

专题报道

SPECIAL REPORT

北京市天然气管网地质灾害防范措施的研究

北京建筑工程学院(100044) 杜学平 刘 蓉
北京燃气集团(100035) 刘 燕 支晓晔

摘要 根据地质灾害引起的燃气管线事故分析,结合北京地质条件与国内外燃气管线防灾减灾的先进办法,从燃气设施规划选址、管线改造和建设加强保护措施、分区域独立控制、防灾减灾监控系统建立方面论述了城市天然气管网地质灾害的防范。

关键词 城市燃气 防灾减灾 地质灾害 抗震措施

Study of Geological Disaster Prevention in Beijing Natural Gas Network

Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture Du Xueping, Liu Rong

Beijing Gas Group Liu Yan, Zhi Xiaoye

Abstract According to the analysis about gas pipeline accident caused by geological disasters, combining with geological conditions in Beijing and advanced disaster prevention at home and abroad, we elaborated on city natural gas pipeline geological disaster prevention in natural gas facilities planning and site selection, strengthen protection measures in conversion and new construction pipeline, sub-regional independent control, and establishment of disaster prevention and mitigation monitoring system.

Keywords city natural gas; disaster prevention and mitigation; geological disasters; anti-seismic measures

1 引言

“5·12”汶川大地震导致了大量的人员伤亡和经济损失,给当地乃至全国的经济、社会造成了极大的影响。地震引发了大量的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。初步统计,地质灾害多达 12 000 多处,潜在隐患点近 8 700 处,部分城市基础设施破坏相当严重,燃气设施也有不同程度的损坏。

城市天然气管网在震中极易损坏,泄漏引发的大火往往成为最严重的次生灾害。北京市约有 11 000 km 天然气输配管道,一旦发生意外将会造成不可估量的损失。只有未雨绸缪,切实做好规划,及时采取应对措施,才能将灾害损失降到最低限度。

2 北京地质灾害

北京市位于华北平原西北隅,燕山山脉和太行山脉衔接部位^[1],其特殊的自然条件和强烈的人类活动,易发育多种地质灾害。1949 年以来,北京地区泥石流、崩(滑)塌、采矿塌陷 3 类地质灾害已造成 600 余人员伤亡,经济损失达数亿元。北京具有灾种多、灾害频发和群发性强等特点,地质灾害除造成人员伤亡和建筑物破坏外,还可毁坏、破坏景观,对生态环境造成严重的影响。

北京及周边地区经历多次地震,历史上北京曾遭受几次严重地震灾害。自有史记载以来,北京地区曾遭受有感地震 592 次,其中地震用表面波的强度 $M_s \geq 4.75$ 有 67 次(1976 年 7 月 28 日唐山地震止)。1679 年 9 月 2 日平谷—三河 8 级地震是有记载以来对北京地区造成破坏最为严重的地震,10 万人在这次地震中伤亡^[1]。



图1 北京市天然气输配管网与城市地质灾害分布概况

除地震强度外,液化也是破坏埋地管道的一个重要因素。砂土液化是由地震引起的使土壤呈现液态泥状现象^[2]。砂土液化具有重复性,历史地震所导致的砂土液化的分布范围和特征可为今后的城市规划和工程建设提供有力的参考^[3]。唐山大地震在北京地区所造成的砂土液化的分布范围很广,几乎涉及到了整个北京平原区^[4]。

由于过量开采地下水,我国多个城市出现地面沉降,地面沉降也是北京平原区主要灾害之一。1999年-2005年近6年来北京地面沉降面积的年均增加速度,远远快于以往的45年。2005年沉降速率是20世纪80年代的2倍~3倍,也是北京有监测资料以来最快的时期,且远大于上海、天津、沧州等沉降严

重区同期的年沉降率^[5]。平原地区地面沉降面积不断扩大,已由20世纪80年代2个沉降区,增加为5个主要沉降区(图1),沉降区造成局部线路、管线变形破坏,建筑地基下沉等^[6]。

近代以来,由于人类大量抽取地下水和进行采矿等活动,出现了一系列因人为活动所引起的地裂缝^[7]。根据近几年的调查资料显示,目前北京地区发现的对城市建设有较大影响的地裂缝为顺义地裂缝、高丽营地裂缝、北小营地裂缝和苇沟地裂缝(图1),均分布在平原区地面沉降较为发育地带,与断裂构造有着密切关系^[8]。地裂缝已造成建筑物开裂变形,对城镇建设造成了极大的影响。

近年来城市工程建设地面塌陷时有发生,由于

城市建设实施的大量地下工程,如市政管线工程、地铁工程等都位于平原松散地层中,这些工程扰动了地下土体,机械施工震动、地下空间开挖、人工土石置换、开挖回填不实等都会导致土层结构变化和地应力发生改变,在局部地带形成空洞或土层疏松等不稳定空间。不稳定空间上部土体在雨、地表水、各类渗水和外部震动的作用下,不断坍塌,致使不稳定空间不断扩大,最终发展到地表,形成地表陷落^[1]。据不完全统计,北京市近几年发生影响较大的地表陷落 50 余起,其中一半发生在地下管线工程建设较多的朝阳区^[1]。

北京震害分布的总趋势是东部重,西部轻,平原重,山区轻。市区为松散的沉积物平原,人为和自然原因共同作用加剧了市区地裂缝、地面沉降、地表陷落等城市地质灾害。

3 世界部分地区城市燃气设施地质灾害防范措施

环太平洋地震带集中了全球 80%以上的浅源地震和几乎全部的中源地震和深源地震,表 1 所示为 20 世纪 80 年代以来各大地震对供气系统的影响。

美国加州地震安全委员会^[9]的研究表明天然气泄漏是导致地震火灾的主要原因,过去的地震火灾中大约有 20%~50%与燃气泄漏有关。震害发生时往往因为构筑物的损坏首先殃及用户侧的中、低压管

道,所以管径较小的输送管道受损率更高,这也直接威胁着居民的生命和财产安全。采取相应的措施可降低风险,但这有赖于用户的选择和投入。

东京瓦斯公司截止 2007 年共有 1 010 万用户,总管线长度为 50 800km,覆盖东京及其附近地区 3 100km²。管网压力分为 4 级,最新的 SUPREME (super-dense real-time monitoring of earthquakes)超密集实时地震监测系统,采用地震测示仪和切断阀门联动,以保障低压管线供应安全。在 3 100km²供气区域内,共有 3 800 个监测点,平均每个监测站监测 0.9km²,监控中心通过计算机下达切断命令,传感器与监控中心之间通过无线网络和普通电话网络进行通信信号传输^[3]。

台北燃气公司有 32 万燃气用户,采用了日本 SUPREME 系统^[3],共安装了 31 个新式传感器,利用租用的无线电话线路遥测,在 1999 年台湾集集地震和 2002 年的 311 大地震中,SUPREME 系统都发挥了作用^[3,9]。

4 地质灾害引起的管道事故分析

美国、欧洲和加拿大等国家建立了相应的管道事故数据库^[7],欧洲燃气管道地质灾害引起的管道事故各破裂模式发生比例,分别为断裂 50%、孔 30%、微孔/裂纹 20%^[8]。由此可知,地质灾害引起的燃气管道事故以断裂为主。

美国石油学会制定的标准 API 581 提供了燃气

表 1 20 世纪 80 年代以来各大地震对供气系统的影响^[3~5]

发生年代	发生地点	对燃气供应系统的影响	地震引起的火灾	燃气导致的火灾
1985	墨西哥墨西哥市	400 余处煤气管网的中压管线破坏	引起了市区的火灾	
1989	美国 Loma Prieta	1 000 余户城市供气系统出现漏气现象	67	16
1994	美国 Northridge	供气系统出现 1 500 多处的漏气现象	97	54
1995	日本神户	主干供气线路破坏 5 190 处	205	36
2002	中国台湾“311”	应用 SUPREME 系统及时关断,管线最终只有少量泄漏,未导致火灾		

发生泄漏后各种表现形式的概率^[9],燃气发生泄漏后有 80%可以安全排放,有 20%会造成事故。

燃气泄漏、扩散及爆炸是一个复杂的物理、化学过程,但泄漏量无疑是事故危害程度的最主要参数。

气态燃气泄漏量可从伯努利方程推导得到,燃气泄漏的质量流量与其流动状态有关。

当 $\frac{P_0}{P} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}$ 时, 气体流动属于音速流动^[10], 燃气的质量流量

$$Q = C_{dg} A_p \sqrt{\frac{kM}{RT} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)(k-1)}} \quad (1)$$

P_0 , 环境压力, Pa;

P , 容器内介质压力, Pa;

Q , 燃气泄漏的质量流量, kg/s;

C_{dg} , 气体泄漏系数, 与泄漏口形状有关, 泄漏口为圆形时取 1.0, 三角形时取 0.9, 长方形时取 0.9, 渐缩孔取 0.9~1.0, 渐扩孔取 0.6~0.9, 管道完全断裂取 1.0;

A , 泄漏口的面积, m^2 ;

k , 气体绝热指数(定压比热与定容比热之比), 甲烷(多原子气体)取 1.29;

M , 分子量, 甲烷 16;

R , 气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$;

T , 气体温度, 288K (15℃)。

当 $\frac{P_0}{P} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}$ 时, 气体流动属于亚音速流动, 燃气泄漏的质量流量

$$Q = C_{dg} A_p \sqrt{\frac{kM}{RT} \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[\frac{P_0}{P} \right]^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

利用以上公式可计算出一定漏气面积, 在不同管线压力下的泄漏量。大量的资料表明, 低压管网破坏率远高于高压管网。如 1995 年日本阪神大地震, 神户市燃气管道高压管基本未坏, 中压管有 96 处破坏, 低压管损坏 21 647 处^[11]。美国加州地震安全委员会的研究表明低压燃气管道的破损率远高于高、中压管道。北京市低压管道压力(相对压力)一般为 2kPa 左右, 当直径为 100mm 管道破裂时, 其泄漏量计算结果如下:

$$\left[\frac{P_0}{P} \right] = \frac{1.01325 \times 10^5}{0.102 \times 10^5} = 0.98$$

$$\left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}} = \left[\frac{2}{1.29+1} \right]^{\frac{1.29}{1.29-1}} = 0.548$$

$\frac{P_0}{P} > \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k-1}}$ 属于亚音速流动, 选择式(2)计算泄漏速率:

$C_{dg}=1.0$, 管道断裂泄漏口近似为圆口; $A=\pi d^2/4=0.00785m^2$, 低压管道断裂后从裂口一侧漏气, 管内径 0.1m 为泄漏口的当量直径;

$$Q = C_{dg} A_p \sqrt{\frac{kM}{RT} \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[\frac{P_0}{P} \right]^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 10.29 (kg/s)$$

折合为 10min 体积泄漏量为 $8\ 232m^3$, 由上式可计算出当管径分别为 80mm、150mm、200mm, 管道破裂 10min 气体泄漏量分别为 $5\ 264m^3$ 、 $18\ 520m^3$ 、 $32\ 928m^3$ 。此结果说明, 即使是低压管线的断裂, 泄漏量也很大, 其危险性是不言而喻的。

5 北京市天然气输配管网应对地质灾害措施

综合北京地质条件、管网情况、灾害趋势 3 方面的情况, 北京市天然气输配管网防灾减灾特点概括为: 地质复杂, 潜在危害大; 管网庞大, 防灾底子薄; 灾害增多, 应对措施难。

北京市天然气管网从 1958 年到 2008 年经过了 50 年的建设发展历程, 供应规模已达到 80 亿 m^3/a , 相当于东京 1998 年的供气量。但由于经济水平和防灾意识等原因, 燃气管网防灾措施远没有达到日本同等规模时期水平, 与现状东京燃气相差更远。随着北京经济水平的提高, 城市规模的扩大, 以人为本的理念的加深。提高北京燃气管网安全性, 采取应对地质灾害的必要措施, 已受到广泛重视。燃气管网防灾系统是一个逐步发展和完善的过程, 通过对目前北京燃气管网分析, 结合国内外经验, 在防灾系统建设初期, 防灾措施概括起来可从以下 4 个方面着手:

(1) 重要燃气设施规划选址避开地质条件差的地区。

(2) 管线改造与建设加强防护措施。

(3) 细分控制区域减小灾害损失。

(4) 建立防灾减灾监控系统。

5.1 重要燃气设施规划选址避开地质条件差地区

2020年北京市天然气供应量由2008年55亿 m^3 ,增加到120亿 m^3 ,六环路全环建设4.0MPa天然气管线,北六环和东北六环附近建设两座天然气接收站。

根据北京燃气规划,将在高丽营建门站,但其位置正处在断裂带附近,由于门站运行安全对北京天然气供应起着举足轻重的作用,高丽营门站将占全网供应能力的1/4,一旦发生事故将导致北京市天然气管网供应瘫痪。因此,建议在规划选址时应避免潜在地质灾害地区。

5.2 管线改造和建设加强保护措施

5.2.1 管道工程采取增强其安全性的措施

在地质灾害风险较大区域敷设的管线,管材应选用抗震性能好的材料,在接口连接处应采用柔性接头。管道穿越市区断裂带时,管道应与其正交;并敷设套筒内,周围填充砂料;管道及套筒应采用钢管;穿越地裂缝的管道两侧应增设紧急切断阀门。在北京市区东部和北部以及断裂带地区建设管线时,应进行地质灾害对管线影响评估,建成后应加强地质条件恶劣地区周边管线的巡检。

5.2.2 采用地下综合管沟敷设管线

实践证明管沟敷设是管线防止地质灾害的有效方法。法国巴黎的地下市政设施^[12]十分完善,早在19世纪就利用了地下排水渠道的上部空间敷设电话线、电线、煤气管道等公共服务管道设施。2005年日本东京,为预防可能发生的大地震,在繁华区地下40 m深处,开始建设被称为“防震生命线”的共同管沟工程^[13]。此管沟内有电话、电气、天然气、上下水道等管线。目前,东京市内1 100km的干线道路下,已经建成119 km的共同沟,根据日本政府计划,今后所有干线道路下都将兴建公共管沟。

北京市越来越多的管线要求地下敷设,如通信、电力电缆等,随着城市建设的发展,地下管线的增多,给工程建设和维护管理带来了更大的困难。管沟敷设方法不仅能有效地防止地质灾害,便于维护管理,而且还可以防止由于地铁杂散电流对管线的腐蚀。但由于管沟敷设投资大,地质条件要求高,不可能在短时间得到普及,但对于重要管线集中路段应采用管沟敷设方式。据悉随着京包路的建设,沿线地下需敷设高压天然气,高压电缆、电信、上下水等重要管线,而京包路附近地下水开采过量,地沉下降速

度加快,沿公路还要建设城铁,因此,京包路地下管线应采用管沟敷设方式。目前北京中关村西区采用了包括电力主管廊、电信主管廊、天然气主管廊、热力主管廊、给水管廊的综合管廊工程^[4],实践证明效果良好。

5.3 细分控制区减少损失

5.3.1 重要区域的划分

北京市是悠久的历史名城,有如:故宫、北海、天坛、圆明园、颐和园重要的名胜古迹。但是由于要对此地区附近用户供气,天然气管线无法避免地要在此周围敷设。天然气管线是这些古迹潜在的危险源,一旦发生地质灾害导致管线天然气泄漏引发的大火,其损失是无法估量的。为此应对这些地区重点保护。另外,大学、医院、图书馆、电视台、政府机构及重要军事设施也应该列入重要保护区域。

5.3.2 分区域保护措施

细分区域可在紧急情况下独立控制。以往在做天然气规划时比较重视高压管线的防护,但天然气管线防止地质灾害的关键和着眼点应是低压管网的保护措施。北京市天然气输配管网拓补结构复杂,一般一个区域由多座调压站供应,紧急情况下只要一座调压站未能实现切断,则不能停止该区域的供气。图2所示为建立中压独立控制区域示意图。

对于重要区域的保护措施,可以借鉴日本的经验,东京瓦斯公司将其管辖的供气域的低压网路划分为101个区域。每个区域的大小为30 km^2 ~40 km^2 ,每个有30个~50个中低压区域调压站^[9]。在紧急情况下,只要关闭域内所有的调压站就可以完全切断供气。为了保证可靠性,每个区域都至少配备了3个地质监测装置将监测到的大地运动数值传到监控中心,以便监控中心做出切断的决定。这要求SI监测有极高的可靠性,否则不必要的切断将给用户带来不便,并且根据安全规则,中断后重新供气必须检查该区域所有用户的管道状况。同样,日本大阪天然气公司^[14]通过对服务区域进行更加细小的划分,能够更加精确地控制供应,中止供气。每个分区都是彼此独立的,而且每个分区的天然气可以单独控制。该计划要求把整个服务区从目前的55个分区细分到120个,每个分区包含由5万户降到2.5万户,在遇到紧急情况时,仅对那些受损严重的地区进行暂停供气操作。

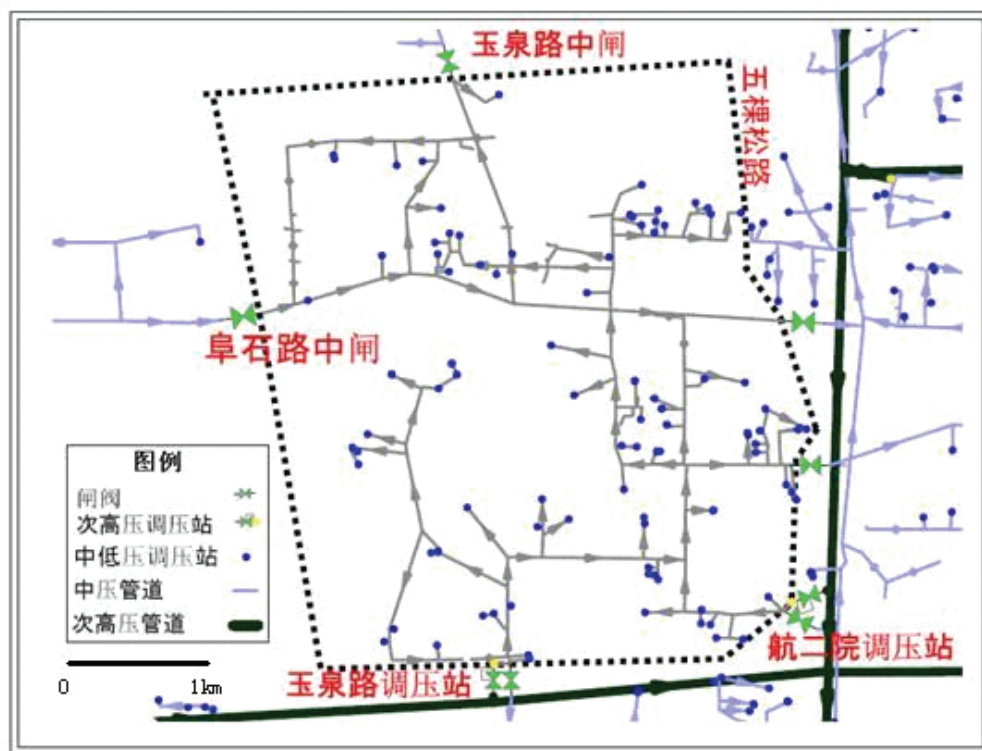


图2 紧急情况下独立隔断的中压区域(北京)

5.4 建立防灾减灾监控系统

防灾减灾关键问题是灾害发生时的应急反应与灾后快速恢复的能力,要达到这一目的必须建立防灾减灾监控系统。

截至到2008年北京燃气共有460万用户,天然气管线10 873万km,其中:高压管线(大于1.0MPa)为946km,中压管线(0.1至0.4MPa)为4 100km,低压管线为(小于5kPa)5827km。北京中压管网普遍成环状,调压站一般为超压切断,切断阀没有远程控制,这为防灾保护带来了巨大的困难。

若按5万户划分区域,360万户有75个区域,初步估计需800个切断阀,225个地震测示仪,共有1 025个监测点,设备投入为10 250万元。由于北京天然气管线大多埋设在公路下,施工难度大,可考虑分期实施,首先在重点区域内建设监测点,监测点与调度中心通讯可采用租公共数据网方式。

地震测示仪器与调压站的切断阀、管线切断阀连接,地震测示仪能够将土体运动信号独立的传输给调度中心和所属区域的调压站、干线阀门站,调度中心经过专家诊断软件迅速判断是否切断阀门,并

下达指令。

快速恢复供气可以减少经济损失,震后恢复方案的制定要根据管线的受损,灾情预警情况而定。合理分布的地震监测仪可以为调度中心提供地震发生过程的历史数据,先进的软件平台(如GIS)和专家诊断系统可为地下管线评估提供科学依据。为谨慎起见,一般切断阀打开,恢复供气都采取人工方式。

天然气管网防灾减灾系统可纳入现有的北京市天然气管网调度监控系统中。目前此系统场站监控点为3 000个,2009年将对此系统进行升级改造,升级改造后的系统应具备防灾减灾部分功能。

总之,建立防灾减灾监控系统是以能够及时有效应对和快速恢复为目标,这赖于准确地质运动信号的获取、可靠的信号传输、科学的判断及高效的控制。

6 结语

天然气管线遍布北京大街小巷,天然气中低压管线,在地质灾害中易损坏漏气,漏气后容易发生火

灾,从而造成生命和财产的损失。因此,管线建设和运行应采用必要措施,建立天然气管网防灾减灾监控系统,北京燃气可在现有的监控系统中增加重点区域的地震监测点,切断阀监测点,实现中低侧的安全实时控制,建立先进的关闭系统。

参考文献

- 1 北京市地质矿产勘查开发局,北京市地质研究所.北京地质灾害[M].北京:中国大地出版社,2008.
- 2 安培浚,曲建升,等.世界部分国家和地区地震次生灾害应对措施[J].科学新闻,2008,12:16-18.
- 3 Yoshihisa Shimizu, et al. Development of Real-Time Safety Control System for Urban Gas Supply Network [J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 237-249.
- 4 宋波,黄世敏.图说现代城市灾害与减灾对策[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- 5 Fred Turner, Douglas Honegger. Improving Natural Gas Safety in Earthquakes—California Recommendations [A]. Proceedings of the Sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering [C]. Long Beach California (USA): American Society of Civil Engineers, 2003. 368-377.
- 6 Japan Society of Civil Engineers. The 1999 JI-JI Earthquake Taiwan Investigation into the damage to civil engineering structures [EB/OL]. http://www.jsce-int.org/disaster_report.shtml, 2008.
- 7 王弢,帅健.天然气长输管道定量风险评价中的技术要点[J].油气储运,2005,24(B12):18-21.
- 8 Gerry Ferris, Jordan Severin. Pipeline Integrity Risk Assessment and Management [EB/OL]. <http://www.bgcengineering.info/>, 2007.
- 9 孙永庆,钟群鹏,张峥.城市燃气管道风险评估中失效后果的计算[J].天然气工业,2006,26(1):120-122.
- 10 彭世尼.燃气安全技术[M].重庆:重庆大学出版社,2005.
- 11 童林旭.城市生命线系统的防灾减灾问题—日本阪神大地震生命线震害的启示城市发展研究[J].城市发展研究,2007,7(3):8-12.
- 12 钟纪刚.巴黎城市建设史[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- 13 新民晚报.日本东京“共同沟”工程[J].上海电力,2005,18(1):109-109.
- 14 陈伟,张军.地震灾害与能源安全(上)—地震灾害与石油天然气系统安全[J].科学新闻,2008,14:34-36.

城镇燃气地下管网诊断检测技术交流会 在津顺利召开

2009年3月19日,由中国城市燃气协会主办、北京埃德尔公司承办的城镇燃气地下管网诊断检测技术交流会在天津顺利召开。来自全国15个省、直辖市的120多位代表参加了会议。

中国城市燃气协会秘书长迟国敬、天津天联燃气股份有限公司总经理郑太琪、北京埃德尔公司董事长杨帆出席会议并致辞。会议由中国城市燃气协会产品委副主任丁淑兰主持。埃德尔代理厂家瑞士 PERGAM 公司总裁 Peter Mantel 先生出席了会议,并针对“远程燃气管网泄漏检测新技术——激光检测”做了详细介绍;埃德尔技术总监高伟就“燃气管网泄漏检测技术及相关设备应用”作了技术报告;郝英杰高工就“地下管线探测技术、燃气管道防腐层检测及评估以及管道摄像检测系统在管网检测中的应用及相关设备”做了发言,并与到会领导、专家针对以上技术进行了现场互动交流。会议期间,代表们还参观了我公司销售给天津西青开发区燃气公司的“激光燃气检测车”及车内配置的所有设备。借此机会对天津西青开发区燃气公司在设备演示提供、与调配上给予的大力支持表示由衷的感谢。本次会议,与会代表对埃德尔主推产品“车载式激光甲烷检测系统 SELMA”表示非常感兴趣,纷纷索要详细资料,并希望能有进一步的交流。

(张 力)