

## 跨越平行三通热应力分析及设计优化

王杰<sup>1</sup>, 单既国<sup>1,\*</sup>, 肖培飞<sup>2</sup>, 施志钢<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 菏泽投资发展集团有限公司, 菏泽 274000)

**摘要:** 为了保证集中供热埋地三通管道的运行安全, 提出跨越平行三通的设计方案, 提高了供热三通管道吸收热应力的能力, 并且能够连续稳定运行。利用 CAESAR II 应力分析软件, 模拟了跨越平行三通在运行工况时的工作状态, 通过分析管道内压、壁厚、温升、弯头弯曲半径以及短臂  $L_2$  的长度对三通应力的影响, 提出了对三通结构参数的优化。结果表明, 跨越平行三通具有补偿量大、管道强度高、不占用地下空间、工程造价低等特点。

**关键词:** 直埋供热三通; CAESAR II 软件; 应力分析

**中图分类号:** TU995.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0140-07

## Thermal stress analysis and design optimization of across-parallel tees

WANG Jie<sup>1</sup>, SHAN Jiguo<sup>1,\*</sup>, XIAO Peifei<sup>2</sup>, SHI Zhigang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Heze Investment Development Group Co. Ltd., Heze 274000, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe operation of the buried tee pipeline of central heating, this paper proposes a design scheme of across-parallel tees, which improves the ability of the heating tee to absorb thermal expansion stress and makes the heating tee operate continuously and stably. In this paper, CAESAR II stress analysis software is used to simulate the working state of the across-parallel tees under heating conditions, and the influence of pipe internal pressure, wall thickness, temperature rise, elbow bending radius and length of short arm  $L_2$  on tee stress is analyzed, and the structural parameters of tee are optimized. The results show that the across-parallel tees have the characteristics of large compensation amount, high pipeline strength, no occupation of underground space and low project cost.

**Key words:** directly buried heating tee pipeline; CAESAR II; stress analysis

供热三通是城镇供热管网中重要的分流管件<sup>[1]</sup>, 在管网运行时, 管道会受到内压或外载荷等因素直接引起的一次应力和热胀冷缩引起的二次应力, 使直埋三通管道受力较为复杂<sup>[2]</sup>; 与此同时, 由于三通支管需要在供热主管上开孔焊接, 造成三通接口处受力不连续, 容易出现集中应力, 使得三通管道容易开裂, 造成热水泄露<sup>[3-4]</sup>。在工程中, 为避免跨越三通支管对主管的推力过大, 一般设置支管长度小于 9 m<sup>[5]</sup>。因此, 研究一种安全有效的三通支管引出方式, 减缓三通主管道因应力过大而被破坏<sup>[6]</sup>, 对于保障供热管道

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078257)

作者简介: 王杰(1995-), 男, 陕西咸阳人。硕士, 研究方向为供热技术与节能。E-mail: W1433422@163.com。

\* 通信作者: 单既国(1970-), 男, 山东青岛人。教授, 主要从事城镇供热技术及清洁能源利用方面的研究。E-mail: qdjgh@163.com。

的安全极其重要。

针对上述问题,专家学者们做了大量的研究工作。李奎等<sup>[7]</sup>通过数值模拟,分析了三通最大应力超过规范规定的疲劳极限时,仍能正常运行,探究了更合理的疲劳极限。燕勇鹏等<sup>[8]</sup>采用有限元分析法,对不同工况下供热三通最小允许壁厚进行模拟计算。陈曦等<sup>[9]</sup>基于 ANSYS 软件分析了直埋供热焊制三通支管对三通应力的影响因素,总结了支管长度、管壁厚度以及支管弯头曲率对三通应力的影响。刘鑫等<sup>[10]</sup>基于 CAESAR II 软件分析了埋地管道受土壤摩擦力作用,一、二次应力和热应力的占比情况。张禹等<sup>[11]</sup>基于 CAESAR II 软件分析了集气站放空管道的应力分布,并合理布置约束位置进行优化管道所受应力情况。以上研究均是对三通管道开口披肩处及直埋管道受力因素的分析,没有考虑利用三通支管的结构吸收管道产生的热胀应力。

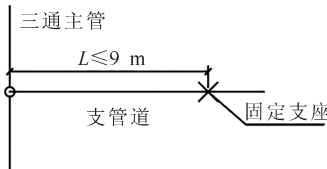
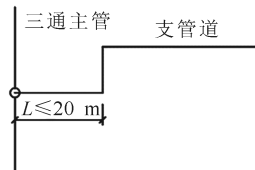
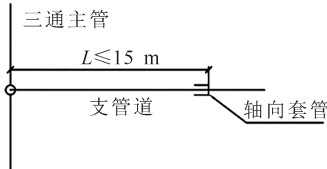
由于受力结构复杂,埋地供热三通管道在工程设计中,多采用经验方法确定三通管道的结构尺寸,使得三通管道的长时间平稳运行存在隐患<sup>[12]</sup>。因此,本文提出了跨越平行三通的设计方法,利用三通管道的自身形变吸收支管道的热胀应力,并采用有限元软件 CAESAR II,对其运行状态的应力大小及结构参数进行模拟研究,以期为提高三通管道的安全运行提供指导。

## 1 跨越平行三通理论

### 1.1 供热三通支管设计方法

一般供热管道使用无缝钢管焊接而成,供热管道在运行时,不可避免地存在热胀应力,而热胀应力对三通支管的安全性有着重要影响,所以三通支管的设计一直是人们重点关注的问题。通过查阅文献,总结以往成熟的设计方案,见表 1,但都存在一定的局限性,通过对比研究,本文提出了更优的跨越平行三通设计。

表 1 三通支管设计

补偿方式	三通支管设计示意图	应用特点	
		优点	缺点
跨越三通固定支座		结构简单,施工周期短,造价低廉,占用空间小。	热应力补偿能力差,当 $L$ 超过 9 m 时,三通主管容易受到应力破坏;需配合其他补偿措施一起使用。
Z 形自然补偿装置		Z 形自然补偿弯管设计简单,布置方便。	需要增加 4 对弯头,造价更高;且占据地下空间,加大了土方开挖量,还需考虑地形等影响。
轴向套管补偿装置		结构相对简单,整体长度不长(补偿量较大)。	需要设置设备检查室,不能直接用于直埋敷设;需定期运行维护,增加了维护费用。

### 1.2 跨越平行三通的原理

跨越平行三通利用一个 L 形弯管和跨越三通焊接加工而成,组成了两段长度不一的弯管段,分别是短臂  $L_1$  和短臂  $L_2$ ,如图 1 所示。在管网运行时,跨越平行三通会产生图中虚线所示的形变,由于支管道的热形变量大于短臂  $L_2$ ,所以最大弯曲应力发生在短臂  $L_2$  处,短臂  $L_2$  的长度越短,弯曲应力越大,此时虚线的形变位移可以吸收管道的热胀应力。跨越平行三通正是利用 L 形弯管的自然补偿特性,可以降低支管道上热胀应力对三通的影响,起到保护三通管道的作用。

跨越平行三通的管道结构,相比于跨越三通固定支座只增加了短臂 $L_2$ ,不用设置固定支座;相比于Z形自然补偿装置和轴向套管补偿装置,跨越平行三通短臂 $L_2$ 与三通主管道平行布置,不过多占用地下空间,而且跨越平行三通加工制造费用少且施工周期短,不增加额外的运行费用。

## 2 CAESAR II 管道模型建立

### 2.1 CAESAR II 管道模型

CAESAR II 是管道应力专业分析软件,提供丰富的钢材数据库,可根据具体情况自定义管道模型的压力载荷、热载荷等其他载荷<sup>[13]</sup>,并且内置 B31.1/B31.3/B31.8/B31.4 液体输送等管道校验规范及标准,可以对管道进行多种载荷工况的模拟分析。运用 CAESAR II 管道建模,只需 4 个步骤:①建立管道模型结构;②管道模型错误检查;③应力分析计算;④计算结果输出。如果模型预处理提示错误,则修改模型参数或工况条件,重复步骤①和②,直至计算结果符合要求<sup>[14]</sup>。

以某街区高温水供热管道为例,对跨越平行三通主要节点的冷态、热态综合应力进行模拟计算。管道热媒介质为热水,管道材料为 Q235B<sup>[15]</sup>,管材特性见表 2;主管管径为 DN450 mm,支管管径为 DN300 mm,管壁厚度均为 8 mm;管道的设计运行温度为 100 °C,管道压力为 1.0 MPa;保温材料密度为 200 kg/m<sup>3</sup>,保温层厚度为 50 mm;三通主管道埋深为 1.8 m,管长为 10 m,三通支管焊接在主管道中间 5 m 处,埋深为 1.0 m,长为 15 m。在 CAESAR II 软件中设置管道模型如图 2 所示(图 2 是模型的主要部分),其中支管短臂 $L_1$ 管道,选用普通长半径弯头,管长为 0.8 m;短臂 $L_2$ 管道选用曲率半径 $R=1.5D$ ( $D$ 为管径)的弯头,管长为 1.5 m,其中节点 10、110 为固定点。支管道底部采用细沙土进行回填,沙土密度应小于 1700 kg/m<sup>3</sup>;应力计算规范选用 ASME B31.3—2016<sup>[16]</sup>。

完成上述建模后,利用软件错误自检功能,逐一确认修改,即可进行应力分析计算,计算结果见表 3。

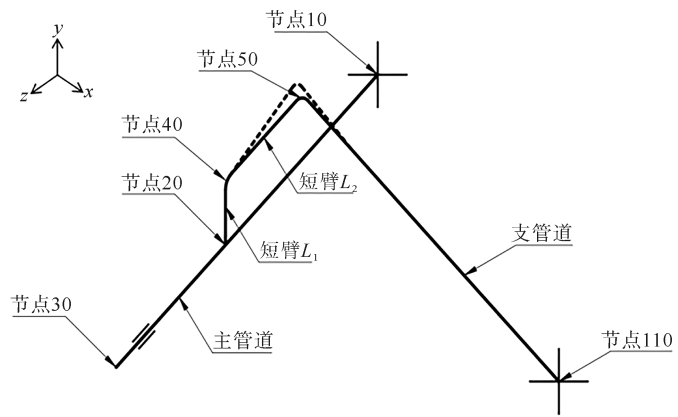


图1 跨越平行三通管道结构

CAESAR II 软件在建立管道模型时以 10 的倍数作为管段节点,其中节点 50 到节点 110,包含了 5 段 3 m 长的管道,为了图片清晰表达,节点 60、70、80、90、100 未在图中标出

表2 管道材料物理参数

弹性模量 $E/\text{MPa}$	热膨胀系数 $\alpha/(\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	泊松比 $\nu$
$1.98 \times 10^5$	$1.24 \times 10^{-5}$	0.3

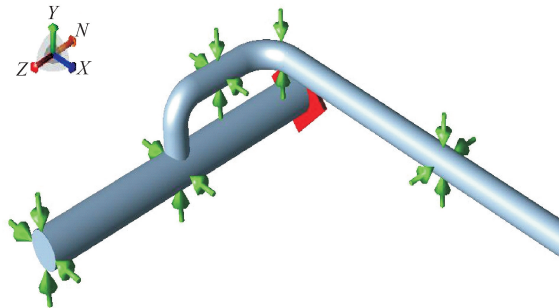


图2 跨越平行三通管道模型结构

其中支管短臂 $L_1$ 管道,选用普通长半径弯头,管长为 0.8 m;短臂 $L_2$ 管道选用曲率半径 $R=1.5D$ ( $D$ 为管径)的弯头,管长为 1.5 m,其中节点 10、110 为固定点。支管道底部采用细沙土进行回填,沙土密度应小于 1700 kg/m<sup>3</sup>;应力计算规范选用 ASME B31.3—2016<sup>[16]</sup>。

表3 三通管道数值计算结果

节点	冷态			热态		
	综合应力/kPa	许用应力/kPa	比率/%	综合应力/kPa	许用应力/kPa	比率/%
10	19 383.9	278 293.9	7.0	13 361.9	268 548.0	5.0
20	48 692.6	277 852.0	17.5	51 381.6	267 231.4	19.2
30	0.0	280 164.3	0.0	67 495.9	273 879.1	24.6
40	86 801.9	280 008.4	30.9	74 816.3	273 816.0	27.3
50	168 249.5	280 417.2	59.9	85 377.3	273 686.5	31.2
110	46 154.6	278 807.0	16.6	16 761.1	272 026.1	6.2

### 2.2 数值模拟结果分析

通过 CAESAR II 对跨越平行三通管道模型的运算结果分析,管道的结构尺寸符合应力校核规范,可以应用于工程实践。由表 3 可知,跨越平行三通受热应力最大的节点是节点 50,所受一次应力最大值为 168.2 MPa,比率为 59.9%;二次应力最大值为 85.3 MPa,比率为 31.2%。由此可知,三通管道的支管长度大于短臂  $L_2$ ,支管所产生的应力也大于短臂  $L_2$  产生的应力,所以最大弯曲应力发生在短臂  $L_2$  一端的固定节点 50 处。因此,可以利用 L 形弯管的形变偏移,吸收三通支管受热所产生的推力,从而保护三通管道不会被热胀应力破坏,管道受热形变效果及热应力方向,如图 3 所示。

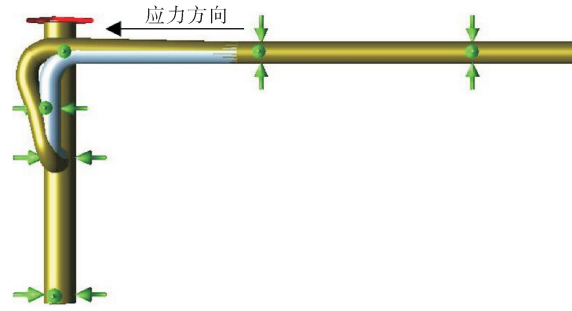


图 3 跨越平行三通形变效果  
 ■ 安装状态; ■ 受热状态

为了增强管道的受力稳定和安全运行,竖直短臂  $L_1$  可以采用固定支架加以固定,短臂  $L_2$  处可以利用具有保温性能的软性材料进行回填处理,并且,预留出短臂  $L_2$  的伸长和收缩变形空间,以减轻支管道的热胀应力对三通主管道焊接处的破坏作用,确保三通管道正常运行。

为了保护弯管区域,一般可以在弯头附近设置锚固点,位置点近似为靠近弯头 20 倍直径处,阻挡直管段位移。在横向变形段弯头附近加大弹性臂长。采用特殊的回填措施,以增大管道柔性。在三通安装前,进行管道预热直埋,缩小运行安装温差,加厚弯头壁厚或增大弯曲半径。

## 3 跨越平行三通结构优化

如前文所述,给出了跨越平行三通的结构参数,但三通管道的应力大小受较多因素的影响,如设计压力、管道温度、壁厚、弯头曲率以及短臂  $L_2$  的长度。通过 CAESAR II 软件进行数值模拟,分析跨越平行三通在不同工况下的应力变化趋势,研究跨越平行三通所能承受的最大应力的结构参数,并对一些关键影响参数进行优化。

### 3.1 压力和壁厚对应力的影响

设置三通主管、支管管径分别为 DN450 mm、DN300 mm,支管长度为 18 m,短臂  $L_1$  长度为 0.8 m,短臂  $L_2$  长度为 1.5 m,管道运行温度设为 100 °C,运行压力分别设为 0.6、1.0、1.6、2.5 MPa,当支管管道壁厚分别取 8、10、12、14、16、18、20 mm 时,跨越平行三通节点 50 处最大当量应力值,如图 4 所示。

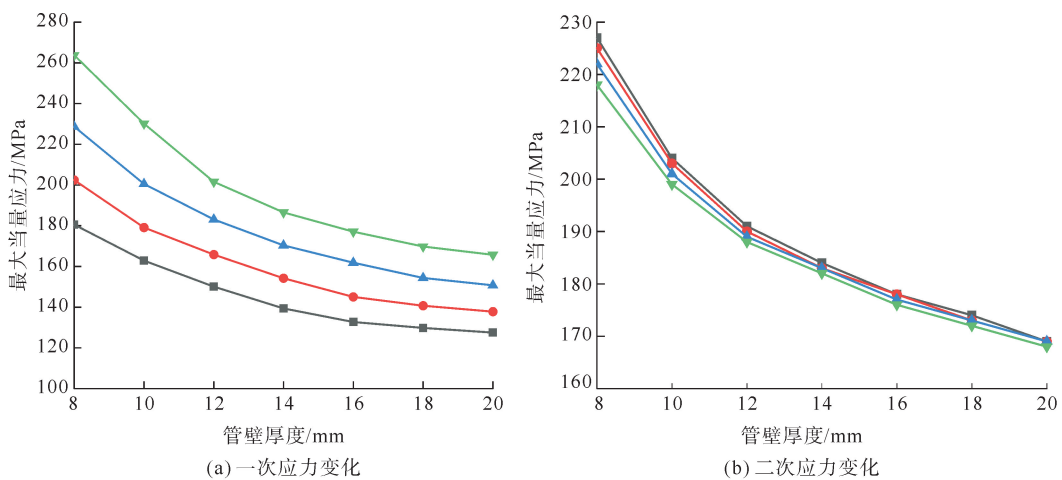


图 4 内压和管道壁厚对应力的影响

■ 0.6 MPa; ■ 1.0 MPa; ■ 1.6 MPa; ■ 2.5 MPa

由图 4 可知,在管道内压相同时,当支管管壁厚度增大,跨越平行三通节点 50 处,一、二次最大应力值



有显著的下降。在 1.0 MPa 压力下,支管管壁厚度由 8 mm 增加到 10 mm 时,一次最大应力值下降了近 11.6%,二次最大应力值平均下降了近 10.6%。但是,当支管道壁厚大于 12 mm 时,管壁厚度对三通的一、二次最大应力的影响能力开始逐渐下降。当支管道壁厚增加到 14 mm 时,节点 50 处一次最大应力值相比壁厚 8 mm 时下降 25.1%,远低于规范的要求值。因此,在管径小于 DN500 mm 时,没有必要选用 10 mm 以上的管道壁厚。本设计在管道运行温度 100 °C,管道内压 1.0 MPa,支管管壁厚 8 mm 时,将跨越平行三通支管的长度提升至 18 m,节点 50 处,一、二次最大应力比率分别为 63.7%、32.8%,最大应力值满足动力管道规范 B31.4 的要求。

数值模拟结果表明在支管管壁厚度相同、管道内压不同时,一次应力最大值的下降幅度小于 20 MPa,二次应力最大值的下降幅度小于 4 MPa,因此,供热管道在其他工况条件保持相同时,管道内压相对于管道运行温度,对管道热应力的影响很小。

### 3.2 温度和壁厚对应力的影响

设置三通主管、支管管径分别为 DN450 mm、DN300 mm,支管长度为 18 m,短臂  $L_1$  长度为 0.8 m,短臂  $L_2$  长度为 1.5 m,管道运行压力为 1.0 MPa,管道运行温度分别设为 60、80、100、120 °C,当支管道壁厚分别取 8、10、12、14、16、18、20 mm 时,跨越平行三通节点 50 处最大当量应力值,如图 5 所示。

由图 5 可知,在管道运行温度相同、管壁厚度不同时,二次最大应力值随支管道壁厚的增大,呈现下降趋势;当管道壁厚超过 10 mm 时,管道运行温度对于二次应力的影响曲线,其斜率基本相同,下降率约为 5%。二次应力主要由管道受热膨胀和土壤的束缚作用所产生,在相同壁厚时,管内温度越高,支管受到的二次应力越大。

通常来说,供热管道的供水温度高于回水温度,所以管道的最大应力出现在供水管一侧。因此,管壁厚度在满足供水管应力要求时,同样满足回水管道。在管内温度为 100 °C,管道运行压力为 1.0 MPa,管壁厚度从 8 mm 增大至 10 mm 时,三通最大应力值下降了 9.2%;当管道壁厚超过 10 mm 时下降幅度保持在 5%以下,且下降幅度越来越小。因此,在实际工程中,管径小于 DN500 mm 的管道没必要选用 10 mm 以上的管壁厚度。

### 3.3 弯管曲率半径对应力的影响

设置三通主管、支管管径分别为 DN450 mm、DN300 mm,管道运行温度设为 100 °C,管道运行压力为 1.0 MPa,支管壁厚为 8 mm,短臂  $L_2$  长度为 1.5 m,当节点 50 处弯管曲率半径分别取公称直径(DN)的 1.0、1.5、2.5、4.0 倍时,跨越平行三通节点 50 处弯头最大当量应力值,如图 6 所示。

由图 6 可知,当支管弯头曲率半径增大时,跨越平行三通的最大应力值呈下降趋势。当曲率半径从 1.0 倍 DN 增大至 2.5 倍 DN 时,三通支管弯头处应力呈线性减小,下降率约为 12.4%;当曲率半径大于 2.5 倍 DN 时,下降趋势有所减缓;当曲率半径从 2.5 倍 DN 增大至 4.0 倍 DN 时,三通支管最大应力值下降了 14.2%。通过与供热管道标准规定的最大应力值相比较可知,1.5 倍 DN 的弯管即可满足工程规范要求。

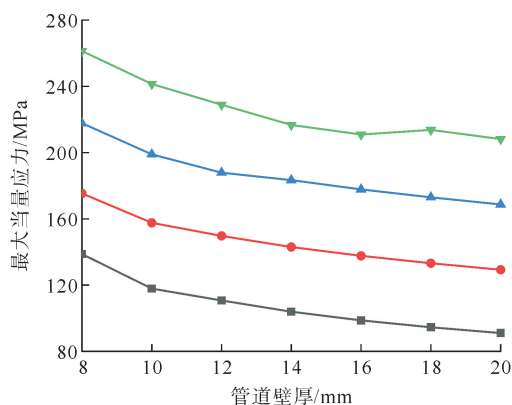


图5 温度和管道壁厚对二次应力的影响

—■— T=60 °C; —●— T=80 °C; —▲— T=100 °C; —▼— T=120 °C

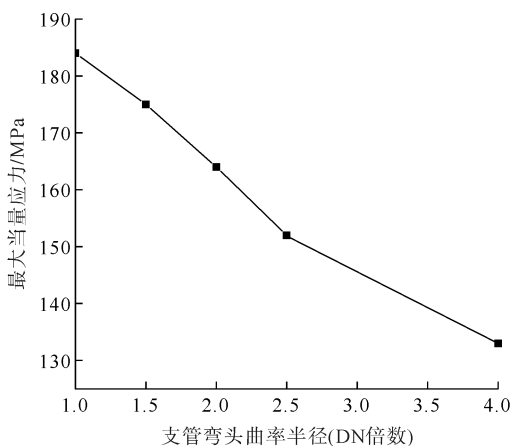


图6 弯头曲率半径对应力的影响

### 3.4 短臂 $L_2$ 长度对应力的影响

设置三通主管、支管管径分别为 DN450 mm、DN300 mm,管道运行温度设为 100 °C,管道运行压力为 1.0 MPa,支管壁厚为 8 mm,当短臂  $L_2$  的长度分别取 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 m 时,跨越平行三通节点 50 处最大位移量,如图 7 所示。

短臂  $L_2$  的长度对管道热应力的补偿能力至关重要,需进行多次重复模拟,以确定短臂  $L_2$  与三通支管的最佳补偿量。由图 7 可知,短臂  $L_2$  所产生的最大位移随短臂  $L_2$  的长度增加而增加,当设计短臂  $L_2$  的长度为 1.0 m 时,

二次应力占比为 101.7%(CAESAR II 完成数值模拟后,每次输出结果中包含最大应力占比,不同短臂长度的二次应力占比情况见图 7),超过了钢材的许用应力值;当短臂  $L_2$  长度为 1.5 m 时,可产生 12.01 mm 的最大位移,二次应力占比为 15.4%,可以确保三通管道的安全运行。在模拟计算时,如果继续增加短臂  $L_2$  的长度,获取更大补偿能力,则短臂  $L_2$  将受到管壁外侧土壤的束缚力,从而限制跨越三通补偿能力的继续增大。因此,跨越平行三通的补偿能力不可无限增大,通过研究短臂  $L_2$  的长度,可以确定三通管道支管的安全长度,降低管道工程造价。

## 4 结论

1) 基于 CAESAR II 对直埋跨越平行三通的模拟分析,L 形的弯管设计可以有效补偿支管道所产生的热胀应力,并且三通支管道产生的一、二次最大应力值的计算结果均符合规范要求。

2) 通过对跨越平行三通的模拟优化,在三通管道在设计供水温度为 100 °C,管道内压为 1.0 MPa,设计三通主管、支管管径分别为 DN450 mm、DN300 mm,支管壁厚为 8 mm,弯头弯曲半径为 1.5 倍 DN,短臂  $L_2$  长度为 1.5 m 时,可最大限度地提高三通的热补偿能力,更好地保护管道运行安全。

3) 对于供热高温水直埋三通管道的设计,当需要设置热应力补偿时,可优先考虑采用跨越平行三通补偿装置,能减少管材使用,具有节省投资、占用地下空间小等优点。

### 参考文献(References):

- [1] 张运杰. 供热管网施工质量的保障措施[J]. 化学工程与装备,2021(1):179-181.  
ZHANG Yunjie. Guarantee measures for construction quality of heating pipe network[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(1):179-181.
- [2] 次新涛. 现状直埋供热管道增加支线位置的选择[J]. 区域供热,2022(4):81-85.  
CI Xintao. Selection of additional branch line location for existing directly buried heating pipeline[J]. District Heating, 2022(4):81-85.
- [3] 王乾,万人杰,赵斌,等. 基于 CAESAR II 的 LNG 卸料系统管道应力分析[J]. 盐科学与化工,2022,51(8):45-49.  
WANG Qian, WAN Renjie, ZHAO Bin, et al. A piping stress analysis of LNG unloading system based on CAESAR II [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2022, 51(8):45-49.
- [4] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京:中国石化出版社,2010.  
TANG Yongjin. Stress analysis of pressure pipes[M]. Beijing:China Petrochemical Press, 2010.
- [5] 张文议. 直埋供热管道管系中管件应力分析[J]. 长安大学学报,2021(6):26-29.  
ZHANG Wenyi. Stress analysis of pipe fittings in piping system of directly buried heating pipeline[J]. Journal of Chang'an University, 2021(6):26-29.
- [6] 王飞. 直埋供热管道工程设计[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2014.  
WANG Fei. Engineering design for directly buried heating pipelines[M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture & Building Press, 2014.
- [7] 李奎,王飞,王国伟,等. 直埋压制三通疲劳极限合理性对比分析[J]. 太原理工大学学报,2017,48(2):174-178.  
LI Kui, WANG Fei, WANG Guowei, et al. Contrastive analysis on rationality of fatigue limit in directly buried extruded tees of specification[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(2):174-178.

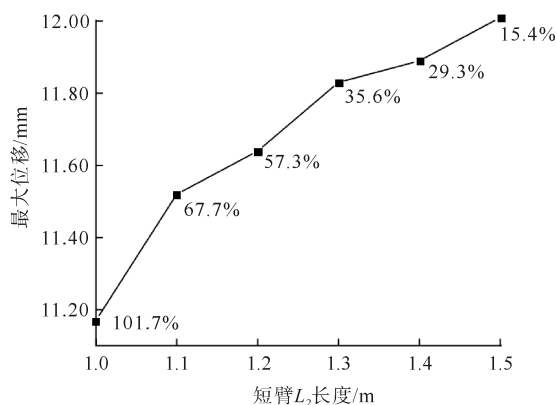


图7 短臂  $L_2$  不同长度的最大位移  
n%为二次应力占比

- [8] 燕勇鹏,王淮,赵惠中,等. 热力管道锻制三通最小允许壁厚有限元分析[J]. 煤气与热力,2020,40(9):5-9.  
YAN Yongpeng,WANG Huai,ZHAO Huizhong,et al. Finite element analysis of minimum allowable wall thickness of forged tee for heating pipeline[J]. Gas & Heat,2020,40(9):5-9.
- [9] 陈曦,王飞,王国伟,等. 直埋供热焊制三通支管对三通应力影响因素分析[J]. 太原理工大学学报,2016,47(5):634-639.  
CHEN Xi,WANG Fei,WANG Guowei,et al. Analysis on the influence factors of directly buried heating pipeline welded tee branch pipe on tee stress[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2016,47(5):634-639.
- [10] 刘鑫,张磊,刘子健,等. 基于 CAESAR II 输气站场架空及埋地管道应力分析研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2020,40(8):125-126.  
LIU Xin,ZHANG Lei,LIU Zijian,et al. Based on the stress analysis of overhead and buried pipelines in CAESAR II gas transmission station[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality,2020,40(8):125-126.
- [11] 张禹,刘银春,赵会军,等. 基于 CAESAR II 的集气站放空管道应力优化研究[J]. 常州大学学报(自然科学版),2021,33(6):70-78.  
ZHANG Yu,LIU Yinchun,ZHAO Huijun,et al. Research on stress optimization of vent pipeline of gas collection station based on CAESAR II [J]. Journal of Changzhou University(Natural Science Edition),2021,33(6):70-78.
- [12] 江超,官燕玲,邓顺熙,等. 直埋热水供热管道三通热-力耦合分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(4):585-592.  
JIANG Chao,GUAN Yanling,DENG Shunxi,et al. Analysis on the T-joint thermal coupling for directly buried heating pipeline[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),2016,48(4):585-592.
- [13] 黎颖慧. 用 CAESAR II 分析补偿器在热力管道设计中的应用[J]. 广东化工,2021,48(10):190-192.  
LI Yinghui. Application of CAESAR II analysis compensator in the design of thermal pipeline[J]. Guangdong Chemical Industry,2021,48(10):190-192.
- [14] 冯晨辰. 管道应力分析软件 CAESAR II 的简介与应用[J]. 当代化工,2019,48(5):1039-1041.  
FENG Chenchen. Introduction and application of pipe stress analysis software CAESAR II[J]. Contemporary Chemical Industry,2019,48(5):1039-1041.
- [15] 王子哲,刘芸,王杨,等. 加强型节点焊接残余应力应变的有限元研究[J]. 青岛理工大学学报,2018,39(1):1-7.  
WANG Zizhe,LIU Yun,WANG Yang,et al. Finite element study on residual stress and strain of strengthened connection[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2018,39(1):1-7.
- [16] 美国机械工程师学会压力管道委员会. ASME B31.3—2016,持续应力载荷计算[S]. 徐玉忠,译. 北京:中国计划出版社,2016.  
American Society of Mechanical Engineers Pressure Piping Committee. ASME B31.3—2016, Calculation of continuous stress loads[S]. Translator: XU Yuzhong. Beijing: China Planning Publishing House,2016.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)

### (上接第 102 页)

- [10] 曾铁梅,刘茜,冯宗宝,等. 基于 PCBN 模型盾构下穿既有隧道施工安全风险评价[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(10):1692-1698.  
ZENG Tiemei,LIU Qian,FENG Zongbao,et al. Safety risk assessment of shield tunneling under existing tunnel based on PCBN model[J]. Tunnel Construction,2021,41(10):1692-1698.
- [11] 黄亮. 市政道路工程项目施工阶段风险管理研究[D]. 南宁:广西大学,2016.  
HUANG Liang. Study on risk management of municipal road engineering project in construction phase[D]. Nanning: Guangxi University,2016.
- [12] 李晓婧. 基于 PPP 模式的 W 市政道路工程风险管理研究[D]. 威海:山东大学,2019.  
LI Xiaojing. Research on risk management of W municipal road engineering based on PPP model[D]. Weihai: Shandong University,2019.
- [13] 王昭辉. 道路工程项目风险管理模式研究[D]. 长沙:中南林学院,2004.  
WANG Zhaohui. Research on risk management model of road engineering projects[D]. Changsha: Central South Forestry University,2004.
- [14] 黎鹏. 市政工程建设管理工作研究[C]//北京恒盛博雅国际文化交流中心会议论文集. 2017:46-47.  
LI Peng. Research on the management of municipal engineering construction[C]//Proceedings of the Beijing Hengsheng Boya International Cultural Exchange Center Conference. 2017:46-47.
- [15] 袁仕超. 市政道路工程项目风险管理研究[D]. 南昌:南昌大学,2015.  
YUAN Shichao. Research on risk management of municipal road engineering projects[D]. Nanchang: Nanchang University,2015.
- [16] 朱雷. 市政工程施工现场管理存在的问题与对策论述[J]. 居舍,2019(25):8-8.  
ZHU Lei. Discussion on the problems and countermeasures of municipal engineering construction site management[J]. Housing,2019(25):8-8.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)