

文章编号:1673-9469(2012)02-0020-04

## 中美欧圆钢管相贯节点设计方法比较

隋炳强<sup>1</sup>, 罗兴隆<sup>1</sup>, 王发强<sup>2</sup>, 吴天河<sup>1</sup>

(1. 上海宝冶集团, 上海 201908; 2. 山东诸城长运路桥工程有限公司, 山东 诸城 262200)

**摘要:**对中国、美国和欧盟钢管节点设计规范做了深入研究, 从节点分类、破坏模式和极限承载力方面进行了详细的分析比较, 并结合工程实例给出了设计建议: 增大壁厚是提高节点承载力的最有效的方法之一, 增大支管与主管直径的比值可提高节点承载力。

**关键词:**相贯节点; 圆钢管; 设计规范; 比较

**中图分类号:** TU391

**文献标识码:** A

### Comparison of design method of circular steel tubular welded joints in China, the United States and the EU

SUI Bing-qiang<sup>1</sup>, LUO Xing-long<sup>1</sup>, WANG Fa-qiang<sup>2</sup>, WU Tian-he<sup>1</sup>

(1. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 201908, China; 2. Shandong Zhucheng Changyun Road and Bridge Corp., Ltd., Shandong Zhucheng 262200, China)

**Abstract:** In this paper, design specifications of circular steel tubular welded joints in China, United States and EU are studied thoroughly. With detailed analysis and comparison about the joints classification, failure mode and ultimate bearing capacity of joints, the design proposals are presented combined with practical examples. The results show that the wall thickness increased is one of the most effective way to improve the joint strength and the joint strength can be improved by increase the diametrical ratio between the branch pipe and main pipe.

**Key words:** welded joints; circular steel tube; design specifications; comparison

钢管截面形状及截面材料分布合理, 与开口截面相比, 具有各向等强, 抗扭刚度大, 稳定承载能力高, 端头封闭后抗腐蚀性能好等优点, 对受风载的结构, 钢管结构所具有的光滑表面比用其它型钢制造的类似结构所引起的风载荷要小得多。而且圆管截面的表面积仅为相类似的工字形截面的表面积的2/3, 这样会大大减少涂漆与防火保护的費用<sup>[1-2]</sup>。钢管相贯节点中各杆件直接焊接, 强度高, 绕流条件好, 截面封闭抗腐蚀性强, 与大气接触表面小, 易于防护。在清洁要求较高的场合, 如化工或食品加工建筑, 钢管相贯节点结构较容易除尘, 且没有突缘、连接部件及其它容易积聚灰尘的地方<sup>[3-4]</sup>。基于以上优点, 相贯节点已广泛应用于网架、网壳、塔架和海洋平台等工程结

构中。

本文对中国钢结构设计规范(GB500017-2003)<sup>[4]</sup>、美国钢结构设计规范<sup>[5]</sup>(ANSI/AISC 360-05)、美国焊接规范<sup>[6]</sup>(AWS D1.1/1.1M 2008)和欧盟钢结构设计规范<sup>[7]</sup>(Eurocode 3: BS EN 1993-1-8:2005)中的圆管相贯节点部分进行分析比较, 并结合工程实例提出了设计建议。

### 1 节点分类及其破坏模式

#### 1.1 节点分类

1) 平面单一节点: 相贯节点由一个或多个直接焊接到连续主管上的支管组成, 依据连接处负

载的受力可以分为K型连接(包括N型),Y型连接(包括T型),或交叉形(也就是X型)连接,而并不依赖于物理连接。

**Y型节点(包括T型):**当支管中的冲击荷载( $Pr \sin \theta$ )由主管剪力平衡,且支管垂直于主管,则该节点将为T形连接,否则就是Y形连接。此种节点形式可看成是K型节点的特例。

在K型连接中,其中一个支管只有极少荷载或没有荷载,这种连接就可以看作Y型连接。

如果在一个K(或N)型连接处的缺口处间隙变大,超过了偏心距极限允许值,K型连接应该被视为两个独立的Y型连接。

**X型节点:**当支管上垂直于弦杆横截面的冲击荷载( $Pr \sin \theta$ )通过弦杆构件传递,并且是通过两端的支管构件平衡,这种节点是X形节点。

**K型节点:**如果同一侧两根支管在垂直于弦杆横截面方向的分力( $P \sin \theta$ )基本保持平衡(差额在20%以内),则节点为K形节点。N形节点可以认为是K形节点的一种。

2)平面复合节点:当节点中部分支管为K型连接,以及部分为T型、Y型或者X型连接时,此种节点形式可认为是复合节点,具体的节点形式根据支管受力确定如图1中的K-X型连接。

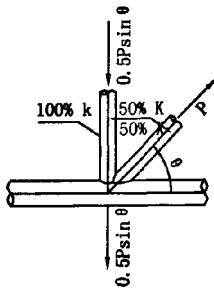


图1 K-X型节点  
Fig. 1 K-X joint

3)空间节点:平面节点支管和弦杆的中心线应该在同一个平面内,当一个节点有两个或以上的支管,且支管与弦杆的中心线不在同一个平面,这样的节点称为空间节点。

当一个节点由不在同一平面内两个T型支管组成时,该节点称为TT型节点。

当一个节点由不在同一平面内4个X型支管组成时,该节点称为XX型节点。

当一个节点由不在同一平面内4个K型支管组成时,该节点称为KK型节点。

## 1.2 节点破坏模式

国外的新近研究成果表明,对于以主管平壁形成塑性铰线的破坏模式,应考虑两种极限状态的验算。建议取令主管表面的局部凹(凸)变形达主管宽度 $b$ 的3%时的支管内力为节点的极限承载力(承载力极限状态);取局部变形为1% $b$ 的支管内力为节点正常使用极限状态的控制力。至于由哪个极限状态起控制作用,应视承载力极限状态的承载力与正常使用极限状态的控制力的比值 $K$ 而定。若 $K$ 值小于折算的总安全系数,则承载力极限状态起控制作用,反之由正常使用极限状态起控制作用。分析表明,当 $\beta < 0.6$ ,  $b/t > 15$ 时,一般由正常使用极限状态局部变形( $\delta = 0.01b$ )控制<sup>[4]</sup>。节点破坏模式主要有以下6种:

- a) 弦杆表面塑性失效。
- b) 弦杆侧壁破坏。
- c) 弦杆在间隙处剪切破坏。
- d) 弦杆表面冲剪失效。
- e) 有效宽度失效(腹杆拉断或焊缝破坏)。
- f) 支管或主管局部失稳。

## 2 节点极限承载力

### 2.1 节点承载力影响因素

影响节点极限承载力的因素有杆件尺寸(径厚比),支管与主管的夹角 $\theta$ ,主管轴向应力情况,以及支管受压还是受拉等<sup>[7-8]</sup>。

为计算径厚比对节点强度的影响,中美欧钢结构规范均采用 $\gamma^{0.2} = (d/t)^{0.2}$ 来考虑。

试验表明,支管轴心力垂直于主管方向的分力是造成节点破坏的主要因素。支管倾角 $\theta$ 越小,支管轴心力的垂直分力也越小,节点承载力就越高。中美欧规范中用 $1/\sin \theta$ 来表达支管倾角 $\theta$ 对节点强度的影响,也就是说仅考虑支管轴力垂直分力作用。

圆管节点的破坏多由于节点处过大的局部变形而引起的。当主管受轴向压应力时,将促使节点的局部变形变大,节点强度随主管压应力增大而降低,而当主管受轴向拉应力时,可减小节点局部变形,此时节点承载力比主管应力为0时约提高3%~4%。设主管的应力比为 $U$ ,中美欧设计规范均采用 $\Psi_n = Q_f = k_p = 1 - 0.3U - 0.3U^2$ 来考虑主管应力的影响<sup>[4-6]</sup>。

当支管承受压力时,节点的破坏主要由主管

壁的局部屈曲引起的,而当支管承受拉力时主要是强度破坏。

## 2.2 节点承载力

Y-型节点(包括T型):中国钢结构设计规范(GB50017-2003)受压支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{cr}^p = \frac{11.51}{\sin\theta} \left(\frac{d}{t}\right)^{0.2} \psi_n \psi_d t^2 f$$

受拉支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{cr}^p = \begin{cases} \beta \leq 0.6, 1.4N_{cr}^p \\ \beta > 0.6, (2-\beta)N_{cr}^p \end{cases}$$

美国钢结构设计规范(ANSI/AISC 360-05)计算时不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } P_n = \frac{F_y t^2 [3.1 + 15.6\beta^2] \gamma^{0.2}}{\sin\theta} Q_f$$

$$\text{冲剪破坏 } P_n = 0.6F_y t \pi D_b \frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta}$$

美国焊接规范(AWS D1.1/1.1M 2008)计算时同样不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } P_u = \frac{t_c^2 F_{y0} [6\pi\beta Q_g] Q_f}{\sin\theta}$$

$$\text{冲剪破坏 } P_u \leq \frac{\pi d_b t_c F_{y0} / \sqrt{3}}{\sin\theta}$$

欧盟钢结构设计规范(Eurocode 3: EN 1993-1-8: 2005(E))计算时不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0^2 [2.8 + 14.2\beta^2] \gamma^{0.2}}{\sin\theta} k_p$$

$$\text{冲剪破坏 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin\theta}{2\sin\theta}$$

X-型节点:中国钢结构设计规范(GB50017-2003)受压支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{cx}^p = \frac{\hat{f}_t^2 [5.45 / (1 - 0.81\beta)] \psi_n}{\sin\theta}$$

受拉支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{ix}^p = 0.78 \left(\frac{d}{t}\right)^{0.2} N_{cx}^p$$

美国钢结构设计规范(ANSI/AISC 360-05)计算时不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } P_n = \frac{F_y t^2 [5.7 / (1 - 0.81\beta)]}{\sin\theta} Q_f$$

$$\text{冲剪破坏 } P_n = 0.6F_y t \pi D_b \frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta}$$

美国焊接规范(AWS D1.1/1.1M 2008)计算

时同样不分拉压支管,取以下三式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } P_u = \frac{t_c^2 F_{y0} [6\pi\beta Q_g] Q_f}{\sin\theta}$$

$$\text{冲剪破坏 } P_u \leq \frac{\pi d_b t_c F_{y0} / \sqrt{3}}{\sin\theta}$$

$$\text{整体破坏 } P_u = \frac{F_y t_c^2 (1.9 + 7.2\beta)}{\sin\theta} Q_f Q_g$$

欧盟钢结构设计规范(Eurocode 3: EN 1993-1-8: 2005(E))计算时不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0^2 [5.2 / (1 - 0.8\beta)]}{\sin\theta} k_p$$

$$\text{冲剪破坏 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta}$$

K-型节点:中国钢结构设计规范(GB50017-2003)受压支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{cx}^p = \frac{11.51 \hat{f}_t^2 \left(\frac{d}{t}\right)^{0.2} \psi_n \psi_d \psi_a}{\sin\theta_c}$$

受拉支管在管节点处的承载力设计值为

$$N_{ix}^p = \frac{\sin\theta_c}{\sin\theta_i} N_{cx}^p$$

美国钢结构设计规范(ANSI/AISC 360-05)计算时取以下两式中的最小值。

弦杆塑性破坏

$$P_n = \begin{cases} F_y t^2 [2.0 + 11.33D_b/D] Q_g Q_f / \sin\theta_c & (\text{受压支管}) \\ (P_n \sin\theta_c)_{\text{受压支管}} / \sin\theta_i & (\text{受拉支管}) \end{cases}$$

$$\text{冲剪破坏 } P_n = 0.6F_y t \pi D_b \frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta}$$

美国焊接规范(AWS D1.1/1.1M 2008)计算时同样不分拉压支管,取以下三式中的最小值。

$$\text{弦杆塑性破坏 } P_u = \frac{t_c^2 F_{y0} [6\pi\beta Q_g] Q_f}{\sin\theta}$$

$$\text{冲剪破坏 } P_u \leq \frac{\pi d_b t_c F_{y0} / \sqrt{3}}{\sin\theta}$$

欧盟钢结构设计规范(Eurocode 3: EN 1993-1-8: 2005(E))计算时不分拉压支管,取以下两式中的最小值。

$$\text{受压支管 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0^2 [1.8 + 10.2d_1/d_0] k_p k_g}{\sin\theta_c}$$

$$\text{受拉支管 } N_{2,Rd} = N_{1,Rd} \sin\theta_c / \sin\theta_i$$

$$\text{冲剪破坏 } N_{1,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta}$$

从以上公式对比中可以看出,美国钢结构设计规范(ANSI/AISC 360-05)和欧盟钢结构设计规范 Eurocode3 表达形式基本一致。

### 3 算例

本文以科威特中央银行一个简单的 K-型相贯节点为例,按中美欧设计规范进行计算并对其结果进行分析比较。

节点尺寸:主管直径为 219 mm,壁厚为 12.5 mm,支管直径为 139 mm,壁厚为 6 mm,支管 1 与

主管的夹角为  $19^\circ$ ,支管 2 与主管的夹角为  $21^\circ$ 。

材料:钢材的屈服强度为  $F_y = f_{y0} = 345 \text{ N/mm}^2$ ,设计强度为  $f = 310 \text{ N/mm}^2$ ,AWS 规定屈服强度  $F_{y0} = 300 \text{ N/mm}^2$ 。

设计荷载:主管所受的轴压力为 480 kN,支管 1 所受轴压力为 120 kN,支管 2 所受轴拉力为 109 kN。计算结果见表 1。

表 1 K 型节点计算结果对比  
Tab. 1 K - Joint calculation results

	弦杆塑性破坏/kN		冲剪破坏/kN		设计承载力/kN	
	受压支管	受拉支管	受压支管	受拉支管	受压支管	受拉支管
中国钢结构规范	1 926.49	1 750.16	1 926.49	1 750.16	1 926.49	1 750.16
美国钢结构规范	1 987.52	1 805.61	6 712.08	5 676.72	1 987.52	1 805.61
美国焊接规范	1 753.24	1 592.77	2 758.78	2 506.28	1 753.24	1 592.77
欧盟钢结构规范	1 789.18	1 625.42	6 798.63	5 749.9	1 789.18	1 625.42

从表 1 中可以看出,中美钢结构规范设计承载力较为接近,中国规范略低;欧盟钢结构规范与美国焊接规范计算结果较接近,美国焊接规范设计承载力略小,综合上述四部规范结果来看,美国焊接规范设计承载力最低,也最为保守。

### 4 结论

1)从设计思想和公式表达形式看,美国钢结构规范和欧盟钢结构规范基本一致;从极限承载力来看,中美钢结构规范计算结果较接近,美国焊接规范和欧盟钢结构规范接近,其中美国焊接规范计算结果最为保守,设计承载力最低。

2)从极限承载力表达式看,主管直径和壁厚是影响节点承载力的主要因素,在直径一定的前提下,增大壁厚能使节点刚度增大,是提高节点承载力的最有效的方法之一。

3)节点的极限承载力还与支管和主管的直径比  $\beta$  有关,随着  $\beta$  的增大节点承载力也增大,因此增大支管与主管直径的比值是提高节点承载力更有效的方法。

4)支管壁可以薄一些。因为其壁厚与节点承载力无关,在保证焊缝的基础上,可以采用较薄的支管。

5)间隙连接无论是焊缝设计还是杆件的制作、定位及焊接均比搭接节点易于操作,建议尽可能采用间隙节点。

#### 参考文献:

- [1] 王晓怡. 大尺寸 K 型相贯节点的研究[D]. 南京:东南大学,2000.
- [2] 朱庆科. K 型圆钢管相贯节点极限承载力有限元分析[D]. 广州:华南理工大学,2002.
- [3] 王伟,陈以一. 圆钢管相贯节点局部刚度的参数公式[J]. 同济大学学报,2003,31(5):515-519.
- [4] GB50017-2003,钢结构设计规范[S].
- [5] AWS D1. 1/D1. 1M:2008. Structural Welding Code Steel (21th Edition)[S].
- [6] ANSL/AISC 360-05,2008. Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [7] Eurocode 3; Design of steel structures; Part 1-8; Design of joints (BS EN 1993-1-8;2005)[S].
- [8] Marshall, P. W. and Luyties, W. H. "Allowable stresses for fatigue design." [C]. Proceedings of The 3rd International Conference on The Behavior of Offshore Structures. Boston; August 1982.
- [9] Marshall, P. W. Designing tubular connections with AWS D1. 1[S].

(责任编辑 刘存英)