

碳纤维修复技术在局部减薄缺陷管道中的应用研究

孟祥进*, 吴佳琦, 施哲雄, 蒋晓东

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: 针对含有腐蚀、擦伤等局部减薄缺陷的管道, 探究了碳纤维修复的原理及应用。在理论计算分析的基础上, 通过爆破实验验证了碳纤维材料对含缺陷管道补强的可行性, 并讨论了包裹层数对补强的影响。

关键词: 碳纤维; 玻璃化温度; 含缺陷管道; 爆破试验

中图分类号: TQ050.7

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)08-0144-03

Application of carbon fiber reinforcement technology in pipe with local thinning defects

MENG Xiang-jin*, WU Jia-qi, SHI Zhe-xiong, JIANG Xiao-dong

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: For pipe with local thinning defects such as external, mechanical damage, etc., the principle and application of carbon fiber reinforcement technology are discussed. According to the theoretical analysis and bursting test results, the feasibility of CFRP technology are proved and wrap levels effects are also discussed.

Key words: carbon fiber; glass-transition temperature; defect pipe; blasting experiment

碳纤维修复技术分为两大类: 干缠绕法和湿缠绕法。其中湿缠绕管道修复技术主要是由碳纤维、聚合物基体、环氧底漆以及填缝剂 4 部分组成。利用涂敷在缺陷部位的高强度填料, 以及管体上和纤维材料层间的强力胶, 将作用在管道缺陷部位的应力均匀地传递到复合材料修复层上, 合理分布应力, 从而起到补强的作用^[1]。

1 碳纤维复合材料的抗拉强度测试

碳纤维有多种编织方式, 在管道修复技术上, 应用最广泛的是单向碳纤维布和双向平纹碳纤维布。当含缺陷的管线不长, 管线本身就有着很好的抗弯能力, 经济性更好的单向碳纤维布就更加适用^[2]。

参照 GB/T 9979—2005 纤维增强塑料高低温力学性能试验标准, 选取常温、60、80、100、120、140、160、200℃ 8 组温度分别对 12 K 单向碳纤维复合材料 (每个温度 5 个试样) 进行拉伸测试, 抗拉强度的测试结果如表 1, 碳纤维试样在不同温度下的断裂情况参见图 1。

表 1 碳纤维拉伸性能试验数据处理结果

测试温度/℃	平均值 \bar{x} /MPa	标准偏差 S	离散系数 C_v /%
常温	1402.71	43.562	3.105
60	1301.73	41.289	3.171
80	1275.38	23.215	1.803
100	1162.94	55.043	4.733
120	1029.04	23.854	2.318
140	1009.07	24.964	2.473
160	958.63	26.517	2.766
200	893.26	12.819	1.343

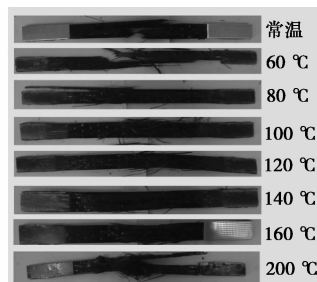


图 1 碳纤维试样在不同温度下的断裂图

根据表 1 数据和图 1 可以得到以下结论。

收稿日期: 2015-02-08; 修回日期: 2015-06-12

作者简介: 孟祥进 (1989-), 男, 硕士, 主要从事特种设备安全保障技术、失效分析技术和管道修复技术的研究, 021-64253256, mengxiangjin14@126.com。

(1) 离散系数都在5%以下, 低于允许测试误差范围, 可见此次在不同温度下碳纤维的拉伸强度试验的数据结果比较稳定, 可靠性较高^[3]。

(2) 在低温条件下, 碳纤维破坏形式主要呈现出单个断口的脆性断裂^[4]。随着温度的提高, 当温度接近该组环氧树脂的玻璃态转变温度时, 环氧树脂就开始出现软化现象, 总体表现为颜色改变、表面起泡。

2 碳纤维修复工艺参数确定

2.1 确定修复厚度 t_{repair}

存在缺陷的管道在具体的工况下可能存在屈服、未屈服以及裂纹3种情况, 本文中分别介绍了ASME PCC-2-2011中关于管道在这3种情况下设计修复厚度的计算方法^[5]。

(1) 针对修复对象(管体)未发生屈服情况, 取下列两式中 t_{min} 值较大者:

$$t_{\text{min}} = (D/2S)(E_s/E_c)(P - P_s) \quad (1)$$

$$t_{\text{min}} = (D/2S)(E_s/E_c)(2F/\pi D^2 - P_s) \quad (2)$$

(2) 针对修复对象(管体)发生屈服的情况, 考虑修复层的许用应变得出需要的修复层厚度, t_{repair} 可以由以下公式得到:

$$\varepsilon_c = PD/2E_c t_{\text{repair}} - s t_s/E_c t_{\text{repair}} - P_{\text{live}} D/[2(E_c t_{\text{repair}} + E_s t_s)] \quad (3)$$

(3) 针对修复对象(管体)发生泄漏的情况

对于圆形或者接近圆形的缺陷, 最小修复厚度 t_{min} 用公式(4)代入计算得出。

$$P = f_{\text{vf}} \sqrt{\gamma/[(1-v^2)/E](3d^4/512t_{\text{min}}^3 + d/\pi) + (3d^2/64Gt_{\text{min}})} \quad (4)$$

对于非圆形缺陷且纵横比小于5的缺陷, 公式(4)同样适用, 其中 d 选取缺陷的最大长度。

对于狭槽和矩形缺陷, 当满足 $w \leq 1.65 \sqrt{Dt_{\text{min}}}$ 条件, 最小复合材料修复厚度可以由下式求得:

(上接第143页)

与水力输送技巧有关, 还与树脂是否夹有空气、管道阻力、设备内部结构等有很大关系, 因此在实际应用过程中, 还应注意以下几点。

(1) 对树脂管道材料的选择, 以及管道的布置, 长半径弯头的使用。

(2) 底部出水装置应尽量选用下部为穹型孔板加水帽的方式。

(3) 在采用上下同时进水的水力输脂的同时, 如发现输送不彻底, 可使用压缩空气用于残存树

$$P = f_{\text{vf}} \sqrt{\gamma/[(1-v^2)/E](W^4/24t_{\text{min}}^3 + \pi W/4) + (3/16Gt_{\text{min}})[(4/5 + v/2)/(1+v)]W^2} \quad (5)$$

2.2 轴向修复长度 L 的计算

绝大多数情况下, 轴向包覆长度一般都会超过缺陷, 超出缺陷的长度, 由下式给出:

$$L_{\text{over}} = 2.5 \sqrt{Dt/2} \quad (6)$$

当管体存在泄漏情况, 则:

$$L_{\text{over}} = \max(2.5 \sqrt{Dt/2}, E_s \varepsilon_s t_{\text{repair}}/\tau) \quad (7)$$

修复材料轴向的总长度:

$$L = 2L_{\text{over}} + L_{\text{defect}} + 2L_{\text{taper}} \quad (8)$$

式中, L_{taper} 是轴向末端进行锥形修正的锥形长度, 最小的锥度为5:1。

3 爆破实验

3.1 管道缺陷尺寸制定

为了便于进行爆破试验, 本次试验没有在管道系统中进行, 而是在管道上设计并加工了人工缺陷, 并通过焊接将管道两端封闭起来做成密闭容器, 以便进行爆破试验。试验容器结构的设计如图2~图4所示。

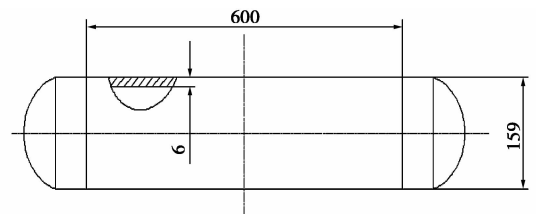


图2 实验容器结构尺寸设计图

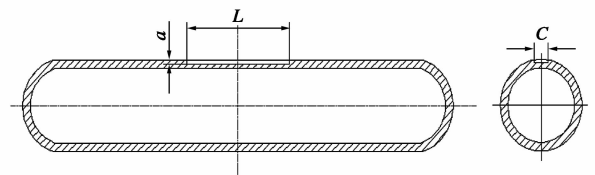


图3 人工缺陷尺寸图

脂的输送, 但应注意及时冲洗输脂管路。

参考文献

- [1] 裴峰, 史晓燕. 凝结水精处理高塔分离再生工艺探讨[J]. 华北电力技术, 2010, (4): 13-16.
- [2] 阎志国, 于尊君. 高塔分离技术用于凝结水精处理中的流量控制[J]. 电力建设, 2005, 26(6): 20-24.
- [3] 汤兴. 高塔分离法在凝结水精处理中的应用[J]. 电站辅机, 2010, 31(3): 33-36.
- [4] 李长海, 张雅潇. 高速精处理混床在实际运行中的优化分析[J]. 电站辅机, 2010, 31(1): 38-42. ■

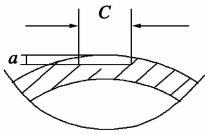


图 4 含裂缝人工缺陷局部剖面图

试验管道的外径 159 mm,壁厚 6 mm,材料是 20#碳钢,根据 ASME B31G-2009 和 DNV RP-F101 以及工业管道实际缺陷的腐蚀情况,在容器上设计加工的人工缺陷尺寸如表 2。

表 2 实际加工缺陷尺寸数据 mm

管道编号	L	c	a	备注
1	100	20	0	4 个相同缺陷的实验管道,通过包覆不同厚度的碳纤维修复层,来研究碳纤维包覆性能
2	100	20	3	
3	100	20	3	
4	100	20	3	
5	100	20	3	

3.2 碳纤维补强厚度 t_{min} 的计算

根据公式(1)计算补强厚度 $t_{repair} = 2.68$ mm,需要缠绕 7 层碳纤维复合材料(理论每层碳纤维 0.35 mm),并且参照这一厚度,总共设计了以下 5 种包覆厚度分别运用于 1 号~5 号试验容器。具体参数如表 3 所示。

表 3 含缺陷爆破试样各项设计参数

试验对象	E_s / GPa	E_c / GPa	D/ mm	S/ MPa	P/ MPa	P_s / MPa	t_{repair} / mm	层数
1 号容器	206	131	159	275	11.26	5.35	0(选取厚度)	0 层
2 号容器	206	131	159	275	11.26	5.35	1.05(选取厚度)	3 层
3 号容器	206	131	159	275	11.26	5.35	1.75(选取厚度)	5 层
4 号容器	206	131	159	275	11.26	5.35	2.68(计算结果)	7 层
5 号容器	206	131	159	275	11.26	5.35	3.5(选取厚度)	10 层

3.3 爆破试验与试验结果分析

对缺陷长度 100 mm、宽度 20 mm、深度 3 mm 的 5 个容器进行爆破试验,通过福贝尔公式计算得到了理论的爆破压力,爆破试验结果见表 4。

表 4 爆破试验结果

容器编号	修复方式	修复层数	未修复情况下 爆破压力/MPa	无缺陷管道的 理论爆破 压力/MPa	实际试验 爆破 压力/ MPa	破坏位置
1	直接缠绕	0(人为设定)	28.2	36.13	28.2	人工缺陷
2	直接缠绕	3(人为设定)	28.2	36.13	33.8	人工缺陷
3	直接缠绕	5(人为设定)	28.2	36.13	37.1	人工缺陷
4	直接缠绕	7(假设计算)	28.2	36.13	39	完整管体
5	直接缠绕	10(人为设定)	28.2	36.13	38.2	完整管体

根据以上的试验结果,得到以下结论。

(1)所有含缺陷容器结构采用本文中的修复技术后的实际爆破压力都大于原始同一缺陷结构的爆破压力。且随着缠绕厚度的增加,实际爆破压力也随之提高。

(2)当含缺陷的容器结构修复厚度达到 0.21 mm(5 层碳纤维)时,爆破压力与无缺陷同一结构下的容器爆破压力相接近。这说明当修复厚度超过某一数值后,修复补强效果已达到新的完整容器结构强度水平。

(3)2、3、4、5 号管道的整体爆破压力与 1 号管道相比分别提高了 19.9%、31.6%、38.3%、35.5%。当修复厚度提高到一个数值后容器的最终压力将处在一个均值水平,不会再随着厚度的增加而增加。

4 结语

(1)选择何种编织方式碳纤维取决于管道实际的运行工况,当管道仅需要补强轴向的强度时,选择单向碳纤维布更加有效;当管道需要补强轴向和抗弯强度时,需要选用双向纤维碳纤维布。

(2)碳纤维修复材料中的环氧树脂在高温下会发生玻璃化转变,导致黏结性能下降,影响碳纤维修复效果。因此,在具体的修复工程中,保证其工作温度在其玻璃化转变温度之下。

(3)碳纤维修复参数的确定中需要根据修复对象的材料性能、是否发生泄漏等情况确定具体使用的公式。

(4)爆破试验的结果表明,以上研究得到的碳纤维修复技术是一种安全可靠的工程技术,在修复设备性能的同时也提供了一定的安全裕量,使得这种技术的应用更加可靠。

参考文献

[1] 庞宝君,曾涛,杜善义. 三维多向编织复合材料有效弹性模量的细观计算力学分析[J]. 计算力学学报,2001,18(2):231-234.

[2] 周荣星,陈明珍. 经编多轴向技术及其在复合材料中的应用[J]. 武汉纺织工学院学报,1999,12(3):81-85.

[3] Plecnik J M, Iding R, Cunningham J D, et al. Temperature effects on epoxy adhesives [J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(1):99-113.

[4] GB/T 9979—2005 纤维增强塑料高低温力学性能试验[S].

[5] ASME PCC-2. Repair and testing standard, Section 4, nonmetallic repairs, Article 4.1. Non-metallic composite repair systems for pipelines and pipework [Z]. High Risk Applications, 2011. ■