

交通荷载作用下聚乙烯（PE）燃气管道的应力和稳定性分析

□ 北京市公用工程设计监理公司（100026）张雷 张诚

□ 佛山市高压管网公司（500028）李建军

摘要：近年来，聚乙烯（PE）管道在城镇燃气行业得到了越来越广泛的应用，特别是2008版《聚乙烯燃气管道技术规程》大幅度提高了PE管的最大工作压力、管道直径范围，更有力的拓展了PE管的应用前景。但是，由于PE管管材的柔性特征，人们对其在交通荷载作用下的安全性能仍心存疑虑。本文介绍了PE管的应力和稳定性分析方法，并对一些在交通荷载作用下的管道示例进行了应力和稳定性推导，以说明PE管只要措施得当，使用在车行道下能够确保其安全性。

关键词：聚乙烯（PE）燃气管道 应力 稳定性

近年来，聚乙烯管（以下简称PE管）已经越来越普遍地应用中低压燃气输配工程中，这与它所具备的耐腐蚀、连接可靠、管材廉价和施工简便等卓越性能是分不开的。但是同时，由于PE管管材的柔性特征，人们对它的安全可靠性也产生了一系列的疑问，其中一个重要问题就是PE管到底可不可以敷设在承受频繁交通荷载的车行道路下。并且，在市域内部的中低压燃气输配工程中，由于现场障碍繁多，各类地下管线密集，燃气管道又经常被敷设在车行道路下。于是，这一问题是否能得到满意解答对PE管更广泛的使用就具有了现实意义。

虽然在《聚乙烯燃气管道技术规程》CJJ63-2008中并没有对PE管的应力和稳定性分析作出详细规定，但实际上，这一问题的理论体系是较为完备的。下面本文就结合国内外相关规范的规定，对PE管的应力和稳定性分析理论进行介绍，并对一些案例进行试算，以证明只要措施得当，PE管敷设在车行道路下能够确保安全。

1 交通荷载的选用

首先，我们必须确定路面交通荷载对PE管的作

用数值。从公路桥涵有关规范中可以查出，我国汽车车辆荷载计算图式最大轮压为 $7 \times 10^4 \text{N}$ ，可采用布辛尼斯克点荷载公式，求得轮压传递到管顶处的竖向压力标准值如下：

$$q_{vk} = 0.4775 \times \frac{\mu_d \times Q_{v,k}}{H^2} \quad (\text{式1-1})$$

q_{vk} ——轮压传递到管顶处的竖向压力标准值（ N/mm^2 ）；

$Q_{v,k}$ ——汽车车辆荷载计算图式最大轮压，取 $7 \times 10^4 \text{N}$ ；

H ——覆土厚度（ mm ）；

μ_d ——动力系数，按表1选取；

表1 动力系数 μ_d

覆土厚度（m）	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	≥ 0.70
动力系数 μ_d	1.30	1.25	1.20	1.15	1.05	1.00

需要解释的是，动力系数是对汽车荷载冲击性质的简化模拟，它存在的结果是传递到管顶处的竖向压力被放大。但是，当覆土厚度加大时，这种影响会逐步减小甚至可以不予考虑，这也是《聚乙烯燃气管道

技术规程》要求车行道下PE管埋深不得小于0.90m的原因之一。与此同时,我们也不能忽略覆土荷载对PE管的作用,其值按下式计算:

$$q_{sk} = C_s \gamma_s H \quad (\text{式1-2})$$

q_{sk} ——覆土传递到管顶处的竖向压力标准值(N/mm²);

C_s ——开槽施工土压力系数,取1.2;

γ_s ——覆土的重力密度,取 1.8×10^{-5} N/mm³;

2 交通荷载作用下PE管的应力分析

由于燃气PE管的管径最大不过630mm,覆土也不很厚,外压(汽车轮压和覆土土压)产生的环向弯曲应力微乎其微,不必考虑它的组合作用,只要按下式核算由内压产生的环向应力即可:

$$\sigma_h = \frac{P(d_n - e_n)}{2e_n} \leq \frac{(MRS)}{C} \quad (\text{式2-1})$$

σ_h ——由内压产生的最大环向应力(MPa);

P ——工作压力(MPa);

d_n ——PE管的公称外径(mm);

e_n ——PE管的公称壁厚(mm);

MRS ——最小要求强度(MPa);

C ——总体使用(设计)系数,取2;

《聚乙烯燃气管道技术规程》中的最大允许工作压力就是按上式的变形式求出的。可以说,有无交通荷载对PE管截面应力大小并无多大影响。但与此同时,交通荷载对PE管的稳定性却有至关重要的影响。PE管有可能在交通荷载作用下环向失稳和竖向变形过大。

3 交通荷载作用下PE管的稳定性分析

3.1 交通荷载作用下PE管的环向稳定性分析

所谓环向失稳,是指在外压作用下,PE管的环截面受压屈服。它以空管时为最不利工况,以下的分析方法均以此为条件。目前,国内外的环向失稳计算一般采用藤田博爱的模型。有如下式:

$$F_{cv,k} \geq K_s (q_{vk} + q_{sk} + F_{Ak}) \quad (\text{式3-1})$$

其中,

$$F_{cv,k} = \frac{2E_p(n^2-1)}{3(1-\nu_p^2)} \left(\frac{e_n}{d_n-e_n}\right)^3 + \frac{E_d}{2(n^2-1)(1+\nu_s)} \quad (\text{式3-2})$$

$F_{cv,k}$ ——PE管管壁截面的临界应力标准值(N/mm²);

K_s ——截面稳定安全系数;

F_{Ak} ——PE管管内真空压力,可取0.05 MPa;

E_p ——PE管材的弹性模量,PE80管材为750MPa~850MPa,PE100管材为900MPa;

ν_p ——PE管材的泊松比,取0.4;

E_d ——管侧土的综合变形模量(MPa);

ν_p ——管两侧胸腔回填土的泊松比;

n ——管壁失稳时的褶皱波数,其值应使 $F_{cv,k}$ 最小,且为不小于2的整数;

从式3.2可以看出,管壁截面的临界应力可以考虑管周土的有利影响。但对燃气PE管来说,这种影响不会超过临界应力的5%,予以忽略。此时,只有 n 取2才能使 $F_{cv,k}$ 最小。于是,式3-2可以简化为下式:

$$F_{cv,k} = \frac{2E_p}{(1-\nu_p^2)} \left(\frac{e_n}{d_n-e_n}\right)^3 \quad (\text{式3-3})$$

燃气PE管从低到高有PE80、PE100两档管材,从薄到厚又分别有SDR17.6、SDR11两档壁厚。我们选取一部分PE80、SDR17.6管材的PE管,计算其环向稳定如表2。按照给水专业的规定,稳定安全系数小于2时,管道环向稳定性属于不合格。从表2可以看出,当覆土厚度为0.5m时,稳定安全系数仅约为1.85。而覆土厚度增至0.9m时,稳定安全系数可以达到3.5,这再次说明了保证PE管覆土厚度的重要性。当施工现场确实有困难时,一定要采取加强措施,如砌保护沟等。同时也可以这样说,只要符合《聚乙烯燃气管道技术规程》中的最小覆土厚度要求,PE管的环向稳定性是有保障的。

3.2 交通荷载作用下PE管的竖向变形分析

控制竖向变形的目的是保证PE管正常工作,而不被压扁。目前普遍的认识是,在外压的作用下PE管的竖向变形不应大于管外径的5%。竖向变形的计算一般采用Spangler的IOWA公式:

$$\Delta x = \frac{ZS(d_n - e_n)^3(q_{sk}d_n + q_{vk}d_n)}{8E_pI_p + 0.061E_d(d_n - e_n)^3} \quad (\text{式3-4})$$

Δx ——PE管在外压作用下竖向变形量(mm);

Z ——PE管的变形滞后系数,取1.5;

S ——基床系数,素土平基取0.108;

表2 交通荷载作用下PE管的环向稳定

PE管规格 $d_n \times e_n$	截面临界应力标准 $F_{cr, k}$ (MPa)	$q_{vk} + q_{sk} + F_{Ak}$ (MPa)		
		覆土厚度 500mm	覆土厚度 900mm	覆土厚度 1200mm
110 × 6.3	0.400	0.215	0.111	0.990
200 × 11.4	0.394			
315 × 17.9	0.391			
400 × 22.8	0.394			
500 × 28.4	0.390			
630 × 35.8	0.391			
稳定安全系数 K_s		1.81 ~ 1.86	3.51 ~ 3.60	3.94 ~ 4.04

表3 交通荷载作用下PE管的竖向变形

PE管规格 $d_n \times e_n$	竖向变形 Δx (mm)			变形限值 $[\Delta x]$ (mm)
	覆土厚度 500mm	覆土厚度 900mm	覆土厚度 1200mm	
110 × 6.3	17.0	6.3	5.1	5.5
200 × 11.4	31.1	11.5	9.3	10.0
315 × 17.9	49.4	18.2	14.7	15.8
400 × 22.8	62.3	23.0	18.6	20.0
500 × 28.4	78.4	28.9	23.4	25.0
630 × 35.8	98.7	36.4	29.4	31.5

I_p ——单位管长的截面惯性矩 (mm^4/mm)， $I_p = \frac{e_n^3}{12}$ ；
 E_d ——按素粘土，取1.0MPa；

对式3-4需要说明的是，汽车荷载并非不间断地作用在管道上，在变形计算时应该可以考虑乘以准永久值系数予以折减，本式未予折减是遵从了长输管道的有关规定。我们仍以表2所列规格的PE管为例，计算变形如表3。从结果看，控制竖向变形远比控制稳定性要难。如表中规格管，即使覆土厚度达到0.9m仍不满足要求，尚须考虑加大壁厚到SDR11或改用PE100管材。而覆土厚度加大到1.2m时，不论采用何种管材竖向变形均能完全满足要求。

4 结束语

通过以上分析，不难得出以下几点结论：

(1) 交通荷载的存在，并不能够引起PE管截面应力的显著变化。

(2) 我们分析重点应是PE管的环向稳定和竖向变形，尤其是竖向变形。

(3) 在交通荷载作用下，保证PE管的覆土厚度

不小于0.9m是关键措施，并应适当加厚。当采用0.9m时，以加大PE管壁厚或改善管材为宜。

(4) 本文所采用的分析方法是国际上比较通用的分析方法。国内给排水行业也广泛使用PE管材，应力和稳定性分析亦不外乎以上之方法。所以，只要注意以上几点，在车行道路下采用燃气PE管，安全是有保证的。

参考文献

- 1 输气管道工程设计规范GB50251-2003. 北京：中国计划出版社，2003
- 2 埋地聚乙烯给水管道工程技术规程CJJ101-2004. 北京：中国建筑工业出版社，2004
- 3 埋地聚乙烯排水管道工程技术规程CECS164：2004. 北京：中国标准化协会，2004
- 4 埋地输油输气钢管道结构设计规范CECS15：90. 北京：中国标准化协会，1990
- 5 张少禹. 消防用埋地PE供水管的变形计算. 消防科学与技术，2007；26（1）：75-76