

# 聚酰胺 12 管道性能研究与应用<sup>1</sup>

郑彬

赢创特种化学（上海）有限公司

**摘要：**作为一种经济有效的管线铺设和修复解决方案，非开挖技术随着中国城市建设和油气开发，已经得到了长足的发展，在燃气管道、给排水管道、化工管道、热力管道、石油管道及其它地下工业管道等领域得到广泛应用。非开挖技术中应用的各种材质的管道耐腐蚀性，抗压抗拉性能即强度等性能各不相同，使得在实际的应用中必须依据各自的特点进行选择和施工。聚酰胺 12 (PA12) 管道为非开挖技术的选材提供了一个创新性的选择，其性能在一定程度上结合了金属管道的刚性和塑料管道的柔韧性。PA12 管道在燃气管道水平定向钻进施工和内衬修复应用中的案例展示了其优异的力学性能和耐化学腐蚀性。PA12 管道的非开挖施工允许更高的拖拉力，更恶劣的地质条件和更加苛刻的流体输送环境。PA12 在世界范围内越来越多地应用于天然气管道的非开挖铺设和腐蚀性流体的内衬修复。

**关键词：**聚酰胺 12；非开挖技术；拖拉力；溶胀

## 1. 前言

随着日益增长的人口和日益密集的城市环境，中国亟需创新性的方法以敷设新管道和修复逐渐老化的地下管线。非开挖技术成为切实可行并且可持续性的解决方案<sup>[1]</sup>。非开挖铺管技术是 20 世纪末全球兴起的新技术方法。它以不污染环境、不影响交通、对地层结构破坏小、施工安全可靠、周期短、社会效益与经济效益显著等技术优势受到了国内外相关行业的关注<sup>[2]</sup>。自上世纪九十年代以来，非开挖技术伴随着中国城市建设的需求，得到了长足的发展。截止目前，在国内最为常用的非开挖技术包括水平定向钻进 (HDD)，顶管法，微型隧道法，碎管法以及夯管法<sup>[3]</sup>。非开挖内衬修复技术的主要应用领域包括燃气管道、给排水管道、化工管道、热力管道、石油管道及其它地下工业管道等<sup>[4]</sup>。

非开挖施工方法可分为三大类：铺设新的地下管线；在原位更换旧管道；修复现有管线的局部缺陷或改善其性能 [5]。而可用于上述方法的管道材料包括金属管道，混凝土以及各类塑料管道，尤其是聚乙烯 (PE) 和聚氯乙烯 (PVC)。对于不同材质的管道，其抗腐蚀性，抗压抗拉性，强度等性能各不相同。金属管道适用于对管道力学性能要求较高的情况，但金属管道由于地下温变、潮湿、不通风等条件，腐蚀较为严重。而非金属管道具有较好的柔韧性和耐腐蚀性，也可以降低施工的周期和费用 [6]，但抗拉性能较弱。如相关标准建议，PE 管材的拖拉长度不宜超过 300 米 [7]。随着非开挖技术的广泛应用，对能够兼具金属管道的刚性和传统塑料管道柔韧性的新型塑料管道的需求也日益迫切。

聚酰胺 12 (PA12, 尼龙 12) 自 2006 年作为非金属管道解决方案进入油气行业以来，已经有

作者简介：郑彬，男，硕士，长期从事 PA12 在油气工业中的应用研究。电子邮件：cliff.zheng@evonik.com.

上千公里使用 PA12 的柔性管投入运行 [8]。作为一种高性能聚合物，从 1970 年代开始，聚酰胺 12 已经被广泛地应用于汽车、电子和运动装备。现在聚酰胺 12 对机械应力、应力开裂和化学腐蚀的优异耐受性使得它的应用扩展到为海上和岸上油气管道提供保护。同样，PA12 管道在世界范围内也已经被应用于非开挖施工，用于次高压段（8-16 巴）的天然气管道和输送腐蚀性流体的金属管道内衬。与传统塑料管道相比，PA12 具有更好的耐化学腐蚀性，更低的气体渗透率，更高的抗拉抗压性能以及更优异的耐刮擦和耐裂纹扩展性能。上述性能使得在非开挖施工中，PA12 管道允许更长的拖拽距离，更大的许用拖拉力和更加苛刻的工况。

## 2. PA12 管道非开挖施工案例

### 2.1 PA12 燃气管道 HDD 施工

早在 2009 年，美国燃气技术协会（GTI）就通过一系列的实验室测试和实地试验，对 PA12 在高压燃气管道中的应用进行了验证。基于对 PA12 管道系统进行评估而获得的一系列良好结果，GTI 协助 Atmos Energy（美国密西西比州天然气输运供应商）计划铺设具有更高使用压力的商用 PA12 管道。

Atmos Energy 计划安装一条长约 450 米的 6 英寸（160 毫米）PA12 管道，最大操作压力 17 巴。该 PA12 管道与一条现存的 6 英寸不锈钢管道平行，这样 Atmos Energy 可以评估是否能用 PA12 管道替换操作压力达 17 巴的不锈钢管道。该管道的选址如图 1 所示。

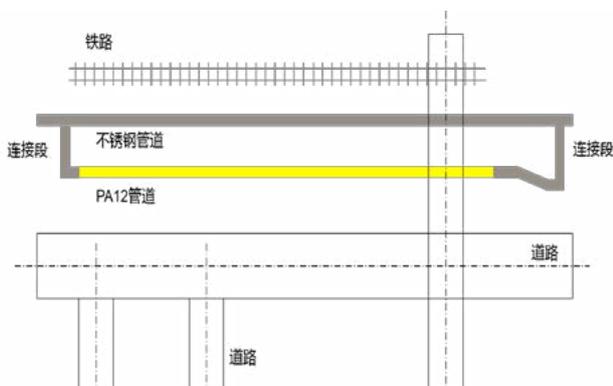


图 1 PA12 燃气管道铺设选址方案

由于 PA12 管道需要从地下穿过一条公路和排水管道，该段施工采用了水平定向钻进（HDD）技术。其余部分采用了开挖铺设的方案。图 2 展示了 PA12 管道水平定向钻进现场照片。



图 2 PA12 管道 HDD 施工现场

由于该段 HDD 施工长度约 450 米，施工方按照相关标准进行了核准并完善了施工流程，使得全段管道得以顺利拖出。

### 2.2 PA12 内衬修复 CO<sub>2</sub> 输送管道

墨西哥南部的韦拉克鲁斯州的一家生产尿素的工厂以二氧化碳（CO<sub>2</sub>）作为原料。其输送管道为金属管，经过长年的使用，金属管道面临着严重的内部和外部腐蚀，壁厚显著减小，穿孔的风险大大增加。所以该工厂计划修复该金属管道，但原管道有一段长约 800 米的管段位于一条

河流之下。重新挖出该管段然后铺设新管道面临着巨大的开支和后期维护成本。而如果选择使用HDPE进行穿插修复,则CO<sub>2</sub>的渗透则会迅速导致管壁间的气体积聚。

综合考虑PA12的耐化学腐蚀性,低气体渗透率和耐蠕变性能,工厂决定使用PA12管道对原金属管道进行修复。该管道修复和施工的现场如图3所示。



图3 PA12内衬修复管道施工现场

该项目也是首次PA12管道应用于大口径的管道修复,直径达到了18英寸(约460毫米)。我们的工业伙伴确定的修复方案采用带有纵向条纹的管道,以监测CO<sub>2</sub>的渗透。波纹状的内衬层和金属管道内壁之间存在空隙,这些空隙中保留着压力约为1巴的气体。当外层管道发生破损,管道两端的压力监测装置感知到压力损失,即可迅速确定泄漏点。

同时也利用PA12材料的塑性对可能的穿孔进行覆盖,形成了具有自适应性的“智能化”内衬层。如图4所示。在穿孔发生时,PA12内衬可发生有限的形变,将穿孔点完全覆盖,为后续的维修提供足够的时间。在此期间,金属管道仍旧不会发生严重的泄露和变形。

CAD的模拟计算表明,在28巴的压力下,对于直径18英寸的管道,PA12内衬层可以覆盖高达直径4英寸(约100毫米)的区域。这完全得益于PA12优异的耐蠕变性能。

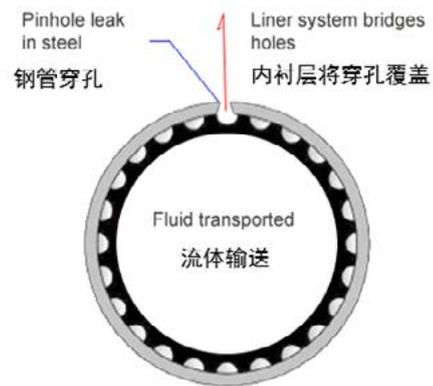
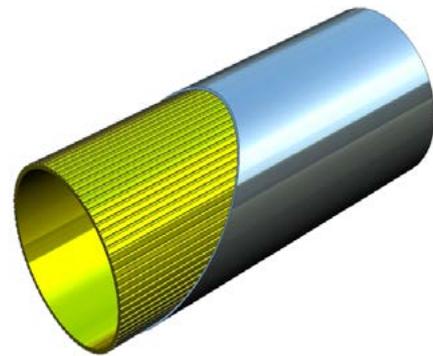


图4 自适应型内衬层示意图

### 3.PA12 性能分析

#### 3.1 非开挖施工中的耐刮擦性能

我们收集了不同非开挖施工应用场合下的PA12和PE管道,包括胀管施工和水平定向钻进施工。使用显微镜和扫描电镜观察经施工操作后的管道表面。经胀管操作后的管道表面比较如图5所示。

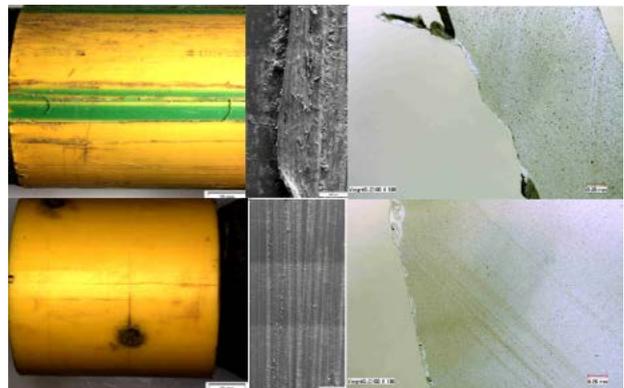


图5 经胀管施工后的PE和PA12管道表面形貌比较 (a为PE管道,b为PA12管道)

由于 PA12 具有完全不同的化学结构，PA12 管道表面硬度远高于 PE 管道，可达到邵氏 75。同时，PA12 由于具有较高的耐裂纹扩展性能，其表面耐刮擦的性能也好于传统的塑料管道。该管道在后续的耐压测试中也未发生失效。

PA12 的耐刮擦性能展示了其优异的耐第三方破坏性能的一部分。较高的耐刮擦和耐裂纹扩展性能使得 PA12 在非开挖施工中对施工现场和环境的条件具有更好的耐受度，也适用于部分工况较为恶劣的施工要求。

### 3.2 非开挖施工中的最大许用拖拉力

在国内的各项施工规范中，对非开挖施工中的最大许用拖拉力有着不同的计算方式<sup>[9][10]</sup>。美国塑料管道研究院（PPI）发布的 PE 管道手册使用了公式 1 来计算塑料管道在非开挖施工中所允许使用的最大拖拉力<sup>[11]</sup>。

$$F = \pi \times E \times \varepsilon \times F_s \times OD^2 \times \left( \frac{1}{DR} - \frac{1}{DR^2} \right) \quad (1)$$

其中，F 为最大拖拉力，E 为塑料材料拉伸模量， $\varepsilon$  为安全应变（通常为材料屈服应变的一半）， $F_s$  为安全系数，通常为 0.6，OD 为管道外径，DR 为管道尺寸比。

表 1 列出了 PA12 和 PE 材料的力学性能比较。可以看出 PA12 有着较高的拉伸模量和屈服应变。

表 1 PA12 和 PE 材料力学性能比较

力学性能	单位	PA12	PE
屈服应变	%	12	6
拉伸模量	MPa	1050	538

按照上述公式计算 PA12 管道和 PE 管道的许用最大拖拉力，如图 6 所示。上述计算中，PA12 许用最大拖拉力的计算使用了 PE 管道的较低的安全应变（3%），实际上，PA12 的安全应变可以是 PE 管道的 2 倍（即 6%）。即便如此，PA12 管道的许用最大拖拉力仍然远高于 PE 管道，接近后者的 2 倍。

较高的许用最大拖拉力为非开挖施工提供了更加宽松的施工窗口，同等长度的拖拉施工中，也具有更高的安全系数。这在面临着较长的穿越距离和施工周期等苛刻条件时显得尤为重要。

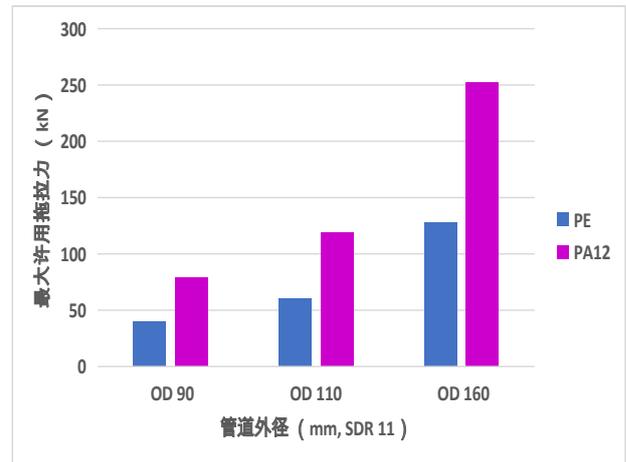


图 6 PA12 和 PE 管道许用最大拖拉力的比较

### 3.3 作为金属管道内衬的极限塌缩压力

塑料管道作为金属管道的内衬进行修复作业时，极限塌缩压力是一项衡量塑料管道长期性能的指标。在带有塑料内衬的金属管道中，管道内的流体分子会由于渗透作用进入金属和塑料管壁之间，积聚的流体在压力达到特定数值时，会将塑料内衬向内挤压，造成塌缩。这一特定数值即为极限塌缩压力。极限塌缩压力与材料的耐溶胀性能密切相关。

我们比较了 PA12 内衬和传统的内衬材料（PE）在高温原油中的溶胀效应。部分的测试结果如图 7 所示。由图可以看出，PA12 材料在远高于 PE 材料的老化温度下，仍然有着更好的耐溶胀性能，样条的质量变化率约在 3%，而 PE 材料达到了 8%（较低温度下）。

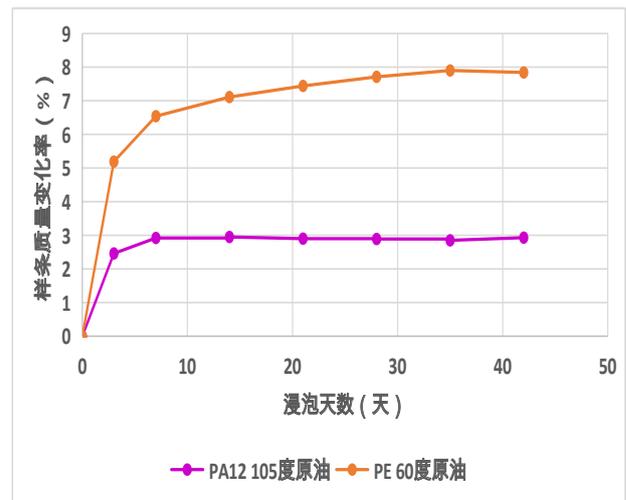


图 7 PA12 和 PE 材料在高温原油中浸泡后的质量变化率比较

根据上述的溶胀数据，我们计算了PA12内衬和内衬在高温原油流体中的极限塌缩压力。如图8所示。数据表明，在相同温度下，PA12内衬的极限塌缩压力超过PE内衬的两倍。即便是在较高的温度下，PA12内衬的极限塌缩压力仍旧高于PE内衬层。

优异的耐化学腐蚀性为PA12作为内衬修复油气工业管道提供了广阔的空间。在更高的工作温度和工作压力下，PA12内衬层能够为金属管道提供更加安全可靠的保护和更加持久的寿命。这一点，已经通过PA12在海洋柔性立管和增强热塑性复合管道(RTP)中的应用得到了很好的证明。

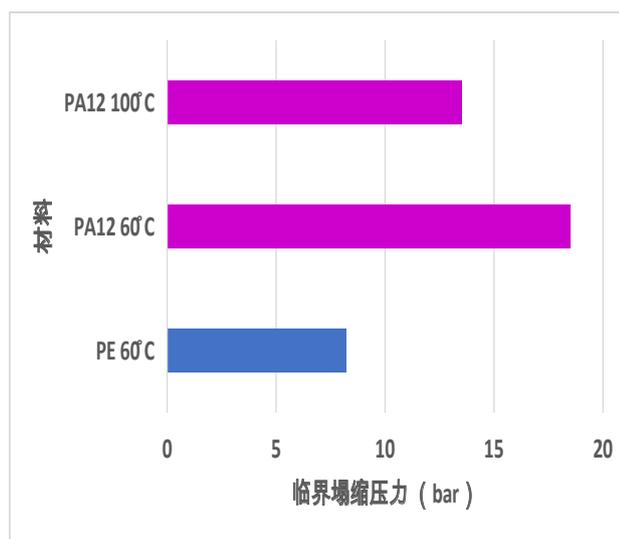


图8 PA12和PE内衬在高温原油中的极限塌缩压力

#### 4. 结论

作为一种非开挖施工中的新型塑料材料，PA12通过其世界范围内数十个安装案例，有效地证明了其优势。与传统塑料材料相比，PA12管道具有更高的安全性，能够有效耐受刮擦和第三方破坏。同时，其优异的力学性能，允许非开挖施工中更高的拖拉力和更长的拖管距离。在腐蚀性流体中极低的溶胀为其在油气管道修复应用中提供了广阔空间。PA12为非开挖施工材料的选择提供了一个创新性的选项，在一定程度上实现了金属管道刚性和塑料管道柔韧性的有机结合。

#### 参考文献

- [1] Samuel T. Ariaratnam, Survey questionnaire results of the current level of knowledge on trenchless technologies in China. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (2010) 802–810.
- [2] 乌效鸣, 胡郁乐, 李粮纲等. 导向钻进与非开挖铺管技术[M]. 中国地质大学出版社, 2004.
- [3] Baosong Ma, M. Najafi, Development and applications of trenchless technology in China. *Tunnelling and Underground Technology* 23(2008) 476–480.
- [4] 王朝建. 内衬非开挖管道修复技术及其应用分析[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2008, 35(3):54–56.
- [5] 王文革. 聚乙烯(PE)管材与非开挖施工技术[J]. 非开挖技术, 2005(4):50–53.
- [6] 姚黎明. PE输气管道水平定向钻穿越在胜利油田的应用[J]. 石油工程建设, 2004(05):25–27+3.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气管道穿跨越工程技术规程. CJJ/T 250–2016.
- [8] J. Berger, J. Franosch, C. Schuett, A. Dowe: “The Aging of Offshore Polyamides Under Service Conditions in Subsea Applications”, OTC Brazil 2011.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 油气输送管道穿越工程设计规范. GB 50423–2013.
- [10] 上海市非开挖技术协会. 上海市工程建设规范管线定向钻进技术规范. DG/TJ08–2075–2010.
- [11] Peacock A J. Handbook of Polyethylene[J]. Crc Press, 2000.