

文章编号:0253-9721(2007)06-0070-05

管道修复用管状纺织复合材料的力学性能

王瑞¹, 张淑洁¹, 高艳章², 王欢¹

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300160; 2. 天津军事交通学院, 天津 300161)

摘要 管状纺织复合材料用于修复管道的内衬管, 受到管道内输送介质的压力作用, 其承压性能直接影响修复效果。为此基于对管状纺织复合材料特殊力学性能的要求及其自身结构特点, 通过对其拉伸性能进行测试, 建立了计算管状纺织复合材料拉伸断裂强力/宽度与破裂压强间关系的数学模型。通过实验证实, 该数学模型精度较高; 当待修复管道管径发生变化或腐蚀孔尺寸发生变化时, 可计算管状纺织复合材料的耐压性能, 对管状纺织复合材料的应用具有实际指导意义。

关键词 管道修复; 管状纺织复合材料; 拉伸性能; 破裂压强; 数学模型

中图分类号: TB332; TE4 文献标识码: A

Mechanical properties of tubular textile composite material for pipeline rehabilitation

WANG Rui¹, ZHANG Shujie¹, GAO Yanzhang², WANG Huan¹

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China;

2. School of Military Communication, Tianjin 300161, China)

Abstract When the tubular textile composite material is used in rehabilitating the liner of a pipeline, it must withstand the pressure exerted by the medium in the pipeline, so its pressure withstanding properties directly affects the rehabilitation result. Based on the special mechanical property requirements of the tubular textile composite material and its own structural features, and through the test of its tensile property, the paper established a mathematical model to calculate the tensile strength /width/ bursting pressure and determine their relationships. The experimental results have proved that the precision of the model is high; when the diameter of the old pipeline and the size of the corrupt hole have changed, the model can calculate the maximum pressure that the tubular textile composite material can withstand. So it has significance in providing a guideline for the application of tubular textile composite materials.

Key words pipeline rehabilitation; tubular textile composite material; tensile properties; bursting pressure; mathematical model

管状纺织复合材料作为内衬管实现对旧管道的修复, 具有许多金属材料不具备的优良特性, 如抗疲劳性、减震能力、破坏安全性及耐腐蚀性较好^[1], 且使得管道的使用寿命增加 30~50 年。此技术在 20 世纪 70 年代末期首先在英国、美国及日本得到开发与应用, 在我国 90 年代才发展起来。大部分管道修复工程通过技术引进完成, 一小部分采用自制无纺布缝合内衬管完成。完全引进国外产品, 价格昂

贵, 不适应国内市场成本的要求, 因此面对国内管道修复这个巨大市场, 实现修复材料国产化迫在眉睫^[2], 但目前国内对该技术的开发应用尚处在实验阶段, 深入研究较少。不同材料制作的管状纺织复合材料在修复不同腐蚀孔、不同管径的管道时, 其能承受的最大压强也不同。本文建立了计算管状纺织复合材料断裂强力/宽度与破裂压强间关系的数学模型, 从而避免由于管道内压强超过其极限破裂压

收稿日期: 2006-05-21

修回日期: 2007-01-29

作者简介: 王瑞(1960—), 男, 教授。研究领域为纤维增强复合材料。E-mail: wangrui@tjpu.edu.cn.

强,使管状纺织复合材料出现开裂等情况。

1 试样制作

1.1 管状纺织复合材料的结构

管状纺织复合材料作为内衬管修复管道,由 3 种材料组成:起增强作用的管状织物;起密封作用的防渗膜与起黏结作用的树脂,树脂同时也是织物增强复合材料的基体,直接与介质接触的是防渗膜,它对管道的介质起到密封的作用,使冲压时内衬管能紧紧黏结在待修复管道的内壁,且能够改善内衬管的表面性能,使管状纺织复合材料的内壁更加光滑,从而可以增加介质的流速;防渗膜里层是管状织物增强的树脂,树脂浸渍在织物里,将防渗膜、管状织物与待修复的管道黏结在一起,树脂同时可以增加内衬管的刚度和强度^[3],见图 1。

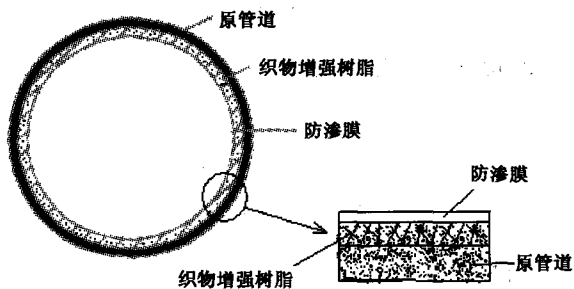


图 1 采用管状纺织复合材料修复后的管道示意图

Fig.1 Sketch of the pipeline rehabilitated by tubing textile composite

1.2 管状纺织复合材料的模拟制作

管状织物制作采用的是管状平纹机织物^[4],由于管状纺织复合材料衬于管道后,环向强度比径向强度要求高,因此纬纱采用 300 tex 玻璃纤维长丝,断裂强力 359.12 N,断裂伸长率 36.27%,经纱采用 300 tex 工业用涤纶长丝,断裂强力 236.10 N,断裂伸长率 56.47%,织造在 CSW-03 型电脑织样机上进行。防渗膜采用热塑性聚氨酯膜(TPU),TPU 具有高模量、高强度、高伸长和高弹性及优异的耐磨、耐油、耐低温、耐老化等性能。实验选用聚氨酯膜的厚度为 0.4 mm,断裂伸长率大于 900%,断裂强力为 351.99 N,熔融温度为 180 °C。采用 YT071-45A 塑料制品液压机来制作防渗膜与织物的柔性层合织物,上模温度为 150 °C,因为涤纶在 150 °C 时加热 1 h,其强度会下降 60%,为了使涤纶的性能受损较小,所以塑料制品液压机的下模不加热,如图 2 所示;压力为 10~12 MPa,压膜时间为 3 s,压膜时间较短是为

防止高温损伤涤纶织物的性能。压膜结束后,在室温下冷却至可以安全脱离膜具。在现场施工,是将压膜后的织物送入待修管道前浸入树脂,然后施加温度、压力固化成管状刚性复合材料。树脂灌浸在纺织内衬管里的过程,操作简单,精度要求不高,因此实验中采用手糊方法浸渍树脂完全可以模拟实际工艺,树脂采用环氧树脂 830,其黏结力强,机械强度高,耐热、耐腐蚀性好等优点,固化剂为二缩水甘油醚 PG-207,与树脂的质量比为 100:2.1。

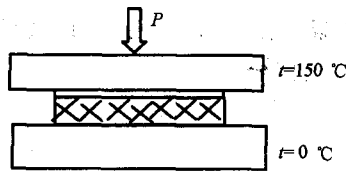


图 2 试样模拟压膜示意图

Fig.2 Sketch of the sample to simulate to press the film

2 拉伸性能测试

2.1 试样准备

管状纺织复合材料在储存与运输过程中有折痕,因此在做拉伸实验时,试样在轴向和环向剪切取样,见图 3。拉伸长度一般取 150 mm,宽度要足够,一般取 25 mm,这样能包括一个具有代表性的纤维数量。

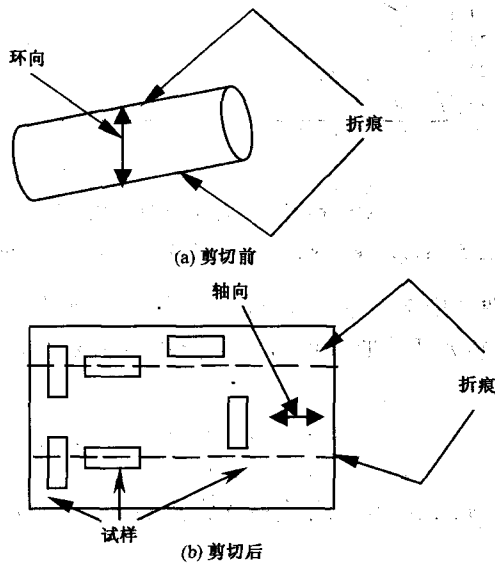


图 3 剪切前后的管状纺织复合材料

Fig.3 Tubular textile composite material before cutting

(a) and after cutting (b)

2.2 结果计算

图 4 为一个典型的负荷与应变曲线,靠近原点

处,曲线主要由树脂的强力控制,远离原点处,曲线由管状织物的强力所控制。负荷与应变曲线可以近似的由 2 条直线(1 个双线性曲线)来表示,见图 5。2 条直线的交点代表了屈服点,这一点的值是屈服应力和屈服负荷。斜率代表弹性模量。最小平方线性回归给出了双线性近似方程:

$$y = m_{a1}x + c_{a1} \quad (1)$$

$$y = m_{a2}x + c_{a2} \quad (2)$$

式中:常量 m_{a1} 和 m_{a2} 表示直线的斜率;常量 c_{a1} 和 c_{a2} 代表 Y 轴的截距;式(1)表示图 4 曲线的左边部分,式(2)表示右边部分。

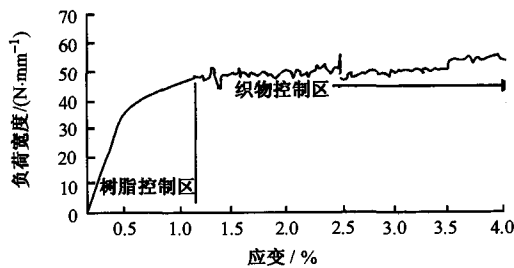


图 4 负荷与应变曲线的树脂与织物控制区

Fig.4 Load/width-displacement that is controlled by resin and fabric

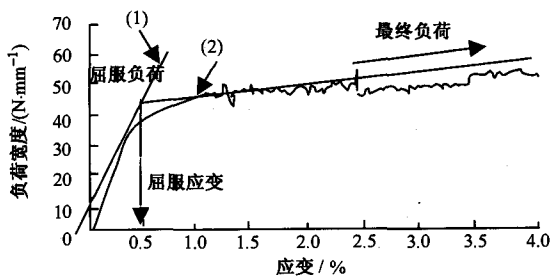


图 5 由双线性近似值确定材料性能参数

Fig.5 Properties defined on the bilinear approximation

曲线中 2 条直线部分的结果回归得出下面的方程,分别为开始曲线的直线部分和接下来曲线的直线部分:

$$y = m_{11}x + c_{11} \quad (3)$$

$$y = m_{12}x + c_{12} \quad (4)$$

式中: m_{11} , m_{12} 为直线的斜率常量; c_{11} , c_{12} 为 Y 轴的截距。

根据双曲线的近似值确定材料性能的步骤如下:

初始模量 $E_1 = m_{a1} \quad (5)$

第二次模量 $E_2 = m_{a2} \quad (6)$

初始泊松率 $V_{12-1} = \frac{-m_{11}}{m_{a1}} \quad (7)$

第二次泊松率 $V_{12-2} = \frac{-m_{12}}{m_{a2}} \quad (8)$

直线的交点也就是方程(1)和(2)的解,给出了屈服负荷/宽度(在 Y 轴上)以及屈服点的应变(在 X 轴上)。负荷/宽度的最大值是最终的负荷/宽度。

对于轴向和环向样品,要确定下列性能:屈服应变(ϵ_y)、屈服负荷(N_y)、初始模量(E_1)、第二次模量(E_2)、初始泊松率(V_{12-1})、第二次泊松率(V_{12-2})与最终负荷(N_{ms})

轴向或环向是在圆括弧右下角用“a”和“h”表示。例如,屈服应变在环向上表示为(ϵ_y)_h,在环向上的第二次模量表示为(E_2)_h。在每个方向上至少进行 5 次实验。计算结果会在数学模型建立中使用,变形系数的定义如下。

初始相互作用变形系数:

$$S_{12-1} = \frac{-V_{12-1}}{E_1} \quad (9)$$

第二次相互作用变形系数:

$$S_{12-2} = \frac{-V_{12-2}}{E_2} \quad (10)$$

3 数学模型建立

建立数学模型的目的是利用试样拉伸测试数据、旧管道腐蚀孔的尺寸和 2.2 材料性能计算数据来计算管状纺织复合材料断裂拉伸负荷和破裂压强。

假定缺陷处仅由 2 个方位,环向方位的长度 W 和轴向方位的长度 L 来描述,对于圆形缺陷, $L = W$ 。假定在旧管道的腐蚀孔处,管状纺织复合材料变形成一个圆弧,超过管壁的内衬凸起的高度为 H,见图 6,则应变为:

$$\epsilon_h = \frac{2 \cdot r_h \arcsin^{-1}\left(\frac{w}{2 \cdot r_h}\right)}{D \arcsin^{-1}\left(\frac{w}{D}\right)} - 1 \quad (11)$$

$$\epsilon_a = \frac{2 \cdot r_a \arcsin^{-1}\left(\frac{L}{2 \cdot r_a}\right) - L}{L} \quad (12)$$

式中: ϵ_h 为环向应变(%); ϵ_a 为轴向应变(%);D 为原管道直径(mm); r_h 为环向的内衬曲率半径(mm); r_a 为轴向的内衬曲率半径(mm)。

管状纺织复合材料为正交各向异性材料,则应力与应变的关系为

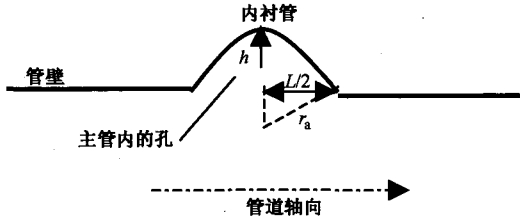


图 6 管状纺织复合材料凸出孔的示意图

Fig.6 Sketch for liner bulging out of hole

$$\epsilon_h = \frac{1}{E_h} \cdot N_h + S_{12} \cdot N_a \quad (13)$$

$$\epsilon_a = S_{12} \cdot N_h + \frac{1}{E_a} \cdot N_a \quad (14)$$

式中: S_{12} 为相互作用变形系数; N_a 为轴向载荷 (N/mm); N_h 为环向载荷 (N/mm); E_a 为轴向弹性模量 (MPa); E_h 为环向弹性模量 (MPa)。

当管状纺织复合材料凸出缺陷口时,在缺陷口的末端点是受限制的。假设管状纺织复合材料轴向与环向是一个圆弧,环向和轴向凸起的弯曲直径为:

$$r_a = \frac{L^2}{8 \cdot H} + \frac{H}{2} \quad (15)$$

$$r_h = \frac{W^2}{8 \cdot H} + \frac{H}{2} \quad (16)$$

旧管道如果存在腐蚀孔,则衬在管道内的管状纺织复合材料就会有裸露,对于裸露处的管状纺织复合材料的静态平衡由下式表示^[5]

$$\frac{N_h}{r_h} + \frac{N_a}{r_a} = P \quad (17)$$

式中 P (MPa) 为实际压强。

将方程(15)~(17)联立,消去 r_a, r_h 得裸露处的管状纺织复合材料的静态平衡方程

$$\frac{N_h}{\frac{W^2}{8H} + \frac{H}{2}} + \frac{N_a}{\frac{L^2}{8H} + \frac{H}{2}} = P \quad (18)$$

由方程(13)、(14)得到 N_h, N_a 的表达式,再把方程(11)、(12)、(15)、(16)代入可得:

$$N_h = \frac{1}{\frac{1}{E_h E_a} - S_{12}^2} \left(\frac{1}{E_a} \left[\frac{\left(\frac{W^2}{4H} + h \right) \arcsin \left(\frac{W}{\frac{W^2}{4H} + H} \right)}{D \arcsin \left(\frac{W}{D} \right)} - 1 \right] - S_{12} \left[\frac{\left(\frac{L^2}{4H} + H \right) \arcsin \left(\frac{L}{\frac{L^2}{4H} + H} \right)}{L} - 1 \right] \right) \quad (19)$$

$$N_a = \frac{1}{S_{12}^2 - \frac{1}{E_h E_a}}$$

$$\left(S_{12} \left[\frac{\left(\frac{W^2}{4H} + H \right) \arcsin \left(\frac{W}{\frac{W^2}{4H} + H} \right)}{D \arcsin \left(\frac{W}{D} \right)} - 1 \right] - \frac{1}{E_h} \left[\frac{\left(\frac{L^2}{4H} + H \right) \arcsin \left(\frac{L}{\frac{L^2}{4H} + H} \right)}{L} - 1 \right] \right) \quad (20)$$

相互作用标准适用于管状纺织复合材料,当下列条件满足时失效发生^[5]

$$\left(\frac{N_h}{(N_{uts})_h} \right)^2 - \frac{N_h N_a}{(N_{uts})_a^2} + \left(\frac{N_a}{(N_{uts})_a} \right)^2 = 1 \quad (21)$$

方程(19)、(20)与相互作用标准方程(21)联立可解出管状纺织复合材料的轴向拉伸断裂负荷 $(N_{uts})_a$ 和环向拉伸断裂负荷 $(N_{uts})_h$ 。在管状纺织复合材料静态平衡方程中,当轴向和环向负荷达到轴向和环向拉伸断裂负荷时,内衬管内实际压强为管状纺织复合材料所能承受的最大压强。即把解出的轴向拉伸断裂负荷 $(N_{uts})_a$ 和环向拉伸断裂负荷 $(N_{uts})_h$ 代入管状纺织复合材料的静态平衡方程(18)可得破裂压强

$$P_i = \frac{(N_{uts})_h}{\frac{W^2}{8H} + \frac{H}{2}} + \frac{(N_{uts})_a}{\frac{L^2}{8H} + \frac{H}{2}} \quad (22)$$

4 结果分析

4.1 测试结果

采用 AGa250KNE 材料试验机。从 1.2 制得的管状纺织复合材料中取样,轴向和环向分别取 6 件样品,最后取平均值,结果见表 1。表中试样轴向厚度为 1.295 mm,宽度为 16.840 mm;环向厚度为 1.245 mm,宽度为 15.824 mm。

4.2 模型验证

假设原管道直径 $D = 42.672$ mm,其上有一个直径为 30.408 mm 腐蚀孔,即 $L = 30.408$ mm, $W = 30.408$ mm, $H = 1.524$ mm,采用 4.1 中试验数据,并根据方程(9)和(10)得初始和第 2 次相互作用变形系数,如表 2 所示。

将表 1 与表 2 中的数据代入方程(19)~(21),得轴向拉伸断裂强力 $(N_{uts})_a = 1897.380$ 和环向拉伸断裂强力 $(N_{uts})_h = 7945.120$,与实际测试

表 1 拉伸测试结果

Tab.1 Direction tensile results

断裂载荷/ (N·mm ⁻¹)		屈服应变/ %	屈服应力/ (N·mm ⁻¹)		初始模量/ MPa		第二次模量/ MPa		初始泊松率		第二次泊松率	
轴向	环向	轴、环向	轴向	环向	轴向	环向	轴向	环向	轴向	环向	轴向	环向
1 897.380	7 945.120	0.9	932.180	2 476.500	3 350.0	8 435.5	39.4	733.8	-0.138	-0.315	-0.060	0.192

表 2 初始和二次相互作用变形系数

Tab.2 Primary and secondary interaction compliance coefficients

方向	S_{12-1}	S_{12-2}
轴向	-4.12×10^{-5}	-1.52×10^{-3}
环向	-3.78×10^{-5}	2.62×10^{-4}
平均	-3.95×10^{-5}	1.23×10^{-4}

值相比,精度较高。因此在腐蚀孔径和管状纺织复合材料性能不同时,可以采取方程(21)作为计算模型求解拉伸断裂强力。把 $L = 30.408$ mm, $W = 30.408$ mm, $H = 1.524$ mm以及计算得到的轴向拉伸断裂强力 $(N_{ms})_a = 1 897.380$ 和环向拉伸断裂强力 $(N_{ms})_h = 7 945.120$ 代入方程(22),解得 $P_i = 0.855$ MPa,据此,试验假设的管状纺织复合材料在修复管径为 42.672 mm且管壁上有一个直径为 30.408 mm腐蚀孔的管道时,管道内输送介质最大压强不能超过0.855 MPa,与修复后的旧管道实际最大承压值0.875相比,误差为2.29%,因此通过这个模型,计算出管状纺织复合材料承受的最大压强0.855 MPa是合理的。

5 结 论

采用一次成型无缝管状平纹机织物作增强体制作管状纺织复合材料试验样品,测试其拉伸性能,由相互作用标准和管状纺织复合材料平衡方程,建立了计算管状纺织复合材料拉伸断裂载荷/宽度与破裂压强间关系的数学模型。通过试验证实,该模型精度较高,当待修复管道管径发生变化或腐蚀孔尺寸发生变化时,可计算管状纺织复合材料的耐压性能,用于指导实际生产。

参考文献:

- [1] 董久樟. 翻转内衬法修复我国燃气旧管道技术的应用研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2001.
- [2] 季荣生. 新编非开挖工程实用技术大全[M]. 北京:清华同方光盘电子出版社,2000:540-600.
- [3] 张丽. 管状纺织复合材料及其在管道修复技术上的应用[D]. 天津:天津工业大学,2001.
- [4] 张淑洁,王瑞,张丽,等. 管状纺织复合材料生产工艺及其性能探讨[J]. 纺织学报,2006,27(9):36-39.
- [5] ASTM F2207-02. Standard specification for cured-in-place pipe lining system for rehabilitation of metallic gas pipe[S].