

文章编号:1673-2049(2016)06-0073-08

焊接残余应力对 Y 型相贯节点极限承载力影响分析

高占远^{1,2}, 郭彦林¹

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;

2. 天津城建大学 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384)

摘要:采用 ANSYS 的热-结构间接耦合、生死单元技术模拟 Y 型相贯节点的焊接过程;将牛顿-拉普森法和弧长法结合,求解 Y 型相贯节点极限承载力,给出求解流程;分析支管外径与主管外径比、支管倾角、主管径厚比等几何参数对 Y 型相贯节点极限承载力的影响,将考虑和不考虑焊接残余应力的计算结果进行对比分析。研究表明:焊接残余应力降低了 Y 型相贯节点的极限承载力;支管外径与主管外径比 β 越大,主管的径厚比 γ 越小,支管倾角 θ 越小,则 Y 型相贯节点极限承载力降低越多;结构设计时,保证强度和安全的的前提下选择合适的支管外径、主管壁厚和支管倾角,可减小焊接残余应力对 Y 型相贯节点极限承载力的影响。

关键词:Y 型相贯节点;极限承载力;牛顿-拉普森法;弧长法;焊接残余应力;参数分析

中图分类号:TU392 **文献标志码:**A

Analysis on Influence of Welding Residual Stress on Ultimate Bearing Capacity of Y-joints

GAO Zhan-yuan^{1,2}, GUO Yan-lin¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China)

Abstract: The welding process of Y-joint was simulated by using thermal structure indirect coupling and birth-death element in ANSYS. Combined Newton-Raphson method and arc-length method, the ultimate bearing capacity of Y-joints was solved, and solution flow was given. The influence of geometric parameters such as the ratio of diameter of branch pipe and diameter of pipe, angle of branch pipe, ratio of diameter and thickness of pipe, on the ultimate bearing capacity of Y-joints with considering welding residual stress was analyzed. Ultimate bearing capacities of Y-joints with welding residual stresses and without welding residual stresses were compared and analyzed. The results show that the ultimate bearing capacity of Y-joint is reduced by welding residual stress; because values of the β are larger, or values of the γ are smaller, or values of the θ are smaller, the ultimate bearing capacity of Y-joint is more reduced. In structural design, to ensure the strength and safety of structure, choosing the suitable diameter and angle of branch pipe, wall thickness of pipe, the effect of welding residual stress on ultimate bearing capacity of Y-joint can be reduced.

Key words: Y-joint; ultimate bearing capacity; Newton-Raphson method; arc-length method; welding residual stress; parameter analysis

收稿日期:2016-05-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(11304168);清华大学自主科研项目(2012Z10134)

作者简介:高占远(1979-),男,吉林松原人,天津城建大学讲师,工学博士,博士后,E-mail:haifenglingyong@sina.com。

0 引言

钢管结构主要应用于桁架、结构柱、支撑、格构式结构、大跨空间结构等^[1-2]。桁架结构的应用比较广泛,这类结构具有造型美观、布置灵活、受力明确等特点,通过节点将主管和支管连接起来,节点性能的好坏直接影响结构的承载力。节点种类较多,如螺栓球节点、焊接空心球节点、铸钢节点、相贯节点等。相贯节点是常见形式之一,具有构造简单、易于连接、受力性能较好、传力路径清晰、外表美观、易于维护保养、节省用钢量等优点,越来越受到人们的青睐^[3]。

相贯节点通过焊接而成,在结构中产生较大的残余应力,对结构的承载力和安全造成影响,因此分析相贯节点的焊接残余应力分布及其对节点静力性能和极限承载力的影响规律对结构的设计和施工是十分有意义的。针对焊接残余应力对相贯节点的影响研究并不多,文献[4]对空间的 KX 型圆管相贯节点的焊接温度场、应力场与极限承载力进行了数值模拟分析,指出焊接残余应力对 K 支管和 X 支管的极限承载力降低都有一定的影响。文献[5]研究了节点焊后残余应力及残余变形随几何参数的变化趋势、焊缝热效应对 K 型相贯节点极限承载力的影响。文献[6]对 K 型钢管相贯节点进行了温度场和应力场的耦合计算,考虑了钢材热物理参数和力学参数随温度变化的非线性性能,得到的三维残余应力和残余变形分布规律与 K 型钢管相贯节点试验的破坏形态吻合较为理想,提出了焊接热损伤对节点破坏形式有一定影响的结论。

本文采用 ANSYS 的热-结构间接耦合、生死单元技术对 Y 型相贯节点的焊接过程进行数值模拟。运用牛顿-拉普森法和弧长法相结合求解 Y 型相贯节点的极限承载力,给出求解流程,将考虑和不考虑焊接残余应力的极限承载力进行对比。分析支管外径与主管外径比、支管倾角、主管的径厚比等几何参数对考虑焊接残余应力下 Y 型相贯节点极限承载力的影响。

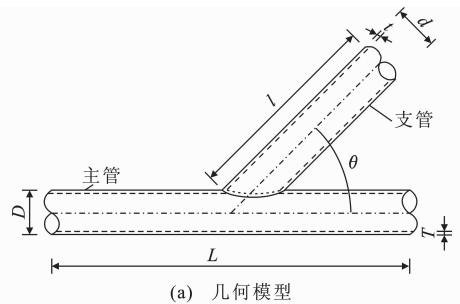
1 焊接残余应力数值模拟

焊接是集电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程,具有复杂的高温、动态、瞬时等特征。采用三维热弹塑性有限元数值模拟方法来模拟 Y 型相贯节点的焊接过程。采用弹塑性有限元的增量法逐步求解出焊件的温度场、应力场等,采用间接耦合技术考

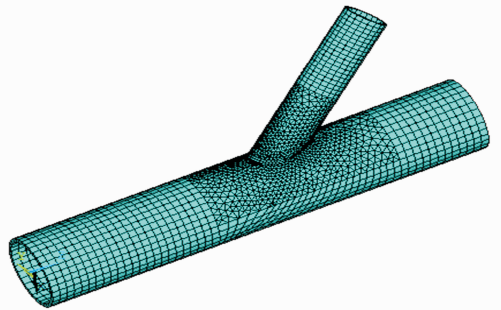
虑温度和应力之间的相互影响,即只考虑温度场对应力场的影响,忽略应力场对温度场的影响。

1.1 有限元分析模型

Y 型相贯节点如图 1 所示,主管管长 L 为 1.2 m,管外径 D 为 219 mm,壁厚 T 为 10 mm,支管管长 l 为 0.6 m,管外径 d 为 114 mm,壁厚 t 为 8 mm,倾角 θ 为 45° 。Y 型相贯节点选用 Q345 钢材,屈服强度为 345 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,材料密度为 $7\ 850\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,热胀系数为 $1.48 \times 10^{-5}\text{ m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,泊松比为 0.29,热传导系数为 $34\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$,比热容为 $420\text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ ^[7]。



(a) 几何模型



(b) 有限元模型

图 1 Y 型相贯节点

Fig. 1 Y-joint

建立三维热弹塑性有限元模型,如图 1(b)所示。焊缝区域温度变化大,生成的热应力较大,变形也较明显,焊缝采用较细的网格,即映射网格按 4 mm 的网格尺寸划分。离焊缝较远的区域温度变化相对较小,生成的热应力较小,热变形也不明显,可忽略细部变化,映射网格按 20 mm 的网格尺寸划分。中间过渡区域采用自由网格划分。采用热-应力间接耦合的分析方法,热分析时焊缝区域和离焊缝较远区域选用三维实体单元 Solid70,中间过渡区域因为网格尺寸不规则选用 Solid90 单元。残余应力分析时,利用 ETCHG, TTS 命令将热单元转化为相应的结构单元 Solid185 和 Solid186,结构场单元 Solid185 和 Solid186 可以考虑塑性。

常用的焊接热源模型有高斯热源、双椭圆热源模型和基于生死单元的焊接热源模型等^[8]。AN-

SYS 中单元生死功能的原理就是修改单元刚度矩阵,当单元处于死的状态时,其刚度矩阵乘一个很小的因子,使其对总刚度不产生作用,单元生的状态是通过单元激活实现的。在模型的前处理中,建立生死单元,求解过程中利用单元是否激活实现单元生或死的状态^[9],通过生死单元技术模拟焊缝金属的填充过程。采用 ANSYS 提供的内生热率热源模型模拟电弧对焊缝的加热作用^[10],内生热率模型的内部热生成以热生成强度来表示,即将有效的焊接热输入量换算成每道焊缝单元在单元体积、单位时间内热生成强度的供给热能,在所有焊接热能都施加到焊缝上后,内部热停止生成。热生成强度 q 的计算公式为^[11]

$$q = \frac{\eta UI}{A_w v dt} \quad (1)$$

式中: U 为电弧电压; I 为电流; η 为电弧热效率; A_w 为焊缝的横截面面积; v 为焊接速度; dt 为每个荷载步的时间步长。

本文焊接电流取 180 A,电弧电压 21 V,焊接速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,电弧热效率取 0.7。

边界条件:焊接温度场的计算属瞬态热分析,需施加恒温边界条件,在空气中焊接时,恒温边界条件设为室温($20 \text{ }^\circ\text{C}$)。施加换热边界条件主要以热辐射和热对流为主,热辐射作为面荷载施加到对应的辐射面中,为计算方便,将这一影响因素与对流所产生的作用进行合成,共同用对流系数这一参数来实现,ANSYS 中对流系数综合体现了焊接过程外界环境因素的影响^[12],因此,热对流边界条件可模拟结构与空气接触面上的热交换,取对流传热系数为

$50 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ 。

在进行结构场分析时,施加力学边界条件,即主管一端按固定端考虑,既不能平动,也不能转动,另一端仅允许轴向位移,支管限制其环向和径向的位移,允许轴向位移,如图 2 所示。

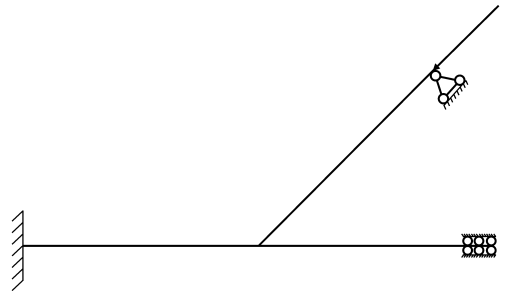


图 2 边界条件和加载方式

Fig. 2 Boundary Condition and Loading Mode

1.2 温度场分析

Y 型相贯节点的焊接过程可分为焊缝填充的焊接升温过程和空气中冷却的降温过程。图 3 为 Y 型相贯节点焊接温度场云图。

图 3(a)~(d)为焊接升温过程。从图 3(a)~(d)可以看出:焊接热过程中温度场是动态且瞬变的,温度等值线分布形状大致一致,温度传递的范围较小,只在焊缝及附近区域达到较高的温度,焊接最高温度近 $1700 \text{ }^\circ\text{C}$,其他位置的温度均较低。在热源的前方,温度梯度比较陡,在热源的后方,温度梯度比较平缓。图 3(e),(f)为空气中冷却过程的温度分布云图,整个构件焊接完成后,27.5 s 开始进入空冷阶段,此时的降温过程主要依靠热辐射和热对流进行降温,当时间达到 4 827.5 s 时,降温结束,温度

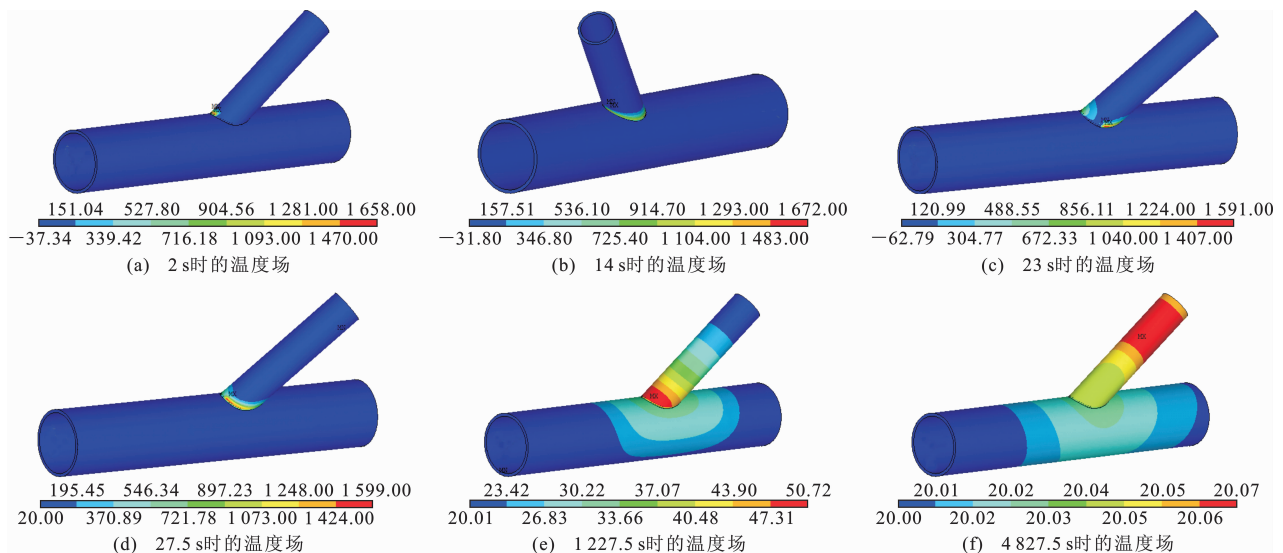


图 3 温度场云图(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 3 Nephograms of Temperature Field (Unit: $^\circ\text{C}$)

等值线清晰可见,等温线的范围逐渐扩大,最后各点的温度趋于室温。

1.3 焊接残余应力分析

焊接过程中,随着热源的移动,焊缝金属被填充,各点的温度上升,钢材膨胀受到周围材料的约束,焊接残余应力超过材料在该温度下的屈服极限,使金属产生塑性变形。节点内产生焊接残余应力。图4给出了焊接在27.5,1 227.5,4 827.5 s时Y型相贯节点的Von-Mises等效应力云图。

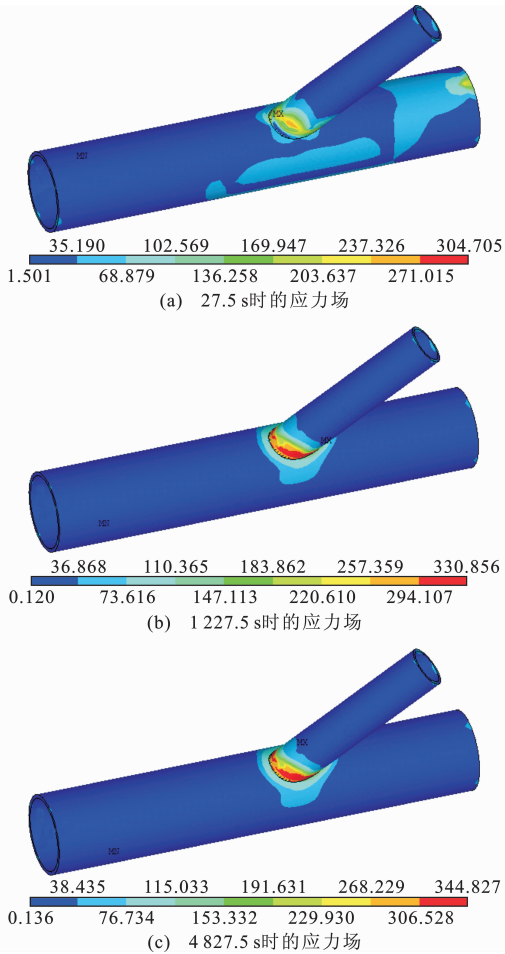


图4 Von-Mises等效应力云图(单位:MPa)

Fig. 4 Nephograms of Von-Mises Equivalent Stress (Unit:MPa)

图4(a)为焊接升温后的残余应力分布云图,图4(b),(c)分别为空气冷却过程中和冷却完成之后的应力分布云图。由图4可以看出:焊接过程是动态变化的过程。焊接残余应力存在范围较小,只在焊缝及其附近区域,焊接残余应力的最大值接近材料的屈服强度。

2 考虑焊接残余应力的极限承载力

2.1 分析方法

Y型相贯节点极限承载力的求解属于非线性问

题,有限元对非线性问题的求解是将荷载分成一系列的荷载增量,然后在不同的荷载步内施加荷载增量,每个增量求解完成后,程序会调整刚度矩阵,再进行下一个荷载增量的求解。增量迭代法有牛顿-拉普森法、弧长法、位移控制法等。牛顿-拉普森法收敛速度较快,占用计算机存储空间相对较小,但无法求出荷载-位移曲线的下降段。弧长法适用于一些复杂的非线性问题求解,且可求解出荷载-位移曲线的下降段,但收敛速度较慢,占用计算机存储空间相对较大。

考虑焊接残余应力下的Y型相贯节点极限承载力分析时采用三维实体单元且数目众多,计算时间长且占用计算机存储空间大,为节约计算机存储空间和缩短计算时长,并求出荷载-位移曲线的下降段,采用牛顿-拉普森法和弧长法结合的方式进行求解。根据文献[13]初估极限承载力值,首先加载到初估极限承载力值的70%,通过牛顿-拉普森法求解,再用弧长法求解Y型圆管相贯节点的极限承载力。

2.2 极限承载力的判定标准

Y型相贯节点的破坏形式主要有:主管的塑性破坏(主管管壁在支管力的作用下局部发生过大的塑性变形)、主管管壁的冲切破坏、主管的局部屈曲破坏、支管屈曲破坏和焊缝破坏等。文献[13]规定 $0.2 \leq \beta \leq 1.0$, $d/t \leq 60$, $D/T \leq 100$, $\theta \geq 30^\circ$,其中 β 为支管外径与主管外径之比。只需满足上述规定就能避免主管管壁的冲切破坏、主管的局部屈曲破坏和支管屈曲破坏。针对焊缝破坏,增大焊缝尺寸和提高焊接质量即可避免。因此,Y型相贯节点的节点破坏主要是由主管管壁过大的塑性变形引起的。

Y型相贯节点的破坏一般是由支管传递的力引起的,故破坏时支管轴力可作为节点的极限承载力。此外,节点的极限承载力不仅与材料的强度有关,还受到主管的变形位移限制(即管壁的塑性变形),Yura等[14]认为当支管端部位移达到 $\delta \geq 60df_y/E$ 时(f_y 为材料屈服强度),主管将会产生较大的凹陷,节点退出工作。位移限值一般取主管外径的3%^[15-16],故主管变形位移在主管外径3%以内出现极限荷载,则该荷载作为Y型相贯节点的极限承载力,如没出现极限荷载,则取3%塑性变形对应的荷载值作为Y型相贯节点的极限承载力。

2.3 极限承载力对比分析

为了考察焊接残余应力对Y型相贯节点极限承载力的影响,模拟图1所示的Y型相贯节点,分

析考虑焊接残余应力和不考虑焊接残余应力 2 种情况下的极限承载力,并将模拟结果进行对比。为了便于对比分析,2 种情况下节点模型的模型尺寸、网格划分、单元类型、约束条件等均相同。加载方式采用单向加载,即仅在支管末端上施加沿支管轴向的集中荷载,如图 2 所示。

采用 ANSYS 的 APDL 语言编制算法程序,图 5 给出了考虑焊接残余应力时极限承载力求解流程。针对图 1 所示的 Y 型相贯节点,根据文献[10]初估的极限承载力值为 517.5 kN,首先在支管上施加 362.25 kN 的荷载,采用牛顿-拉普森法求解,然后采用弧长法增量迭代求解。经 ANSYS 计算分析,2 种情况下荷载-位移曲线如图 6 所示,图 6 中 P 、 P^w 分别表示不考虑焊接残余应力和考虑焊接残余应力的荷载-位移曲线,垂直于横轴的位移控制线(即主管管壁的塑性变形达到主管外径 3% 时对应的线)对应的主管塑性变形为 6.57 mm。

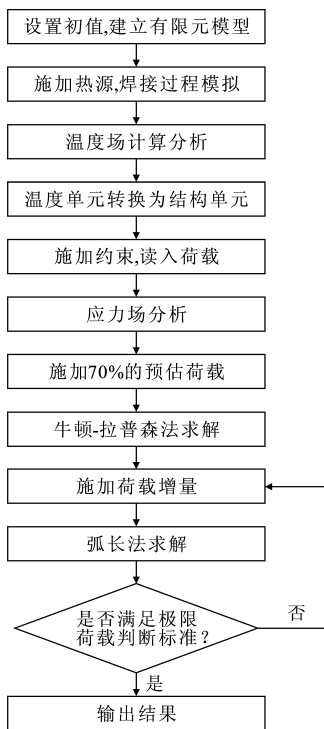


图 5 考虑焊接残余应力的极限承载力求解流程
Fig. 5 Solution Flow of Ultimate Bearing Capacity Considering Welding Residual Stress

由图 6 可知,位移较小时焊接残余应力对结构的静力性能影响较小,位移增大后焊接残余应力对结构的静力性能影响不可忽略。2 种情况下荷载-位移曲线的极值点均出现在位移控制线之后,故取支管管壁极限位移对应的荷载值为极限承载力,不考虑焊接残余应力的 Y 型相贯节点极限承载力 P_u 。

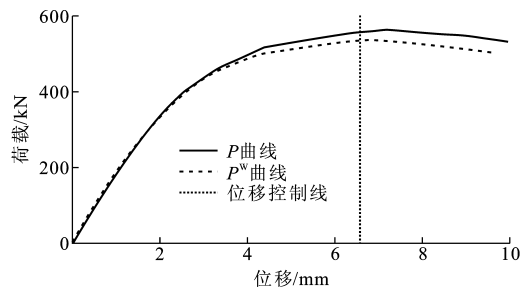


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves

为 554.68 kN,考虑焊接残余应力的极限承载力 P_u^w 为 534.06 kN。由于焊接残余应力的存在,Y 型相贯节点的极限承载力降低了 3.71%。考虑焊接残余应力时极值点对应的主管管壁塑性变形比不考虑焊接残余应力时小,即极值点位置提前。

3 几何参数对极限承载力影响分析

交汇于节点的各圆钢管几何参数对 Y 型相贯节点的极限承载力有很大影响,这些参数主要有:支管外径与主管外径比 β 、主管径厚比 γ 、支管倾角 θ 等。为了研究焊接残余应力对 Y 型相贯节点极限承载力的影响,分析这些几何参数变化对其极限承载力影响变化趋势,选取了 14 个模型,将模型编号为 Y-1~Y-14,模型 Y-1~Y-7 不考虑残余应力,模型 Y-8~Y-14 考虑焊接残余应力,表 1 给出了模型 Y-1~Y-7 的几何参数,模型 Y-8~Y-14 的几何参数与模型 Y-1~Y-7 分别对应,故没在表 1 中列出。

表 1 模型几何参数

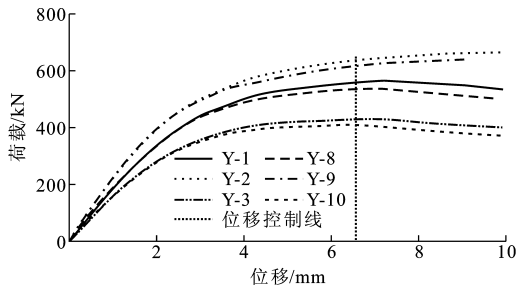
Tab. 1 Geometric Parameters of Models

| 模型编号 | D/mm | T/mm | L/mm | d/mm | t/mm | l/mm | $\theta/(^\circ)$ |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Y-1 | 219 | 10 | 1 200 | 114 | 8 | 600 | 45 |
| Y-2 | 219 | 10 | 1 200 | 140 | 8 | 600 | 45 |
| Y-3 | 219 | 10 | 1 200 | 76 | 8 | 600 | 45 |
| Y-4 | 219 | 12 | 1 200 | 114 | 8 | 600 | 45 |
| Y-5 | 219 | 8 | 1 200 | 114 | 8 | 600 | 45 |
| Y-6 | 219 | 10 | 1 200 | 114 | 8 | 600 | 60 |
| Y-7 | 219 | 10 | 1 200 | 114 | 8 | 600 | 30 |

3.1 β 变化对极限承载力的影响

图 7 给出了模型 Y-1~Y-3 和模型 Y-8~Y-10 的荷载-位移曲线,表 2 给出了各模型节点的极限承载力值。模型 Y-1 和 Y-8 对应的 β 值为 0.52, Y-2 和 Y-9 模型对应的 β 值为 0.64, Y-3 和 Y-10 模型对应的 β 值为 0.35。

由图 7 和表 2 可知,荷载-位移曲线的极值点均出现在位移控制线后,故取位移控制线对应的荷载

图7 不同 β 值对应节点的荷载-位移曲线Fig. 7 Load-displacement Curves of Joints Corresponding to Different β 表2 不同 β 值对应节点的极限承载力Tab. 2 Ultimate Bearing Capacities of Joints Corresponding to Different β

| 模型编号 | β | P_u /kN | P_u^w /kN | $(P_u - P_u^w)/P_u/\%$ |
|------|---------|-----------|-------------|------------------------|
| Y-1 | 0.52 | 554.68 | 534.06 | 3.71 |
| Y-8 | | | | |
| Y-2 | 0.64 | 640.41 | 616.34 | 3.76 |
| Y-9 | | | | |
| Y-3 | 0.35 | 420.12 | 405.27 | 3.53 |
| Y-10 | | | | |

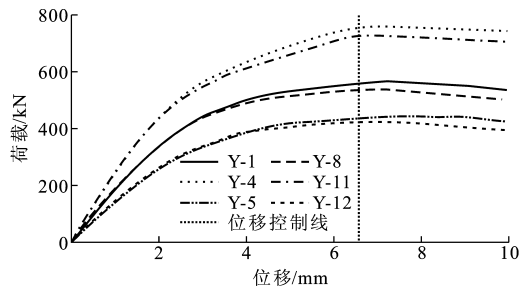
值作为节点的极限承载力。考虑焊接残余应力时的位移比不考虑焊接残余应力时的位移小,即极值点位置提前。当位移较小时,荷载-位移曲线没有太大差别,对节点静力性能影响较小。当位移较大时,焊接残余应力对结构的影响不可忽略。

由图7和表2还可知,Y型相贯节点的极限承载力随着支管外径与主管外径比 β 的增大而增大,因为 β 越大,支管直径越大,受力面积越大,应力越均匀。 β 值越大,焊接残余应力使得节点极限承载力降低越多,因为 β 越大,支管直径越大,相贯焊缝越长,焊接残余应力和受残余应力影响的区域越大,对节点的削弱越大。结构设计时,在满足强度和功能要求的前提下,合理选择 β 值有助于削弱焊接残余应力的影响。

3.2 γ 变化对极限承载力的影响

图8给出了不同 γ 值对应的考虑和不考虑焊接残余应力时Y型相贯节点的荷载-位移曲线,模型Y-1和Y-8对应的 γ 值为21.9,模型Y-4和Y-11对应的 γ 值为18.25,模型Y-5和Y-12对应的 γ 值为27.38。表3给出了各模型节点的极限承载力值。

由图8和表3可知,模型Y-11的荷载-位移曲线在位移控制线之前达到荷载极值,故取荷载极值作为节点的极限承载力值,其他模型均在位移控制线后达到荷载极值,故取位移控制线对应的荷载值

图8 不同 γ 值对应节点的荷载-位移曲线Fig. 8 Load-displacement Curves of Joints Corresponding to Different γ 表3 不同 γ 值对应节点的极限承载力Tab. 3 Ultimate Bearing Capacities of Joints Corresponding to Different γ

| 模型编号 | γ | P_u /kN | P_u^w /kN | $(P_u - P_u^w)/P_u/\%$ |
|------|----------|-----------|-------------|------------------------|
| Y-1 | 21.90 | 554.68 | 534.06 | 3.71 |
| Y-8 | | | | |
| Y-4 | 18.50 | 751.18 | 718.84 | 4.31 |
| Y-11 | | | | |
| Y-5 | 27.38 | 435.71 | 419.98 | 3.61 |
| Y-12 | | | | |

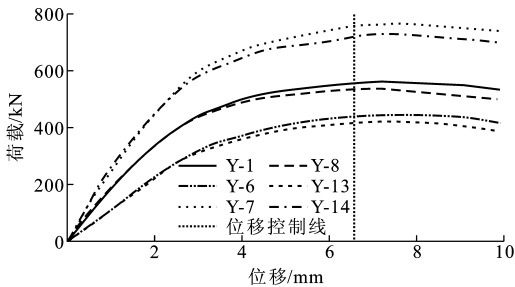
作为节点的极限承载力值。当荷载较小时,焊接残余应力对节点的影响较小;当荷载较大时,焊接残余应力对节点的影响较大。

由图8和表3还可知,Y型相贯节点的极限承载力随着主管径厚比 γ 的增大而降低,因为当 γ 增大时,主管壁厚变薄,节点的极限承载力降低较多。当考虑焊接残余应力时,随着 γ 减小,节点的极限承载力降低得越多,因为当 γ 变小时,主管壁厚增加,支管被约束作用加强,焊接残余应力影响作用加强,故极限承载力削弱越大。因此,结构设计时,在保证强度和功能要求的前提下,不宜选择过厚的主管。

3.3 θ 变化对极限承载力的影响

图9给出了不同 θ 值对应的考虑和不考虑焊接残余应力时Y型相贯节点的荷载-位移曲线。模型Y-1和Y-8对应的 θ 值为 45° ,模型Y-6和Y-13对应的 θ 值为 30° ,模型Y-7和Y-14对应的 θ 值为 60° 。表4给出了不同 θ 值对应各模型节点的极限承载力值。

由图9和表4可知,荷载的极值点均在位移控制线后,故取位移控制线所对应的荷载值作为节点的极限承载力值。随着 θ 增大,Y型相贯节点的极限承载力降低,因为 θ 越大,垂直于主管轴线的分量越大,管壁径向承受的力越大。由于焊接残余应力的存在,主管管壁的塑性变形比不考虑焊接残余应

图 9 不同 θ 值对应节点的荷载-位移曲线Fig. 9 Load-displacement Curves of Joints Corresponding to Different θ 表 4 不同 θ 值对应节点的极限承载力Tab. 4 Ultimate Bearing Capacity of Joints Corresponding to Different θ

| 模型编号 | $\theta/(\circ)$ | P_u/kN | P_u^w/kN | $(P_u - P_u^w)/P_u/\%$ |
|------|------------------|----------|------------|------------------------|
| Y-1 | 45 | 554.68 | 534.06 | 3.71 |
| Y-8 | | | | |
| Y-6 | 60 | 437.46 | 421.84 | 3.57 |
| Y-13 | | | | |
| Y-7 | 30 | 754.32 | 720.13 | 4.53 |
| Y-14 | | | | |

力时小,即极值点提前。当考虑焊接残余应力时,随着 θ 的减小,Y 型相贯节点的极限承载力降低得越多。因为当 θ 减小时,相贯焊缝尺寸变大,焊缝及影响区域变大,对节点刚度的削弱作用变大。因此,在结构设计时 θ 值不宜过小。

4 结 语

(1) Y 型相贯节点焊接残余应力主要分布在焊缝及附近区域,影响区域较小,焊接残余应力最大值接近钢材的屈服强度。

(2) 采用牛顿-拉普森法和弧长法相结合的方式求解极限承载力,给出 ANSYS 的求解流程,并将考虑和不考虑焊接残余应力的 Y 型相贯节点荷载-位移曲线进行对比分析,验证该方法是可行的。

(3) 当荷载较小时,焊接残余应力对节点影响较小,可忽略不计。当荷载较大时,Y 型相贯节点的极限承载力降低。考虑焊接残余应力时主管管壁的塑性变形比不考虑焊接残余应力时小,即极值点提前。

(4) 支管外径与主管外径比 β 越大,Y 型相贯节点极限承载力越大,焊接残余应力使其极限承载力降低越多。主管的径厚比 γ 越大,Y 型相贯节点的极限承载力越小,焊接残余应力使其降低越少。支管倾角 θ 越小,Y 型相贯节点的极限承载力越大,焊接残余应力使其降低越大。

(5) 对 Y 型相贯节点进行设计时,在保证节点强度和功能要求的前提下,为减小焊接残余应力对节点承载力的影响,主管和支管外径相差不宜过大,主管壁厚不宜过厚,倾角不宜过小。

(6) 实际工程中相贯节点应用非常广泛,种类繁多,针对其他平面和空间相贯节点,研究焊接残余应力对其性能和承载力影响,为结构设计和施工提供有意义的参考,是未来研究相贯节点非常有意义的方向。

参考文献:

References:

- [1] 赵熙元,陈东伟,谢国昂. 钢管结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
ZHAO Xi-yuan, CHEN Dong-wei, XIE Guo-ang. Design for Steel Hollow Section[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [2] 武振宇,张 扬. 直接焊接 KT 型搭接方管节点破坏类型的有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 6-11.
WU Zhen-yu, ZHANG Yang. Finite Element Analysis of Failure Modes of Directly Welded KT-type Overlapped SHS Joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 6-11.
- [3] 陈以一,陈扬骥. 钢管结构相贯节点的研究现状[J]. 建筑结构, 2002, 32(7): 52-55, 31.
CHEN Yi-yi, CHEN Yang-ji. Research Status of Tubular Joints of Steel Tubular Structures[J]. Building Structure, 2002, 32(7): 52-55, 31.
- [4] 王 波. 焊接残余应力对空间 KX 型圆管相贯节点极限承载力的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
WANG Bo. The Influence of Welding Residual Stress on Ultimate Bearing Capacity of Multiplanar KX-type CHS Joints[D]. Chongqing, Chongqing University, 2013.
- [5] 袁益宏. K 型圆钢管相贯节点分析[D]. 上海: 同济大学, 2004.
YUAN Yi-hong. Analysis of K-type Circular Steel Tubular Joints [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [6] 罗永赤. 钢管相贯 K 型节点焊接残余应力的数值模拟与试验分析[J]. 钢结构, 2006, 21(6): 21-25.
LUO Yong-chi. Numerical Simulation and Experimental Research on Residual Stresses in Direct Welding K-joints of Steel Tubular Members[J]. Steel Construction, 2006, 21(6): 21-25.
- [7] 郭彦林,赵思远. 深圳湾体育馆焊接合拢对结构受力

- 性能的影响分析[J]. 施工技术, 2011, 40(3): 71-75.
- GUO Yan-lin, ZHAO Si-yuan. Welding Effects on Roof Closure Process of Shenzhen-wan Stadium[J]. Construction Technology, 2011, 40(3): 71-75.
- [8] 陈楚, 汪建华, 杨洪庆. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- CHEN Chu, WANG Jian-hua, YANG Hong-qing. Application of Numerical Analysis in Welding [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1985.
- [9] 胡敏英, 吴志生. 基于单元生死焊接温度场应力场模拟研究[J]. 机械工程与自动化, 2007(6): 58-60.
- HU Min-ying, WU Zhi-sheng. Study on Welding Temperature and Residual Stress Based on Element Death and Birth[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(6): 58-60.
- [10] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- FANG Hong-yuan. Welding Structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [11] 郭彦林, 陈航, 袁星. 厚钢板对接焊接三维有限元数值模拟与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 90-97.
- GUO Yan-lin, CHEN Hang, YUAN Xing. 3-D Finite Element Numerical Simulation and Analysis on Butt Welding of Thick Steel Plate[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 90-97.
- [12] 梁晓燕. 中厚板多道焊焊接过程中温度场和应力场的三维数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- LIANG Xiao-yan. Three-dimensional Numerical Simulation of Temperature Fields and Stress Fields in the Multi-pass Welding of Mid-thick Plates[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004.
- [13] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures [S].
- [14] YURA J A, HOWELL L E, FRANK K H. Ultimate Load Tests on Tubular Connections[R]. Austin: University of Texas, 1978.
- [15] 邓长根, 李加斌, 隋炳强, 等. 圆钢管相贯节点静力性能的研究方法和进展[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(5): 8-12.
- DENG Chang-gen, LI Jia-bin, SUI Bing-qiang, et al. A Review of Research on the Static Behavior of CHS Tubular Welded Joints[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(5): 8-12.
- [16] 陈誉, 彭兴黔. 空间KK型双弦杆圆钢管搭接节点有限元参数分析与极限承载力计算公式[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 37-45.
- CHEN Yu, PENG Xing-qian. Finite Element Parametric Analysis and Design Formula of Ultimate Capacity for Overlapped CHS KK-joint with Two Chords[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 37-45.