



· 燃气输配与储运 ·

聚乙烯燃气管道水平定向钻最大穿越长度确定

石丹阳¹, 黄 颺², 王传惠², 陈景义², 刘 斌²

(1. 中裕(河南)能源控股有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 中裕城市能源投资控股(深圳)有限公司, 广东 深圳 518049)

摘 要: 针对 CJJ/T 250—2016《城镇燃气管道穿跨越工程技术规程》关于聚乙烯管材的拖拉长度不宜超过 300 m 的条文说明提出问题, 给出确定聚乙烯管道最大穿越长度的方法。根据不同管材力学性能参数的时间特性, 由初步设计穿越轨迹并校核长期运行变形及环向稳定, 再校核施工阶段轴向应力、变形及环向稳定, 最终确定最大穿越长度。算例在孔壁稳定、管道与孔壁摩擦系数保守取值、常见参数的前提下, 计算得到 SDR11、PE100、公称外径 400~90 mm 管道的最大穿越长度为 844.1~873.4 m, 回拖力为 295.7~15.5 kN。

关键词: 聚乙烯燃气管道; 水平定向钻; 最大穿越长度

中图分类号: TU996.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-4416(2021)03-0B10-06

1 问题的提出及聚乙烯管道特性分析

1.1 问题的提出

聚乙烯管道具有良好的耐腐蚀性、柔韧性及较好的耐快速、慢速裂纹扩展性能^[1], 大量应用于城镇燃气开挖敷设以及水平定向钻穿越工程中。相对于钢管, 聚乙烯管道强度较低, 穿越长度受限。CJJ/T 250—2016《城镇燃气管道穿跨越工程技术规程》(以下简称 CJJ/T 250—2016) 条文 4.3.3 提出水平定向钻穿越长度大于 300 m 时, 宜采用钢管。

① 对规程条文的探讨

CJJ/T 250—2016 条文 4.3.3 在规定穿越适宜长度时, 在条文说明中引用 CJJ 63—2008《聚乙烯燃气管道工程技术规程》6.2.7 条, 对应于 CJJ 63—2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》的 6.3.5 条, 但拖管法埋地敷设管道是否等同于水平定向钻穿越敷设管道, 不够清晰。同时引用 CJJ/T 147—2010《城镇燃气管道非开挖修复更新工程技术规程》条文 3.2.1, 条文 3.2.1 对不同修复更新工艺分段施工最大适宜长度进行了规定, 其中部分修复工艺会

用到将聚乙烯管道拖拉进入在役管道的方法, 拖拉聚乙烯管道进入在役管道的规定长度能否作为水平定向钻长度的参考, 也有待探讨。

CJJ/T 250—2016 未给出最大穿越长度的计算方法, 引用的其他标准条文, 未明确对应于水平定向钻敷设聚乙烯管道。

② 与工程实践的切合度

在工程实践中, 由于穿越地段的条件限制, 部分水平定向钻穿越需要一次性穿越敷设管道长度超出 300 m。考虑到钢管的施工期长、难度大以及施工空间有限等, 一些实际工程采用聚乙烯燃气管道穿越长度达 500 m 以上, 且运行良好。国外也有大量的大穿越长度聚乙烯管道工程实例, 部分实例见表 1^[2]。文献[2]认为 HDPE(高密度聚乙烯)管道最大穿越长度理论计算值可超过 1 609.3 m。

因此有必要对该问题进行深入探讨, 提出量化的计算方法, 较合理地确定最大穿越长度。需要说明的是, 本文中穿越长度均指不采用配重减浮等措施的管道本身穿越长度; 为简化行文, 除对 PE100、

第一作者简介: 石丹阳, 男, 工程师, 硕士, 从事燃气工程技术及管理工作。

收稿日期: 2020-02-05; 修回日期: 2020-08-21

表 1 部分国外聚乙烯管道大穿越长度工程实例

工程地点	外直径/mm	SDR	穿越长度/m
美国印第安纳州 Fort Wayne	152.4、203.2	—	1 127.8
美国圣地亚哥港	203.2	—	944.8
美国佛罗里达州 Matanzas 河	406.4	—	1 036.3
美国南加州查尔斯顿	457.2	11.0	1 066.8
英国 Kinml 海滩	711.2	13.6	1 432.6
美国加利福尼亚 Indio	1 371.0	21.0	426.0

PE80 管材对比部分外,计算均采用 PE100、SDR11 规格管道,PE100 管道一般为 HDPE 管道,PE80 管道一般为 MDPE(中密度聚乙烯)管道;计算均以孔壁稳定为前提,安全拉应力的取值已经考虑不可预见因素的影响。

1.2 聚乙烯管道特性

确定最大穿越长度的原则是,施工及运行阶段管道的结构计算均在安全范围内。城镇燃气聚乙烯管道定向钻穿越,一般用于中压及以下压力级别,穿越较深,应主要分析轴向应力、管道竖向变形、环向稳定性等结构计算。常温下不同于钢管在使用期限内各项性能指标保持不变,聚乙烯材料存在蠕变与应力松弛特性^[1],随着时间增加,管道的拉伸屈服强度与弹性模量降低,泊松比上升,计算必须考虑不同作用时间对应的材料特性。

ASTM(美国材料实验协会)标准 F1962 - 11 《Standard Guide for Use of Maxi—Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles》(《大型水平定向钻穿越工程敷设聚乙烯管道指引标准》,1999 年出版,2011 年修订,以下简称 F1962 - 11),给出了 22.7 °C 下聚乙烯管道在不同的作用时间内,典型的安全拉应力、弹性模量、泊松比,分别见表 2 ~ 4。

表 2 F1962 - 11 给出的 22.7 °C 下聚乙烯管道的安全拉应力

作用时间 /h	HDPE 管道的安全拉应力/MPa	MDPE 管道的安全拉应力/MPa
0.5	9.0	6.9
1.0	8.3	6.2
12.0	7.9	5.9
24.0	7.6	5.5

表 3 F1962 - 11 给出的 22.7 °C 下聚乙烯管道的弹性模量

作用时间	HDPE 管道的弹性模量/MPa	MDPE 管道的弹性模量/MPa
短期	800	600
10 h	400	300
100 h	350	250
50 a	200	150

表 4 F1962 - 11 给出的 22.7 °C 下聚乙烯管道的泊松比

作用时间	泊松比
短期	0.35
长期	0.45

2 最大穿越长度的确定方法

2.1 轨迹设计计算

① 初步设计穿越轨迹

典型的定向钻导向孔轨迹见图 1,回拖管道与导向孔方向相反。本文定向钻轨迹计算采用 CECS 382—2014《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(以下简称 CECS 382—2014)中 5.3.9 计算公式。

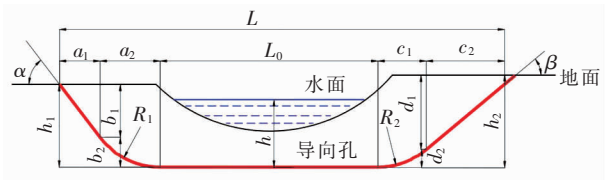


图 1 典型的定向钻导向孔轨迹

$$a_2 = R_1 \sin \alpha \tag{1}$$

$$b_2 = R_1 (1 - \cos \alpha) \tag{2}$$

$$b_1 = h_1 - b_2 \tag{3}$$

$$a_1 = \frac{b_1}{\tan \alpha} \tag{4}$$

$$c_1 = R_2 \sin \beta \tag{5}$$

$$d_2 = R_2 (1 - \cos \beta) \tag{6}$$

$$d_1 = h_2 - d_2 \tag{7}$$

$$c_2 = \frac{d_1}{\tan \beta} \tag{8}$$

$$L = a_1 + a_2 + L_0 + c_1 + c_2 \tag{9}$$

式中 a_2 、 c_1 ——导向钻入土、出土端曲线段水平长度, m

R_1 、 R_2 ——导向钻入土、出土端曲率半径, m

α 、 β ——导向钻入土、出土角, rad, 对应回拖管道出土、入土角

b_2, d_2 ——导向钻入土、出土端曲线段高度, m
 b_1, d_1 ——导向钻入土、出土端直线段高度, m
 h_1, h_2 ——入土、出土端地面距轨迹底部直线段的高度, m
 a_1, c_2 ——导向钻入土、出土直线段水平长度, m
 L ——穿越总长度, m
 L_0 ——轨迹底部水平段长度, m

穿越轨迹直接反映穿越长度, 其与结构计算的关系有:

a. 若穿越深度位于水位线以下, 应校核长期液位静压力对管道变形及环向稳定的影响。

b. 穿越长度、深度、出入土角度、曲率半径, 决定了管道回拖力与弯曲段的弯曲应力计算, 是强度校核的重点内容。

c. 钻孔泥浆产生液体静压, 及回拖阶段轴向拉应力对环向稳定临界压力的折减效应, 是影响回拖管道变形与环向稳定的主要因素。

轨迹设计应综合考虑地质水文条件、施工空间、地下管线、敷设管道种类、设计深度、钻机特性等因素, 具体可参见相关论述^{[3]8-11}以及 CECS 382—2014 中的 5.3 节。轨迹水平面投影长度与实际轨迹长度相差微小, CECS 382—2014 中 5.3 节、F1962—11 中第 3 章以及 PPI (美国塑料管研究所) 标准《Guidelines for Use of Mini - Horizontal Directional Drilling for Placement of High Density Polyethylene Pipe》TR46 - 2009 (《小型水平定向钻敷设高密度聚乙烯管道指引标准》, 以下简称 TR46 - 2009) 附录 C 中, 均采用了水平投影长度进行计算。不同标准对出入土角度、曲率半径规定见表 5, 表 5 中 D 指管道外径, 单位为 m。

表 5 不同标准对出入土角度、曲率半径的规定

标准编号	入土角 / (°)	出土角 / (°)	$D < 0.4$ m 时曲率半径	$0.4 \text{ m} \leq D < 0.8$ m 时曲率半径	$D \geq 0.8$ m 时曲率半径
CECS 382—2014	8 ~ 30	4 ~ 20	不小于 1 200 倍钻杆外径	不小于 250D	不小于 300D
CJJ/T 250—2016	8 ~ 18	4 ~ 12	不小于 500D		

本文曲率半径取 500D 且不小于 1 200 倍钻杆外径, 导向钻入土角取 8° ~ 18°、出土角取 4° ~ 12°。

② 最大水位线下深度校核

最小穿越深度可参考 CJJ/T 250—2016 中 4.2.3 条、CECS 382—2014 中 5.3.7 条及文献[4]。

a. 管道变形量校核计算

根据 F1962 - 11 并参考相关专著^{[3]124}及计算, 对长期运行在水位下管道变形起决定影响的是液体静压。管道受到的外部净压力计算公式为:

$$p_e = \gamma_m h - p_{in} \quad (10)$$

式中 p_e ——管道受到的外部净压力, kPa

γ_m ——钻孔泥浆的容重 (出于安全取钻孔泥浆的), kN/m^3 , 取 12 kN/m^3

h ——水位线至轨迹水平段的高度, m

p_{in} ——管道最低运行压力, kPa

运行期间, 由外部净压力产生的管道环向变形与外直径的比值 (称为管道长期变形比) 计算公式为^{[3]127}:

$$\lambda_1 = \frac{0.0125 p_e}{1000 E_1} \cdot \frac{1}{12(S-1)^3} \quad (11)$$

式中 λ_1 ——管道长期变形比

E_1 ——管道长期弹性模量, MPa, 按表 3 中 50 a 对应的值取, 即 200 MPa

S ——管道外径与壁厚比, 为 11

根据 F1962 - 11 并参考 CJJ 101—2016《埋地塑料给水管道工程技术规程》中 4.4.12 条, 管道长期变形比控制在 5% 以内。经计算在内压 0 kPa 的情况下, h 应不大于 5.6 m; 在内压 50 kPa 的情况下, h 应不大于 9.7 m, 管道保持一定的内压, 有助于减小变形量。

b. 管道稳定性校核计算

管道在内外荷载下的环向稳定临界净压力^{[3]127}计算公式为:

$$p_{ul} = \frac{2000 E_1}{1 - \mu_1^2} \left(\frac{1}{S-1} \right)^3 \frac{f_0}{N} \quad (12)$$

式中 p_{ul} ——维持管道环向稳定的临界净压力, kPa

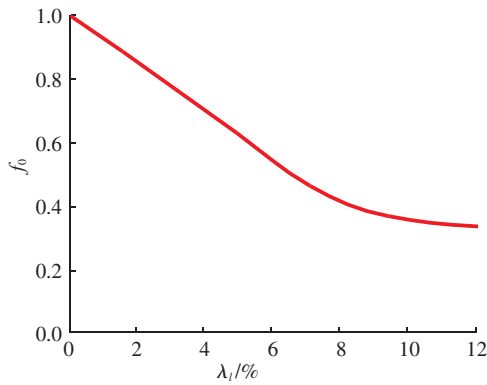
μ_1 ——长期泊松比, 取 0.45

f_0 ——由变形量引入的修正系数

N ——安全系数, 一般取 2

f_0 的取值可在 F1962 - 11 中 8.2.4.2 款及相关文献^{[3]127}查线图 (见图 2) 求得, 在 λ_1 不大于 0.07 的区间, f_0 与 λ_1 近似为线性关系, 公式为:

$$f_0 = 1 - 8\lambda_1 \quad (13)$$

图2 F1962-11中 f_0 与 λ_1 的对应线图

管道受到的长期外部净压力不应大于临界压力。通过计算得知,在临界长期变形比5%时, p_{ul} 为149.7 kPa,当内压为50 kPa时,高于相应的外部净压力。因此水位线下9.7 m以内的聚乙烯管道不存在变形及环向失稳风险。若水位线下深度增加,则需要增大管道壁厚、控制内压及考虑采用钢管等。

2.2 回拖阶段轴向应力校核计算

在施工回拖阶段,管道同时受到钻杆回拖力、流体阻力以及弯曲段的弯曲力,在弯曲段外侧叠加形成轴向拉应力,整个穿越管道的轴向拉应力不应大于允许安全拉应力。回拖应力占主要部分,最大值位于管道与钻杆的连接处。

根据经验,一般900 m范围内的PE管道定向钻回拖时间在24 h内。

① 回拖力计算

回拖力计算有多种方法^[5]。明确适用于聚乙烯管道回拖力计算的有F1962-11中8.2.5.1款、TR46-2009中附录C、CECS 382-2014中5.4.3条和相关专著^{[3]104},均采用了一致的回拖力计算方法(该方法在回拖力计算时不考虑管道受到的流体阻力)。该方法考虑的影响因素较全面,所建计算模型与实际较符合。该方法采用曲线段一直线段一曲线段来简化实际穿越轨迹,见图3。

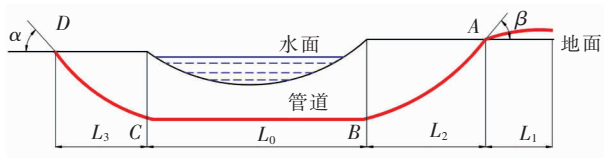


图3 回拖管道简化轨迹

图中 L_3 ——曲线段CD对应的水平长度,m

L_2 ——曲线段AB对应的水平长度,m

L_1 ——管道连接与收缩额外需要的长度,一般取穿越长度的3%左右,m

简化后穿越长度计算公式为:

$$L = L_3 + L_0 + L_2 \quad (14)$$

$$L_3 = a_1 + a_2$$

$$L_2 = c_1 + c_2$$

对管道回拖首端按照时间顺序分别经过点A、B、C、D时的回拖力,采用指数因子迭代计算^{[3]104}:

$$F_A = \exp(\mu_a \beta) [\mu_a W_a (L_1 + L_2 + L_0 + L_3)] \quad (15)$$

$$F_B = \exp(\mu_b \beta) [F_A + \mu_b |W_b| L_2 + W_b h_2 - \mu_a W_a L_2 \exp(\mu_a \beta)] \quad (16)$$

$$F_C = F_B + \mu_b |W_b| L_0 - \exp(\mu_b \beta) \cdot [\mu_a W_a L_0 \exp(\mu_a \beta)] \quad (17)$$

$$F_D = \exp(\mu_a \alpha) \{ F_C + \mu_b |W_b| L_3 - W_b h_1 - \exp(\mu_b \beta) [\mu_a W_a L_3 \exp(\mu_a \beta)] \} \quad (18)$$

式中 F_A 、 F_B 、 F_C 、 F_D ——管道首端经过点A、B、C、D时的回拖力,kN

μ_a ——管道与地面的摩擦系数,管道与地面间无措施时 μ_a 取0.5,采用滚轮时 μ_a 取0.1

W_a ——单位管长的重力,kN/m

μ_b ——管道与孔壁的摩擦系数,取0.1~0.3

W_b ——单位管长重力方向合力,kN/m

$$W_a = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma_p \quad (19)$$

式中 d ——管道内直径,m

γ_p ——聚乙烯管道的容重,kN/m³,取9.55 kN/m³

$$W_b = \frac{\pi D^2}{4} \gamma_m - W_a \quad (20)$$

② 流体阻力

在回拖过程中,管道受到泥浆压力而产生阻力^{[3]106},计算公式为:

$$\Delta F = \Delta p \frac{\pi}{8} (D_h^2 - D^2) \quad (21)$$

式中 ΔF ——管道受到的流体阻力,kN

Δp ——管道回拖受到的流体压力,kPa,取90 kPa

D_h ——钻孔直径,m,据经验取1.2D~1.5D,本文取1.5D

回拖力及流体阻力产生的应力组合计算公式

为:

$$\sigma_i = \frac{4}{1\,000\pi(D^2 - d^2)}(F_i + \Delta F) = \frac{4F_i}{1\,000\pi(D^2 - d^2)} + 0.17 \quad (22)$$

式中 σ_i ——回拖力及流体阻力产生的应力组合, MPa
 F_i ——管道首端经过点 i 处的回拖力, i 为 A、B、C 或 D

③ 弯曲应力

简化后的回拖轨迹, 两端曲线段的平均曲率半径^{[3]142}计算公式为:

$$\rho = 2 \frac{h'}{\theta^2} \quad (23)$$

式中 ρ ——管道简化入土、出土曲线段平均曲率半径, m
 h' ——管道入土、出土曲线段深度, 对应 h_2 、 h_1 , m
 θ ——管道入土、出土角度, 入土角度为 β , 出土角度为 α , rad

弯曲应力计算公式为^{[3]143}:

$$\sigma_{ai} = \frac{E_{sw} D}{2\rho} = \frac{E_{sw} D \theta^2}{4h'} \quad (24)$$

式中 σ_{ai} ——弯曲应力, MPa
 E_{sw} ——计算弯曲应力弹性模量, MPa, 为增加计算安全余量, 取表 3 中的短期数值, 即 800 MPa

可见弯曲应力是由外直径、出入土角度、穿越深度等轨迹参数决定。

④ 组合轴向应力及校核计算

在管道弯曲部位外侧形成的组合轴向应力, 不应大于安全拉应力:

$$\sigma_{pi} = \sigma_i + \sigma_{ai} = \frac{4F_i}{1\,000\pi(D^2 - d^2)} + 0.17 + \frac{E_{sw} D \theta^2}{4h'} \leq \sigma_{SPS} \quad (25)$$

式中 σ_{pi} ——组合轴向应力, MPa
 σ_{SPS} ——安全拉应力, MPa, PE100 取 24 h 的值, 为 7.6 MPa

2.3 回拖阶段管道变形及稳定性计算

① 管道变形

回拖期间, 由外部净压力产生的管道环向变形

与外直径的比值(称为管道短期变形比)计算公式^{[3]127}:

$$\lambda_s = \frac{0.0125p_e}{\frac{1\,000E_{sb}}{12(S-1)^3}} \quad (26)$$

式中 λ_s ——管道短期变形比
 E_{sb} ——计算变形量弹性模量, MPa, 取表 3 中 100 h 对应的数值, 即 350 MPa

该阶段在内压 0 kPa 的情况下, 若控制短期变形比 5%, PE100 管道距离地面的最大深度不应大于 9.8 m, 此时管道受到的外部净压力为 116.7 kPa。

② 稳定性校核

管道在回拖阶段由于轴向拉应力的产生, 临界环向失稳压力会有所折减。具体计算按文献[3]第 145 页公式为:

$$p_{ua} = \frac{2\,000E_{sb}}{1-\nu_s^2} \left(\frac{1}{S-1} \right)^3 \frac{f_0}{N} f_R \quad (27)$$

式中 p_{ua} ——管道回拖阶段折减后的临界环向失稳压力, kPa
 ν_s ——管道短期泊松比, 取 0.35
 f_R ——临界安全失稳压力折减系数

$$f_R = \sqrt{5.57 - \left(\frac{\sigma_{pi}}{2\sigma_{SPS}} + 1.09 \right)^2} - 1.09 \quad (28)$$

若短期变形比为 5%, 取最大轴向应力 $\sigma_{pi} = \sigma_{SPS}$, 则 f_R 最小值为 0.654, 计算 p_{ua} 为 164.3 kPa, 大于外部净压力 134.4 kPa。即施工阶段控制管道距离地面的最大深度在 9.8 m 内, 可同时满足变形及环向稳定要求。

由此可见, 无论运行期还是施工期, 控制管道变形的深度条件比控制环向稳定要严格。根据经验, 运行后管内压力增加, 可一定程度减小管道变形。

3 算例及分析

根据以上分析, 运行压力 50 kPa, 设计轨迹深度 9.8 m 内且水位线下深度 9.7 m 内, 不需要进行变形及失稳校核, 一般工程都能够满足这一条件。算例基本参数(见表 6)为常用值, 为便于分析, 出入土角度、深度、曲率半径按表 6 取值。

对不同管径管道, 以组合轴向应力达到安全拉应力 7.6 MPa 时的穿越长度作为最大穿越长度。根据表 6 的基本参数, 对于公称外径 90 ~ 400 mm 规格的管道, 根据公式(1) ~ (9) 计算轨迹, 根据公式(14) ~ (28) 计算校核安全拉应力, 计算最大穿越

长度,回拖长度及对应的回拖力见图4。

表6 算例基本参数

h_1/m	5
h_2/m	5
R_1	500D 且不小于1 200 倍钻杆直径
R_2	500D 且不小于1 200 倍钻杆直径
$\alpha/(\circ)$	8
$\beta/(\circ)$	8
μ_a	0.1
μ_b	0.3
钻杆直径/m	0.073
σ_{SPS}/MPa	7.6

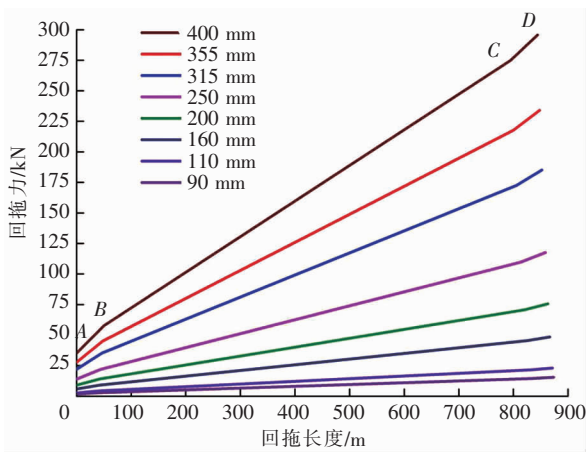


图4 回拖长度与回拖力的关系

① 在管道水平段距地面深度、出入土角度、摩擦系数等参数一致条件下,不同管径管道最大穿越长度为844.1~873.4 m,相差不大,且随管径减小穿越长度略有增加。

② 随回拖长度增加,回拖力逐渐增大,且管径越大最终回拖力增加幅度越明显。最大回拖力出现在点D即回拖结束时。

③ 不同管径管道最大穿越长度相差不大时,但最大回拖力相差很大。de 400 mm 管道最大穿越长度为844.1 m,最大回拖力295.7 kN,而de 90 mm 管道最大穿越长度为873.4 m,最大回拖力只有15.5 kN。

4 结论

针对CJJ/T 250—2016《城镇燃气管道穿跨越工程技术规程》关于聚乙烯管材的拖拉长度不宜超过300 m的条文说明提出问题,给出确定聚乙烯管道最大穿越长度的方法。根据不同管材力学性能参数的时间特性,由初步设计穿越轨迹并校核长期运行变形及环向稳定,再校核施工阶段轴向应力、变形及环向稳定,最终确定最大穿越长度。算例在孔壁稳定、管道与孔壁摩擦系数保守取值、常见参数的前提下,计算得到SDR11、PE100、公称外径400~90 mm管道的最大穿越长度为844.1~873.4 m,回拖力为295.7~15.5 kN。

参考文献:

- [1] 孙中飞,蔡美婷,宋晞明,等. 钢管和聚乙烯管应用于水平定向钻穿越的比较[J]. 煤气与热力,2012(7): A32-A35.
- [2] PETROFFL J. 苏波,译. ASTM F1962—定向钻进铺设聚乙烯管道设计指南简介[J]. 非开挖技术,2010(1):1-7.
- [3] 曾聪,马保松. 水平定向钻理论与技术[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2015.
- [4] 杨罗,张海宁,徐方. 城镇燃气管道水平定向钻穿越河流最小埋深[J]. 煤气与热力,2018(4):B01-B04.
- [5] 陈曦. 定向钻回拖过程力学分析(硕士学位论文)[D]. 西安:西安石油大学,2015:13-21,62-71.

(本文责任编辑:林国真)

国情数据:截至2019年底,北方地区清洁取暖面积达 $116 \times 10^8 \text{ m}^2$,比2016年增加 $51 \times 10^8 \text{ m}^2$ 。