

K 型管节点焊接残余应力及其对应力集中系数的影响

蒙 占 彬^{1,2}

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利油田 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:采用有限元软件 ANSYS,以 K 型管节点为研究对象,利用生死单元技术,模拟焊接过程和退火处理过程,研究管节点的焊接残余应力,得到焊接温度场和应力场的分布。分别对考虑焊接残余应力与不考虑焊接残余应力而只考虑焊缝对结构影响的管节点模型施加轴向载荷,计算这两种模型的热点应力集中系数,得到焊接残余应力对管节点应力集中系数的影响。结果表明:对焊接管节点进行退火处理可以显著降低焊接残余应力,降低发生变形和断裂失效的风险,大幅度提高管节点的安全性能;管节点结构中热点位置及热点应力集中系数与尺寸参数、载荷类型、加载方式、焊缝结构等有关。

关键词:K 型管节点; 焊接残余应力; 退火处理; 应力集中系数

中图分类号:TE 952

文献标志码:A

Welding residual stress of K-joint and its influence on stress concentration factor

MENG Zhan-bin^{1,2}

(1. College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257017, China)

Abstract: Using the finite element software ANSYS, taking K-joints as the study object, numerical simulation was performed for the welding process and the annealing process using the birth-death element technology. The welding residual stress of the managed node was studied and the distributions of welding temperature field and stress field were obtained. The axial loads were applied on two different K-joint models, one with welding residual stress and the other without welding residual stress while just considering the influence of welding seam on the K-joint. The stress concentration factors of these two models were calculated and the influence of the welding residual stress on stress concentration factor was obtained. The results show that the welding residual stress is reduced significantly using annealing process, the risk of deformation and fracture failure is reduced, and the safety performance of the managed node is greatly improved. The structure stress state is very complex, and the hot spot location and the hot spot stress concentration factor are related to size parameters, load type, loading mode, the welding seam structure.

Key words: K-joint; welding residual stress; annealing treatment; stress concentration factor

管节点的主要作用就是传递支管的负载给主管,由于汇交于节点的各圆管交线处应力状态非常复杂,往往造成局部高应力,导致裂纹出现,引起结构失效^[1]。应力集中系数是评价管节点安全的重要参数,把节点应力集中最大的点称为热点,相应的最大应力值称为热点应力。对于海洋平台结构的管

节点破坏往往发生在管节点焊缝处,对于管节点焊接结构,由于焊接过程中不均匀的加热与冷却将导致残余应力和残余变形的产生^[2-3],而目前管节点承载能力的计算都只是考虑了局部几何形状因素引起的应力集中系数,笔者基于热弹塑性理论,考虑材料的力学性能随温度的变化,通过有限元方法数值模

拟焊接残余应力,分析其对管节点应力集中的影响。在此基础上,分别建立 K 型间隙节点和搭接节点模型,研究其在相同载荷作用下应力分布形式的异同。

1 焊接残余应力

考虑到焊接过程模拟的高度非线性以及计算量等因素^[4],假设:管节点的所有外边界仅与空气发生对流换热,将辐射换热的影响折算到对流换热中,而不单独考虑;忽略熔池内部的化学反应和搅拌、对流等现象;忽略焊条与母材材料的不一致性,采用随温度变化的热物性参数;忽略缺陷和裂纹的形成;环境温度为室温 25 ℃。

由于金属材料物理和力学性能随温度变化而变化,特别是对焊接加热高温区。为了准确计算焊接的残余应力,通过 mptemp 和 mpdata 命令建立材料随温度变化的参数库,给出了具有代表性的 6 个特征温度下的材料性能参数值,其余温度下的值则是通过线性插值求得,给定温度范围之外的则由外推法求得。

1.1 温度场数值模拟

如图 1 所示为 K 型管节点几何参数,其中, D 、 d

分别为主管外径和支管外径, δ_1 、 δ_2 分别为主管、支管壁厚, α 为支管轴线与主管轴线交角, g 为支管之间的间隙, L 为管段长度。

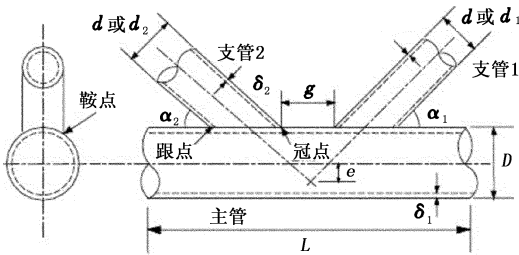
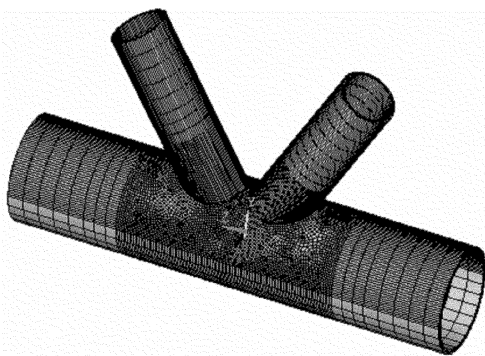


图 1 K 型管节点的几何参数

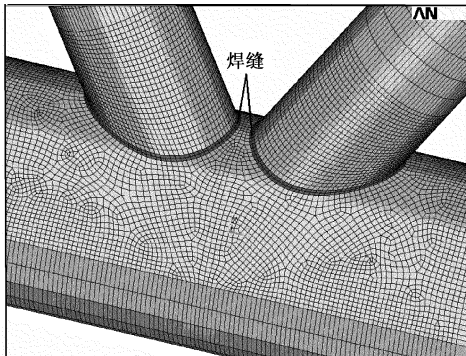
Fig.1 Geometric parameters of K-joint

K 型管节点有限元分析模型几何参数为 $D=273.1\text{ mm}$, $d=141.3\text{ mm}$, $\delta_1=25.4\text{ mm}$, $\delta_2=19.1\text{ mm}$, $L=5\,911\text{ mm}$, $L_1=2\,466\text{ mm}$, $L_2=2\,044\text{ mm}$, $\alpha_1=\alpha_2=45^\circ$ 。其中, L_1 、 L_2 分别为两支管长度。

采用三维热分析单元 solid70 建立模型如图 2 所示。考虑到焊接区及其附近存在着较大的温度梯度,为了保证精度又节省计算机时,在焊缝及其附近区域单元划分较密,管体其他部位网格划分较稀,整个模型的节点数为 62 774,单元数为 45 445,焊缝区 752 个单元。



(a) 整体模型



(b) 局部网格

图 2 K 型管节点温度场有限元模型

Fig.2 FEM model of K-joint for temperature field analysis

焊接温度场求解过程中采用单元生死技术模拟热源移动和焊料填充,将每一个载荷步划分为若干个时间步,由于焊接升温 and 冷却的初始阶段温度变化较大,采用欧拉向后时间积分法以改善收敛和提高精度,在每一时间步上使用修正的 Newton-Raphson 迭代法进行平衡迭代,时间步长在焊接开始和冷却开始时取值较小,一般为 0.1 s,计算得到的焊接过程中管节点的瞬态温度分布如图 3 所示。图 4 为焊缝区某点温度随时间变化曲线($0\leq t\leq 800\text{ s}$),描绘了在焊接瞬间温度迅速升高然后自然冷却至室

温的整个过程。

1.2 焊接应力场数值模拟

构件由于焊接产生的内应力为焊接应力,按作用时间可以分为焊接瞬时应力和焊接残余应力。焊接后残留在构件内的焊接应力称为焊接残余应力。管节点焊接残余应力的有限元模型与焊接温度场数值模拟的有限元模型相同,将温度场计算得到的各时刻每个节点的温度保存在热分析结果文件中,重新进入 ANSYS 前处理器,在应力场分析时将温度作为体载荷对应施加于各节点。将热分析单元转换为

对应的结构分析单元,输入材料随温度变化的力学性能参数,设置结构的力学边界条件,然后将温度场计算的各个时刻节点温度作为体载荷读入。考虑到焊接和冷却过程中材料温度变化,材料的力学性能也将随之发生变化,选用双线性随动强化模型,它使

用一个双线性来表示应力应变曲线,所以有两个斜率:弹性斜率和塑性斜率,需要输入屈服应力和切线斜率。设定了 6 条不同温度下的材料性能曲线(图 5),而其他温度则采用插值方法求解。

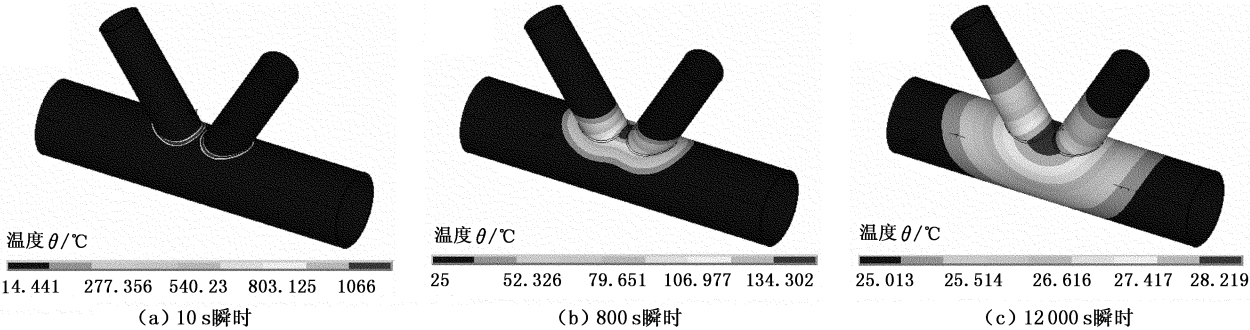


图 3 焊接过程中温度场分布

Fig. 3 Distribution of temperaturer field during welding

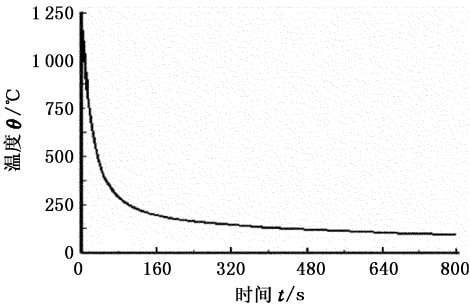


图 4 焊缝区某节点温度随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of some node temperature in welding area

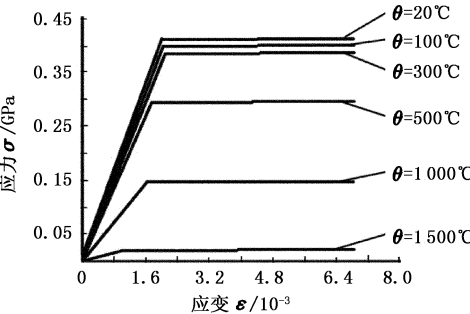


图 5 不同温度下管材本构关系

Fig. 5 Stress-strain curve under different temperatures

图 6 所示为管节点焊接后的残余应力分布。由图 6 可以看出:焊缝区及附近存在着高达 400 MPa 的焊接残余应力,其最大值超过了材料的屈服强度;离开焊缝区后,焊接残余应力迅速衰减。

焊接残余应力的存在降低了管节点的承载能力和抗腐蚀能力,且会导致结构早期失效,严重影响结构的使用寿命。因此,通常采用焊后热处理,也称去应力退火。退火是将金属缓慢加热到一定温度,保

图 6 管节点焊接残余应力分布
Fig. 6 Distrubution of welding residual stress

持足够时间,然后以适宜速度冷却(缓慢冷却或控制冷却)的一种金属热处理工艺。焊接使材料在拉应力区受拉伸而发生屈服,压应力区则相应被压缩,退火时,发生蠕变而出现应力松弛。构件退火的理想温度曲线如图 7 所示。计算时设定退火温度 650

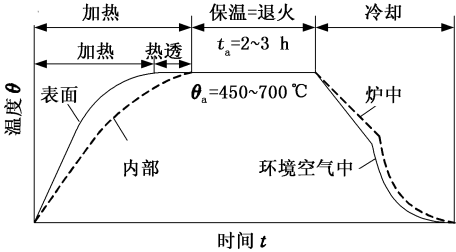


图 7 焊后热处理的温度与时间关系

Fig. 7 Relationship between temperature and time for annealing treatment

℃,升温时间为 5 h,保温 4 h 后,再用 4 h 的时间将温度降至室温。退火处理后管节点残余应力分布如图 8 所示。由图 8 可以看出,焊接残余应力的分布与退火前基本一致,但最大残余应力从退火前的 408.407 MPa 显著降低至退火后的 32.516 MPa,说

明退火处理能大幅度降低焊件的焊接残余应力,焊接结构产生变形和裂纹的可能性也将大大减少。

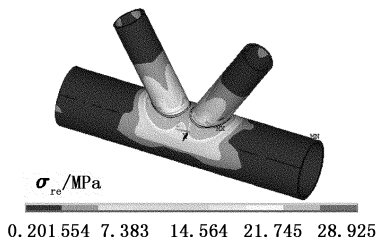


图 8 退火后管节点焊接残余应力

Fig. 8 Distribution of welding residual stress after annealing treatment

2 K 型管节点应力集中系数

2.1 有限元模型

管节点应力集中系数的计算可以采用数值方法或者试验方法^[5],通过与试验结果对比分析发现,数值方法具有较高的准确性并且成本较低,因此被广泛使用^[6-8]。管节点有限元模型的建立没有统一标准,其单元类型的选择取决于管节点的形式与研究内容。根据 DNV 规范,可以选用实体三维单元或者带有厚度的壳体单元来分析。选用壳单元能减小计算的存储空间、缩短运算时间,但建模是采用其中面轴线,因此在结构不连续位置往往模拟效果不理想,如弦、撑杆相交处的焊缝,其影响会被忽略,导致不能精确地对焊缝处不连续的几何特征进行模拟,也不能对焊缝处原本是复杂的三维的应力状态进行描述。而采用三维实体单元则可以克服这些缺点,本文采用三维实体单元 solid185,单元通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度。为提高分析结果的准确性同时尽量减少分析计算时间,在几何不连续、应力梯度大的主、支管交界处对网格细化加密,而在远离交界处则对网格进行稀疏处理,有限元模型如图 9 所示。其尺寸参数与焊接残余应力分析模型一致。

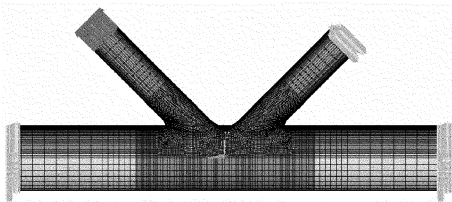


图 9 K 型管节点有限元模型

Fig. 9 FEM model of K-joint

2.2 应力场分析

管节点的应力集中系数定义为热点应力和名义应力的比值,对于承受轴向力、平面内弯矩和平面外

弯矩等基本载荷作用的 K 节点,其名义应力^[5,9]表示为

$$\sigma_{n,AX} = \frac{4F}{\pi[d^2 - (d-2\delta_2)^2]}, \quad (1)$$

$$\sigma_{n,IPB} = \frac{32dM_i}{\pi[d^4 - (d-2\delta_2)^4]}, \quad (2)$$

$$\sigma_{n,OPB} = \frac{32dM_o}{\pi[d^4 - (d-2\delta_2)^4]}. \quad (3)$$

式中, $\sigma_{n,AX}$ 、 $\sigma_{n,IPB}$ 和 $\sigma_{n,OPB}$ 分别为 K 节点在轴向力、平面内弯矩和平面外弯矩作用下的名义应力; F 、 M_i 和 M_o 分别为轴向力、平面内弯矩和平面外弯矩; d 和 δ_2 分别为支管的直径和壁厚。

管节点的热点应力记为 σ_{HSS} ,相应的节点的应力集中系数 f_{SCF} 定义为

$$f_{SCF} = \sigma_{HSS} / \sigma_{nom}. \quad (4)$$

设定施加在支管末端的载荷为名义应力为单位 1 时的载荷,这样所得到的最大应力即为应力集中系数,因此:

$$F = \pi[d^2 - (d-2\delta_2)^2]/4, \quad (5)$$

$$M_i = \pi[d^4 - (d-2\delta_2)^4]/(32d), \quad (6)$$

$$M_o = \pi[d^4 - (d-2\delta_2)^4]/(32d). \quad (7)$$

仅选取 K 型管节点承受轴向载荷进行分析试算,将主管两端和其中一个支管的端部固结,在另外一个支管的端部施加轴向拉力,如图 9 所示。通过计算将名义应力设定为 1 MPa,这样得到的热点应力数值便与应力集中系数相等,计算结果如图 10 所示。可以看出,主管最大应力集中系数(3.163)和支管最大应力集中系数(2.17)都出现在冠点。

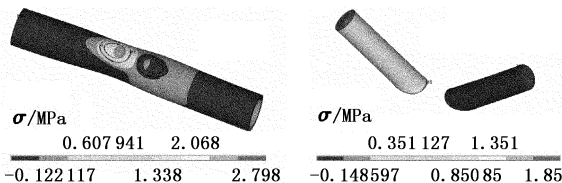


图 10 轴向载荷下 K 型管节点应力分布

Fig. 10 Distribution of stress for K-joint under axial load

2.3 焊接残余应力的影响

对 2 种 K 型管节点模型进行了应力分析。第一种模型考虑焊接残余应力,即对该模型进行焊接过程模拟并进行退火处理,对退火处理完成后的模型施加载荷与约束;第二种模型不考虑焊接残余应力,不模拟焊接过程和退火处理过程,只在主管与支管连接处建立焊缝结构,考虑焊缝对管节点几何连续性的影响。两种模型具有相同的尺寸参数,承受相同的载荷与约束,即主管两端为固定约束,两支管分别承担名义应力为 100 MPa 的轴向拉力。计算得

到K型管节点应力分布如图11所示。由图11可以看出,两种模型应力分布基本一致,最大应力出现位置也基本相同,对于考虑焊接残余应力模型其热点应力集中系数为3.52(图11(a)),而不考虑焊接残余应力其热点应力集中系数为3.23(图11(b)),两者相差不大,可以认为焊接残余应力对应力集中系

数影响不大。因此,在对K型管节点进行应力集中分析时,可以只考虑焊缝的存在造成的结构影响而忽略焊接残余应力的影响。对比图11(b)与图10可以发现,由于两种模型的尺寸参数和加载方式有所不同,虽然两者均承受轴向载荷,其热点位置与热点应力集中系数并不一致。

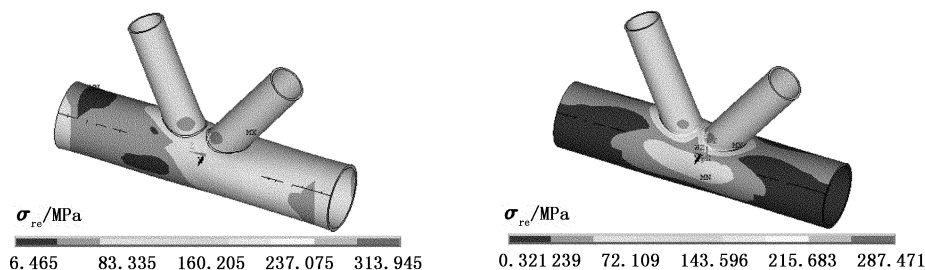


图11 焊接残余应力对应力集中系数的影响

Fig. 11 Influence of welding residual stress on stress concentration factor

3 结论

(1)利用生死单元技术可以比较准确模拟K型管节点焊接温度场和应力场,焊接将产生很大的残余应力,甚至超过材料的屈服极限,严重威胁结构的安全和使用寿命。

(2)对焊接管节点进行退火处理可以显著降低焊接残余应力,降低了发生变形和断裂失效的风险,大幅度提高管节点的安全性能,在对结构进行焊接残余应力模拟分析时必须考虑退火处理。

(3)对K型管节点进行应力集中分析时可以只考虑焊缝的存在造成的结构影响而忽略焊接残余应力的影响。

(4)管节点结构应力状态非常复杂,热点位置及热点应力集中系数与尺寸参数、载荷类型、加载方式、焊缝结构等有关,单一模型无法准确预测,需要综合考虑各种因素进行系统性分析。

参考文献:

- [1] 卢文发,李林普,高明道. 近海导管架平台[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [2] 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-joint of steel tubular members[J]. Steel Construction, 2006,21(6):21-25.
- [3] 罗永赤. 钢管相贯节点焊接残余应力与热损伤的非线性有限元分析[J]. 焊接学报,2007,28(3):65-68.

LUO Yong-chi. Nonlinear finite element analysis of residual stresses and thermo-harm in direct welded K-joint of steel tubular members [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007,28(3):65-68.

- [4] CAO Y G, SHI Y J, ZHANG S H, et al. Research on strength degradation of oil transmission pipeline by third-party damages [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(4):992-1007.
- [5] 邵永波, LIE Seng-tjhen. K节点应力集中系数的试验和数值方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(增1):79-85.
- SHAO Yong-bo, LIE Seng-tjhen. Experimental and numerical studies of the stress concentration factor (SCF) of tubular K-joints [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(sup 1):79-85.
- [6] 沃登尼尔珠 J. 钢管截面的结构应用[M]. 张其林, 刘大康, 译. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [7] LIE S T, LEE C K, WONG S M. Modelling and mesh generation of weld profile in tubular Y-joint [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(5):547-567.
- [8] SPYROS A Karamanos, ARIE Romeijn, JAAP Warde-nier. Stress concentration in tubular gap K-joints: mechanics and fatigue design [J]. Engineer Structures, 2000, 22:4-14.
- [9] 石卫华, 钟新谷, 余志武. 轴向载荷作用下K型管节点应力集中系数研究[J]. 工程力学, 2007, 27(增1):48-52.
- SHI Wei-hua, ZHONG Xin-gu, YU Zhi-wu. Study on stress concentration of K-joints under axial loads [J]. Engineering Mechanics, 2007, 27(sup 1):48-52.

(编辑 沈玉英)