

榆林—济南天然气管道缺陷复合材料修复设计

李 天 成

中国石化天然气榆济管道分公司

李天成. 榆林—济南天然气管道缺陷复合材料修复设计. 天然气工业, 2012, 32(10): 78-79.

摘 要 目前国内尚无完善的设计规范和标准来指导对缺陷管道进行复合材料补强设计。国外较常见的设计方法是依托管道剩余强度评价, 使用等效强度方法进行补强。为此, 根据碳纤维复合材料管道修复补强技术原理和设计方法, 提出了模拟管道壁厚完全损失的保守设计方法。应用该方法对榆林—济南天然气管道进行了碳纤维复合材料缠绕补强修复和防腐作业, 采用绝缘材料进行垫底处理, 彻底杜绝了电偶腐蚀的可能性, 修复后管道恢复正常运行压力, 补强效果良好, 确保了补强设计的安全有效性。

关键词 榆林—济南天然气管道 管道缺陷 碳纤维 复合材料补强 管道壁厚 安全

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.019

榆林—济南天然气管道(以下简称榆济输气管道)工程是国家“十一五”重点工程, 线路全长 941.63 km, 设计年输量为 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为国家天然气干线管网重要组成部分。

在管道建设期间通球清管时, 榆济输气管道兔坂阀室上游 10 m 处发生了卡球现象, 后来在管道上开了一个 500 mm × 700 mm 的窗口, 才将清管球取出。在对管壁上的窗口进行修补时, 采取了焊接加强板的方式。使用焊接方式对管道进行补强, 焊缝周边容易发生应力集中, 此外, 如果焊缝中存在裂纹、未焊透、未熔合等缺陷, 这些缺陷也可能在较高的应力作用下导致焊缝断裂失效。该段管道周边人口居住密度较大, 管道一旦发生破裂失效, 将对周边环境造成严重影响, 并造成巨大的人身伤亡和经济损失。

纤维复合材料维修补强方法是对上述潜在风险点进行补强加固的最佳选择。该技术利用纤维材料在纤维方向的高强度特性, 使用粘结树脂在服役管道外包覆一个复合材料补强层, 以恢复含缺陷管道的服役强度^[1]。其优点是不用在服役管道上进行焊接, 避免了焊穿和发生氢脆、冷脆的可能, 极大地降低了操作的风险性, 并且可以对管道进行带压修复^[2], 保障管道不间断运行。

碳纤维复合材料补强技术是纤维复合材料修复技

术的一种, 碳纤维材料因其具有优异的抗拉强度、弹性模量和良好的施工性能而在油气管道焊缝缺陷维修补强中得到了广泛的应用。

到目前为止, 国内尚无完善的设计规范和标准来指导对缺陷管道进行复合材料补强设计。国外较常见的设计方法是依托管道剩余强度评价, 使用等效强度方法进行补强。在采用碳纤维复合材料补强技术对榆济输气管道焊缝进行补强时, 笔者提出了模拟管道壁厚完全损失的保守设计方法, 确保了补强设计的安全有效性。

1 管道纤维复合材料补强原理

管道被施以内压时, 管道发生径向膨胀且管壁产生环向拉伸应力。在管壁减薄区域(如腐蚀坑), 由内压引起的径向凸起、环向应力、应变比正常壁厚区域要严重, 当径向凸起达到一定程度时, 该缺陷处将发生破裂失效和泄漏。复合材料修复技术利用增强纤维和基体树脂在管道外形成复合材料补强层, 分担管道承受的载荷, 限制管道缺陷处由内压引起的径向膨胀和环向拉伸应力, 从而达到对缺陷补强的目的, 以恢复管道的正常承压能力。

碳纤维复合材料管道修复补强技术由高强度碳纤维、填平材料以及高性能粘结剂 3 部分组成。在缺陷

修复时,首先利用填平材料对缺陷进行填平处理,然后在管道外缠绕碳纤维与粘结剂所组成的碳纤维复合材料。碳纤维复合材料固化后具有极高的抗拉强度和弹性模量,它将通过具有抗压能力的填平树脂限制缺陷处的径向膨胀变形,降低缺陷处的拉伸应力,实现对管道缺陷的补强修复。

近年来,为解决碳纤维复合材料补强潜在的电偶腐蚀问题,广泛采用绝缘垫层的技术解决方案。该绝缘垫层隔绝了碳纤维与钢管的直接接触,最大限度地消除了电偶腐蚀的可能性。

2 复合材料补强设计方法

在管道安装以及维修强度设计中,所运用最多的强度准则是环向应力准则。GB 50251—2003《输气管道工程设计规范》^[3]主要以环向应力作为强度校核的标准。比如对于一级地区,管道的强度设计系数为 0.72,即管壁的环向应力不应超过管材屈服强度的 72%。在纤维复合材料补强设计中,也采用了环向应力的设计方法。

在利用碳纤维复合材料对含缺陷管道进行维修补强时,环向应力设计要求和管道维修补强处剩余壁厚与碳纤维复合材料的混合承压能力达到最大允许操作压力的两倍,最大允许操作压力对应于管材环向拉伸应力达到屈服强度的 72%。该设计原理表达如下:

$$p_{burst} = p_{rest} + p_{wrap} = 2p_{MAOP} = 2 \times 72\% p_{SMYS} \quad (1)$$

式中 p_{burst} 为静水压试验爆破压力,MPa; p_{MAOP} 为最大允许操作压力,MPa; p_{SMYS} 为管材中环向应力达到屈服强度所对应的内压,MPa; p_{rest} 为腐蚀区域剩余壁厚所对应的极限内压,MPa; p_{wrap} 为补强材料所对应的极限内压,MPa。

缺陷处剩余壁厚的承压能力按下式计算:

$$p_{rest} = k_{corr} \left(\frac{2\sigma_{ult}t}{D} \right)_{pipe} \quad (2)$$

式中 t 为管道壁厚,mm; D 为管道外径,mm; σ_{ult} 为管材的抗拉极限,MPa; k_{corr} 为缺陷的强度降低系数,其计算方法参见 ASME B31G—2009《用于测定受腐蚀管道剩余长度的手册标准》以及 Kiefner^[4] 所发表的文章。

$$k_{corr} = \frac{1 - \frac{d}{t_p}}{1 - \frac{d}{M \cdot t_p}} \quad (3)$$

式中 $M = \sqrt{1 + \frac{0.8L_{defect}^2}{D_p \cdot t_p}}$; d 为腐蚀缺陷深度,mm; t_p 为管道壁厚,mm; L_{defect} 为腐蚀缺陷轴向长度,mm; D_p

为管道外径,mm。

按照环向应力设计准则,有如下关系:

$$p_{burst} = k_{corr} \left(\frac{2\sigma_{ult}t}{D} \right)_{pipe} + \left(\frac{2\sigma_{cf}t}{D} \right)_{wrap} \quad (4)$$

式中 σ_{cf} 为补强材料的抗拉极限,MPa。

由式(1)、(4)可计算得到碳纤维的厚度为:

$$t_{wrap} = \frac{D_p}{2\sigma_{cf}} \frac{1}{X - \frac{1}{2\sigma_{cf}}} \quad (5)$$

式中 $X = 2 \times 0.72 \frac{2\sigma_y t_p}{D_p} - k_{corr} \frac{2\sigma_{cf} t_p}{D_p}$; σ_y 为管材的屈服强度,MPa。

在上述公式中,为了计算方便起见,补强材料的抗拉强度和厚度取碳纤维材料的抗拉强度和单层理论厚度。

在确定碳纤维材料的单层厚度后,即可确定碳纤维补强的环向缠绕层数。在管道承受较大轴向拉伸载荷的区域可考虑轴向铺设碳纤维复合材料以进行轴向加固。

3 输气管道现场补强应用

设计案例中的榆济输气管道兔坂阀室处管道材质为 X65,其额定最小屈服强度为 448 MPa,管道壁厚为 14.2 mm。假设管道补板处的管体金属壁厚全部损失,利用碳纤维复合材料补强的方法弥补管体环向强度。由式(5)可计算得到环向补强层数为 8.19 层,进一步取整为 9 层。

依据上述设计结果,对榆济输气管道进行了碳纤维复合材料缠绕补强修复和防腐。在补强修复时,采用绝缘材料进行垫底处理,彻底杜绝电偶腐蚀的可能性。修复后管道恢复正常运行压力,补强效果良好。

4 结论

1)随着管道完整性管理理念在我国的逐步推广,油气输送管道维修过程的安全性和经济性要求也越来越高。碳纤维复合材料补强技术是一种快速、安全而经济的管道修复技术,必将在我国的油气输送管道维修补强中得到越来越多的应用。

2)现阶段没有成熟的复合材料补强设计规范或标准指导管道缺陷的复合材料维修补强。笔者提出的补强管道混合承压能力设计方法可以用于承压管道的复合材料危险补强设计。

3)建议对碳纤维复合材料维修补强的应用范围和应用条件进行进一步的研究,以更好地指导复合材料维修补强作业。

(下转第 85 页)

进行了一些改进,包括微量减小了折流板间距、额外增加了支持板、增加了管壁厚度、改变了布管方式、改进了密封条形状、使用了进口气体分布器等。所有的改进措施都委托了第三方进行评估,包括基于 CFD 的流场分析和管束振动评估等。此外,针对可能对传热和流动特性产生的影响重新进行了设计修正。

5 结论和建议

1)对适用于多股流传热的 SWHE 和 PFHE 进行了应用对比分析,PFHE 具有结构相对紧凑、传热效率较高等特点,但在可靠性、抗热冲击负荷、浮式 LNG 的适应性等方面表现较差。国际上存在着 PFHE 大型化和 SWHE 小型化的趋势。在我国的中小型 LNG 装置中,使用 SWHE 作为 MCHE 尚属空白。

2)以 Technip 和 Wieland 合作开发的 GEWA-PB 和 GEWA-KS 日益成为 LNG 工厂关键换热器的优选方案。过去 10 年共有超过 50 台套强化传热管换热器在应用中表现出良好的热力性能和安全性能。

3)对直接冷却法和间接冷却法进行了技术对比,证明了直接海水冷却法的优势,同时从全寿命周期的经济性和可靠性来看,选择钛材作为主制冷剂冷凝器和压缩机级间冷却器具有明显的优势。

4)分析了实际混合物制冷剂的冷凝过程,介绍了 Hammerfest LNG 工厂基于实际冷凝过程和机械可靠性对使用的螺旋折流板换热器进行结构改进的措施。

5)中国在 LNG 工厂的换热技术上应着手以下几个方面的工作:①开展基于 SWHE、处理规模为 $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 装置 MCHE 的研究;②开展基于实际工质下高效冷凝管和蒸发管的传热与流动研究;③系统研究直接冷却法和间接冷却法对 LNG 装置的影响,加大整个装置范围内材料及设备对海水的适应性研究;④加大钛高效管的研究,结合壳程纵向流动的研究和高效传热元件的利用,开发出具有良好热力性能和机械可靠性的实际混合物制冷剂冷凝器。

参 考 文 献

- [1] 付子航,宋坤,单彤文. 空气热源式气化技术在大型 LNG 接收终端的应用[J]. 天然气工业,2012,32(8):100-104.
- [2] 严平,曹伟武,钱尚源,等. 新型 LNG 加热气化装置的结构设计及试验研究[J]. 天然气工业,2011,31(6):98-102.
- [3] 严平,曹伟武,钱尚源,等. 新型烟气自击回旋湿式 LNG 气化装置的研究设计[J]. 天然气工业,2011,31(1):86-89.
- [4] 陈永东,吴晓红,周兵. LNG 缠绕管式换热试验研究中的热物性计算方法[J]. 天然气工业,2011,31(6):92-97.
- [5] JOHN B S, DAWN L R, ERIC D N, et al. LNG process selection considerations for future developments[C]// LNG-16 Conference. London: International Trade and Events (ITE) Group Plc, 2010.
- [6] MARCUS L. A review of world LNG technology evolution with focus on large train sizes[C]// LNG China 2011 Conference. Beijing: China Huanqiu Contracting & Engineering Corp. (HQC), 2011.
- [7] HEINZ C B. Process design options on small & medium size LNG liquefaction plants[C]// LNG China 2011 Conference. Beijing: China Huanqiu Contracting & Engineering Corp. (HQC), 2011.
- [8] 陈永东,陈学东. LNG 成套装置换热器关键技术分析[J]. 天然气工业,2010,30(1):96-100.
- [9] THOMAS L, BRIGITTE P. Dual enhanced tubes for the hydrocarbon processing industry - from debottlenecking to grassroots[C]// LNG-16 Conference. London: International Trade and Events(ITE) Group Plc, 2010.
- [10] THOMAS C. Direct seawater cooling in LNG liquefaction plants[C] // LNG-16 Conference. London: International Trade and Events Group(ITE) Plc, 2010.
- [11] PETERSEN J, FREDHEIM A O, ORMBOSTAD H. Experience with water cooled mixed refrigerant condensation [C] // LNG-16 Conference. London: International Trade and Events(ITE) Group Plc, 2010.

(修改回稿日期 2012-08-06 编辑 何 明)

(上接第 79 页)

参 考 文 献

- [1] 路民旭,陈迎锋,董绍华,等. 管道维修补强技术及其发展趋势[J]. 油气储运,2005,24(增刊):129-132.
- [2] American Society of Mechanical Engineers. PCC-2 2006 Repair of pressure equipment and piping [S]. New York: ASME, 2006.

- [3] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB 50251—2003 输气管道工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- [4] KIEFNER J F, VIETH P V. New method corrects criterion for evaluating corroded pipe[J]. Oil and Gas Journal, 1990, 88(9):56-59.

(修改回稿日期 2012-08-08 编辑 何 明)