

管道修复用复合材料的研究进展*

徐喻琼 游敏 郑小玲

(三峡大学机械与材料学院, 宜昌 443002)

摘要 在民用建筑及航空领域, 复合材料修补已成为一种有效的修复补强技术; 将其应用到管道修复中, 又形成了无开挖、速度快、效果好的管道先进修复技术。综述了管道修复用复合材料的研究进展, 重点介绍了以纤维增强聚合物(FRP)为主体的管道修复材料及相关技术的进展。

关键词 复合材料 管道修复 纤维增强聚合物

Development of Fiber Reinforced Composite for Pipe Repair Purpose

XU Yuqiong YOU Min ZHENG Xiaoling

(College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002)

Abstract Composite repair technology has proved to be very effective for repairing damaged structural components in civil engineering and aeronautical field. It is also an advanced pipe repair technology. This paper summarizes some methods of repairing and rehabilitating pipes and evaluates their present situation and progress. Particular attention is paid to the application of the fiber reinforced polymer.

Key words composite, pipe repair, fiber reinforced polymer

0 前言

因管道具有输送成本低、效率高、建设周期短、占地少、安全、无污染、可穿越各种地域和实现自动化输送等特点, 广泛应用于供水、输气、输油等领域。但在环境和所输送介质的作用下, 管道(特别是钢制管道)会逐渐发生化学、电化学腐蚀, 极易出现强度降低、腐蚀穿孔、裂纹等缺陷, 导致管道运行的安全性下降, 最终引发泄漏事故。为此美国运输部规定, 当管道运行压力超过材料屈服强度的 40% 时, 必须对管道的缺陷及各类损伤采用合适的方法进行修复^[1]。

对金属管道来说, 焊接是一种较为成熟的修复技术。但采用现场焊接修复措施时, 有一些问题不可避免, 如焊补影响管道运行的安全性、修补费用高、输送管道在修补期间有时需要停止运行、管内油气需要排空、修复操作十分困难等。随着材料性能的提高, 性能的稳定、重复性、可靠性的实现以及制备工艺的完善及低成本化, 使复合材料修复技术拓宽了其应用领域。纤维增强复合材料最初主要用于建筑物修复和补强, 在压力容器和管道修复方面的研究始于 20 世纪 70 年代, 90 年代以前主要用于气体输送管线的修复^[2]。

聚乙烯材料具有抗化学腐蚀和使用寿命长的特点, 且易于连接。例如高密度聚乙烯(HDPE)材料所制备的 HDPE 管道具有耐腐蚀、强度高、重量轻、寿命长的特点, 广泛用于制作工业、城市燃气输送及市政排水管道。以聚烯烃材料制作内衬修复管道时, 可实现长距离、无开挖或少开挖修复, 同时改善管道内层腐蚀性能, 不仅有利于环境, 费用低, 而且还可显著降低管道接头数量^[3]。

1 国外的研究和应用现状

FRP(纤维增强聚合物)因其独有的补强和修复能力, 近年来迅速地进入民用工程和航空结构的修复和补强领域^[4~6]。根据增强聚合物的不同, 管道修复中可用的 FRP 有: 玻璃纤维增强聚合物(GFRP)、碳纤维增强聚合物(CFRP)、聚乙烯纤维增强聚合物(PFRP)、芳族聚酰胺纤维(AFRP)等。碳纤维增强聚合物的强度较高、价格昂贵。部分玻璃纤维增强聚合物的强度已逐渐接近碳纤维增强聚合物, 且价格便宜, 不易形成腐蚀电池, 应用较多。FRP 管道修复材料与传统的管道修复材料相比具有如下优点: ①重量轻、强度高、耐腐蚀性强、耐久性好, 便于运输, 可裁剪、安装成型速度快, 在大型管件修复中具有优势; ②修复管道所需设备简单, 不需移动管道, 甚至可实现无开挖修复, 操作过程中无明火、高压, 安全性高; ③能有效提高损伤管段的刚度、静强度, 减低裂纹尖端的应力强度因子, 不需对原结构开口或切割, 不会形成新的应力集中源, 有利于提高疲劳性能; ④修复后, 管径不会明显减小, 在某些情况下, 经修复的管道因内壁涂层更光滑而减小摩擦, 使管道输送量增加^[7]。

将 FRP 用于管道修复是研究人员近年来引用的全新观念和初步尝试, 在实验和应用中都取得了很好的效果。采用 FRP 修复管道时, 所采用的主要施工技术有套袖、缠绕、预制模等。

1.1 套袖(slip lining)

套袖即管道外部安装复合套管, 大多采用环氧玻璃钢(E/GFRP)套管, 主要用于各类钢制管道上缺陷的修复, 特别是形状不规则的管段, 且能有效抑制内腐蚀过程的破坏。环氧钢壳套在管道上, 且与管道保持一定环隙, 环隙的两端用胶封闭, 封闭

* 湖北省教育厅科研计划重大项目(2003Z001)

徐喻琼: 女, 1974 年生, 硕士研究生 游敏: 男, 通讯联系人, 1958 年生, 博士, 教授

空间内灌注环氧砂浆构成复合套管,对管道缺陷进行补强。英国天然气公司于1988年将该技术成功地用于修复天然气管道,具有对管线运行影响小、间隙可以在较大范围内调整、施工灵活性强的特点,可修复腐蚀、裂纹、扭曲或压痕、不规则的焊道等各类缺陷,同时使腐蚀过程得到延缓^[6,9]。在实际工程中,该技术已在最大口径1067mm的管线上成功应用,最长的套管组在原油管线上为14m,在天然气管线上则达20m。

1.2 缠绕(winding)

FRP缠绕修复更多地用于建筑结构(如梁、桥墩)的损伤修复和补强^[5,10],近年来开始用这种方法进行管道修复和补强^[11],如图1所示。

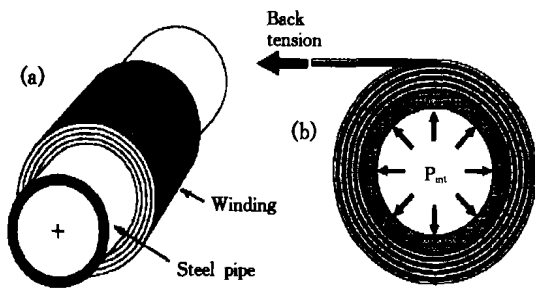


图1 纤维缠绕修复管道示意
(白色为复合材料,黑色为胶粘剂)

已有文献报道,将环氧树脂^[12~14]、丙烯酸酯^[15,16]等胶粘剂用于供水、煤气管道的修复中,但在使用时要对胶粘剂进行改性处理。FRP缠绕后虽不能完全中止腐蚀进程,但能显著降低腐蚀的速率,有效地保护易腐蚀部位。不仅能达到从外部补强管道的目的,还能使管道所受的径向正应力转变为机械紧固力,失效模式从未缠绕时的弯曲失效转为缠绕后的拉伸失效^[17],比单独涂覆胶粘剂的修复效果更好。引起研究人员普遍关注的重要课题是界面的胶接强度评定和载荷转移特点,目前的成果主要集中在应力分析和失效机制的研究方面^[18]。

FRP用于修复时一般为2~4层,可视损伤情况和腐蚀环境,适当增加缠绕层数,达到最佳效果^[5]。

缠绕修复的关键设备是缠绕机。当修复普通管道时,缠绕机牵引胶带旋转并包覆管道,用火焰或激光束将复合材料带加热到树脂熔化温度以上。如输送介质为天然气、油料等特殊介质时,将会遇到以下一些特殊困难:管道不能旋转;由于安全原因,火焰和高压气瓶不能靠近待修复的管道;激光束加热装备不能在现场使用等,此时必须改进已有的缠绕机。文献^[11]报道了适用于天然气管道修复的特殊场合所开发的一种简单而实用的缠绕机。该缠绕机可用轻型卡车运输,现场安装,便于管道维修。缠绕时,复合材料带的预张力约为1500N,传送速度为69m/min,压敏胶层的厚度为0.5mm,圆周张力转变为径向应力,与气体对管道的内压力平衡,可实现室温铺设和在役修复。

FPR修复的耐久性是评价修复效果的关键指标。研究结果表明,若修复后的结构仍处在复杂的腐蚀环境中(特别是处于较为潮湿的环境下时),FPR的力学性能会大大降低。

Frassine^[11]用纤维聚合物和压敏胶粘剂缠绕损伤天然气管道,取得了很好的长期修复效果。分析了多层缠绕时每层的受力情况,用常应变试验测试了缠绕带和胶粘剂的时间、温度特性,在考虑材料非等温粘弹性的基础上建立了缠绕修复的理论模型,模型对修复强度的预测与实验结果较为吻合。当采用刚性好的

的胶粘剂配之以时间依存性(time-dependent)较弱的缠绕带时,可获得经历50年使用后的腐蚀速率从20%降为10%的效果,对缠绕修复的选材提供了一定的思路。

Toutanji^[19]以钢管为研究对象,分析了FRP缠绕修复的优点,建立了应力模型和圆周应力曲线,并用该模型研究了管壁施加不同应力时引起的作用效果和FRP对损伤管圆周拉伸应力的影响。结果表明:与GFRP和AFRP相比,CFRP能更好地提高管道的内压力,明显改进修复效果、耐久性,改善腐蚀特性。虽然在对FRP聚合材料与钢接触的研究结果中还未发现有可见缺陷,但由于用CFRP修复钢管时已发现管道易于腐蚀,仍然要求在采用FRP修复损伤钢管时,管壁必须无腐蚀,并涂覆防腐涂层以避免FRP和钢管的接触。

文献^[20]中给出了缠绕修复的测试程序,用以测试Armor Plate管道缠绕法(APPW)修复腐蚀和机械损伤管道的可靠性。Armor Plate公司于1997年12月用爆管试验测试了经APPW修复的各种缺陷管道(名义直径约为152mm),进行了大量试验以解决管道腐蚀修复、增加疲劳寿命及材料性能等问题。试验结果表明,Armor Plate管道缠绕法是修复腐蚀和机械损伤管道的可行方法,经循环压力试验得到的失效数据说明,该法使修复管段的疲劳寿命提高了3倍。为确保安全和便于安装,Armor Plate公司用表格形式给出了系列安装规范,对一定腐蚀深度和长度下缠绕层数进行了详细说明。除了管道修复外,文献^[20]中还提出了一种Aqua缠绕(aqua wrap)堵漏法。

1.3 预制模(preforming mold)

预制模树脂注入成型(resin transfer molding, RTM)是一种近年来在国内外普遍受到重视的复合材料成型工艺^[19,21~25],也是一种较为先进的修复技术。实施时先将FRP材料做成合适的骨架,通过检修孔将其置入待修复的管段,再注入树脂,使管道得以修复。由于预制模树脂注入成型RTM可在指定位置用纤维复合材料建造大型复杂的三维各向异性结构,且制造成本低,故可用于大型地下管道的修复和补强^[26]。Lee等^[27]通过如图2所示的预制模树脂注入成型方法,将玻璃纤维做成丝网状,用两层防水薄膜包覆,制成修复预制骨架,在其内注入不饱和树脂进行管道修复和补强。整个修复过程在检修孔内便可完成,施工效率高。试验结果表明,经RTM工艺修复的管段,其承压能力提高约15%。

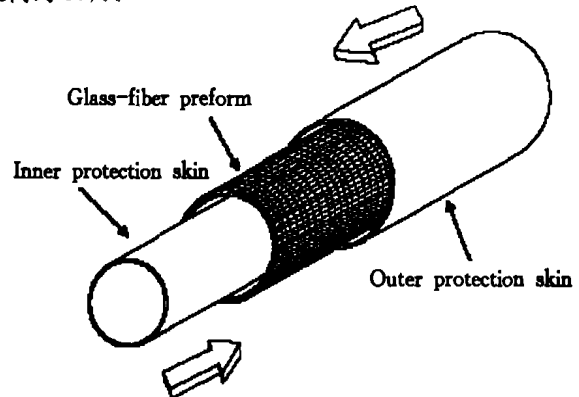


图2 预制模树脂注入成型(RTM)示意图

密封预制模的两端,选用在常温下能快速固化的树脂。采取毛细管、真空泵等措施(如图3)排除树脂固化产生的水及其他低分子产物。修复的质量取决于树脂注入的情况和固化过程的控制。

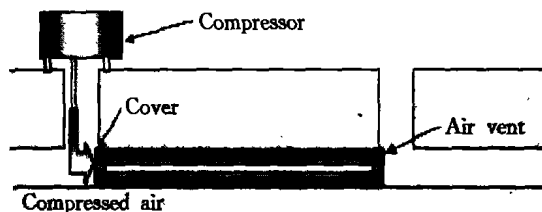


图3 RTM树脂固化控制示意图

2 国内应用现状

复合材料的性能使其在修复技术中有了广阔的用途,我国已将其用于混凝土^[28]及金属部件^[29]上,但“一焊、二补、三换”的传统管道修复思路,加之复合材料本身成本较高,在一定程度上制约了复合材料在管道修复中的广泛应用。我国目前用于管道修复的材料以聚乙烯居多,其次为玻璃钢。以FRP为主体的管道修复技术的成就主要集中在玻璃钢套袖方面,已开发了NCF玻璃钢内衬修复技术,采用无纺布、环氧树脂等特种材料,成功地修复了已穿孔、腐蚀的管道。用FRP玻璃钢修复和补强油气输送管道缺陷的应用始于20世纪80年代末,如华东输油局已将玻璃钢用于防腐、补强,在 $\Phi 377\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的濮临线上进行了工业性试验^[9]。而在缠绕修复技术的研究和应用方面,虽然国内也开展过一些研究^[24,25],但尚未见在管道修复工程实践中应用的相关报道。预制树脂注入成型技术的研究和应用工作在国内尚未开展。

3 研究方向与趋势

随着管道修复需求量的增加,各种管道输送公司都在积极寻求更加安全、经济、简捷的修复方法,用于管道修复的复合材料的研究与开发正越来越受到重视,具有很大的发展空间。今后的研究工作应注意以下问题。

(1)管道修复多为野外作业,需进一步开发适于野外、恶劣环境中使用的新型FRP复合材料,研究影响其性能的主要因素;注意对修复过程、修复期间运行成本进行综合分析,降低FRP复合材料修复管道的成本,提高其性能/价格比,营造出有利于推广应用FRP复合材料修复管道的外部环境。

(2)管道修复用复合材料的研究包括纤维网格模型和树脂体系。通过改变纤维网格制作预浸料或预制模型,可明显地影响修复结构的应力分布和承载情况。应研究适于不同条件下修复用的复合材料,开发新型材料。修复用的树脂体系除粘接力强、机械强度高、耐腐蚀外,还需具有合适的粘度、韧度和固化收缩率,使其固化过程易于控制。要研究基体树脂的改性和固化工艺问题,有效地控制树脂基复合材料固化时的内应力^[30]。特别是在采用不同树脂基体和FRP特性后,一定要进一步深入研究其对管道修复部位的应力分布有何影响。

(3)注重研究与管道修复复合材料应用相关联的修复技术,除修补增强的3种施工技术之外,还应开展管道表面处理和固化工艺优化方面的研究,以形成复合材料修复管道的完备技术体系。

(4)借助有限元分析方法或计算机模拟,对修复、固化过程及内应力的状况作预测和分析。对经修复的工程结构实施有效

监测,提高现场检测水平,积累相关数据以建立数据库,为制定相应的设计、安装标准或工艺规范奠定基础。

用于管道修复的复合材料在我国有着广阔的应用前景,而相关材料、相应施工技术的研究与开发、技术人员的培训和配套施工设备的研制是提高我国管道修复技术水平关键环节。随着复合材料工业技术的进步、生产规模的扩大及生产成本的下降,复合材料在管道修复领域中的应用将进一步扩大。

参考文献

- 1 True W R. Gas-pipeline Repairs. Oil & Gas J, 1995, (2): 54
- 2 白真权,王献桢,孔杰. 石油矿场机械, 2004, 33(1): 41
- 3 牛松山. 管道技术与设备, 2003, 2: 22
- 4 Neale K W. Prog Struct Eng Mater, 2000, 2: 133
- 5 Sen R. Prog Struct Eng Mater, 2003, 5: 99
- 6 徐建新,刘艳红,周焯,等. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): 96
- 7 Fortner B. Civil Engng Mag, 1999, 6: 42
- 8 Kiefner J F. Pipeline & Gas J, 1996, 1: 1
- 9 廖达伟. 管道技术与设备, 1996, 2: 17
- 10 Wootton I, Spainhour L, Yazdani N. J Composites Construction, 2003, 7: 16
- 11 Frassine R. Adv Polym Techn, 1997, 16: 33
- 12 王利华,龙光芝. 粘接, 1996, 17(5): 37
- 13 常世清,李勇. 石油炼制与化工, 1999, 30(4): 64
- 14 罗道成,易平贵,陈安国. 煤化工, 2002, 101(4): 21
- 15 王利华,龙光芝. 中南民族学院学报(自科版), 1996, 15(2): 13
- 16 杨斧钟,陈明凤,李建曾. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(1): 64
- 17 Jones R, Hanna S. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 28: 125
- 18 Meniconi L C M, Freire J L F, Vieira R D, et al. Proc of the Inter Pipeline Conf IPC, 2002, B: 2031
- 19 Toutanji H, Dempsey S. Thin-Walled Structures, 2001, 39: 153
- 20 Alexander C, Wilson F. Pressure Vessels and Piping Division, 2000, 409: 27
- 21 Kang M K, Lee W I. Polym Comp, 1999, 20(2): 293
- 22 Skordos A A, Kahnanas P I, Partridge I K. Measure Sci Techn, 2000, 11: 25
- 23 Diallo M L, Gauvin R, Trochu F. Polym Comp, 1998, 19(3): 246
- 24 张少春,陆关兴,黄恂,等. 玻璃钢/复合材料, 1996, 6: 1
- 25 汪明,张佐光,胡宏军,等. 玻璃钢/复合材料, 2002, 3: 38
- 26 Mallick P K. Fiber-Reinforced Composites. New York: Marcel Dekker Inc, 1988. 3
- 27 Lee D G, Chin W S, Kwon J W, et al. Composite Structures, 2002, 57: 67
- 28 张凤翻,雷兴华,张雯婷. 高科技纤维与应用, 2002, 27(5): 17
- 29 邢素丽,曾竟成,肖加余. 玻璃钢/复合材料, 2003, 3: 39
- 30 游敏,郑小玲. 连接结构分析. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004. 33

(责任编辑 张 敏)