

翻转内衬修复技术在燃气管道上的适用性分析

□ 北京市燃气集团有限责任公司 (100035) 金 强

□ 北京市燃气集团研究院 (100011) 马 彬

□ 北京市天环燃气有限公司 (100025) 曹国权

□ 中国石油大学 (102249) 帅健 李燕

摘 要: 本文针对城镇燃气管道的运行工况, 综合分析了燃气管道的主要缺陷类型及载荷特性, 建立了不同载荷工况下燃气管道的失效判据, 提出了翻转内衬法修复适用性的分析内容。对无外载荷或高压管道, 只需采用第三强度理论评估管道的环向应力是否满足强度要求; 对外载作用超过内压的管道, 需要采用径向变形极限和第三强度理论分别评估管道的刚度和强度, 对满足评估条件的管道才适于使用翻转内衬法修复。

1 引言

燃气管道是保障城市安全、稳定运行的重要基础设施, 随着运行时间的增长, 一些早年建设的管线开始出现不同程度的损伤及老化, 不仅会对管道的正常运行造成影响, 还会对公众安全和社会稳定构成潜在威胁。于是, 管道修复技术应运而生。管道修复技术最早起源于发达国家, 也称为“3R技术”, 即维修、修复和更新 (Repair, Rehabilitation, Replacement)^[1]。维修多指日常维修养护及泄漏事故发生时的临时性维抢修, 修复和更新有时也称“大修”, 不仅要更换管道的防腐层, 还要修复管道的本体缺陷^[2]。

传统的管道修复技术为开挖修复, 需要对路面进行大范围的开挖, 适用于人口稀疏、场地宽阔且对交通影响相对不严重的地方。通常需要在管道停输的条件下进行, 并且修复完成后需要重新铺设路面, 对公共交通和环境的影响较大。对于一些繁华市区、环境保护区或管道埋设较深的地方, 不适于实施大范围开挖, 采用非开挖的施工方式对旧管道进行修复或更换

以达到改善性能的目的, 大幅降低了修复过程中的开挖工作量, 避免了路面因频繁开挖、填埋、铺设引起的交通堵塞及环境污染, 减少了许多因开挖造成的资源浪费具有极其重要的工程意义。

常见的非开挖修复技术包括翻转内衬法、插入法、缩径内衬法、折叠管法、静压裂管法等^[3]。由于修复材料和施工工艺的不同, 每种修复方法都有其优势和不足, 能够修复的管道类型有限。本文针对我国城镇燃气管道修复中常用的翻转内衬法进行了应用现状分析, 从材料性能、修复工艺、修复效果等方面对翻转内衬法的技术原理及优缺点进行了阐述, 并结合燃气管道的运行现状分析了主要缺陷特征及载荷特性, 提出了翻转内衬修复法的适用性评估的失效判据, 对于推动我国城镇燃气管道的更新改造工程具有重要意义。

2 翻转内衬法

翻转内衬法是最早在工程中应用的非开挖修复

方法,起源于1971年,由英国Insituform公司的工程师Eric Wood发明,是一种将复合材料制成的内衬管安装在待修管道内,在材料的热固化作用下形成的“管中管”修复技术。我国对非开挖修复技术研究始于上世纪末^[4],主要以借鉴和吸取国外先进技术为主。目前,已经形成了较为系统的施工工艺和质量控制体系标准,并且在实际的管线中进行了应用,取得了一定的成绩^[5]。2010年,我国发布的CJJ/T147标准是国内首部针对城镇燃气管道的非开挖修复标准^[3],对包括翻转内衬修复法在内的多种非开挖修复技术的设计、施工及验收做出了规定,但是由于当时的技术有限,可以实施修复更新的燃气管道压力不高于0.4MPa,也就是中低压管线。近年来,随着修复技术的提升,可实施翻转内衬法修复的燃气管道压力扩展至高压级别(2.5MPa),并于2015年发布了北京市地方标准DB11/T 1136^[6],该标准以工程试验为基础,涵盖了修复材料的使用、施工过程控制及施工质量验收等方面的规定。

2.1 修复材料

修复材料是一种由防渗膜和复合材料组成的内衬管。防渗膜通常用聚乙烯(PE膜)作为基材,与土工布复合而成。防渗膜具有良好的抗拉强度和延伸率,有一定的变形能力,耐腐蚀、低温及抗冻性能也较好^[7]。复合材料采用热固性树脂为基体材料、织物纤维层为增强材料制成。热固性树脂在修复过程中起粘结和定型的作用,可以使内衬管与管道紧密贴合。纤维层可以采用编织、非编织材料或二者结合的方式制作^[8],具有良好的稳定性能,可以增强内衬管的强度、刚度以及耐热、耐疲劳、耐蠕变性能。

2.2 工艺流程

翻转内衬法的修复过程主要分为5个阶段:管道清洗、内衬安装、保压固化、端口处理和衬后检测^[3,6]。

(1) 管道清洗。旧管道在运行一段时间后必然会发生锈蚀,加上国内燃气管道在初建成时期主要用于输送煤气,管道中不可避免的会有焦油和萘等物质^[9],这些杂质的存在会直接影响修复效果,不利于内衬管与旧管道的粘结。所以,修复前的清理工作十分必要。清理前先要对管道修复段进行封堵,采用CCTV(closed circuit television inspection)检测设备对管道损伤情况进行探索。根据检测结果选取适宜的清洗方

法,一般的清理顺序为:高压水清理、机械清理和喷砂清理。

(2) 内衬安装。内衬管在恒温操作箱中制作,由机器卷材、混和树脂、浸渍和碾压等步骤组成。操作箱不仅可以按比例自动混合树脂与催化剂,最大化发挥材料的性能,还可以将施工对环境的影响降至最低。

(3) 保压固化。保压固化是利用热水、蒸汽或紫外光使内衬软管与待修管道内壁完全粘合的过程,固化压力由自动固化装置提供,整个过程中需要保持稳定的固化压力。固化完成后,内衬软管会在管道内壁形成一层与旧管道形状完全相同的光滑硬质衬管。

(4) 端口处理。内衬软管固化完成后,需要对端口进行环切处理,留出焊接热影响区。按照要求,切割长度为管径的1/2且不小于150mm,还需保持切口整齐、平滑,并用胀圈和粘合剂固定。

(5) 衬后检测。待修复完成后,需要再次使用CCTV检测设备检测修复效果。在修复管段中,除弯头外,其余位置应当连续光滑。

2.3 优势及局限性分析

传统的管道开挖修复技术对城市交通、环境及居民的影响十分明显,而翻转内衬修复方法充分利用了复合材料的性能及现代化的施工技术,克服了管道全线路开挖引发的问题,只需要在作业点处开挖很小的工作坑就可以施工,在对周围环境影响最小的情况下完成修复工作。避免了路面的反复施工,缩短了施工工期,大幅降低了经济费用,减少了环境污染等问题,特别适合于修复城区中不便明开换管的燃气管道。

内衬管表面的防渗膜是一层耐腐蚀兼具少量抗变形能力的材料,可以阻止管道内壁再次发生腐蚀。内衬管内层为热固性树脂作为基体的复合材料,加热固化后,可以填补管道内的缺陷,形成与管道内壁形状相同的光滑密封硬质衬管,降低了管道的断面损失,增大了过流能力。其施工和防腐性能不受旧管道已有缺陷的影响,特别适合于修复弯管和非圆截面管道。理论上,完全粘结的内衬管具有良好的抗腐蚀性能,在埋地环境中可以延长管道的再使用寿命30~50年^[9]。但是实际上,处在埋地环境中的管道不可避免地会受到土壤的作用,管道的使用寿命很大程度上取决于修复后期电保护的监控及维护。

翻转内衬法修复后的管道是损伤管道和内衬管

经固化粘结而成的复合结构,虽然内衬管具备一定的抗变形能力,但是就承载能力来说,内衬管不能独立承担载荷^[3],只能对损伤管道进行气密性的非结构性修复。也就是说,翻转内衬法的适用范围有一定的局限性,并非所有损伤管道都可使用翻转内衬法修复,对于损伤程度严重、安全裕量不足的管道,无法承受作用于其上的载荷,就不适于使用翻转内衬法修复。这就要求在实施修复前对管道进行适用性分析,评估管道的承载能力。而现有的评价方法均以长输管道为主,燃气管道的运行工况与长输管道不同,不能直接使用现有方法,所以应当基于燃气管道的运行现状,分析翻转内衬法的适用性。

3 适用性分析

应用翻转内衬法修复首先要评估损伤管道的适用性,综合分析管道的运行现状,根据管道的缺陷类型和载荷工况进行失效判定,确定损伤管道是否适于使用翻转内衬法修复。

3.1 缺陷特征

钢制管道作为传统的输气设施,在我国城镇燃气管道中占有相当大的比重^[8]。由于钢材的耐腐蚀性能差,受敷设环境和输送介质的影响,容易产生腐蚀缺陷。以北京市统计资料为例,管道泄漏是造成燃气管道事故的最主要原因,而腐蚀老化导致的泄漏事故占比最高,并且呈逐年增加的趋势^[10]。腐蚀缺陷按照分布位置可以分为内腐蚀和外腐蚀,内腐蚀的产生与输送介质的性质有关,我国燃气管道早期多用于输送煤气,输送介质中含有硫化氢、二氧化碳和少量氧气,使管道内壁产生均匀减薄。此外,土壤中的水分、沙石、细菌及杂散电流会破坏管道的外防腐层,造成管道外壁发生化学、电化学及微生物腐蚀,在管道外壁形成局部腐蚀,严重时会展形成腐蚀孔,造成泄漏事故。

3.2 载荷特性

埋地管道会受到多种载荷的共同作用,特别是对于城市燃气管道,出于工程建设的目的,常常需要敷设在交通道路下方,不仅会受到内压的作用,还会受到土壤和车辆等外载荷的作用。内压产生环向应力,引起管道发生膨胀变形,当环向应力超过材料的许用

极限时,管道会因丧失承载力而发生结构性破坏。外载荷会产生弯曲应力、引起管道横截面发生“椭圆化”变形,过大的变形会影响管道的正常使用,为了保证管道具有足够的刚度,就必须控制变形量。

内压和外载荷同时存在时,二者会形成一种相互作用的关系。对压力级别较低的管道,内压引起的环向应力和管道膨胀变形均较小,可以忽略内压的作用,此时外载荷对管道的影响占主导作用。随着压力升高,管道的膨胀变形和环向应力都会增大,膨胀变形会削弱外载荷引起的部分“椭圆化”变形,同时环向应力会与外载荷引起的弯曲应力叠加,两种载荷对管道的作用相当。当内压高达一定值后,内压的贡献会超过外载荷,成为主导载荷。

对长输管道,由于压力级别较高,无需考虑土壤、车辆等外载荷的影响。而燃气管道的压力级别较低^[11],最低为0.01MPa,最高不超过4MPa,当埋设在有车辆及其他动载荷作用的环境中,会存在外载荷的作用压力超过内压的情形,在进行适用性分析时不可忽略外载荷的作用。

3.3 失效判据

通过以上的分析可知,在燃气管道翻转内衬法的适用性分析中,对高压或无外载荷作用的工况,只需考虑强度条件,控制管道的应力,具有足够承载力的管道即可使用翻转内衬法修复。而对外载荷的压力作用超过内压的工况,不仅要考虑强度条件,还要考虑刚度条件,控制管道的横截面变形,防止管道因变形过大而影响正常使用。只有同时满足强度和刚度条件的管道,才能使用翻转内衬法修复。对此,需要确定合理的失效判据。

在强度评估方面,国内外标准的规定不同,美国和中国采用第三强度理论,加拿大和日本采用第四强度理论,二者均可用于塑性材料的屈服破坏失效预测,但使用第三强度理论更加安全,并且可以与管道的壁厚设计方法保持一致^[12, 13]。无外载作用或高内压管道的当量应力为内压引起的环向应力,有外载且作用压力超过内压的管道的当量应力为外载荷引起的弯曲环向应力与内压引起的环向应力的合应力。对当量应力不超过材料屈服强度的管道,具备足够的承载力。在刚度评估方面,有外载荷作用且作用压力超过内压时(即除去高压管道及埋设环境无车辆及其他动

载荷作用的管道), 需要验算管道的横截面变形。刚度条件的控制指标因材料而异, 一般认为钢管变形量达到直径的5%时, 管壁开始进入屈服状态, 但是为了保证管道安全运行, 国内外标准普遍采用3%作为钢管的径向变形极限^[13-15]。当外载荷引起的横截面变形小于该限值时, 认为外载荷引起的变形不会影响管道的正常使用。

对均匀腐蚀管道, 由于整个圆周方向的壁厚损失是均匀的, 可以按照初始壁厚为减薄后的完好管道来分析。管道的壁厚与环向应力、径向变形量均呈反比, 根据强度和刚度的失效判据可以计算出当前载荷工况下的最小减薄壁厚, 同时与管道的最小设计壁厚进行比较, 可以得到最小许用壁厚, 当均匀减薄管道的壁厚不小于最小许用壁厚时, 适用于翻转内衬法修复。对局部腐蚀管道, 目前尚未有可以直接采用的计算方法, 但是可以根据Spangler理论模型中的载荷假设理论, 建立有限元模型进行模拟。由于外载荷产生的弯曲应力沿管道的环向位置分布不均, 所以分析时要考虑腐蚀缺陷环向位置的影响, 当缺陷位于管道横截面水平方向左右两端外壁时, 内压引起的环向拉力与外载荷引起弯曲拉力共同叠加, 是局部腐蚀最危险的位置, 保守分析时可以按照最危险位置分布的腐蚀缺陷计算。当计算出的环向应力和径向变形量同时满足要求时, 适于使用翻转内衬法修复。

4 结论

翻转内衬法作为历史最久的非开挖修复技术, 因其施工量小、可修复范围广、环境污染低、再使用寿命长等优势, 在地下管道的修复中占有十分重要的地位。修复后的管道具有较好的防腐蚀性能。但是修复材料不具备承载能力, 只能作为气密性的防腐保护层, 这就要求修复前的损伤管道应当具有相当的承载力。所以, 需要在修复前对管道进行适用性分析。本文对燃气管道的运行现状进行了综合考虑, 确定了管道的主要缺陷特征及载荷特性, 提出了燃气管道翻转内衬修复适用性评估的腐蚀缺陷失效判据, 得到了以下结论。

(1) 长输管道的高压载荷条件决定了其失效不受土壤和车辆等外载荷的影响, 而燃气管道的压力级

别整体偏低, 会受到土壤和车辆等外载荷的作用引发刚度失效, 所以在燃气管道的翻转内衬法的适用性分析中, 需要考虑外载荷与内压之间的相互作用关系, 对管道的强度和刚度进行失效评估。

(2) 强度评估的失效判据采用第三强度理论, 既能保证管道的安全性, 又可与壁厚设计理论保持一致。对无需考虑外载的管道, 当量应力为内压引起的环向应力; 对外载荷作用压力超过内压的管道, 当量应力为外载荷引起的环向弯曲应力和内压引起的环向应力的合应力。对当量应力小于材料的屈服强度时, 认为管道的承载力足够, 适用于翻转内衬法修复。

(3) 刚度评估的失效判据采用直径的3%作为径向变形量的极限, 当外载荷引起的管道径向变形量未超过该限值时, 认为管道的变形量不影响正常使用, 适用于翻转内衬法修复。

(4) 对局部腐蚀管道, 需要借助有限元模拟对管道进行评估, 并且要考虑缺陷的环向位置。对均匀腐蚀管道, 可以采用理论方法按照剩余壁厚计算主导载荷作用下的最小减薄壁厚, 与设计壁厚比较后, 得到最小许用壁厚, 当管道剩余壁厚大于最小许用壁厚时, 可以使用翻转内衬法修复。

参考文献

- 1 王玉梅, 刘艳双, 张延萍等. 国外油气管道修复技术. 油气储运, 2005; 24(12): 13-16
- 2 蔡克. 含缺陷管道补强修复技术研究(硕士学位论文). 西安: 西安石油大学, 2014
- 3 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气管道非开挖修复更新工程技术规程: CJJ/T 147-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- 4 牛颖琦. 内衬燃气修复管的应力分析研究. 成都: 西南石油大学, 2016
- 5 李钦, 谭松玲, 王欣. CIPP翻转内衬技术在北京西三环高压燃气管线工程中的运用. 非开挖技术会议, 2014
- 6 北京市质量技术监督局. 城镇燃气管道翻转内衬法施工及验收规程 DB11/T 1136. 北京市质量技术监督局, 北京: 2014
- 7 牛松山. 国外管道内修复技术及我国翻转内衬(CIPP)修复工艺的发展. 管道技术与设备, 2003; 02: 22-24

北京市农村“煤改气”配套场站典型设计

□ 北京市燃气集团有限责任公司 (100035) 李持佳 邱迪

□ 北京优奈特燃气工程技术有限公司 (100031) 赵立春 肖勇 崔竞月 王壮 刘万波

摘 要: 针对北京市农村地区“煤改气”,对采用LNG与CNG供气进行供气方案、投资估算、占地面积等方面的对比。根据不同村庄的用气规模,对配套场站进行方案选择并且对不同方案作出典型设计。

关 键 词: 农村 煤改气 场站

1 引言

近年来,随着国家《大气污染防治行动计划》以及北京市实施细则《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》等的纷纷出台和逐步落实,北京市燃气集团积极响应政策的清洁能源改造计划,目前北京市农村“煤改气”已经进入攻坚阶段并取得了阶段性成果。

2 用气量计算

农村地区天然气主要用气炊事及壁挂炉采暖,用气不均匀系数采用北燃经发(2010)123号文件《关于印发天然气用气指标及不均匀系数的通知》,见表1。北京农村地区每个村庄家庭户数一般不超过1 500户,因此对小时高峰流量在 $100\text{Nm}^3/\text{h}\sim 15\,000\text{Nm}^3/\text{h}$ 的供气

8 张丽. 管状纺织复合材料及其在管道修复技术上的应用研究. 天津: 天津工业大学, 2006

9 张志川. 目前国内各种非开挖修复技术对比分析. 城市燃气, 2008; 12: 3-9

10 苗金明, 刘倩倩. 北京市地下燃气管网构成及其事故原因统计分析. 北京劳动保障职业学院学报, 2013; 7(2): 41-46

11 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气设计规范: GB 50028-2006. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 406

12 中华人民共和国住房和城乡建设部. 输气管道工程设计规范: GB 50251-2015. 北京: 中国计划出版社, 2015

13 中华人民共和国建设部. 输油管道工程设计规范: GB 50253-2014. 中国: 中国计划出版社, 2014: 165

14 国家经济贸易委员会. 钢质管道穿越铁路和公路推荐做法: SY/T 0325-2001. 中国: 2001: 44

15 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气管道穿越工程技术规程: CJJ/T 250-2016. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016