

管道复合补强修复技术

袁勇¹ 刘海峰² 姜世强³

(1. 四川科宏输气分公司石油天然气工程有限公司 2. 西南油气田分公司输气管理处 3. 成都克瑞斯科技发展有限公司)

袁勇等. 管道复合补强修复技术. 天然气工业, 2004; 24(11): 139~142

摘要 随着管道工业的发展, 管输公司一直希望寻找到一种更加经济高效、快捷、能永久性地恢复管体强度、保证管道安全运行的管道补强修复技术。文章介绍了当前国外管道复合修复技术的技术原理、产品开发及应用情况, 并结合美国天然气研究协会的研究报告, 进一步阐述了中高压天然气管道对管道补强修复技术的要求, 以及 ClockSpring 管道复合修复技术与传统的玻纤布复合修复技术的区别。这为我国石油天然气公司管道补强大修技术的选择提供了一种全新的解决方案。

关键词 输气管道 不停产 复合 修复 管道补强 技术

无论何种材质的管道一旦建成后, 都会连续不断地受到各种机制的侵袭和破坏。因此, 对于管输公司而言, 管道大修维护一直是一项非常重要的课题。尤其是随着管道检测技术的发展, 管道的维护管理已经逐步从事后抢险修复向事前预防修复发展。为了降低管道运行的风险, 延长管道的使用寿命, 管道公司必须对检测发现的管道缺陷进行修复。但是, 采用什么样的修复技术方案才能够永久性地恢复管体的强度, 保证管道的安全运行, 同时又对生产的影响最小, 一直以来都是管输公司所关注的焦点。

1980年, 美国已有了长达 40×10^4 英里 (64.3738×10^4 km) 的高压天然气集输管道。为了保证如此长的天然气管道的管体完整性, 管输公司投入了大量的维修费用。为了帮助管输公司降低管道大修成本, 美国天然气研究协会组成了一个研发团队, 成员包括美国西北大学、Battelle 气体研究所、应力工程服务公司等多家研究机构。该研发团队经过8年的工作, 开发出了一种全新的电化级单向纤维强化的塑性复合材料, 这就是今天被广泛应用的管道复合修复技术。

在复合修复技术出现以前, 管道公司主要采用传统的更换缺陷部位管道, 或者打金属卡箍等方法来修复存在缺陷的管道。但这些方法都存在着较多不足: 更换缺陷部位管道需要停产, 需要动用大型设备, 需要焊接作业, 同时也会给管输公司造成巨大的放空损失。因此, 管道复合补强修复技术的出现, 满

足了管输公司的需求, 使管输公司有了一种更加安全、经济、可靠的新的选择。

一、技术原理

1. 管道承压分析

管道的承压能力受多种因素的影响, 一般情况下, 可以使用以下方程来表示管道的承压能力:

$$p = (2 \times S \times t / D) \times F \times E \times T$$

式中: p 表示设计压力; S 表示钢管的最小屈服强度; t 表示管壁厚度; D 表示管径; F 表示设计系数; E 表示焊接系数; T 表示温度系数。

管道在运营过程中, 因受内压而存在圆周应力, 如果管壁表面某个部位受损或变薄, 那么受损部位将会承受比正常部位更大的压力, 甚至有可能超出安全极限发生爆管事故。

2. 复合修复技术的原理

复合修复技术就是将复合修复材料缠绕在存在缺陷的管道外表面, 与强力胶和填料一起构成复合修复层。修复完成后, 缺陷部位管道承担的部分应力就会传递到复合修复层, 从而使缺陷部位管道承担的应力始终处于安全极限之下, 保证管道的安全运行。

那么复合修复层承担的应力与缺陷部位管道承担的应力存在什么样的关系呢? 如何才能保证缺陷部位承担的应力处于安全极限之下, 对复合修复材料又有什么样的技术要求呢? 美国天然气研究协会

作者简介: 袁勇, 1971年生, 工程师; 1993年毕业于西南石油学院油气储运专业, 现任四川科宏输气分公司石油天然气工程有限公司总工程师。地址: (610215) 四川省成都市华阳。电话: (028) 85601584, 135181152592。E-mail: ssss@sss.sina.net

的研究证实:任何一种复合修复材料能否达到修复效果,主要取决于复合材料的抗拉伸强度和弹性模量。一旦抗拉伸强度和弹性模量确定,就可以精确预测复合材料的修复效果。

(1) 拉伸强度

对于中高压管道,要想保证管道修复层在恶劣的环境下安全运行 50 年以上,复合修复层的拉伸强度是一个非常关键的因素。在土壤环境中,复合修复材料的抗拉伸强度会随着时间而逐步下降,所以就要求复合修复材料在设计上必须确保有足够的机械强度,从而使其在使用 50 年后依然能够保持修复效果。复合修复材料抗拉伸强度下降的速率与所处的环境如潮湿度、温度、土壤特性等有关。美国天然气研究协会测试证实:要想确保复合修复材料在使用 50 年后抗拉伸强度依然在安全值之上(138 MPa),新产品的最小拉伸强度必须超过 310 MPa。

(2) 弹性模量

复合修复层承担的应力与缺陷部位管壁承担的应力,其间存在什么样的比值关系呢?美国天然气研究协会的研究结果证明:其比值等于两种材质弹性模量的复数之比。通常钢材的弹性模量近似为 207×10^3 MPa,如果复合修复层的弹性模量为 34×10^3 MPa,则缺陷部位管壁承压发生形变达到 1% 时,圆周应力将会完全传递到复合修复层,从而将缺陷部位管壁的形变控制在了安全形变范围内,保证了管道的安全运行。如果复合修复层的弹性模量小于这个数值,意味着缺陷部位管壁就必须承担更大的应力,结果将会造成缺陷部位管壁发生更大的形变,形变如果超出安全极限,将会造成安全事故。即使在安全极限之内,也必将影响管道的完整性,从而无法真正达到永久修复的要求。

二、技术路线选择

复合修复技术在发展过程中主要形成了两大系列:湿缠绕法复合修复技术和预成型法复合修复技术,这两种复合技术在复合材料和安装工艺上的区别如下。

1. 复合材料

湿缠绕法复合修复技术采用高密度玻纤布作为补强材料,在施工现场与环氧树脂复合,构成复合修复层。而预成型法复合修复技术所使用的复合材料是电化级纤维强化的塑性复合材料(FRP),两种材料有着本质的区别:① 湿缠绕复合修复技术所使用的玻纤布,使用玻璃纤维丝编织而成,价格便宜,只

有 50% 的纤维在管道圆周应力方向上,随着使用时间的增长,管道压力波动将会使经向玻璃纤维丝和纬向玻璃纤维丝互相影响,从而使复合修复层的强度迅速下降;② 预成型法复合材料采用电化级单向玻璃纤维丝在工厂严格按照比例与间苯二甲酸聚脂树脂等多种树脂成分复合而成,是一种全新的纤维强化复合材料,其所使用的电化级单向玻璃纤维丝,在 1200 °C 高温下拉制而成,每支纤维的直径为 10~25 μm ,拉伸强度高达 3400 MPa,每 4000 支纤维丝构成 1 个纤维束,每个复合套筒包含 150 束纤维,经过加工成型后已经形成了一种新的复合材料。

2. 安装工艺

湿缠绕法复合修复技术由操作工人把玻璃纤维布裁剪后现场与环氧树脂复合。复合过程受到作业环境、工人的技术熟练程度、工人的责任心等多种因素的影响。事实上,即使是同一个优秀的操作工人,第一次安装和第二次安装也不会完全相同。因为安装过程涉及的变量包括:玻纤与树脂的比例、树脂的饱和度、玻纤受力方向的调整、修复层的强度一致性、施工环境的差异等等。

这些变量的不稳定性直接影响修复效果,表现为:① 抗拉伸强度和弹性模量不稳定;② 安装过程中,因潮气侵袭影响的修复层使用寿命;③ 安装过程中,玻纤与树脂比例变化影响的复合修复层机械属性;④ 无记忆效应;⑤ 用户现场加工复合,修复过程受到现场很多因素的影响。

而预成型法复合修复技术由生产企业在工厂使用电化级单向玻璃纤维丝和乙烯基树脂等多种成分复合而成,所有的一切变量都在生产工厂中得到了严格控制。现场安装非常简单,任何一个用户,经过简单培训,都能完成现场安装。抗拉伸强度和弹性模量稳定,安装过程也不受环境影响。

3. 吸水性

吸水性也是一个非常关键的指标,它决定了复合材料抗拉伸强度下降的速度。美国天然气研究协会对复合修复材料所做的持久性测试考虑了最为恶劣的环境:温度 60 °C、pH 值 4~9、充分湿润的土壤环境。

玻纤布制成的复合材料,经纬向编织结构将有利于水分的吸收,从而对材料的持久性带来负面影响。复合结构不能存在任何杂质,否则也会有利于水分的吸收,对持久性会产生负面危害。

在第一次测试中,样本置于室温 23 °C 条件下 40 h,测试的结果为:预成型法复合修复材料层与层之

间的抗剪切强度为 69 MPa,湿缠绕法复合修复材料层与层之间的抗剪切强度为 47 MPa(表 1)。

表 1 正常情况下套筒层与层之间抗剪切强度 MPa

样本编号	ClockSpring	玻纤布复合修复技术
1	68.2	42.3
2	69.6	49.8
3	67.8	47.7
4	70.3	49.5
5	69.6	46.5
平均值	69	47.2
误差	1.08	3.04

在第二次测试中,将样本放置于沸腾的蒸馏水中 2 h,再次测试,结果预成型法复合材料层与层之间的抗剪切强度降到 63 MPa,变化很小。而玻纤布复合材料层与层之间的抗剪切强度下降了 50% 还多,降到了 21 MPa。这个结果证明:玻纤布复合材料的持久性是值得怀疑的,很显然,它不是一种永久性的修复技术(表 2)。

表 2 沸腾水中浸泡 2 h 后套筒层与层之间抗剪切强度 MPa

样本编号	ClockSpring	玻纤布复合修复技术
1	63.9	19.2
2	64	22
3	65	20.9
4	64.7	21.4
5	62.3	23.5
平均值	63	21.4
误差	2.8	1.6

事实上,在实际应用中,管道的周期性应力变化也会使玻璃纤维布的强度下降,影响到复合材料的持久性。因此,玻纤布复合修复材料不能用于高压管道的永久性修复,一般用于压力低于 3.4 MPa 的管道修复。

三、技术要求

(1)复合材料全新状态下的抗拉伸强度必须大于 310 MPa。

(2)复合材料杨氏弹性模量不得小于 3.4×10^4 MPa。

(3)复合材料必须经过权威部门长期可靠的工程测试和分析(实验室测试和现场测试),证明复合补强材料能够永久(使用寿命超过 50 年)恢复缺陷

部位管道的强度。

(4)复合材料安装过程无可变因素,安装质量一致性好。

(5)对阴极保护系统无影响。

(6)材料固化时间小于等于 3 h(常温下)。

(7)生产企业必须严格按照培训程序对安装人员和培训人员进行培训,并每年对安装人员和培训人员进行资格年审。

四、实际应用

ClockSpring 中高压管道复合修复技术自商业化以来,在世界上 65 个国家和地区已经成功地安装了 10 万套以上的产品。用户包括壳牌、埃克森、英国天然气公司、TRANSCANADA、TRANSMOUNTAIN、法国天然气公司等许多世界知名的管道公司。应用范围包括:①腐蚀或损伤程度小于等于 80% 的管道补强;(可用于运行压力高达 25 MPa 的管道)②堵漏(管道压力最高可达 7 MPa,泄漏孔直径最大可达 25 mm);③环缝焊接部位加固;④抑制正在孕育的管道裂纹;⑤浅海或海洋平台管道修复(可用于垂直竖立的管道修复);⑥管道支撑或悬挂部位加固;⑦弯曲部位的损伤或腐蚀修复。

在此简要介绍 ClockSpring 技术在法国天然气公司的应用实例。

1. 基本情况

法国天然气公司成立于 1946 年,其管理的高压天然气管网长度约 30000 km,管径从 80 mm 到 1100 mm。其中最早的管道建设于二战以后,管道埋深约 1 m。

2. 可选择的大修方案

在发现管道缺陷后,法国天然气公司决定:对存在缺陷的管道进行大修。可供选择的大修方案主要有:①不停产带压修复;②堆焊/补焊;③复合补强修复技术。法国天然气公司认为,第一种和第二种方法在现场实施技术难度很大,经过技术比较,法国天然气公司认为 ClockSpring 复合修复技术是一种非常理想的修复方案。

3. 技术分析

为了保证修复方案 100% 的安全可靠,法国天然气公司的技术研究部门对 ClockSpring 的技术方案进行了全面的技术分析和研究。

技术研究部门开发了全面的实验室和理论模拟程序,以达到以下目的:①通过系统全面的有效性检测,确定 ClockSpring 复合修复技术的应用范围;②

评估 ClockSpring 修复技术是否能用于管道表面凹陷或表面损伤的修复;③评估 ClockSpring 修复技术能否用于螺旋焊缝缺陷、内部腐蚀缺陷、环焊缝缺陷的修复。

4. 技术测试

测试工作分以下 9 部分:①研究测试范围确定;②全方位的测试;③测试条件下的数学模型设计;④数学模型的有效性;⑤在实际条件下的数学模型;⑥实验方案设计;⑦数学模拟;⑧结果的解释;⑨评估软件应用。

5. 测试结果

在对数学模拟的结果解释的基础上,技术研究部门开发了一个评估软件,根据所有的相关参数计算疲劳强度和爆破压力。使用这个软件,法国天然气公司对每一个缺陷进行了技术评估,确定是否能够使用 ClockSpring 复合补强修复技术对管体进行补强修复。

6. ClockSpring 技术的应用

最后,法国天然气公司选择使用了 ClockSpring 复合修复技术对存在的管道缺陷进行了修复。其中包括外腐蚀缺陷、表面机械损伤、内腐蚀缺陷等。甚至有些部位是其他技术无法修复的部位,如靠近阀门的部位等。

五、结束语

目前,管道复合修复技术刚刚才进入中国,已经有部分用户开始使用。中国石油西南油气田分公司输气管理处也对 ClockSpring 修复后的含缺陷管道

进行了静水压爆破试验,在同一环向上存在 3 个腐蚀程度高达 79% 的缺陷情况下,使用 ClockSpring 复合修复材料补强后,试验压力高达 31.8 MPa,而经过修复后的缺陷部位管道依然完好。这再次证实了 ClockSpring 复合修复技术是一项安全、可靠的修复技术。

参 考 文 献

- 1 Stephens D R, Kilinski T J. Field validation of composite repair of gas transmission pipelines. GRI 98/0032
- 2 Milkovich Scott M, Barlo Thomas J. Literature review on the electrical and mechanical properties of glass-fiber composite materials when exposed to gas-transmission-pipeline environments. GRI 92/0253
- 3 Stephens D R, Kilinski T J. Field validation of composite repair of gas transmission pipelines. GRI 94/0139
- 4 Stephens Denny R. Summary of validation of Clock Spring(R) for permanent repair of pipeline corrosion defects. GRI 98/0227
- 5 Lindholm U S, Kuhlman C J, Stephens D R *et al.* Long-term reliability of gas pipeline repairs by reinforced composites. GRI 93/0453
- 6 Kuhlman Chris J, Lindholm U S, Stephens D *et al.* Long-term reliability of gas pipeline repairs by reinforced composites. GRI 95/0071
- 7 Permanent composite repair of gas transmission lines DOT regulatory process and results

(修改回稿日期 2004-09-30 编辑 居维清)

杭州企业发电用上了天然气

拱墅区康桥科技经济园区的天然气供气项目现已部分开通,园内康园东一路西侧、康园中路北侧的浙江康永佳纤维有限公司天然气发电机组经联动试车,日前率先通气运行。浙江康永佳纤维有限公司是专业生产特种涤纶纤维的企业,生产工艺要求连续性生产,不能断电。为此,厂方通过多方论证考察和分析当前城市能源供应现状,决定采用天然气发电,再利用余热来供应制冷和采暖的综合系统,也就是国际上统称的区域微小型冷热电联产系统。今后,杭州市将向各大企事业单位推广这一系统项目,对缓解今冬本市用电将起到极大的作用。

(蒋静萍 摘自中国油气管道报 2004-11-15)