

圆钢管销铰连接中端板的受力性能和强度计算

孟宪德¹, 陈以一¹, 杜纯领²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司, 上海 200031)

摘要: 本文对圆钢管销铰连接中端板的力学性能进行了研究。建立了端板的简化力学模型, 对端板的受力机理进行了探讨。建立了便于使用的端板承载力计算公式, 根据建立的 100 个有限单元参数模型的线弹性计算结果, 给出了计算公式中各系数的计算表格, 给出了表格的使用方法和算例。最后对计算表格的有效性进行了评价, 并得出一些对此类节点设计有参考价值的结论。

关键词: 钢管节点; 支座节点; 端板; 承载力

中图分类号:

文献标识码: A

Ultimate Capacity of Unstiffened Cover-Slab of Tubular Structure Using In the Supporting Joint

Meng Xiande¹, Chen Yiyi¹, Du Chunling²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Arup International Consultants (Shanghai) Co. Ltd, Shanghai 200031, China)

Abstract: Ultimate capacity of unstiffened cover-slab of tubular structure using in the supporting joint is researched in the paper. The mechanical principle of the unstiffened cover-slab is discussed, and the mechanical models are established. Based on the model, the formulas of bearing capacity are recommended. According to the results of finite element analysis of 100 models which vary with the geometrical parameters, two handy tables of the factors in the bearing capacity formulas are established. And the applying method of the tables is given by an example. Finally the evaluation on validity of the tables is given, and some valuable conclusions are drawn from the tables.

Keywords: tubular joint; supporting joint; cover-slab; ultimate capacity.

1 简介

在管结构中, 经常采用图 1 所示端部节点: 钢管端部封焊一块圆形端板, 端板外侧立焊一块耳板, 耳板通过销栓与支座连接。当此种节点应用于钢管承受轴力为主的工况时, 需要验算端板的强度。端板的强度验算包括承载力极限状态验算和考虑变形的正常使用极限状态验算。但关于端板的强度计算在工程类和研究类文献中未见记录。本文建立了端板的简化力学模型, 对端板的受力机理进行了探讨。根据建立的 100 个壳单元有限元参数模型, 给出端板强度设计使用的表格供设计人员参考。

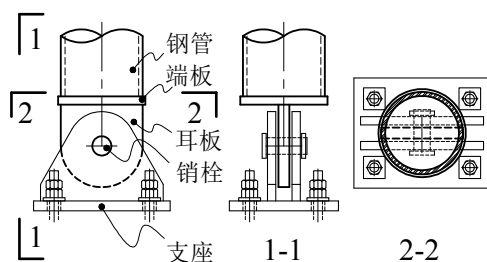


图 1 圆钢管销铰连接

2 受力机理分析

如果将耳板对端板的反力简化为均布荷载, 钢管对端板的约束简化为简支支座, 端板的受力状态则可简化为力学模型一, 如图 2 所示。实际结构中, 端板直径大于钢管直径 (图 1), 分析中可视端板直径等同于钢管直径 d 。由模型一可知, 端板直径 d 变大则在相同的荷载 q 下端板内弯曲内力变大; 端板厚度 t_p 变小则在相同的弯曲内力下弯曲应力变大。

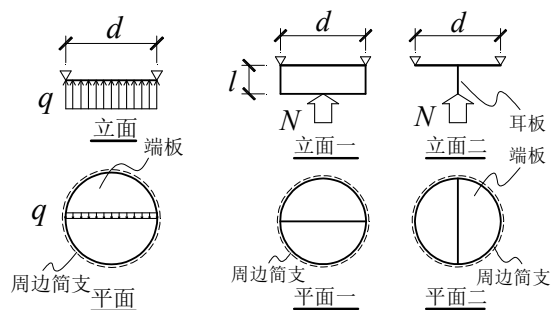


图 2 端板力学模型一

图 3 端板力学模型二

耳板的存在使端板平面外受弯受到附加约束, 因此实际上耳板对端板的反力不为均布线荷载。如果考虑耳板对端板的约束, 钢管对端板的约束仍然简化为简支支座, 建立力学模型二, 如图 3 所示。

由模型二可知,如果耳板刚度与端板刚度之比趋向于无穷大,则端板的内力(应力)和挠度将趋于零,因此耳板存在对端板的内力分布影响较大。

钢管对端板的约束属于弹性约束。如果端板所受荷载为中心对称荷载,则钢管对端板的支承可简化为简支支座,否则需考虑钢管的有限刚度对端板受力的影响。考虑钢管的弹性约束,建立空间力学模型三,进一步简化为平面模型四,如图4所示。

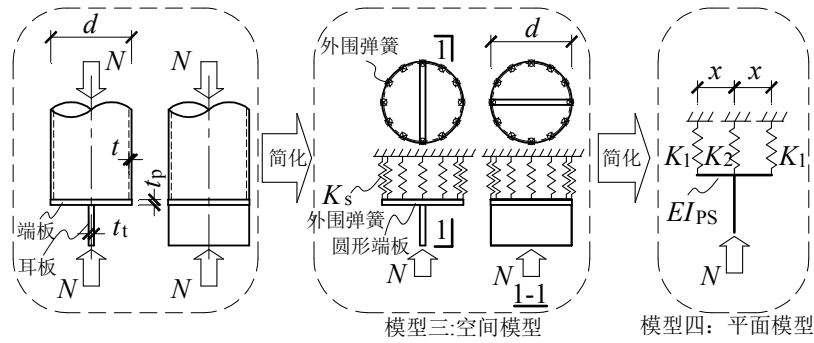


图4 端板力学模型

由模型四可知,端板的内力与弹簧刚度(K_1 、 K_2)、端板刚度、耳板刚度有关,可得出如下结论:

(1) 相同的端板刚度和耳板刚度,如果弹簧刚度变小则端板的内力(应力)变大。(2) 相同的弹簧刚度和耳板刚度,如果端板刚度变小则端板的内力(应力)变小。

3 参数分析研究

3.1 计算公式

有限单元计算已广泛应用于钢管节点的承载力、应力场、应力集中分析中,与试验结果比较,表明其具有良好的精度,采用此方法进行参数分析是一种快捷、实用的方法^[1]。本文采用有限单元的方法建立端板的参数模型,根据有限元参数分析结果建立端板弹性应力和挠度的计算表格。

端板的最大弯曲应力 $\sigma_{\max}$ 采用式(1)表达:

$$\sigma_{\max} = \alpha \frac{N}{t_p^2} \quad (1)$$

参照圆形薄板的弹性挠度公式^[2],端板最大相对挠度 $\bar{v}_{\max}$ 采用:

$$\bar{v}_{\max} = \frac{v_{\max}}{d} = \beta \frac{N d}{E t_p^3} \quad (2)$$

其中 α 为应力系数, β 为挠度系数, N 为钢管轴力, t_p 为端板厚度, d 为钢管外径, E 为端板钢材的弹性

模量。

α 和 β 与端板、耳板、钢管的几何参数有关,即与端板径厚比(d/t_p)、耳板宽高比(d/l)、耳板端板厚度比(t/t_p)、钢管径厚比(d/t)有关,其中耳板高度 l 指销轴中心点与端板的距离。

3.2 参数模型

参照工程中常用尺寸,选取基本可以覆盖常用

管节点的范围建立有限单元参数模型。参数取值范围为: d/t_p : 7.5、10、15、25、35; t/t_p : 0.5、1.0、1.5、2.5; d/t : 10、20、30、40、60。模型简图如图5所示。

在参数模型中耳板的宽高比 d/l 取常值2,原因如下:设销轴中心的集中力沿 45° 扩散,当耳板的高度 l 大于 $0.5d$,集中力能在耳板全宽范围传递到钢管上;其次在通常情况下考虑到支座耳板的抗剪承载力,耳板的高度 l 一般大于管径 d 的0.5倍;而由前述机理分析知,其余参数不变时耳板越高端板的应力越小,从安全考虑采用 d/l 为2进行端板的参数分析。

在参数模型中钢管长度 L 取 $2d$ 。耳板传递给钢管的内力经过 $2d$ 的长度钢管截面应力基本达到均匀。在远离端板的钢管一侧采用简支的支座条件。

有限单元分析首先采用实体单元模型与壳单元模型进行比较,结果基本相同。为节省计算机容量和加快运算速度,采用壳体单元模型进行参数分析。

在参数模型中端板与耳板相交处的端板单元厚度取耳板的高度 l ,范围相当耳板厚度 t_l 以更好的模拟了端板的实际受力情况。

本文采用ANSYS10.0有限元软件进行分析,壳单元采用SHELL181单元类型。有限元模型细部(局部)如图6所示。

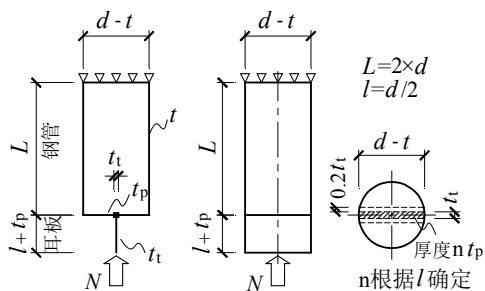


图 5 参数模型简图

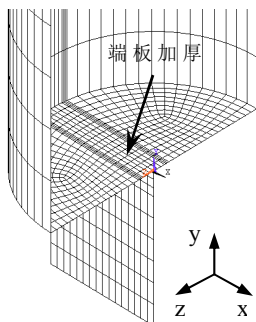


图 6 有限元模型细部

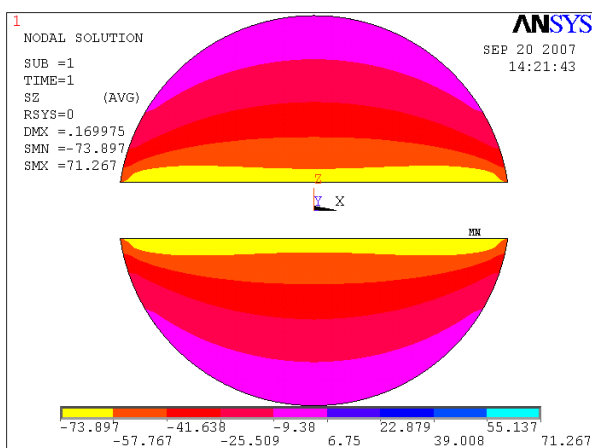


图 7 端板应力分布

3.3 模型结果与利用

参数模型在耳板与端板交界处产生了较大的应力集中，但考虑不采用在耳板 t_t 外两侧 $t_t/5$ 宽度内的端板峰值应力，原因是耳板与端板的连接一般采用双面坡口熔透焊缝，假定该焊脚边缘距耳板 $t_t/5$ ，该范围内的应力不应代表端板设计中的应力取值。 $d/t=30$ ， $t_t/t_p=1.0$ ， $d/t_p=10$ 时端板的弯曲应力分布如图 7 所示。该图反映耳板厚度加两侧各 $t_t/5$ 以外区域的应力分布，从中取出应力控制值已较彻底地排除了应力集中的因素。

最大应力 $\sigma_{\max}$ 取端板内垂直耳板方向的最大正应力，即图 6 所示模型的 σ_z 。根据比较， σ_z 的最大值与按 Mises 准则确定的最大折算应力基本相

同，因此可以作为判定端板是否屈服的数值。最大挠度 $v_{\max}$ 取端板跨中最大挠度与周边最小挠度的差值。根据参数模型结果，得出应力系数 α 和挠度系数 β 分别如表 1、表 2 所示。

利用式 (1) 和表 1，可以得出端板的最大应力，进而可采用式 (3) 验算端板的抗弯极限承载力。利用式 (2) 和表 2，可以得出端板的最大挠度，进而可采用式 (4) 验算端板的正常使用极限状态的变形。

$$\sigma_{\max} \leq f \quad (3)$$

$$\bar{v}_{\max} \leq [\bar{v}] \quad (4)$$

其中 f 和 $[\bar{v}]$ 分别为端板钢材强度设计值和端板变形限值。

算例：钢管 $\phi 300 \times 10$ ，承受轴力 600kN，端板拟采用 30mm 厚，耳板拟采用 45mm，端板钢材采用 Q235，相对变形限值要求为 $1/400$ ^[3]。求解过程如下：(a) $d/t=300/10=30$ ， $t_t/t_p=45/30=1.5$ ， $d/t_p=300/30=10$ ；(b) 查表 1 得 α 等于 0.28，查表 2 得 β 等于 0.02；(c) 分别利用公式(1)和公式(2)得端板最大应力 $\sigma_{\max}=187\text{N/mm}^2$ ，端板最大相对挠度 $\bar{v}_{\max}=1/1500$ ；(d) 分别满足公式(3)和公式(4)，因此端板满足承载力要求。

如果结构所用钢管或拟采用的端板、耳板尺寸不在表中，可采用差值法进行计算。

3.4 结果评价

由表 1 可知，如果 d/t 和 t_t/t_p 相同，随着 d/t_p 变大， α 变小，即在相同的轴力和相同的端板、耳板厚度时，随着管径（径厚比不变）变大，端板的最大应力变小。这与机理分析的模型一相悖，但与模型四相一致，即端板的应力水平与端板本身的刚度相关，荷载条件并不能仅仅简化为均布线荷载。如果 d/t_p 和 t_t/t_p 相同，随着 d/t 变大， α 变大，即在相同的轴力，相同的端板、耳板厚度，相同的管径时，随着钢管径厚比变大，端板的最大应力变大。这亦与模型一相悖，而与模型四相一致，即端板的应力水平与周边支承钢管的刚度相关，端板的支座条件不能简化为简支支座。

根据表 1，得出端板达到设计强度时（假定端板的设计强度与钢管的设计强度相同），钢管可以承受的设计荷载 $N_{u,sp}$ 与钢管的截面强度 $N_{u,tubular}$ ($=Af$) 的比值 η ，如图 8 所示。由图可知， d/t 较

大、 d/t_p 较小、 t/t_p 较大时钢管承载力可得到较有效的利用。从整体来看，钢管的承载力利用率不高，因此只有钢管内力较小时可利用非加劲构造，钢管内力较大时宜采用加劲节点。

根据式（1）、式（2）可以得出端板最大应力达到屈服时端板的极限相对挠度 $\bar{v}_{\max}$ 。如果端板钢材的屈服强度为 310N/mm^2 ，得极限相对挠度如图 9 所示。如果利用文献[3]关于主梁的挠度限值则限值 $[\bar{v}]$ 取 $1/400$ ，由图可知， $\bar{v}_{\max}$ 皆小于 $1/400$ ，因此端板的挠度在承载力验算中不起控制作用。

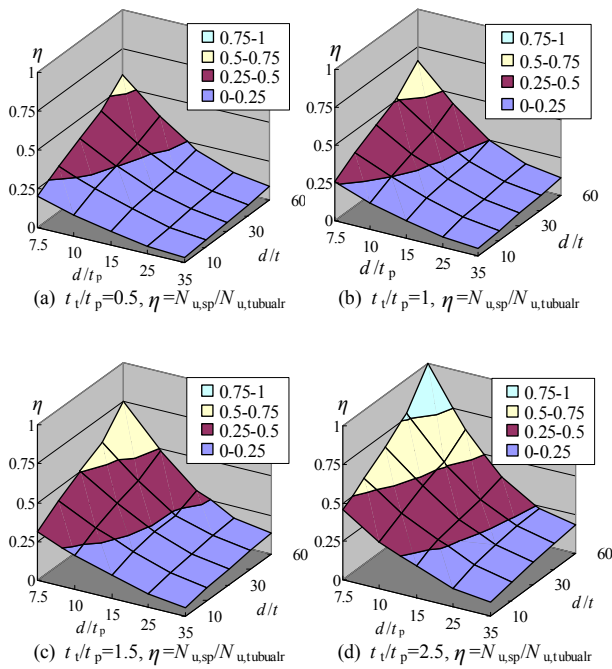


图 8 端板的承载效率 η

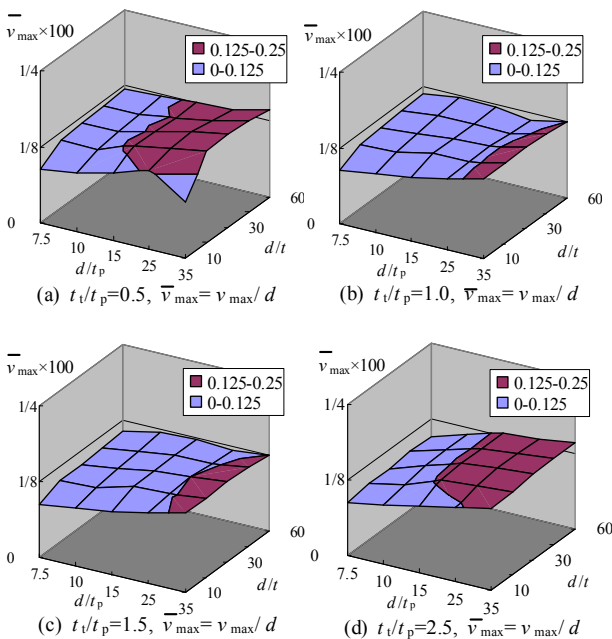


图 9 端板的极限相对挠度

本文采用弹性设计方法，给出弹性分析结果，没有考虑弹塑性发展。弹性计算结果表明只有钢管应力处于较低水平时，无加劲端板构造才是可行，符合工程常识。如果采用塑性计算方法，端板塑化后平面外刚度变弱，挠度变大，将加大钢管局部承载的负担。以静力为主的结构设计中，是否应在端板中考虑塑性，考虑何种程度为宜，需要进一步研究。

4 结论

本论文根据销铰连接中端板的受力状态，建立了相应的简化模型，对端板的受理机理进行了探讨。

建立了便于使用的端板承载力计算公式，通过有限元法的参数分析得出公式各系数的表格，并给出表格的使用方法和算例。根据文献[1]、[4]对管节点分析方法的研究，可知有限元结果是可信的，可指导设计人员进行此类节点的设计。

此种节点形式钢管的承载能力利用率不高，除非端板径厚比 d/t_p 较大，钢管径厚比 d/t 较小。一般只有钢管内力较小时可利用此类节点，钢管内力较大时宜采用加劲节点。

参考文献：

- [1] M.M.K.Lee. Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements. Journal of Constructional Steel Research[J], 1999, 51: 265–286.
- [2] 吴家龙. 弹性力学[M]. 上海：同济大学出版社，1987
- [3] GB50017-2003 钢结构设计规范[S]
- [4] Jihad S.Jubran. and William F.Cofer Finite-Element Modeling of Tubular Joints. Journal of Structural Engineering[J], 1995, 121: 496–508.

表 1 应力系数 α

α		$d/t_p=7.5$	$d/t_p=10$	$d/t_p=15$	$d/t_p=25$	$d/t_p=35$
$d/t=10$	$t_l/t_p=0.5$	0.323	0.268	0.179	0.120	0.089
	$t_l/t_p=1.0$	0.243	0.198	0.132	0.085	0.062
	$t_l/t_p=1.5$	0.199	0.161	0.106	0.067	0.048
	$t_l/t_p=2.5$	0.139	0.116	0.075	0.046	0.033
$d/t=20$	$tt/tp=0.5$	0.407	0.329	0.225	0.148	0.117
	$tt/tp=1.0$	0.337	0.268	0.180	0.111	0.084
	$tt/tp=1.5$	0.287	0.226	0.147	0.089	0.066
	$tt/tp=2.5$	0.215	0.172	0.107	0.063	0.046
$d/t=30$	$tt/tp=0.5$	0.476	0.393	0.284	0.170	0.129
	$tt/tp=1.0$	0.405	0.328	0.232	0.134	0.096
	$tt/tp=1.5$	0.351	0.280	0.192	0.109	0.078
	$tt/tp=2.5$	0.265	0.214	0.142	0.078	0.054
$d/t=40$	$tt/tp=0.5$	0.526	0.446	0.334	0.202	0.144
	$tt/tp=1.0$	0.454	0.378	0.277	0.162	0.112
	$tt/tp=1.5$	0.396	0.326	0.249	0.133	0.090
	$tt/tp=2.5$	0.300	0.252	0.175	0.095	0.064
$d/t=60$	$tt/tp=0.5$	0.596	0.519	0.409	0.259	0.178
	$tt/tp=1.0$	0.522	0.450	0.347	0.213	0.142
	$tt/tp=1.5$	0.459	0.392	0.298	0.178	0.117
	$tt/tp=2.5$	0.345	0.307	0.229	0.130	0.083

表 2 挠度系数 β

β		$d/t_p=7.5$	$d/t_p=10$	$d/t_p=15$	$d/t_p=25$	$d/t_p=35$
$d/t=10$	$t_l/t_p=0.5$	0.0248	0.0168	0.0086	0.0040	0.0015
	$t_l/t_p=1.0$	0.0187	0.0123	0.0059	0.0026	0.0015
	$t_l/t_p=1.5$	0.0149	0.0100	0.0047	0.0020	0.0012
	$t_l/t_p=2.5$	0.0104	0.0073	0.0035	0.0014	0.0008
$d/t=20$	$t_l/t_p=0.5$	0.0388	0.0233	0.0127	0.0054	0.0032
	$t_l/t_p=1.0$	0.0302	0.0185	0.0092	0.0035	0.0021
	$t_l/t_p=1.5$	0.0250	0.0152	0.0076	0.0028	0.0016
	$t_l/t_p=2.5$	0.0172	0.0116	0.0059	0.0022	0.0012
$d/t=30$	$tt/tp=0.5$	0.0470	0.0290	0.0158	0.0063	0.0037
	$tt/tp=1.0$	0.0373	0.0239	0.0119	0.0042	0.0024
	$tt/tp=1.5$	0.0309	0.0200	0.0100	0.0035	0.0019
	$tt/tp=2.5$	0.0211	0.0154	0.0080	0.0028	0.0014
$d/t=40$	$tt/tp=0.5$	0.0530	0.0338	0.0182	0.0071	0.0040
	$tt/tp=1.0$	0.0429	0.0286	0.0140	0.0049	0.0027
	$tt/tp=1.5$	0.0355	0.0239	0.0130	0.0042	0.0022
	$tt/tp=2.5$	0.0246	0.0185	0.0098	0.0034	0.0017
$d/t=60$	$tt/tp=0.5$	0.0616	0.0412	0.0222	0.0086	0.0047
	$tt/tp=1.0$	0.0508	0.0353	0.0179	0.0062	0.0033
	$tt/tp=1.5$	0.0418	0.0300	0.0157	0.0054	0.0027
	$tt/tp=2.5$	0.0283	0.0227	0.0128	0.0045	0.0022

第一作者：孟宪德 博士研究生

工作单位：同济大学土木工程学院建筑工程系钢与轻型结构教研室

通讯地址：上海市密云路 528 弄同济大学博士 4 号楼 1002 室，200092

电子邮箱：mxs13816871099@126.com

联系电话：13816871099 手机，021-65982926 教研室