

城市聚乙烯燃气管道漏气案例统计与原因分析

李夏喜¹, 邢琳琳¹, 田晓江¹, 高观玲¹, 刘敏¹, 胥晴晴², 高瑾²

(1.北京燃气集团有限责任公司, 北京 100035; 2.北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要: **目的** 分析影响聚乙烯燃气管道漏气的薄弱部位及原因, 为建立聚乙烯燃气管道安全服役评价方法可行性分析提供实际数据支撑。**方法** 收集、归纳某城市聚乙烯燃气管道实际应用中的290例漏气案例, 从失效薄弱部位、服役年限、月份等多方面进行统计分析, 并讨论聚乙烯燃气管道发生漏气的主要原因。**结果** PE燃气管道安全服役的钢塑转换、套筒、焊接位置等连接位置是聚乙烯燃气管道服役的薄弱部位, 服役年限与漏气案例比例成正比, 且各部位的敏感月份相差较大。影响管道服役的主要因素是环境/应力长期耦合作用和外力突发作用。**结论** 土壤环境中存在的有机酸介质会加速管道老化, 特别是对于施工等带来的固有薄弱缺陷、外界因素带来的表面损伤、应力集中等, 在土壤服役环境中化学介质、温度、运行压力的耦合作用下, 管道性能大大下降, 产生漏气事故, 给安全运行带来极大威胁。

关键词: 聚乙烯; 燃气管道; 漏气; 薄弱部位; 服役年限

中图分类号: TU996

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)04-0107-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.014

Statistics and Cause Analysis of Gas Leakage in Urban Polyethylene Gas Pipelines

LI Xia-xi¹, XING Lin-lin¹, TIAN Xiao-jiang¹, GAO Guan-ling¹, LIU Min¹, XU Qing-qing², GAO Jin²

(1. Beijing Gas Group Co., Ltd., Beijing 100035, China; 2. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the weak parts and causes that affect the gas leakage of polyethylene gas pipelines and provide practical data support for the feasibility analysis of the evaluation method for safe service of polyethylene gas pipelines. 290 cases of gas leakage in the practical application of polyethylene gas pipelines in Beijing were collected and summarized to make statistical analysis from the aspects of failed and weak parts, service years, months, etc., and discuss the main causes for gas leakage of polyethylene gas pipelines. The steel-plastic conversion sites, sleeves, welding positions and other connection positions of PE gas pipelines in safe service were the weak parts of PE gas pipelines in service. The service life was proportional to the proportion of gas leakage cases, and the sensitive months of each part were quite different.

收稿日期: 2022-05-30; 修订日期: 2022-09-05

Received: 2022-05-30; Revised: 2022-09-05

作者简介: 李夏喜(1966—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为燃气输配系统关键技术和管道完整性管理。

Biography: LI Xia-xi (1966-), Male, Master, Engineer, Research focus: key technology of gas transmission and distribution system and pipeline integrity management.

通讯作者: 高瑾(1963—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为防腐蚀涂层失效机制与寿命预测研究、新型涂层防护技术研发、高分子材料老化失效与防老化、生物材料研发与环境失效。

Corresponding author: GAO Jin (1963-), Female, Master, Associate professor, Research focus: failure mechanism and life prediction of anti-corrosion coatings, research and development of new coating protection technology, aging failure and anti-aging of polymer materials, research and development of biological materials and environmental failure.

引文格式: 李夏喜, 邢琳琳, 田晓江, 等. 城市聚乙烯燃气管道漏气案例统计与原因分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 107-114.

LI Xia-xi, XING Lin-lin, TIAN Xiao-jiang, et al. Statistics and Cause Analysis of Gas Leakage in Urban Polyethylene Gas Pipelines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 107-114.

Through analysis, the main factors affecting pipeline service were determined as the long-term coupling effect of environment/stress and the sudden effect of external force. The organic acid medium existing in the soil environment will accelerate the aging of the pipelines, especially for the inherent weak defects caused by construction, surface damage caused by external factors, stress concentration, etc. Under the coupling action of chemical medium, temperature and operating pressure in the soil service environment, the performance of the pipelines is greatly reduced, resulting in gas leakage accidents, which poses a great threat to safe operation.

KEY WORDS: polyethylene; gas pipeline; gas leakage; weak part; service life

城市燃气管道的安全运行是城市安全的重中之重,聚乙烯(PE)管道具有突出的耐腐蚀性,不存在电化学腐蚀问题,大大减少了金属燃气管道带来的漏气事故。同时,PE管道又具有对输送介质无污染性、制造安装易操作、费用低、使用寿命长等优势^[1],成为市政燃气工程中、低压燃气输送的首选材料。但漏气事件仍时有发生,为保障PE燃气管道的安全运行,首先需要对PE燃气管道的漏气事故进行科学的分析,明确PE管道服役的薄弱部位,以及漏气原因。

PE管道在国外燃气领域的应用起始于20世纪60年代末^[2],在国内起始于20世纪80年代初^[3]。发达国家,20世纪80年代初,PE燃气管道的普及率大多超过50%^[4],90年代初超过90%^[5],20世纪末、21世纪初,新敷设的燃气管道PE管材占比接近100%^[5-7]。国内由20世纪初的20%增至2014年的40%^[8-11],到2020年,新敷设的中低压燃气管道中,90%以上采用PE管材^[12]。随着PE燃气管道的广泛应用,以及服役年限增加,PE管材抗伤能力弱、不耐高温、易燃、机械强度低的缺点开始显现。随PE管道服役年限的增加,PE材料性能发生衰减,尤其是当材料本身存在缺陷时,PE管材直接发生脆性断裂失效^[13],且焊接过程中温度的变化会导致材料的结晶度发生变化^[14],削弱管道的强度^[15]。钢塑转换接头中,塑料部分的导热性差,当温度过高时,会导致接头的失效^[16],且土壤环境中的活性溶剂和应力的共

同作用会使得PE管道发生环境应力开裂^[17-18],使得PE燃气管道漏气事故时有发生^[19-26]。PE燃气管道漏气事故社会影响恶劣,严重威胁城市安全。2010年,外力施工导致中压PE燃气管道破裂,造成2人死亡,2人受伤^[27]。2017年,PE管焊缝发生脱焊,造成1人死亡,事故直接经济损失约147万元^[28]。同年,PE燃气管道被钻漏,造成7人死亡,85人受伤,以及直接经济损失4419万元^[29]。2020年,PE管道焊缝脱焊,造成1人死亡,2人受伤^[28]。虽然漏气事故引起了社会的关注与重视,但对PE燃气管道的认知还存在不足,无法保证PE燃气管道的安全运行。

本文立足于某城市燃气集团提供的290例珍贵的PE燃气管道漏气案例,从服役年限、漏气发生季节、漏气部位等多方面对漏气案例进行统计分析,确定了PE管道在服役过程中的薄弱部位,进而对其漏气原因进行了深入的探讨与分析,为城镇埋地环境下PE燃气管道的安全服役评估体系的建立奠定基础。

1 漏气案例统计分析

2016—2020年,某城市燃气集团所辖管线发生燃气泄漏事故共3469例,其中PE燃气管道漏气事故有290例。将燃气管道的漏气部位、服役年限、漏气季节等相关信息进行汇总,并分析。PE燃气管道漏气部位的服役年限汇总见表1。

表1 PE燃气管道服役年限汇总
Tab.1 Summary of service life of PE gas pipelines

服役年限/a	漏气部位/例						总计/例
	管材	管件	阀门	钢塑转换、套袖本体	法兰、丝扣连接	焊接处	
0~10	92	4	1	18	3	13	131
10~20	64	4	2	21	7	7	105
20以上	11		1	9	4		25
不详	20	1	3	3	2		29
合计	187	9	7	51	16	20	290

1.1 PE燃气管与金属管道漏气案例数量对比分析

将2016—2020年间抢修事故中的燃气管道按照

材质进行划分,各年燃气管道事故以及管道材质数量对比如图1所示。可以看出,近5年的PE燃气管漏气事故数远低于钢管的漏气事故,体现了PE管用于城市中、低压燃气管网的优势,并且PE燃气管道的

敷设量是逐年增加的, 而漏气事故的数量是逐年减少的。这不仅表明了 PE 管道用于城镇中、低压燃气管网的优势, 也说明了 PE 燃气管网工程质量管控的不断提高。

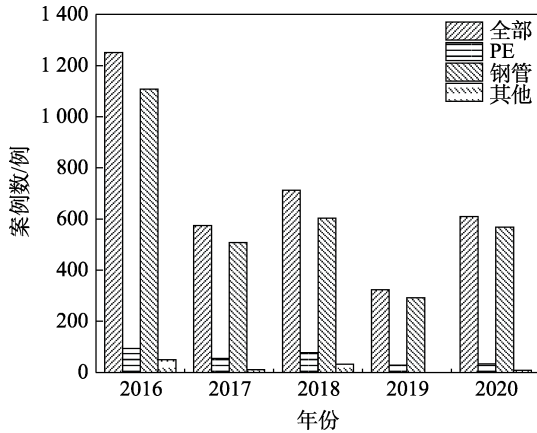


图 1 不同年份各种材质燃气管漏气案例数量对比
Fig.1 Comparison of the number of gas leakage cases of gas pipelines made of various materials in different years

1.2 漏气部位统计分析

PE 燃气管道不同部位导致的漏气事故数量统计如图 2 所示。可以看出, PE 管材漏气比例最大, 为 64%, 但大多是由于外力损伤导致的管材破损, 其他需要重点关注的是钢塑转换、套袖、焊接位置等连接处占比 36%, 说明它们是影响 PE 管道安全服役的薄弱部位。其中, 钢塑转换、套袖事故占比较高, 为 18%, 是需高度重视的部位, 是影响 PE 管道安全服役的重要薄弱部位。

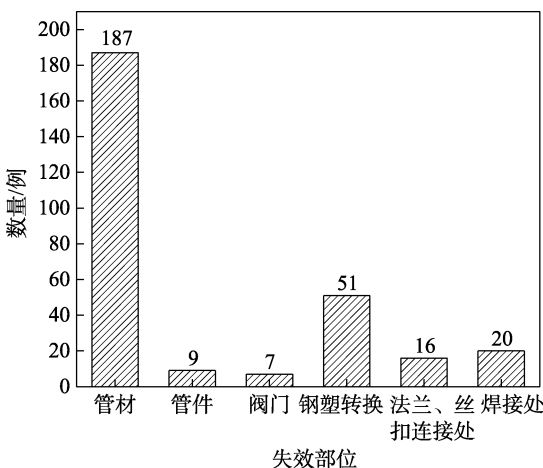


图 2 不同漏气部位数量占比统计
Fig.2 Statistics on the proportion of different gas leakage parts

不同服役压力的 PE 管道漏气部位数量统计如图 3 所示。可以看出, 中、低压服役的 PE 管材漏气案例数量相差不大。阀门漏气案例都是中压管线, 表明

管内运输压力大会给阀门的安全服役带来更大的威胁。对于钢塑转换、套袖、焊接、管件这些薄弱部位, 低压服役的发生漏气案例数略大于中压, 但是低压管网采用 PE 管道的工程量大, 不能说明低压对管道漏气薄弱部位的影响。

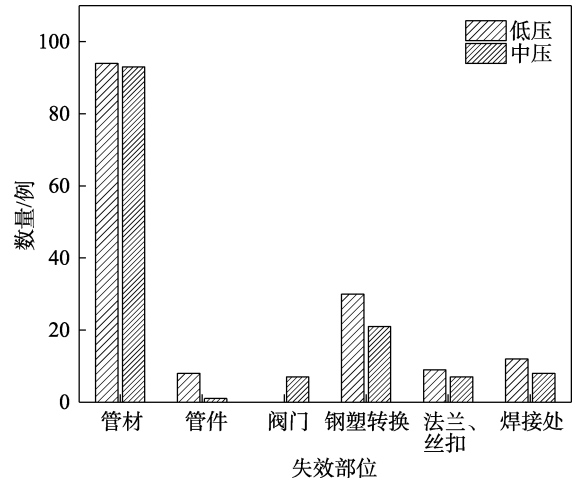


图 3 中低压 PE 管不同部位漏气案例数量对比
Fig.3 Comparison of the number of gas leakage cases in different parts of medium and low pressure PE pipelines

1.3 漏气案例管道已服役年限统计分析

PE 燃气管道的不同部位发生漏气事故时的服役年限不同, 290 例案例的服役时间可分成 0~10 a、10~20 a、20 a 以上等 3 组, PE 燃气管道在不同服役年限的数量如图 4 所示。可以看出, PE 燃气管道漏气事故中服役 20 a 以下的高达 81%, 但 2000 年后, PE 管在燃气管网应用的数量大大增加, 这也是服役 20 a 以下的管道数量远大于 20 a 以上的原因。管道连接部位、连接工艺、结构、受力不同, 对服役环境的敏感性不同。分析认为, 不同部位漏气时的服役年限会有所差距, 各部位漏气时服役年限统计对比如图 5 所示。

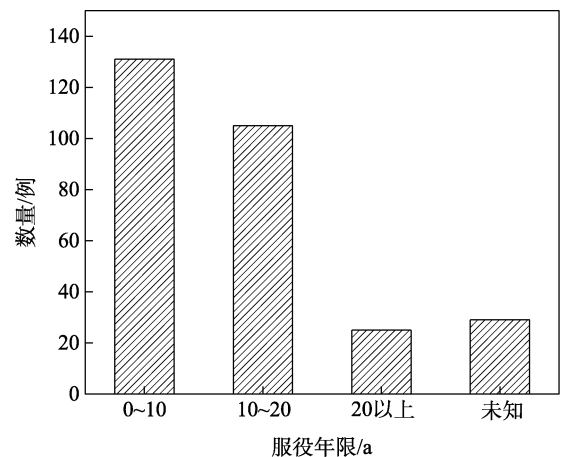


图 4 PE 燃气管道服役年限
Fig.4 Service life of PE gas pipelines

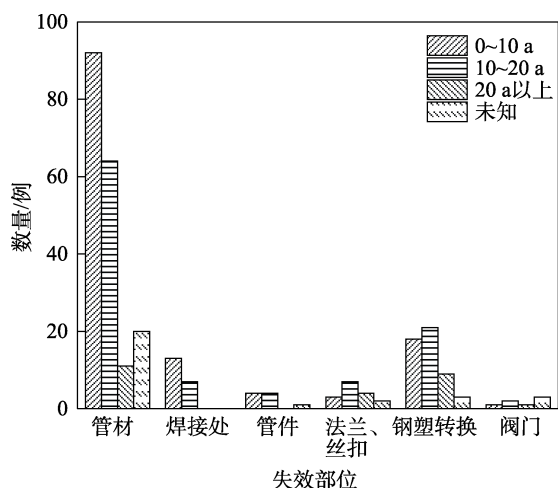


图5 各部位在不同服役年限发生漏气事故的数量对比图
Fig.5 Comparison chart of the number of gas leakage accidents of various parts in different service years

管材的漏气主要是由于外力施工机械力损伤管材导致的,而连接部位受服役环境与应力的长期耦合作用的影响大。图5表明,焊接处在服役0~10 a间漏气的占比约是服役10~20 a占比的1.85倍,远远高于其他连接部位。法兰丝扣、阀门、钢塑转换、套袖、连接部位等的漏气在10~20 a的占比高于0~10 a。这在一定程度上说明焊接处对服役环境更为敏感,若焊接质量稍有不足,PE燃气管道就无法长期承受环境与应力的耦合作用,在服役早期就会产生缺陷导致漏气。

1.4 漏气事故多发月份统计分析

不同月份的漏气事故数量对比如图6所示。可以看出,在3、5月份发生PE管道的漏气事故较多。典型漏气部位在各月份发生的漏气事故数量对比如图7所示。可以看出,钢塑转换、套袖本体在3月份发生的漏气事故最多,焊缝位置在5月份发生的漏气事故最多,表明钢塑转换、套袖本体对某城市3月土壤温度由低向高的变化较为敏感,焊缝对春季向夏季的温

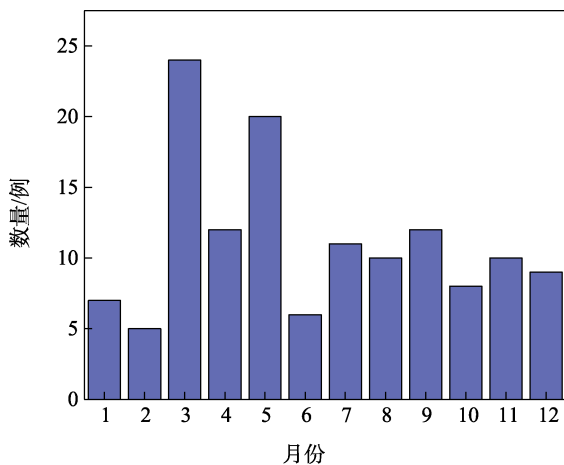


图6 不同月份的漏气事故数量对比
Fig.6 Comparison of the number of gas leakage accidents in different months

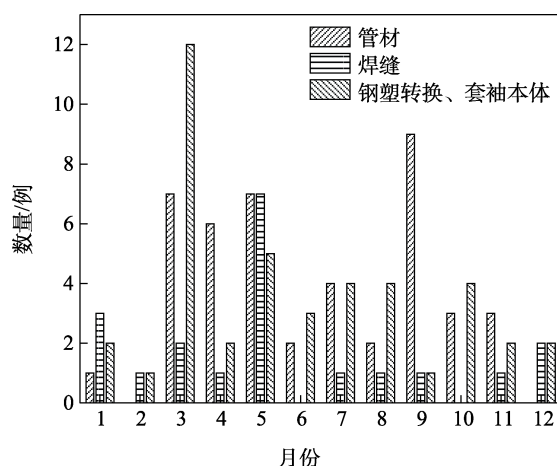


图7 典型漏气部位在各月份发生的漏气事故数量对比
Fig.7 Comparison of the number of gas leakage accidents in typical gas leakage parts in each month

度过渡环境较为敏感。漏气案例漏气月份的统计,在一定程度上可以反映不同漏气部位的高发月份,这就提醒燃气集团相关人员在日常巡查的基础上要在不同月份对不同部位进行重点关注与防范。管材在3、4、5、9月份发生的漏气事故较多,这可能与春秋两季城镇市政施工较多有关。在没有明确PE燃气管道的具体位置的情况下,机械作业损伤管材部位几率增大。

2 PE燃气管道漏气原因归纳分析

深入分析PE燃气管漏气的本质原因,是保障管网安全运行的重要基础。根据提供的PE燃气管道漏气事故抢修关闭单,燃气管道漏气部位为管材、钢塑转换与套袖本体、焊接位置、管件、阀门、法兰与丝扣连接等6种,漏气的直接原因为施工外力、塌陷、地面沉降、设备本身质量、外腐蚀、安装缺陷、焊接质量和烧、热熔等8类。但针对燃气管道漏气事故采集的信息仍有不明确之处,如“外腐蚀”是沿用钢管的腐蚀漏气说法,没有具体解释,“设备本身质量”说法太过笼统,没有进行具体分类。另外,漏气部位中将钢塑转换和套袖、法兰和丝扣连接归为一类,没有准确的划分。对事故案例进行统计分析仍能在一定程度上反映PE燃气管道服役过程中的薄弱部位,以及造成漏气事故的原因。

不同原因导致的漏气事故量如图8所示。分析其原因可以归纳为,服役环境/力长期耦合作用(塌陷、地面沉降、设备本身质量、外腐蚀、安装缺陷和焊接质量)和突发外界作用(市政施工机械外力和烧、热熔)。由服役环境/力长期耦合作用导致的漏气事故数量有156例,占比54%,突发外界作用导致的漏气事故有134例,占比46%,表明环境的长期作用对PE燃气管道的安全运行影响重大。

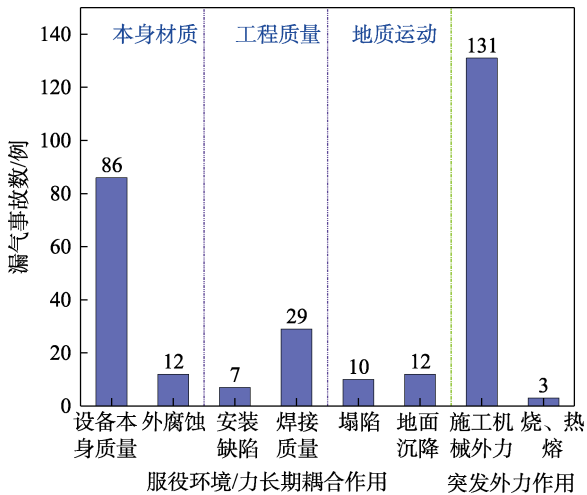


图 8 不同原因导致漏气事故数量

Fig.8 Number of gas leakage accidents due to different causes

2.1 服役环境/力长期耦合作用

服役环境和应力的长期耦合作用会严重影响 PE 燃气管道的安全运行以及服役寿命, 从 PE 管道漏气案例的直接原因来看, 主要体现在 3 方面: 1) 管道本身材质, 包含漏气原因中的设备本身质量和外腐蚀; 2) 工程质量, 包含漏气原因中的安装缺陷和焊接质量; 3) 地质变化, 包含漏气原因中的塌陷和地面沉降。

1) 管道本身材质。管材、各连接部位由于材质因素在长期服役过程中, 性能下降至 PE 燃气管道的临界值以下, 导致管道漏气。由该原因导致的漏气事故案例数共计 98 例, 不同漏气部位的数量统计如图 9 所示。可以看出, 钢塑转换、套袖本体部位发生漏气的案例数最多, 占比 33.67%, 是 PE 燃气管道长期服役的关键薄弱部位, 在服役过程中需重点关注。其次是管材位置, 其他位置漏气事故相对较少, 表明管材和各连接部位材料在环境/力长期耦合作用下会发生老化, 使得该部位无法继续承载外压力和内压力的双重作用, 燃气管道局部出现损伤, 发生漏气事故。

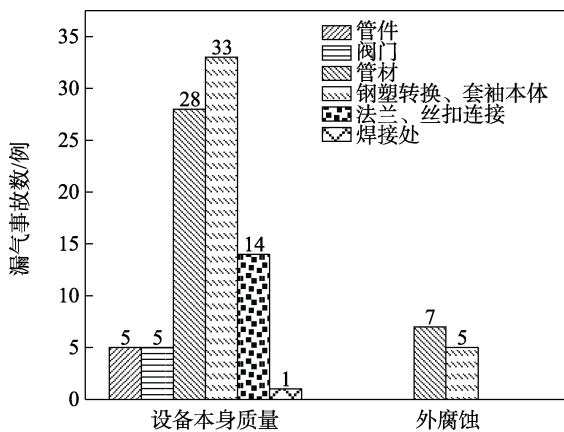


图 9 材质原因导致漏气事故的部位统计

Fig.9 Statistics on the parts of gas leakage accidents caused by the material

2) 工程质量。在长期服役过程中, 由工程实施质量的问题带来的漏气事故共计 36 例, 如图 10 所示。工程施工质量不到位带来的漏气事故主要发生在焊缝位置, 表明这一部位是 PE 燃气管道服役安全的重要薄弱部位。

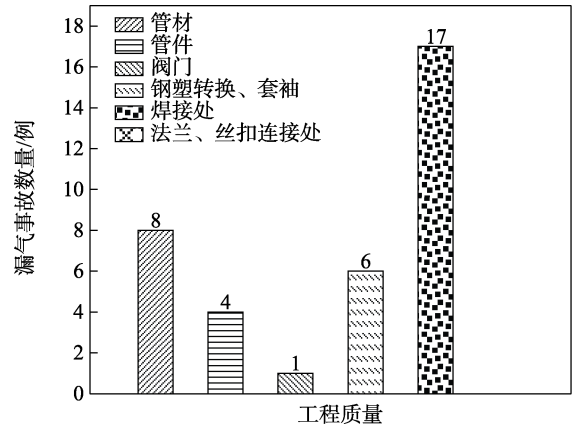


图 10 工程质量导致漏气事故的部位统计

Fig.10 Statistics on the parts of gas leakage accidents caused by engineering quality

3) 地质变化。地质变化中的地面沉降是由于管道周边土壤环境长期缓慢运动导致的。采集的信息中, 未对地面沉降、塌陷进行明确分类, 本文将其认定为是土壤环境长期变化或突发的塌陷与沉降, 带来管道长期受到额外的应力作用的结果。由塌陷与地面沉降原因带来 PE 管事故有 22 例 (塌陷 10 例, 地面沉降 12 例), 如图 11 所示。可以看出, 管材处发生漏气的案例最多, 是因为在燃气管道中, 管材用量是最多的, 故是地质变化带来的塌陷与沉降作用的主要部位。其次是钢塑转换、套袖本体位置, 其他部位在地质运动下发生的漏气事故较少。

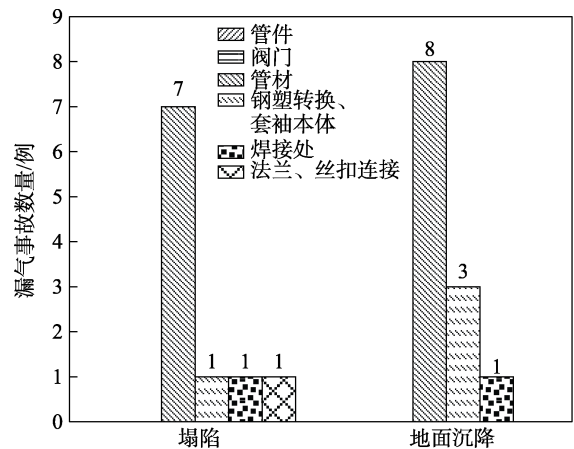


图 11 地质变化导致漏气事故的部位统计

Fig.11 Statistics on the parts of gas leakage accidents caused by geological changes

综合以上 3 种服役环境/力长期耦合作用导致的漏气案例, 分析认为是由 PE 高分子的分子结构决定

的。服役的土壤环境中大多含有一定具有表面活性的化学介质，长期在这种环境下服役，PE管道表面会提前老化，使得PE的承载能力下降，在环境和内外应力的长期耦合作用下，PE管道易发生漏气事故。这就要求在PE燃气管道在敷设前，确定土壤中含有的敏感化学介质种类；在生产、选择管材和各管件时，要保证质量；在运输、储存过程中，要遮蔽防护，避免阳光、雨淋对PE管道的老化影响；在工程施工中，要加强管理和施工质量管控，关键部位给予补强，防范地质环境变化带来的PE管受力过大，进而漏气。

2.2 突发外界作用

市政施工机械外力和烧、热熔突发事件带来PE管道漏气归纳为突发外界作用。本文热熔案例是由于地面发生燃烧事故，管道覆土较薄，使得其下方燃气管道发生热熔而导致漏气事故，属于突发外界作用。若PE燃气管道附近存在热力管网，存在热源长期作用，会使PE管道老化失效导致漏气，这属于环境的长期作用。

1) 施工机械外力。被施工机械外力破坏的PE燃气管道如图12所示。PE燃气管道在施工外力作用下发生的燃气管道泄漏事故共计131例，其中管材处发生破损导致的漏气事故有126例，占总漏气事故的43.45%，故施工机械外力是管材漏气事故的最主要原因。该原因导致的PE管材漏气事故多发是因为PE高分子链的非极性烯烃化学结构决定了高密度聚乙烯的强度远低于金属，拉伸强度为21~38MPa。在工程施工中，金属器械机械作用力很大，若作用在PE管上，会带来严重的机械破坏，产生漏气。PE管道的力学强度有限，必须予以充分重视，因此在进行市

政施工时，要加强各部门之间的协调沟通，在施工前明确城镇地下管网的分布，强化施工人员的规范操作，避免野蛮操作，减少工程施工对PE燃气管道造成损伤。在燃气管道安装工程中，要保证PE管道在运输、储存、敷设过程完好，以及回填土中没有尖锐的石块，避免PE管道表面出现损伤和应力集中，成为服役的薄弱部位。燃气集团要加强对防止第三方破坏的保护、日常巡查和安全管理措施。

2) 烧、热熔。在本文漏气案例中，共有3例烧、热熔案例，均发生在管材部位。其中，由于电缆短路的大电流导致的烧熔事故有2例，如图13所示。由于地面燃烧杂物导致PE管道热熔的漏气事故有1例。烧、热熔漏气案例虽然数量较少，但是性质恶劣，一旦发生破坏性大，严重威胁社区安全。PE管材易发生烧、热熔事故，是PE高分子结构决定了PE管具有不耐高温、阻燃性弱、应用温度范围有限的特性。PE高分子链的氧指数只有17左右，抗热降解温度在300℃左右，高于此温度，大分子链大量裂解。因此，PE管材不耐热、易燃。由图13可见，搭接在PE管道上的电缆短路时会带来大电流，使得PE管道的表面温度超过降解温度（300℃）而被烧熔，漏气事件恶劣。当PE燃气管道覆土层较薄时，地面发生燃烧事故，地面高温传到PE管道表面的温度超过了其应用温度范围（-60~60℃），其力学性能随着温度的升高快速下降，使其无法继续在该管内压力的作用下服役，故发生热熔漏气事故。因此，一定要加强市政管网体系的协调管理，确保PE燃气管道附近没有电缆线路和热源的存在。其次，为避免当地面发生高温事故时，土壤层不能有效阻隔温度造成漏气事故，在敷设PE燃气管道时，要选择合适的埋深。

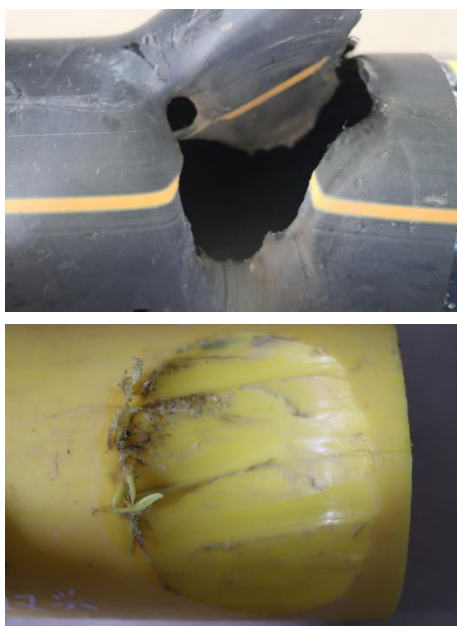


图12 施工外力损伤PE管道

Fig.12 Damage of PE pipeline caused by external force of construction



图13 电缆短路导致PE管熔化烧结

Fig.13 PE pipeline melting and sintering caused by short circuit of cable

3 结论

1) 某城市燃气集团 2016—2020 的 PE 管漏气案例占总事故量的 8.3%, 并逐年减少。服役年限 10 a 以下的漏气案例居多。服役环境长期对管材外壁、连接薄弱部位老化作用带来的事故 (156 例, 占比 53.7%) 主要发生在服役 20 a 前, 远远低于 60 a 设计寿命。

2) 钢塑转换和套袖、焊接、法兰、丝扣等连接部位 (漏气占比 35.5%) 由于设备材质质量、工程质量带来该部位在服役环境/力的长期耦合作用下早于管材老化失效, 是 PE 管网的安全服役关键薄弱部分。

3) PE 高分子链的非极性碳链结构决定了其强度低, 易被施工机械外力损伤, 导致漏气, 漏气事故占比高 (43.5%)。PE 分子链结构也决定了管材的耐高温性和阻燃性较弱, 在电缆大电流、环境温度较高时, 管材会发生烧、热熔, 导致漏气。这些外界突发作用带来的管道损伤程度大, 会带来重大安全、经济损失的恶劣事故。

参考文献:

- [1] KHELIF R, CHATEAUNEUF A. Reliability-Based Replacement of Polyethylene Gas Pipeline Networks[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(11): 8175-8185.
- [2] 尹智生, 丁磊, 杜建强, 等. 高密度聚乙烯管材国内外应用开发现状[J]. 石化技术, 1997, 4(3): 187-190.
YIN Zhi-sheng, DING Lei, DU Jian-qiang, et al. Application and Development of High Density Polyethylene Pipe[J]. Petrochemical Industry Technology, 1997, 4(3): 187-190.
- [3] 丁金森, 李智, 唐元亮, 等. 燃气用埋地聚乙烯管材快速裂纹扩展影响研究[J]. 特种设备安全技术, 2018(4): 13-15.
DING Jin-sen, LI Zhi, TANG Yuan-liang, et al. Study on the Influence of Rapid Crack Propagation of Buried Polyethylene Pipe for Gas[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2018(4): 13-15.
- [4] 丽华兴, 刘仿军, 彭少贤, 等. 聚乙烯塑料燃气管道[J]. 塑料挤出, 2003(3): 19-22.
LI Hua-xing, LIU Fang-jun, PENG Shao-xian, et al. Polyethylene Plastic Gas Pipeline[J]. Plastic Extrusion, 2003(3): 19-22.
- [5] 钱恒河. HDPE 管材的开发现状及其应用前景[J]. 现代塑料加工应用, 2002, 14(3): 36-41.
QIAN Heng-he. Development and Application of Hdpe Pipes[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2002, 14(3): 36-41.
- [6] 李金玲, 卢春华, 石明霞, 等. 国内聚乙烯管材专用料生产现状及市场分析[J]. 弹性体, 2010, 20(2): 83-88.
LI Jin-ling, LU Chun-hua, SHI Ming-xia, et al. Production Status & Market Analysis of Special Compound for Polyethylene Pipe at Home[J]. China Elastomerics, 2010, 20(2): 83-88.
- [7] 鲍光复. 国内聚乙烯燃气管专用料的开发现状及市场[J]. 现代塑料加工应用, 2011, 23(5): 47-50.
BAO Guang-fu. Domestic Situation and Market Status of Polyethylene Special Materials for Gas Pipe[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2011, 23(5): 47-50.
- [8] 曹鹏, 吴明, 刘广鑫, 等. 城镇燃气埋地含缺陷聚乙烯管道应力分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 77-81.
CAO Peng, WU Ming, LIU Guang-xin, et al. Stress Analysis on Buried Urban Gas PE Pipeline Containing Defects[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 77-81.
- [9] 刘睿, 赵玲, 吴明, 等. 基于有限元分析的 PE 燃气管道有固定墩的跨越段应力分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2017, 37(1): 24-29.
LIU Rui, ZHAO Ling, WU Ming, et al. Stress Analysis of the across Urban Gas PE Pipeline with Fixed Pier Based on the Finite Element Analysis[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2017, 37(1): 24-29.
- [10] 刘旭东, 姚舜刚, 侯亮. PE100 性能对聚乙烯燃气管道定向穿越施工的影响[J]. 上海煤气, 2019(1): 1-5.
LIU Xu-dong, YAO Shun-gang, HOU Liang. Application of PE100 to Calculation of Maximum Drag Distance of Gas Pipeline[J]. Shanghai Gas, 2019(1): 1-5.
- [11] 马麦围, 杨涛. 聚乙烯燃气管道施工质量控制研究[J]. 城市燃气, 2018(11): 19-22.
MA Mai-tim, YANG Tao. Study on Construction Quality Control of Polyethylene Gas Pipeline[J]. ChengShi RanQi, 2018(11): 19-22.
- [12] 李茂东, 陈国华, 杨波, 等. 热老化对恒定内压下 PE 管材性能的影响[J]. 塑料, 2019, 48(2): 127-131.
LI Mao-dong, CHEN Guo-hua, YANG Bo, et al. Effect of Thermal Ageing on Properties of PE Pipes under Constant Internal Pressure[J]. Plastics, 2019, 48(2): 127-131.
- [13] 何芄. 燃气用埋地聚乙烯(PE)管耐快速裂纹扩展(RCP)的试验评价[J]. 化学工程与装备, 2010(3): 13-16.
He Peng. Experimental Evaluation of Rapid Crack Growth (RCP) Resistance of Buried Polyethylene (PE) Pipes for Gas[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(3): 13-16.
- [14] LI Hai-jing, GAO Bing-jun, DONG Jun-hua, et al. Welding Effect on Crack Growth Behavior and Lifetime Assessment of PE Pipes[J]. Polymer Testing, 2016, 52: 24-32.
- [15] 胡先志, 魏忠诚, 胡战洪, 等. 耐环境应力开裂的 PE 电(光)缆护套料的研制[J]. 现代塑料加工应用, 1996, 8(1): 28-32.
HU Xian-zhi, WEI Zhong-cheng, HU Zhan-hong, et al. Study and Preparation of Pe (Optical) Cable Jacket Material Resisting Esc[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 1996, 8(1): 28-32.

- [16] 樊洋. 钢塑转换接头应力分析及优化研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
FAN Yang. Stress Analysis and Optimization Research of Steel-Plastic Transition Joint[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [17] 陈祖敏. 影响聚乙烯管材耐环境应力开裂的因素及对策[J]. 塑料科技, 2000, 28(6): 27-29.
Chen Zu-min. Influence Factors on ESCR of PE Pipe and Countermeasure[J]. Plastics Science and Technology, 2000, 28(6): 27-29.
- [18] 姜述春, 吉周健. 高密度聚乙烯环境应力开裂机理的研究[J]. 北京化工学院学报(自然科学版), 1994(4): 34-41.
JIANG Shu-chun, JI Zhou-jian. Study on Environmental Stress Cracking Mechanism of High Density Polyethylene[J]. Journal of Beijing of Chemical Technology, 1994(4): 34-41.
- [19] CHUDNOVSKY A, ZHOU Zhen-wen, ZHANG Hai-ying, et al. Lifetime Assessment of Engineering Thermoplastics[J]. International Journal of Engineering Science, 2012, 59: 108-139.
- [20] ZHANG Yi, BEN JAR P Y, XUE Shi-feng, et al. Quantification of Strain-Induced Damage in Semi-Crystalline Polymers: A Review[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(1): 62-82.
- [21] DETREZ F, CANTOURNET S, SEQUELA R. Plasticity/Damage Coupling in Semi-Crystalline Polymers Prior to Yielding: Micromechanisms and Damage Law Identification[J]. Polymer, 2011, 52(9): 1998-2008.
- [22] GU Gong-yao, XIA Yong, LIN C H, et al. Experimental Study on Characterizing Damage Behavior of Thermoplastics[J]. Materials & Design, 2013, 44: 199-207.
- [23] 姜锐涛, 吴志峰, 王志伟. 钢塑转换连接结构的研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 86-91.
JIANG Rui-tao, WU Zhi-feng, WANG Zhi-wei. Research on Structure of PE to Steel Transition[J]. China Plastics, 2021, 35(5): 86-91.
- [24] 刘宏亮, 刘若溪, 赵西元, 等. 径向电流集中诱发的高压交联聚乙烯电缆缓冲层烧蚀研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8): 94-101.
LIU Hong-liang, LIU Ruo-xi, ZHAO Xi-yuan, et al. Study on Ablation of Buffer Layer in High Voltage XLPE Cable Induced by Concentrated Radial Current[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 94-101.
- [25] ZHANG Yi, BEN JAR P Y. Quantitative Assessment of Deformation-Induced Damage in Polyethylene Pressure Pipe[J]. Polymer Testing, 2015, 47: 42-50.
- [26] ZHAO Yong-jian, CHOI B H, CHUDNOVSKY A. Characterization of the Fatigue Crack Behavior of Pipe Grade Polyethylene Using Circular Notched Specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 51: 26-35.
- [27] 徐清泉. 关于泸州市“12·26”天然气爆燃事故案例浅析[Z/OL]. [2015-04-02]. <http://www.egas.cn/lwen/2356.html>.
XU Qing-quan. A brief analysis on the case of "12.26" natural gas deflagration accident in Luzhou City[OL]. 2015-04-02. <http://www.egas.cn/lwen/2356.html>.
- [28] 两起聚乙烯燃气管道焊接质量引发的事故[Z/OL]. [2021-06-08]. https://www.sohu.com/a/470967406_120661187.
Two Accidents Caused by Welding Quality of Polyethylene Gas Pipelines[Z/OL]. 2021-06-08. https://www.sohu.com/a/470967406_120661187.
- [29] 吉林松原“7.4”燃气爆炸事故调查报告[Z/OL]. [2018-02-06]. https://www.sohu.com/a/221233376_660504.
Investigation Report on "7.4" Gas Explosion Accident in Songyuan, Jilin Province[Z/OL]. 2018-02-06. https://www.sohu.com/a/221233376_660504.

责任编辑: 刘世忠