



管廊内热力管道支墩分析与设计

张 扬^{1,2}, 陈思宇¹

(1. 中国中元国际工程有限公司,北京 100089;2. 中国科学院大学 工程科学学院,北京 100049)

摘要:为了解决当前综合管廊热力管道支墩设计参考资料匮乏的现状,文章尝试建立科学规范的设计方法,为支墩设计提供理论依据与实践指导。采用理论分析与工程算例结合的方式,首先说明支墩对热力管道的约束功能特性,并基于力学原理对管廊内 3 类热力管道支墩进行受力分析,阐明荷载传递机制。随后,以混凝土结构设计规范为依据对管廊内 DN600 热力管道的支墩进行设计,结合其构造形式及截面强度计算,通过规范化的流程形成完整的工程算例。计算结果表明:依据混凝土结构设计规范的支墩设计方法具有可行性,可为综合管廊热力管道支墩的标准化设计研究提供参考。

关键词:综合管廊; 热力管道; 支墩; 设计方法

中图分类号:TU973+.23

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)05-0040-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.05.060

Analysis and design of thermal pipeline support piers in pipe gallery

ZHANG Yang^{1,2}, CHEN Siyu¹

(1. China IPPR International Engineering Co., Ltd., Beijing 100089, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to address the current lack of reference materials for the design of thermal pipeline support piers in comprehensive pipe galleries, this article attempts to establish a scientific and standardized design method, providing theoretical basis and practical guidance for the design of supports. The article adopts a combination of theoretical analysis and engineering examples to first explain the constraint function characteristics of support piers on thermal pipelines, and based on mechanical principles, conduct force analysis on three types of thermal pipeline support piers in the pipe gallery to clarify the load transfer mechanism. Subsequently, based on the design specifications for concrete structures, the support piers of the DN600 thermal pipeline in the pipe gallery are designed. Combined with their structural form and cross-sectional strength calculations, a complete engineering example is formed through a standardized process. The calculation results indicate that the pipeline support piers design method based on the concrete structure design specifications is feasible and can provide reference for the standardized design research of thermal pipeline piers in comprehensive pipe galleries.

Key words: comprehensive pipe gallery; thermal pipeline; support piers; design method

近年来,伴随着我国城市建设的高质量发展,城市地下综合管廊因其集约化利用城市地下空间节约土地资源、保障地下管线安全运营、避免断路检修等优势,正在被广泛应用于全国各地的城

市建设^[1]。在综合管廊规划设计中,热力仓主要用于敷设城市供热管道,其内部主要由热力管道、补偿器、管道支墩、管道支架组成。其中,管道支墩作为贴地敷设管道的重要结构构件用于承托

收稿日期:2024-10-18

作者简介:张 扬(1998—),男,助理工程师,从事能源工程结构设计工作。

管道、承载热力管道自重以及运行产生的各向推力,对热力管线的安全运行起到至关重要的作用。

在热力管道直埋支墩设计研究领域,刘敏^[2]对直埋热力管道固定支墩的受力特点及设计方法进行了分析阐述并给出了应用案例;住建部颁布的行业标准《城镇供热直埋热水管道技术规程》(CJJ/T 81—2013)^[3]也对直埋热力管道固定墩提出了设计要求;此外,李留强等^[4]对固定支墩的尺寸、样式及配筋计算进行了分析总结,为类似设计提供参考;朱闯^[5]结合装配式混凝土结构技术,提出了一种新型直埋热力管道预制装配式固定支墩并论述了其设计方法,在优化直埋热力管道支墩建设周期方面提供了思路。管廊内热力支墩设计研究方面,戴超等^[6]对纳入热力管线的综合管廊的设计要点进行了归纳总结,结合工程实例论述热力管道支墩在管廊内的作用及工况特点,从管径及管道推力两个角度分析了支墩的构造形式,提出了热力管线与管廊主体结构同步设计,尽量提高管道支墩设计标准以应对建设过程中难以预估的变化的建议;杨洁^[7]提供了热力管道入廊散热量计算方法及管廊内热力管道系统的设计要点,对管道支墩设计提出了要求;张玉成等^[8]等在对国内首条热力盾构隧道工程的结构设计与研究过程中,重点研究了隧道内热力管道特殊节点处(固定、导向、滑动)荷载对隧道管片的影响,详细阐述了上述3类特殊节点荷载的特点。值得注意的是,上述文献均未涉及管廊内热力支墩设计方法的研究。

综上,热力管道支墩是热力管网工程中重要的附属构件,但现有文献仅提供了直埋热力管线固定支墩的设计方法,未提出管廊内热力管道支墩的设计方法。目前的研究关注支墩对管廊主体结构的影响但管廊内热力管道支墩分析与设计方面仍缺乏文献资料且无专门的规范标准可循。因此,为了保证管廊内热力管线的运行安全,相对科学合理地对支墩进行设计,本文依据《混凝土结构通用规范》(GB 55008—2021)^[9]及《混凝土结构设计规范》(2015年版)(GB 50010—2010)^[10](下文简称:混规),对管廊内热力管道固定、导向及滑动支墩进行受力分析并提出相应设计方法,以期为管廊热力管道支墩设计及研究工作提供参考。

1 热力管道支墩的分类及设计方法

1.1 固定支墩

固定支墩用于限制热力管道沿管轴方向的位移,并承载管道的轴向力及竖向力。其工作原理:热力管道在运行时产生的轴向力传给管卡,钢筋混凝土支墩顶部预埋件与管卡刚性连接,使支墩承载管道推力和竖向力。固定支墩的构造形式与受力特点与悬臂短柱相似,承受沿管轴方向的剪力、竖向轴力及管道竖直平面内弯矩(图1)。因此,从受力分析来看,固定支墩可以按单向偏心受压构件进行设计。图中: F_1 为竖向荷载,kN; F_2 为平面向荷载,kN; M_{F_2} 为轴向弯矩,kN·m。

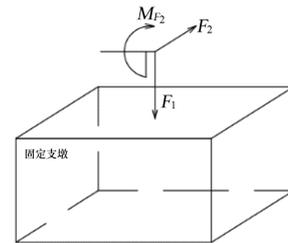


图1 固定支墩受力示意

1.2 导向支墩

导向支墩用于限制热力管道沿管径方向的位移并承载管道的径向力及竖向力,同时承担少许轴向推力并限制位移。其工作原理:管道产生的径向及轴向力传给管卡,钢筋混凝土支墩顶部预埋件与管卡刚性连接,使支墩承载管道的双向推力和竖向力。因此,导向支墩承受管道运行产生的双向剪力、竖向轴力及管道平面内、外双向弯矩(图2)。从受力分析来看,导向支墩可以按双向偏心受压构件进行设计。图中: F_3 为径向荷载,kN; M_{F_3} 为径向弯矩,kN·m。

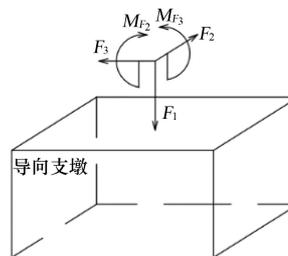


图2 导向支墩受力示意

1.3 滑动支墩

滑动支墩用于承担热力管道的竖向力。其工

作原理：热力管道在运行时产生的轴向力及竖向力传递给管卡，钢筋混凝土支墩顶部预埋件与管卡滑动连接（管卡与预埋件脱开不焊接），支墩承载管卡与支墩预埋件间产生的滑动摩擦力以及管道竖向力。管廊内的滑动支墩数量一般较多，为便于管廊主体结构施工，滑动支墩多采用廊内后浇筑型式或预制支墩坐浆。在管道推力的作用下，滑动支墩不可避免地会受到弯矩作用，但支墩顶部热力管道的刚度会对支墩起到一定的约束作用，可不考虑支墩的抗倾覆验算。因此，滑动支墩主要承受管轴方向的滑移力及竖向轴力（图 3），为保证支墩工作的可靠性，滑动支墩应进行抗滑移验算。

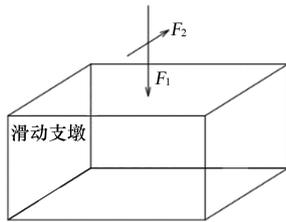


图 3 滑动支墩受力示意

2 热力管道支墩算例

某综合管廊热力管网工程贴地敷设两根 DN600 热力管道（图 4），热力专业设计人员通过管道应力计算提供管廊内各类管道支墩的荷载，如表 1 所示。结构专业根据管廊主体结构设计情况将支墩的材料与主体结构相统一，采用 C35 混凝土及 HRB400 钢筋，支墩的混凝土材料性能及钢筋材料性能如表 2、3 所示，本算例的管道荷载分项系数均按 1.5 计算。

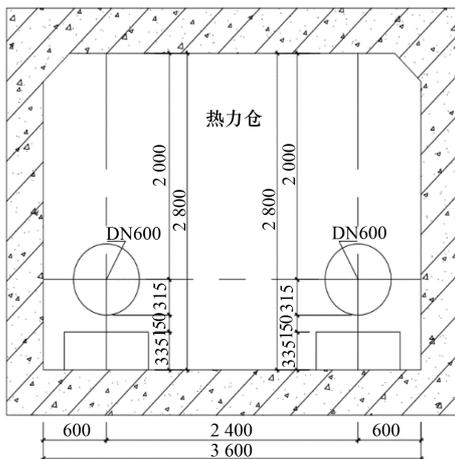


图 4 管廊热力仓断面

mm

表 1 DN600 热力管道对各类支墩的荷载作用标准值 kN

支墩类型	竖向荷载 F_1	轴向荷载 F_2	径向荷载 F_3
固定支墩	75	350	-
导向支墩	75	25	70
滑动支墩	75	25	-

表 2 DN600 热力管道支墩混凝土材料性能 MPa

轴心抗压强度设计值 f_c	轴心抗拉强度设计值 f_t	立方体抗压强度标准 $f_{cu,k}$	弹性模量 E_c
16.7	1.57	35	3.15×10^4

表 3 DN600 热力管道支墩钢筋材料性能 MPa

抗拉强度设计值 f_y	抗压强度设计值 f'_y	弹性模量 E_s
360	360	2.0×10^5

2.1 固定支墩设计

根据工艺资料及预埋件尺寸设计固定支墩（图 5），支墩的尺寸参数如表 4 所示。

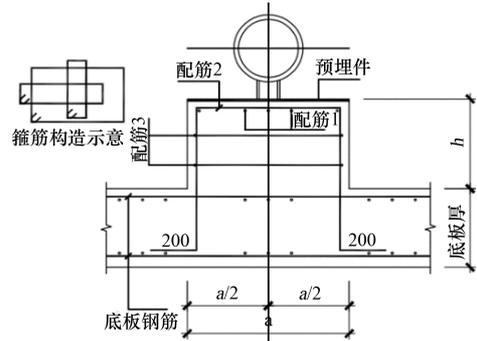


图 5 固定、导向支墩配筋构造示意

表 4 固定支墩尺寸参数 mm

径向尺寸 a	轴向尺寸 b	高度尺寸 h	管道中心至预埋件距离 h'
800	1 000	335	465

2.1.1 预埋件设计

支墩预埋件作为与管卡刚性连接的传力构件在设计时需特别关注。有工程案例表明，热力管道支墩会因预埋件设计不满足承载力要求而破坏，同时预埋件的尺寸会影响管道支墩的尺寸，因此在支墩设计时应首先进行预埋件设计（图 6）。

通过对支墩的受力分析，预埋件应按有剪力、法向压力和弯矩共同作用的工况进行设计，依据混规 9.7.1、9.7.2 及 9.7.4 条，预埋件的承载力设计及构造应符合以下条件：

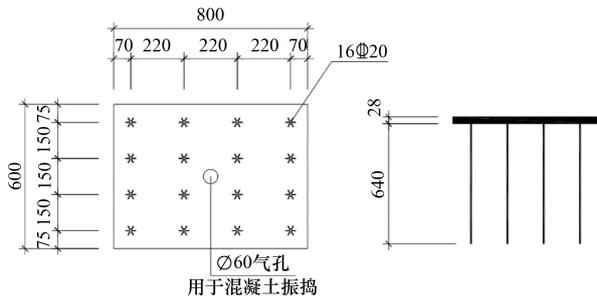


图6 预埋件示意

$$A_s \geq \frac{V - 0.3N}{\alpha_r \alpha_v f_y} + \frac{M - 0.4N_z}{1.3\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (1)$$

$$A_s \geq \frac{M - 0.4N_z}{0.4\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (2)$$

$$\alpha_v = (4.0 - 0.08d) \sqrt{\frac{f_c}{f_y}} \quad (3)$$

$$\alpha_b = 0.6 + 0.25 \frac{t}{d} \quad (4)$$

式中: A_s 为预埋件锚筋的总截面面积, mm^2 ; V 为轴向荷载设计值对预埋件产生的剪力作用, kN ; M 为轴向荷载设计值对预埋件的弯矩作用, $\text{kN}\cdot\text{m}$; N 为竖向荷载设计值对支墩产生的轴压作用, kN ; z 为沿剪力作用方向最外层锚筋中心线之间的距离, mm ; α_v 为锚筋受剪承载力系数; α_b 为锚板弯曲变形承载力系数; t 为锚板厚度, mm ; d 为锚筋直径, mm ; α_r 为锚筋层数影响系数。

设预埋件轴向尺寸 800 mm 径向尺寸 600 mm, 锚板厚度采用 28 mm, 设置 4 层 4 列 20 锚筋, 轴向锚筋间距 220 mm, 径向锚筋间距 150 mm, 荷载作用均按活荷载考虑。

由此可得以下结果:

$$A_s = 5\,024 \text{ mm}^2; \alpha_v = 0.517, \alpha_b = 0.950, \alpha_r = 0.85; V = 1.5F_2 = 525 \text{ kN}; M = 1.5F_2 h' \times 10^{-3} = 244.125 \text{ kN}\cdot\text{m}; N = 1.5F_1 = 112.5 \text{ kN}。$$

由公式(1)计算: $A_s \geq 3\,965 \text{ mm}^2$ 。

由公式(2)计算: $A_s \geq 2\,794 \text{ mm}^2$ 。

因此, 预埋件设计满足承载力及构造要求。

2.1.2 正截面承载力设计

支墩正截面承载力按偏心受压构件计算设计, 为了保证支墩沿轴向双方向的受力性能一致且便于施工, 采用对称配筋方式。依据混规 6.2.1、6.2.5-6.2.7、6.2.14、6.2.17 及 8.5.1 条, 可知偏心受压构件的计算要区分大、小偏压破坏形

态, 由于热力管道支墩尺寸较大, 多为大偏压构件即混凝土受压区高度小于混凝土界限受压区高度且受压钢筋应变很小, 受压钢筋难以充分利用, 在计算支墩配筋前应先验证大偏压构件假定, 可通过公式(5)~(8)可计算出混凝土界限受压区高度 x_b , 支墩对称配筋, 受拉筋与受压筋的内力相抵, 通过力的平衡条件可得公式(13)即混凝土受压区高度 x , 满足大偏压条件后通过公式(9)~(12)计算考虑弯矩作用后的竖向力作用点至受拉钢筋合力点间的距离, 采用公式(14)对受压钢筋合力点取矩则可得支墩单侧配筋面积, 同时还应按公式(15)以混凝土构件单侧最小配筋率要求复核配筋面积。计算公式如下:

$$\varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (5)$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (6)$$

$$h_0 = b - a_s \quad (7)$$

$$x_b = h_0 \xi_b \quad (8)$$

$$e_0 = \frac{M}{N} \quad (9)$$

$$e_a = \max\left(20, \frac{b}{30}\right) \quad (10)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (11)$$

$$e = e_i + \frac{b}{2} - as \quad (12)$$

$$x = \frac{N}{\alpha_1 f_c a} \quad (13)$$

$$A_s = \frac{N\left(e_i - \frac{b}{2} + a'_s\right)}{f_y (h_0 - a'_s)} \quad (14)$$

$$A_{s,\min} = 0.002 ab \quad (15)$$

式中: ε_{cu} 为混凝土正截面极限压应变, 计算值大于 0.0033 取 0.0033, mm ; ξ_b 为配置有屈服点钢筋钢筋混凝土构件的相对界限受压区高度, mm ; h_0 为截面有效高度, mm ; β_1 为混凝土等效矩形应力图系数, 混凝土强度等级不超过 C50 时取 0.8; α_1 为混凝土受压区等效矩形应力系数, 混凝土强度等级不超过 C50 时取 1.0; a_s 为受拉钢筋合力点至受拉边缘的距离, 本文取 40 mm; a'_s 为受压钢筋合力点至受拉边缘的距离, 本文取 40 mm; e_0 为压力对截面重心的偏心距, mm ; e_a 为附加偏心

距, mm; e_i 为初始偏心距, mm; e 为压力作用点至纵向受拉普通钢筋合力点的距离, mm; x 为混凝土受压区高度, mm; x_b 为混凝土界限受压区高度, mm; A_s 为支墩单侧计算配筋截面面积, mm^2 ; $A_{(s,\min)}$ 为支墩单侧最小配筋截面面积, mm^2 ; M 为轴向荷载设计值对支墩的弯矩作用, $\text{kN}\cdot\text{m}$; N 为竖向荷载设计值对支墩产生的轴压作用, kN。

由此可得以下结果: $\varepsilon_{cu} = 0.00345$ mm, 取 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ mm; $\xi_b = 0.518$; $h_0 = b - a_s = 960$ mm; $x_b = 496.941$ mm; $M = 1.5F_2(h + h') \times 10^{-3} = 420$ $\text{kN}\cdot\text{m}$; $e_0 = 3733$ mm, $e_a = 33.333$ mm, $e_i = 3767$ mm, $e = 4227$ mm; $x = 8.421$ mm $< x_b = 496.941$ mm, 满足大偏心受压假定。

由于 $x < 2a'_s$, 根据规范应按公式(14)计算配筋且应满足公式(15)的构造要求: $A_s = 1123$ mm^2 , $A_{(s,\min)} = 1600$ mm^2 。

因此, 配筋 1 与配筋 2 均采用 8 Φ 16 纵向钢筋可满足正截面承载力的设计要求。

2.1.3 斜截面承载力设计

为了防止支墩在荷载作用下出现斜压破坏, 限制支墩的受剪截面尺寸, 依据混规 6.3.1 条, 矩形、T 形和 I 形截面受弯构件的受剪截面应符合以下条件:

$$\text{当 } \frac{h_w}{a} \leq 4 \text{ 时, } V \leq 0.25\beta_c f_c a h_0 \quad (16)$$

式中: h_w 为支墩受剪截面的有效高度即 h_0 , mm; a_s 为受拉钢筋合力点至受拉边缘的距离, 取 40 mm; β_c 为混凝土强度影响系数混凝土强度等级不超过 C50 时取 0.8。

由此可得以下结果: $h_0 = b - a_s = 960$ mm; $0.25\beta_c f_c a h_0 = 3.206 \times 10^3$ kN; $V = 1.5F_2 = 525$ kN; $V < 0.25\beta_c f_c a h_0$ 。

因此, 受剪截面满足要求。

由于轴向压力对构件的受剪承载力起有利作用, 能阻滞斜裂缝的出现和开展, 增加了混凝土剪压区高度, 提高了混凝土所承担的剪力。依据混规 6.3.13 条, 矩形、T 形和 I 形截面的钢筋混凝土偏心受压构件在满足公式(17)的要求时, 可不进行斜截面受剪承载力计算, 其箍筋的构造要求应满足混规 9.3.2 条规定。

$$V \leq \alpha_{cv} f_t a h_0 + 0.07 N \quad (17)$$

$$\alpha_{cv} = \frac{1.75}{\lambda + 1} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{h}{h_0} \quad (19)$$

式中: α_{cv} 为斜截面混凝土受剪承载力系数; λ 为计算截面的剪跨比; N 为轴压比不超过 0.3 时竖向荷载设计值对支墩产生的轴压作用, kN。

由此可得以下结果: $\lambda = 0.349 < 1.5$, 按规范要求取 $\lambda = 1.5$; $\alpha_{cv} = 0.7$; $\alpha_{cv} f_t a h_0 + 0.07 N = 844.04$ kN; $V = 1.5F_2 = 525$ kN; $V < \alpha_{cv} f_t a h_0 + 0.07 N$ 。

因此, 支墩配筋 3 配置 Φ 8 @ 200 四肢构造复合箍筋即可满足抗剪承载力设计要求。

2.2 导向支墩设计

根据工艺资料设计导向支墩结构构造与固定支墩相同(图 5), 但二者之间的配筋 1、配筋 2 及配筋 3 所配置的钢筋是不同的, 支墩的尺寸参数如表 5 所示。

表 5 导向支墩尺寸参数 mm

径向尺寸 a	轴向尺寸 b	高度尺寸 h	管道中心至预埋件距离 h'
800	600	335	465

2.2.1 预埋件设计

导向支墩预埋件的计算方法与固定支墩、滑动支墩预埋件的计算方法不同之处在于导向支墩是双向受力构件, 同时承载管道径向力与轴向力。现行规范对于双向剪切、双向弯曲预埋件没有明确的计算方法, 但在长期的工程实践中, 以及多数专业计算软件的编制中, 常采用代数叠加的方法来解决双向剪切、双向弯曲问题^[11]。因此, 导向支墩预埋件的锚筋计算应按公式(1)~(4)及公式(20)~(21)计算:

$$A_s \geq \frac{V_{F_3} - 0.3N}{\alpha_{r1} \alpha_b f_y} + \frac{M_{F_3} - 0.4N_{z1}}{1.3 \alpha_{r1} \alpha_b f_{yz1}} + \frac{V_{F_2} - 0.3N}{\alpha_{r2} \alpha_b f_y} + \frac{M_{F_2} - 0.4N_{z2}}{1.3 \alpha_{r2} \alpha_b f_{yz2}} \quad (20)$$

$$A_s \geq \frac{M_{F_3} - 0.4N_{z1}}{0.4 \alpha_1 \alpha_b f_{yz1}} + \frac{M_{F_2} - 0.4N_{z2}}{0.4 \alpha_2 \alpha_b f_{yz2}} \quad (21)$$

式中: V_{F_3} 为径向荷载设计值对预埋件产生的剪力作用, kN; M_{F_3} 为径向荷载设计值对预埋件的弯矩作用, $\text{kN}\cdot\text{m}$; V_{F_2} 为轴向荷载设计值对预埋件产生

的剪力作用, kN; M_{F_2} 为轴向荷载设计值对预埋件的弯矩作用, kN·m; z_1 为沿径向剪力作用方向最外层锚筋中心线之间的距离, mm; z_2 为沿轴向剪力作用方向最外层锚筋中心线之间的距离, mm; α_{r1} 为径向锚筋层数影响系数; α_{r2} 为轴向锚筋层数影响系数; 公式中其余参数含义详见本文3.1.1节。

设预埋件轴向尺寸400 mm 径向尺寸600 mm, 锚板厚度采用25 mm, 设置2层4列 $\Phi 14$ 锚筋, 轴向锚筋间距200 mm, 径向锚筋间距150 mm。

由此可得以下结果: $A_s = 1\ 232\ \text{mm}^2$; $\alpha_v = 0.62$, $\alpha_b = 1.046$, $\alpha_{r1} = 0.85$, $\alpha_{r2} = 1.0$; $V_{F_3} = 1.5 F_3 = 105\ \text{kN}$; $M_{F_3} = 1.5 F_3 h' \times 10^{-3} = 48.825\ \text{kN}\cdot\text{m}$; $V_{F_2} = 1.5 F_2 = 37.50\ \text{kN}$; $M_{F_2} = 1.5 F_2 h' \times 10^{-3} = 17.438\ \text{kN}\cdot\text{m}$; $N = 1.5 F_1 = 112.5\ \text{kN}$ 。

由公式(20)计算: $A_s \geq 630.857\ \text{mm}^2$; 由公式(21)计算: $A_s \geq 775.743\ \text{mm}^2$ 。

因此, 预埋件设计满足承载力及构造要求。

2.2.2 正截面承载力设计

导向支墩正截面承载力的设计方法同3.1.2节, 与固定支墩正截面承载力设计方法的区别是需要按照单向偏压构件分别验算径向和轴向的正截面承载力, 支墩在两个水平受力方向均考虑对称配筋并根据混规6.2.21条给出的双向偏心受压倪克勤(N. V. Nikitin)近似公式进行双向偏压复核计算。因此导向支墩正截面承载力按公式(5)~(10)及公式(22)~(25)计算:

$$N \leq \frac{1}{\frac{1}{N_{ux}} + \frac{1}{N_{uy}} - \frac{1}{N_{u0}}} \quad (22)$$

$$N_{ux} = \frac{A_{s1} f'_y (h_{01} - a'_s) + \alpha_1 f_c \alpha x_1 \left(h_{01} - \frac{x_1}{2} \right)}{e_x} \quad (23)$$

$$N_{uy} = \frac{A_{s2} f'_y (h_{02} - a'_s) + \alpha_1 f_c b x_2 \left(h_{02} - \frac{x_2}{2} \right)}{e_y} \quad (24)$$

$$N_{u0} = f_c ab + f'_y \sum A_s \quad (25)$$

式中: N_{ux} 为压力沿轴向偏心后考虑按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值, kN; N_{uy} 为压力沿径向偏心后考虑按全部纵向普通钢筋计算的构件偏心受压承载力设计值, kN; N_{u0} 为构件的截面轴心受压承载力设计值, kN; $\sum A_s$ 为支

墩配筋总截面面积, mm^2 ; h_{01} 为支墩轴向的截面有效高度, mm; h_{02} 为支墩径向的截面有效高度, mm; 公式中其余参数含义详见本文3.1.2节。

(1) 轴向正截面承载力计算:

$\varepsilon_{cu} = 0.003\ 45\ \text{mm}$, 取 $\varepsilon_{cu} = 0.003\ 3\ \text{mm}$; $\xi_b = 0.518$; $h_{01} = b - a_s = 560\ \text{mm}$; $x_b = 289.882\ \text{mm}$; $M'_{F_2} = 1.5 F_2 (h + h') \times 10^{-3} = 30\ \text{kN}\cdot\text{m}$; $e_0 = 266.667\ \text{mm}$, $e_a = 20\ \text{mm}$, $e_i = 286.667\ \text{mm}$, $e = 546.667\ \text{mm}$; $x_1 = 8.421\ \text{mm} < x_b = 289.882\ \text{mm}$, 满足大偏心受压假定。

由于 $x_1 < 2a'_s$, 根据规范应按公式(14)计算配筋且应满足公式(15)的构造要求: $A_s = 16.026\ \text{mm}^2$, $A_{s,\min} = 960\ \text{mm}^2$ 。

因此, 配筋1采用5 $\Phi 16$ 纵向钢筋即可满足轴向正截面承载力的设计要求。

(2) 径向正截面承载力计算:

$\varepsilon_{cu} = 0.003\ 45\ \text{mm}$, 取 $\varepsilon_{cu} = 0.003\ 3\ \text{mm}$; $\xi_b = 0.518$; $h_{02} = a - a_s = 760\ \text{mm}$; $x_b = 393.412\ \text{mm}$; $M'_{F_3} = 1.5 F_3 (h + h') \times 10^{-3} = 84\ \text{kN}\cdot\text{m}$; $e_0 = 746.667\ \text{mm}$, $e_a = 26.667\ \text{mm}$, $e_i = 773.333\ \text{mm}$, $e = 1\ 133\ \text{mm}$; $x_2 = 11.228\ \text{mm} < x_b = 393.412\ \text{mm}$, 满足大偏心受压假定。

由于 $x_2 < 2a'_s$, 根据规范应按公式(14)计算配筋且应满足公式(15)的构造要求: $A_s = 179.398\ \text{mm}^2$, $A_{s,\min} = 960\ \text{mm}^2$ 。

因此, 配筋2采用5 $\Phi 16$ 纵向钢筋即可满足轴向正截面承载力的设计要求。

(3) 双向偏压复核算:

根据2.2.2节(1)、(2)小节计算结果, 并按公式(22)~(25)验算, 可得如下结果: $N = 112.5\ \text{kN}$; $N_{ux} = 458.529\ \text{kN}$; $N_{uy} = 304.733\ \text{kN}$; $N_{u0} = 9\ 463\ \text{kN}$ 。

$$N < \frac{1}{\frac{1}{N_{ux}} + \frac{1}{N_{uy}} + \frac{1}{N_{u0}}} = 186.68\ \text{kN}。$$

因此, 正截面承载力的设计满足要求。

2.2.3 斜截面承载力设计:

导向支墩斜截面承载力设计需要进行支墩双向受剪截面验算及双向斜截面受剪承载力验算, 采用以椭圆规律的受剪承载力方程式为基础并与单向偏心受压构件受剪的截面要求相衔接的表达式计算。因此按公式(18)~(19)、混规9.3.2条及

公式(26)~(30)对支墩在两个水平受力方向分别进行设计。

$$V_{F_2} \leq 0.25\beta_c f_c a h_{01} \sin\theta \quad (26)$$

$$V_{F_3} \leq 0.25\beta_c f_c b h_{02} \cos\theta \quad (27)$$

$$V_{F_2} \leq (\alpha_{cv} f_t a h_{01} + 0.07 N) \sin\theta \quad (28)$$

$$V_{F_3} \leq (\alpha_{cv} f_t b h_{02} + 0.07 N) \cos\theta \quad (29)$$

$$\theta = \arctan(V_{F_2}/V_{F_3}) \quad (30)$$

式中： θ 为支墩承受的管道轴向剪力与径向剪力的夹角，(°)；公式中其余参数含义详见本文2.1.3节。

(1) 轴向斜截面承载力计算：

对导向支墩的轴向斜截面承载力进行计算可得以下结果： $V_{F_2} = 1.5 F_2 = 37.5 \text{ kN}$ ； $V_{F_3} = 1.5 F_3 = 105 \text{ kN}$ ； $\theta = 19.65^\circ$ ； $h_{01} = b - a_s = 560 \text{ mm}$ ； $0.25\beta_c f_c a h_{01} \sin\theta = 1.87 \times 10^3 \text{ kN}$ ； $V_{F_2} < 0.25\beta_c f_c a h_{01} \sin\theta$ 。

因此，轴向受剪截面满足要求。

$\lambda = 0.598 < 1.5$ ，按规范要求取 $\lambda = 1.5$ ； $\alpha_{cv} = 0.7$ ； $(\alpha_{cv} f_t a h_{01} + 0.07 N) \sin\theta = 165.599 \text{ kN}$ 。

$V_{F_2} < (\alpha_{cv} f_t a h_{01} + 0.07 N) \sin\theta$ 。因此，支墩配筋3配置 $\Phi 8@200$ 四肢构造复合箍筋即可满足轴向抗剪承载力设计要求。

(2) 径向斜截面承载力计算

对导向支墩的径向斜截面承载力进行计算可得以下结果：

$V_{F_2} = 37.5 \text{ kN}$ ， $V_{F_3} = 105 \text{ kN}$ ， $\theta = 19.65^\circ$ ； $h_{02} = a - a_s = 760 \text{ mm}$ ； $0.25\beta_c f_c b h_{02} \cos\theta = 1.904 \times 10^3 \text{ kN}$ ； $V_{F_3} < 0.25\beta_c f_c b h_{02} \cos\theta$ 。

因此，径向受剪截面满足要求。

$\lambda = 0.441 < 1.5$ ，按规范要求取 $\lambda = 1.5$ ； $\alpha_{cv} = 0.7$ ； $\alpha_{cv} f_t b h_{02} + 0.07 N) \cos\theta = 471.956 \text{ kN}$ ； $V_{F_3} < (\alpha_{cv} f_t b h_{02} + 0.07 N) \cos\theta$ 。

因此，支墩配筋3配置 $\Phi 8@200$ 四肢构造复合箍筋即可满足径向抗剪承载力设计要求。

2.3 滑动支墩计算

根据工艺资料设计滑动支墩(图7)，支墩的尺寸参数如表6所示。

2.3.1 预埋件设计

设预埋件轴向尺寸400mm，径向尺寸400mm，锚板厚度采用25mm，设置2层2列 $\Phi 10$ 锚筋，轴向锚筋间距200mm，径向锚筋间距200mm，根据3.1.1节公式(1)~(4)验算可得以下结果：

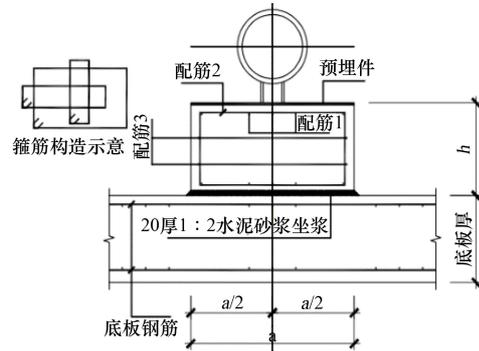


图7 滑动支墩配筋构造示意

表6 滑动支墩尺寸参数 mm

径向尺寸 a	轴向尺寸 b	高度尺寸 h	管道中心至预埋件距离 h'
600	500	335	465

$A_s = 314 \text{ mm}^2$ ； $\alpha_v = 0.689$ ， $\alpha_b = 1.225$ ， $\alpha_r = 1.0$ ； $V = 1.5 F_2 = 37.5 \text{ kN}$ ； $M = 1.5 F_2 h' \times 10^{-3} = 17.438 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ； $N = 1.5 F_1 = 112.5 \text{ kN}$ 。

由公式(1)计算： $A_s \geq 88.701 \text{ mm}^2$ 。

由公式(2)计算： $A_s \geq 239.158 \text{ mm}^2$ 。

因此，预埋件设计满足承载力及构造要求。

2.3.2 抗滑移验算

支墩抗滑移验算的关键在于计算抗滑移力即最大静摩擦力，抗滑移力应至少大于滑移力30%以确保支墩不产生位移。因此按公式(31)~(32)进行滑动支墩的抗滑移验算。

$$F_{as} = \mu(F_1 + G) \quad (31)$$

$$K_s = \frac{F_{as}}{F_s} \geq 1.3 \quad (32)$$

式中： μ 为混凝土接触面摩擦系数，取0.55^[12]； G 为滑动支墩自重，kN； F_{as} 为抗滑移力，kN； F_s 为滑移力 F_2 ，kN； K_s 为抗滑移安全系数；钢筋混凝土容重取25kN/m³。

由此可得以下结果： $G = 25abh \times 10^{-9} = 4.02 \text{ kN}$ ； $F_{as} = 47.412 \text{ kN}$ ； $F_s = 25 \text{ kN}$ ； $K_s = 1.705 > 1.3$ 。

因此，抗滑移验算满足要求。

2.3.3 配筋设计

滑动支墩在管廊主体竣工后浇筑，从构造上看是与管廊主体脱开的，其主要承受管道竖向压力及较小的轴向推力即滑移力。因此，滑动支墩计算配筋不起控制作用，按构造配筋。滑动支墩按本文公式(15)及混规9.3.2条的要求进行配筋设计。因

此,配筋1与配筋2均采用5 Φ 16纵向钢筋即可满足正截面承载力的设计要求,配筋3配置 Φ 8@200四肢构造复合箍筋即可满足抗剪承载力设计要求。

3 结 语

随着城市地下综合管廊的建设,大量热力管道在综合管廊内敷设,管廊内热力管道支墩对管道有承载及限位等功能,对城市热力管网的稳定运行起到关键作用。本文对管廊内热力管道支墩的作用及工作原理进行了简述,针对当前该领域设计工作缺乏相关文献资料,需要深入分析研究设计方法以保证支墩的安全可靠的问题,对管廊内热力管道固定、导向及滑动支墩进行了受力分析,采用基于混凝土结构设计规范的设计方法对DN600热力管道的3类支墩进行分析与设计,由本文的算例结果可知该设计方法具有一定的可行性与可靠性,可为类似工程的设计及研究工作提供参考。

参考文献:

- [1] 张越. 热力管道直埋与综合管廊敷设方案的经济比较[J]. 煤气与热力,2017,37(6):14-17.
- [2] 刘敏. 供热管道固定支墩的设计[J]. 煤气与热力,2004(2):91-93.
- [3] 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.
- [4] 李留强,安兆静,李超. 直埋热网管道固定支墩设计分析[J]. 中国建筑金属结构,2013(20):214.
- [5] 朱闯. 直埋热力管道预制装配式固定支墩设计与计算探讨[J]. 区域供热,2021(1):154-158.
- [6] 戴超,张佩兰. 浅谈纳入热力管线的综合管廊设计要点[J]. 低碳世界,2018(2):182-183.
- [7] 杨洁. 热力管道入廊设计要点分析[J]. 建筑热能通风空调,2019,38(8):75-77.
- [8] 张玉成,董淑棉,刘仰鹏. 热力盾构隧道的结构研究与设计技术[J]. 特种结构,2018,35(3):41-48.
- [9] 混凝土结构通用规范:GB 55008—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [10] 混凝土结构设计规范(2015年版):GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [11] 符旭晨. 预埋件计算方法存在的问题及解决方法[J]. 工程建设与设计,2020(9):23-25.
- [12] 陈富强,田唯,刘占国,等. 匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J]. 中国港湾建设,2014(12):34-38.