套筒组装图,杆体及套筒的材料均为 45 号钢,螺纹规格为 M60×4。通过材性实验得到钢材的抗拉强度 $\sigma_u=610$ MPa,屈服强度 $\sigma_b=335$ MPa,弹性模量 $E=210$ GPa。

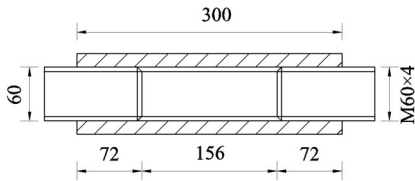


图 2 钢拉杆套筒组装图
Fig 2 Assembly diagram of the steel rod sleeve

2.2 钢拉杆应力分析

钢拉杆在载荷 F 作用下螺纹根部的拉断直径为

$$d_1 = d - 2 \times \frac{5h}{8} = d - 1.083P \quad (1)$$

式中: P 为螺纹螺距; d 为杆件公称直径; h 为螺纹牙高度,普通螺纹 $h=0.541P$ 。

钢拉杆有效截面处的应力为

$$\sigma = \frac{F}{A_1} = \frac{4F}{\pi d_1^2} \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: A_1 为有效截面面积; $[\sigma]$ 为许用正应力; F 为设计承载力。将具体数值代入可得钢拉杆有效截面处的荷载为 $F \leq 1\,484$ kN

3 试验概况

3.1 试件材料

试件选取拧入深度 l 和壁厚比 ξ (壁厚比为套筒壁厚/杆件工称直径) 两个参数作为影响因素,完成 12 组钢拉杆套筒连接试件的拉伸试验,对试件的破坏过程、荷载-位移曲线和破坏形态等进行分析。其中,拧入深度 $l=NP$,套筒壁厚比 $\xi=(D-d)/2d$ 。 N 为螺纹圈数; D 为套筒外径。

钢拉杆直径为 60 mm,钢材为 45 号钢,杆件数量为 24 根,根据《钢拉杆》(GB/T 20934—2016)^[15] 关于钢拉杆要求进行处理。套筒数量为 12 个,套筒外径分别为 93、90、87、84、81、78 mm。将两根钢拉杆通过套筒螺纹组装连接共组装成 12 组试件,钢拉杆试件的规格与数量如表 1 所示。

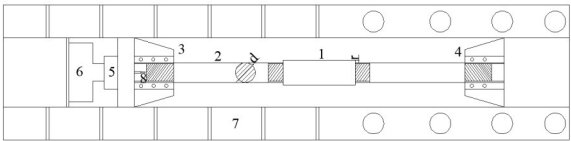
表 1 试件规格与数量

Table 1 Specimen specifications and quantity

试件编号	套筒外径/mm	壁厚比
1-24-0.275	93	0.275
1-48-0.275	93	0.275
1-54-0.275	93	0.275
1-60-0.275	93	0.275
1-66-0.275	93	0.275
1-72-0.275	93	0.275
2-72-0.150	78	0.150
2-72-0.175	81	0.175
2-72-0.200	84	0.200
2-72-0.225	87	0.225
2-72-0.250	90	0.250
2-72-0.275	93	0.275

3.2 加载装置

钢拉杆拉伸试验在天津大学结构与抗震实验室 300 T 卧式拉力试验机进行,按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[16] 中进行单向拉伸试验加载,加载速率为 1 kN/s,采用 WKD3813 静态数据采集仪实时采集套筒连接件拉线位移计的数据。并选取拧入深度 l 和套筒壁厚比 ξ 作为参数进行试验。加载装置如图 3 示。



注: 1—套筒 2—钢拉杆 3—前夹头 4—后夹头
5—千斤顶 6—电机 7—框架 8—位移计

图 3 钢拉杆套筒连接试件加载图
Fig 3 Loading diagram of the steel tie rod sleeve connection specimen

4 试验结果

4.1 破坏模式

钢拉杆的受力破坏过程可分为 4 个典型阶段: 弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和颈缩阶段。在初始加载阶段,钢拉杆套筒连接试件表现出典型的弹性特征,其应力-应变关系呈线性变化,荷载与位移

呈正比关系。随着轴向荷载 F 的持续增加,试件进入屈服阶段。不同于传统钢材的明显屈服平台,该试件表现出短暂的屈服平台,随后应力应变曲线斜率减小的缓慢上升,在此过程中材料进入塑性变形状态。继续加载,试件进入强化阶段,材料在塑性变形过程中仍能继续承载,荷载随位移增大而持续上升,直至达到极限承载力 $P_{\max}$ 。在颈缩阶段,由于截面应力集中效应显著,试件局部出现明显的截面缩减现象,最后颈缩断裂应力迅速下降。

图4为试件破坏模式。由图4知,试件表现出3种主要破坏模式:螺纹连接处拉拔破坏、套筒断裂破坏以及钢拉杆颈缩断裂破坏。其中,螺纹拉拔破坏主要发生在螺纹与套筒界面处,表现为螺纹齿牙的剪切破坏;套筒断裂则源于材料在最大应力区域的局部断裂,断裂位置集中于中部;而钢拉杆颈缩破坏表现出典型的韧性断裂特征,断口呈现杯锥状形态。

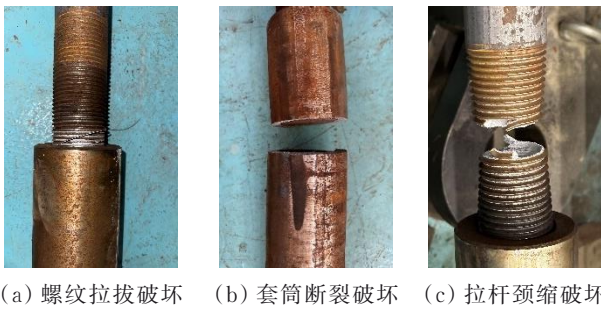


图4 试件破坏模式

Fig 4 Failure mode of specimens

4.2 拧入深度试验分析

在不同拧入深度条件下,钢拉杆试件的破坏模式表现出显著的差异性。如图5表2所示,当拧入深度为 $0.4d$ 、 $0.8d$ 和 $0.9d$ 时,试件均发生螺纹拉拔破坏,破坏位置集中于螺纹连接区域。具体表现为螺纹齿牙的剪切破坏,同时伴随螺纹从套筒中被拔出的现象,表明此时的破坏机制以螺纹齿牙的剪切破坏为主导,钢拉杆套筒节点先于钢拉杆破坏。

当拧入深度增加至大于 $1.0d$ 后,试件的破坏模式发生转变,表现为拉杆在螺纹根部的杆件拉断。在此情况下,拉杆体首先发生显著的塑性变形,随后在螺纹区域形成颈缩,最终发生断裂。值得注意的是,即使达到最终破坏状态,螺纹连接仍保持良好,即拉杆外螺纹与套筒内螺纹保持完整啮合,未出现明显的螺纹滑移或脱扣现象。

试件的最大荷载与拧入深度的关系呈现显著的非线性特征,如图6所示。在初始阶段(拧入深度 $< 0.8d$),试件的最大荷载相对较低,其承载能力尚未得到充分发展。随着拧入深度的增加,尤其在



图5 不同拧入深度试件破坏形态

Fig 5 Failure morphology of specimens with different screwing depths

表2 试件参数与破坏形态

Table 2 Parameters and failure patterns of specimens

试件编号	拧入深度/mm	套筒外径/mm	壁厚比	破坏形态
1-24-0.275	24	93	0.275	螺纹拉拔破坏
1-48-0.275	48	93	0.275	螺纹拉拔破坏
1-54-0.275	54	93	0.275	螺纹拉拔破坏
1-60-0.275	60	93	0.275	杆体颈缩破坏
1-66-0.275	66	93	0.275	杆体颈缩破坏
1-72-0.275	72	93	0.275	杆体颈缩破坏
2-72-0.150	72	78	0.150	套筒断裂破坏
2-72-0.175	72	81	0.175	套筒断裂破坏
2-72-0.200	72	84	0.200	套筒断裂破坏
2-72-0.225	72	87	0.225	杆体颈缩破坏
2-72-0.250	72	90	0.250	杆体颈缩破坏
2-72-0.275	72	93	0.275	杆体颈缩破坏

$0.8d \sim 1.0d$ 这一过渡区间内,试件的最大荷载表现出明显的增长趋势。当拧入深度超过 $1.0d$ 后,试件的最大荷载趋于稳定,此时试件的承载能力已达到理论计算值,后续增加拧入深度对承载能力的提升效果不显著。

对破坏模式的分析发现,不同拧入深度阶段的试件呈现截然不同的破坏特征。在拧入深度较小时,试件主要发生螺纹拉拔破坏;当拧入深度超过 $1.0d$ 后,所有试件均表现为杆件材料本身的断裂破坏,这进一步验证了此时试件已充分发挥其理论承载能力。荷载分布情况与结论相互印证,表明在拧入深度不小于 $1.0d$ 时,节点不会先与杆件破坏,避

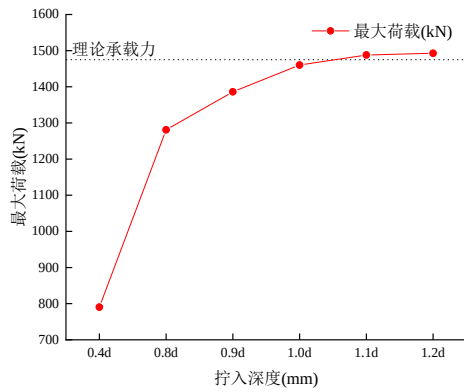


图6 不同拧入深度试件最大荷载

Fig.6 Maximum load of specimens with different screwing depths

免节点剪切破坏同时保证节点安全。

通过对荷载-位移曲线的分析发现,试件的力学行为表现出明显的阶段性特征,如图7所示。在初始弹性阶段,所有试件的荷载-位移曲线斜率基本一致,说明在弹性阶段不同拧入深度的试件具有相近的刚度。随着荷载的增加,试件相继进入强化阶段,此时曲线斜率逐渐减小,直到达到其最大荷载,应力快速下降试件破坏。随着拧入深度的增加,试件的最大荷载及对应的位移值均呈现递增趋势。这种趋势在拧入深度达到 $1.1d$ 时趋于稳定,此时继续增加拧入深度对最大荷载和位移的影响已不再显著。

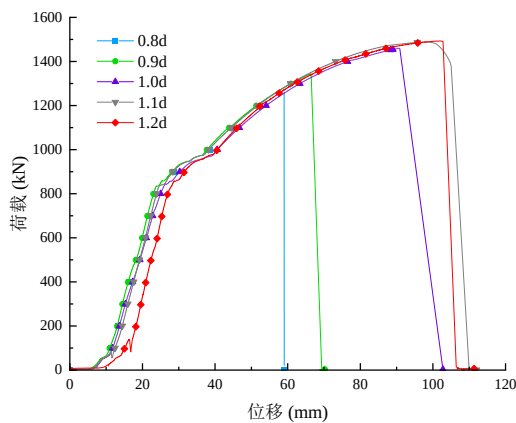


图7 不同拧入深度试件荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of specimens with different screwing depths

4.3 套筒壁厚比试验分析

套筒壁厚比对其连接结构的破坏模式具有显著影响。图8是不同套筒壁厚比试件的破坏形态,当套筒壁厚比处于 $0.150\sim0.200$ 区间时,试件均呈现套筒拉伸断裂破坏特征,断裂位置集中于套筒中截面区域,断面呈现典型脆性断裂形态。此时未观察到螺纹连接破坏,套筒与拉杆的螺纹啮合状态保

持完整。当壁厚比提升至 0.225 及以上时,结构破坏模式转变。此时破坏位置转移至拉杆螺纹根部,破坏过程表现为拉杆体首先发生塑性变形,随后在螺纹根部形成明显颈缩并最终断裂。尽管拉杆发生断裂,其外螺纹与套筒内螺纹仍保持良好啮合状态,螺纹接触面未见明显损伤,表明螺纹连接强度在此工况下仍具有充分保障。



图8 不同套筒壁厚试件破坏形态

Fig.8 Failure morphology of specimens with different wall thicknesses

壁厚参数对结构承载特性具有显著影响,其中各杆件的最大荷载情况如图9所示,在套筒壁厚较小的情况下,试件最大荷载值明显受限,其承载潜能未能充分释放。随着壁厚比增至 $0.150\sim0.225$ 区间时,试件极限承载力呈现出显著的增长趋势,荷载增幅达 $42\%\sim65\%$,显示出壁厚增强对结构性能的强化作用。当套筒壁厚比超过 0.225 后,试件的最大荷载趋于平稳,不再随套筒壁厚的增加而明显提高,试件的承载能力已经达到稳定水平,接近于理论承载力。同时试件的破坏形态也与最大荷载情况相对应。当套筒壁厚比超过 0.225 后试件都为杆件破坏,最大荷载值波动幅度小于 2% ,表明此时节点已达到理论承载状态。

不同壁厚比试验的荷载-位移曲线如图10所示。图10表明,试验构件的荷载-位移曲线呈现典型的3阶段演化规律,其力学行为与套筒约束效应呈现显著相关性。套筒壁厚比从 0.150 增至 0.250 ,试件的承载能力和变形能力同步提升,所有曲线在最开始的弹性阶段,各杆件斜率基本一致,说明弹

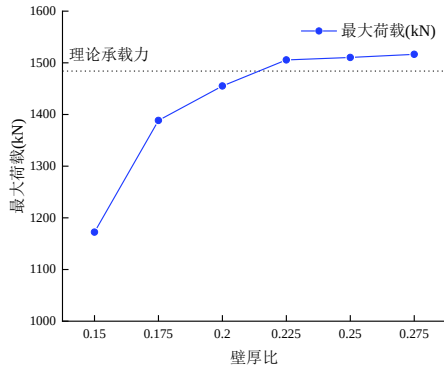


图9 不同套筒壁厚试件最大荷载

Fig. 9 Maximum load of specimens with different tube wall thickness

性刚度不受壁厚影响,接着不同试件均沿着相同的趋势进入强化阶段,随着套筒壁厚不断增大,试件的最大荷载与位移也在不断增大,在达到峰值荷载后断裂荷载迅速下滑,曲线呈现“陡降型”破坏特征。在套筒壁厚比在 0.225 之后,最大荷载与位移变化已趋于稳定,表明此时套筒厚度已超出最小设计阈值。

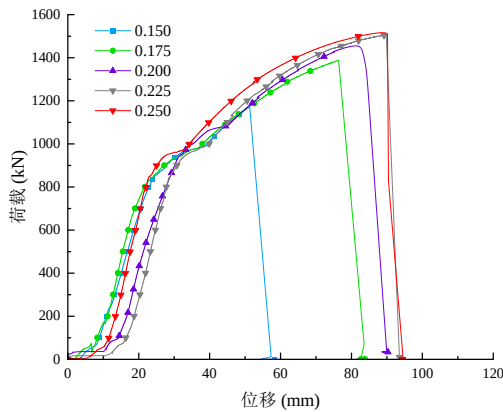


图10 不同套筒壁厚试件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of specimens with different tube wall thickness

5 有限元分析

5.1 本构模型

钢拉杆和套筒都采用的本构模型为等向弹塑性模型,应力-应变曲线按钢材的应力增长分为弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑性流 5 个阶段^[17]。材料的基本力学参数由试验过程中的材性试验得到,具如表 3 所示。

表3 钢材材料属性参数

Table 3 Steel material properties

密度/ (kg/m ³)	泊松比	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
7 850	0.3	210	335	610

模型的数学表达式为

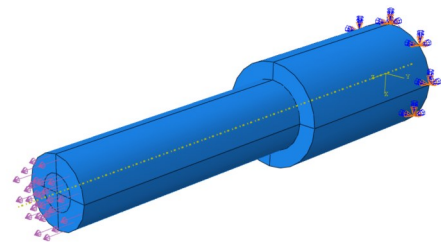
$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \epsilon_s \leq \epsilon_e \\ -A\epsilon_s^2 + B\epsilon_s + C & \epsilon_e < \epsilon_s \leq \epsilon_{e1} \\ f_y & \epsilon_{e1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e2} \\ f_y \left(1 + 0.6 \frac{\epsilon_s - \epsilon_{e2}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}}\right) & \epsilon_{e2} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \epsilon_{e3} < \epsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; f_y 为钢材的屈服强度; ϵ_{ei} 为钢材对应于不同阶段的应变, $i=1,2,3$, $\epsilon_s = 0.8f_y/E_s$; $\epsilon_{e1} = 1.5\epsilon_e$; $\epsilon_{e2} = 10\epsilon_{e1}$; $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_{e1}$; A 、 B 、 C 作为非线性硬化阶段的拟合参数,用于强化阶段的抛物线型应力计算式

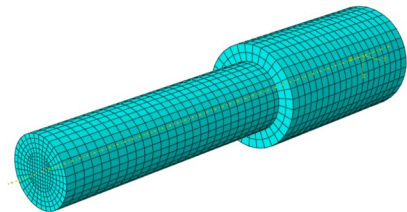
$$A = 0.2f_y/(\epsilon_{e1} - \epsilon_e)^2; B = 2A\epsilon_{e1}; C = 0.8f_y + A\epsilon_{e1}^2 - B\epsilon_e$$

5.2 有限元建模

有限元建模时,仅将钢拉杆和套筒建入模型中。网格单元为 C3D8R 单元,通过在 ABAQUS 接触定义中根据《普通螺纹 基本牙型》(GB/T 192—2003)^[18]和《普通螺纹 直径与螺距系列》(GB/T 193—2003)^[19]设置与螺纹相关的参数。钢拉杆与钢梁套筒之间法向采用硬接触,将摩擦系数取值为 0.2,有效模拟螺纹的力学交互行为。模型试件底套筒底端设置为固定端约束,并在拉杆处施加水平方向荷载进行加载,加载方式及加载过程与试验中完全一致,边荷载分布与边界条件如图 11(a)所示,网格划分如图 11(b)所示。



(a) 荷载分布与边界条件



(b) 网格分布

图11 节点有限元建模设置

Fig. 11 Node finite element modeling setup

5.2.1 拧入深度有限元分析

当在不同拧入深度加载设计承载力 1 484 kN 的荷载时,通过对不同拧入深度的内力分析发现,

整体节点的最大应力出现在钢拉杆的拧入到套筒的外边缘处。在拧入深度在 $0.4d$ 的应力云图中能够看出,在杆件超过抗拉强度后内力进行重分布,最大应力达到了 626 MPa ,大于抗拉强度。在拧入深度在 $0.4d \sim 1.0d$ 之间时,随着拧入深度的增大,最大应力在逐渐减小;而在 $1.1d$ 和 $1.2d$ 时,最大应力增加而总体的应力分布更均匀且有所降低且注

意在拉杆内部出现应力集中。

套筒处的应力最大值基本都出现在套筒变阶处,其主要原是套筒突然变阶导致的应力集中。套筒螺纹的最大应力主要出现在端部旋合第1圈螺纹处,而随着拧入深度的增大,套筒的应力分布更加均匀。具体应力分布如图12所示。

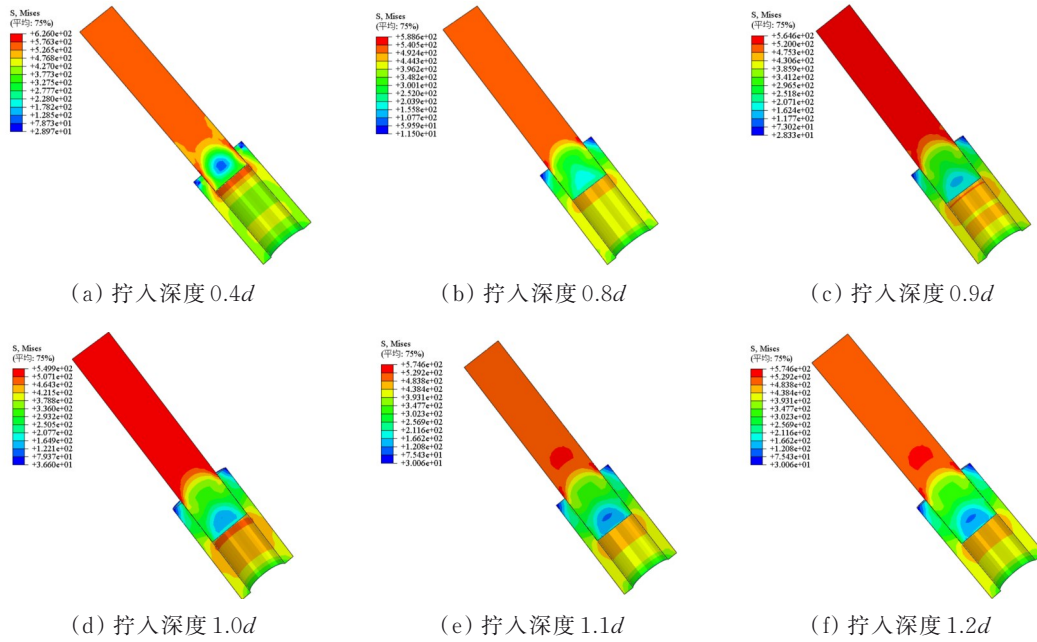


图 12 不同拧入深度试件应变云图

Fig. 12 Strain cloud image of specimens with different screwing depths

5.2.2 套筒壁厚比有限元分析

通过有限元分析揭示套筒壁厚比对结构应力分布的影响。当壁厚比 $\xi = 0.150 \sim 0.200$ 时,系统呈现典型的界面应力集中效应。对不同套筒壁厚的内力分析,当套筒壁厚比在 $0.150 \sim 0.200$ 之间时,套筒应力显著大于拉杆应力,且集中在套筒与拉杆变阶处。而随着套筒壁厚比的增大,套筒的应力逐渐减小且壁厚比在 0.225 及其以后,套筒的应力小于拉杆应力,保证套筒在相同材料的情况下不会先于钢拉杆产生破坏。不同套筒壁厚比的应力云图如图13所示。

6 理论分析

6.1 钢拉杆套筒连接节点破坏模式

在钢拉杆套筒连接节点中,其极限承载力主要由3种破坏模式^[20]决定:螺纹剪切破坏、套筒整体破坏和拉杆抗拉破坏。对钢拉杆连接节点系统的极限承载力取三者中的最小值。

$$F_u = \min(F_{\text{shear}}, F_{\text{sleeve}}, F_{\text{tensile}}) \quad (4)$$

6.1.1 螺纹剪切破坏模式

在螺纹剪切破坏模式中,螺纹剪切破坏由螺纹啮合面的剪切强度决定。在轴向力 F 作用下,钢拉杆与套筒螺纹受剪切和挤压。将单圈螺纹简化为根部固定、顶部承受线性分布荷载的悬臂梁^[21],如图14所示。假设每圈螺纹平均压力为 F/N ,其中 N 为旋合的圈数,并作用在直径 d_1 的圆周上。在螺纹牙危险截面 A—A 上的剪切应力 τ 为

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 b N} \quad (5)$$

式中: b 为螺纹牙根部的厚度,普通螺纹 $b = 0.75P$, P 为螺距。 d_1 为螺纹小径, $d_1 = d - 1.038P$ 。同时考虑到螺纹存在受力不均匀的情况,引入不均匀系数 k_z

$$F = k_z F_{\text{shear}} \quad (6)$$

则当达到材料抗剪强度 τ_u 时,螺纹不发生剪切破坏时的极限承载力为

$$F_{\text{shear}} = \frac{N \pi d_1 b \tau_u}{k_z} = \frac{0.45 \pi l (d - 1.083P) \sigma_u}{k_z} \quad (7)$$

式中: k_z 为不均匀系数。由于外部载荷分布、材料性质差异及装配工艺等因素^[22]导致受力时应力不均匀

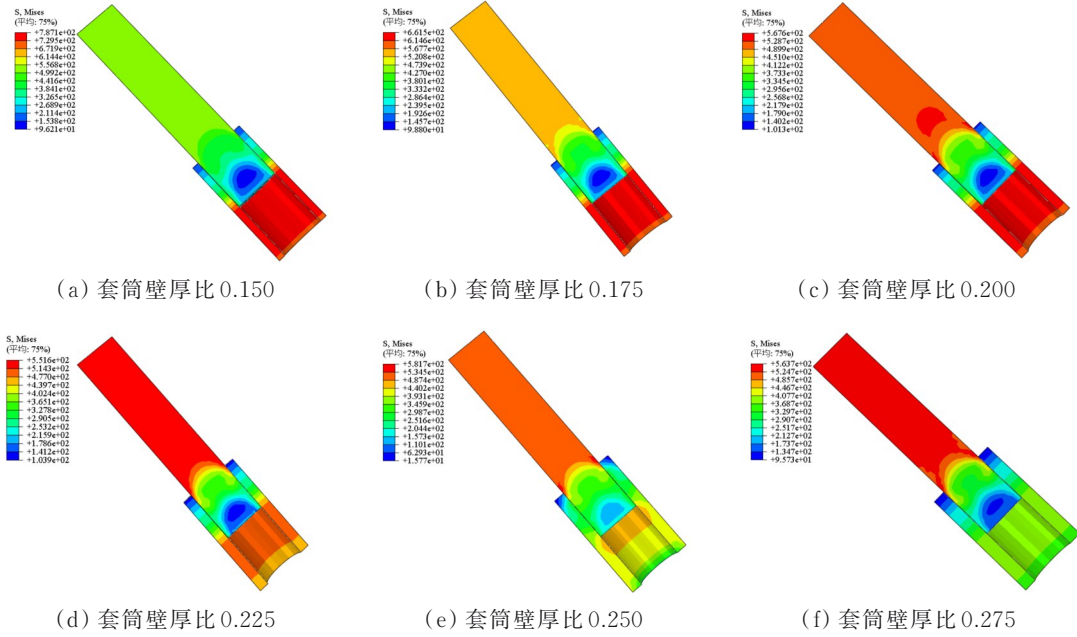


图 13 不同套筒壁厚试件应变云图

Fig. 13 Strain cloud image of specimens with different tube wall thickness

分布,基于对螺纹不均匀系数相关研究^[23-24],并参考《机械设计手册》^[25],结合试验结果进行理论推导,得到不均匀系数 k_z 的计算方法,如式(8)所示。

$$k_z = 0.7(1 + \frac{4P}{l}) \quad (8)$$

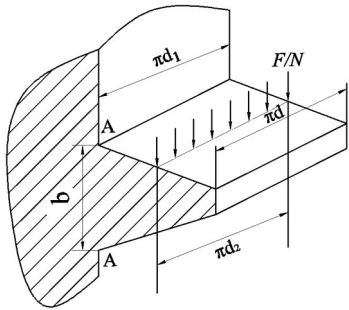


图 14 螺纹的力学模型

Fig. 14 Mechanical model of thread

6.1.2 套筒整体破坏模式

在套筒整体破坏模式中,套筒作为厚壁圆筒承受拉应力,考虑截面突变处的应力集中效应,引入折减系数 $\alpha = 0.95$,则

$$F_{\text{sleeve}} = \alpha \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \sigma_u \quad (9)$$

而壁厚比 ξ 为套筒壁厚/杆件公称直径

$$\xi = \frac{(D - d)}{2d} \quad (10)$$

将壁厚比带入式(9)得到套筒破坏承载力

$$F_{\text{sleeve}} = 0.95\pi d^2 \xi(1 + \xi) \sigma_u \quad (11)$$

6.1.3 拉杆抗拉破坏模式

对于钢拉杆抗拉破坏模式,基于螺纹应力集中

效应,采用有效截面法计算杆体承载力

$$F_{\text{tensile}} = \frac{\pi d_1^2}{4} \sigma_u = 0.25\pi(d - 1.083P)^2 \sigma_u \quad (12)$$

6.2 理论计算与实验结果对比

通过钢拉杆套筒节点的破坏模式和理论计算,建立3种破坏模式临界条件判断方程。

$$F_u = \min \begin{cases} \frac{0.671\pi l^2 (d - 1.083P) \sigma_u}{l + 4P} \\ 0.95\pi d^2 \xi(1 + \xi) \sigma_u \\ 0.25\pi(d - 1.083P)^2 \sigma_u \end{cases} \quad (13)$$

根据方程模型,对理论结果和实验数据进行对比,如图15、图16所示。在不同拧入深度与套筒壁厚比,理论计算与试验结果误差在4%内,计算值与实测值吻合较好,验证了理论模型的可靠性。对于

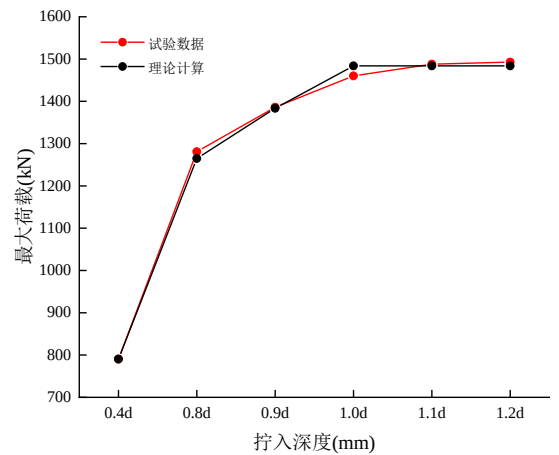


图 15 拧入深度理论值与实际结果对比

Fig. 15 Comparison between the theoretical value of screwing depth and the actual result

试验结果与理论模型的误差,可能的来源包括:1)界面摩擦非线性,实际接触面摩擦系数与模型假设存在偏差;2)轧制方向与加载轴夹角影响局部屈服强度分布;3)螺纹加工的误差导致实际值与理论计算的差异。

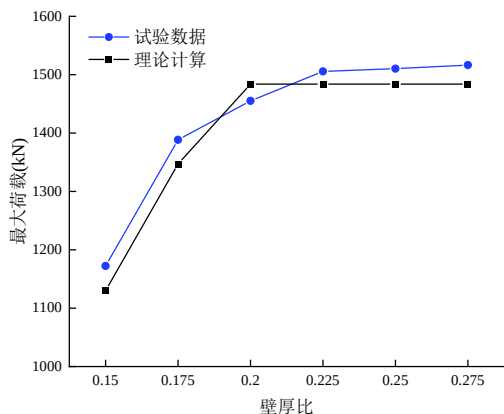


图 16 筒壁厚比理论值与实际结果对比

Fig. 16 Comparison between the theoretical value of wall thickness ratio and the actual result

7 结论

1)当拧入深度不足 $1.0d$ 时,界面剪切应力集中,导致螺纹根部过早发生剪切破坏;拧入深度增大时,破坏模式转为杆体颈缩拉伸破坏。试验数据与理论分析表明,承载力与塑性变形能力随拧入深度的增大呈非线性增长趋势,最小安全拧入深度 $1.0d$ 是保障连接节点安全的最小阈值。

2)当壁厚比低于 0.225 时,套筒与拉杆的界面约束不足引发套筒母材提前拉断,形成典型脆性断裂特征;高于临界壁厚比 0.225 时,套筒刚度增强显著优化了应力再分布能力,促使破坏模式向杆体颈缩延性破坏转变。钢拉杆最大承载力和变形随着套筒壁厚比的增大而增大,达到最小安全壁厚比 0.225 后力学性能保持稳定。

3)分析钢拉杆套筒节点的破坏模式,并结合试验结果与有限元分析对比,对节点承载力进行理论推导,以此建立钢拉杆套筒连接节点的承载力计算模型。

4)针对实际工程中循环荷载及长期服役的耐久性需求,参考相关规范中结构设计的安全系数,建议采用 $1.1d$ 的拧入深度,作一定的安全储备,同时采用 0.225 的套筒壁厚比作为设计下限值,既可满足承载力需求又可控制材料成本。

参考文献

[1] 杨建国,叶建国,祁海坤,等. 高强度建筑钢拉杆的应用与研究[J]. 钢结构, 2005, 20(5): 26-28.

YANG J G, YE J G, QI H S, et al. Technical application and investigation of the high strength constructional steel Tie rod [J]. Steel Construction, 2005, 20(5): 26-28. (in Chinese)

[2] 刘红波,杨智锋,周婷,等. 基于 Revit 二次开发与深度学习的钢框架节点智能审图[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 43-55.

LIU H B, YANG Z F, ZHOU T, et al. Intelligent drawing review of steel frame structure joints based on Revit secondary development and deep learning [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(7): 43-55. (in Chinese)

[3] 祁海坤. 工程用高强度钢拉杆的研制与应用[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊 1): 359-361.

QI H S. The manufacture and application of high strength steel tie rod for engineering [J]. Industrial Construction, 2005, 35(Sup 1): 359-361. (in Chinese)

[4] ZHANG C X, SUN R H, YIN J P, et al. Failure behaviours of steel/aluminium threaded connections under impact fatigue [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109473.

[5] DE FALCO A, RESTA C, SEVIERI G. Sensitivity analysis of frequency-based tie-rod axial load evaluation methods [J]. Engineering Structures, 2021, 229: 111568.

[6] DUAN W, JOSHI S. Failure analysis of threaded connections in large-scale steel tie rods [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 2008-2018.

[7] 李思遥,李雄彦,薛素铎. 套筒式节点受拉力学性能试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 23-26, 65.

LI S Y, LI X Y, XUE S D. Experimental and finite element research on mechanical behavior of threaded-sleeve connection in tension [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 23-26, 65. (in Chinese)

[8] CHEN Z H, LU J, LIU H B, et al. Experimental study on the post-fire mechanical properties of high-strength steel tie rods [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 311-329.

[9] 刘涛,熊家鑫,范重,等. 钢拉杆受力性能试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(增刊 1): 126-135, 157.

LIU T, XIONG J X, FAN Z, et al. Experimental study on mechanical properties of steel Tie rods [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(Sup 1): 126-135, 157. (in Chinese)

[10] 黄山,李超群,王炜萍,等. 端部非镦粗高强度钢拉杆节点设计及试验研究[J]. 中国建筑金属结构, 2023(1): 14-18.

HUANG S, LI C Q, WANG W P, et al. Design and experimental study on joint of high strength steel tie rod with non-upsetting end [J]. China Construction Metal Structure, 2023(1): 14-18. (in Chinese)

[11] 石永久,王萌,王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构

- 关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 293-300.
- SHI Y J, WANG M, WANG Y Q. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 293-300. (in Chinese)
- [12] 向虎, 邱剑, 程畅, 等. 某各层弱相关悬挂结构抗震设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(15): 73-77, 59.
- XIANG H, QIU J, CHENG C, et al. Seismic design of a suspension structure with weakly related of each floor [J]. Building Structure, 2023, 53(15): 73-77, 59. (in Chinese)
- [13] 向虎, 邱剑, 阳帅, 等. 某各层弱相关悬挂结构施工模拟分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(15): 78-83.
- XIANG H, QIU J, YANG S, et al. Construction simulation analysis of a suspension structure with weakly related of each floor [J]. Building Structure, 2023, 53(15): 78-83. (in Chinese)
- [14] 向虎, 程畅, 邱剑, 等. 某各层弱相关悬挂结构转换桁架设计及关键节点分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(15): 67-72.
- XIANG H, CHENG C, QIU J, et al. Design of transfer truss and analysis of key joints of a suspension structure with weakly related of each floor [J]. Building Structure, 2023, 53(15): 67-72. (in Chinese)
- [15] 钢拉杆: GB/T 20934—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Steel tie rod: GB/T 20934—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [16] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [17] 周婷, 王子轩, 王双, 等. 内嵌式 ALC 墙板钢框架结构的抗裂性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(3): 289-300.
- ZHOU T, WANG Z X, WANG S, et al. Experimental study on crack resistance of steel frames with ALC infilled walls [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(3): 289-300. (in Chinese)
- [18] 普通螺纹 基本牙型: GB/T 192—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General purpose metric screw threads—Basic profile: GB/T 192—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [19] 普通螺纹 直径与螺距系列: GB/T 193—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General purpose metric screw threads—General plan: GB/T 193—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [20] WU Q Y, WANG H J, QIAN H L, et al. Effect of insufficient screwing depth of bolt on mechanical behavior of bolt-ball joint and stability of single-layer reticulated shell [J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110590.
- [21] LU S K, HUA D X, LI Y, et al. Stiffness calculation model of thread connection considering friction factors [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019 (1): 8424283.
- [22] 陈冬冬, 张子航, 李伟, 等. 考虑应力不均匀分布的索夹螺杆轴力超声检测[J]. 中国公路学报, 2025, 38(6): 160-169.
- CHEN D D, ZHANG Z H, LI W, et al. Ultrasonic-based axial force detection of clamp bolt considering uneven stress distribution [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(6): 160-169. (in Chinese)
- [23] 黄炳生, 付宜东, 陈烨, 等. 螺栓球节点高强度螺栓拧入深度试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(4): 28-32.
- HUANG B S, FU Y D, CHEN Y, et al. Experimental study on the depth of high strength bolt into bolt-sphere joint [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18 (4): 28-32. (in Chinese)
- [24] 闫巍, 陈志华, 李砚波, 等. 铝合金螺栓球节点螺纹轴向力分布研究[J]. 空间结构, 2023, 29(2): 43-52.
- YAN W, CHEN Z H, LI Y B, et al. Research on axial force distribution of screw threads of aluminum alloy bolted ball joint [J]. Spatial Structures, 2023, 29(2): 43-52. (in Chinese)
- [25] 成大先. 机械设计手册 [M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- CHENG D X. Handbook of mechanical design [M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017. (in Chinese)

(编辑 XXX)