

直埋热水供热管道三通热-力耦合分析

江 超¹, 官燕玲¹, 邓顺熙¹, 王 军²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市热力总公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 针对直埋热水供热管道三通受力的复杂性, 基于土弹簧模型建立了热-力耦合有限元模型, 分析了直埋三通应力的主要影响因素, 并给出了简化三通接管长度的热-力耦合有限元模型. 建模中管土相互作用考虑了介质本身的重量和覆土重力等的作用, 三通管段的边界条件施加在主管和支管端头. 结果表明, 直埋三通在温升作用下, 相贯区峰值应力较大; 直埋三通的二次应力随温升、管道壁厚、支管管径、主管过渡段长度变化, 而受内压影响较小; 地面荷载作用使三通最大当量应力减小, 对三通起保护作用. 该结果旨在为直埋管道的安全性提供帮助.

关键词: 直埋供热管道; 三通; 热-力耦合; 有限元分析

中图分类号: TU995

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0585-08

Analysis on the T-joint thermal coupling for directly buried heating pipeline

JIANG Chao¹, GUAN Yanling¹, DENG Shunxi¹, WANG Jun²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Parent Company of Xi'an District Heating, Xi'an 710016, China)

Abstract: To study the complicated stress characteristics of T-joints in directly buried heating pipelines, a thermal-mechanical coupled finite element model was constructed using the soil spring model. The main affecting factors on stress distribution of directly buried T-joints were analyzed. A thermal-mechanical coupled finite element model for T-joints with reduced straight pipe lengths was given. The weights of thermal medium and covering soil were considered in the pipe-soil interaction of the model. The boundary conditions were applied to the ends of the main pipes and the branch. The results indicate that the junction area of buried T-joints bears peak stress with high value due to temperature rise. The secondary stress varies with temperature rise, pipe wall thickness, branch diameter and the length of partly restrained section. The internal pressure has little effect on the secondary stress of T-joints. The ground load, which decreases the maximum equivalent stress of buried tee joint, is benefit to the buried pipelines. The findings of this article aim to provide aid for security analysis on buried pipelines.

Key words: directly buried heating pipelines; tee joint; thermal-mechanical coupled analysis; finite element analysis

受周围土壤的位移束缚作用, 直埋热水供热管道受力情况较为复杂. 三通是集中供热管网中的重要管件, 在输配管线上应用较多. 由于三通分支开孔造成主管道不连续, 在相贯处的连续受力面积减小, 因此在相贯处会出现峰值应力. 对于埋地三通, 由于结构复杂, 目前没有解析模型可用于其应力分析, 规范要求采取保护或加固措施^[1], 但是具体参数没有明确规定, 在实际工程中多采用经验方法, 从而使管道的安全性存在一定的隐患, 或增加不必要的投资. 因此, 本文提出应用热-力耦合分析方法, 对直埋三通在工作状态下的应力大小和分布特性展开研究, 为确保供热管道的安全性提供帮助.

目前关于管道三通的有限元分析仅限于管道

架空非直埋敷设, 且不考虑温度应力的情况.

马爱梅等基于 ANSYS 软件分析了开孔接管三通的应力分布^[2], 通过模拟得到了内压作用下管道开孔和三通的应力分布特性. 马亚华等基于 ANSYS 软件分析了大口径三通两个应力集中区域的应力分布特性^[3]. 苏厚德等基于 ANSYS 软件分析了内压作用下大异径挤压三通的应力分布^[4]. 宋晔明等基于 ANSYS 软件分析了钢制三通在内压作用下的应力分布^[5].

以上研究均为基于架空常温管道采用有限元分析方法得到的成果, 既没有考虑温升应力的影响, 也没有考虑周围土壤对三通及其接管的位移约束及反力作用, 因此不适用于直埋热水供热管道三通

收稿日期: 2016-01-25 修改稿日期: 2016-08-25

基金项目: 国家青年科学基金项目 (51208059); 陕西省科学技术研究发展计划基金资助项目 (2013K13-02-01); 陕西省住房和城乡建设厅科学技术计划基金资助项目 (2014-04)

作者简介: 江超 (1984-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事供热直埋管道应力分析研究. E-mail: 15091336209@126.com

的应力分析和强度验算. 由于土壤限制了管道的温升热膨胀, 在管道中形成了很大的轴向应力, 使直埋供热管道产生了塑性变形. 直埋热水三通受内压、温升和土壤反力的作用, 受力情况较为复杂.

本文针对直埋热水三通受力问题, 采用通用有限元软件 ANSYS, 基于土弹簧模型建立了热-力耦合有限元模型, 对直埋热水三通的应力分布特性和影响因素进行分析研究.

1 土弹簧模型

由于直埋管道整个外表面都受到土壤的位移束缚, 因此在管土热-力耦合有限元分析中, 土壤弹簧单元的设置直接影响分析结果的可靠性. 文献^[6-7]只采用横向线性弹簧模型研究管土相互作用. 由于热水管道温升产生的热膨胀力较大, 使得与之接触的土壤产生了塑性变形, 采用三维非线性弹簧单元进行管土作用模拟, 除设置横向弹簧外, 还设置了轴向和竖向弹簧, 这些弹簧均采用非线性模型.

1.1 Winkler 模型

土弹簧模型为 Winkler 模型^[8-9], 该模型为土的离散模型, 土介质表面上任意一点的位移仅与作用在该点的应力成正比, 而与作用在其他各点的应力无关, 即:

$$\sigma = k\omega \quad (1)$$

式中: σ 为土介质表面某点处的应力, MPa; k 为地基反力系数, MPa/m; ω 为土介质表面某点处的位移, m.

这样一来, 土壤被理想化为一系列各自独立的弹簧单元. 基于 Winkler 模型, 采用 ANSYS 软件提供的 Combin39 弹簧单元进行土壤模拟.

1.2 土弹簧参数取值

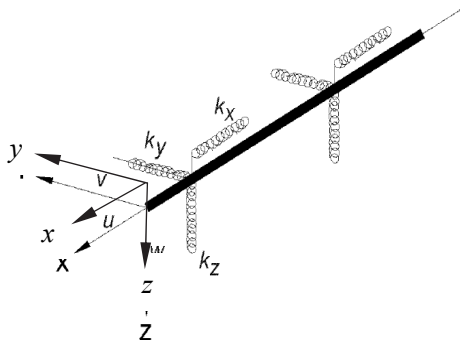


图1 管-土作用三维土弹簧模型^[10]

Fig.1 3D soil spring model for pipe-soil interaction

如图1所示, 以管道轴线方向为 x 轴建立直角坐标系, 直埋管道所受土弹簧作用可以分解为轴向

弹簧 k_x 、横向弹簧 k_y 和竖向弹簧 k_z (图1)^[10]. 所有弹簧均采用双线性模型进行分析, 因此只需确定屈服力和屈服位移, 即可确定弹簧的力-位移曲线.

1.2.1 轴向土弹簧

轴向弹簧屈服力取摩擦力, 即土压力乘以摩擦系数. 对于无地下水的情况为^[1]:

$$f_u = \mu \left[\frac{1+K_0}{2} \gamma H_p \pi D + W_p - \gamma \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: f_u 为轴向土弹簧屈服力, kN/m; μ 为管道与土壤之间的摩擦系数; K_0 为土壤静压力系数; γ 为土壤容重, kN/m³; H_p 为管道中线埋深, m; D 为保温管外径, m; W_p 为管道单位长度自重, kN/m. 轴向弹簧的屈服位移 u_u 取 $0.01D$ ^[11].

1.2.2 横向土弹簧

横向弹簧屈服力取最大侧反力, 即极限水平土压力. BS EN 13941-2009 规定按下式计算:

$$P_u = \gamma H_p K_q \quad (3)$$

式中: P_u 为横向土弹簧屈服力, kN/m; K_q 为土压力系数. K_q 的数值根据 BS EN 13941-2009 附图 B.5 中的摩擦角为 30° 的曲线进行最小二乘法拟合得到. K_q 的三次拟合曲线为

$$K_q = 9.4783 \times 10^{-4} \left(\frac{H_p}{D} \right)^3 - 0.055186 \left(\frac{H_p}{D} \right)^2 + 1.1442 \left(\frac{H_p}{D} \right) + 4.8742 \quad (4)$$

横向弹簧的屈服位移 v_u 取 $2\% H_p$ ^[10].

1.2.3 竖向土弹簧

American Lifelines Alliance 给出了竖向弹簧的计算方法^[12]:

$$q_u = N_c c D + N_q \gamma H_p D + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{2} \quad (5)$$

式中: N_c , N_q , N_γ 为承载系数; c 为土壤的粘聚力, kPa.

$$N_c = \cot(\varphi + 0.001) \left[e^{\pi \tan(\varphi + 0.001)} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi + 0.001}{2} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (7)$$

$$N_\gamma = \exp(0.18\varphi - 2.5) \quad (8)$$

式中, φ 为土壤的内摩擦角, $^\circ$. 竖向弹簧的屈服位移 w_u 取 $0.2D$ ^[12].

1.2.4 土弹簧力-位移曲线

DN1000mm (聚乙烯保护壳外径为 1 155mm) 直埋热水管道, 管顶覆土 1.4m 的情况下, 轴向、横向和竖向弹簧力-位移曲线见图 2-4. 对于其他管径的管道, 也可得到类似的曲线.

2 管道模型

Shell181 单元适用于薄壁及中等厚度壳体结构

大应变非线性分析^[13], 本文采用 Shell181 单元对管道进行建模.

为详细得到三通处的应力分布, 对相贯区域附近的网格进行了加密 (图 5). 管道横截面布置 4 排弹簧 (图 6): 顶部弹簧为轴向土弹簧, 用以模拟土壤对管道的摩擦力作用; 左右两侧为横向土弹簧, 用以模拟土壤对管道的横向压缩反力; 底部为竖向土弹簧, 用以模拟土壤对管道的竖向作用力.

三通几何参数见表 1, 材料参数见表 2^[1].

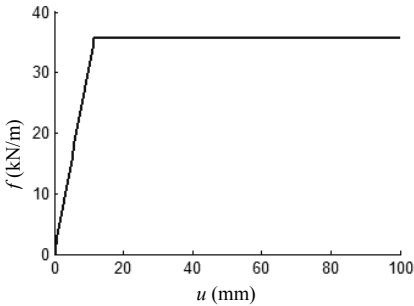


图 2 轴向弹簧力-位移曲线
Fig.2 Force-displacement curve of axial spring

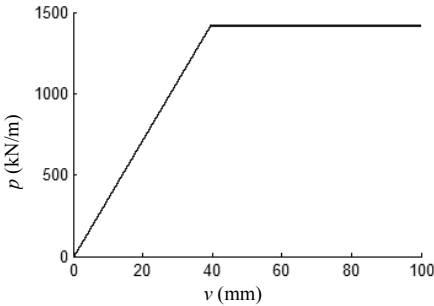


图 3 横向弹簧力-位移曲线
Fig.3 Force-displacement curve of lateral spring

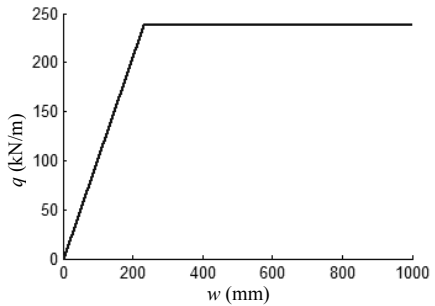


图 4 竖向弹簧力-位移曲线
Fig.4 Force-displacement curve of vertical spring

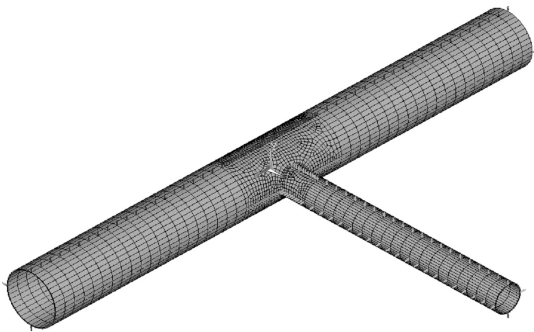


图 5 直埋三通有限元模型
Fig.5 Finite element model for buried T-joints

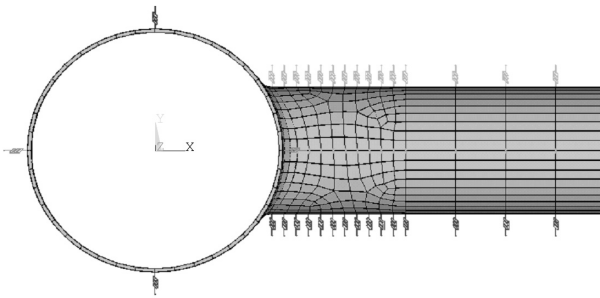


图 6 管道土弹簧布置
Fig.6 Layout of soil spring around pipes

表 1 管道几何参数

Tab.1 Geometric parameters of pipes

主管外径/mm	支管外径/mm	三通壁厚/mm
1 020	529	16

注: 本文所选壁厚为理论壁厚, 未考虑壁厚偏差的影响.

表 2 管道材料参数^[1]

Tab.2 Material parameters of pipes

弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	线膨胀系数 $\alpha/[\text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$
19.8×10^4	0.3	12.4×10^{-6}

3 热-力耦合分析

供热管道应力分析的重点是热作用, 即受热管道产生热膨胀力, 而周围土壤限制了其热膨胀力的释放, 从而产生了管道和土壤的变形协调. 本文将热膨胀与土壤压缩变形的耦合作用称为热-力耦

合. 管道只受热而不受周围土壤作用的条件下, 管道中不存在轴向应力; 管道受到周围土壤作用而无热作用, 轴向应力可以忽略. 热-力耦合作用下, 管道中将产生很大的轴向应力, 极易造成管道破坏.

本节依据所建立的有限元模型, 分析内压、温升、土壤作用对三通应力分布特性的影响.

3.1 热-力耦合计算

图 7 和图 8 给出了不同外载作用下三通的应力分布和位移分布. 两图所计算的三通臂长均为 10 m (为清晰展现计算结果, 仅给出了三通附近的计算结果). 其中图(a)仅设定管内压力为 1.0 MPa; 图(b)在图(a)工况的基础上在管道周围按第 2 节的方法设置了土弹簧; 图(c)在图(b)工况的基础上给管道增加了 120 °C 的温升荷载. 图(b)和图(c)中, 在三通主

管端头设置了 130 kN 的轴力、三通支管端头设置了 45kN 的轴力^[14]，以模拟补偿器的反力作用。

内压作用下，三通的最大位移仅为 0.351 mm (图 7a)，最大当量应力为 108 MPa (图 8a)，最大当量应力出现在三通相贯区肩部，高应力区由相贯区向主管轴线以约 30° 的方向扩展；增加土壤作用后，最大位移增加至 3.828 mm (图 7b)，最大当量应力增加至 143 MPa (图 8b)，最大当量应力转移至相贯区腹部，高位移和高应力区均拓展超过半个圆周截面；增加温度荷载后，最大位移增加至 6.949 mm (图 7b)，最大当量应力增加至 241 MPa (图

8c)，高位移区扩展的范围更大，高应力区范围没有变化，但应力集中更为明显。

表 3 为对应图 7 和图 8 的三通计算结果汇总。无温升作用下，弯头的当量应力较小；温升作用下，三通主、支管均产生了较大的位移，使管土作用加强，从而产生了较大的当量应力 (图 8c)。

表 3 三通计算结果
Tab.3 Results for T- joints

荷载	内压	内压-土壤	内压-温度-土壤
最大当量应力/MPa	108	143	241
最大位移/mm	0.351	3.828	6.949

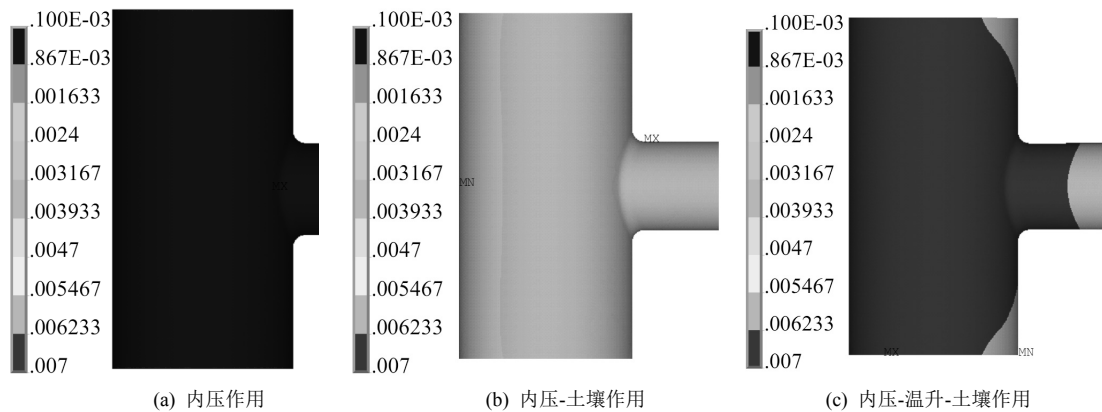


图 7 三通位移等值分布图/m
Fig.7 Displacement contour of T- joints t/m

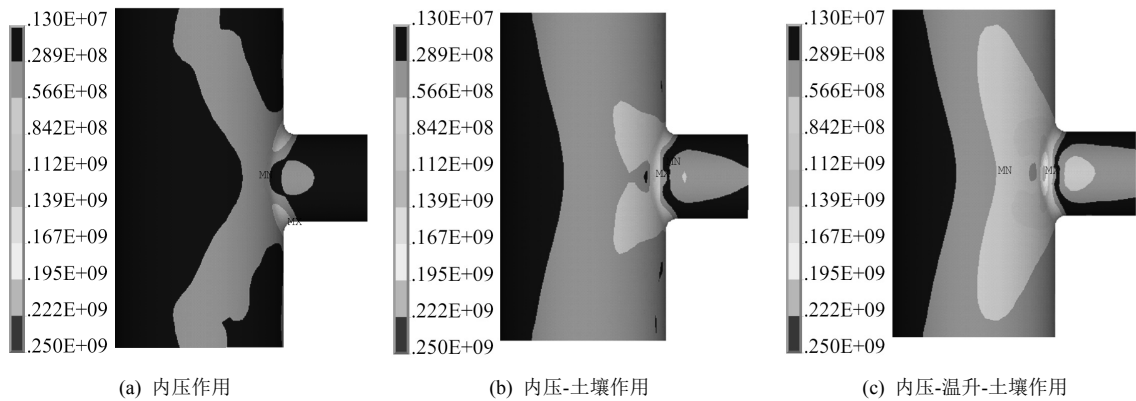


图 8 三通应力等值分布图/Pa
Fig.8 Stress contour of T- joints /Pa

3. 2 接管长度的简化

工程应用中，三通各支管长度均较长（干线长度常达几公里），因此对三通进行全尺寸建模必将耗费大量的计算机存储空间和计算时间。本节研究如何通过改变边界条件以减小有限元模型的长度，即简化长尺寸计算模型的单元数量。

三通处于锚固段时没有明显的管土作用，因此，模型的简化分析应对管土作用明显的过渡段进行分析。

根据过渡段三通管段位移矢量分析结果（图 9），三通附近区域位移矢量的横向分量很大，而远离该区域后位移矢量的横向分量明显减少，说明远离三通的直管上横向土弹簧作用很小。竖向位移分析也有同样的规律。

图 9(b)给出了 10 倍主管管径处的位移矢量分布放大图。可以看出，位移矢量的主方向在轴向，且位移矢量关于管道轴线基本对称，说明横向土压力和竖向土压力没有产生明显的作用。这一现象在

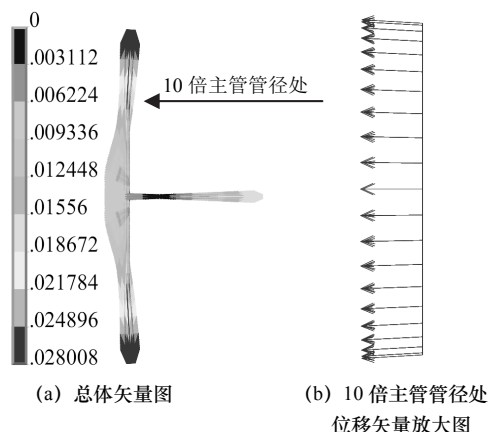


图9 过渡段三通管段的位移矢量图/m

Fig.9 Displacement vector of partly restrained section with T-joints /m

10 倍主管管径以外区域更为明显. 因此, 对于 10 倍主管管径以外区域, 可以只计算轴向土壤作用 (即摩擦力作用). 这样, 只需要按不小于 10 倍主

管管径长度建立有限元模型, 管道端头施加相应的约束条件即可进行各种长度三通管段的计算.

在工程中, 为了限制三通支管对主管的推力, 支管长度不宜超过 9 m^[15]. 对主管长度为 100 m、支管长度为 9 m 的三通管段进行分析. 简化模型取主管长度为 20 m, 以 80 m 管道产生的摩擦力与补偿器摩擦力之和作为轴向力施加到两个管端; 支管端头设定为固定条件. 两主管管端施加大小 2 978 kN 的轴向力 (其中管道轴向摩擦力为 2 848 kN, 补偿器摩擦力为 130 kN), 模拟结果见图 10. 最大位移为 12.131 mm, 最大当量应力为 578 MPa. 全尺寸模型的模拟结果见图 11, 最大位移为 12.129 mm, 最大当量应力为 580 MPa. 对比图 10 和图 11 可以发现, 简化模型与全尺寸模型的位移和当量应力分布基本相同, 最大位移、最大当量应力的偏差均小于 0.5%.

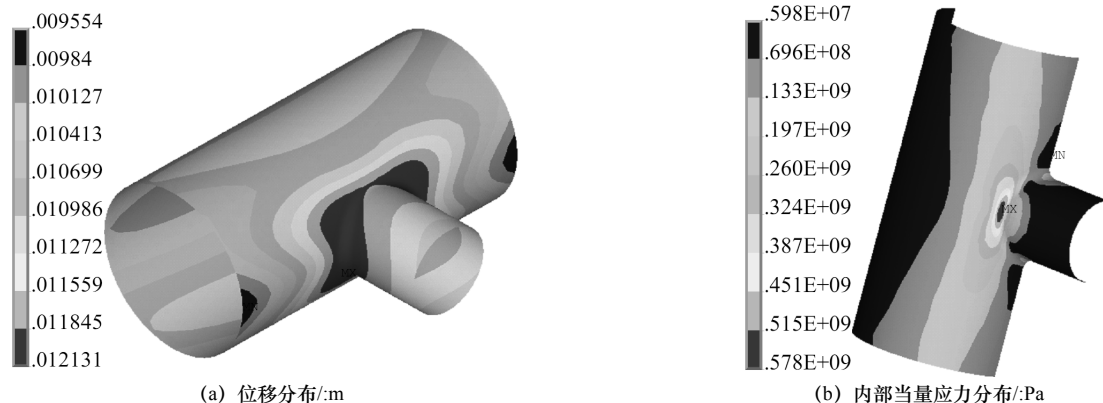


图10 100 m 长三通简化模型应力分析

Fig.10 Stress analysis on T-joints of simplified model for tee joint with 100m branches

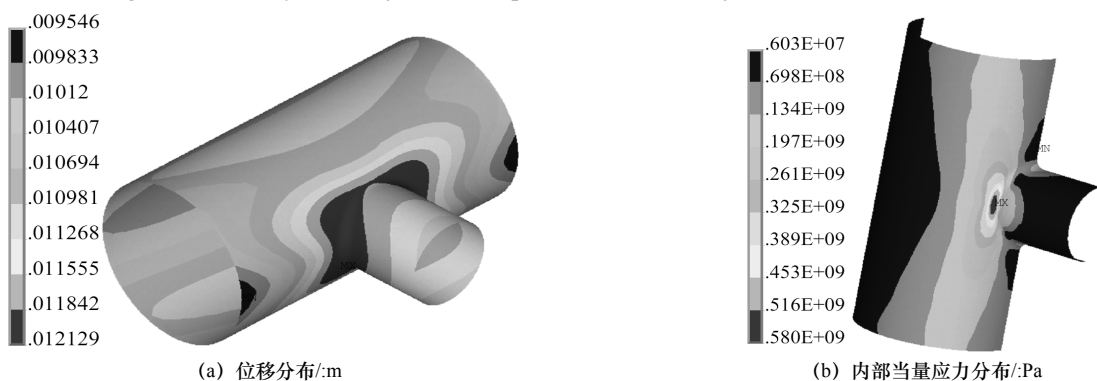


图11 100 m 长三通应力分析

Fig.11 Stress analysis on T-joints with 100m branches

4 三通应力的影响因素

按照应力分类法, 分别对影响三通一次应力和二次应力的因素进行分析.

4.1 一次应力的影响因素

影响一次应力的因素为内压、管道壁厚、支管

管径. 由图 12 和图 13 可以看出, 一次应力随壁厚的增加而降低, 随内压、支管管径的增加而增加.

4.2 二次应力的影响因素

根据应力分类法, 二次应力为位移导致的应力, 因此, 影响三通位移的因素都会对二次应力产生影响. 所以, 影响二次应力的因素除内压、管道壁厚、

支管管径外,还有温升和主管过渡段长度.图14~图17给出了这些因素对二次应力的影响.

由图14~图17可以看出,二次应力随壁厚的增加而降低,随温升、支管管径、主管过渡段长度的增加而增加.图14表明内压对二次应力影响不大.

4.3 地面荷载的影响

地面人群荷载、地面堆积荷载和地面车辆荷载

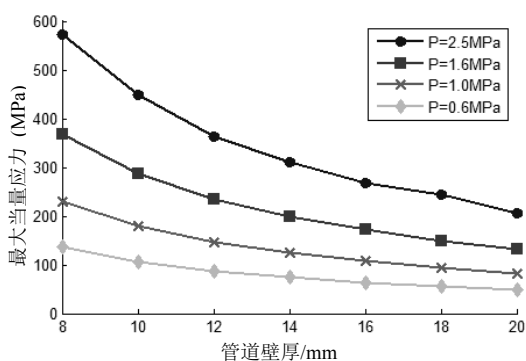


图12 内压和管道壁厚对一次应力的影响

Fig.12 Effect of internal pressure and wall thickness on primary stress

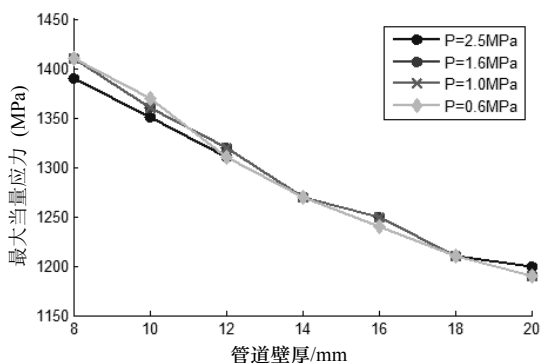


图14 内压和管道壁厚对二次应力的影响

Fig.14 Effect of internal pressure and wall thickness on primary stress

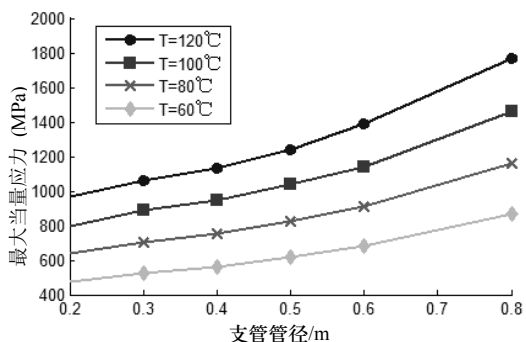


图16 温升和支管管径对二次应力的影响

Fig.16 Effect of temperature rise and branch diameter on secondary stress

《城市道路工程设计规范》(CJJ37-2012)^[17]第3.6.1条规定“道路路面结构设计应以双轮组单轴载100 kN为标准轴载.”“标准轴载计算参数为:双轮组单轴载100 kN,以BZZ-100表示,轮胎压

均会影响管道所受土压力大小,本文通过调整土弹簧刚度(修改屈服力)模拟地面荷载的影响.

按照《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332-2002)^[16]的规定,地面人群荷载标准值取4 kN/m²,准永久值系数取0.3;地面堆积荷载标准值取10 kN/m²,准永久值系数取0.5.这两项直接以准永久值叠加到土压力计算上.

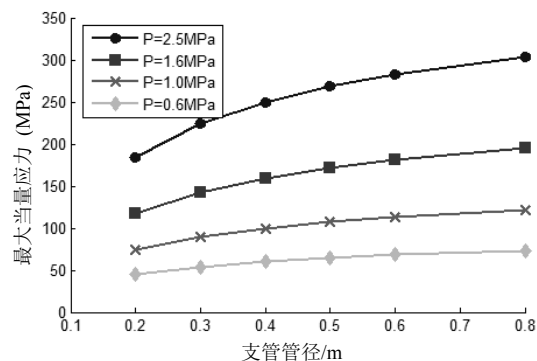


图13 内压和支管管径对一次应力的影响

Fig.13 Effect of internal pressure and branch diameter on primary stress

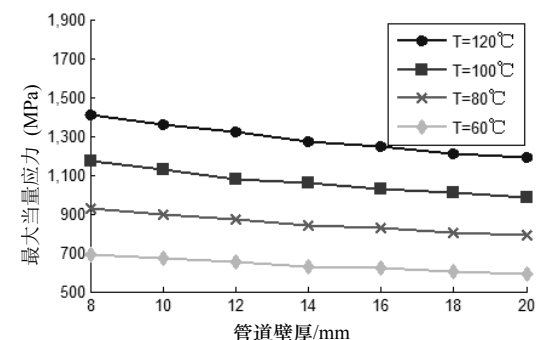


图15 温升和管道壁厚对二次应力的影响

Fig.15 Effect of temperature rise and wall thickness on secondary stress

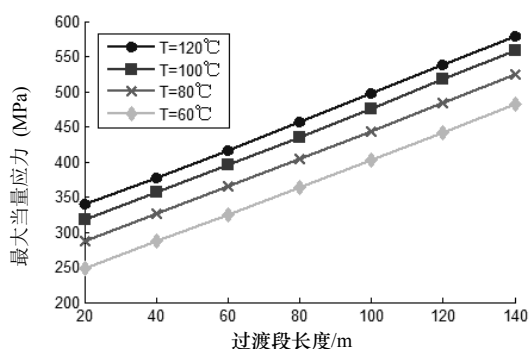


图17 温升和过渡段长度对二次应力的影响

Fig.17 Effect of temperature rise and length of partly restrained section on secondary stress

强为0.7 MPa,单轴轮迹当量圆半径 r 为10.65 cm,双轮中心间距为 $3r$ 。”

按照分布角法^[18]进行管顶地面车辆荷载产生的附加土压力进行计算,双轮在地面下 H_p 深度处

产生的竖向应力标准值为

$$q_{vk} = \frac{\mu_d Q_{vk}}{2\pi(r + H_p \tan \theta)^2} \quad (9)$$

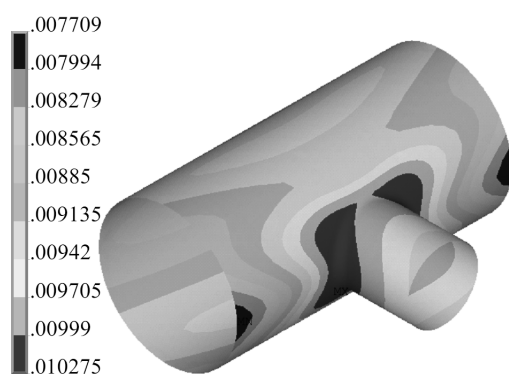
式中: q_{vk} 为双轮产生的竖向压力标准值, kN/m^2 ; μ_d 为车辆轮压的动载系数, 覆土深度大于 0.7 m 时取 1.0; Q_{vk} 为标准轴载, kN ; θ 为压力扩散角, 取 30° 。

计算得到地面车辆荷载标准值为 10.2 kN/m^2 。地面车辆荷载的准永久值系数取 $0.5^{[16]}$ 。

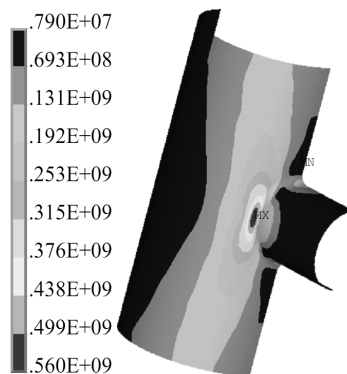
从而, 地面人群荷载、地面堆积荷载和地面车辆荷载引起的竖向土压力的附加荷载为 $q_{v,add}=11.3 \text{ kN/m}^2$ 。

根据公式 (2), 得到轴向弹簧的屈服力附加值为

$$f_{u,dd} = \mu \frac{1+K_0}{2} q_{v,add} \pi D \quad (10)$$



(a) 位移分布/ m



(b) 内部当量应力分布/ Pa

图 18 地面荷载作用下 100 m 长三通简化模型应力分析

Fig.18 Stress analysis on tee joint of simplified model for T-joints with 100m branches sustaining ground load

5 结语

通过在管道周围设置轴向、横向和竖向土弹簧对直埋热水供热管道三通在内压和温升荷载作用下的应力分布特性进行了热-力耦合有限元模拟分析。通过对比分析, 可以得出如下结论:

(1) 内压、土壤作用下三通的应力和位移均较低; 增加温升荷载后, 位移明显增加, 管土作用增强, 当量应力增加较大。

(2) 温升荷载作用下, 三通接管对三通的热作用可以采用力荷载等效替代, 等效后的模型三通接管长度应不小于 10 倍主管管径, 并以轴力替代被缩短掉的接管的轴向作用。

(3) 内压作用下, 三通一次应力随壁厚的增加而降低, 随内压、支管管径的增加而增加; 施加土

根据公式 (3), 得到横向弹簧的屈服力附加值为

$$p_{u,dd} = q_{v,add} K_q \quad (11)$$

根据公式 (5), 得到竖向弹簧的屈服力附加值为

$$q_{u,dd} = N_q q_{v,add} D \quad (12)$$

对主管长度为 100m、支管长度为 9 m 的三通管段采用简化模型进行分析, 设定内压为 1.0 MPa 、温升 120°C , 按公式 (10~12) 增加地面荷载, 得到的结果见图 18。

增加附加荷载后, 相当于增加了管道埋深, 这一点对管道是有利的。从模拟结果上也体现了这一点。相比于没有设置地面荷载的模拟结果 (图 10), 增加地面荷载后, 最大位移由 12.131 mm 减小为 10.275 mm , 最大当量应力由 578 MPa 减小为 560 MPa 。

壤和温度作用后, 三通二次应力随壁厚的增加而降低, 随温升、支管管径、主管过渡段长度的增加而增加, 内压对二次应力影响不大。

(4) 温升作用下, 地面荷载可以减小三通的最大位移和最大当量应力, 对三通起保护作用。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇供热直埋热水管道技术规程: CJJ/T 81-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for directly buried hot-water heating pipeline in city: CJJ/T 81-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 马爱梅, 鹿晓阳. 管道开孔接管和三通设计及应力分析 [J]. 机械设计与制造, 2007(7):50-51.

- MA Aimei, LU Xiaoyang. Design and stress analysis of opening hole on pipe or three-way pipe [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(7):50-51.
- [3] 马亚华, 何东升. X80 钢级大口径三通应力分析与结构优化[J]. 油气储运, 2010, 29(1):62-64,75.
MA Yehua, HE DongSheng. Stress analysis and structure optimization on large diameter X80 tee joints [J]. Oil & Gas Storage Transportation, 2010,29(1):62-64,75.
- [4] 苏厚德, 冯玉洁, 樊建领. 异径挤压三通应力的有限元分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2010,23(3):86-89.
SU Houde, FENG Yujie, FAN Jianling. Finite element analysis of extruded reducing tee [J]. Journal of petrochemical universities, 2010,23(3):86-89.
- [5] 宋晞明, 马俊峰, 孙中飞. 基于 ANSYS 软件的钢制三通有限元应力分析[J]. 煤气与热力, 2012,32(3): B01-B06.
SONG Ximing, MA Junfeng, SUN Zhongfei. ANSYS-based finite element stress analysis of steel tee fitting [J]. Gas & Heat, 2012, 32(3):B01-B06.
- [6] 王国伟. 大口径直埋供热管道 90° 弯头疲劳寿命的有限元分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
WANG Guowei. Large-diameter directly-buried heating pipe 90° elbow fatigue life of the finite element analysis [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [7] 杜保存. 大口径供热直埋椭圆弯头的有限元分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
DU Baocun. The finite element analysis of large diameter heating directly-buried elliptic elbow [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [8] A. Selvadural. 土与基础相互作用的弹性分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
Selvadura A. Elastic analysis of soil-foundation interaction [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [9] E. Winkler. Theory of elasticity and strength [M]. Prague: Dominicus, 1867. (in German)
- [10] Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating: BS EN 13941-2009[S]. London: Standards Policy and Strategy Committee, 2009.
- [11] API-RP 2A-WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - working stress design [M]. USA: American Petroleum Institute Production Department, 21th edition, 2002:61-63.
- [12] American Lifelines Alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe[M]. ASCE, 2001.
- [13] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
WANG Xinmin, LI Yiqiang, XU Hongwei. ANSYS element for structural analysis and its application [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 中国市政工程华北设计研究院. 05 系列建筑标准设计图集:05N5 热力工程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005:62.
North China Municipal Engineering Design & Research Institute. 05 Series of Building Standard Collective Drawings: 05N5 Thermal engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [15] 王飞. 直埋供热管道工程设计 [M]. (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2014:104.
WANG Fei. Engineering design for directly buried heating pipelines [M]. 2nd ed, Beijing: China Architecture & Building Press, 2014:104.
- [16] 中华人民共和国建设部. 给水排水工程管道结构设计规范:GB 50332-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of construction of the People's Republic of China. Structural design code for pipelines of water supply and waste water engineering: GB 50332-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范:CJJ 37-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban road engineering: CJJ 37-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [18] 王直民. 交通荷载作用下埋地管道的力学性状研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006:46.
WANG Zhimin. Study on mechanical behaviors of buried pipelines under traffic loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006:46.

(编辑 沈波)

(上接第 573 页)

- International Journal of Refrigeration, 2002, 25(3): 351-361.
- [13] 王怡, 黄艳秋. 炼铁厂高温烟气流动特性及排风罩优化[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(S1):162-166.
WANG Yi, HUANG Yanqiu. Flow field of high-temperature gases and exhaust hood optimization in ironmaking plant[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013 (S1):162-166.
- [14] LI Yuguo, NIELSEN P V. CFD and ventilation research[J]. Indoor Air, 2011, 21(6): 442-453.
- [15] 王怡, 疏艺波, 黄艳秋. 浮射流速度场和断面流量规律特性的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46 (6):839-843.
WANG Yi, SHU Yibo, HUANG Yanqiu. The study on the characteristics of velocity field and section flow rate of buoyant jet[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46 (6):839-843.
- [16] 高军. 建筑空间热分层理论及应用研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 2007.
GAO Jun, Research of the theory of thermal stratification in buildings and its applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

(编辑 沈波)