

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701031



# 供热热水管道管廊敷设方式研究进展

范辉<sup>1</sup>, 王飞<sup>1</sup>, 王国伟<sup>1</sup>, 雷勇刚<sup>1</sup>, 张建伟<sup>2</sup>, 李海东<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
2. 太原市热力公司, 山西 太原 030000)

**摘要:** 综述热水管道传统敷设方式现状,对管廊热水管道的现行敷设方式及存在的主要问题进行探讨.依据热水管道有补偿直埋敷设向无补偿冷安装直埋敷设的研究进展,提出管廊热水管道无补偿架空敷设方式,取消补偿器的设置,增加管网运行安全性与可靠性.分析管廊热水管道无补偿架空敷设可能存在的主要问题,提出管廊热水管道无补偿敷设的理论与工程设想解决方案.

**关键词:** 供热管道; 敷设方式; 综合管廊; 无补偿敷设

**中图分类号:** TU 833.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2017)06-0747-06

## Recent Progress of Tunnel Laying Method on Heating Pipeline

FAN Hui<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Guowei<sup>1</sup>,  
LEI Yonggang<sup>1</sup>, ZHANG Jianwei<sup>2</sup>, LI Haidong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Taiyuan Heating Power Company, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** The current situation of laying heating pipeline in traditional ways was reviewed, and several major problems of current laying method were discussed in this paper. In order to cancel the compensator and enhance the running safety and reliability of the whole network, the method of laying heating pipeline without compensation in the utility tunnel was put forward; according to the progress of transforming from directly buried hot water pipe with compensation to the one without compensation. In addition, taking potential problems of overhead laying free-compensation hot water pipeline in the utility tunnel into consideration, the theory and engineering ideas for the free-compensation installation mode of hot water pipeline in the utility tunnel were proposed.

**Keywords:** heating pipeline; laying method; utility tunnel; free-compensation installation

市政集中供热是我国北方城市冬季采暖的主要方式<sup>[1]</sup>.随着热电联产供热形式的出现并迅速发展,其热源的供热能力、供热半径和管道管径不断突破<sup>[2]</sup>,热水采暖管道的敷设方式也不断发展.本文综述热水管道传统敷设方式现状,并对管廊热水管道的现行敷设方式及存在的问题进行探讨.

### 1 热水管道敷设方式

#### 1.1 热水管道传统敷设方式

传统热水管道敷设方式主要分为:地上架空敷设、地下管沟敷设和地下无沟敷设即直埋敷设<sup>[3]</sup>.

**收稿日期:** 2017-01-11  
**通信作者:** 王飞(1957-),男,教授,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)

20 世纪 70 年代前,我国大多热水管道采用地沟及架空敷设,个别小管径管道也采用油布防护<sup>[4]</sup>或填充矿渣棉、预制泡沫混凝土瓦块等保温材料<sup>[5]</sup>的直埋敷设;80 年代,随着北欧管道直埋技术的引进,小管径管道虽由地沟、架空向直埋敷设方式发展,但大管径管道仍以架空或地沟敷设方式为主<sup>[4]</sup>;90 年代中期至今,我国集中供热事业发展迅速,管网建设规模趋于大、中型化,管道无补偿直埋技术结合我国国情不断发展,日趋成熟,管网的敷设方式逐渐以无补偿直埋敷设为主<sup>[5]</sup>.

1.2 传统敷设方式的弊端与管廊热水管道敷设方式

地上架空敷设将管道安装于地面或附墙支架上<sup>[3]</sup>,是我国过去经常采用、较为经济的敷设方式.但同时也存在占地面积大、不美观、易受自然气候侵蚀、管道热损失大等缺点<sup>[6]</sup>.尤其在发展较早的老工业区,架空管道保温管材质量差、管网运行温度高、工作环境恶劣、年久失修等问题突出,导致保温层脱落,管道腐蚀严重,事故频发<sup>[5]</sup>.

管道的地下敷设方式不影响市容和交通,在城镇集中供热发展中得到广泛采用<sup>[3]</sup>.地沟敷设方式将管道敷设于地下围护构筑物中,受到地理环境影响,会造成地沟内常年或季节性积水,加大保温材料传热,并导致管道锈蚀<sup>[7]</sup>.管道地下直埋敷设方式以管道安装为主,具有施工周期短,工程造价低,热损失小,防腐、绝缘性能好,使用寿命长等优点,在城镇集中供热管网敷设中得以大力推进<sup>[5]</sup>.但随着我国社会经济的快速发展和城镇化进程的快速推进,城市地下工程管线的敷设问题日益突出,尤其是近年来大雨内涝、管线泄漏爆炸、路面塌陷等事件频发<sup>[8]</sup>.目前,城市地下空间的开发和利用工作已全面展开,提出了建设城市地下综合管廊的战略决策.

市政热水管道作为综合管廊中的管线之一,其输送热水介质使管廊内温度升高,会造成管廊内环境的热污染.因此,热水管道不应与输送可燃、腐蚀性气体的管道同舱室敷设<sup>[9]</sup>;管线敷设时,应将热水管道与其他热敏感管线分舱室收容或满足充分间距要求<sup>[10]</sup>,且不能同电力电缆同仓敷设<sup>[11]</sup>.然而,城市地下综合管廊的建设处于研究探索和试验阶段,对管廊内供热热水管线的布置仍沿袭地沟敷设的方法,没有考虑综合管廊构筑物的特点,管线布置技术细节问题尚未考虑,存在思想交流不足、法律规范匮乏和设计不完善等问题,工艺水平有待提高.

2 管廊热水管道的敷设设计

2.1 管廊热水管道现行敷设方式存在的问题

市政热水管道纳入地下综合管廊,应进行专项管线设计<sup>[11]</sup>.对于管廊热水管道的敷设设计并没有技术层面上的规定,相关具体的设计理论和权威的设计规范方面几乎处于空白状态.由于敷设环境与传统可通行地沟相似,各地在建的和已经建好的管廊热水管道仍沿袭传统地沟与架空敷设供热管道有补偿敷设的设计方法.其敷设设计主要通过划分补偿段,计算管段补偿量,根据管网结构选择合适的补偿方式和补偿器类型,并计算固定支架推力<sup>[12]</sup>.这样管网中就不可避免地需要设置大量补偿器,把刚性的供热管网分割为多段柔性连接的管段.为了保证柔性管件-补偿器不被轴向撕裂,必须设置推力较大的固定墩.尽管如此,补偿器仍是供热管网最为薄弱的环节,可靠性较差,增加了管网事故的发生概率,降低供热管网运行的安全水平和防灾抗灾能力.

除此之外,地下综合管廊内作为供热动脉的热力管道,补偿器的大量使用既增加了初投资,也增大了供热管网的热损失,降低了管网的输送效率,造成管廊内环境的热污染;管廊内设置过多的补偿器增加了管网泄漏的可能性,运行中要派专人定时巡查,运行管理成本较高,维护工作量较大.由于地下综合管廊的规划存在不同种类专项管线的共舱收容,供热管道一旦发生泄漏,引起热水介质的泄漏汽化问题,无法及时排出急剧增加的大量高温水及汽化产生的大量水蒸气,造成管廊内管线维护人员呼吸道受损,危害人身安全,增加抢修难度,拖延抢修进度;同时,还影响共舱室管线和电缆的安全运行,影响管廊运行的可视化监控.

2.2 管道应力计算依据

2.2.1 我国管道应力计算的依据 对热水管道而言,应力计算是管道工程设计的基础.随着应力分析理论和试验技术的发展,热水管道从有补偿直埋敷设发展为无补偿冷安装直埋敷设,并表现出优越的管

道布置形式、较低的施工难度、运行工作量少及经济性好等优点,在我国集中供热工程中得到了广泛应用<sup>[13]</sup>.热水管道无补偿冷安装直埋敷设采用应力分类法进行管道应力验算<sup>[14]</sup>,将各种载荷产生的应力根据起因、作用范围和性质进行分类,采用不同的强度条件控制<sup>[5,14]</sup>,有利于充分发挥钢材潜能,降低管道事故概率.地上架空敷设与地下地沟敷设热水管道受力计算参照 CJJ 34—2010《城镇供热管网设计规范》<sup>[15]</sup>,规定地上与管沟敷设供热管道的许用应力计算、管道壁厚设计、补偿量计算及应力验算条件参照 DL/T 5366《火力发电厂汽水管道应力计算技术规程》<sup>[15]</sup>.

2.2.2 国外管道应力计算依据 国外集中供热发展较早,丹麦、芬兰、瑞典等北欧国家的供热技术处于世界领先水平,对直埋敷设方式研究较多<sup>[16]</sup>.主要通过限制极限荷载保证管道安全运行,涉及地上架空敷设和地沟敷设管道应力计算资料相对较少<sup>[17]</sup>,但对压力管道的研究理论较为成熟,包括内压和热应力作用下管道的受力破裂<sup>[18-19]</sup>、受压弯头的疲劳寿命分析<sup>[20]</sup>、大直径压力管道在应力集中情况下的压力腐蚀破坏<sup>[21]</sup>等涉及压力管道及其管件的研究.俄罗斯区域供热管网应力和地震分析标准<sup>[22]</sup>采用应力分类法,规范了管道地下与地上敷设方式.美国标准 B 31—2016《ASME 压力管道规范》<sup>[23]</sup>根据压力管道的不同类型,对电厂、化工、集中供热和供冷等输送管道的设计有不同要求;基于应变的 X80 大管径油气输送管线设计通过位移控制荷载,保证管道安全运营的前提下,允许管道应力超过屈服应力<sup>[24]</sup>.

### 2.3 管廊热水管道无补偿敷设技术条件

1982 年,梁恒谦<sup>[25-26]</sup>提出交通-管道两用隧道中输油管道的无补偿直线敷设方法,并在浑河水下隧道工程中得到应用.长输油气管道遇到天然或人工障碍,以及复杂水文地质条件,采用无补偿器地上跨越<sup>[27]</sup>,跨距不大时,常采用最简单的无补偿梁式直管跨越<sup>[28]</sup>.这种管道无补偿敷设,利用管道自身承受温度及内压引起的应力.地上弹性曲线管道,将管道轴线沿曲线敷设,利用管道伸缩及弯曲性能吸收管道热膨胀<sup>[26]</sup>.可见输油管道非直埋无补偿敷设已有工程实例,理论上也为管廊热水管道无补偿敷设提供了一定的参考.

管廊热水管道的无补偿架空敷设,应根据管道敷设特点,进行应力验算,保证在设计和工作条件下,具有足够的强度、刚度和稳定性.管道应力校核,采用应力分类法<sup>[5,14]</sup>,根据不同的强度控制条件,验算管道应力.参照压力管道应力分析<sup>[29]</sup>及石油、化工管道设计方法<sup>[23,30-31]</sup>,分析管道应力水平,防止管壁内应力过大.根据安定性原理,控制循环温差,避免管道发生循环塑性变形破坏<sup>[5,14]</sup>.依据钢结构稳定理论,验证管道构件运行稳定性<sup>[32]</sup>.另外,管廊与地沟相比,结构坚固,横断面积非常大,与周围土壤产生非常大的摩擦力,类似并远大于直埋无补偿敷设的箱式固定墩,为限制管道的热膨胀提供了外部条件.

## 3 管廊热水管道无补偿敷设存在的主要问题

管廊热水管道的无补偿架空敷设与直埋无补偿敷设方式相比,在直埋管道不发生局部沉降、塌陷的情况下,最主要区别在于土壤力作用.管廊热水管道由支架支承,失去土壤的支撑与约束,缺少了覆土压力作用,管道自重作用更加明显.

### 3.1 管道应力的计算

管廊热水管道在重力载荷、内压和热应力的作用下,产生压缩与弯曲的组合变形.

3.1.1 轴向应力的计算 直埋热水管道锚固段受土壤的嵌固作用,不存在横向弯曲变形,其轴向应力主要包括温度变化和内压引起的纵向应力作用<sup>[5]</sup>,并不包括重力作用产生的弯曲正应力;而管廊热水管道轴向应力计算时,应综合考虑内压作用、温度作用及管道重力弯曲引起的弯曲应力与附加弯矩影响.

3.1.2 热应力的计算 温度变化产生的热应力,对于直埋热水管道锚固段而言,为管道不发生屈曲时的最大温度应力.管廊热水管道架空敷设,管道自重的作用下发生弯曲,直管道位置降低,管道轴线有一定的伸长变形,产生新的弯曲应力及管道轴线长度增加而产生的拉伸应力,温度应力则由于弯曲段的横向位移有所减小.

3.1.3 内压轴向应力 与直埋热水管道锚固段相比,管廊热水管道内压轴向应力除泊松应力外,还包括内压作用由于管道弯曲而产生的纵向应力.

### 3.2 稳定性验算

管道稳定性验算主要包括整体稳定性和局部稳定性验算.

3.2.1 整体稳定性验算 直埋热水管道由于土压力作用,管网温度变化时,热伸长受阻,产生轴向压应力,有向约束最弱区域推进的趋势.整体稳定性验算就是要保证管道周围覆土压力抵抗管道法向力不会向轴线法线方向凸出<sup>[5]</sup>.管廊内长直热水管道受到管道支架约束,其整体稳定性验算则是要防止管道像“压杆”一样发生纵向屈曲<sup>[32]</sup>.

3.2.2 局部稳定性验算 大口径热水管道属于薄壁型空间结构,无论是直埋热水管道还是管廊内架空敷设的热水管道,在高轴向压应力的作用下,都有可能局部产生较大变形,发生局部屈曲失稳<sup>[33]</sup>.此外,焊接定位偏差和其他尺寸及材料的偏差造成管道缺陷,也可导致管道纵向允许压应变的下降<sup>[16]</sup>.但是直埋热水管道受到周围土壤的约束作用,管道变形比较均匀,应变局部积累的可能性较小;局部集中的塑性变形仅可能出现在承受高轴向压应力或截面有缺陷的部位.架空敷设的管廊热水管道由支架支承,有着大不相同的变形方式,而且当管道形变之后,载荷逐渐被变形吸收.

4 主要技术问题解决途径设想

4.1 管廊热水管道敷设理论体系构建设想

直埋热水管道主要受到轴心压应力作用,考虑到管道实际敷设状况,可视为既存在残余应力又有初始几何缺陷的轴心受压构件.管廊热水管道无补偿架空敷设,受到重力载荷影响,同时,承受轴心压力和二阶弯矩作用.在轴心压力和管道弯矩的共同作用下,弯矩最大的截面边缘纤维开始屈服,进入弹塑性受力状态;随着轴心压力的增大,管道抗弯刚度降低,变形加快,附加弯矩增加<sup>[32]</sup>.管廊热水管道敷设理论体系的建立应以压弯理论为基础,将管道视为实际压弯构件,对管道在弯矩作用平面内的稳定及弯矩作用平面外的弯扭屈曲问题进行研究分析.由于管道应力会随管道变形的发生而减小,对于温度载荷为主的热热水管道,以管道应变为基础的非线性设计将更为合理.

同时,采用有限元分析法进行数值模拟,与理论计算结果进行对比分析,修正计算公式,并进行管廊热水管道无补偿敷设应力分析试验,明确管道应力和应力集中点分布情况,为设计施工提出理论指导.

4.2 管廊热水管道敷设工程设想

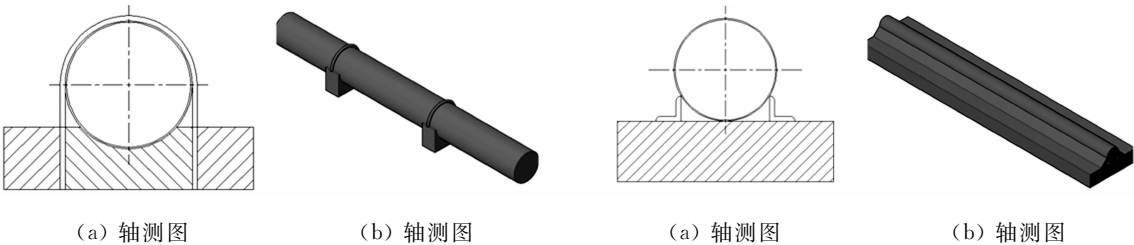
根据管廊结构能否承受供热管道热膨胀力作用,将综合管廊分为以下两种类型.

4.2.1 管廊结构能够承受热膨胀力作用 能够承受供热管道热膨胀力作用的第一类管廊,热力舱室内各固定管墩均由同一管廊底板相连,如图 1 所示.此时,管廊类似于直埋管道的固定墩,可将供热管道由于内压力、外部荷载和热胀冷缩引起的力、力矩通过固定管墩传向管廊,再传向地下土壤.整个管廊类似无数个相连的固定墩,利用管廊自身结构来提供限制管道变形作用的外力,管廊和土壤的摩擦力无需达到管道推力的要求,无需额外增加和土壤的接触面积.

4.2.2 管廊结构不能承受热膨胀力作用 对于管廊结构不能承受热膨胀力作用的第二类管廊,此时,有以下 9 种敷设方法.

1) 无补偿直线敷设.类似于隧道中输油管道的无补偿敷设,两端设置固定边墩,中间设置固定支墩.此时,管道对固定边墩的作用力较大,中间固定支墩作用力较小.

2) 附加焊接钢件.通过在管道上附加焊接钢件,限制供热管道的热伸长,如图 2 所示.



(a) 轴测图

(b) 轴测图

图 1 无补偿直线敷设的热水管道

(a) 轴测图

(b) 轴测图

图 2 附加焊接角钢铺设的热水管道

Fig. 1 Laying heating pipeline with fixed support

Fig. 2 Laying heating pipeline with additional welded rail

3) 焊接环向肋板.在管道上焊接环向肋板,形成彼此连接的结构限制管道的热伸长,如图 3 所示.

4) 钢套钢.采用钢套钢结构,类似于蒸汽直埋管道,利用外层钢套管限制内层介质钢管管道的热伸长,如图 4 所示.

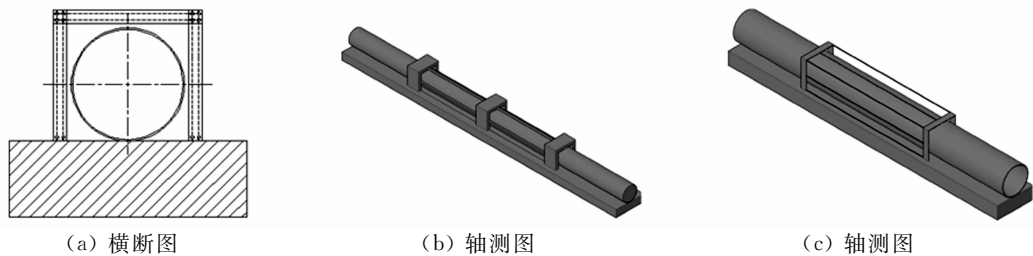


图 3 铺设带有环形肋的热水管道

Fig. 3 Laying heating pipeline with circumferential rib

5) “双胞胎”牵制. 采取某种措施将供、回水管加工成一体, 以回水管道牵制供水管道的热伸长, 如图 5 所示.

6) “三胞胎”牵制. 两根供水管配以一根回水管, 以 1 根回水管道牵制 2 根供水管道的热伸长, 如图 6 所示.

7) 将热水管道与混凝土凹槽锁定. 将供热管道焊接成长直管道, 放置在混凝土管墩凹槽内, 利用螺栓扣件将管道锁定, 管道和管墩凹槽及螺栓扣件间存在摩擦, 类似于直埋供热管道中管道与土壤间的摩擦力, 如图 7 所示.

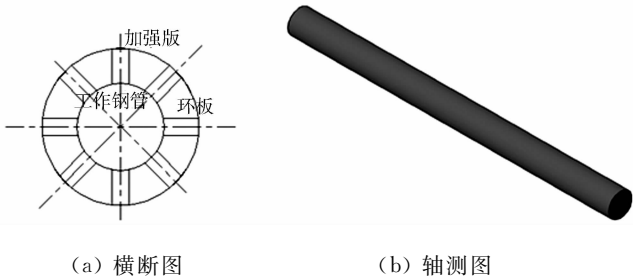


图 4 铺设钢护套的热水管道

Fig. 4 Laying heating pipeline with steel jacket

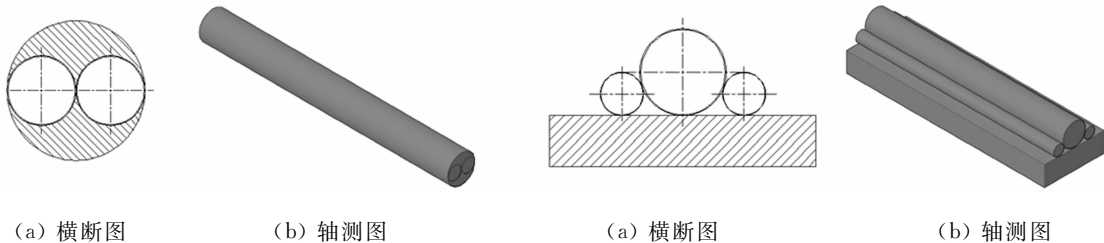


图 5 “双胞胎”牵制方式的热水管道

Fig. 5 Welded supply and return pipe together

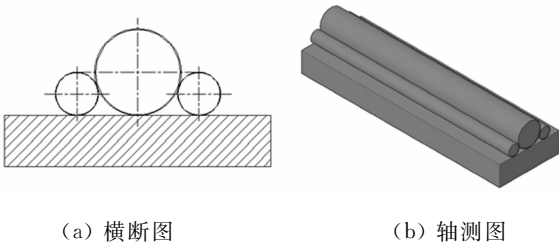


图 6 “三胞胎”牵制方式的热水管道

Fig. 6 Welded one return pipe with two supply pipes together

8) 其他牵制. 如果管廊中还存在热水供应管道, 则 3 根管道焊接在一起, 可以起到相互牵制作用, 如图 8 所示. 同时, 高温供水管还可与热水供应管互为备用或交替使用, 增加供热安全性与可靠性.

9) 弹性曲线敷设. 管道轴线曲线敷设, 利用管道伸缩及弯曲性能吸收管道热膨胀.

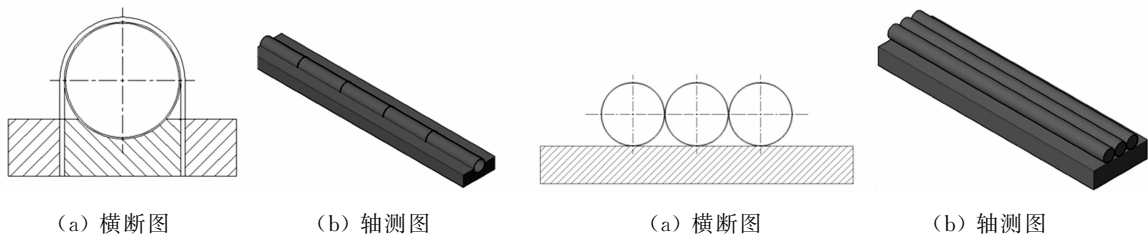


图 7 敷设在混凝土凹槽内的热水管道

Fig. 7 Laying heating pipeline in concrete groove

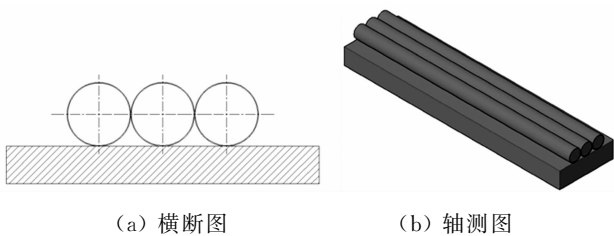


图 8 其他牵制方式的热水管道

Fig. 8 Welded three pipes together

## 5 结束语

综合管廊作为综合利用城市地下空间资源的集约化、现代化基础设施, 能够系统地整合地下管线分布, 提升市政管网服务水平. 管廊内供热热水管道的无补偿架空敷设, 可以充分利用管道的材料性能, 取消热水管网中补偿器的设置, 提高供热管网运行的安全性, 具有良好的节能效益、社会效益和经济效益.

## 参考文献:

[1] 潘旭. 国内外采暖方式现状及发展趋势分析[J]. 科技创新与应用, 2014(10): 206.

- [2] 吴建琪. 补偿器在集中供热中的应用[J]. 山西科技, 2002(1): 63-64.
- [3] 贺平, 孙刚, 王飞, 等. 供热工程[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 孟继成, 李治东, 张肇永. 金属波纹补偿器在直埋供热管道上的应用[J]. 管道技术与设备, 2009(4): 58-59. DOI:10.3969/j. issn. 1004-9614. 2009. 04. 021.
- [5] 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.
- [6] 杨洪梅, 胡雅晶. 室外管道敷设方式[J]. 黑龙江科技信息, 2010(14): 220. DOI:10.3969/j. issn. 1673-1328. 2010. 14. 214.
- [7] 郑光明. 供热工程中直埋与地沟敷设的应用研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2004, 23(1): 44-46.
- [8] 王恒栋. 市政综合管廊容纳管线辨析[J]. 城市道桥与防洪, 2014(11): 208-209.
- [9] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 陈寿标. 共同沟投资模式与费用分摊研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [11] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 同济大学. 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [12] 李仲博. 地沟管道敷设与无补偿直埋管道敷设的设计方法探讨[J]. 区域供热, 2012(5): 17-22.
- [13] 冯继蓓, 孙蕾, 张虹梅. 直埋供热热水管道敷设方式比较[J]. 煤气与热力, 2006, 26(11): 50-55.
- [14] 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.
- [15] 北京市煤气热力工程设计院有限公司. 城镇供热管网设计规范: CJJ 34—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] British Standards Institution Group. 2009 Design and installation of preinsulated bonded pipe system for district heating: BS EN 13941[S]. London: British Standards Institution Group, 2009.
- [17] 王秀全. 地上和地沟敷设供热管道的受力分析与计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [18] KIM Y J, HUH N S, KIM Y J. Quantification of pressure-induced hoop stress effect on fracture analysis of circumferential through-wall cracked pipes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(11): 1249-1267.
- [19] BARNETT W P, LORIG L. A model for stress-controlled pipe growth[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006, 159(1): 108-125. DOI:10.1016/j. jvolgeores. 2006. 06. 006.
- [20] HYDE T H, SUN W, WILLIAMS J A. Life estimation of pressurised pipe bends using steady-state creep reference rupture stresses[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(12): 799-805.
- [21] VALIENTE A. Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete[J]. Engineering Failure Analysis, 2001, 8(3): 245-261.
- [22] Federal Agency of Technical Regulation and Metrology. District heating networks standard for stress and seismic analysis: GOST 55596—2013[S]. Moscow: The National Standard of Russian Federation, 2013.
- [23] The American Society of Mechanical Engineers. ASME code for pressure piping: B 31—2016[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [24] LOWER M D. Strain-based design methodology of large diameter grade X80 linepipe[R]. Oak Ridge: U. S. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2014.
- [25] 梁恒谦. 输油管穿越浑河水下隧道工程[J]. 石油工程建设, 1982(1): 13, 34-38.
- [26] 梁恒谦. 隧道中的管道及其敷设[J]. 石油工程建设, 1983(5): 42-44.
- [27] 阿英宾杰尔 А Б, 卡麦尔卡捷英 А Г. 干线管道强度及稳定性计算[M]. 肖冶, 译. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- [28] 张慧敏, 潘家祯. 长输管线中直管跨越管道的力学分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2007, 33(4): 577-583. DOI:10.3969/j. issn. 1006-3080. 2007. 04. 026.
- [29] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- [30] 潘家华, 郭光臣, 高锡祺. 油罐及管道强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- [31] 帅健, 于桂杰. 管道及储罐强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [32] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 6版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [33] 金浏, 李鸿晶. 冲断层作用下埋地管道屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 98-104.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)