复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 5 期 10 月 2009 年
Vol. 26 No. 5 October 2009

文章编号：1000-3851(2009)05-0173-05

管道修复用管状非织造布复合材料的结构设计

王 瑞*，张淑洁，马崇启
（天津工业大学 纺织学院，天津 300160）

摘 要： 基于修复大管径管道对管状非织造布复合材料强度与厚度的要求，对管状非织造布复合材料的结构进行了设计。通过在非织造布中加筋增强了其强度；加筋非织造布设计块数在 2 块和 2 块以上，形成管状非织造布复合材料在周向接缝等距离设置的结构，这种多接缝的管状非织造布复合材料结构对称，在翻衬时避免单个接缝应力集中现象，从而防止了在接缝处出现开裂；在每块加筋非织造布覆膜时，两侧预留缝合区域，减少了缝合难度，增加了缝合效率，而且降低了缝合处的厚度，使得接缝处更容易膜焊接，保证了整个管状非织造布复合材料的密封性。最后通过实验验证了结构设计的合理性。

关键词： 管道修复；管状非织造布复合材料；结构；设计
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Structure design of the tubular nonwoven composite material applied on pipeline rehabilitation

WANG Rui*, ZHANG Shujie, MA Chongqi
(School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: Based on requirement of intensity and thickness for the tubular nonwoven composite material by the big pipeline rehabilitation, the structure of the tubular nonwoven composite material was designed. To add fabric to reinforce the tubular nonwoven composite material, two pieces or more of the reinforced nonwoven were designed, forming a structure of the tubular nonwoven composite material with equidistant seams in the circumferential direction. This structure of the tubular nonwoven composite material with many seams is symmetric, during inversion, the concentration of the stress of the single seam can be avoided, so the cracking of the seam is prevented; when the reinforced nonwoven is coverd with film, the areas at its two sides for sewing were obligated, the difficulty of the sewing is decreased, the efficiency of the sewing is increased, and the thickness of the seam is decreased; the film jointing of the seam becomes much easier, the airproof of the tubular nonwoven composite material being guaranteed. At last through the test, the rationality of the structure design was tested.

Keywords: pipeline rehabilitation; tubular nonwoven composite material; structure; design

管道的非开挖翻衬修复技术是指在不开挖地表的条件下，采用纺织纤维材料制成管状织物，对其外表面进行热熔覆防渗膜与内表面浸渍粘结树脂，然后采用翻转法利用气压或水压使之粘结并衬于旧管道内壁上，在一定压力下，树脂常温或加热条件下固化后，形成内壁光滑的管状纺织复合材料，从而完成对旧管道的保护与修复[1]。其中管状织物作为增强体，包括机织和非织造布 2 种。由于机织管状织物制作方法的限制，使得管状材料的厚度较薄，适合修复管径较小的管道，如燃气管道、电信电缆管道及部分工业用管道。对于大管径管道如给排水管道、石油管道及工业用排污管道等，其所需内衬管的厚度较大，以保证足够的刚度与强度[2]。非织造布制作过程中，厚度没有限制，因此本文中主要对适合修复大管径管道的管状非织造物复合材料的结构设计进行了探讨性研究。

当采用非开挖技术进行埋地受损管道翻衬施工时，管状非织造布复合材料将从萎缩的状态变成“开花”状态，这就要求其能够承受复杂的应力与变形[3]。目前，管状非织造布复合材料制作时，先以非织造布为骨架，均匀涂覆防渗膜，制备成平面状的非织造布复合材料；然后把非织造布复合材料的

收稿日期： 2008-09-23；**收修改稿日期：** 2009-01-09
基金项目： 天津市应用基础及前沿技术研究计划(08JCYBJC11400)
通讯作者： 王 瑞，教授，主要从事纤维增强复合材料方面的研究 E-mail：wangrui@tjpu.edu.cn

宽度方向对接在一起，即可制成管状非织造布复合材料。对接有 2 种方式：一是缝合；二是热压粘合。缝合的管状非织造布复合材料，其接缝处的厚度是其它部分厚度的 2 倍，在实际翻衬时接缝处的缝合线承受集中应力而容易断裂，而且缝合时缝纫针不仅要刺穿柔软的非织造布，还要刺穿较硬的防渗膜，致使缝合比较困难，缝合效率不高，同时接缝处会产生许多针眼，特别是翻衬施工后，针眼会受拉变形和扩大，留有渗漏的隐患而影响密封，一般达不到复合材料抗透气性、抗透水性及翻衬时力学性能的要求，如图 1(a)所示；热压粘合的管状非织造布复合材料，其搭接处必然是双层的基布和防渗膜，厚度也是其它部分厚度的 2 倍，热压后，其厚度也远厚于其它部分，且利用搭接界面防渗膜的热熔粘合作用而粘接成管状，其多层结构的层间强度和接缝强度也不能得到保证，翻衬施工时容易开裂，如图 1(b)所示[4]。更重要的是，目前的管状非织造布复合材料，不论是哪种对接方法，均采用一块非织造布和一条接缝的管状成型方式制成，在进行修复管路实际应用时，会造成非织造布复合材料的“翻转头”的翻衬施工机械运动不稳定，接缝处产生较大的应力集中，容易开裂或变形不均匀，造成管状非织造布复合材料的密封和防渗性能下降，使受损管道内衬修复效果下降，甚至使修复施工失败。

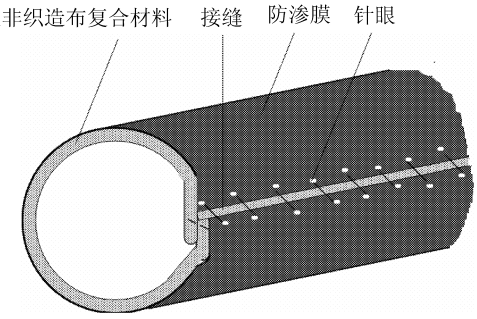
本文作者在以上管状非织造布复合材料结构设计的基础上，针对修复大管径管道对管状非织造布复合材料强度与厚度的要求，提出了在非织造布中加筋以增强复合材料的强度，以及设计多个接缝以避免复合材料翻衬时在接缝处开裂的现象。而且通过实验验证了结构设计是可行的。

1　理论基础

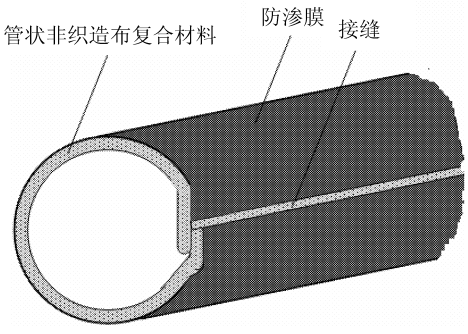
1.1　强度计算

管道内压包括翻衬时产生的内压 P_f 和运行时输送介质产生的内压 P_s。在设计管状纺织内衬材料的纬向与经向强力时，设计值应大于等于计算值。由于大管径管道一般是排水或排污管道，属于非压力管道，因此输送的介质对管道产生压力很小，这里只考虑翻衬时产生的内压 P_f 对管状非织造布复合材料产生的应力。

翻衬压强引起管状非织造布复合材料的纬向应力[5]为



(a) Material by sewing



(b) Material by hot-pressed with bond

图 1　缝合管状非织造布复合材料示意图

Fig. 1　Sketch of the tubular nonwoven composite material

$$\sigma_y = \frac{P_f(D_2 + 2H)}{2H} \tag{1}$$

式中：σ_y—管状非织造布复合材料的纬向应强(MPa)；P_f—翻衬压强(MPa)；D_2—管道内径(mm)；H—管状非织造布复合材料的厚度(mm)。

管道内压引起管状非织造布复合材料的经向应力[5]为

$$\sigma_x = \frac{P_f(D_2 + 2H)}{4H} + \frac{\beta_1 P_f q_{v1} v_1/(ZRT) + P_f \pi D_2^2/4}{S} \tag{2}$$

式中：σ_x—管状非织造布复合材料的经向应力(MPa)；ρ—气体密度(kg/m^3)；Z—气体压缩系数；R—气体常数，对空气 $R=287.06$ J/(kg·℃)；T—绝对温度(K)；β_1—动能修正系数，在流动计算问题中，一般近似地取 $\beta_1=1$；q_{v1}—介质的体积流量(m^3/s)；v_1—介质的平均流动速度(m/s)；S—管道的截面积(m^2)。

1.2　厚度计算

非压力管道在部分损坏的条件下，根据 ISO(国际标准化组织)国际方程，管道所承受的压力与内衬的管状非织造布复合材料的厚度、强度之间存在以下关系[6]：

$$P_f = \frac{2\sigma}{C(SDR-1)} \tag{3}$$

式中：P_f—翻衬压强(MPa)；C—安全系数(通常取1)；σ—管状非织造布复合材料的拉伸断裂强度(MPa)；SDR—管状非织造布复合材料的标准尺寸比，$SDR=\frac{D_1}{H}$，D_1 为管状非织造布复合材料的公称外径(mm)，H 为管状非织造布复合材料的厚度(mm)。

由式(3)可以推导出管状非织造布复合材料的厚度计算公式：

$$H=\frac{CD_1P_f}{CP_f+2\sigma} \tag{4}$$

以修复局部穿孔的排水管道为例，可采用式(4)进行管状纺织复合材料厚度的计算。设管道壁厚为 10 mm，管径分别为 1200、1400、1600 mm，翻衬压强 $P=0.05$ MPa[7]，代入式(1)、(2)可得内衬修复材料的断裂强度的最小值分别为 3、3.5、4 MPa。取安全系数 $C=1$，将以上参数代入式(4)可得修复不同管径排水管道需要非织造布复合材料的厚度，如表 1 所示。

表 1　修复不同管径的非织造布复合材料厚度

Table 1　Width of the tubular nonwoven composite material to rehabilitate the different diameter pipelines

Diameter of the pipeline/mm	Intensity/MPa	Width/mm
1200	3.0	7.86
1400	3.5	7.09
1600	4.0	6.01

2　结构设计方案

2.1　非织造布的拼接块数

根据待修复管道的管径，结合加筋非织造布的幅宽设计，每块加筋非织造布的幅宽应当一致或等宽，最好依据现有产品来选择，尽可能不剪裁加筋非织造布的幅宽，以节约资源，降低成本；拼接块数也不宜多，多了会增加拼接工序负担，比较好的是 2～8 块，理想的是 3～6 块，一般待修复管道的管径越大接缝个数越多。等宽的 2 块或 2 块以上的非织造布作基布制造的管状非织造布复合材料具有周向对称的几何结构，在翻衬施工时，可以实现其周向应力的均匀分布，机械变形稳定，避免了单一接缝处应力集中和机械变形不稳定的问题。

2.2　加筋非织造布

为了增大非织造布的拉伸强度，可以采用针刺的方法将涤纶长丝或机织物刺入非织造布。根据翻衬压强引起的内衬材料经纬向的应力，来设计加筋布的结构，一般为平纹织物，且经纬向的密度较低，防止针刺时被折断。加筋非织造布的成型过程如图 2 所示。

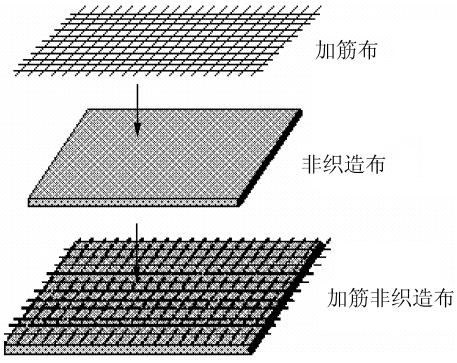


图 2　加筋非织造布成型过程示意图

Fig. 2　Sketch of molding course of the reinforced nonwoven

2.3　加筋非织造布局部覆膜

在每块加筋非织造布宽度方向上的两侧留有缝合区域，其余处均匀涂覆防渗膜，如图 3 所示。这样缝合时就避免了缝针刺破防渗膜，提高了缝合效率，而且降低了缝合楞边的高度，便于接缝处密封处理。

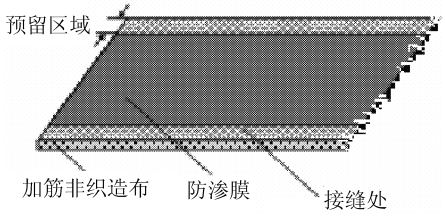


图 3　加筋非织造布局部覆膜示意图

Fig. 3　Sketch of covering film partly of the reinforced nonwoven

2.4　缝合方法

利用缝合边把设计数量或块数涂覆有防渗膜的加筋非织造布平面对接缝合成管状物体，平面对接缝合是指 2 个缝合边之间没有搭接或重叠地紧靠在一起的缝合连接。可采用包缝技术，通过调整缝纫线的张力，可使缝合处平整。在实际的平面对接缝合中，如果存在拼接的叠压或涌起，也应当剪除(缝合设备可自动剪除)，使缝合边拼接面平整，如图 4 所示。本文中设计的平面对接缝合仅针对柔软的基布，没有较硬的防渗膜，所以适用于现有缝接设备，缝合效率高，完全可以克服多接缝带来的工时耗费，同时缝合质量优良。

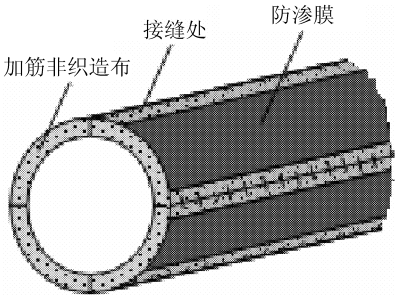


图 4　覆膜加筋非织造布缝合示意图

Fig. 4　Sketch of sewing of the reinforced nonwoven with film

2.5　接缝处膜焊接

对覆膜加筋非织造布接缝处进行膜焊接处理，并使接缝处防渗膜的厚度与其余处涂覆树脂的厚度均匀一致，从而保证整个内衬材料的密封性能。具体方法是预先制备缝合边 2 倍宽度的膜条，且膜条的厚度与涂覆在加筋非织造布上的防渗膜的厚度一致。缝接膜焊接时，把膜条直接热压粘合在平面对接缝合处即可，如图 5 所示。

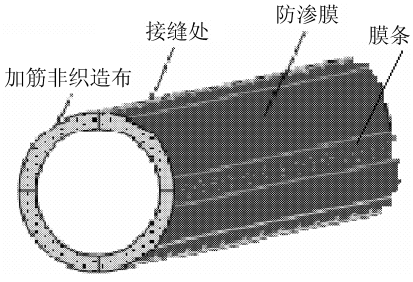


图 5　接缝处膜焊接示意图

Fig. 5　Sketch of film sealing in seam

3　试验验证

3.1　物理机械性能

根据 HG/T3050.3－2001 涂层织物厚度的测试标准，对覆膜非织造布的厚度进行了测试，如表 2 所示。对比表 1，可知覆膜非织造布的厚度达到了设计要求，而且接缝处的厚度较其他部位厚度略有增加，但是增幅很小。这是由于缝合与膜焊接会使接缝处的厚度有所增加，但是由于本文中设计了加筋非织造布的局部覆膜与包缝技术，使得接缝处的厚度增幅很小。

管状非织造布复合材料中加筋非织造布主要起增强作用，其断裂强度将直接影响复合材料的断裂强度，进而决定其能否承受管道的施工压力[8]。因此，覆膜非织造布的拉伸性能指标是决定施工成败的关键因素。根据 GB/T 3923.1－1997 使用 INSTRON3369试验机对覆膜非织造布的拉伸性能进行了测试，结果如表 2 所示。对比表 1，可知覆膜非织造布的断裂强度达到了设计要求，而且缝合处的断裂强度稍低于横向断裂强度。一方面是由于缝针对纤维的损伤致使缝合处纤维的强度下降；另一方面是由于在缝合处产生了应力集中，使样品在拉伸过程中缝合处容易被拉断。

表 2　管状覆膜非织造布的物理机械性能测试结果

Table 2　Test results of physical and mechanical property of the tubular nonwoven with film

Intensity in axial direction/MPa	Intensity in circle direction/MPa	Intensity in seam/MPa	Width/mm	Width in seam/mm
7.252	3.858	6.327	7.102	7.327

3.2　密封性能

如图 6 为密封性能测试示意图。一个衬有管状非织造布复合材料的 1.5 m 测试管，测试管的管径为 50 mm，测试管一端接有测压计，通过充气使得测试管内压强增加；当测压计显示压强值达到施工翻衬压强时，立即停止充气，保压 24 h，压力无变化，说明本文中设计的管状纺织复合材料的密封性能优良[2]。

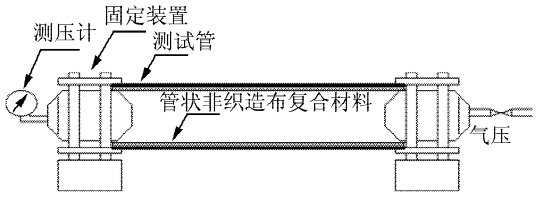


图 6　密封性能测试示意图

Fig. 6　Sketch of sealing test

4　结　论

（1）根据修复大管径管道对管状非织造布复合材料强度与厚度的要求，本文中设计了管状非织造布复合材料采用 2 块或 2 块以上相同的加筋非织造布作增强体，然后把它们平面对接缝合成管状，其几何结构对称，具有接缝处平整、整体结构好、厚度一致、翻衬时没有应力过度集中情况、接缝处不易开裂、适用于大直径管道修复等特点。

（2）在每块加筋非织造布覆膜时，两侧预留缝合区域，减少了缝合难度，增加了缝合效率，而且降低了缝合处的厚度，使得接缝处更容易膜焊接，

保证了整个管状非织造布复合材料的密封性。

参考文献：

[1] Hufenbach W，Kroll L，Böhm R，Langkamp A，Czulak A. Development of piping elements from textile reinforced composite materials for chemical apparatus construction [J]. Journal of Materials Processing Technology，2006，175(6)：231-240.

[2] 张淑洁. 管道修复用管状纺织复合材料的研究 [D]. 天津：天津工业大学，2008：22-23.

[3] 米　淇，刘殿博. 采用翻转内衬技术修复管道 [J]. 油气储运，2000，49(1)：58-59.
Mi Qi，Liu Dianbo. Repairing pipeline adopting inversion lining technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation，2000，49(1)：58-59.

[4] 蔡志章，田宝全. 修复地下管线的复合软管：中国，99216840.6 [P]. 2000-06-28：5-6.

[5] 张淑洁，王　瑞，王　欢. 管道修复用管状纺织复合材料强度的设计原理 [J]. 复合材料学报，2008，25(2)：161-165.
Zhang Shujie，Wang Rui，Wang Huan. Design principle of intensity of tubular textile composite material：Applied on pipeline rehabilitation [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：161-165.

[6] 林永志，赵铁成. 翻转法修复给排水管道的内衬结构设计研究 [J]. 非开挖技术，2005，22(6)：8-10.
Lin Yongzhi，Zhao Tiecheng. Research of structure design of the liner applied on sewer pipeline rehabilitation [J]. Trenchless Technology，2005，22(6)：8-10.

[7] 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，2001：48-62.

[8] Zhao W，Nassar R，Hall D E. Incorporating reliability into the design of pipeline rehabilitation liners [J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2005，20(6)：203-212.