

塑管-混凝土界面密闭性能改善措施的研究

王俊颜[✉], 周田, 吕梁胜, 杨全兵

先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804

✉通信作者, E-mail: 14529@tongji.edu.cn

摘要: 为改善塑管混凝土结构的界面密闭性能, 研究了在塑管-混凝土界面粘贴一种双面压敏胶带——Preprufe 胶带的作用。通过界面粘结强度、界面渗水高度和界面透气性实验, 测得塑管混凝土结构的界面粘结强度、界面渗水高度、气体压力-时间衰减曲线, 推导出界面渗透指数。试验结果表明, 界面粘结强度与粘贴胶带的宽度的关系可初步认为符合幂函数分布, 压敏性粘合剂胶层与液态混凝土在硬化过程中形成的粘结强度远大于普通粘性层与塑管间的粘结强度。粘贴 Preprufe 胶带可显著提高塑管-混凝土界面抗渗能力。界面渗透指数随粘贴胶带的宽度增大呈明显的递减趋势, 粘贴 220 mm 宽胶带的塑管混凝土试件界面渗透指数仅为基准塑管混凝土试件的 2.86%。Preprufe 双面压敏胶带在改善塑管-混凝土界面密闭性能上有良好的表现。在工程应用中可综合考虑所需效果和价格成本来选取粘贴胶带的宽度。

关键词: 塑管-混凝土界面; 双面压敏胶带; 界面粘结强度; 界面渗水高度; 界面透气性

中图分类号: TU528.0

Research on improving the impermeability of plastic pipe-concrete interface

WANG Jun-yan[✉], ZHOU Tian, LV Liang-sheng, YANG Quan-bing

Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China

✉ Corresponding author, E-mail: 14529@tongji.edu.cn

Abstract: In such environments as tidal / splash zone and soil-air transition zone in saline environment, concrete structures, like bridge piers and pile foundations, often suffer more severe structural corrosion and reinforcement corrosion than those completely in water, soil and air. The application of plastic pipe concrete can effectively solve the above problems. Plastic pipe concrete is integrated by pouring concrete into a large-diameter plastic pipe with a certain structural size. Plastic pipes can protect the bridge piers, eliminate the water level change area and the soil-air junction area in structural design, so as to realize the integrated anticorrosion protection of the bridge piers in the salty environment. The anti-corrosion protection effect of the plastic pipe concrete system depends on the impermeability of the plastic pipe-concrete interface. The difference in the coefficient of linear expansion between plastic pipe and concrete and the shrinkage of the core concrete will damage the bonding layer between the plastic pipe and concrete, thereby affecting the impermeability of the interface. To improve the impermeability of plastic pipe-concrete interface, the effect of a pressure-sensitive adhesive tape—the Preprufe double-sided tape attached to plastic pipe-concrete interface was studied. Through the experiments of interfacial bond strength, interfacial water penetration height and interfacial air permeability, the interfacial bond strength, interfacial water penetration height, gas pressure-time decay curve are measured, and the interface permeability index is deduced. The experimental results show that the relationship between the interfacial bond strength and the width of adhesive tape can be preliminarily considered as power function distribution. The bond strength formed between the pressure-sensitive adhesive layer and liquid concrete during the hardening process is much greater than that between the ordinary adhesive tape and the plastic pipe. Pasting the Preprufe tapes can significantly improve impermeability of the plastic pipe-concrete interface. The interfacial permeability index decreases with the increase of the width of adhesive tape, and the interfacial permeability index coefficient of plastic pipe-concrete specimens with 220 mm wide tape were only 2.86% of that of the specimens with no tape. Preprufe double-sided pressure-sensitive tape has good performance in improving the impermeability of plastic pipe-concrete interface. The width of adhesive tape can be selected by

基金项目：国家自然科学基金青年基金(51609172)；浙江省交通运输厅科技项目(2019-GCKY-01)
considering the required effect and cost in engineering applications.

Keywords： plastic pipe-concrete interface； double-sided pressure-sensitive tape； interfacial bond strength； interfacial water penetration height； interfacial airtightness

处在含盐环境下的潮汐/浪溅区和土壤-空气过渡区这类环境的混凝土结构，例如桥梁的桥墩和桩基础，其结构物腐蚀和钢筋锈蚀破坏往往比完全处在水中、土壤中以及大气区中的混凝土严重得多^[1,2]。对于上述的盐腐蚀环境，除了提高混凝土自身耐久性之外，实际工程仍需要附加的防护措施，才能保证混凝土结构的耐久性。目前腐蚀环境下混凝土防护措施主要有涂层保护法^[3-5]、钢筋防腐蚀处理^[6-8]，以及电化学防护^[9-11]等。此外，通过给混凝土结构“穿”上柔性防护层来隔绝外界腐蚀性介质侵蚀的防腐套技术^[12-14]也是解决这个难题的有效方案之一。防腐套在美国等发达国家的近海混凝土结构的防腐蚀措施中应用相当广泛，然而防腐套技术的缺点在于：1)防腐套的凸缘缝存在潜在渗水通道；2)厚度不能太厚，否则不利于人工施工，但厚度太薄又容易破损；3)施工费用昂贵，均需要潜水员进行水下部分的操作以及独立工期。采用塑管混凝土结构则可以解决上述问题，将具有一定结构尺寸的大口径塑管预置于钢模内，然后浇注混凝土一体化成型，从结构设计上把桥墩、桩基等结构在水位变化区和土壤-大气交界区中与侵蚀环境隔绝起来，如图1所示。塑管混凝土体系没有结构缝，完全隔绝海水的渗透；在浇筑混凝土柱时一体化成型不需要后期的人工施工，节约人工费；可以使用厚度大的塑管，能承受更严酷的物理撞击和磨损；且管材为无缝管，可以对核心混凝土提供径向约束力，提高混凝土结构的延性和韧性，同时也为核心混凝土的硬化阶段提供了良好的养护环境。

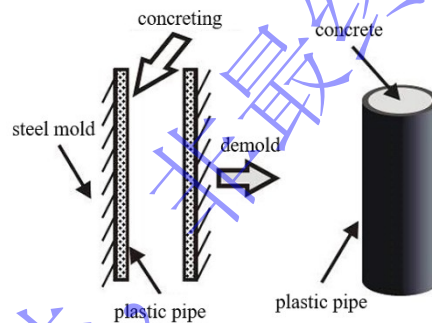


图1 塑管-混凝土结构一体化成型

Fig.1 Integrated molding of plastic pipe-concrete structure

在塑管混凝土结构中，塑管与混凝土不同材料间线膨胀系数的差异以及核心混凝土的收缩会使得塑管与混凝土之间的粘结层发生破坏。采用粘结剂可有效提升塑管与后浇注混凝土间的粘结可靠度，进而大幅提高塑管-混凝土界面的抗渗能力，但关键难题是寻找可以与液态混凝土粘结的粘结剂。传统的防腐套是在已经硬化的混凝土表面，用自带的粘结剂进行粘结，类似于粘贴防水卷材的过程，但传统的粘结剂并不能实现与新拌混凝土的粘结。美国 GCP AT 公司(Grace Construction & Packing Applied Technologies Inc.)生产的 Preprufe 双面压敏胶带广泛应用于各大地下防水工程^[15-17]，该胶带由三部分组成^[18]，如图 2(a)所示，分别是粘性层、基层和 Preprufe 胶层，胶带总厚度为 0.5 mm。其中粘性层是由普通的强粘性固体胶组成，可以直接紧贴塑管的内壁；Preprufe 胶层为压敏性粘合剂层以及丙烯酸基弹性体保护涂层的结合层，面向未浇注的混凝土，其表面具有微观的钩状物和孔隙，微观构造如图 2(b)所示。当混凝土浇注于塑管之内时，硬化产生的水泥水化产物在压力下会和 Preprufe 胶的微观结构形成机械咬合作用^[19]，从而达到混凝土与胶带的紧密粘结。

考虑到 Preprufe 双面压敏胶带昂贵的价格，在实际应用时要将所有塑管内壁全都贴满是不现实的。因此本文将通过界面粘结强度、界面渗水高度和界面透气性三组试验研究胶带宽度对塑管-混凝土界面密闭性能的影响，根据试验结果建立胶带宽度与界面渗透指数的关系模型，为 Preprufe 双面压敏胶带在实际工

程中的应用提供理论依据。

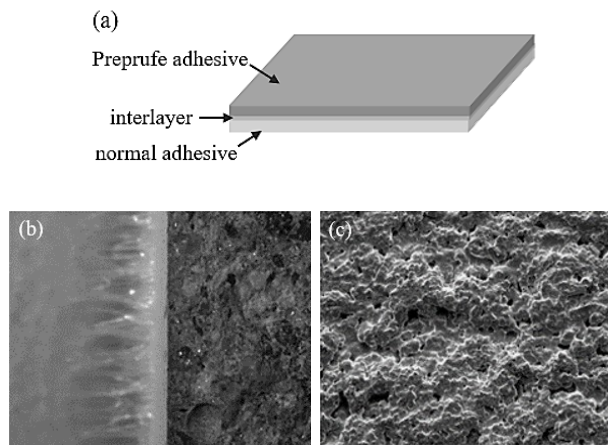


图2 Preprufe 胶带的宏观与微观构造图。(a) 宏观构造图；(b)(c) 微观构造图

Fig.2 Macrostructure and microstructure of the Preprufe tape. (a) Macrostructure; (b)(c) Microstructure

1 实验方案与测试方法

1.1 实验试件的制备

塑管的选择要综合考虑最大可造公称外径、延展性、耐腐蚀耐老化性等几个重要因素，目前已广泛应用于市政工程地下排水管道的大口径塑管^[20,21]如高密度聚乙烯（HDPE）管、聚氯乙烯（PVC）管和玻璃钢夹砂管（FRP）管均可用于塑管混凝土结构。本文中实验均采用 HDPE 管，公称压力为 1.0MPa，公称外径为 110 mm，厚度为 6.6 mm。混凝土原材料如下：水泥选用上海宝山水泥厂生产的 42.5#普通硅酸盐水泥；所用砂为河砂，细度模数为 2.8；粗骨料选用普通碎石，粒径为 5~20 mm；拌和水使用自来水；减水剂采用花王迈地 100 萘系减水剂粉剂，混凝土坍落度控制在 18 ± 2 cm。混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比

Tab.1 Concrete mix ratio

Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Slump	28d compressive strength
kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	cm	MPa
176	352	732	1140	18	52.0

塑管混凝土试件尺寸为 $\Phi 110$ mm×220 mm，3 个试件为一组。研究采用三种宽度的 Preprufe 双面胶带，分别为 220 mm、110 mm 和 55 mm（塑管混凝土试件高度的 1 倍、1/2 倍和 1/4 倍），对应的塑管混凝土试件的编号分别为 PRE-220、PRE-110 和 PRE-55；基准塑管混凝土编号定为 PRE-0，即无粘贴胶带（胶带宽度为 0），如图 3 所示。

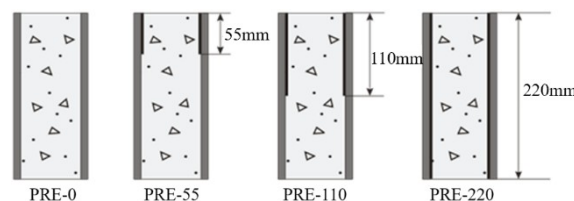


图3 粘贴 Preprufe 双面胶带的塑管-混凝土试件

Fig.3 Plastic pipe-concrete specimens with the Preprufe double-sided tape

每种编号的塑管混凝土试件分别成型 3 组试件，然后分别进行塑管-混凝土的界面粘结强度、界面渗

水高度和界面透气性的测试。由于界面渗水高度试验所用的试件与其他两种测试方法不同（见图5），在粘贴胶带时塑管内外侧均有粘贴，并且粘贴的位置在塑管的下半段，与压力水直接接触。由于塑管外侧的混凝土高度（150 mm）低于塑管内混凝土高度（220 mm），PRE-220 试件的塑管外侧与混凝土的粘结部分只有 150 mm。

1.2 界面粘结强度测试方法

本文采用塑管-混凝土界面粘结强度的试验方法^[22]示意图如图4。塑管混凝土的下端放置于一个特制钢环之上，钢环的内径比塑管混凝土内径大 2 mm；上端放置一块比塑管内径略小的垫板。试验前确保所有物件的轴心重合，以避免偏心加载，然后使用压力机进行加载，加载速度定为 0.05 kN·s⁻¹，记录核心混凝土从塑管推出的最大荷载值。

界面粘结强度的计算公式如式(1)

$$\text{粘结强度} = \frac{\text{荷载}}{\text{塑管内壁表面积}} \quad (1)$$

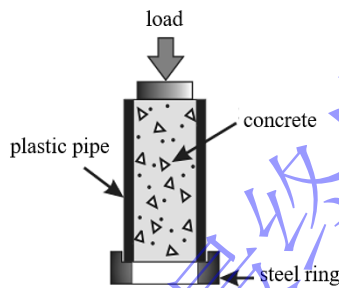


图4 塑管混凝土粘结强度的测试

Fig.4 Bond strength test of plastic pipe concrete

1.3 界面渗水高度测试方法

界面渗水高度试验的示意图如图5，试验方法参考了水工 DL/T 5150-2001 标准^[23]的 4.22。试件成型时塑管预置于成型抗渗试件的钢模中，然后浇筑混凝土一体化成型，试件形状如图5右上方所示，相当于在普通混凝土抗渗试件内部形成塑管-混凝土界面。由于塑管-混凝土界面的渗透性要远大于混凝土的渗透性（初步试验证明），可以认为压力水在混凝土中的渗透不会影响其在界面中的渗透。

试件 24 h 后拆模进行水养护。试件达到 28 d 龄期后套入普通混凝土抗渗试件用的钢模，然后安装到混凝土抗渗仪上，水压调整到 0.8 MPa 恒压，计时 24 h 后停止实验。将试件塑管内外侧的混凝土分开，然后将核心混凝土的外表面十等分，测量其界面平均渗水高度；再将核心混凝土沿竖向对半切开，测量混凝土自身渗水高度，与界面渗水高度相比较。

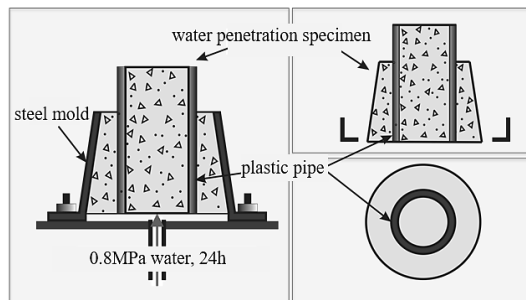


图5 界面渗水高度试验示意图

Fig.5 Interfacial water penetration height

混凝土的渗水高度 D_m 与其所受压力水头 H 及施压时间 T 的乘积的平方根成正比^[24]，如公式(2)所示

$$D_m = \sqrt{2THK_w/m}, \quad (2)$$

式中： K_w =混凝土渗透系数（透水系数， $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ）， m =混凝土空隙率，通常取 $m=0.03$ 。混凝土渗透系数 K_w 通过换算得到式(3)

$$K_w = \frac{m \cdot D_m^2}{2TH}. \quad (3)$$

1.4 界面透气性测试方法

塑管混凝土的界面透气性测试的测试原理与 G. R. Martin^[25]提出的混凝土透气性测试原理相同，都是时间变量-压力差测试方法，即具有相同初始压力的密闭容器中的压缩气体通过管道对测试舱中的测试体进行渗透，然后测试密闭容器的压力衰减曲线来表征测试体的渗透性，压力衰减越慢，说明测试体的渗透性越差，密实性越高。界面透气性测试系统如图 6 所示，测试前先检查装置气密性，然后关闭阀门 2、打开阀门 1 和阀门 3，开启电子压力表，开启空气压缩机，在储气罐压力达到 200 kPa 时关闭压缩机，误差控制在 $\pm 0.3\%$ ；打开阀门 2，储气罐内的压缩空气通过塑管混凝土进行渗透，其压力从 200 kPa 开始衰减，电脑实时记录储气罐的压力-时间衰减曲线，数据采集频率为 1 Hz；当压力衰减至 30 kPa 时停止测试。

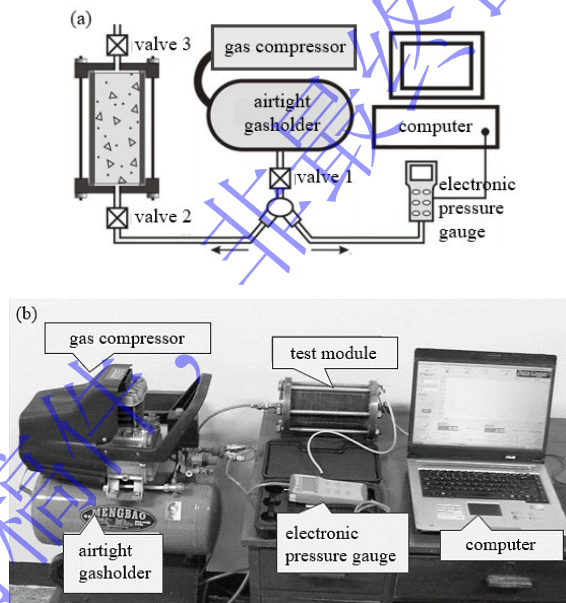


图 6 界面透气性测试系统。(a) 示意图；(b) 实物图

Fig.6 Interface airtightness test system. (a) diagram; (b) objects

在得到储气罐的压力-时间衰减曲线后，如何从曲线中获得有效的参数来评估界面气密性的大小是关键。最为简单有效的参数是储气罐中压力从 200 kPa 衰减到一定压力值（本文为 30 kPa）时消耗的时间，定义为衰减时间 T_d 。衰减时间 T_d 越长，说明界面气密性越好。然而衰减压力值的决定取决于主观因素，不同的衰减压力值对应不同的衰减时间。假如仅用于横向对比等简单分析的话，衰减时间 T_d 已经足够，然而若要将界面渗透性能与混凝土的渗透性能进行对比或者评估塑管混凝土不同界面改善措施改善效果时，仅使用衰减时间 T_d 来表征气密性是不够的。

在所有混凝土气密性试验研究中，渗透系数得到了最广泛的应用。式(4)是采用恒压气流在混凝土试件中渗透得到的渗透系数 K_g

$$K_g = \frac{\eta \cdot L \cdot Q}{A \cdot (p_1 - p_2)}, \quad (4)$$

式中： K_g =渗透系数(cm^2)， Q =流量($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)， p_1 =进口压力(Pa)， p_2 =出口压力(大气压，Pa)， L =试件在气流方向的长度(cm)， η =气体的粘度系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)， A =试件垂直于气流方向的面积(cm^2)。塑管-混凝土界面的气密性试验实际上记录的是图6中储气罐的压力衰减情况，导致储气罐的压力衰减的影响因素包括塑管-混凝土界面纵向孔隙的分布情况、试件长度，以及塑管-混凝土界面的横截面形状。在计算塑管-混凝土的界面渗透系数时，为了与混凝土的渗透系数进行比较，作者将塑管-混凝土界面等效为一个和核心混凝土相同尺寸的实心圆柱体，然后用气体在混凝土的渗透理论进行分析，推导出压力-时间衰减曲线的模型，以及可以作为抗渗指标的渗透系数（界面透气性测试系统测试到的储气罐压力衰减，实际是由压力气体透过塑管-混凝土界面和核心混凝土自身这两部分导致的；但鉴于实验显示塑管-混凝土界面透气性远大于混凝土自身的透气性，本文在计算推导时将储气罐压力衰减全归于塑管-混凝土界面的贡献）。

储气罐内气体在环境温度 T 不变的情况下，根据克拉伯龙方程式(5)

$$PV = nRT = \text{const}, \quad (5)$$

对式(5)进行微分，并且定义储气罐内气体的初始压力和初始体积分别为 P_k 、 V_k ，测试舱的流体速率 (dV/dt) 和压力变化 (dP/dt) 的关系可以用式(6)表示

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V_k}{P_k} \cdot \frac{dP}{dt}, \quad (6)$$

在塑管-混凝土界面的等效圆柱体的长度为 L ，横截面积为 A ，并且在 dt 很短的情况下（气压差值 Δp 的变化可以忽略），根据式(4)，测试舱的气体流量 Q 可以用式(7)表示

$$Q = K_g \cdot \frac{A \cdot \Delta p}{\eta \cdot L} = \frac{dV}{dt}, \quad (7)$$

假设 $\Delta p = P$ （相对压力，为了和式(6)保持一致），联立式(6)和式(7)可得式(8)

$$\frac{dP}{P} = -K_g \cdot \frac{A \cdot P_k}{\eta \cdot L \cdot V_k} \cdot dt, \quad (8)$$

由于式(8)等号右边除了 dt 以外均为定值，作者定义 Ω (s^{-1}) 的表达式如式(9)

$$\Omega = K_g \cdot \frac{A \cdot P_k}{\eta \cdot L \cdot V_k}, \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)并对等号两边进行积分可得式(10)

$$\ln P = -\Omega \cdot t + \text{const}, \quad (10)$$

定义边界条件为：当 $t=0$ 时，储气罐的初始相对压力为 P_i ，则常数 $\text{const} = \ln P_i$ ，代入式(10)后可得式(11)和式(12)：

$$\ln \frac{P}{P_i} = -\Omega \cdot t, \quad (11)$$

$$P = P_i \cdot e^{-\Omega t}. \quad (12)$$

由式(12)可知，储气罐的压力-时间衰减曲线符合指数函数 $y = a \cdot e^{bx}$ ，其中 a 为 P_i ，本文中的 P_i 定为 200 kPa， b 为 $(-\Omega)$ 。 Ω 是控制该函数衰减的唯一参数，可以作为表征储气罐压力衰减速度的参数， Ω 越大，压力衰减越快，说明塑管-混凝土界面的气密性越差，因此本文定义 Ω 为界面气密性试验中的塑管-

混凝土的界面渗透指数，量纲为 s^{-1} （秒的负一次方）。通过测试表征塑管-混凝土界面透气性的压力-时间衰减曲线，然后用指数函数 $y=a \cdot e^{bx}$ 进行曲线拟合，即可获得 Ω 的具体数值。以基准的塑管混凝土为例，其界面透气性的压力-时间衰减曲线及其拟合曲线见图 7，由拟合曲线的表达式可得其界面渗透指数 Ω 的具体数值为 0.00943，拟合曲线的标准方差为 0.99454，相关性较好。另外，由式(9)可知， Ω 与 K_g 为线性相关关系，因此 Ω 还可以转换为 K_g ，从而与混凝土的渗透系数进行衔接。

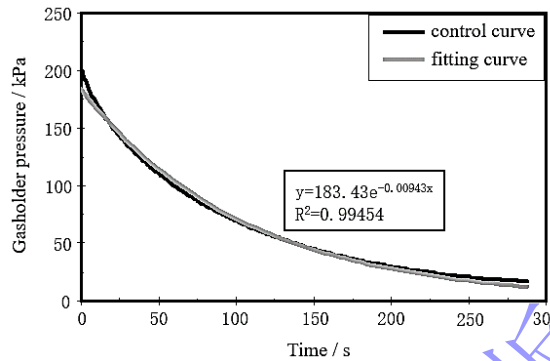


图 7 PRE-0 压力-时间衰减曲线及其拟合曲线

Fig.7 Pressure-time decay curve and its fitting curve of PRE-0

2 实验结果和分析

采用不同宽度 Preprufe 胶带的塑管-混凝土界面性能试验结果汇集于表 2 中，包括界面粘结强度、界面渗水高度试验以及界面透气性试验，分别在下面的 2.1-2.3 节中进行分析 and 讨论。

表 2 粘贴不同宽度 Preprufe 双面胶带的塑管-混凝土界面密闭性能试验结果

Tab.2 Test results of impermeability of plastic pipe-concrete interface with Preprufe tape of different widths

Specimens	Bond strength (kPa)	Interfacial water penetration height		Interfacial airtightness	
		Water penetration height (cm)	Permeability coefficient ($10^{-7} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Decay time (s)	Permeability index Ω ($10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
PRE-0	44.6	13.85	2.38	199	9.43
PRE-55	263	0	N/A	383	4.41
PRE-110	512	0	N/A	1248	1.11
PRE-220	1070	0	N/A	3349	0.27

注：表中衰减时间是指储气罐中压力从 200kPa 衰减到 30kPa 时消耗的时间

2.1 界面粘结强度

采用不同宽度 Preprufe 双面胶带的塑管-混凝土界面粘结强度见表 2 和图 8。由表 2 可知，PRE-55、PRE-110 和 PRE-220 的界面粘结强度的比例接近于 1: 2: 4，这说明虽然 PRE-55、PRE-110 只是部分使用 Preprufe 双面胶带，但界面粘结强度主要由胶带的粘结力提供；PRE-220 的界面粘结强度则高达基准试件的 24 倍。由图 8 可见，界面粘结强度与 Preprufe 双面胶带宽度的关系可初步认为符合幂函数分布。在实验中，核心混凝土被推出后可以看到被破坏的是粘性层与塑管内侧形成的粘结层，而 Preprufe 胶层与混凝土形成的粘结层却完好无损。这说明 Preprufe 胶层不仅能实现与新拌混凝土的粘结，并且其形成的粘结强度远大于普通粘性层与塑管之间的粘结强度。

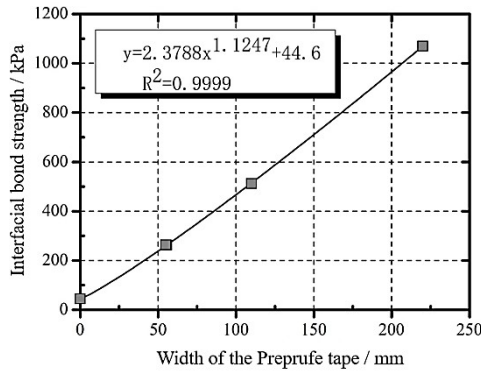


图8 Preprufe 胶带宽度 vs 界面粘结强度

Fig.8 Width of the Preprufe double-sided tape vs interface bonding strength

2.2 界面渗水高度

采用不同宽度 Preprufe 双面胶带的塑管-混凝土界面渗水高度如表 2 及图 9 所示, PRE-0 的界面渗水高度 (138.5 mm) 远大于混凝土自身的渗水高度 (13.7 mm), 在顶出 PRE-55 的核心混凝土并剥离胶带后, 可以观察到核心混凝土外表面没有水渍, PRE-110 和 PRE-220 也是如此。表明在 24 h 内, 0.8 MPa 压力水并不能透过 Preprufe 双面胶带, 使用胶带的三组试件的核心混凝土与塑管间界面渗水高度基本为 0。因此粘贴 Preprufe 胶带可使塑管-混凝土界面抗渗能力达到优于核心混凝土抗渗能力的程度。界面渗水高度试验并不能反映出胶带宽度对界面渗透性能的影响, 液体作为一种介质在测试渗透性能的时候存在一定的瓶颈。

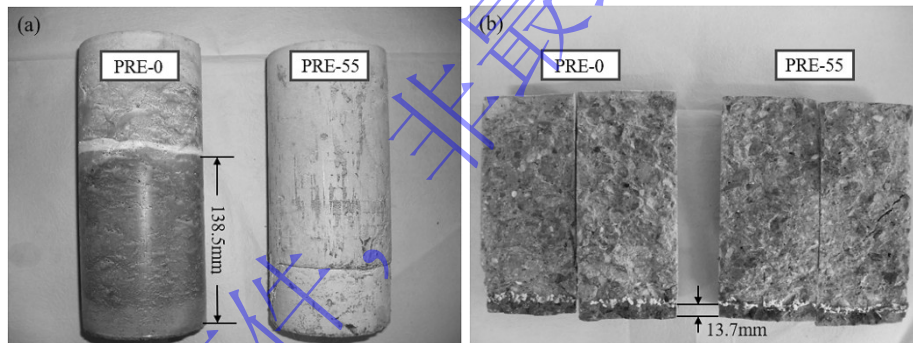


图9 核心混凝土渗水高度。(a) 外表面; (b) 内部

Fig.9 Seepage height of central concrete. (a) Surface; (b) Inner

2.3 界面透气性

界面透气性试验测得的压力-时间衰减曲线如图 10 所示, 衰减时间 T_d 和界面渗透指数 Ω 如表 2 所示。PRE-0、PRE-55、PRE-110 和 PRE-220 的界面渗透指数呈明显的递减趋势, PRE-220 的界面渗透指数已经比前三组小一个数量级, 仅为基准试件的 2.86%, 衰减时间长达基准试件的 17 倍。Preprufe 胶带对衰减时间 T_d 和界面渗透指数 Ω 的影响分别见图 11 和图 12。由图 11(a)和图 12(a)可见, 衰减时间 T_d 随胶带宽度呈指数函数增长趋势, 而界面渗透指数 Ω 随胶带宽度呈指数函数下降趋势, 数据趋势线跟经验公式都在图中给出。在图 11(b)和图 12(b)中, 纵坐标均采用了对数刻度, 更加直观地呈现了实验数据之间数量级的差别; 在获得有限数据的情况下, 通过数据推导为实际工程提供数据指标。

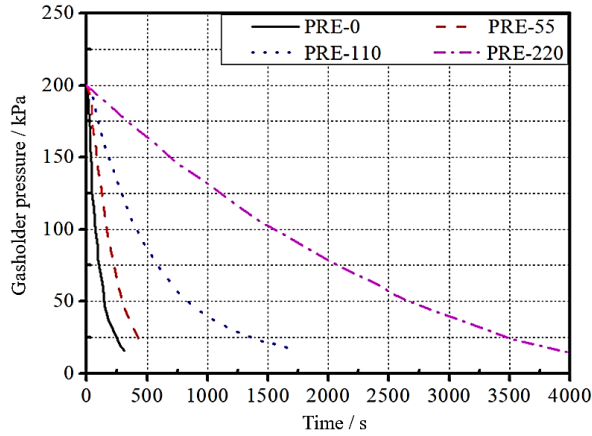


图 10 压力-时间衰减曲线

Fig.10 Pressure-time decay curve

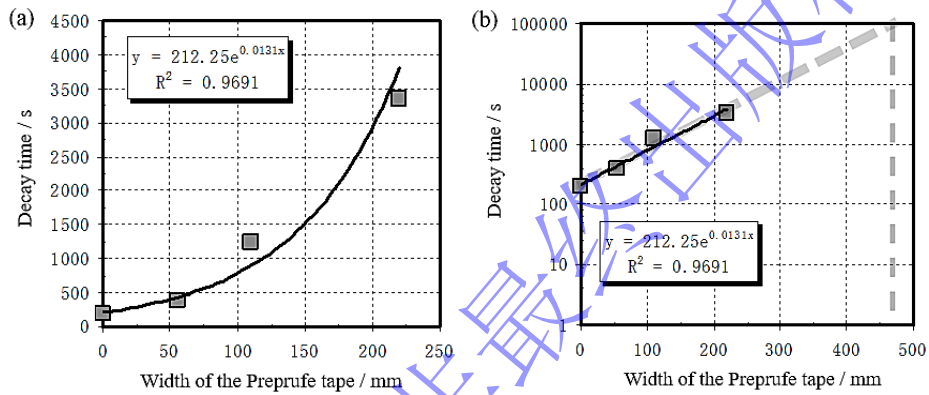


图 11 Preprufe 胶带宽度 vs 衰减时间 T_d 。(a) 常规数值刻度；(b) 对数刻度

Fig.11 Width of the Preprufe double-sided tape vs decay time T_d . (a) Conventional numerical scale; (b) Logarithmic scale

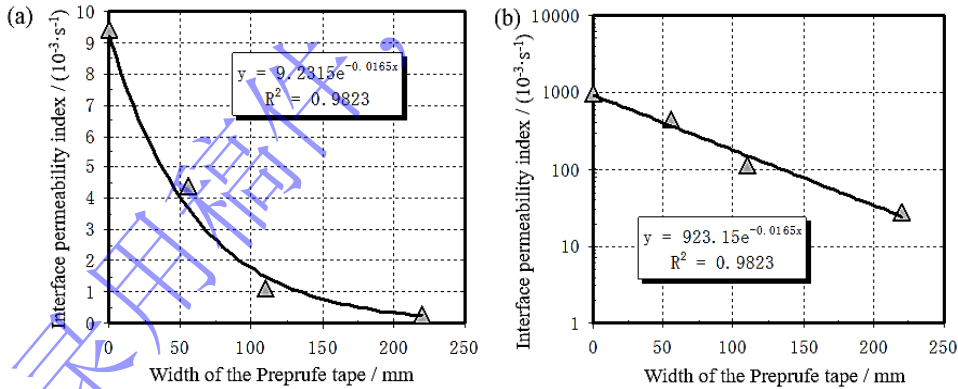


图 12 Preprufe 胶带宽度 vs 界面渗透指数 Ω 。(a) 常规数值刻度；(b) 对数刻度

Fig.12 Width of the Preprufe double-sided tape vs interface permeability index Ω . (a) Conventional numerical scale; (b) Logarithmic scale

3 结论

塑管混凝土结构能够提高耐久性的关键点在于塑管-混凝土界面能有效地抵御外界有害物质的侵蚀。本文采用在塑管内壁粘贴一种双面压敏胶带的方法，改变塑管和混凝土之间的粘结方式，提高塑管-混凝土界面的密闭性能，并分别以界面粘结强度试验、界面渗水高度试验和界面透气性试验来检验其效果。通

过对实验数据的分析和讨论,得到以下几点结论:

(1) 塑管-混凝土界面粘结强度与胶带宽度的关系可初步认为符合幂函数分布,界面粘结强度主要由胶带的粘结力提供。双面胶带的压敏性粘合剂胶层可与核心混凝土形成一个整体,其与核心混凝土表面形成的粘结层在测试粘结强度时完好无损。

(2) 粘贴该胶带可显著提高塑管-混凝土界面抗渗能力。界面渗水高度试验并不能反映出胶带宽度对界面渗透性能的影响,液体作为一种介质在测试渗透性能的时候存在一定的瓶颈。相对而言,界面透气性测试系统则可以十分有效地对塑管-混凝土界面的抗渗性进行评估。

(3) 界面透气性试验结果表明:塑管-混凝土界面透气性随着粘贴胶带宽度的增大而降低。粘贴 220 mm 宽胶带的试件压力衰减时间长达未粘贴胶带试件的 17 倍,提高了一个数量级;界面渗透指数仅为未粘贴胶带试件的 2.86%,降低了一个数量级。

(4) Preprufe 双面压敏胶带在改善塑管-混凝土界面密闭性能上有良好的表现。实际工程中可综合考虑所需效果和价格成本来选取粘贴胶带的宽度。

参考文献

- [1] Mohammed T U, Hamada H, Yamaji T. Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(4): 593
- [2] Wu J H. Study on the durability of reinforced concrete structure in marine environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (吴金海. 海洋环境下混凝土结构耐久性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.)
- [3] Elnaggar E M, Elsokkary T M, Shohide M A, et al. Surface protection of concrete by new protective coating[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220(9): 245
- [4] Elhalawany N R, Nawwar G A. Novel polymer/hybrid coatings for concrete protection using poly methyl methacrylate (scrap) as seeded particles[J]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2015, 47(4): 370
- [5] Bolander J E. Surface coating for sustainable protection and rehabilitation of concrete structures, R. Narayan Swamy, Shin Tanikawa (Eds.). Kohbunsha Publishing Co., Ltd., Japan (2012). 257p[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014,46(2): 109.
- [6] Larsen K P. Surface-applied corrosion inhibitors extend life of reinforced steel concrete structures[J]. *Materials Performance*, 2019,58(3): 12
- [7] Lu Y Y, Hu J Y, Li S, et al. Active and passive protection of steel reinforcement in concrete column using carbon fibre reinforced polymer against corrosion[J]. *Electrochimica Acta*, 2018,278(7): 124
- [8] Zhou Y, Chen C C, Cai J S, et al. Corrosion behavior of corrosion resistant reinforcing steels and their synergistic corrosion resistant effect with corrosion inhibitor[J]. *Journal of Building Materials*, 2016,19(02): 379 (周扬, 陈翠翠, 蔡景顺, 等. 耐蚀钢筋的腐蚀行为及其与阻锈剂的协同防腐作用[J]. 建筑材料学报, 2016,19(02): 379)
- [9] Whitmore D, Miltenberger M. Galvanic cathodic protection of corroded reinforced concrete structures[J]. *Materials Performance*, 2019,58(10): 24
- [10] Zuo J Q, Yao W. Effect of CNT-CF cement-based materials auxiliary anode on cathodic protection of reinforced concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(3): 424 (左俊卿, 姚武. CNT-CF 水泥基材料辅助阳极对钢筋混凝土阴极保护影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 424)
- [11] Mangaiyarkarasi G, Muralidharan S. Electrochemical protection of steel in concrete to enhance the service life of concrete structures[J]. *Procedia Engineering*, 2014,86(11): 615
- [12] Zhang Y J, Han W L, Zhang Y G, et al. Research and application of three-layer coating protective structure for offshore platform pile leg[J]. *Surface Technology*, 2016,45(11): 123 (张彦军, 韩文礼, 张贻刚, 等. 海洋平台桩腿防腐层修复三层包覆防护结构研究与应用[J]. 表面技术, 2016,45(11): 123)
- [13] Hu J J, Shi M W. Corrosion and anticorrosion technology in offshore platforms[J]. *China Offshore Platform*, 2008,23(06): 39 (胡津津, 石明伟. 海洋平台的腐蚀及防腐技术[J]. 中国海洋平台, 2008,23(06): 39)
- [14] Strange A E. Corrosion control with induced tension polymer wraps[J]. *Materials Performance*, 1996, 35(10): 32

- [15] GCP Applied Technologies Inc. Below grade waterproofing brings massive transit project back on track [EB/OL]. [2020-04-10]. <https://gcpat.com/en/about/project-profiles>
- [16] Ding H M. Prefabricated polymer self-adhesive waterproofing membrane and its construction technology[C] // Proceedings of the 15th Academic Exchange Meeting of the Waterproofing and Drainage Professional Committee of the Tunnel and Underground Engineering Branch of the China Civil Engineering Society, Kunming, 2006: 728
(丁红梅. 高分子自粘胶膜防水卷材及其预铺施工技术[C] //中国土木工程学会隧道与地下工程分会防水排水专业委员会第十五届学术交流会论文集, 昆明, 2011:105)
- [17] Liu B K, Shao X Y, Lv J D. Application of Preprufe waterproof material in Zhichunlu station of Beijing metro[C] // *Proceedings of the Second National Geotechnical and Engineering Conference (Part 2)*, Wuhan, 2006:728
(刘兵科, 邵翔宇, 吕军斗. 预铺式自粘防水卷材在北京地铁知春路车站的应用[C] //第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册), 武汉, 2006: 728)
- [18] Wiercinski R A, Ranganathan A, Cao X, et al. *Waterproofing Membrane*: United States Patent, US9394464[P]. 2016-07-19
- [19] Sun S M, Li M L, Liu A. *A review on mechanical properties of pressure sensitive adhesives*[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, 41(3): 98
- [20] Jiang Y. Study on the selection and research progress of new type pipes in water supply and drainage construction[J]. *Technological Development of Enterprise*. 2013, 32(13): 45.
(姜宇. 给排水管道施工中新型管材的选用及研究进展[J]. 企业技术开发, 2013, 32(13): 45)
- [21] Ahmed A, Guo S C, Zhang Z H, et al. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119484
- [22] Wang J L. Cohesive-bridging zone model of FRP-concrete interface debonding[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(17): 2643
- [23] Test code for hydraulic concrete: DL/T 5150-2001[S]. Beijing: *China Electric Power Press*, 2002
(水工混凝土试验规程: DL/T 5150-2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002)
- [24] Liu W B, Ji Y L, Sha Y F. Discontinuous treatment of impervious concrete test[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 1999, 5(1): 45
(刘文波, 嵇艳玲, 沙元福. 抗渗混凝土试验间断的处理[J]. 水利科技与经济, 1999, 5(1): 45)
- [25] Martin G R. A method for determining the relative permeability of concrete using gas[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1986, 38(135): 90