

多基复合材料在管材制造中的应用

Application of Multi-Matrix Composites in Pipe Manufacturing

恒润集团有限公司 宋鹏飞 宋建国

[摘要] 对国家大规模投资的水利市政以及海水淡化等工程中的管道工程,设计具有高性能、长寿命、低成本的新型多基复合管道,无疑是具有重大意义的。基于多基复合管材的研究背景,对多基复合管材的结构设计理论做了探索性的研究。理论推导出了各载荷作用下多基复合管的内力表达及应力分析,为该复合材料大规模应用于管道设计做了有益的基础性研究。

关键词: 多基复合结构 复合管材 海水淡化 水利市政 管道

[ABSTRACT] Facing the large-scale investment in municipal water conservancy as well as desalination and other pipeline project, it is undoubtedly of great significance to create new kind of pipe which has advantages of high performance, long service life and low cost. Based on designing for the multi-matrix composites pipe, the exploratory research on the composites theory of concrete, fiber reinforced plastic and metal is carried out. The inner force and stress under different loads to the pipe are obtained, which will be useful for the basic exploration on the multi-matrix composites pipe's application.

Keywords: Multi-matrix composites structure Composites pipe Desalination Municipal water engineering Pipe

水资源对居民生活质量以及经济发展水平有着重要影响,而我国地域辽阔,全国降水量和径流量的地区分布极不均匀,人均水资源量仅相当于世界人均占有量的 1/4。同时,我国水资源分布极不均衡,全国水资源有 80.4% 分布在长江流域及其以南地区,而在长江流域以北广大地区,水资源仅占全国的 14.7%。此外,我国拥有大量的海岸线,海水资源丰富,是世界上海岸线最长的国家之一。

输水管线中,最常用的管道有两种,一为预应力钢筋混凝土管,简称 PCCP 管;二为玻璃钢管,简称 FRP 管。对这两种常用管道的优缺点进行对比,发现在耐腐蚀性能上,玻璃钢管耐腐蚀性强,可输送海水、污水,

PCCP 管耐腐蚀性差,主要体现在:(1) 预应力钢筋易锈蚀;(2) 管壁易腐蚀后碳酸盐化,并且在强度安全可靠性能上,PCCP 管的抗内压强度主要依靠混凝土外侧的一根连续缠绕而成的预应力钢筋,一旦钢筋的任何部位发生锈蚀而断裂,整个管材将会突然崩坏而造成爆管,维修比其他管材要困难。如利比亚“大人工河”工程中连续出现了 5 次爆管事故,事故原因为氯化物导致了 PCCP 管预应力钢丝的锈蚀。在刚度性能上,PCCP 管刚度大、抗外压能力强,而玻璃钢管刚度低、抗外压能力较弱,对土质要求高,埋设条件高,施工成本高;在水力特性上,玻璃钢管内壁光滑、不结垢、耐腐蚀,水力特性好,如在 0.1% 水力坡度下, DN2600 的 PCCP 管的流量为 $10.5\text{m}^3/\text{s}$, DN2400 玻璃钢夹砂管的流量为: $11.3\text{m}^3/\text{s}$ ^[1]。因此,如能克服不同管材的缺陷,利用其各自优势,设计出具有树脂基复合材料、水泥基材料、金属材料相复合的新型多基复合管材,不仅可进一步提高管道性能,延长使用寿命,而且可降低成本。这对于国家大规模投资的水利市政以及海水淡化等工程的管道建设而言,无疑是具有重大意义的。

本新型管道主要由如下材料复合构成:(1) 玻璃钢套筒层;(2) 混凝土结构层;(3) 预应力钢丝;(4) 树脂砂浆外保护层。多基复合管材产品如图 1 所示。

本文针对这种新型复合管材展开一定的理论和计算方面的研究,为以后的新型管材的实际应用提供一定理论基础。



图1 多基复合管材产品

Fig.1 Pipe product of multi-matrix composites

* 国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA031306)资助。

1 各载荷作用下管道内力计算

从理论上推导各种荷载作用下管道的内力大小。

取单位长度管道进行分析,其截面如图 2 (a) 所示;该管道为 3 次超静定结构,考虑到管道左右正对称,左半部分管道截面可以等效为悬臂梁结构^[2-4],如图 2 (b) 所示(其中, P_{ei} 为管周任意位置土荷载产生的压力, P_{pi} 为管周任意位置自重产生的压力, P_{fi} 为管周任意位置流体内压力, M_0 为管道顶部截面的弯矩, F_{n0} 为管道顶部截面的轴力)。

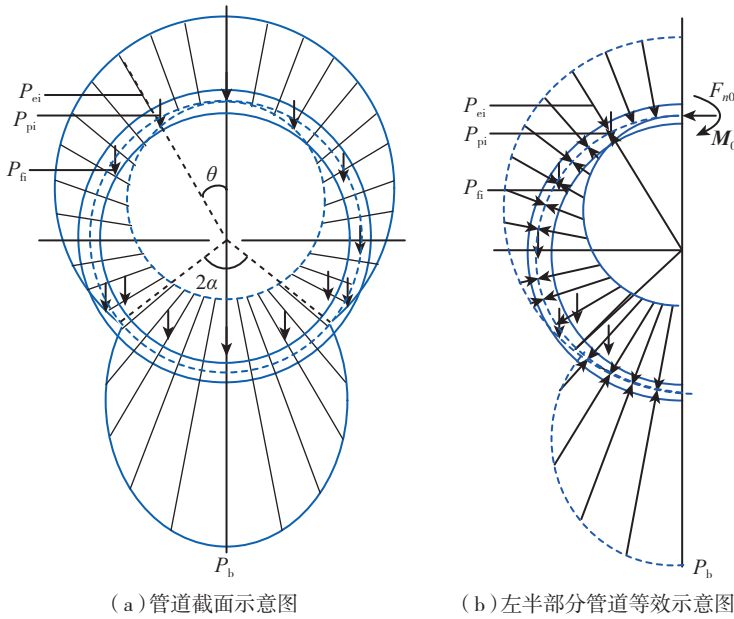


图2 截面示意图
Fig.2 Section view

不难得到土荷载和活荷载作用下管道截面上的弯矩为:

$$M_e(\theta) = f_{e1}(\theta, \alpha)R(W_e + W_l) \quad (1)$$

其中, α 底部基础包角的 1/2; θ 为环向坐标; R 为管道外半径; W_e 为土荷载; W_l 为活荷载; f_{e1} 为分段函数。

类似可推知土荷载和活荷载作用下管道截面上的轴力、剪力可表示为:

$$F_{eN} = f_{e2}(\theta, \alpha)R(W_e + W_l) \quad (2)$$

$$F_{eS} = f_{e3}(\theta, \alpha)R(W_e + W_l) \quad (3)$$

其中, f_{e2} 、 f_{e3} 为分段函数。

类似推导,可得管内流体自重作用下管道截面上的弯矩、轴力、剪力及管体自重作用下管道截面上的弯矩、轴力、剪力和基础包角支反力作用下管道截面上的弯矩、轴力、剪力等理论表达式^[5-7]。

2 多基复合管有限元分析

以管长 5m, DN2000 的 FPCCP 预应力混凝土玻璃钢复合管为例,分析工作压力为 0.6MPa 时玻璃钢预应力筋预应力与混凝土开裂的关系,第一种状态玻璃钢的预应力为 50MPa,第二种状态玻璃钢的预应力为 100MPa。图 3、图 4 计算结果表明,玻璃钢预应力筋具有两种不同预应力时,随着玻璃钢预应力筋预应力的增加,混凝土拉应力区减小,且最大拉应力也随之减小。通过控制玻璃钢预应力层的预应力,可以有效避免混凝土裂纹的生成。数值仿真技术手段对层状预应力混凝土玻璃钢复合管的结构设计起到了指导作用。

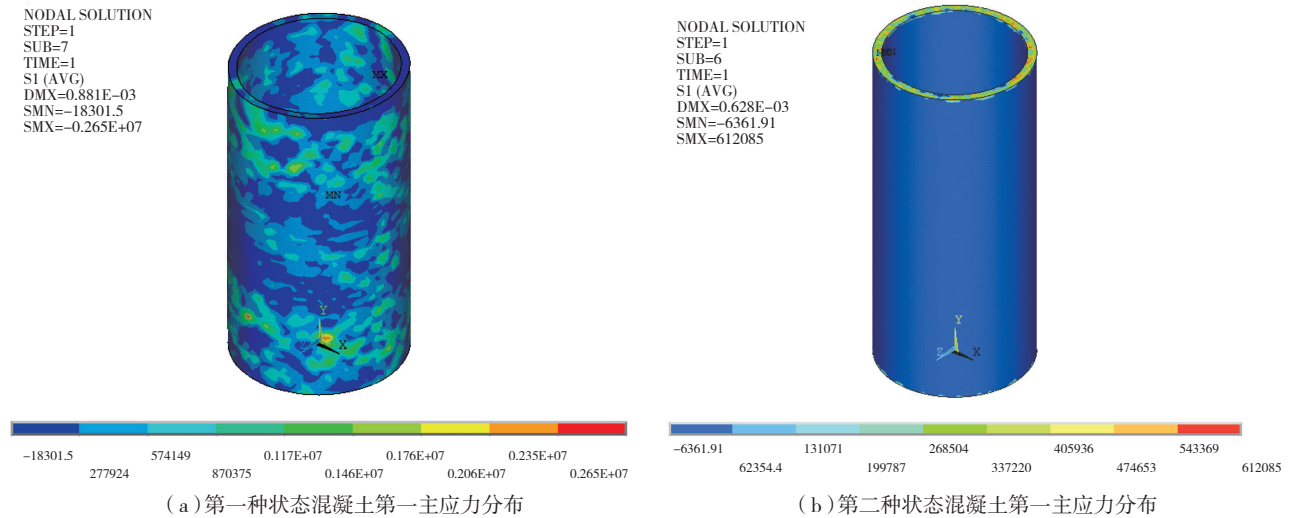
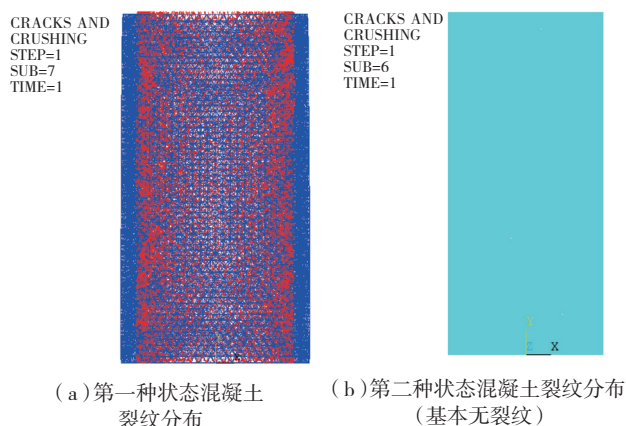


图3 复合管中混凝土的两种状态第一主应力分布

Fig.3 Major principal stress distributions for a composites pipe under 2 concrete conditions



(a) 第一种状态混凝土
裂纹分布 (b) 第二种状态混凝土裂纹分布
(基本无裂纹)

图4 复合管中混凝土的两种状态裂纹分布图

Fig.4 Crack distributions for a composite pipe
under 2 concrete conditions

通过调整高强聚合物基预应力层的预应力可对混凝土预应力进行设计与控制。

3 结论

基于多基复合管材的应用背景,本文对多基复合管材的结构设计理论做了探索性的研究,且通过数值仿真进一步为结构设计提供了依据,为该复合材料大规模应用于管道设计做了有益的基础性研究。具体从管道设计的流程出发,推导了实际管道设计中可以使用的公式如下:

(1) 管道实际使用过程中的土荷载、地面活载、管内流体自重、管体自重等外载荷在管道上产生的压力的分布规律,外载荷作用下引起的基础包角上的支反力分布规律;

(2) 预应力层中施加预应力后管道上各材料层应力分布均匀化处理后的应力计算公式。

参考文献

- [1] 李卓球,岳红军. 玻璃钢管道与容器. 北京: 科学出版社, 1990:600-619.
- [2] 龙驭球,包世华. 结构力学. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 王耀先. 复合材料力学与结构设计. 上海: 华东理工大学出版社, 2012-09.
- [4] 吴兴文. 多基复合管的结构分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] American Water Works Association. ANSI/AWWA C304-2007 standard for design of prestressed concrete cylinder pipe. American Water Works Association, 2007.
- [6] American Water Works Association. ANSI/AWWA C301-2007 standard for prestressed concrete pressure pipe, steel-cylinder type for water and other liquids. American Water Works Association, 2007.
- [7] American Water Works Association. AWWA Manual M9-2008 concrete pressure pipe. American Water Works Association, 1995.

(责编 良辰)

(上接第 146 页)

的梁、肋结构上使用热塑性复合材料,充分发挥热塑性复合材料可以快速成型、批量生产的低成本、高效率优势;同时,在一些需要抗冲击(如前缘结构)或耐高温的部位(如发动机面板)也可以使用热塑性复合材料,以充分发挥热塑性树脂材料较高的韧性、优秀的损伤容限性能和抗耐热性等特征。另外,一体化热成型批量生产热塑性复合材料零件是未来的一个重要发展趋势,其设备研制相对容易,制造工艺相对简单,我国低成本制造工艺也可以考虑从该项技术的研发开始,积累经验,并逐渐赶上国外先进制造水平,争取在将来使用我国自主研发的自动化成型设备,如自动铺带、铺丝、缠绕、拉挤设备等。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料和航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 张兴金,邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机. 纤维复合材料, 2009, 6(2):24-26.
- [3] 刘雄亚. 纤维增强热塑性复合材料及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [4] 陈绍杰,申屠年. 先进复合材料的近期发展趋势. 高科技纤维与应用, 2004, 29(1):1-7.
- [5] 黄汉生. 复合材料在飞机主结构中的应用动向. 化工新型材料, 2004, 32(10):51-52.
- [6] 贺福,孙微. 碳纤维复合材料在大飞机上的应用. 高科技纤维与应用, 2007, 32(6):5-8.
- [7] Peter M. High performance thermoplastic. Plastics engineering, 2007, 6: 18-22.
- [8] Béland S. High performance thermoplastic resins and their composites. The united states of America: Noyes, 1991: 1-156.
- [9] Ramathal H, Favaloro M. A comparison of maximum use temperatures for high performance thermoplastic composites. Presented at the SAMPE 2008 Fall Technical Conference, Memphis TN.
- [10] Ahmed T J, Stavrov D, Bersee H E N, et al. Induction welding of thermoplastic composites—an overview. Composites: Part A, 2006, 37: 1638-1651.
- [11] Michael Favaloro. A Comparison of the environmental attributes of thermoplastic vs. thermoset composites [EB/OL]. 2009, <http://www.thomasnet.com/pdf.php?prid=101809>.
- [12] Lang D, Barre S, Colas C C, et al. Thermoplastic Tape Placement and Continuous Consolidation. RTO-MP-069(II), 2001, 23: 1-5.
- [13] Innovation award for breakthrough technology of G650 rudder and elevator[EB/OL]. 2010-04-12, www.ticona.com.
- [14] 陈亚莉. 高性能热塑性复合材料在飞机上的应用. 航空维修与工程, 2003, 3:28-30.
- [15] Thermoplastic composites for aerospace [EB/OL]. 2008-01-09, www.iapd.org.
- [16] Yao K D, Liu J, Cheng G X, et al. The application of thermoplastic matrix composites to aircraft industry. Appl. Polym. Sci., 1996, 60:279.

(责编 亿霖)