

玻纤增强塑料复材管道力学性能研究

彭 鑫

(南宁市建筑规划设计集团有限公司, 广西 南宁 530001)

摘 要: 为满足复杂条件下长距离输水需求,通过足尺模型试验,结合有限元分析方法,研究了一种玻璃纤维增强塑料复材预制管道。采用静载试验分析了管道变形历程,研究表明管道具有初始环刚度大、后期延性好、承载力高的优点。采用冲击试验研究了蒙皮厚度、管节接头方式对管道冲击性能的影响,并根据试验结果对复材管道提出了实际应用推荐构造措施。

关键词: 玻璃纤维;复合材料;静力试验;动力试验

中图分类号: TU992.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0294-04

Study on Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Pipes

PENG Xin

(Nanning Architectural and Planning Design Group Co., Ltd., Nanning 530001, China)

Abstract: In order to meet the needs of long-distance water conveyance under complex conditions, a glass fiber reinforced plastic composite prefabricated pipe is studied by full-scale model test and finite element analysis. The static loading test is used to analyze the deformation process of the pipe. The research shows that the pipe has the advantages such as high initial ring stiffness, good ductility in the later stage, and high bearing capacity. The impact tests are used to study the effects of skin thickness and segment connection methods on the impact resistance of the pipe. Based on the test results, the practical application and recommended construction measures for composite pipes are proposed.

Keywords: glass fiber; composite material; static test; dynamic test

0 引 言

广西某水资源配置工程以郁江为核心水源,连通红水河、郁江、桂南沿海诸河,途经北海、钦州、南宁、玉林等地,输水线路总长约 500 km。该工程具有输水管道线路长,沿线地形起伏大、地质结构复杂,建设规模及难度大的特点。拟采用输水方式有重力、压力输水;敷设方式有埋地、架空敷设。管道受水、空气、温度、湿度、压力等长期作用,架空敷设时还受塌方、落石等潜在威胁,需要具有强度高、刚度大、水阻小、延性优良、承载潜力大、冲击韧性好、绝热耐蚀、密闭性好、使用年限长、综合成本低等多重性能与功能要求,此外,工程现场和运维还对管道提出了轻质高强、安装快捷、现场作业少、维修更换方便的要求。

常见的长距离输水管道,按材料分为钢管、球墨

铸铁管、混凝土管、塑料管、玻璃钢管^[1]。钢管不耐高温与腐蚀、易变形、成本高;球墨铸铁管制造难度大、造价高;混凝土管尺寸重量大、管节短、接头多、运输安装不便、管道基础要求高、施工周期长、强度低、易开裂、抗震及耐久性能差、维修更换难度大;玻璃钢管^[2]刚度小、易变形、冲击性能差。

1 玻璃纤维增强塑料复材管道

按前述使用性能与功能要求,设计了一种玻璃纤维增强塑料复材管道,该管道以玻璃纤维增强塑料为内、外蒙皮,具有耐高温、耐腐蚀、模量高,易加工成形等优点,中间芯层则使用轻质陶粒,具有容重小、隔热好、吸能强、成本低等优点^[3],外蒙皮用于抵抗管外复杂的物理、化学作用,芯层用于提高管道截面刚度、传递压力、吸收变形能量,内蒙皮直接承受水流作用,整管采用往复式定长缠绕工艺生产,各结构层依靠树脂定型成一体,见图 1、图 2。

复材管道结构主要由玻纤增强塑料内、外层蒙皮与陶粒芯层组成,内、外蒙皮原材料主要为玻璃纤

收稿日期: 2025-04-08

作者简介: 彭鑫(1992—),男,硕士,工程师,从事市政结构设计工作。



图1 复材管道剖面图

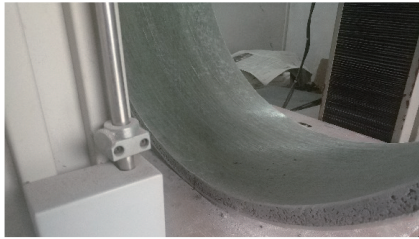


图2 管道足尺模型

维与不饱和聚酯树脂,芯层原材料主要为轻质陶粒与不饱和聚酯树脂。

树脂作为黏结纤维、陶粒及结构层间变形协调的关键材料,要求具有良好的黏结性能、抗拉模量、断裂延伸率,依据《树脂浇筑体性能试验方法》(GB/T 2567—2008)^[4]制作树脂浇铸体试件并进行拉伸试验,试验结果见表1。

表1 管道材料物理性能指标表

玻璃纤维	抗拉强度/MPa	3 000
	拉伸强度/MPa	66.7
树脂	拉伸弹模/MPa	320
	断裂伸长率/%	12.1
陶粒	立方体抗压强度/MPa	2.2
	含水率/%	0.2

对陶粒控制含水率、粒料形状、级配、树脂配合比等参数,经控制变量研究,陶粒原材最优含水率应低于0.2%。经陶粒树脂混合料立方体抗压强度试验,优化确定芯层生产配合比为树脂与陶粒质量比为0.2,立方体抗压强度2.2 MPa。

玻纤与管道夹角对蒙皮力学性能影响较大^[5],纤维平行方向拉伸性能较优,纤维层数、厚度、原料性能均会影响管材力学性能,本试验管材经优化确定玻纤分布在两个方向,其中环向缠绕角接近90°,以提高初始环刚度,交叉缠绕角54.73°^[6],以提高管道整体变形性能。

根据管材设计目标,其性能主要评价体系为基本物理指标、复杂条件下可靠性能,基本物理指标包括原材力学试验、成管尺寸精度、管道米重控制等,复杂条件下可靠性能包括隔离环境危险(高温、高湿、有毒、腐蚀)能力、变形能力、冲击性能、接头性

能、安装拆卸难易程度等,此外管材设计尚需具有优良的经济性,制造工艺简便、原材便宜、可重复使用等。

2 复材管道刚度研究

环刚度试验可定量评价外荷作用下管道力学性能^[7],分析结构层间强度、延性特征、荷载传递规律、破坏阶段等。依据《纤维增强热固性塑料管平行板外载性能试验方法》(GB/T 5352—2005)^[8]进行管道环刚度试验,管段试件内径800 mm、长300 mm。

试验表明,倾角约45°的斜裂缝由管道与垫板接触位置开始发育,逐渐贯穿芯层至内蒙皮结合面,见图3、图4。



图3 下接触面开裂(径向变形24 mm)



图4 上接触面开裂(径向变形24 mm)

由于芯层变形能累积、结合面粘接强度达到上限,伴随一声闷响,裂缝突然贯穿芯层,内蒙皮与芯层剥离,荷载突降,此时管道径向变形量24 mm(3.0%)。当径向变形量达174 mm(21.8%)后,试件陶粒受外力作用引起相互挤压摩擦声、以及管道结合面剥离声。当径向变形260 mm(32.5%)后卸载,管道恢复见图5。

图6所示试件加载曲线突变发生在内蒙皮与芯层首次剥离后,曲线全过程均无明显屈服平台,首次剥离后,管道力学性能稳定恢复,强化阶段近似线性增长。加载过程内、外蒙皮均未出现裂缝。试验完成摇晃管道有陶粒摩擦响声,芯层陶粒约束发生破坏。

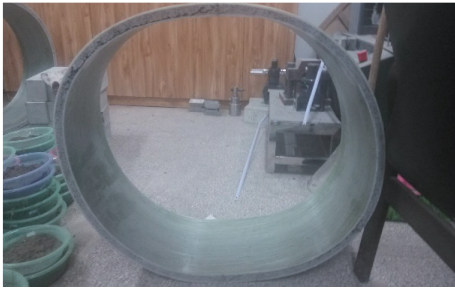


图5 管道变形恢复(径向变形260 mm)

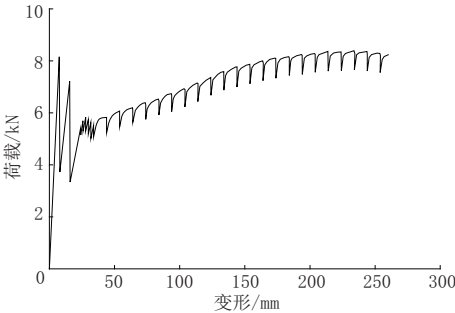


图6 试件典型加载曲线

按《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》GB/T 1447—2005^[9]计算初始环刚度,按《纤维增强塑料试验方法总则》GB/T 1446—2005^[10]统计计算结果见表2。

表2 环刚度试验结果

序号	蒙皮厚/mm		芯层厚/ mm	加载速度/ (mm·min ⁻¹)	弹性极限		环刚度/ (kN·m ⁻²)
	内层	外层			荷载/ kN	位移/ mm	
1#	2	4	20	10	1.0	2.1	29.9
2#	2	4	20	10	2.3	4.9	29.3
3#	2	4	20	10	1.1	2.1	32.6
4#	2	3	30	25	5.6	6.4	54.8
5#	2	3	30	25	5.9	7.3	51.6
6#	2	3	30	25	5.7	6.8	53.3
7#	4	5	20	10	8.6	8.0	69.1
8#	4	5	20	10	9.9	10.0	63.8

试验结果表明,增加各结构层厚度能显著提高管道整体环刚度。根据试验结果,提升复材管道承载力主要途径有:提高黏接材料塑性变形能力;增强结构层变形协调能力;改善结合面黏接能力。

基于试验研究,采用Abaqus建立复材管道有限元模型,管顶固定约束,端面约束 y 、 z 方向,材料参数取试验结果,对模型施加12 mm位移。

有限元结果显示外荷载作用下,复材管道的整体变形特征呈对称外鼓。

应力云图显示复材管道具有分层受力的特征(见图7),管道与垫板接触位置两侧内蒙皮产生拉应力,内蒙皮到外蒙皮拉应力递减,管顶处芯层产生压应力,并向两侧逐渐降低。该应力特征与试件芯层

裂缝斜向贯通内、外蒙皮一致。

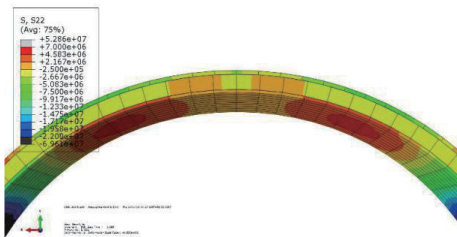


图7 管道应力云图

3 冲击试验

部分管段架空敷设时受塌方、落石等潜在威胁,为增强结构防灾减灾能力,有必要对管道开展冲击试验研究。本试验冲击落锤采用直径0.5 m、高0.6 m的混凝土圆柱体,重300 kg,见图8。



图8 试件与落锤

将落锤平稳提升至锤底离地7 m高,对管顶作作用点后,燃断吊绳,落锤自由下落冲击管道。

设计了三种管节接头方式:钢板抱箍加强接头、钢管抱箍加强接头、加强承插式接头。钢板抱箍加强接头指除采用普通承插式连接外,节段间以钢板抱箍加强连接;钢管抱箍加强接头则以平行钢管替代钢板;加强承插式接头采用厚壁承插口。每种接头均制作一组足尺试件,单个试件由两节管道连接,分五个冲击点,依次为节段1外端、节段1中点、接头、节段2中点、节段2外端。试验结果见表3。

表3 冲击试验结果

序号	蒙皮厚/mm		芯层厚/ mm	接头 型式	冲击点	最大变形/ mm
	内层	外层				
1#	2	3	30	钢板箍	接头	完全破坏
2#	2	3	30	钢管箍	接头	130
3#	2	5	20	承插式	接头	10
4#	2	3	30	—	节段中点	250
5#	2	5	20	—	节段中点	15
6#	2	3	30	—	节段端点	150

试验结果表明,将钢板抱箍改为钢管抱箍后,接头冲击变形显著减小,冲击后落锤弹离管道。加强承插式接头较其余两种接头能显著提高管道冲击性能。增加外玻纤层厚度能显著提升管道节段冲击性能。管道节段端头则由于落点难以准确落在端点,

试验结果偏小。加强承插式接头除具有抗冲击性能好,还便于维修更换,作为推荐连接方式。试验结果见图 9 至图 11。



图 9 冲击结果(钢板抱箍加强接头)



图 10 冲击结果(钢管抱箍加强接头)



图 11 冲击结果(加强承插式接头)

4 结 语

根据使用性能与功能要求目标,研究了一种玻

璃纤维增强塑料复材管道。

(1)试验表明复材管道具有良好的环刚度及延性性能,满足复杂条件下输水需求。

(2)复材管道静力试验表明荷载作用下管道破坏主要由蒙皮与芯层黏结剥离引起,根据试验结果对复材管道提出实际应用加强措施,一是从构造角度,增加蒙皮厚度、增加芯层隔离层阻碍裂缝发展路径;二是从受力角度,有限元分析表明结构层间剥离主要由应力分层引起,因此应使各结构层尽可能变形协调,提高黏接材料塑性变形能力。

(3)复材管道冲击试验表明增加蒙皮厚度相比芯层能更显著提高结构防灾减灾能力,设计管节接头方式推荐采用加强承插式接头。

参考文献:

[1] 罗宇丰.长距离输水管道设计若干问题探讨[J].城市建筑,2013(20):150-156.
[2] 励敏,彭夏军,葛春辉.软土地基上大直径玻璃钢夹砂管用压力输水管的研究[J].给水排水,2009,45(10):93-98.
[3] 尹天一,王志宇,余睿,等.多孔陶粒对超高性能混凝土的性能影响[J].混凝土,2022(10):137-148.
[4] GB/T 2567—2008,树脂浇筑体性能试验方法[S].
[5] M.W.K ROSENOW,董雨达.纤维缠绕角对聚酯玻璃钢管力学性能的影响[J].纤维复合材料,1988(1):21-32.
[6] 林柏生.缠绕玻璃钢管道轴向强度设计[J].玻璃钢/复合材料,1999(1):8-11.
[7] 石华旺,高怀君,魏连雨,等.埋地玻璃钢夹砂管涵环刚度优化设计[J].玻璃钢/复合材料,2017(12):51-56.
[8] GB/T 5352—2005,纤维增强热固性塑料管平行板外载性能试验方法[S].
[9] GB/T 1447—2005,纤维增强塑料拉伸性能试验方法[S].
[10] GB/T 1446—2005,纤维增强塑料试验方法总则[S].

(上接第 291 页)

Society of Rural Planning, 2016, 22(2): 89-98.
[14] 盛勇,刘健新.桥梁景观评价中的差异调查与对策[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(1):49-50;53.
[15] 王大海,崔永彬.城市桥梁造型及景观设计思考[J].交通世界(运输·车辆),2010(9):108-110.
[16] 蒋宇,孙军.桥梁景观审美体验的维度分析[J].公路,2019,64(4):255-258.
[17] 黄泽斌,肖雅丹,王奇文,等.城市景观桥梁群地域性美学研究[J].中外建筑,2022(10):40-45.
[18] 李健,宋丽朱,王鑫.类型学研究方法:概念辨析、研究步骤与拓展应用[J].中国行政管理,2024,40(8):56-64.

[19] 欧阳红,代美玲,王蓉,等.传统村落景观基因的识别与关系序列结构研究[J].地理与地理信息科学,2024,40(3):96-103.
[20] 任震,刘雨桐,韩广辉.黄河流域(山东段)村镇聚落文化景观基因识别指标体系构建[J].规划师,2024,40(2):145-152.
[21] 蔡文婷,姜娜,佃袁勇,等.乡村景观资源特征指标体系构建[J].风景园林,2022,29(3):25-30.
[22] 郝天之,李春华,杨涛,等.索-悬链线拱联合结构的受力机理与力学特征[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(8):89-102.
[23] 陈宝良.明清时期的绍兴及其地域文化——兼及江南区域视野下之吴越比较[J].安徽史学,2020(3):19-32.