

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.021

荷载作用下多夹砂层玻璃钢夹砂管涵结构破坏模式

王清洲,张朝阳,薛晓,孔丽颖,肖成志

(河北工业大学土木与交通学院,天津 300401)

摘要:为分析多夹砂层玻璃钢夹砂管在拉伸和压缩荷载作用下的破坏模式,自缠绕生产的管上截取不同形式的玻璃钢夹砂管样开展拉伸试验、压缩试验、静载破坏试验。结果表明,荷载作用下柔性玻璃钢夹砂管管壁结构的不同位置处于拉压相反的复杂受力状态,破坏模式较复杂。拉伸荷载作用下,纯缠绕层的试件以界面脱粘分层、纤维与基体断裂、纤维拔出等破坏模式为主,环向管壁切样达到拉伸破坏状态时发生瞬间脆性破坏,轴向管壁切样则为塑性屈服破坏;压缩荷载作用下,环向试件主要是裂缝和分层破坏,而轴向试件则是与试件长边呈 45° 的分层跨越剪切破坏;大变形条件下管环的静载破坏以裂缝、层间分离以及夹砂层剪切破坏为多夹砂层结构的主要破坏模式,控制三类破坏形式可提高管涵力学性能和使用寿命。

关键词:玻璃钢夹砂管;拉压荷载;破坏模式;变形

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0107-07

Failure Mode of FRP Sand Pipe Culvert Structure with Multiple Sand Layers under Load

Wang Qingzhou, Zhang Zhaoyang, Xue Xiao, Kong Liying, Xiao Chengzhi

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract : In order to analyze the failure mode of multi-layered FRP sand pipes under tensile and compressive loads, different forms of FRP sand pipe samples were taken from the self-winding pipes to conduct tensile experiments, crush experiments, and static load failure experiments. The results show that the different positions of the wall structure of the flexible FRP sand pipe under the action of load are under the complex stress state of opposite tension and compression, and the failure mode is comparably complicated. Under the action of tensile load, the specimens with pure winding layer are dominated by failure modes such as interface debonding and delamination, fiber and matrix fracture, fiber extraction, and instant brittle failure occurred when the hoop pipe wall reaches the tensile failure state. Axial pipe wall cut specimens reach plastic yield failure. Under compression load, the hoop specimens are mainly cracks and delamination failures, while the axial specimens are stratified cross shear damage at 45° from the long side of the specimen; the static load failure of the pipe ring under the condition of large deformation is the main failure mode of the multi sandlayers structure with cracks, interlayer separation and sand layer shear failure. Controlling the three types of failure modes led to improve the mechanical performance and service life of the pipe culvert.

Keywords : FRP sand pipe; tension and compression load; destruction mode; deformation

玻璃钢夹砂管是一种以不饱和聚酯树脂为基体,石英砂为填充物经过特定缠绕加工工艺制作而成的新型柔性管涵,因其具有自重轻、强度高、耐腐蚀、内壁光滑、运输方便、免维护等优势,已作为传统刚性管涵的替代品,在市政、公路排水工程中广泛应用^[1-3]。由于柔性管涵变形和破坏模式是涵洞设计

时重点考虑的因素,决定着管涵在服役期内能否具有良好的力学性能和耐久性,因此开展玻璃钢夹砂管破坏模式研究,将为管壁结构设计优化以及力学指标控制起到积极作用^[4-8]。

国内外学者对于玻璃钢夹砂管的破坏模式开展了较为深入的研究,并取得了丰富的研究成果,主

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目(Y-201628),天津市自然科学基金项目(20JCYBJC00630)

通信作者: 王清洲,博士,副教授,主要从事道路新材料、新技术方面的研究 E-mail: 2006126@hebut.edu.cn

收稿日期: 2020-09-16

引用格式: 王清洲,张朝阳,薛晓,等. 荷载作用下多夹砂层玻璃钢夹砂管涵结构破坏模式[J]. 工程塑料应用,2020,48(12): 107-113.

Wang Qingzhou, Zhang Zhaoyang, Xue Xiao, et al. Failure mode of FRP sand pipe culvert structure with multiple sand layers under load[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 107-113.

要集中在极限破坏荷载的确定和破坏过程表述方向。极限破坏荷载是表征管涵承载力的重要指标,多采用试验和数值分析手段确定。陈兆南等^[9-10]用试验方法研究了尺寸为50 mm×50 mm×150 mm试样的破坏过程,以及通过无约束静载试验研究了壁厚50 mm、直径1500 mm的玻璃钢夹砂管的破坏模式,确定了试样的极限破坏荷载;周仕刚^[11]通过平行板加载试验分析管环的内力与应力,利用等效截面法确定管壁各层材料的力学性能,用于材料的力学性能控制;张国盘^[12]通过试验研究了壁厚50 mm、直径1500 mm的公路玻璃钢夹砂管涵结构在拉伸和压缩荷载作用下的力学性能,得到试验强度值远远高于设计强度值,管涵结构强度安全储备较大。由于受试样加工变异性等因素影响,采用试验的方法用于确定管涵强度值具有较大难度和较差的普适性,为节约试验成本和缩短试验周期,数值计算方法越来越受到重视。H. Ouellette等^[13]根据管涵的承载要求,提出了详细计算玻璃钢夹砂管的最大载荷、弯曲和剪切强度以及各层承载能力的方法,用于指导管壁结构指标选取;R. Roham等^[14]采用渐进损伤模型进行管涵的失效行为分析,研究了压力等级与玻璃钢夹砂管失效时间、失效形式、失效力之间的关系,计算得到的强度值具有很高的精度。目前,针对多夹砂层玻璃钢夹砂管结构从微观角度对破坏模式进行研究的成果较少。笔者通过对玻璃钢夹砂管的缠绕层、环向与轴向试样以及管环开展破坏试验,采用应力监测与扫描电子显微镜(SEM)分析等手段,研究玻璃钢夹砂管试样在拉压受力状态下的破坏模式、拉压受力状态以及裂缝分布规律,可为玻璃钢夹砂管的工艺更新、参数优化设计以及提高工程使用寿命起到推动作用。

1 试验部分

1.1 玻璃钢夹砂管

玻璃钢夹砂管:DN1500,管道各层材料构成及参数要求见表1,承德金丰建材有限责任公司。

1.2 仪器及设备

微机控制电液伺服万能试验机:WAW-1000型,上海三思纵横机械制造有限公司;

三通道电液伺服试验机:PLS-500型,济南东测试验机技术有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Nova NanoSEM450型,美国FEI公司。

表1 管道各层材料构成及参数要求

层名	原材料	厚度 / mm	树脂含量 / %
内衬层	胶衣、玻璃表面毡、无碱针织毡、化纤网格布、聚磷酸铵阻燃剂和间苯型树脂及辅助材料等	1.6	≥ 90
1层环向缠绕 + 2层交叉缠绕	玻璃纤维无捻粗纱、缠绕纤维、邻苯型树脂及辅助材料等	2.0	15 ~ 25
树脂夹砂层	石英砂、树脂及辅助材料、兜纱布等	14	≥ 25
1层环向缠绕 + 1层交叉缠绕	玻璃纤维无捻粗纱、缠绕纤维、邻苯型树脂及辅助材料	1.2	15 ~ 25

1.3 试样制备

除缠绕层试样外,其它管材试样均按照试验尺寸使用云切机从内径为1500 mm、壁厚50 mm、定长12 m缠绕的玻璃钢夹砂管上切取,要求试样管壁厚度均匀、截取断面无缺陷,并保证内衬层与外保护层无缺损破坏。缠绕层试样则由1层环向缠绕复合2层交叉缠绕定制加工生产而成,其厚度为2 mm,交叉缠绕角为57.52°^[15],使用云切机按照试验尺寸要求切取试样。

1.4 测试与表征

玻璃钢夹砂管缠绕层试样拉伸试验按照GB/T 1447-2005进行,试样尺寸为20 mm×50 mm×150 mm、开口处20 mm,拉伸速率为2 mm/min。

玻璃钢夹砂管管材试样的压缩试验根据GB/T 1448-2005进行,由内径1500 mm、定长12 m的玻璃钢夹砂管上截取,试样尺寸为50 mm×50 mm×150 mm,加载速率为3 mm/min。

玻璃钢夹砂管管材试样的拉伸试验按照GB/T 1447-2005进行,试样尺寸为20 mm×50 mm×150 mm、开口处20 mm,拉伸速率均为5 mm/min。

玻璃钢夹砂管环静载试验根据GB/T 5352-2005进行,采用平行板外载性能试验方法,试样尺寸为50 mm×300 mm×1500 mm。为监测荷载作用下管环不同位置的应力分布规律,在管环内外侧的0°~180°每隔15°布置一个测点,按照“T”型布设环向和轴向的应变片,应变片布置分布如图1所示。试验采用0.2 kN/s的力控制方式施加压荷载直到管环至塑性阶段,随后以位移控制将管环压至完全破坏。

SEM分析:从拉伸试验破坏后玻璃钢夹砂管缠绕层断口处裁剪出不超过10 mm的试样,采用

SEM 分析其断口处的破坏机理。

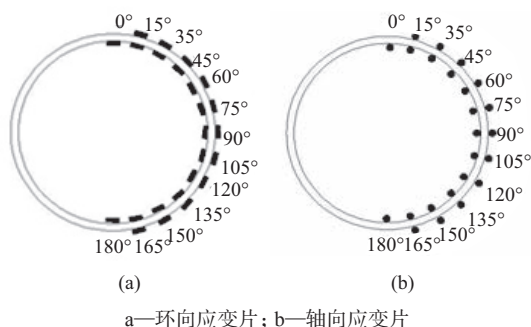
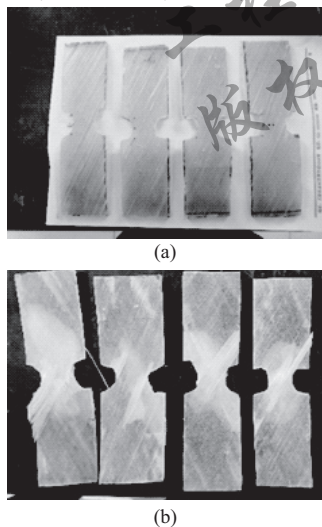


图1 管环内外表面应变测点分布图

2 结果与讨论

2.1 拉伸荷载作用下缠绕层试样的破坏模式

按照试验要求进行缠绕层试样拉伸破坏试验,纤维缠绕层在拉伸时的破坏过程为:基体树脂在拉伸作用下产生径向变形,随着拉力的进一步增加,纤维断裂/脱粘拔出、树脂产生断裂以及纤维断裂。图2为拉伸试验前后的缠绕层试样。对比拉伸试验前后的试样发现,玻璃纤维从树脂基体中拔出并发生断裂,裸露在试件表面的纤维呈现出乳白色,可见大量平行于纤维缠绕方向的裂缝,缠绕层的纤维与基体断裂、界面分离的现象明显,如图2b所示。

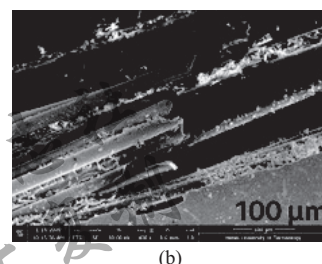
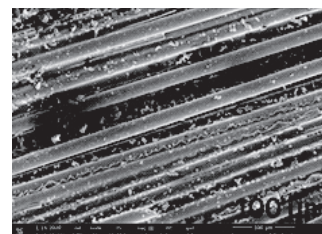


a—未拉伸的试样; b—拉伸破坏后的试样

图2 拉伸试验前后的缠绕层试样

缠绕层拉伸破坏试样的 SEM 照片如图3所示。图3a是纤维和基体脱粘分离,因纤维未能发挥有效抗拉作用,整体强度较低,主要原因是纤维表面碎屑偏少且较为光滑,树脂浸润效果差或纤维集中缺少树脂裹覆,反映成型工艺变异性会导致层间粘合强度不高。另外,当缠绕层发生拉伸断裂时,纤维表面会携带着大量的碎屑,纤维断口参差不齐,树脂整体

产生断裂分散,无法粘结纤维形成整体强度,如图3b所示。纤维表面光滑与否,一定程度上决定着玻璃纤维破坏形式与状态。拉伸试验结果表明,玻璃钢夹砂管缠绕层的破坏机理是纤维断裂、基体断裂及开裂、纤维脱粘与拔出,以及层间和层内裂纹扩展导致的分层及分叉等形式。



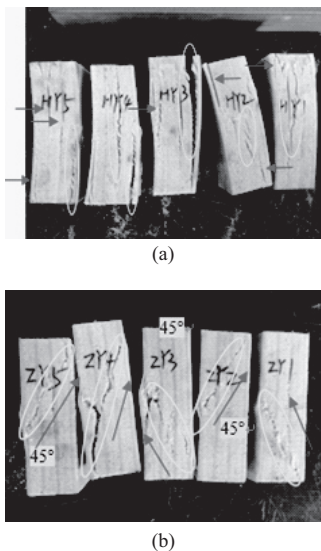
a—脱粘分离; b—纤维断裂拔出

图3 缠绕层拉伸破坏试样的 SEM 照片

2.2 压缩荷载作用下管材试样的破坏模式

使用万能试验机对环向与轴向试样进行压缩破坏试验,破坏后的压缩试样如图4所示。玻璃钢夹砂管作为一种新型柔性复合材料,具有很强抵抗外荷载的变形能力^[16-18],在荷载作用下环向压缩试样层间界面开裂是主要破坏模式,即结构层层间界面是受力最薄弱的位置。由图4a可见,竖向裂缝首先出现在管道最外侧的纤维缠绕层与夹砂层之间的界面处,随荷载增加裂缝逐渐扩展连通,且层间界面分离由外侧向内侧依次破坏,试样中部夹砂层出现竖向裂缝时荷载达到最大值,主要原因是试样从管道上截取下来带有弧度,使得试样破坏通常是由外侧到内侧;随后,试样开始处于塑性状态,竖向位移继续增加使得夹砂层发生横向剪切破坏。

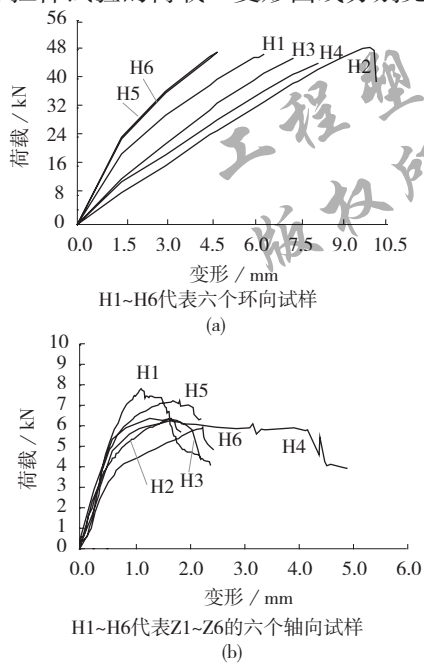
轴向试样的破坏模式表现为沿着管壁厚度方向发生剪切破坏。图4b中各试样虽然破坏的位置不同,但破坏过程首先是层间界面产生微小裂缝,随荷载增加裂缝沿着与试件长边呈45°方向贯穿夹砂层,纤维缠绕层受剪应力后,逐层剪切破坏,在管壁内侧夹砂层剪应力集中,横向扩张发生脆性破坏时荷载达到最大值,试样是失稳破坏。



a—环向试件层间分层破坏; b—轴向试样沿着荷载成 45° 方向破坏
图 4 压缩荷载下环向和轴向管壁切样破坏形式

2.3 拉伸荷载作用下管材的破坏模式

对两组各 6 个试样进行环向和轴向拉伸强度试验,试样拉伸试验的荷载-变形曲线分别见图 5。



a—环向拉伸荷载-变形图; b—轴向拉伸荷载-变形图
图 5 拉伸荷载下管壁切样荷载-变形图

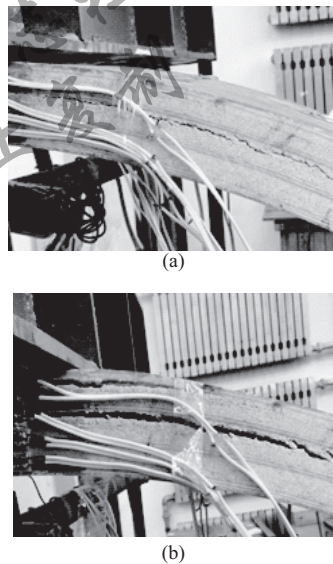
由图 5a 可知,环向试样受拉破坏前荷载-变形曲线近似线性增加趋势,表明管材环向拉伸破坏前基本处于弹性阶段,试验中能明显观察到试样表面裂缝发生与发展过程;达到极限荷载后,试样瞬间断裂,力值迅速下降,并伴随有清脆响声,管材呈脆性破坏模式。图 5b 的轴向荷载-变形曲线表明,轴向拉伸试验变形较小时 (≤ 1 mm) 荷载和变形呈

线性增长,试样先出现细小裂缝,随荷载持续增大,裂缝逐渐变大、增多,直至塑性断裂破坏。破坏之前环向试样荷载-变形曲线增加量较缓慢,轴向试样荷载-位移曲线增加量较大。

基于环向和轴向荷载-变形曲线,可确定环向拉伸强度平均值约为 78.00 MPa,各试样对应的最大变形量范围为 4.5 ~ 10 mm 之间;轴向拉伸强度平均值约为 7.34 MPa,各试样对应的最大变形量范围为 1.0 ~ 2.4 mm,对比表明,管材环向拉伸强度远大于轴向拉伸强度,试样环向抵抗变形能力明显优于轴向,符合管道服役期的受力特性。

2.4 静荷载作用下管环的破坏模式

无约束静载破坏试验加载时,持续拍摄和记录玻璃钢夹砂管样的一侧和另一侧层间裂缝发展趋势和分布情况,如图 6 和图 7 所示。



a—层间界面细小裂纹; b—裂缝向夹砂层扩展

图 6 一侧层间裂缝开展情况

试样裂缝发展过程表明,细小裂缝通常首先出现在加载梁下端即 0° 位置,对应玻璃钢夹砂管管顶处,此时管壁的缠绕层和夹砂层界面出现分层,随荷载增加裂缝逐渐变大并向远端发展,管顶荷载值加至 28 kN 时,缠绕层和夹砂层完全分层,并伴随清脆的响声,此时荷载不再增加,管道进入塑性阶段。为持续加载使管环发生破坏,将试验加载方式由力控制方式转换为位移控制。随着加荷持续进行,总变形迅速增加,多个层间界面出现裂缝,各层出现应力重分布,管环夹砂层受剪应力,裂缝逐渐贯通整个夹砂层并最终发生剪切破坏,管环破坏时多层层间完全脱开,并伴有贯通夹砂层的较大裂缝。



(a)



(b)

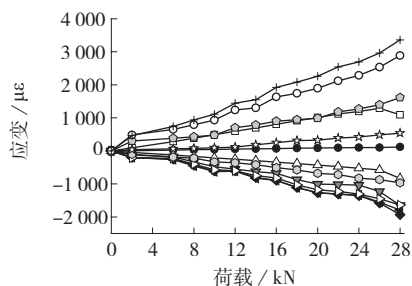
a—缠绕层—夹砂层层间分层; b—夹砂层剪切破坏

图7 对面一侧层间裂缝开展情况

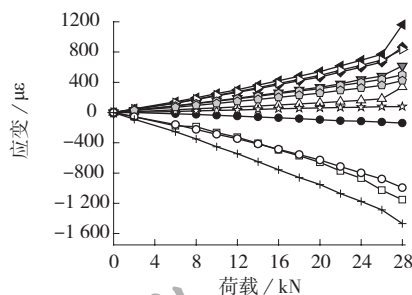
试验加载过程中测得不同测点的环向和轴向应变如图8所示。由于在试验加载过程中,管环外侧165°处的应变片受压破坏,故无法采集数据。由图8a、图8b可知,管壁内侧环向最大拉应变发生在下腰部即150°~180°处,在水平径向附近即75°~105°处出现最大压应变,在0°~30°和120°~180°处为拉应变,在30°~120°处为压应变,表明管道沿环向自管顶到管底构成了“拉—压—拉”过渡的受力特征;管壁内侧轴向最大拉应变发生在75°~105°处,然后沿着管周向两侧逐渐减小,在15°和180°位置处出现最大压应变,另外,管壁内侧轴向在0°~60°和150°~180°处为压应变,而在60°~150°处为拉应变,形成了“压—拉—压”过渡的受力特性,表明管顶受载时管壁内侧轴向和环向应变呈现明显不同的变化模式。

此外,由图8c、图8d可知,玻璃钢夹砂管的管壁外侧轴向最大拉应力发生在0°~45°处,在60°和105°处压应变达最大值,拉应变出现在0°~45°和75°~105°处,压应变出现在45°~75°和105°~150°处,形成“拉—压—拉—压”交替的受力状态;管壁外侧环向最大拉应变出现在60°~90°处,最大压应变出现在15°和150°位置处,在0°~45°和120°~150°处为压应变,在45°~120°处为拉应变,构成了“压—拉—压”过渡的受力特性。

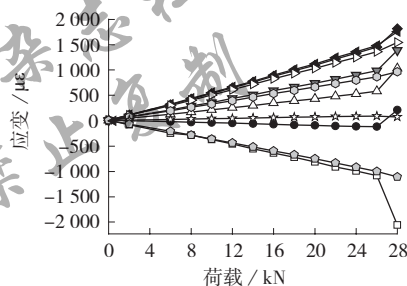
综上可知,由于加载点位置管道所受荷载最大,通常破坏发生在加载梁下端的管顶附近,由于管壁内、外侧总是处于拉压相反的不同状态,厚度50 mm的管壁结构受荷截面承受压应力、拉应力和



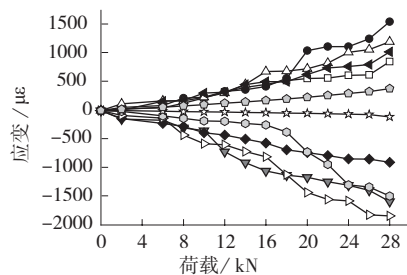
(a)



(b)



(c)



(d)

□—15°; ◆—75°; ☆—135°; ●—30°; ▴—90°; ○—150°;
△—45°; ▽—105°; ○—165°; ▽—60°; ○—120°; +—180°

a—内侧环向应变曲线; b—内侧轴向应变曲线

c—外侧环向应变曲线; d—外侧轴向应变曲线

图8 各级荷载下的应变曲线

剪应力作用,层间界面和抗弯拉强度较低的夹砂层为首先发生破坏的薄弱位置。一旦产生裂缝或分层,将出现应力重分布以及应力集中现象,并将加速管道发生塑性形变或屈服。

管顶静载大变形条件下,玻璃钢夹砂管分层和夹砂层剪切破坏是主要的破坏模式,由于荷载产生的最大弯矩和剪力导致管壁内应力达到极限强度值而发生破坏。一旦管壁中的1~2层完全破坏时,尤

其是靠近管道内侧和外侧的夹砂层发生剪切破坏后,管道承载能力基本消失即发生屈服失效,理论上这并非是层间失效理论中所认为的层合板失效破坏状态。产生这一现象的主要原因是管壁结构层内出现的贯通裂纹使其产生应力集中,随着变形增加剩余强度迅速下降,管道失去承担荷载的能力^[19-20]。因此,层间粘接强度、夹砂层的抗弯拉强度、树脂是否完全浸透砂以及管壁结构设计参数是管道具有较高承载能力的关键因素,针对这些因素的优化是提高管道及公路管涵整体力学性能的重要途径。

3 结论

(1) 通过 SEM 拉伸试样的破坏断面,确定了缠绕层试样拉力下的破坏机理是纤维断裂、基体断裂及开裂、纤维脱粘与拔出,以及层间和层内裂纹扩展导致的分层及分叉等形式。

(2) 环向试样压缩破坏模式为层间界面发生分层破坏,轴向压缩试样破坏为沿着某个滑裂面(与荷载方向成 45°)的剪切破坏;环向拉伸试样瞬间断裂发生脆性破坏,轴向拉伸试样裂缝逐渐扩展发生塑性断裂破坏。

(3) 大变形条件下管环的静载破坏以层间分离和夹砂层剪切破坏为主要破坏模式,管壁结构呈现拉压相反的受力状态。

参考文献

- [1] 薛忠民. 中国玻璃钢/复合材料发展回顾与展望[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(1):5-12.
Xue Zhongmin. Retrospect and prospect of development of FRP/CM in China[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(1):5-12.
- [2] 吉训刚. 山区公路涵洞病害成因分析与防治[J]. 交通科技, 2017(4):115-118.
Ji Xungang. Damage causes and control measures of culvert in mountainous highway[J]. Transportation Science & Technology, 2017(4):115-118.
- [3] 汪准, 邓京兰, 王继辉, 等. 玻璃钢夹砂管道的环刚度有限元分析及应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(11):16-20.
Wang Zhun, Deng Jinglan, Wang Jihui, et al. Ring stiffness finite element analysis and application of GRP pipes[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(11):16-20.
- [4] 王汪宇. 玻璃钢夹砂管失效分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
Wang Wangyu. Failure analysis of glass fiber reinforced plastics laminated with sand[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [5] 马小明, 杜娟, 廖世兴. 玻璃钢夹砂管爆管失效分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(5):61-64.
Ma Xiaoming, Du Juan, Liao Shixing. Failure analysis of glass fiber reinforced plastics laminated with sand burst[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(5):61-64.
- [6] 张济源, 魏连雨, 张国盘, 等. 公路埋地玻璃钢夹砂管车辆荷载下挠曲变形特性[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(10):56-59.
Zhang Jiyeuan, Wei Lianyu, Zhang Guopan, et al. The deformation of FRPM pipe buried in highway under vehicle load[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(10):56-59.
- [7] 王清洲, 梁筱, 魏连雨, 等. 基于路面基层最大层底应力条件下玻璃钢夹砂管涵洞的优化分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(4):80-85.
Wang Qingzhou, Liang Xiao, Wei Lianyu, et al. The optimal analysis of the culvert pipe culvert of FRPM under the maximum layer bottom stress condition[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(4):80-85.
- [8] 乌延玲. 公路钢波纹管涵洞受力与变形特性及应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Wu Yanling. Force deformation characteristic and its application of corrugated steel pipe culvert of highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [9] 陈兆南. 施工及服役条件下公路玻璃钢夹砂管涵洞安全性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
Chen Zhaonan. Study on safety performance of highway glass fiber reinforced plastics mortar pipe culvert under construction and service[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [10] 陈兆南, 魏连雨, 王清洲. 公路 FRPM 管涵洞静载破坏试验研究[J]. 中外公路, 2018(5):144-147.
Chen Zhaonan, Wei Lianyu, Wang Qingzhou. Experimental research on static load failure of highway FRPM pipe culvert[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018(5):144-147.
- [11] 周仕刚. FRPM 管的挠曲性设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(1):3-5, 12.
Zhou Shigang. Design for deflection level of FRPM pipes[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2007(1):3-5, 12.
- [12] 张国盘. FRPM 管涵现场试验及数值模拟研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
Zhang Guopan. Field tests and finite element numerical simulations of FRPM pipe culvert[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [13] Ouellette H, Schrock B J. Rehabilitation of sanitary sewer pipelines[J]. Transportation Engineering Journal, 1998, 107(4):497-513.
- [14] Roham R, Behzad M. Evaluating long-term performance of glass fiber reinforced plastic pipes subjected to internal pressure[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122:694-701.

- [15] Rafiee R, Reshadi F. Simulation of functional failure in GRP mortar pipes[J]. Composite Structures, 2014, 113:155-163.
- [16] 石华旺,尹航,魏连雨,等.公路埋地玻璃钢夹砂管力学行为数值分析[J].河北工业大学学报,2019,48(3):67-72.
- Shi Huawang, Yin Hang, Wei Lianyu, et al. Finite element analysis of mechanical properties of buried-fiber-glass-reinforced-plastic-mortar pipe[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2019, 48(3):67-72.
- [17] 魏连雨,陈兆南,郑彦军,等.车辆超载下玻璃钢夹砂管涵洞安全评价[J].玻璃钢/复合材料,2016(9):81-85.
- Wei Lianyu, Chen Zhaonan, Zheng Yanjun, et al. Safety evaluation of glass fiber reinforced plastic pipe culvert under overload of vehicle[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(9):81-85.
- [18] 张济源,郑彦军,石华旺,等.荷载作用下埋地玻璃钢夹砂管受力特征分析[J].玻璃钢/复合材料,2016(5):80-84, 22.
- Zhang Jiyan, Zheng Yanjun, Shi Huawang, et al. Analysis of the stress characteristics of the buried glass fiber reinforced pipe under load[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(5):80-84, 22.
- [19] Diniz Melo J D. Mechanical behavior of GRP pressure pipes with addition of quartz sand filler[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(6).DOI:10.1177/0021998310385593.
- [20] Affolter C, Barbezat M, Piskoty G, et al. Failure of a sag water pipe triggered by aging of the GFRP composite relining[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84.DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.09.017.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部委级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部委级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2019 年底共 47 卷 362 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2019 年底

共 28 卷 133 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.net>