

# 基于平均应力的直埋供热管道预热温度

王飞<sup>1</sup>, 王国伟<sup>1</sup>, 邹平华<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 太原 030024, wfwfsir@126.com;

2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 针对大直径、高温、高压预热安装供热直埋管道, 在冷水试运行、降温等过程中被拉断、补偿器被撕裂等问题, 提出基于“平均应力温度”的预热温度. 从升温压应力等于降温拉应力出发, 建立起预热温度函数式, 绘出“平均应力温度”随压力和管径的变化曲线, 并用于事故管道分析. 结果表明: 大管径的预热安装温度高, 是降温断裂的主要原因. 预热温度不仅要考虑循环最高温、循环最低温, 还应考虑管道内压力、管径大小及其壁厚等因素. “平均应力温度”随内压力和管径的增大而显著降低, 而“循环中间温度”与这些因素无关. 用“平均应力温度”取代“循环中间温度”来计算各项预热参数, 能使预热安装直埋管道的降温拉应力显著减小.

**关键词:** 预热直埋管道; 供热管道; 预应力; 预热温度; 内压力

**中图分类号:** TU995

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2010)12-1985-05

## A study of the preheating temperature of directly buried heat-supply pipelines based on average stress

WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Guo-wei<sup>1</sup>, ZOU Ping-hua<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China, wfwfsir@126.com;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** When directly buried pipes with large diameter, high temperature and pressure are installed by preheating, serious accidents such as pipeline rupture, compensator fracture will happen in cold water running or during the cooling process. Based on "Average Stress Temperature", preheating temperature is proposed and its function formula is set up on the condition that the heating compressive stress is equivalent to the cooling tensile stress. The curve of "Average Stress Temperature" changed with pressure and diameter is drawn, which can be used to analyze pipeline accidents. Results show that high preheating temperature of large diameter pipes is the main reason for fracture during cooling. When calculating preheating temperature, not only the minimum and maximum cycle temperature, but also the pressure, the diameter and the wall thickness and so on should be considered. The increase of pipeline pressure and diameter plays an important role in reducing "Average Stress Temperature", but has nothing to do with "Intercycle temperature". When all preheating parameters are calculated by using "Average Stress Temperature" instead of "Intercycle temperature", cooling tensile stress for preheated directly buried pipes can be reduced evidently.

**Key words:** preheated directly buried pipes; heat-supply pipes; prestress; preheating temperature; pressure

在直埋供热管道工程中, 特别是大直径、高温

水系统中, 预热安装可以使锚固段的应力水平降低, 从而降低大直径管壁局部屈服的危险性<sup>[1-4]</sup>. 国内外有许多关于直埋供热管道预热方法及预热温度的研究报道<sup>[5-9]</sup>. “预热”是为了减小直埋供热管道在运行时承受的应力而在安装时对管道进行预升温加热. “预热温度”指在预热安装时给管

收稿日期: 2009-02-13.

基金项目: 山西省科技攻关项目(2007032069).

作者简介: 王飞(1957—), 男, 教授, 硕士生导师;  
邹平华(1944—), 女, 教授, 博士生导师.

道施加的预升温温度的最高值,其高低决定着直埋供热管道在冷态下承受预拉应力的和在热态下抵消的压应力的数值.随着电预热方法的问世,大直径直埋管道预热安装的应用越来越多.现行规范预热温度的确定基于“循环中间温度”,不计管道内压力的影响,给系统造成隐患.随着我国集中供热规模不断扩大,管径和管网压力越来越大,按照“循环中间温度”<sup>[8-9]</sup>确定的预热温度数值较高,增加了预热能耗、延长了预热时间和增加了预热成本,更严重的是造成管道的拉应力远高于压应力,在冷运行时出现管道拉断、补偿器损伤和破坏等严重事故<sup>[10-12]</sup>.

## 1 “循环中间温度”和“预热温度”

现行规范按下式计算预热直埋管道的“循环中间温度”:

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (1)$$

式中:  $t_m$  为直埋保温管工作循环中间温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1$  为直埋保温管工作循环最高温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$  为直埋保温管工作循环最低温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

“预热温度”还与预热方式有关.采用敞沟预热方式时,预热温度等于循环中间温度.按式(1)计算<sup>[9]</sup>.

采用覆土预热方式时,预热温度按下式计算<sup>[9]</sup>:

$$t_{\text{ap}} = t_m + \frac{L_c F}{2AE\alpha} \cdot 10^{-6}.$$

式中:  $t_{\text{ap}}$  为计算预热温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  为预热段土壤对单位长度管道的摩擦力,  $\text{N/m}$ ;  $L_c$  为计算管段长度,  $\text{m}$ ;  $A$  为钢管管壁横截面面积,  $\text{m}^2$ ;  $\alpha$  为钢材的线性膨胀系数,  $\text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $E$  为直埋保温管钢管的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $t_m$  同式(1).

无论采用哪种预热方式,预热管段的伸长量均按照下式计算:

$$\Delta L = \alpha(t_m - t_i)L_{\text{pr}}. \quad (2)$$

式中:  $\Delta L$  为预处理管段伸长量,  $\text{m}$ ;  $t_i$  为预处理管段初始应力为零时管道温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $L_{\text{pr}}$  为预处理管段长度,  $\text{m}$ ; 其余符号同上.

由此可见现行规范预热温度是基于“循环中间温度” $t_m$ 确定的,预热效果则通过控制温差( $t_m - t_i$ )作用下的热伸长量来实现.而“循环中间温度” $t_m$ 等于循环最高温和循环最低温度的算术平均值,和管道内压力大小、管径大小和壁厚等有关,见图1.

## 2 “平均应力温度”和预热温度

预热直埋管道总存在某一温度值 $t_0$ ,使得温差( $t_1 - t_0$ )和管内介质压力共同作用下的轴向压应力等于温差( $t_2 - t_0$ )和管内介质压力共同作用下的轴向拉应力.称 $t_0$ 为“平均应力温度”.按照平均应力温度和预热管道的初始温度来计算预热伸长量,通过控制预热管段的伸长量就可以实现上述目的.当不计内压力作用时,平均应力温度等于循环中间温度.工程实践证明:按照循环中间温度的设计方法,大管径的直埋供热管道,内压力的作用会使降温拉应力比升温压应力大得多.当确定平均应力温度时,压力工况和温度工况选择如下.

### 2.1 预热管道压力、温度的确定

在管网设计过程中会涉及到几个压力.一是管网的计算压力即设计压力,等于循环泵出口最高压力加上循环水泵与管道最低点地形高差产生的静水压力<sup>[13]</sup>;二是管网水压试验压力.分段试验压力为设计压力的1.5倍;整体水压试验压力,取设计压力的1.25倍.均对应环境冷水.三是管网的工作压力,按照管网水压图确定的实际压力.

因此计算升温最大压应力时,应把管网最高工作压力和最高运行温度作为计算参数,既安全可靠又较设计压力、水压试验压力接近实际.

同理,降温压力及循环最低温度应选取管网冷水试运行压力<sup>[14]</sup>和环境冷水温度.

### 2.2 敞沟预热平均应力温度和预热温度

#### 2.2.1 预热管道的拉应力与压应力

考虑压力、管径的影响,预热管道按平均应力温度计算的最大压应力为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_1 = \nu\sigma_{1,1} - \alpha E(t_1 - t_0).$$

式中:  $\sigma_1$  为钢管最大压应力,  $\text{MPa}$ ;  $\nu$  为钢材泊松系数;  $\sigma_{1,1}$  为管道内压力引起的环向应力,前已述及取管道的工作压力,  $\text{MPa}$ ;  $t_0$  为直埋管道的平均应力温度,  $^{\circ}\text{C}$ ; 其余符号同上.

考虑压力、管径的影响,预热管道按平均应力温度计算的最大拉应力为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_2 = \nu\sigma_{1,2} - \alpha E(t_2 - t_0).$$

式中:  $\sigma_2$  为钢管最大拉应力,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_{1,2}$  为管道冷运行压力引起的环向应力,运行压力应达到工作压力,  $\text{MPa}$ <sup>[14]</sup>; 其余符号同上.

#### 2.2.2 敞沟预热平均应力温度

按照最大拉应力等于最大压应力,  $-\sigma_1 = \sigma_2$ , 得平均应力温度为

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{\nu\sigma_{1,1}}{2\alpha E} - \frac{\nu\sigma_{1,2}}{2\alpha E} \quad (3)$$

2.2.3 敞沟预热温度

忽略管道自重产生的土壤摩擦力影响,理论敞沟预热温度为  $t_{dp} = t_0$ .

2.3 覆土预热平均应力温度和预热温度

2.3.1 覆土预热管道的拉压应力

覆土预热管段初运行时,最高温度下压应力和最低温度的拉应力按下式计算<sup>[9,15]</sup>:

1) 一次性补偿器处. 压应力

$$\sigma_{c1} = \nu\sigma_{1,1} - \alpha E(t_1 - t_{dp}), \quad (4)$$

拉应力

$$\sigma_{d1} = \nu\sigma_{1,2} - \alpha E(t_2 - t_{dp}). \quad (5)$$

2) 管段与一次性补偿器相对应的另一端. 压应力

拉应力

$$\sigma_{c2} = \nu\sigma_{1,1} - \alpha E(t_1 - t_{dp}) - \frac{FL_c}{A}, \quad (6)$$

拉应力

$$\sigma_{d2} = \nu\sigma_{1,2} - \alpha E(t_2 - t_{dp}) - \frac{FL_c}{A}. \quad (5)$$

由式(4)和式(6)可得管段内应力均布后的压应力为

$$\sigma_{cp} = \nu\sigma_{1,1} - \alpha E(t_1 - t_{dp}) - \frac{FL_c}{2A}. \quad (8)$$

由式(5)和式(7)可得管段内应力均布后的拉应力为

$$\sigma_{dp} = \nu\sigma_{1,2} - \alpha E(t_2 - t_{dp}) - \frac{FL_c}{2A}. \quad (9)$$

2.3.2 覆土预热平均应力温度

令均布后的压应力和拉应力均处于平均应力温度确定的应力水平,则式(8)、(9)又可改写为

$$\sigma_{cp} = \nu\sigma_{1,1} - \alpha E(t_1 - t_0), \quad (10)$$

$$\sigma_{dp} = \nu\sigma_{1,2} - \alpha E(t_2 - t_0). \quad (11)$$

按照最大拉应力等于最大压应力,  $-\sigma_{cp} = \sigma_{dp}$ 和式(10)、(11),可得平均应力温度

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{\nu\sigma_{1,1}}{2\alpha E} - \frac{\nu\sigma_{1,2}}{2\alpha E}. \quad (12)$$

曲线见图 1. 由图 1 可知,对于一定的供热管网,循环中间温度是一个确定的值,和管径、壁厚、压力等无关. 而“平均应力温度”不仅和循环最高、最低温度有关,还受管道压力,钢管直径和壁厚的显著影响.

比较式(3)和(12),可以看出“平均应力温度”和敞沟预热、覆土预热方式无关.

2.3.3 覆土预热温度

按照最大拉应力等于最大压应力,  $-\sigma_{cp} =$

$\sigma_{dp}$ 和式(8)、(9)可得覆土预热温度为

$$t_{dp} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{\nu\sigma_{1,1}}{2\alpha E} - \frac{\nu\sigma_{1,2}}{2\alpha E} + \frac{L_c F}{2AE\alpha} \cdot 10^{-6},$$

或

$$t_{dp} = t_0 + \frac{FL_c}{2AE\alpha} \cdot 10^{-6}.$$

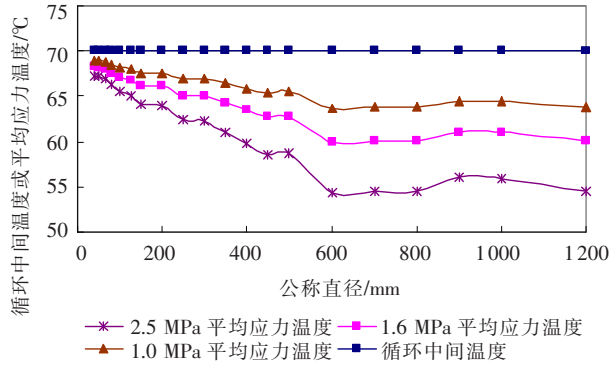


图 1 循环中间温度和平均应力温度随管径的变化

2.4 预热管段伸长量

在式(2)中,由平均应力温度  $t_0$  替代循环中间温度  $t_m$ ,则得预热管段的伸长量为

$$\Delta L = \alpha(t_0 - t_i)L_{pr}.$$

符号同上.

管网中管径不同所需要的预热温度不同,所以,即使分段长度相等  $L_{pr}$ ,预热伸长量也不一定相等(当管径规格不同时).

3 案例分析

某市集中供热一次管网的设计压力为 2.0 MPa,工作压力为 1.6 MPa,钢管规格为 DN800,(外径为 0.820 m,壁厚为 10 mm),设计供回水温度为 130/70 °C,预热安装过程中室外大气温度为 20 °C,最低循环温度为 10 °C,  $\alpha = 12.6 \times 10^{-6} \text{m}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ ,  $E = 19.6 \times 10^4 \text{MPa}$ ,管道平均埋深 1.5 m.

预热方案:首先,敞沟分段电预热.分段长度为 1 000 m,待预热管段达到计算伸长量时,沟槽回填,预热下一管段.每个预热管段沟槽回填后,过渡段长度范围内仍有回缩量.两个相邻的预热管段之间用一次性补偿器连接.集中供热热源作为整体热水预热热源,相邻管段回缩量全部膨胀出来后焊死一次性补偿器并回填.

依据“循环中间温度”的规则,各项预热数值计算如下:

1) 循环中间温度为

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = 70 \text{°C}.$$

2) 敞沟预热温度为

$$t_{dp} = 70 \text{ }^\circ\text{C},$$

覆土预热温度为

$$t_{dp} = t_m + \frac{FL_c}{2AE\alpha} \cdot 10^{-6} = 90 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3) 预热管段的伸长量为

$$\Delta L = \alpha(t_m - t_i)L_{pr} = 0.630 \text{ m}.$$

由于管道及其热媒的自重以及摩擦力偏差等因素影响,实际达到计算伸长量时的预热温度为 98.0 °C. 结果在第二个采暖季来临,冷水试运行过程中,靠近一次性补偿器附近的供水管道被拉断. 事故分析表明,设计、施工、管材等均满足相关规范、规定和标准要求.

如果按照“平均应力温度”的计算原理,各项预热参数值计算如下:

1) “平均应力温度”为

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{\nu\sigma_{t,1}}{2\alpha E} - \frac{\nu\sigma_{t,2}}{2\alpha E} = 61.5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2) 预热温度. 敞沟预热温度为

$$t_{dp} = 61.5 \text{ }^\circ\text{C},$$

覆土后预热温度为

$$t_{dp} = 74.0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3) 预热管段的伸长量为

$$\Delta L = \alpha(t_0 - t_i)L_{pr} = 0.523 \text{ m}.$$

2 种计算方法的对比:

① 敞沟预热温度. “循环中间温度”算法比“平均应力温度”算法高出 8.5 °C 左右.

② 覆土预热温度. “循环中间温度”算法比“平均应力温度”算法高出 16 °C,实际预热温度值高出 24 °C.

③ 拉应力与压应力. 基于“循环中间温度”的预热温度,管网在初次升降温时,一次性补偿器处最大压应力由式(4)可得

$$\sigma_{c1} = \nu\sigma_{t,1} - \alpha E(t_1 - t_{dp}) = -59.82 \text{ MPa}.$$

最大拉应力由式(5)可得

$$\sigma_{d1} = \nu\sigma_{t,2} - \alpha E(t_2 - t_{dp}) = 236.52 \text{ MPa}.$$

而基于“平均应力温度”算法,在初次升温 and 冷水试运行工况下,最大压应力正好等于最大拉应力,即

$$\sigma_{d1} = -\sigma_{c1} = 148.17 \text{ MPa}.$$

断裂原因:

① 该管网次年冷水试运行期间,即当年采暖期结束(初次)降温的延续作用. 管道的拉应力比压应力大得多,尤其一次性补偿器处的拉应力约为最大压应力的 4 倍,最大拉应力超过了屈服应力,  $\sigma_s = 235 \text{ MPa} < 236.52 \text{ MPa}$ .

② 低碳钢在压缩时不会发生断裂,有很高的强度极限,而拉伸到达屈服极限时,最大切应力面发生滑移<sup>[16]</sup>.

③ 直埋管道覆土静压力和车辆动压力的持续作用会造成管道的纵向弯曲<sup>[17-18]</sup>.

冷水试运行期间管道的降温拉应力和纵向弯曲拉应力耦合作用超过钢管强度极限时就会发生断裂.

## 4 结 论

1) 对于大直径、高压力的直埋管道,确定预热温度应从拉应力等于压应力着手,即以“平均应力温度”取代“循环中间温度”. 然后按照“平均应力温度”来计算预热温度.

2) “平均应力温度”不仅和最高、最低循环温度有关还受到内压力、管径和壁厚的显著影响;而“循环中间温度”只和最高、最低循环温度有关.

3) 预热效果是通过控制管道的热伸长来实现的. 预热伸长的计算应按照“平均应力温度”和环境温度之差以及计算管段长度来确定. 因此,等长不等径的管段预热伸长量也因“平均应力温度”不同而不同.

4) “平均应力温度”与敞沟预热和覆土预热方式无关.

5) 当实际预热温度超过计算值而预热管段的预热伸长尚未达到计算量时,应采取其他辅助技术措施促使管道伸长. 避免实际预热温度过高造成降温拉应力过大.

6) “平均应力温度”的确定使得预热直埋管真正实现了升温压应力等于降温拉应力. 如果对直埋管道,特别是大管径、高压力的直埋管道的实际预热温度上限加以限定,既有利于降低预热能耗、缩短预热施工周期又能确保管道的安全运行.

## 参 考 文 献:

[1] ANDREUZZI F, PERRONE A. Analytical solution for upheaval buckling in buried pipeline [J]. Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(39): 5081 - 5087.

[2] DAS S, CHENG J J R, MURRAY D W. Prediction of the fracture life of a wrinkled steel pipe subject to low cycle fatigue load [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(9): 1131 - 1139.

[3] DAS S, CHENG J J R, MURRAY D W. A test method to determine low - cycle - fatigue behavior of wrinkled pipe [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(1): 1 - 9.

- [4] SOLANO R F, VAZ M A, REGO V S. Study assesses thermomechanical buckling in shore - approach pipelines [J]. *Oil & Gas Journal*, 2005, 103 (33): 62 - 68.
- [5] WONSYLD T, BABUS-HAQ R F, PROBERT S D. Pre-insulated district - heating pipelines: Design and operational advice [J]. *Applied Energy*, 1992, 42 (4): 227 - 236.
- [6] ANON. Electric preheating: A new method for laying pre - insulated district heating pipes [J]. *ABB Review*, 1990, 77 (1): 33 - 38.
- [7] LEIF J. Expansion of district heating supply by combined heat and power in Denmark [J]. *Fernwarme International*, 1990, 19(6): 472, 475 - 476.
- [8] (丹麦) 兰德劳夫皮. 区域供热手册[M]. 贺平, 王刚, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998: 29 - 31.
- [9] 唐山市热力总公司. CJJ - T81 - 98, 城镇直埋供热管道工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 27 - 29.
- [10] ZHENG Zhen tai, SHAN Ping, HU Sheng sun, *et al.* Study on cold cracking sensibility of high tensile pipeline - steel by Y - groove cracking test [J]. *Cailiao Gongcheng/Journal of Materials Engineering*, 2006, 8 (8): 20 - 22.
- [11] 杨良仲, 张连钢, 张志清. 高温水直埋保温管道覆土后预热的应力计算[J]. *煤气与热力*, 2007(9): 72 - 75.
- [12] 尚宪, 史广新. 直埋一次性波纹补偿器冷态撕裂现象分析及结构改进[J]. *区域供热*, 2007(6): 36 - 40.
- [13] 北京市煤气热力工程设计院. CJJ34 - 2002, 城市热力网设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 22.
- [14] 北京市热力集团有限责任公司. CJJ28 - 2004, 城镇供热管网工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 45 - 48.
- [15] 王飞, 张建伟. 直埋供热管道工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 107 - 110.
- [16] 单辉祖. 材料力学( I ) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 23 - 27.
- [17] ZHANG Y H, DAS S. Failure of X52 wrinkled pipeline subjected to monotonic bending deformation and internal pressure [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2008, 18(1): 50 - 55.
- [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.

(编辑 刘 彤)

(上接第 1952 页)

- [6] LARSEN A, SAVAGE M, LAFRENIÈRE A, *et al.* Investigation of vortex response of a twin box bridge section at high and low Reynolds numbers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 934 - 944.
- [7] LAROSE G L, LARSEN S V, LARSEN A, *et al.* Sectional model experiments at high Reynolds number for the deck of a 1018m span cable - stayed bridge [C] // Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering. Lubbock: TTU Press, 2003: 373 - 380.
- [8] 张伟, 魏志刚, 杨詠昕, 等. 基于高低雷诺数试验的分离双箱涡振性能对比 [J]. *同济大学学报*, 2008, 36(1): 6 - 11.

(编辑 刘 彤)