

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201609037



95°~135°不规则 Z 形弯管 应力变化规律

平飞, 王飞, 王国伟, 雷勇刚

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 假设管道材料为无限弹性体, 采用 ANSYS 有限元分析软件, 对 95°~135°范围内不规则 Z 形直埋供热弯管进行数值模拟, 并绘制各种参数下弯管最大应力变化曲线图和 DN1 200 不规则 Z 形弯管在 95°~135°转角下的线算图. 模拟结果表明: 随着膨胀垫厚度、壁厚、管径的增加, 弯管应力最大值逐渐减小; 随着补偿弯臂、曲率半径的增加, 弯管应力最大值先减小后增大; DN1 200 不规则 Z 形弯管的补偿能力随着转角角度的增加而削弱.

关键词: 直埋供热; Z 形弯管; 补偿弯臂; 弯管应力; 数值模拟

中图分类号: TU 833.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0664-06

Stress Changing Regulation of Irregular Z-Shaped Elbow With Curvature of 95°-135°

PING Fei, WANG Fei, WANG Guowei, LEI Yonggang

(College of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The pipeline was assumed to be an infinite elastic solid, and the ANSYS software for finite element analysis was applied to conduct numerical simulation analyzing the irregular Z-shaped directly-buried heating elbow which was between 95° and 135°. The graph was drawn to describe the change of maximum stress on elbow with the various parameters, and the alignment chart was drawn to describe the DN1 200 irregular Z-shaped elbow with a curvature of 95°-135°. The simulation results showed that, the increase of the thickness of expansion cushion, thickness of pipe wall and pipe size will lead to a decreasing of the maximum stress on elbow; along with the compensation bent arm and radius of curvature increasing, the maximum stress on elbow first decreases then increases; and the increase of the elbow angle will give rise to weaken the compensation ability of the DN1 200 irregular Z-shaped elbow.

Keywords: directly-buried heating; Z-shaped elbow; compensation bent arm; elbow stress; numerical simulation

目前,城市集中供热设计温度已达 150 ℃,设计压力达 2.5 MPa,管径也达到 1 400 mm^[1].管道敷设过程中,由于规划路由和施工场地条件的约束,不规则 Z、L 和 Π 形直埋弯管被大量使用.然而,CJJ/T 81—2013《城镇供热直埋热水管道技术规程》(以下简称《规程》)中仅规定了针对转角角度为 90°的 Z 形补偿管段的计算方法和使用依据^[2],并没有与其相关的技术应用标准.自上世纪 70 年代以来,学者们针对 90°弯头强度进行研究,给出了弯头强度计算的解析方法^[3-5].李明强等^[6],姚红等^[7]通过对规则 Z

收稿日期: 2016-09-22

通信作者: 王飞(1957-),男,教授,博士,主要从事供热技术与节能的研究. E-mail: wfwfsir@126.com.

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2016-K4-079)

形补偿弯管的数值分析,解决了补偿弯臂直管段在 0~2 倍弯头变形段长度变化过程中,其应力变化规律及弯管应力计算模型的问题.从目前的研究看,对不规则 Z 形直埋弯管的研究鲜有报道.工程中,盲目地增设补偿器和固定墩等附件对弯管进行保护,一方面,增加了工程投资,另一方面,也增加了供热直埋管道的事故危险点,降低管网的可靠性.因此,本文采用 ANSYS 有限元分析软件,分别在补偿弯臂长度、管道壁厚、膨胀垫厚度、管径、曲率半径等结构尺寸变化条件下,对 95°~135°范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管应力大小和最大允许被补偿臂长进行模拟分析.

1 管道应力的数学模型

将单元体位移、应变及应力利用节点的位移表征.首先,针对于连续体分析时,应对单元中唯一的分布给出相应的假设,即将位移假设为坐标的某种简单函数,并将这种简单函数称作位移函数(形函数),表达式为

$$u = N\delta^e. \tag{1}$$

式(1)中: u 为单元内任意一点的位移列阵; N 为形函数列阵; δ^e 为单元节点位移列阵.

其次,根据几何方程,将单元应变的关系式通过位移表达式进行表达,利用节点的位移表征,即

$$\varepsilon = B\delta^e. \tag{2}$$

式(2)中: ε 为单元内任意一点的应变列阵; B 为应变矩阵.

再根据物理方程,将单元应力的关系式通过应变表达式进行表达,利用节点的位移表征,即

$$\sigma = DB\delta^e = D\varepsilon. \tag{3}$$

式(3)中: σ 为单元内任意一点的应力列阵; D 为单元材料有关的弹性矩阵.

根据虚功原理建立刚度方程(平衡方程),即作用在单元上节点力和节点位移二者之间的关系式为

$$K^e \delta^e = R^e. \tag{4}$$

式(4)中: K^e 为单元刚度阵; R^e 为单元上的节点力列阵.

最后,计算相邻单元边界的等效节点力,针对整个结构建立刚度方程进行有限元计算,即将所有单元的刚度方程集合,求解节点的位移及计算单元应力.

2 水平对称不规则 Z 形补偿弯管的数值模拟

2.1 物理参数

不规则 Z 形直埋供热弯管,如图 1 所示.图 1 中: L_1 为补偿弯臂长度; L_2 为补偿弯臂直管段长度; L_3 和 L_4 为被补偿臂长度; φ 为转角角度; R_c 为弯头曲率半径.

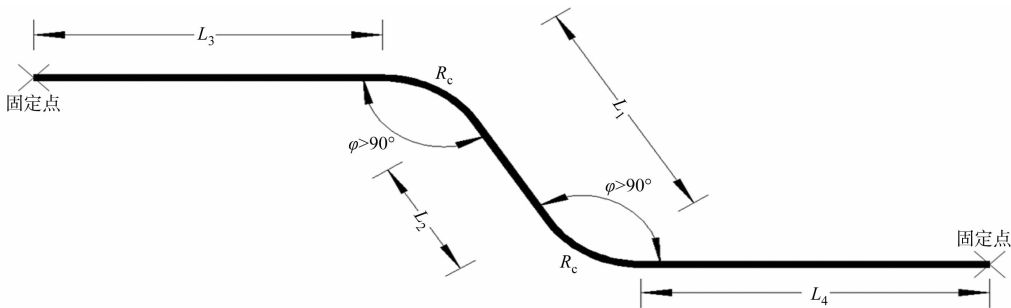


图 1 不规则 Z 形直埋供热弯管

Fig. 1 Irregular Z-shaped directly-buried heating elbow

管道材料选用 Q235B,并假设为理想的弹塑性材料,杨氏弹性模量 $E=198\text{ GPa}$;线膨胀系数 $\alpha=12.4\text{ }\mu\text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$;泊松比 $\nu=0.3$;工作压力 $P_n=2.5\text{ MPa}$;循环最高温度 $\theta_1=130\text{ }^\circ\text{C}$;循环最低温度 $\theta_2=10\text{ }^\circ\text{C}$;循环温差 $\Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$;土壤摩擦系数为 $0.2^{[5]}$;管顶埋深 $h=1.5\text{ m}$.

2.2 几何参数

管道基本数据^[8],如表 1 所示.表 1 中: D_0 为外径; D_i 为内径; D_c 为保温管外径; L_e 为弯头变形段

长度,计算式^[5]为

$$L_e = \frac{2.3}{k}, \quad k = \sqrt[4]{\frac{D_c \times C}{4E \times I_p \times 10^6}}$$

式中: k 为与土壤特性和管道刚度有关的参数, m^{-1} ; C 为土壤横向压缩反力系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$; E 为钢材的弹性模量,MPa; I_p 为直管工作管横截面的惯性矩, m^4 .

2.3 模型简介

综合基床系数根据文献[9]的方法进行计算.在总结文献[6-7]研究成果的基础上,通过增加模型表面效应单元 STRUCTURAL154 模拟管土之间摩擦力的作用,解决应力值偏大的问题^[10].根据文献[7]中表 5 提供的模拟条件,得到改进后的模拟值,结果如表 2 所示.表 2 中: L_1 为补偿臂长.

表 2 模型改进前后弯管应力最大值比较

Tab. 2 Comparison of maximum stress on elbow of model before and after improvement

L_1/m	$0.5L_e$	$0.8L_e$	$1.0L_e$	$1.2L_e$	$1.5L_e$	$1.8L_e$	$2.0L_e$
文献[7]中弯管应力最大值/MPa	367	265	239	226	223	230	237
模型改进后弯管应力最大值/MPa	354	254	229	217	219	227	234

文中被补偿臂长度取 $L_3=L_4=50\text{ m}$,网格间距 0.05 m .由于管道与土壤的耦合作用,需要每个管道模型节点与土弹簧单元节点一一对应,因此,体网格划分采用体扫略的方式.荷载和边界条件的施加参见文献[6-7].

3 结果与分析

表 3 为模拟工况.表 3 中: δ 为弯头壁厚; s 为膨胀垫厚度.选择模拟转角角度在 $95^\circ\sim135^\circ$ 变化范围内,按照表 3 所列的变量和工况,分析各变量对不规则 Z 形直埋供热弯管最大应力的影响.

表 3 模拟工况

Tab. 3 Simulated conditions

模拟变量	模拟工况
L_1 分别取 $0.5L_e, 1.0L_e, 1.5L_e, 2.0L_e$	$P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$, 管径 DN1 200, $\delta=14\text{ mm}, R_c=1.5\text{ DN}, s=40\text{ mm}$
δ 分别取 12, 14, 16, 18 mm	$P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$, 管径 DN1 200, $R_c=1.5\text{ DN}, L_1=1.5L_e, s=40\text{ mm}$
s 分别取 0, 40, 80, 120 mm	$P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$, 管径 DN1 200, $\delta=14\text{ mm}, R_c=1.5\text{ DN}, L_1=1.5L_e$
管径分别取 DN800, DN1 000, DN1 200	$P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}, \delta=14\text{ mm}, R_c=1.5\text{ DN}, L_1=1.5L_e, s=40\text{ mm}$
R_c 分别取 1.5DN, 6.0DN, 12.0DN, 15.0DN, 20.0DN	$P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$, 管径 DN1 200, $\delta=14\text{ mm}, L_1=1.5L_e, s=40\text{ mm}$

在研究最大允许被补偿臂长随转角角度的变化时,模拟工况为 $P_n=2.5\text{ MPa}, h=1.5\text{ m}, \Delta T=120\text{ }^\circ\text{C}$, 管径 DN1 200, $\delta=14\text{ mm}, L_1=1.5L_e, R_c=6.0\text{ DN}, s=40\text{ mm}$.其最大应力值位于弯头中性面与对称截面相交位置处,如图 2 所示.

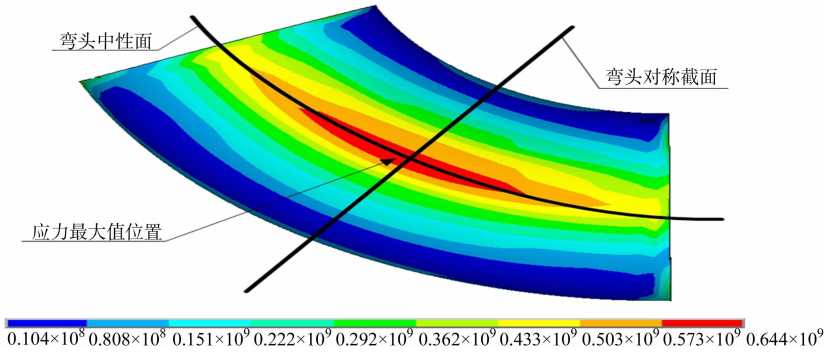


图 2 不规则 Z 形直埋供热弯管应力云图

Fig. 2 Stress nephogram of irregular Z-shaped directly-buried heating elbow

3.1 补偿弯臂长度对弯管应力大小的影响

弯管应力最大值(σ)随补偿弯臂长度(L_1)的变化规律,如图 3 所示.由图 3 可知:对于 95°~135°范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管,随着补偿弯臂 L_1 的增加,弯管应力最大值逐渐减小,这是由于在不规则 Z 形直埋供热弯管中,某侧弯臂的轴向热膨胀是通过另一侧弯臂的横向位移吸收的,如果补偿弯臂过短,无法保证补偿弯臂产生足够的横向位移,不具备良好的侧向变形能力,导致弯管应力增大,最终使弯管应力最大值增大.但是,在由 $L_1=1.5L_e$ 增加到 $L_1=2.0L_e$ 的过程中,补偿弯臂向弯头处释放的热膨胀量增大,导致弯管最大应力值略有增加.当转角角度分别为 95°,115°,135°时,补偿臂长从 $1.5L_e$ 增加到 $2.0L_e$ 的过程中,其应力最大值分别增加了 2.56%,2.83%,1.38%.

由此可见,在一定范围内,增加补偿弯臂长度能提高弯管补偿能力,但如果单纯增加 L_1 ,会导致弯管最大应力值不降反增.在同一补偿弯臂长度的条件下,随着转角角度的增加,弯管应力最大值显著增大,说明不规则 Z 形直埋供热弯管随转角角度的增加,补偿能力下降.

3.2 弯头壁厚对弯管应力大小的影响

弯管应力最大值(σ)随弯头壁厚(δ)的变化规律,如图 4 所示.由图 4 可知:对于 95°~135°范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管,随着弯头壁厚的增加,弯管应力最大值逐渐减小,且这种影响随着转角角度的增大而逐渐减弱,这种变化趋势与文献[11]阐述的相同.究其原因,在其他模拟工况一定时,随着弯头壁厚的增大,弯头断面的抗弯矩增大,而弯管的应力加强系数减小,导致弯管应力减小,最终使弯头处应力最大值减小.当转角角度分别为 95°,115°,135°时,壁厚 δ 从 12 mm 增加 18 mm 的过程中,其应力最大值分别减小了 50,33,30 MPa.说明对于较大转角的不规则 Z 形直埋供热弯管,增加壁厚对于减小弯管的最大应力效果不大.在同一壁厚的条件下,随着转角角度的增加,弯管应力最大值显著增大,说明不规则 Z 形直埋供热弯管随转角角度的增加,补偿能力下降.

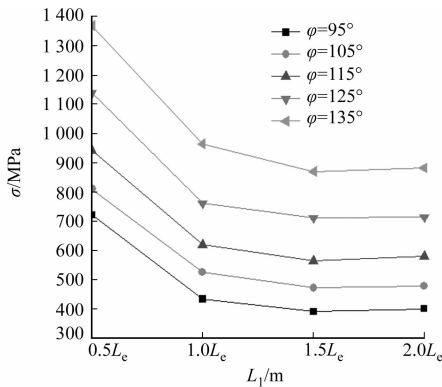


图 3 弯管应力最大值随补偿弯臂长度的变化
Fig. 3 Change of maximum stress on elbow associated with compensated length of bent arm

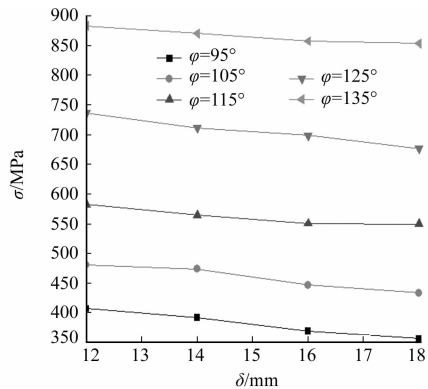


图 4 弯管应力最大值随弯头壁厚的变化
Fig. 4 Change of maximum stress on elbow associated with thickness

3.3 弯头处膨胀垫厚度对弯管应力大小的影响

弯管应力最大值(σ)随弯头处膨胀垫厚度(s)的变化规律,如图 5 所示.由图 5 可知:对于 95°~135°范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管,随着膨胀垫厚度的增加,弯管应力最大值逐渐减小,且随着转角角度的增加,弯管应力最大值减小的幅度逐渐增大.这是由于在弯头两侧放置膨胀垫块,随着膨胀垫厚度的增加,综合基床系数越小,即土壤对弯管的压缩反力减小,导致弯管的应力减小,最终使弯头处应力最大值减小.当膨胀垫厚度从 0 mm 增加到 120 mm 的过程中, $\varphi=95^\circ$ 时的弯管应力最大值减小了 44 MPa; $\varphi=115^\circ$ 时的弯管应力最大值减小了 71 MPa; $\varphi=135^\circ$ 时的弯管应力最大值减小了 108 MPa.说明转角角度越大,增加膨胀垫厚度对降低弯管最大应力越有效.在同一膨胀垫厚度的条件下,随着转角角度的增加,弯管应力最大值显著增大.

3.4 管径对弯管应力大小的影响

弯管应力最大值(σ)随管径(DN)的变化规律,如图 6 所示.由图 6 可知:对于 95°~135°范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管,随着管径的增大,弯管应力最大值逐渐减小,这种变化规律与文献[11]阐述的

相同. 究其原因, 当其他模拟工况一定时, 随着管径的增大, 弯管的应力加强系数及弯头断面的抗弯矩均增大, 但抗弯矩增加速度较应力加强系数的增加变化快, 导致弯管应力减小, 最终使弯头处应力最大值减小. 当 $\varphi=105^\circ$ 时, 管径 DN800, DN1 000, DN1 200 的应力最大值分别为 574, 535, 481 MPa.

可以发现, 增大管径可以有效地减少弯管的应力最大值. 因此, 对大口径不规则 Z 形直埋供热弯管的应用, 应充分发挥其补偿能力. 在同一管径条件下, 随着转角角度的增加, 弯管应力最大值显著增大.

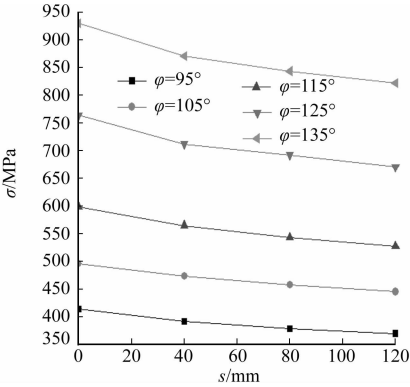


图 5 弯管应力最大值随弯头处膨胀垫厚度的变化
Fig. 5 Change of maximum stress on elbow associated with thickness of expansion cushion

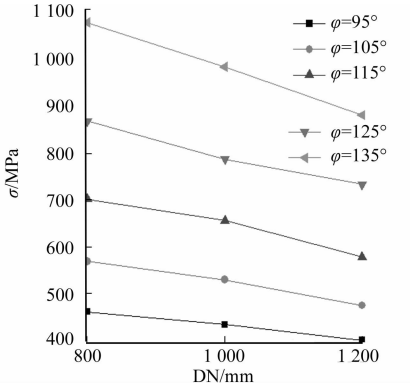


图 6 弯管应力最大值随管径的变化
Fig. 6 Change of maximum stress on elbow associated with pipe size

3.5 弯头曲率半径对弯管应力大小的影响

弯管应力最大值(σ)随曲率半径(R_c)的变化规律, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 对于 $95^\circ\sim135^\circ$ 范围内的不规则 Z 形直埋供热弯管, 不同转角角度均在 $R_c=6.0\text{DN}$ 处出现拐点, 当 $R_c<6.0\text{DN}$ 时, 弯管应力最大值随着曲率半径的增大而显著减小; 当 $R_c>6.0\text{DN}$ 时, 弯管应力值随着曲率半径的增大逐步增大. 当转角角度分别为 $115^\circ, 125^\circ, 135^\circ$ 时, 曲率半径从 $R_c=1.5\text{DN}$ 增加到 $R_c=6.0\text{DN}$, 其应力最大值分别减小了 35.75%, 39.47%, 39.38%; 当曲率半径从 6.0DN 增加到 15.0DN 时, 其应力最大值分别增大了 33.88%, 20.19%, 8.71%.

由此可得, 在 $R_c=6.0\text{DN}$ 范围内, 增加曲率半径可以提高弯管的补偿能力. 这是由于在其他模拟工况一定时, 随着曲率半径在 6.0DN 范围内增大, 弯管的尺寸系数增大, 导致弯管的应力加强系数减小, 弯矩作用条件下的弯管应力减小, 最终使弯管应力最大值减小. 但如果超过 $R_c=6.0\text{DN}$, 弯管最大应力不降反增, 即对于不规则 Z 形直埋供热弯管, 当补偿臂长 L_1 保持不变, 弯管曲率半径无限增大的同时, 等量缩短直臂 L_2 来增加弯头的承载能力没有任何意义. 在同一曲率半径的条件下, 随着转角角度的增加, 弯管应力最大值显著增大.

3.6 弯管最大允许被补偿臂长随转角角度的变化

选择管径为 DN1 200 时, 弯管最大被补偿臂长度(L_{max})随转角角度(φ)的变化, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 管径为 DN1 200 的不规则 Z 形直埋供热弯管, 随着转角角度的增加, 最大允许被补偿臂长呈显著

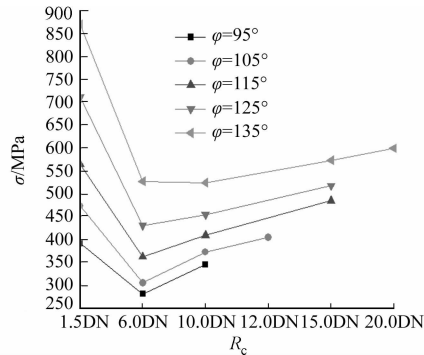


图 7 弯管应力最大值随曲率半径的变化
Fig. 7 Change of maximum stress on elbow associated with radius of curvature

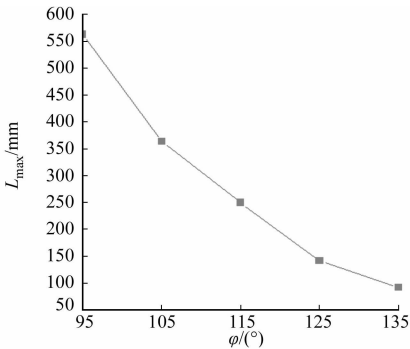


图 8 弯管最大被补偿臂长度随转角角度的变化
Fig. 8 Change of maximum compensated arm length associated with elbow angle

减小的趋势.究其原因,当其他模拟条件一定时,随着转角角度的增加,弯头处产生较大应力,能够吸收热膨胀变形的能力逐渐减弱,最终导致弯管的补偿能力下降.当转角角度分别为 95°,115°,135°时,管径 DN1 200 的最大允许被补偿臂长度分别为 563,250,93 m,依次分别减少了 55.60%和 83.48%.由此可得,随着转角角度的不断增大,不规则 Z 形直埋供弯管补偿能力逐渐下降.

4 结论

1) 随着转角角度的增加,不规则 Z 形直埋供热弯管应力最大值显著增加,最大允许被补偿臂长逐渐减小,削弱了其补偿能力.因此,在运用较大转角角度的不规则 Z 形直埋供热弯管时,由于其补偿能力的下降,应注意限制被补偿臂长度,或者采取保护措施以提高管网运行的可靠性.

2) 在一定范围内,增大补偿弯臂长度对提高弯管补偿能力效果明显.因此,在模拟工况条件下,补偿弯臂长度宜取 $1.5L_c$.但是,补偿弯臂长度超过 $2.0L_c$ 后,继续增长会造成弯管应力最大值的增加.

3) 补偿弯臂长度一定时,增大曲率半径,在一定范围内,对提高弯管补偿能力有效;但是,当 $R_c \geq 6.0DN$ 时,弯管补偿能力不增反降.

4) 对于较大转角角度的不规则 Z 形直埋供热弯管,通过增加膨胀垫厚度以降低弯管最大应力值的效果优于增加壁厚产生的结果.因此,在其应用中,可以结合其他影响因素搭配膨胀垫的使用,综合提高管网强度.

5) 增大管径可以有效地减少弯管应力最大值,提高弯管的补偿能力.因此,更应该注重发挥大口径不规则 Z 形直埋供热弯管的应用.

参考文献:

- [1] 李春庆. DN1 400 mm 热水直埋管道的几点设计体会[J]. 工程建设与设计,2012(2):95-97.
- [2] 城市建设研究院,北京市煤气热力工程设计院有限公司. 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,2013:14.
- [3] 崔孝秉. 埋地长输管道水平弯头的升温载荷近似分析[J]. 华东石油学院学报,1978(2):54-68.
- [4] 梁政,袁祥忠. 埋地长输管道水平弯头升温载荷下的计算问题[J]. 油气储运,1987,6(2):30-36.
- [5] 邓道明,李育光. 埋地油气管道弯头的强度计算[J]. 油气储运,1997,16(11):3-8.
- [6] 李明强,王飞,王国伟,等. 小结构 Z 形弯管在大管径供热直埋管道中的应用研究[J]. 暖通空调,2015,45(5):71-73.
- [7] 姚红,王飞,王国伟,等. 几种供热直埋“Z”形补偿弯管补偿能力的数值分析[J]. 暖通空调,2016,46(1):92-96.
- [8] 王飞,张建伟,王国伟,等. 直埋供热管道工程设计[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2014:222-223.
- [9] 兰德劳皮夫 P. 区域供热手册[M]. 贺平,等译. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:58-61.
- [10] 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,2010:73-74.
- [11] 电力规划设计总院. 发电厂汽水管道应力计算技术规程: DL/T 5366—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014:26-29.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)