

DOI: 10.13475/j.fzxb.20190204106

管道修复用涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度

伏立松¹, 张淑洁¹, 王 瑞^{1,2}, 杨兆薇¹, 荆梦轲¹

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

摘要 为减少涤纶用量以保护石油资源,制备了涤纶/苧麻混杂非织造复合材料。分析了涤纶/苧麻混杂量对非织造复合材料在管道翻衬施工及修复中拉伸强度的影响,利用复合材料混合定律和胡克定律建立了管道修复用涤纶/苧麻非织造材料内衬复合材料的理论临界混杂比和拉伸强度计算公式。结果表明:理论临界混杂比为0.177,实验所得临界混杂比在0.2附近,实验拉伸强度与理论拉伸强度的变化规律基本一致。临界混杂比和拉伸强度计算公式具有较高的实用性,可为翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的管状非织造复合材料的设计和生产加工提供参考。

关键词 管道修复;涤纶/苧麻非织造复合材料;混杂理论;临界体积分数;拉伸强度

中图分类号:TB 332; TE 45 **文献标志码**:A

Tensile strength of polyester/ramie nonwoven composite applied on pipeline rehabilitation

FU Lisong¹, ZHANG Shujie¹, WANG Rui^{1,2}, YANG Zhaowei¹, JING Mengke¹

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract In order to reduce the requirements of polyester resources hence the petroleum resources, polyester/ramie hybrid nonwoven composites were prepared. It was found that hybridizing polyester and ramie would have certain effect on the tensile strength of the pipeline after lining construction and repair. In this paper, the formulae for calculating the critical hybrid ratio and tensile strength of polyester/ramie nonwovens lining composites for pipeline repairing were established based on the law of mixing of composite materials and Hooke's law. The theoretical ratio was found to be 0.177 and the experimental ratio was around 0.2. The experimental tensile strength was basically consistent with the theoretical prediction. The results show that the formula for calculating critical hybrid ratio and tensile strength are practically useful, which can provide theoretical basis for the design and manufacture of tubular nonwovens composites for repairing damaged pipelines with pipes with large pipe diameters, such as non-pressure sewage and drainage.

Keywords pipeline rehabilitation; polyester/ramie nonwoven composite; hybrid theory; critical volume fraction; tensile strength

许多在役的大管径、非压力排污或排水管道因老化等因素会出现严重的裂缝、腐蚀穿孔、渗漏等受损现象,直接或间接地造成了巨大的经济损失^[1]。为降低经济损失和保护水资源,迫切需要受损的

排水或排污管道进行修复。采用管状涤纶非织造复合材料作为内衬管的翻衬修复法具有不开挖、不影响交通、不破坏环境等优势^[2]。目前,国内管状涤纶非织造复合材料翻衬修复受损排污或排水管道才

收稿日期:2019-02-25 修回日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51303128);天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(15JCZDJC38400)

第一作者:伏立松(1992—),男,博士生。主要研究方向为管状纺织复合材料。

通信作者:张淑洁(1976—),女,副教授,博士。主要研究方向为纺织新材料与新技术。E-mail:zhangshujie@tjpu.edu.cn。

刚刚起步,还没有相关的施工规范和工程质量验收标准。国外此方面的研究主要侧重于修复工艺、修复设备^[3],也制定出了一系列的标准可供参考,如ASTM F1743-17《采用现场固化热固性树脂管(CIPP)的现场拉制装置修复现有管线和管道的标准实施规程》、ASTM F1216-16《通过树脂浸渍管的倒置和硫化修复现有管线和管道的标准规程》等,但较少从理论上对管状涤纶非织造复合材料进行系统的设计与研究。

近几十年,石油资源的日益枯竭使得合成纤维的价格不断上涨,人们迫切地需要用天然纤维来部分取代或完全取代合成纤维^[4]。其中,苧麻纤维具有高比强度和高比模量等性能,能够携带更多的树脂与旧管内壁黏接,与树脂结合的界面性能相比纯涤纶非织造材料有所改善^[5],因此有相关学者制备了涤纶/苧麻复合材料用于非开挖修复受损的管道。闫丹等^[6]采用三因素回归旋转设计方法制备涤纶/苧麻非织造复合材料,对比了实际制备与混杂理论下的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度,发现实际拉伸强度与理论拉伸强度存在较大的误差。罗凯等^[7-8]对修复管径较小的燃气、给水等压力管道的涤纶/苧麻机织物复合材料进行微观形貌、接触角、纤维抽拔、黏结强度等研究,发现涤纶/苧麻机织物复合材料在翻衬施工中可以携带更多树脂与管壁黏合,解决管道内壁塌陷的问题。以上研究偏重于混杂纤维复合材料的性能特点,很少讨论纤维混杂设计对涤纶/苧麻复合材料的拉伸强度产生的影响。

针对这些问题,本文利用复合材料混合定律和胡克定律建立了涤纶/苧麻非织造复合材料的理论临界体积分数和拉伸强度的计算公式,制备了不同体积分数的涤纶/苧麻非织造复合材料,对其拉伸强度进行测试,得到临界体积分数与拉伸强度的实验值,找出与理论临界体积分数及理论拉伸强度的相关性,从而证明涤纶/苧麻非织造复合材料的理论临界体积分数和拉伸强度计算公式的可靠性,为翻衬修复排污或排水管道的管状混杂纤维非织造复合材料的强度设计提供理论方法。

1 混杂理论

1.1 理论临界体积分数

将涤纶与苧麻混杂制成的非织造复合材料简化成为单层复合材料板问题,如图1所示。

根据复合材料的混合定律^[9]可知,复合材料的拉伸强度:

$$\sigma_{cu} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (1)$$

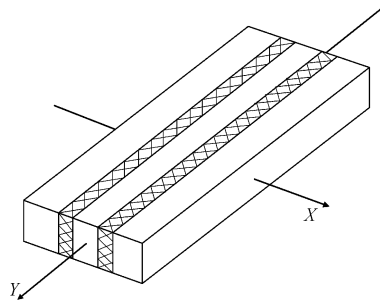


图1 单层复合材料板模型

Fig.1 single-layer composite board model

$$\lambda = \frac{V_m}{V_f} \times 100\% = \frac{1 - V_f}{V_f} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_f 为纤维体积分数,%; V_m 为基体体积分数(基体的体积分数为 $V_m = 1 - V_f$),%; σ_{cu} 为复合材料拉伸强度,MPa; σ_f 为纤维拉伸强度,MPa; σ_m 为基体拉伸强度,MPa, λ 为基体体积含量,%。

涤纶/苧麻非织造复合材料的强度设计要满足管道工作内压引起的纵、横向应力^[10]。

$$\sigma_j = \frac{P(D + 2h)}{4t} \leq \sigma_{cu} \quad (3)$$

$$\sigma_w = \frac{P(D + 2h)}{2t} \leq \sigma_{cu} \quad (4)$$

式中: σ_j 、 σ_w 为涤纶/苧麻非织造复合材料的纵、横向应力,MPa; P 为管道工作内压,MPa; D 为管道内径,mm; h 为管道壁厚,mm。

设单向涤纶/苧麻非织造复合材料板宽度为单位1,涤纶与苧麻纤维层的纤维网厚度为 d_1 、 d_2 ,基体厚度为 d_m ,基体厚度 d_m 与纤维体积分数有关,则有:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times 100\% \\ V_f = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_2 + d_m} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中, V_1 为涤纶层占纤维层总体积的体积分数,%。

结合式(2)和(5),涤纶、苧麻纤维层的纤维网厚度与基体厚度的关系为

$$d_m = \lambda(d_1 + d_2) \quad (6)$$

涤纶/苧麻非织造复合材料沿纤维方向 Y 单向拉伸,在拉伸载荷 F 作用下发生断裂,得其平衡方程:

$$F = \sigma_1 d_1 \times 1 + \sigma_2 d_2 \times 1 + \sigma_m d_m \times 1 \quad (7)$$

式中: σ_1 为涤纶层拉伸应力,MPa; σ_2 为苧麻纤维层拉伸应力,MPa。

由胡克定律^[9]得涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸断裂应变^[10] ε :

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon \sigma_2 = E_2 \varepsilon \sigma_m = E_m \varepsilon \quad (8)$$

式中: E_1 为涤纶层拉伸模量, MPa; E_2 为苧麻纤维层拉伸模量, MPa; E_m 为基体拉伸模量, MPa。

结合式(7)和(8), 推导出涤纶、苧麻纤维层的拉伸应力:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E_1 F}{E_1 d_1 + E_2 d_2 + E_m d_m} \\ \sigma_2 = \frac{E_2 F}{E_1 d_1 + E_2 d_2 + E_m d_m} \end{cases} \quad (9)$$

设涤纶纤维层、苧麻纤维层、基体的断裂应变分别为 ε_{1a} 、 ε_{2a} 和 ε_{ma} , 且满足: $\varepsilon_{1a} < \varepsilon_{2a} < \varepsilon_{ma}$, 若当拉伸载荷 F 增加到 F_a 时, 涤纶层首先断裂, 即当 $F = F_a$ 时, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1a}$, $\sigma_1 = \sigma_{1a}$, σ_{1a} 为涤纶层拉伸强度。根据式(9), 涤纶层断裂的平衡方程为

$$\frac{E_1}{\sigma_{1a}} F_a = E_1 d_1 + E_2 d_2 + E_m d_m \quad (10)$$

式中: 涤纶层断裂后, 苧麻纤维层和基体承担拉伸载荷 F_a 。此时涤纶/苧麻非织造复合材料的平衡方程为

$$F_a = \sigma_2 d_2 \times 1 + \sigma_m d_m \times 1 \quad (11)$$

若在拉伸载荷 F_a 作用下, 苧麻纤维层也到达断裂状态, 即 $\varepsilon_2 = \varepsilon_{2a}$, $\sigma_2 = \sigma_{2a}$, 此时涤纶/苧麻非织造复合材料不会发生二次断裂。根据式(9), 苧麻纤维层断裂的平衡方程为

$$\frac{E_2}{\sigma_{2a}} F_a = E_2 d_2 + E_m d_m \quad (12)$$

将式(6)代入式(10)和式(12), 涤纶、苧麻纤维层断裂的平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{E_{1a}}{\sigma_{1a}} F_a = (E_1 + \lambda E_m) d_1 + (E_2 + \lambda E_m) d_2 \\ \frac{E_2}{\sigma_{2a}} F_a = \lambda E_m d_1 + (E_2 + \lambda E_m) d_2 \end{cases} \quad (13)$$

翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的涤纶/苧麻非织造复合材料不允许发生二次断裂^[11-12]。根据式(13), 涤纶/苧麻非织造复合材料不发生二次断裂的临界体积分数 V_1^* 为

$$V_1^* = \frac{d_1}{d_1 + d_2} = \frac{E_1 E_2 \sigma_{2a} - E_2^2 \sigma_{1a} + \lambda E_m (E_1 \sigma_{2a} - E_2 \sigma_{1a})}{E_1 E_2 (\sigma_{1a} + \sigma_{2a}) - E_2^2 \sigma_{1a}} \quad (14)$$

1.2 理论拉伸强度

翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸断裂情况可分为 2 种^[6, 11]:

1) 涤纶层和苧麻纤维层同时拉伸断裂, 即 $V_1 = V_1^*$, 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \frac{F_a}{d_1 + d_2 + d_m} \geq \sigma_w \geq \sigma_j \quad (15)$$

结合式(2)、(6)和式(15), 推导出简化后的涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度:

$$\sigma_{cu} = \frac{V_1^* V_f E_1 \sigma_{1a} \sigma_{2a}}{E_1 \sigma_{2a} - E_2 \sigma_{1a}} \geq \sigma_w \geq \sigma_j \quad (16)$$

2) 涤纶纤维层断裂后, 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度无法承载拉伸载荷而发生拉伸断裂。一次断裂情况发生在涤纶纤维层体积分数较高时, 即 $V_1 > V_1^*$, 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \left[V_1 V_f + (1 - V_1) V_f \frac{E_2}{E_1} + V_m \frac{E_m}{E_1} \right] \sigma_{1a} \geq \sigma_w \geq \sigma_j \quad (17)$$

3) 只考虑拉伸断裂情况, 忽略翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的实际要求, 涤纶/苧麻非织造复合材料还有以下的拉伸断裂情况: 涤纶纤维层断裂后, 涤纶/苧麻非织造复合材料继续承担拉伸载荷; 当拉伸载荷增加到一定值后, 苧麻纤维层断裂。二次断裂情况发生在涤纶层体积分数较低时, 即 $V_1 < V_1^*$, 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \left[(1 - V_1) V_f + \frac{V_m E_m}{E_2} \right] \sigma_{2a} \geq \sigma_w \geq \sigma_j \quad (18)$$

由式(17)得, 当 $V_1 > V_1^*$, 理论拉伸强度随着涤纶体积分数的增加而增加; 由(18)得: 当 $V_1 < V_1^*$, 理论拉伸强度随着涤纶体积分数的增加而减小; 当 $V_1 = V_1^*$, 涤纶/苧麻非织造复合材料理论拉伸强度最小。

2 实验部分

2.1 实验材料及设备

实验材料: 苧麻纤维规格为 6.3 dtex × 90 mm (安徽雨燕麻业有限公司); 涤纶规格为 1.56 dtex × 38 mm (天津利尔达化纤制品厂); R400-2 内衬环氧树脂 (天津合成材料工业研究所有限公司), 路博润 58887 热塑性聚氨酯 (苏州希珍塑化有限公司)。

实验设备: 电子天平 (瑞安市英衡电器有限公司), YG141 型织物厚度测试仪 (深圳市海滨仪器有限公司), XFH 型小和毛机 (青岛市胶南针织机械厂), CUARNICARD 型罗拉式梳理机 (西班牙 SABADELL), SCZ-1150 型针刺机 (常熟无纺机械设备有限公司), Y/TD71-45 A 型塑料制品液压机 (天津市液

压厂), INSTRON 5969 型万能强力机(美国 INSTRON), Hitachi TM3030 型台式扫描电镜(日本日立公司)。

2.2 涤纶/苧麻非织造复合材料的制备

涤纶与苧麻纤维以 0、10%、20%、30%、40%、60%、80%、100% 的体积分数混杂^[13], 在小和毛机上混和开松, 梳理机上成网, 针刺机上以定量 600 g/m²、针刺密度为 240 刺/cm² 的条件针刺, 制成涤纶/苧麻非织造材料。温度 180 ℃, 压力 4~6 MPa 下液压机熔融聚氨酯, 压力 0.8~1.2 MPa 下与涤纶/苧麻非织造材料复合 16~20 s。定量 1 500 g/m² 的环氧树脂来手糊覆膜后的涤纶/苧麻非织造材料, 于室温下固化, 制成涤纶/苧麻非织造复合材料。

2.3 测试方法

2.3.1 拉伸性能测试

为翻衬修复受损的大管径、非压力排污或排水管道, 选用高强度、高模量的涤纶、苧麻纤维。参考 ASTM D3379-75《高模量单丝材料拉伸强度和弹性模量测试方法》测试涤纶、苧麻纤维的拉伸强度和拉伸模量。随机地在纤维束上截取一段, 抽出单根纤维, 施加一定的张力, 使单根纤维横向拉直紧绷在纸框上, 单根纤维的两端用胶黏剂粘好, 干燥后将纸框垂直固定于万能强力仪的上下夹具中, 调试好仪器, 剪断纸框; 单根纤维的测定长度为 20 mm, 拉伸速度为 10 mm/min; 测试 30 组, 取平均值, 为涤纶、苧麻纤维的拉伸强度和拉伸模量。

按照 GB/T 1447-2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》测试涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度。拉伸试样规格约为 250 mm×25 mm(长×宽), 纵横向各 5 个; 采用美国 INSTRON 生产的万能强力仪进行测试, 拉伸试样夹持距为 150 mm, 加载速度为 5 mm/min。

2.3.2 形貌观察

采用 Hitachi TM3030 型台式扫描电镜, 观察涤纶/苧麻非织造复合材料的纵横向断裂面微观形貌。

3 结果与讨论

3.1 理论临界体积分数

由于非织造材料的纤维取向多元, 混杂效应的随机性比较大^[14-15], 则采用单根涤纶、苧麻纤维的拉伸强度和拉伸模量模拟涤纶、苧麻纤维层的拉伸强度和拉伸模量, 得到涤纶与苧麻纤维的临界体积

分数和涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸性能的变化规律。测试并计算后得到的涤纶拉伸强度 σ_{1a} 为 0.63 GPa, 拉伸模量 E_1 为 13.17 GPa; 苧麻纤维的拉伸强度 σ_{2a} 为 0.48 GPa, 拉伸模量 E_2 为 7.86 GPa; 环氧树脂的拉伸模量 E_m 为 2.96 GPa。假设纤维总体积含量 V_f 为 0.6^[13], 将以上数据代入式(14)中, 通过计算可得高强涤纶与苧麻纤维的临界体积分数为 17.7%。根据式(16)~(18)可知, 当高强涤纶体积分数不低于 17.7% 时, 此时翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的涤纶/苧麻非织造复合材料理论上不发生二次断裂。

3.2 理论拉伸强度

根据上述的高强涤纶与苧麻纤维的相关性能数据, 结合式(16)~(18), 可得到不同涤纶纤维体积分数的涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度, 如图 2 所示。

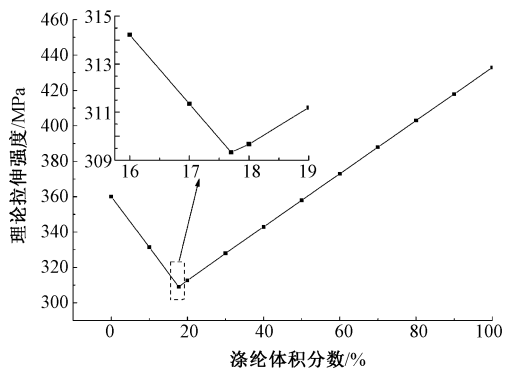


图2 不同涤纶体积分数的涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度

Fig.2 Theoretical tensile strength of polyester/ramie nonwoven composites with different volume fractions of polyester fiber

从图 2 中可看出, 涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度与涤纶纤维体积分数呈线性关系。当涤纶体积分数小于 17.7% 时, 涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度随着涤纶体积分数的增加而降低; 当涤纶体积分数大于 17.7%, 涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度随着涤纶体积分数的增加而增大; 当涤纶体积分数等于 17.7%, 涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度最小。

3.3 结果验证

3.3.1 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度

表 1 示出不同涤纶体积分数的涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度的测试结果。可知: 涤纶体积分数为 20% 的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度是涤纶体积分数为 0、10%、20%、30%、40%、60%、80% 和 100% 8 个组别中的最小值, 为 42.69 MPa,

从而表明临界体积分数在涤纶体积分数 20% 附近。实验得到的临界体积分数在 20% 附近, 与理论的临界体积分数 17.7% 区别不大。结果表明, 建立的新型涤纶/苧麻非织造复合材料临界体积分数的计算公式具有较高的实用性。

表 1 不同涤纶体积分数的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度

Tab.1 Tensile strength of polyester/ramie nonwoven composites with different volume fractions of polyester fiber

涤纶体积分数/%	拉伸强度/MPa		涤纶体积分数/%	拉伸强度/MPa	
	纵向	横向		纵向	横向
0	53.44	36.84	40	56.45	34.74
10	48.85	30.96	60	64.83	45.86
20	42.69	27.36	80	75.89	52.55
30	51.04	29.56	100	88.64	58.36

3.3.2 实验值与理论值对比与分析

由表 1 发现: 涤纶/苧麻非织造复合材料的实验拉伸强度与理论拉伸强度的变化规律一致, 即涤纶纤维体积分数未达到临界体积分数时, 涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度随涤纶体积分数的增加而减小, 到达临界体积分数之后, 随涤纶体积分数的增加而增大, 与不同涤纶体积分数对涤纶/苧麻非织造复合材料的理论拉伸强度的影响结论相同。

与此同时发现, 涤纶/苧麻非织造复合材料拉伸强度的实验值低于理论值。出现这一情况是因为在理论值计算当中将单根苧麻、涤纶的拉伸强度和拉伸模量模拟苧麻、涤纶层的拉伸强度和拉伸模量, 未考虑苧麻、涤纶层的实际加工^[16]。此外, 树脂浸润纤维不全面也是导致同组其他涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度实验值低于理论值原因之一。

3.3.3 临界体积分数

为使翻衬修复受损大管径、非压力排污或排水管道的涤纶/苧麻非织造复合材料不发生二次断裂, 进一步研究实验得到的临界体积分数, 即涤纶体积分数约为 20%。图 3 示出涤纶体积分数为 20% 附近的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度。可知, 涤纶体积分数为 18% 的涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度值最小, 为 41.57 MPa。涤纶体积分数为 16%、18%、20%、22% 和 24% 的 5 个组别中拉伸强度相差不大, 表明临界体积分数在涤纶体积分数 18% 附近。同时考虑实际操作的便利, 以及防止涤纶/苧麻非织造复合材料发生二次断裂现象, 将临界体积分数设为涤纶体积分数 20% 更为合理。

3.4 复合材料的微观结构表征

图 4 示出涤纶/苧麻非织造复合材料的纵横向

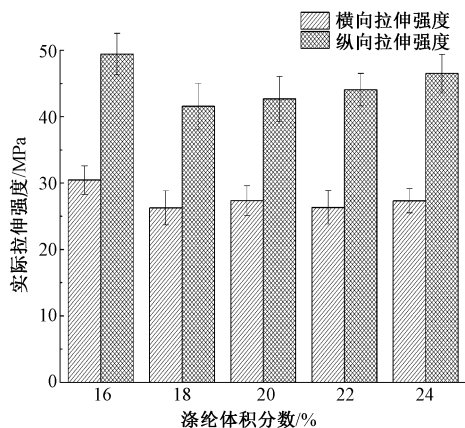
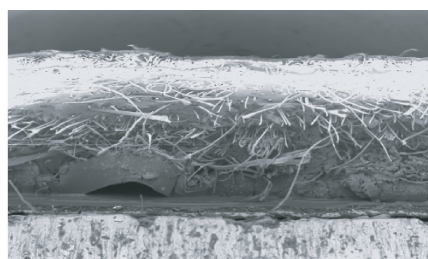


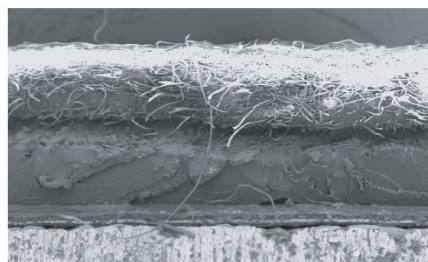
图 3 涤纶体积分数为 20% 附近的复合材料拉伸强度

Fig.3 Tensile strength of composites near 20% of volume fraction of polyester fiber

断裂面形貌。



(a) 纵向



(b) 横向

图 4 涤纶/苧麻非织造复合材料的纵横向断裂面形貌($\times 50$)

Fig.4 Longitudinal(a) and transverse(b) fracture morphology of polyester/ramie nonwoven composites($\times 50$)

在拉伸实验的过程中, 涤纶/苧麻非织造复合材料表面的树脂层首先产生裂纹, 然后裂纹随着拉伸强度的增加而逐渐增生扩散, 并在很短的时间内复合材料发生断裂。在涤纶和苧麻混杂的纤维层断裂后, 纤维从树脂基体中抽拔出, 可以观察到断口表面凹凸不平, 纤维断头较多, 表明大多数的涤纶、苧麻纤维承受了载荷。这种以裂纹沿纤维束扩展而拉断的破坏模式与理论中假设的苧麻、涤纶层的拉伸断裂破坏模式一致, 证明涤纶/苧麻非织造复合材料的理论临界体积分数和拉伸强度计算公式的可行性。

4 结 论

针对管道修复用涤纶/苧麻非织造复合材料在翻衬施工中易出现承压不足等问题,提出利用复合材料混合定律和胡克定律建立涤纶/苧麻非织造复合材料的理论临界体积分数和拉伸强度计算方法。

1)管道修复用涤纶/苧麻非织造复合材料的理论临界体积分数为 17.7%,此时的理论拉伸强度最小。

2)管道修复用涤纶/苧麻非织造复合材料实验得到的临界体积分数为 20%,理论与实际的临界体积分数区别不大,表明临界体积分数的计算公式具有一定实用性;然而由于苧麻、涤纶层的实际加工,及树脂浸润纤维不全面等误差原因,导致同组其他涤纶/苧麻非织造复合材料的拉伸强度实验值比理论拉伸强度低。

3)管道修复用涤纶/苧麻非织造复合材料实验得到的拉伸强度的变化规律与理论一致。即涤纶体积分数未到达临界体积分数时,拉伸强度随涤纶体积分数的增加而减小,到达临界体积分数之后,随涤纶纤维体积分数的增加而增大。 **FZXB**

参考文献:

[1] KARA T, BHAGAT R M, BHATTACHARYYA P. Municipal solid waste generation, composition, and management: the world scenario[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(15):1509-1630.

[2] YANG W. Discussion on design of non-excavation construction for sewage drainage pipe[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2012, 2(1): 67-69.

[3] 马保松. 非开挖管道修复更新技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2014: 108-110.

MA Baosong. Trenchless pipeline rehabilitation and renewal technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2014: 108-110.

[4] YU H N, KIM S S, HWANG I U, et al. Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes [J]. *Composite Structures*, 2008, 86(1): 285-290.

[5] 孙林. 苧麻纤维物理性能[J]. *化纤与纺织技术*, 2004(2): 20-22.

SUN Lin. Research on physical performance of ramie fiber [J]. *Chemical Fiber & Textile Technology*, 2004(2): 20-22.

[6] 闫丹. 管道修复用涤纶/苧麻混杂非织造复合材料的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2014: 46-51.

YAN Dan. Study on ramie/polyester hybrid nonwoven composite for pipeline repair [D]. Tianjin: Tiangong

University, 2014: 46-51.

[7] 罗凯, 张淑洁, 闫佳欣, 等. 管道修复用涤纶-苧麻复合机织物性能试验[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(6): 1245-1251.

LUO Kai, ZHANG Shujie, YAN Jiixin, et al. Performance test of ramie-polyester composite woven fabric applied on pipeline rehabilitation [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(6): 1245-1251.

[8] 罗凯. 管道修复用管状涤纶/苧麻复合机织物复合材料的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2017: 36-46.

LUO Kai. Study on tubular polyester/ramie composite woven fabric composite for pipeline repair[D]. Tianjin: Tiangong University, 2017: 36-46.

[9] 代少俊. 高性能纤维复合材料[M]. 上海:华东理工大学出版社, 2013: 90-96.

DAI Shaojun. High performance fiber composites[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2013: 90-96.

[10] 张淑洁, 王瑞, 徐磊, 等. 管状纺织复合材料力学性能的有限元分析[J]. *纺织学报*, 2008, 29(5): 51-54.

ZHANG Shujie, WANG Rui, XU Lei, et al. Finite element analysis of mechanical properties of the tubular textile composites [J]. *Journal of Textile Research*, 2008, 29(5): 51-54.

[11] 陈汝训. 混杂纤维复合材料受拉构件的最优混杂比研究[J]. *固体火箭技术*, 2005, 28(3): 219-221.

CHEN Ruxun. Study on optimal hybrid fiber composite tension member [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005, 28(3): 219-221.

[12] 赵谦, 王善元. 单向混杂复合材料拉伸性能的两级分析[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(6): 766-770.

ZHAO Qian, WANG Shanyuan. Two-step analysis of tensile behaviors of unidirectional hybrid composites[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 31(6): 766-770.

[13] 陈汝训. 混杂纤维复合材料的体积含量、质量含量和孔隙率[J]. *固体火箭技术*, 2011, 34(2): 238-240.

CHEN Ruxun. Volume fraction, mass fraction and void fraction of hybrid fiber composite material[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34(2): 238-240.

[14] RAWAL A, KAMESWARA RAO P V, RUSSELL S, et al. Effect of fiber orientation on pore size characteristics of nonwoven structures[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 118(5): 2668-2673.

[15] LEE S H, LEE J H, CHEONG S K, et al. A toughening and strengthening technique of hybrid composites with non-woven tissue [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2008, 207(1): 21-29.

[16] LIN J H, YAN R S, WANG R, et al. Manufacturing and mechanical evaluation of HRBP/PPTA intra-ply hybrid nonwovens for protecting cushioning composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 910: 254-257.