

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.04.004

基于 ANSYS 的 KKT 型相贯节点 承载力性能研究

秦林肖¹, 潘颖¹, 张鹏举²

(1. 上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 美钻能源科技(上海)有限公司, 上海 200941)

摘要:针对空间管节点几何形式很多、受力复杂、影响节点承载力性能的因素也比较多等问题,对实际工程中常见的空间 KKT 型相贯节点的极限承载力性能进行了研究。基于数值仿真,主要采用 ANSYS 软件对空间 KKT 型圆管相贯节点进行了非线性有限元分析,揭示了节点的承载力性能和破坏模式;着重分析和总结了重要几何参数对节点极限承载力的影响;将此类节点的极限承载力分析结果与规范中 T 型、K 型节点承载力计算公式进行比较分析。研究结果表明,节点的破坏模式大多属于主管管壁塑性破坏;T 型支管与主管外径比 β_1 、K 型腹管与主管外径比 β_2 、主管径厚比 γ 对节点极限承载力有主要影响;KKT 型相贯节点的极限承载力计算公式与 T 型、K 型节点承载力设计公式有些必然的联系。

关键词:空间 KKT 型相贯节点;承载力;有限元分析;破坏模式;几何参数

中图分类号:TU392.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)04-0013-06

Bearing Capacity Research of Multi-Planar KKT-Joints Based on ANSYS

QIN Linxiao¹, PAN Ying¹, ZHANG Pengju²

(1. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Diamond Energy Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: Multi-planar tubular joints have problems of various geometric forms, complicated loads, and many factors which influence the bearing capacity of the joints. For these problems, the bearing capacity of common multi-planar KKT-joints was discussed in practical engineering. Based on numerical simulation, nonlinear finite element analysis was mainly used in the ultimate strength on multi-planar KKT-joints by ANSYS. The bearing capacities and the failure modes were demonstrated. And then the influences of some important geometric parameters on the ultimate strength were analyzed and summarized. Based on the design formulas of the bearing capacities on T-joints and K-joints of the code, the computational formula of the ultimate bearing capacity on multi-planar KKT-joints was discussed. The results show that the failure modes mostly belong to plastic failure of the walls of the chord. The diameter ratio β_1 of T-branch to the chord, the diameter ratio β_2 of T-branch to the chord and the diameter-thickness ratio γ of the chord have major influences on the bearing capacity of the joints. The computational formula of the bearing capacity on KKT-joints has some positive connections with the design formulas of the bearing capacities on T-joints and K-joints.

Key words: Multi-planar KKT-joints; ultimate bearing capacity; finite element analysis; failure mode; geometric parameters

空间相贯节点是指几根钢管轴线不在同一平面内、采用直接焊接的方法连接在一起的节点。近些年

来,随着空间结构的不断发展、多维数控切割技术的发展、结构体系的多元化发展等,空间相贯节点在大跨度

收稿日期:2014-01-13;修回日期:2014-03-10

基金项目:上海工程技术大学研究生科研创新项目(A-0903-13-01006)

作者简介:秦林肖(1989),男,江苏如皋人,硕士研究生,主要研究方向为空间相贯节点设计与分析。E-mail:qlxyq123@126.com

结构中得到越来越多的应用。而在实际的钢管结构设计中,相贯节点承载力分析往往是衡量钢结构设计的重要指标之一,因为节点的破坏直接导致与之相连杆件的失效,从而使整个结构破坏^[1]。

对于空间 K 型系列节点,国内外许多学者^[2-11]做了广泛的试验研究和理论分析。其中,空间 KKT 型圆管节点是常见的 K 型系列节点之一。舒兴平^[12]、朱邵宁^[13]对 KKT 型节点做了足尺试验分析,并将试验结果、有限元分析计算结果和我国钢结构设计规范计算公式进行了比较分析。本文以此为参考,基于数值模拟仿真,结合我国钢结构设计规范,选取实际工程中的空间 KKT 型圆管相贯节点,建立合适的节点有限元模型,综合考虑材料非线性和几何非线性,对此类节点进行极限承载力分析,分析了空间 KKT 型圆管相贯节点极限承载力与一些基本几何参数的变化规律。并结合规范中 K 型、T 型节点承载力计算公式,探讨空间 KKT 型节点承载力计算公式与它们之间的联系。

1 分析模型

1.1 节点几何模型

本文所选取的空间 KKT 型圆管相贯节点以间隙型节点为主,其基本节点几何模型如图 1 所示。组成 2 组 K 型支管的 4 根支管称为腹管,T 型支管称为支管。

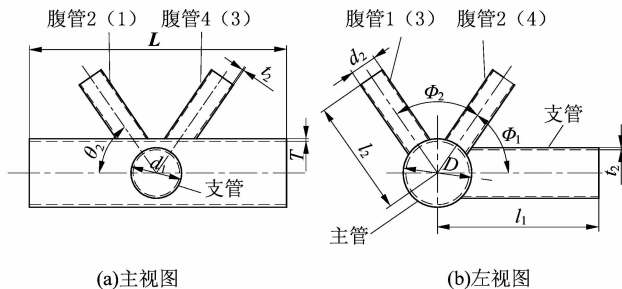


图 1 节点几何模型

Figure 1 Geometric model of KKT-joints

各基本几何参数如表 1 所示。其中, D, T, L 分别为主管的外径、壁厚、长度; d_1, t_1, l_1 分别为支管的外径、壁厚、长度,支管轴线与主管轴线的夹角为 θ_1 ($\pi/2$),与腹管 2、4 间的横向夹角为 Φ_1 ($\cos \Phi_1 = 1/\sqrt{3}$);4 根腹管各几何参数都相同, d_2, t_2, l_2 分别为腹管的外径、壁厚、长度,腹管轴线与主管轴线的夹角都为 θ_2 ($\cos \theta_2 = 1/\sqrt{3}$),相邻腹管间的横向夹角都为 Φ_2 ($\cos \Phi_2 = 1/3$)。表中未注明的单位均为 mm。 $\beta_1 = d_1/D$, $\beta_2 = d_2/D$ 。

表 1 节点几何参数

Table 1 Geometric parameters of KKT-joints

节点	D/mm	T/mm	β_1	β_2	t_1/mm	t_2/mm	L/mm	l_1/mm	l_2/mm
KKT	400		12	0.30	0.30	5	4	2 400	800
			13	0.35	0.35	8	5		
			14	0.40	0.40	10	8		
			15	0.45	0.45	12	10		
			16	0.50		15	12		

1.2 节点边界条件及加载方式

主管左边界按固定端考虑,右边界按滑动支座考虑,仅允许沿轴向运动。支管和腹管端都按自由端考虑。考虑自重,支管端、腹管端所受到的轴向力以均布线约束的形式等比例分级加载,直至结构破坏。如图 2 为节点受力俯视图。

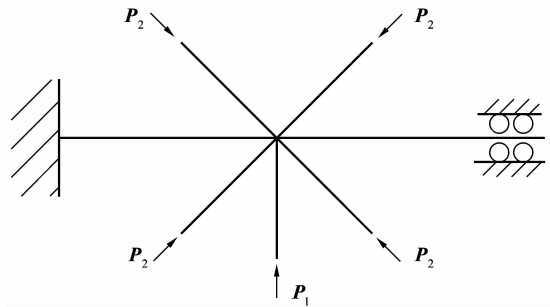


图 2 节点受力俯视图

Figure 2 Vertical view of the joints under load

1.3 节点单元和网格划分

采用 Shell181 单元^[14]模拟此类节点。Shell181 是一种三维四结点弹塑性壳单元,可以模拟平板和曲壳结构,每个单元具有 4 个节点和 6 个自由度,自由度包括空间 3 个方向的平动和 3 个方向的转动,具有大变形、应力刚化等非线性功能。

网格划分采用智能划分与人工划分相结合,对相贯区域网格进行细化。

1.4 节点材料性能及求解设置

钢管节点材料采用 Q345 钢(弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$,屈服强度 $f_y = 345$ MPa),假定为理想的弹塑性材料,服从 Von-Mises 屈服准则和相关流动准则,材料按双线性等向强化(BISO)考虑。本文不计垂直于中面的应力,忽略残余应力和初始缺陷的影响。考虑大变形效应,将 Newton-Raphson 迭代法、线性搜索技术、自动时间步长等收敛技术相结合,建立非线性平衡求解方法。收敛准则为不平衡力收敛准则。

1.5 节点有限元模型

用 ANSYS 软件模拟的空间 KKT 型圆管相贯节点有限元模型如图 3 所示。

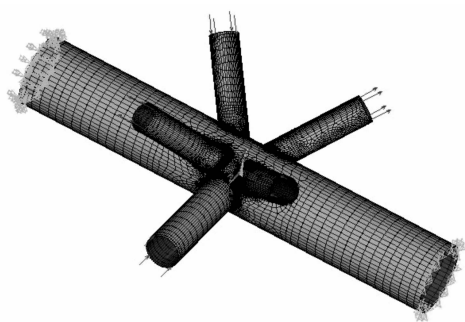


图3 节点有限元模型

Figure 3 FEA model

2 有限元计算分析

2.1 节点极限承载力的确定

用 ANSYS 软件对空间 KKT 型相贯节点进行非线性有限元分析时,取最终计算终止时所施加在腹管末端的轴力为节点的极限承载力。

2.2 节点受力过程分析及破坏模式确定

对空间 KKT 型相贯节点进行非线性有限元分析,取其中一组典型节点(基本几何参数为: $D=400\text{ mm}$, $T=15\text{ mm}$, $\beta_1=0.5$, $\beta_2=0.4$)进行描述节点受力全过程。通过后处理模块可以查看节点相贯区域应力变化过程。节点等效应力发展过程如图4所示,其中, P_i 为某一载荷子步下作用在腹管端的轴力, P_u 为最终节点发生破坏时作用在腹管端的轴力(i 取 $1, 2, \dots, 6$)。

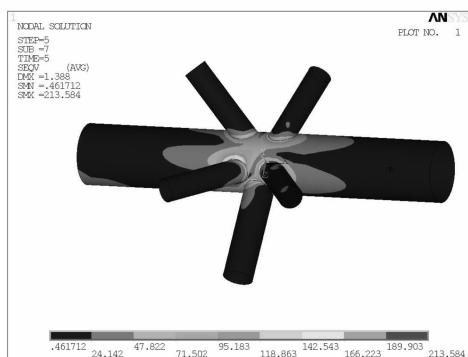
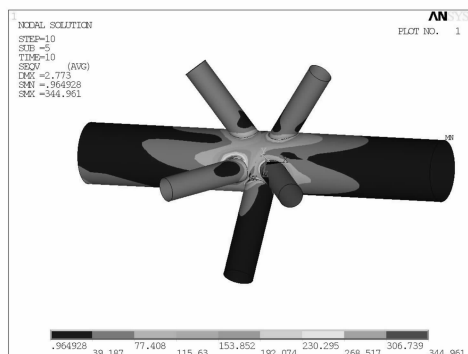
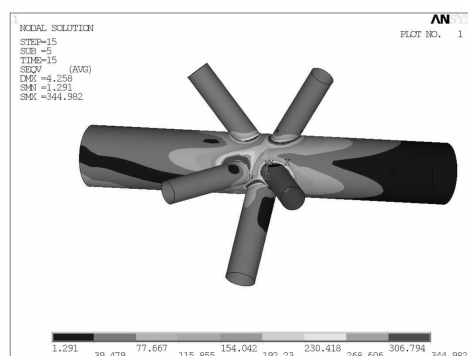
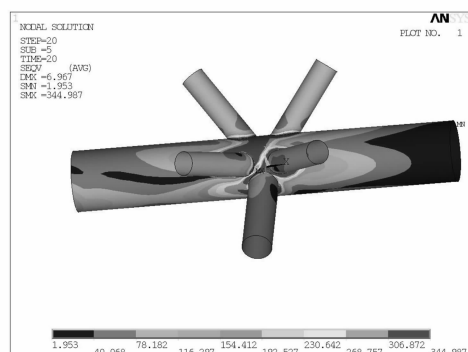
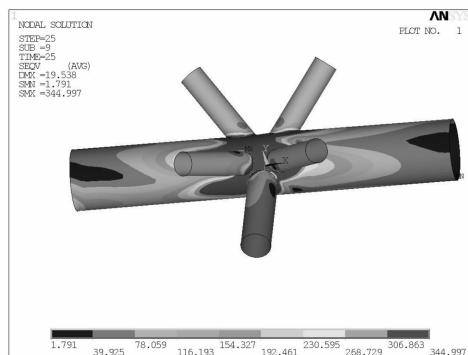
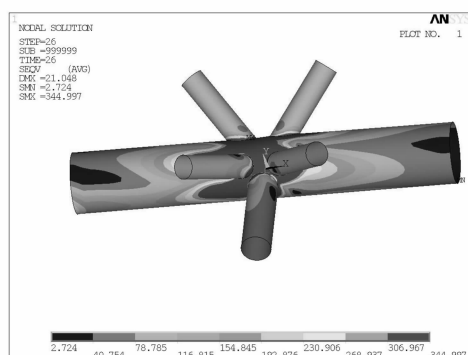
(a) $P_1/P_u=0.19$ (b) $P_2/P_u=0.38$ (c) $P_3/P_u=0.58$ (d) $P_4/P_u=0.77$ (e) $P_5/P_u=0.96$ (f) $P_6/P_u=1$

图4 空间 KKT 型相贯节点应力分布及扩展过程图

Figure 4 Stress distribution and expansion process of KKT-joints

结合图4分析可知,空间 KKT 型相贯节点首先在支管与主管相贯区域、腹管2与主管相贯区域发生屈服。腹管、支管端进一步加载,塑性区逐步向5根支管与主管的交汇区域全面发展,并逐步向相贯区外延伸。最后,5根支管与主管的交汇区域大部分发生屈服现象,计算终止,节点发生破坏。

图5给出了主管、支管、腹管的 Von Mises 等效应力随载荷步变化曲线。由图5可以得出,空间 KKT 型相贯节点从开始屈服到最终破坏,还有一段较长的塑性变形过程,可以说明管节点的塑性性能良好,具有相当高的安全储备。结合图4和图5分析,节点破坏时屈服位置位于5根支管与主管的相贯区域,且与节点的几何特性有密切联系。因此,在此组参数条件下,节点的破坏模式是主管管壁塑性破坏。

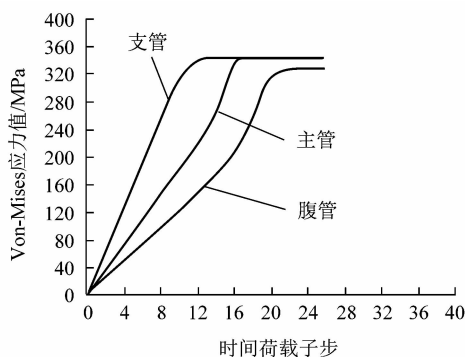


图5 主管、支管、腹管的 Von Mises 等效应力随载荷步变化曲线

Figure 5 Curve of Von-Mises equivalent stresses-load step

2.3 几何特性对节点极限承载力的影响

2.3.1 T型支管与主管外径比 β_1 的影响

在其他几何参数均不变的情况下,支管与主管外径比 β_1 (d_1/D)对空间 KKT 型节点极限承载力有显著影响。由图6(以 $D=400$ mm, $\beta_2=0.4$, $T=15$ mm, $t_1=12$ mm, $t_2=8$ mm的情况为例)可知,随着 β_1 的增大(主管外径不变,支管外径增大),节点相贯区域应力集中程度降低,节点极限承载力逐渐提高。因此可知,节点的极限承载力的变化与T型支管的外径有关。

2.3.2 K型腹管与主管外径比 β_2 的影响

在其他几何参数均不变的情况下,腹管与主管外径比 β_2 (d_2/D)对空间 KKT 型节点极限承载力有显著影响。由图7(以 $D=400$ mm, $\beta_1=0.5$, $T=15$ mm, $t_1=12$ mm, $t_2=8$ mm的情况为例)可知,随着 β_2 的增大(主管外径不变,腹管外径增大),节点刚度越大,沿相贯区域的应力分布均匀,应力集中程度降低,节点极限

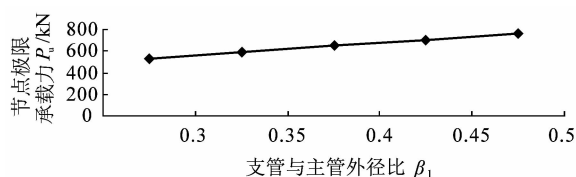


图6 节点极限承载力 P_u 随支管与主管外径比 β_1 的变化曲线

Figure 6 Curve of P_u - β_1

承载力也就越高。因此可知,节点的极限承载力的变化与K型腹管的外径也有关。

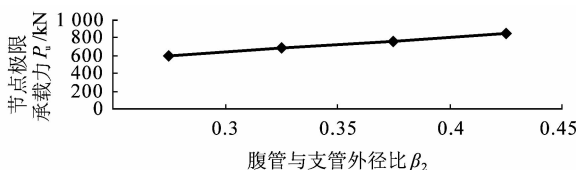


图7 节点极限承载力 P_u 随腹管与支管外径比 β_2 的变化曲线

Figure 7 Curve of P_u - β_2

2.3.3 主管径厚比 γ 的影响

在其他几何参数均不变的情况下,主管径厚比 γ (D/T)对空间 KKT 型节点极限承载力有显著影响。由图8(以 $D=400$ mm, $\beta_1=0.5$, $\beta_2=0.4$, $t_1=12$ mm, $t_2=8$ mm的情况为例)可知,随着 γ 的增大(主管外径不变,主管壁厚减小),主管的抗弯刚度减小,节点承载力降低。因此可知,节点承载力的变化与主管的壁厚有关系。

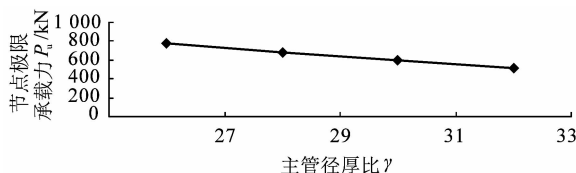


图8 节点极限承载力 P_u 随主管径厚比 γ 的变化曲线

Figure 8 Curve of P_u - γ

2.3.4 T型支管径厚比 γ_1 的影响

在其他几何参数均不变的情况下,T型支管径厚比 γ_1 (d_1/t_1)对空间 KKT 型节点极限承载力的影响很小。由表2(以 $D=400$ mm, $\beta_1=0.5$, $\beta_2=0.4$, $t_2=8$ mm的情况为例)可知,随着 γ_1 的增大(T型支管外径不变,支管壁厚减小),节点抗屈曲能力降低,但节点承载力几乎不变。因此,在选择T型支管壁厚时(在满足屈曲和失稳的条件下),可尽可能地选择壁厚薄一点的T型支管。

表2 T型支管径厚比 γ_1 对节点承载力 P_u 的影响Table 2 Effect of γ_1 to P_u

节点参数				γ_1	P_u/kN
D/mm	β_1	β_2	t_2/mm	(d_1/t_1)	
400	0.5	0.4	8	200/15	756.36
				200/12	771.12
				200/10	757.38
				200/8	764.16
				200/5	774.36

2.3.5 K型腹管径厚比 γ_2 的影响

与T型支管径厚比 γ_1 对空间KKT型节点极限承载力的影响相似,在其他几何参数均不变的情况下,K型腹管径厚比 $\gamma_2(d_2/t_2)$ 对节点极限承载力的影响很小,由表3(以 $D=400\text{ mm}$, $\beta_1=0.5$, $\beta_2=0.4$, $t_1=12\text{ mm}$ 的情况为例)可以看出。因此,在选择K型腹管壁厚时(在满足屈曲和失稳的条件下),也可尽可能地选择壁厚薄一点的K型腹管。

3 有限元计算结果与设计规范计算结果比较分析

根据分析几何特性对空间KKT型节点的极限承载力的影响,T型支管与主管外径比 β_1 、K型腹管与主管外径比 β_2 、主管径厚比 γ 对节点极限承载力有较大

表3 K型腹管径厚比 γ_2 对节点承载力 P_u 的影响Table 3 Effect of γ_2 to P_u

节点参数				γ_2	P_u/kN
D/mm	β_1	β_2	t_1/mm	(d_2/t_2)	
400	0.5	0.4	12	160/12	740.58
				160/10	801.06
				160/8	771.12
				160/5	781.38
				160/4	780.12

的影响,而T型支管径厚比 γ_1 、K型腹管径厚比 γ_2 对节点极限承载力几乎没有影响。

我国现行钢结构设计规范^[15](GB 50017-2003)中给出了T型、K型节点极限承载力计算公式。为了进一步分析和了解空间KKT型节点的承载力性能,将有限元分析计算得到的节点极限承载力与在相同基本几何参数条件下根据设计规范计算公式得到的T型、K型节点极限承载力值相比较,如表4所示。其中, P_{uT} 为KKT型节点中T型支管所受到的承载力, P_{cT}^{pj} 为在同种情况下按设计规范求出的T型节点承载力, P_{uK} 为KKT型节点中K型腹管所受到的承载力, P_K^{pj} 为在同种情况下按设计规范求出的K型节点承载力。

表4 有限元计算结果与设计规范计算结果比较

Table 4 Calculation results of the FE method compared with the calculation results of the design code

节点参数					γ	P_{uT}/kN	$P_{cT}^{\text{pj}}/\text{kN}$	$P_{uT}/P_{cT}^{\text{pj}}$	P_{uK}/kN	$P_K^{\text{pj}}/\text{kN}$	P_{uK}/P_K^{pj}
D/mm	β_1	β_2	t_1/mm	t_2/mm	(D/T)						
400	0.5	0.4	12	8	400/15	642.60	920.05	0.698	771.12	1 142.89	0.675
					400/14	569.00	812.60	0.700	682.80	1 024.92	0.666
					400/13	499.70	711.12	0.703	599.64	910.86	0.659
					400/12	428.40	615.70	0.696	514.08	801.04	0.641

由表4中 $P_{uT}/P_{cT}^{\text{pj}}$ 和 P_{uK}/P_K^{pj} 的比值,并结合前面分析的几何特性对空间KKT型节点的极限承载力的影响,可以得知空间KKT型相贯节点极限承载力计算公式与T型、K型节点承载力计算公式都有相关的联系。初步分析,空间KKT型节点极限承载力大约是T型节点承载力的0.7倍,大约也是K型节点承载力的0.66倍。此结论还需通过后续多次数值模拟和数据线性拟合来进行验证。

4 结论

本文主要用ANSYS软件对空间KKT型圆管相贯节点进行了非线性有限元分析,得出以下一些结论:

1) 本文分析的空间KKT型圆管相贯节点在最终发生破坏时,5根支管与主管的相贯区域大部分发生屈服现象,节点的破坏模式大多属于主管管壁塑性破坏。

2) T型支管与主管外径比 β_1 、K型腹管与主管外径比 β_2 、主管径厚比 γ 对节点极限承载力有主要影响,即对节点破坏起主要控制作用,而T型支管径厚比 γ_1 、K型腹管径厚比 γ_2 对节点极限承载力的影响很小。未考虑T型支管轴线与主管轴线的夹角 θ_1 、K型腹管轴线与主管轴线的夹角 θ_2 、荷载路径、边界条件等对节点极限承载力的影响。因此还需进一步探讨空间KKT型相贯节点与一些重要参数之间的关系。

3) 空间KKT型圆管相贯节点的极限承载力计算公式,与T型、K型节点承载力设计公式有些必然的联系。可在T型、K型节点承载力设计公式的基础上,初步通过多次数值模拟和数据线性拟合推导出空间KKT型圆管相贯节点的极限承载力计算推荐公式。

(下转第21页)