

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.07.022

多夹砂层玻璃钢夹砂管弯曲性能及破坏模式

刘淑艳^{1,2}, 崔洪军¹, 张朝阳¹, 肖成志¹, 王清洲¹

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市交通科学研究院, 天津 300074)

摘要: 为研究多夹砂层玻璃钢夹砂管的弯曲性能及破坏模式, 自定长缠绕生产的玻璃钢夹砂管上沿环向方向截取弧形管材试样, 开展试样凹向和凸向两类加载方式的三点弯曲试验, 分别得到两种加载方式下试样的弯曲强度、弯曲弹性模量以及荷载-位移曲线。试验结果表明, 玻璃钢夹砂管弧形试样在凹向和凸向加载方式下的弯曲强度平均值分别为 160.81 MPa 和 116.41 MPa, 弯曲弹性模量平均值分别为 7932 MPa 和 6508 MPa, 凸向加载方式更易导致试样发生破坏; 凹向试样的破坏模式为多夹砂层的瞬间剪切脆性破坏, 而凸向试样呈现出先产生层间裂缝进而砂层沿 45° 方向出现的渐进剪切破坏模式, 加载方式和破坏模式不同是导致弯曲强度和弯曲弹性模量大小差异的主要原因。

关键词: 玻璃钢夹砂管; 三点弯曲试验; 加载方式; 破坏模式

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)07-0126-06

Bending Performance and Failure Mode of Glass Fiber Reinforced Plastic Mortar Pipe with Multiple Mortar Layers

Liu Shuyan^{1,2}, Cui Hongjun¹, Zhang Zhaoyang¹, Xiao Chengzhi¹, Wang Qingzhou¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Tianjin Transportation Science Research Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: In order to study the bending performance and failure mode of glass fiber reinforced plastic mortar pipe with multiple sand layers, the arc-shaped pipe samples were cut along the circumferential direction from the glass fiber reinforced plastic mortar pipe produced by winding fibers of specified length, and the three-point bending tests were carried out with concave and convex loading methods. The bending strength, bending elastic modulus and load-displacement curve of the samples under two loading methods were obtained respectively. The experimental results show that the average value of bending strength determined by the concave and convex loading methods of the curved specimen of the glass fiber reinforced plastic mortar pipe are 160.81 MPa and 116.41 MPa, and the average value of bending elastic modulus are 7932 MPa and 6508 MPa, respectively. Convex loading method is more likely to cause damage to the specimen. The failure mode of the concave specimen is the instantaneous shear brittle failure of multiple sand layers, while the convex specimen exhibits the first interlayer cracks and then the sand layer is progressively sheared along the 45° direction, the difference in loading method and failure mode is the main reason for the difference in bending strength and bending elastic modulus.

Keywords: glass fiber reinforced plastic mortar pipe; three-point bending test; loading method; destruction mode

玻璃纤维增强塑料夹砂管(简称为玻璃钢夹砂管)是以不饱和聚酯树脂为基体,玻璃纤维为增强体,石英砂作为填充材料按照一定的加工工艺逐层缠绕制作而成的新型柔性管道。相较于传统的钢筋混凝土管道,它具有自重轻、耐腐蚀、施工迅速、服役

期间免维护以及允许变形等优势,广泛应用于市政给水排水工程、公路排水工程等领域,已经成为传统刚性管道的替代品^[1-4]。作为柔性管道,公路排水工程用玻璃钢夹砂管受地基软弱或工后沉降等因素影响,以及在管顶土压力等载荷作用下,服役期内管

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

收稿日期: 2021-04-26

引用格式: 刘淑艳,崔洪军,张朝阳,等.多夹砂层玻璃钢夹砂管弯曲性能及破坏模式[J].工程塑料应用,2021,49(7):126-131.

Liu Shuyan, Cui Hongjun, Zhang Zhaoyang, et al. Bending Performance and Failure Mode of Glass Fiber Reinforced Plastic Mortar Pipe with Multiple Mortar Layers[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 126-131.

道将会产生一定程度的变形^[5-7]。变形导致管道截面由圆形逐渐椭圆化并产生较大内应力,即类似等效于管材承受凹向或凸向加载方式下产生变形和内应力,是管道服役期主要的承荷方式^[8-10]。结合实际工程中管道服役期内的受力状态,开展载荷作用下玻璃钢夹砂管材的弯曲性能和破坏模式的试验研究,将其力学参数控制以及管壁结构设计优化提供依据。

关于玻璃钢夹砂管材的力学性能和破坏模式,国内外学者开展了较深入的研究,并取得丰富的研究成果。管材的压缩强度和拉伸强度是主要的力学性能指标之一,通常采用试样法试验获得,并研究试样的破坏模式。王清洲等^[11]通过在定长缠绕生产的玻璃钢夹砂管上截取试样,开展包括压缩性能、拉伸性能以及平行板外载性能在内的一系列力学性能试验,确定了压缩试验条件下试样的破坏载荷以及破坏模式,为玻璃钢夹砂管材原材料优化和结构设计等提供了重要依据。张济源^[12]对壁厚 50 mm、直径 1 500 mm 公路玻璃钢夹砂管的压缩强度、压缩弹性模量以及环刚度等力学性能指标研究发现,玻璃钢夹砂管材的试验值远高于设计值,材料性能具有良好的安全储备。静载和动载试验是确定玻璃钢夹砂管最大破坏载荷和破坏模式的方法。任妍妍^[13]依托施工现场对直径 1 500 mm、壁厚 38 mm 的公路玻璃钢夹砂管开展静载和动载试验,结果表明,玻璃钢夹砂管的径向变形量以及作用在管道顶部的载荷与覆土厚度有着极大关系,变形量的控制对管涵服役性能至关重要。陈兆南等^[14-15]采用室内试验研究 50 mm×50 mm×150 mm 试样的环向与轴向压缩破坏过程,并且对壁厚 50 mm、宽度 300 mm、直径 1 500 mm 的玻璃钢夹砂管进行无约束静载试验,结果表明,裂缝和层间分离是静载荷作用下管材的主要破坏模式。除此之外,石华旺等^[16]通过静载试验和疲劳试验的方式研究玻璃钢夹砂管的疲劳受力状态,研究结果表明,玻璃钢夹砂管材在加载幅值 4.17 kN、加载频率 2 Hz 下,连续经过 250 万次的疲劳作用,其力学性能未发生破坏,符合公路涵洞的使用标准。弯曲性能是更加符合管涵受力状态的力学性能指标。C. Affolter 等^[17]通过对单层夹砂层玻璃钢夹砂管进行一系列的室内弯曲性能试验和管环静载破坏试验,确定了玻璃钢夹砂管的基本力学性能和破坏载荷,探究了服役玻璃钢夹砂管的破坏过程和破坏原因。

上述研究重点关注了玻璃钢夹砂管材或试样的压缩和拉伸强度、疲劳性能、静压破坏模式等方面,针对弧形多夹砂层玻璃钢夹砂管以及凹向和凸向加载方式下的弯曲性能和破坏模式研究鲜有报道。玻璃钢夹砂管管材的弯曲性能是管壁结构设计的重要指标,它表征圆形多层复合材料制品叠层复合后抵抗载荷的能力。由于载荷作用下多层复合结构容易发生分层破坏,严重降低结构的刚度和强度,确保管材的弯曲性能满足要求是涵洞获得良好服役性能的前提。因此,开展凹向和凸向加载方式下多夹砂层玻璃钢夹砂管弯曲性能测试与评价,将为玻璃钢夹砂管结构设计和提升使用安全性提供重要依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

玻璃钢夹砂管:DN1500,壁厚 50 mm,由不饱和和聚酯树脂、玻璃纤维、石英砂等原材料按照缠绕层(4层)和夹砂层(3层)交替设置,采用定长缠绕工艺生产而成的多层复合材料管道,承德金丰建材有限公司。

1.2 主要仪器与设备

微机控制电液伺服万能试验机:WAW-1000型,配有三点弯曲夹具,上海三思纵横机械制造有限公司;

游标卡尺:TM004型,精度 0.02 mm,南通市锦诺工量刃具有限公司。

1.3 试样制备

玻璃钢夹砂管管材弯曲性能测试试样如图 1 所示。弧形试样采用云切机切取自玻璃钢夹砂管,尺寸为壁厚 50 mm、宽度 80 mm、长度 1 000 mm,试样共制备四组,每组五个试样。加工后的试样管壁厚度均匀、截取断面顺直无缺陷,内衬层与外缠绕层无缺损破坏。试验前采用游标卡尺测量并记录每个试样的长、宽和厚的实际尺寸,每个方向尺寸测量三个不同位置并取其平均值,控制误差在 ± 5 mm 范围内。



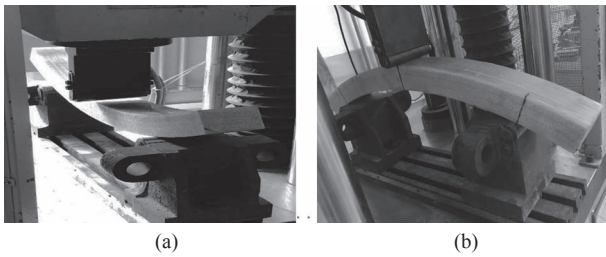
图 1 玻璃钢夹砂管管材弯曲性能测试试样

1.4 性能测试与表征

玻璃钢夹砂管管材试样的弯曲性能按 GB/T 1449-2005 测试,弯曲强度加载速度为 10 mm/min,弯曲弹性模量加载速度为 2 mm/min,跨距 800 mm,并利用 SUNS Test Soft 软件系统自动采集生成载荷-位移曲线。

试验加载过程中用相机持续拍摄并观测试样裂缝分布和发展趋势以及记录试样的破坏过程。

试样的凹向和凸向两种加载方式如图 2 所示。



a—凹向加载方式;b—凸向加载方式

图2 弯曲性能试验

(1) 弯曲强度计算。

弯曲强度计算公式为:

$$\sigma_f = \frac{3P_{\max}l}{2bh^2} \quad (1)$$

式中: σ_f ——弯曲强度, MPa;

$P_{\max}$ ——最大载荷, N;

l ——试样跨距, mm;

h ——试样厚度, mm;

b ——试样宽度, mm。

(2) 弯曲弹性模量计算。

利用万能试验机自带的自动采集功能,记录试样弯曲弹性模量测试过程中的载荷-位移曲线,根据式(2)计算得到已知应变分别为 0.002 5、0.000 5 所对应的试样跨距中点处的位移,再根据载荷-位移曲线确定两种位移下分别对应的载荷值,计算得到相应的弯曲应力。试样的弯曲弹性模量按式(3)计算:

$$\varepsilon = \frac{6Sh}{l^2} \quad (2)$$

式中: ε ——应变, %;

S ——试样跨距中点处的位移, mm。

$$E_f = 500(\sigma'' - \sigma') \quad (3)$$

式中: E_f ——弯曲弹性模量, MPa;

σ'' ——应变 $\varepsilon''=0.002 5$ 时测得的弯曲应力, MPa;

σ' ——应变 $\varepsilon'=0.000 5$ 时测得的弯曲应力, MPa。

2 结果与讨论

2.1 弯曲强度测试结果与分析

表 1 和表 2 为凹向与凸向加载方式下试样弯曲强度测试结果。

表 1 凹向加载方式下试样弯曲强度测试结果

编号	试样长度 / mm	试样厚度 / mm	试样宽度 / mm	试样跨距 / mm	最大载荷 / kN	最大位移 / mm	弯曲强度 / MPa
1 [#]	1 000	51.4	81.7	800	29.99	7.55	166.73
2 [#]	1 000	51.7	81.5	800	28.28	7.17	155.78
3 [#]	1 000	51.2	81.1	800	28.07	7.08	158.44
4 [#]	1 000	51.8	81.4	800	29.33	7.31	161.14
5 [#]	1 000	51.5	81.5	800	29.17	7.22	161.94
平均值	1 000	51.5	81.4	800	28.38	7.27	160.81

表 2 凸向加载方式下试样弯曲强度测试结果

编号	试样长度 / mm	试样厚度 / mm	试样宽度 / mm	试样跨距 / mm	最大载荷 / kN	最大位移 / mm	弯曲强度 / MPa
1 [#]	1 000	52.1	81.2	800	22.41	7.47	122.01
2 [#]	1 000	50.9	81.1	800	18.88	7.17	107.83
3 [#]	1 000	51.3	81.0	800	21.37	7.38	120.30
4 [#]	1 000	51.7	81.4	800	20.33	7.21	112.13
5 [#]	1 000	51.2	80.9	800	21.17	7.32	119.79
平均值	1 000	51.4	81.1	800	20.83	7.31	116.41

由表 1 和表 2 可以看出,试样凹向加载方式下的弯曲强度平均值为 160.81 MPa,凸向加载时的弯曲强度平均值为 116.41 MPa,凹向加载方式下的弯曲强度较凸向加载时提高了 38.1%。凹向与凸向加载方式下,试样破坏时的最大位移平均值分别为 7.27 mm 和 7.31 mm,非常接近;凹向加载破坏时的最大载荷为 28.97 kN,凸向加载破坏时的最大载荷为 20.83 kN,存在较大差异,使得计算得到的两种加载方式下的弯曲强度差异较大。不同加载方式下试样产生的破坏方式差异是导致两类弯曲强度大小不同的主要原因,凸向加载对管材受力更为不利。为保证管材设计的安全性,应将凸向加载方式下试样的弯曲强度作为管壁结构设计的力学指标。

试验结果表明,由于受试样尺寸、材料自身变异特性等因素的影响,5 个试样的弯曲强度值的测试结果之间存在一定差异,尤其是凸向加载方式下试样的弯曲强度离散性更大,但各参数值仍然在合理范围内,试验结果可以接受。后续将改善试样加工工艺等因素,提升试验数据的精度和减少离散性。

2.2 弯曲弹性模量测试结果与分析

根据试验过程中系统自动记录的载荷-位移曲线,按照式(2)和式(3)计算得到凹向与凸向加载方式下试样的弯曲弹性模量,结果见表 3 和表 4。

由表 3 和表 4 可以看出,凹向加载方式下试

表3 凹向加载方式下试样弯曲弹性模量测试结果

编号	试样长度 / mm	试样厚度 / mm	试样宽度 / mm	试样跨距 / mm	最大载荷 / kN	最大位移 / mm	弯曲弹性模量 / MPa
A ₁	1000	51.1	81.7	800	29.34	7.66	7920
A ₂	1000	51.9	81.5	800	27.71	7.03	7575
A ₃	1000	50.8	81.3	800	27.37	6.98	8210
A ₄	1000	52.2	81.1	800	28.33	7.31	7930
A ₅	1000	51.5	81.6	800	29.17	7.55	8025
平均值	1000	51.5	81.4	800	28.38	7.31	7932

表4 凸向加载方式下试样弯曲弹性模量测试结果

编号	试样长度 / mm	试样厚度 / mm	试样宽度 / mm	试样跨距 / mm	最大载荷 / kN	最大位移 / mm	弯曲弹性模量 / MPa
T ₁	1000	51.5	81.4	800	21.54	8.57	6385
T ₂	1000	50.9	81.2	800	19.91	7.93	6533
T ₃	1000	51.1	81.3	800	20.11	8.07	6397
T ₄	1000	51.6	81.2	800	21.03	8.49	6450
T ₅	1000	51.1	81.5	800	22.17	8.75	6773
平均值	1000	51.2	81.3	800	20.95	8.36	6508

样的弯曲弹性模量平均值为 7932 MPa,凸向加载方式下弯曲弹性模量平均值为 6508 MPa,凹向加载方式下弯曲弹性模量较凸向加载时高出 21.9%。此外,凹向加载方式下试样的最大载荷平均值为 28.38 kN,而凸向加载方式下试样的最大载荷平均值为 20.95 kN;凹向和凸向加载方式下试样的最大位移平均值分别为 7.31 mm 和 8.36 mm,凸向加载方式下试样的最大位移平均值大于凹向加载方式,凹向加载方式下试样的承载能力明显优于凸向加载方式。在管涵实际服役中,载荷作用下管顶和管底位置是凸向加载方式,而管侧位置是凹向加载方式,管顶和管底最先被破坏,是管涵最不利受力位置,这与先前的研究结论相吻合^[11,14]。

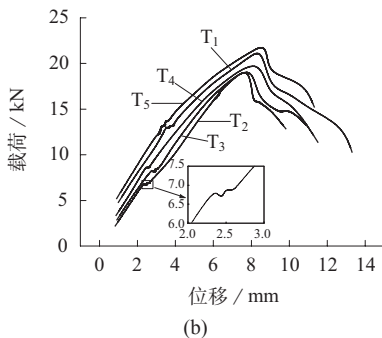
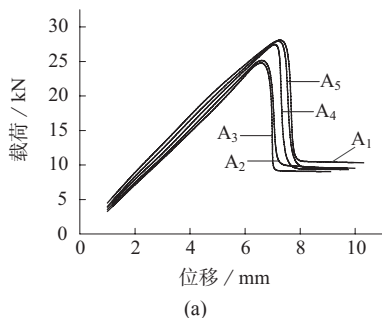
2.3 弯曲破坏模式分析

(1) 试样载荷-位移曲线分析。

在凹向与凸向加载方式下,试样的三点弯曲试验得到的载荷-位移曲线如图3所示。

由图3a可以看出,凹向加载方式下的试样在弯曲破坏之前无明显屈服点,为典型的脆性破坏特征。试样从开始加载至破坏的整个加载过程,位移随着载荷不断增加逐渐增大,载荷-位移曲线接近于线性增加的变化趋势,这表明弧形试样在整个破坏过程中基本处于弹性变形阶段,试样表面并未发生明显的裂缝和层间分离迹象;当达到极限载荷之后,试样瞬间断裂并伴有清脆的响声,载荷迅速下降至 10 kN 左右后趋于稳定。

由图3b可以看出,凸向加载方式下试样的载荷-位移曲线与凹向加载方式下明显不同。在凸向加载



A₁ ~ A₅, T₁ ~ T₅—试样编号

a—凹向加载方式; b—凸向加载方式

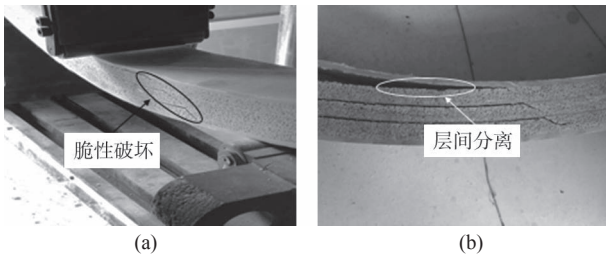
图3 试样载荷-位移曲线

方式下,试样的载荷-位移曲线大致可分为弹性变形、裂缝发展和层间分离、屈服破坏三个阶段,表现为多夹砂层剪切破坏后的试样屈服破坏模式。第一阶段为弹性变形阶段,开始加载至产生较小位移(≤ 2 mm)时,载荷-位移曲线呈现出线性增长,该阶段未出现肉眼能观测到的裂缝。第二阶段为裂缝发展和层间分离阶段,试样出现了较大的位移(2~4 mm),可以观察到裂缝随着载荷增加逐渐变宽、变长的发展过程,并且能够明显观察到缠绕层与夹砂层之间发生分层现象。由于裂缝发展和层间分离,导致管壁结构应力重新分布,载荷-位移曲线有明显的波动点存在,之后曲线基本保持线性增长趋势,直至达到最大载荷值。由图3b还可以看出,在试样破坏过程中,第二阶段波动点出现的越迟,即试样裂缝出现越晚,试样的破坏载荷就越大。第三阶段为屈服阶段,当达到最大载荷后,多个夹砂层发生剪切破坏,有明显的贯通于各结构层的裂缝出现,这时载荷无法增加并且位移迅速增大,导致载荷逐渐下降,试样呈现出塑性断裂破坏特征。

(2) 试样破坏模式分析。

图4和图5分别为凹向和凸向加载方式下试样的破坏过程。

在两种加载方式下,试样的弯曲破坏模式显著不同。由图4可以看出,在凹向加载方式下,夹砂层



a—夹砂层瞬间脆性破坏; b—缠绕层—夹砂层完全分离

图4 凹向加载方式下试样破坏过程



a—一层间细小裂缝; b—夹砂层剪切破坏

图5 凸向加载方式下试样破坏过程

剪切破坏以及与缠绕层层间界面脱粘导致的试样脆性破坏是其主要破坏模式。加载初期,试样表面无明显变化,未发现裂缝和层间分离现象;当达到极限强度时,凹向加载方式下试样的全部夹砂层沿 45° 方向瞬间发生剪切破坏,同时夹砂层与缠绕层之间出现分离现象,形成贯通的断面,但外侧缠绕层未发生明显的纤维与树脂基体的拉伸断裂破坏,这并非全部层合板都失效的终层失效理论所认为的破坏状态。值得注意的是,夹砂层剪切破坏的位置并不是在加载压头的正下方,而是出现在距离加载压头中心点两侧约 $1/8$ 附近。因此,提高各结构层粘接强度和整体性,增加夹砂层的弯曲强度、拉伸强度拉和厚度对于提高玻璃钢夹砂管的承载能力有着积极的作用。

由图5可以看出,在凸向加载方式下,试样经历裂缝发展、层间分离和屈服的渐进失效历程,破坏位置始终位于加载点正下方。施加载荷初期,加载压头正下方位置处试样的缠绕层与夹砂层之间出现细小裂缝,随着载荷的增加,裂缝增大并向两侧迅速发展,层间开始分离,应力出现重分布,此时载荷为 $7 \sim 14$ kN。层间分离后,随着载荷的持续增加,各结构层独自抵抗载荷,以剪切应力为主。当载荷超过夹砂层所能承受的极限剪应力后,试样发生沿 45° 方向的多夹砂层跨层剪切破坏,试样进入屈服阶段。两种加载方式下试样弯曲性能试验所得到的破坏模式与圆形玻璃钢夹砂管在静载条件下的破坏模式相吻合^[11]。

3 结论

(1) 通过弧形玻璃钢夹砂试样的弯曲性能试验,得到凹向和凸向加载方式下试样的弯曲强度平均值分别为 $160.81, 116.41$ MPa,弯曲弹性模量平均值分别为 $7932, 6508$ MPa。推荐采用凸向加载方式确定的试样弯曲强度作为管壁结构设计的力学性能指标。

(2) 凹向和凸向加载方式显著影响试样的破坏模式。凹向加载方式试样的破坏模式为脆性剪切破坏特征,破坏位置在距加载点两侧 $1/8$ 处,而凸向加载方式试样则经历裂缝发展、层间分离和最终屈服的渐进失效破坏模式,破坏位置位于加载点处。

(3) 凸向加载方式率先导致试样破坏,与整管受载荷时管顶和管底位置的加载方式一致,为管涵受力的最不利位置。

参考文献

- [1] 王清洲,梁筱,魏连雨,等.公路用玻璃钢夹砂管道壁厚比优化[J].长安大学学报:自然科学版,2018,38(3):10-17.
Wang Qingzhou, Liang Xiao, Wei Lianyu, et al. Optimization of diameter to thickness ratio of glass fiber reinforced plastics mortar pipe for highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(3): 10-17.
- [2] 朱侯捷.新型离心浇铸玻璃钢夹砂管在顶管施工中的应用[J].建筑施工,2020,42(8):1526-1528.
Zhu Yujie. Application of new centrifugal casting glass fiber reinforced plastic sand pipe in pipe jacking construction[J]. Building Construction, 2020, 42(8): 1526-1528.
- [3] 杜东照,胡学俊,贾彩艳,等.玻璃钢夹砂管道在新沂市尾水导流工程中的质量控制[J].江苏水利,2020(6):70-72.
Du Dongzhao, Hu Xuejun, Jia Caiyan, et al. Quality control of fiber reinforced plastic sand pipes in the tail water diversion project of Xinyi City[J]. Jiangsu Water Resources, 2020(6): 70-72.
- [4] 刘金星,刘刚,耿震,等.采用玻璃钢夹砂管内衬修复大口径污水管工程设计[J].中国给水排水,2019,35(24):85-89.
Liu Jinxing, Liu Gang, Geng Zhen, et al. Engineering design of large diameter sewage pipe lining repairing with centrifugal casting glass fiber reinforced plastics (CCGRP) mortar pipes[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(24): 85-89.
- [5] 石华旺,魏连雨.玻璃钢夹砂管涵洞力学性能现场试验研究[J].广西大学学报:自然科学版,2017,42(4):1535-1540.
Shi Huawang, Wei Lianyu. Full-scale field test for buried glass fiber reinforced plastic mortar pipes culvert[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(4): 1535-1540.
- [6] 郑彦军,陈兆南,魏连雨,等.玻璃钢夹砂管涵洞力学性能试验研究[J].特种结构,2016,33(6):66-70.
Zheng Yanjun, Chen Zhaonan, Wei Lianyu, et al. Experimental

- study on mechanical properties of glass fiber reinforced plastic mortar pipe culvert [J]. *Special Structures*, 2016, 33(6):66–70.
- [7] 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.
- [8] 陈兆南,裴亚男,魏连雨,等.施工期重车行驶下浅埋 FRPM 管涵洞安全性研究[J].玻璃钢/复合材料,2019(11):81–85.
- Chen Zhaonan, Pei Yanan, Wei Lianyu, et al. Study on safety of shallow burial FRPM pipe culvert heavy vehicle driving during construction period[J]. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2019(11):81–85.
- [9] 王清洲,汪洋,魏连雨,等.多排玻璃钢夹砂管涵洞力学性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(7):82–88.
- Wang Qingzhou, Wang Yang, Wei Lianyu, et al. Study on mechanical property of multiple FRPM pipes culvert [J]. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2018(7):82–88.
- [10] 魏彬.公路玻璃钢夹砂管涵洞初始环刚度试验研究[J].公路与汽运,2018(4):142–144.
- Wei Bin. Experimental study on initial ring stiffness of highway FRP sand pipe culvert[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2018(4):142–144.
- [11] 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.
- [12] 张济源.埋地玻璃钢夹砂管的力学性能及公路应用研究[D].天津:河北工业大学,2016.
- Zhang Jiyuan. Research on mechanical properties and the application in highway engineering of buried FRPM pipe[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2016.
- [13] 任妍妍.施工荷载作用下玻璃钢夹砂管涵安全性评价[J].公路,2020,65(11):73–78.
- Ren Yanyan. Safety evaluation of FRPM pipe culvert under construction load[J]. *Highway*, 2020, 65(11):73–78.
- [14] 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,2018,38(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*, 2020, 48(12):107–113.
- [15] 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,2017.
- 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, 2017.
- [16] 石华旺,魏连雨,陈兆南,等.玻璃纤维增强塑料夹砂管涵疲劳性能试验研究[J].玻璃钢/复合材料,2017(3):21–24.
- Shi Huawang, Wei Lianyu, Chen Zhaonan, et al. Experimental study of fatigue performance for FRPM pipe buried in highway[J]. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2017(3):21–24.
- [17] 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, 84:358–370.
- finities and ion-pair formation revealed by non-linear optics and simulations[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, 21: 11 329–11 344.
- [16] Wang Xiangyu, Wang Tao, Ma Jun, et al. Synthesis and characterization of a new hydrophilic boehmite-PVB / PVDF blended membrane supported nano zero-valent iron for removal of Cr(VI) [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 205:74–83.
- [17] Wu Jinhua, Yan Mingjia, Lyu Sihao, et al. Preparation of highly dispersive and antioxidative nano zero-valent iron for the removal of hexavalent chromium[J]. *Chemosphere*, 2021, 262.doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127733.
- [18] 李浪,张敏敏,何颖,等.磺化聚砜/聚醚砜纳滤膜的制备及性能表征[J].工程塑料应用,2016,44(5):10–14.
- Li Lang, Zhang Minmin, He Ying, et al. Preparation and characterization of SPSF / PES nanofiltration membranes[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(5):10–14.
- [19] Taha A, Da' na E, Hessien M. Evaluation of catalytic and adsorption activity of iron nanoparticles greenly prepared under different conditions:Box-Behnken design[J]. *Molecular Simulation*, 2020. doi:10.1080/08927022.2020.1784475.

(上接第 117 页)

27:1 701–1 710.

- [11] Dalal U, Reddy S N. A novel nano zero-valent iron biomaterial for chromium (Cr^{6+} to Cr^{3+}) reduction[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26:10 631–10 640.
- [12] Wang Xiangyu, Liu Peng, Ma Jun, et al. Preparation of novel composites based on hydrophilized and functionalized polyacrylonitrile membrane-immobilized NZVI for reductive transformation of metronidazole[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396:841–850.
- [13] Liu Peng, Wang Xiangyu, Ma Jun, et al. Highly efficient immobilization of NZVI onto bio-inspired reagents functionalized polyacrylonitrile membrane for Cr(VI) reduction[J]. *Chemosphere*, 2019, 220:1 003–1 013.
- [14] Ho W K H, Bao Zhiyong, Gan Xiaorong, et al. Probing conformation change and binding mode of metal ion–carboxyl coordination complex through resonant surface-enhanced raman spectroscopy and density functional theory[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10:4 692–4 698.
- [15] Stoeber A, Hladilková J, Lund M, et al. Molecular insight into carboxylic acid–alkali metal cations interactions:Reversed af-