

# 玻璃钢管的长期刚度测量及预测

朱四荣, 梁娜, 李悦, 陈建中\*

(武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为建立玻璃钢管长期刚度理论模型并对其长期刚度进行预测。首先通过自主设计的恒位移加载试验装置, 在不同初始挠度的恒位移条件下对纯环向缠绕和纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管开展了长期刚度试验研究; 然后, 在试验基础上建立了不同初始挠度下玻璃钢管刚度与时间的折线双对数回归模型、50 年后刚度降幅与初始挠度的线性回归模型, 进而提出了玻璃钢管刚度降幅关于时间与初始挠度的二次曲面预测模型; 最后, 预测了玻璃钢管 50 年后的剩余刚度, 研究了时间和初始挠度对玻璃钢管刚度的影响。结果表明: 纯环向缠绕铺层的玻璃钢管抵抗刚度衰减的能力明显优于纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管, 纯环向缠绕铺层能有效提高玻璃钢管的刚度及其抵抗径向变形的能力, 纯环向缠绕铺层的玻璃钢管有较好的长期力学性能。时间为 8 313.2 h 的测试数据表明提出的玻璃钢管刚度降幅预测模型具有较高的精度和较强的实用性。

**关键词:** 玻璃钢管; 刚度; 长期预测; 双对数回归模型; 二次曲面

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)11-2492-08

玻璃钢管作为一类主要的树脂基复合材料产品, 以其耐腐蚀性好、材质轻、内表面光滑且技术经济效益好等优点而被广泛应用于石油化工行业及给排水工程领域<sup>[1-2]</sup>。随着使用时间的延长, 玻璃钢管的力学性能会有所下降, 甚至可能会出现失效, 从而带来严重的后果。因此, 在充分发挥玻璃钢管耐腐蚀且服役寿命长这一优点的基础上, 保证其在设计年限内的安全可靠性能非常重要。

目前, 多数研究的重点仍集中在试验方面, 即通过试验得出玻璃钢管的长期力学性能特性。国外诸多标准如 AWWA M45—05<sup>[3]</sup>、AWWA C950—07<sup>[4]</sup>、ASTM D2992—12<sup>[5]</sup>、ASTM D5365—06<sup>[6]</sup> 和 ASTM D3681—06<sup>[7]</sup> 等均均以试验时间为 10<sup>4</sup> h 的长期性能试验为基础, 采用双对数回归方法分析预 50 年后玻璃钢管的长期力学性能。这一方法存在试验周期长、费用高以及结果具有局限性等问题, 为此, 已有人提出了一些改进方法。

Carvalho<sup>[8]</sup> 认为回归方法过于保守, 提出了一个阈值应变, 认为当应变达到阈值应变后, 长期性能与时间的对数关系为一条水平直线。Guedes

等<sup>[9]</sup> 采用最大应变准则结合试验分析进行研究, 认为长期性能与时间的对数关系为一条开口向下的抛物线。Bodin<sup>[10]</sup> 考虑了使用条件下环境对玻璃钢管的影响, 采用特征损伤状态与损伤累计概念对玻璃钢管埋地管道进行了寿命预测。Faria 和 Guedes<sup>[11]</sup> 通过试验对比的方法, 提出可以采用试验时间为 10<sup>3</sup> h 的试验代替试验时间为 10<sup>4</sup> h 的试验, 进行长期性能预测。

目前, 中国关于玻璃钢管的研究尚不多见, 而其中涉及玻璃钢管长期性能的研究则更为少见。张玉芳和邓永容<sup>[12]</sup>、魏若奇和王欣<sup>[13]</sup> 分别论述了塑料长期性能的评价原理、重要性和油田用玻璃钢管的失效分析方法、可能失效特征、预测失效的计算机模拟; 董孝理<sup>[14]</sup> 对聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC) 和聚乙烯 (Poly Ethylene, PE) 等塑料管的长期寿命和长期性能静液压强度进行了一定的分析。

玻璃钢管的结构设计是以长期性能为基础的, 若没有可靠的长期性能试验为基础, 则无法保证其长期性能, 这直接关系到玻璃钢管工程结构的安全可靠性。目前的研究一般仅采用条形试样进行弯曲

收稿日期: 2015-10-27; 录用日期: 2016-02-01; 网络出版时间: 2016-04-01 11:49

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160401.1149.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(11102142); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016IA006)

通讯作者: 陈建中, 博士, 副教授, 研究方向为玻璃钢管的长期性能。 E-mail: czjwhut@163.com

**引用格式:** 朱四荣, 梁娜, 李悦, 等. 玻璃钢管的长期刚度测量及预测[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2492-2499.

ZHU S R, LIANG N, LI Y, et al. Measurement and prediction for long-term stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2492-2499 (in Chinese).

或拉伸的耐久性试验, 这种三点弯曲受力情况与玻璃钢管的实际受力情况不一致, 不能真实反映玻璃钢管的特性。因此, 笔者采用管环试样进行研究, 从而考虑其实际工作状态为环弯曲变形的特点, 通过施加不同的初始变形研究玻璃钢管环的长期性能。

首先, 选用纯环向缠绕和纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管环试样为试验对象; 然后, 通过自主设计的恒位移加载试验装置, 以国际通用的长期性能测试方法——恒位移测试为基础, 开展不同初始挠度下玻璃钢管刚度的长期试验研究; 接着, 在试验的基础上, 分别建立不同初始挠度下玻璃钢管刚度与时间的折线双对数回归模型、50 年后刚度降幅与初始挠度的回归模型, 研究时间和初始挠度对玻璃钢管刚度的影响; 最后, 预测玻璃钢管 50 年后的剩余刚度, 为估计玻璃钢管在任意初始挠度和时间下的刚度降幅, 提出并建立玻璃钢管刚度降幅关于初始挠度、时间的二次曲面预测模型。

1 实验

1.1 试样

采用定长缠绕工艺、通过机械设备制作玻璃钢管环试样, 选用 2 种铺层工艺制作试样, 将纯环向缠绕铺层的玻璃钢管记为 Type A, 将纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管记为 Type B, 其交叉缠绕角为 60.19°。制作环境温度为 24℃, 相对湿度为 55%; 第 1 d 自然固化, 第 2 d 通过红外线烤板加热固化。玻璃钢管的组分如表 1 所示, 其公称直径为 200 mm, 公称宽度为 20 mm, 公称厚度为 2 mm。

表 1 玻璃钢管的组分

Table 1 Compositions of glass fiber reinforced plastic pipes

Glass fiber reinforced plastic pipe	Content/wt%	
	Glass-fiber	Resin
Type A	59.74	38.96
Type B	58.96	39.68

1.2 加载装置及测试原理

以恒位移测试为基础, 通过试验研究不同初始挠度的恒位移条件下, 玻璃钢管刚度随时间的变化关系。采用恒位移加载控制方式, 为精确控制试样恒定的挠度, 减少装置带来的误差, 自主设计和定制了恒位移加载试验装置, 如图 1 所示。

恒位移加载条件下, 玻璃钢管环试样的刚度为

$$k = P/W$$

(1)

式中:  $P$  为环试样产生单位径向位移所需的力, N/m;  $W$  为试样的宽度, m。  $P$  需定期测量, 为减少误差对试验数据分析的影响, 使用高精度的 Instron 5848 型微型材料试验机测量试样, 如图 2 所示。在试验机上设定:

$$P = (F_2 - F_1)/7$$

(2)

式中:  $F_2$  为压缩位移为 10 mm 时对应的载荷, N;  $F_1$  为压缩位移为 3 mm 时对应的载荷, N。

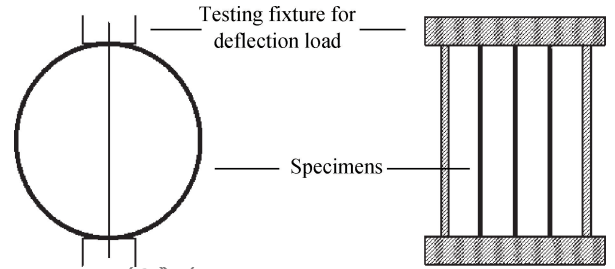


图 1 恒位移加载试验装置

Fig.1 Constant displacement loading test apparatus



图 2 使用高精度的 Instron 5848 型微型材料试验机测量试样

Fig.2 Using Instron 5848 micro material testing machine with high-precision measuring specimen

1.3 测试方法

由于玻璃钢管长期性能的影响因子通常有温度、相对湿度及初始挠度等, 因此, 在试验中采用控制变量法, 除了需要探讨的初始挠度外, 控制温

度和相对湿度对试样的影响:①至少在 $(23\pm2)^{\circ}\text{C}$ 的环境中放置4 h,并在相同环境下进行试验;②至少在相对湿度为 $(50\pm10)\%$ 下的环境中存放40 h,并在同样环境下进行试验。试验中的玻璃钢环试样如图3所示。



图3 试验中的玻璃钢环试样

Fig.3 Ring specimens of glass fiber reinforced plastic pipes in test

按照预定的尺寸制作试件,将每种工艺的试样分为4组,每组均为3个试样,并给试件编号。用游标卡尺对每个试样的尺寸进行测量,取平均值记为各试件的尺寸;同时,测量试样的初始刚度。用夹具将试样的初始挠度分别控制为10 mm (5%)、20 mm (10%)、30 mm (15%)和40 mm (20%)。每隔一段时间将试样取下来,用Instron 5848型微型材料试验机进行测量。

2 结果与讨论

2.1 刚度随时间的变化

采用刚度降幅度量化玻璃钢管刚度的变化,分析比较玻璃钢管刚度的变化规律。刚度降幅 $\delta_k$ 为

$$\delta_k = (k_0 - k)/k_0 \tag{3}$$

式中: $k_0$ 为玻璃钢管的初始刚度,Pa。

图4为不同初始挠度下玻璃钢管刚度随时间的变化。可以看出,Type A和Type B的刚度均随着时间的延长而减小。在时间为5 400 h,初始挠度分别为5%、10%、15%和20%时,Type A的刚度降幅度分别为9.75%、10.03%、13.51%和15.91%,Type B的刚度降幅依次为15.57%、18.53%、25.58%和26.43%,表明随着初始挠度的增加,Type A和Type B的刚度降幅均有所增加。在同等初始挠度下,Type A刚度随时间延长的降幅明显小于Type B,说明纯环向缠绕铺层能增加玻璃钢管抵抗径向变形的能力,Type A有较强的抵抗刚度衰减的能力。

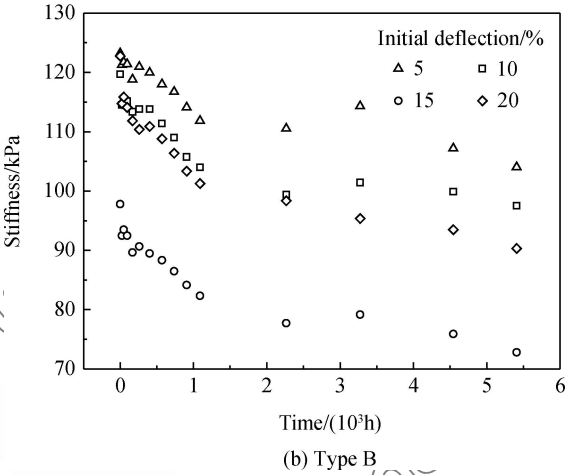
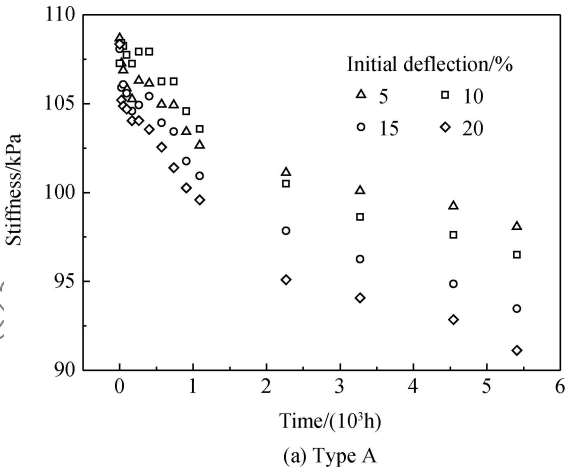


图4 不同初始挠度下玻璃钢管刚度随时间的变化  
Fig.4 Stiffness variations with time of glass fiber reinforced plastic pipes under different initial deflections

2.2 长期刚度

玻璃钢管的设计使用年限一般不超过50年 $(4.38\times10^5\text{ h})$ ,而关于玻璃钢管50年力学长期性能的预测方法,AWWA M45—05<sup>[3]</sup>、AWWA C950—07<sup>[4]</sup>、ASTM D2992—12<sup>[5]</sup>、ASTM D5365—06<sup>[6]</sup>和ASTM D3681—06<sup>[7]</sup>等均采用双对数回归模型进行预测。结合试验数据和拟合优度,分别建立玻璃钢管在不同初始挠度下刚度-时间的折线双对数回归模型<sup>[15]</sup>。

刚度-时间的双对数回归模型为

$$\lg k = a + b \lg t \tag{4}$$

式中: $a$ 和 $b$ 均为回归系数; $t$ 为恒位移加载时间,h。

图5为不同初始挠度下玻璃钢管的刚度-时间拟合曲线。



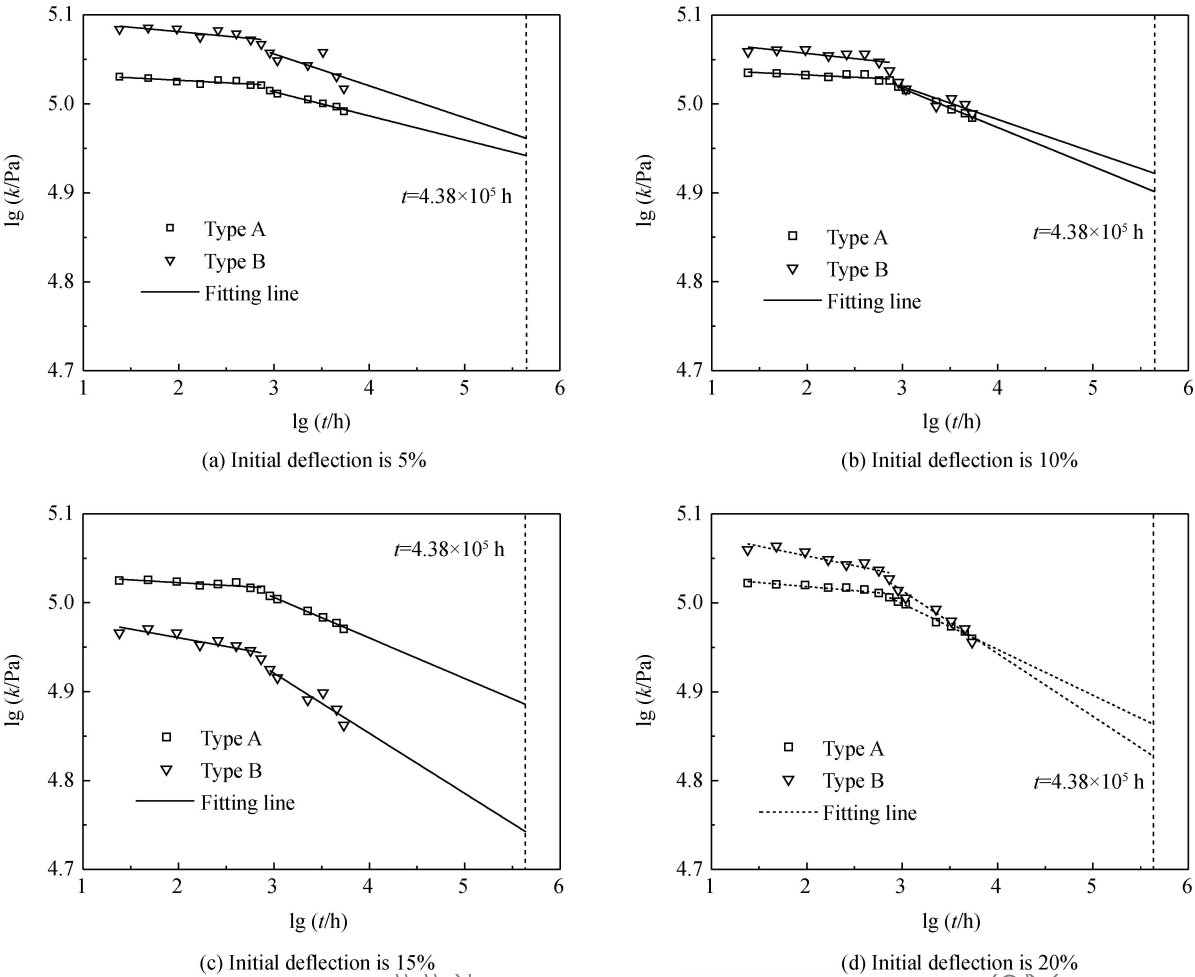


图 5 不同初始挠度下玻璃钢管的刚度-时间拟合曲线  
Fig. 5 Stiffness-time fitting lines of glass fiber reinforced plastic pipes under different initial deflections

$t \leq 1\,000$  h 时, Type A 的刚度-时间折线双对数回归方程为

$$\lg k = \begin{cases} 5.040\,8 - 0.007\,3 \lg t & w = 5\% \\ 5.047\,1 - 0.007\,4 \lg t & w = 10\% \\ 5.039\,7 - 0.008\,7 \lg t & w = 15\% \\ 5.040\,9 - 0.011\,4 \lg t & w = 20\% \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $w$  为初始挠度, %。

$1\,000 \text{ h} < t \leq 5\,400$  h 时, Type A 的刚度-时间折线双对数回归方程为

$$\lg k = \begin{cases} 5.094\,6 - 0.027\,0 \lg t & w = 5\% \\ 5.148\,8 - 0.043\,8 \lg t & w = 10\% \\ 5.143\,1 - 0.045\,7 \lg t & w = 15\% \\ 5.153\,6 - 0.051\,5 \lg t & w = 20\% \end{cases} \quad (6)$$

$t \leq 1\,000$  h 时, Type B 的刚度-时间折线双对数回归方程为

$$\lg k = \begin{cases} 5.108\,2 - 0.013\,8 \lg t & w = 5\% \\ 5.090\,8 - 0.017\,3 \lg t & w = 10\% \\ 5.008\,0 - 0.023\,9 \lg t & w = 15\% \\ 5.105\,5 - 0.026\,6 \lg t & w = 20\% \end{cases} \quad (7)$$

$1\,000 \text{ h} < t \leq 5\,400$  h 时, Type B 的刚度-时间折线双对数回归方程为

$$\lg k = \begin{cases} 5.163\,5 - 0.035\,8 \lg t & w = 5\% \\ 5.130\,0 - 0.036\,9 \lg t & w = 10\% \\ 5.123\,6 - 0.066\,6 \lg t & w = 15\% \\ 5.212\,3 - 0.066\,9 \lg t & w = 20\% \end{cases} \quad (8)$$

比较式(5)~式(8)可知,在  $0 \sim 1\,000$  h 和  $1\,000 \sim 5\,400$  h 范围内,刚度对时间的递减率随着初始挠度的增加而增大,Type B 刚度递减率的增加幅度大于 Type A。5%、15% 和 20% 初始挠度下,Type B 的刚度递减率明显大于 Type A。可见,纯环向缠绕铺层的玻璃钢管在抵抗径向变形和



刚度衰减方面明显优于纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管,这对于玻璃钢管在工程应用中的设计极为重要。

玻璃钢管 50 年后刚度降幅为

$$\delta_{k_{50}} = (k_0 - k_{50}) / k_0 \tag{9}$$

式中: $k_{50}$ 为玻璃钢管 50 年后的刚度。表 2 为玻璃钢管 50 年后刚度降幅。可以看出,不同初始挠度时 Type B 的 50 年后刚度降幅均大于 Type A,平均为 Type A 的 1.33 倍,表明纯环向缠绕玻璃钢管在恒位移加载下有很好的长期力学性能。

表 2 玻璃钢管 50 年后刚度降幅

Table 2 Stiffness degradation rates after 50 years of glass fiber reinforced plastic pipes

Initial deflection/%	Stiffness degradation rate after 50 years/%	
	Type A	Type B
5	19.49	25.74
10	25.53	28.37
15	29.15	43.53
20	32.74	44.32

2.3 初始挠度的影响

建立玻璃钢管 50 年后刚度降幅与初始挠度间的数学表达式,基于此函数关系式可以得到在任意初始挠度下玻璃钢管 50 年后的刚度,进而可求得其他力学指标,这对玻璃钢管在工程中的实际应用非常重要。

玻璃钢管 50 年后刚度降幅-初始挠度拟合曲线如图 6 所示。可见,在同一初始挠度下,Type A 的 50 年后刚度降幅明显小于 Type B;随着初始挠度的增加,同种铺层方式的玻璃钢管 50 年后刚度降

幅增加,表明加大初始挠度可增加玻璃钢管 50 年后刚度降幅。Type B 的 50 年后刚度降幅对初始挠度的增长率为 1.418,为 Type A 的 1.63 倍,表明 Type A 50 年后刚度降幅增长率约为 Type B 的一半,说明纯环向缠绕铺层能有效提高玻璃钢管的刚度,增强其抵抗径向变形的能力。

基于图 6 中的拟合曲线,给定一个具体的初始挠度就可确定在此情况下玻璃钢管 50 年后刚度降幅;相应地,给定玻璃钢管 50 年后刚度降幅的最低值,即可确定其最大初始挠度。

2.4 初始挠度和时间的综合影响

在实际工程中,通常需要同时考虑初始挠度和时间的影响,且初始挠度和时间往往与试验中的不一样,无法对每种工况组合都进行试验。因此,需推广试验结果,建立玻璃钢管长期刚度预测模型,预测玻璃钢管在任意初始挠度和时间下的刚度。

首先基于 2.3 节的试验结果,结合双对数模型并代入给定时间(5、10、...、50 年),得到玻璃钢管在不同初始挠度下的刚度;然后,将其代入式(9),即可得出玻璃钢管的刚度降幅-时间曲线,如图 7 所示。可以看出,在同一初始挠度下,随着时间的延长,刚度降幅增大;在同一时间下,随着初始挠度的增大,刚度降幅也增大;Type A 的刚度降幅增大幅度小于 Type B 的。

为估计在任意初始挠度和时间下玻璃钢管的刚度降幅,必须建立玻璃钢管刚度降幅对初始挠度和时间的数学模型。目前,国内外关于此领域的研究较少,能用来参考的经验公式也很少,Guedes 等<sup>[9]</sup>提出玻璃钢管长期性能与时间关系为二次曲线-抛物线。由 2.3 节可知,不同初始挠度下玻璃钢管刚度与时间的关系均可通过双对数回归模型拟合,即刚度与时间之间为幂函数关系,以此可推得玻璃钢管刚度降幅与时间的关系也为幂函数形式,如图 7 所示。因此,玻璃钢管刚度降幅与初始挠度、时间的关系为曲面形式。

以试验数据为基础,通过反复测试各种曲面拟合方式并根据拟合结果进行筛选,最终选用二次曲面模型拟合玻璃钢管刚度降幅与初始挠度、时间的关系:

$$\delta_k = m + nt_y + c\omega + dt_y^2 + e\omega^2 + ft_y\omega \tag{10}$$

式中: $m$ 、 $n$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  和  $f$  均为模型参数; $t_y$  为时间,

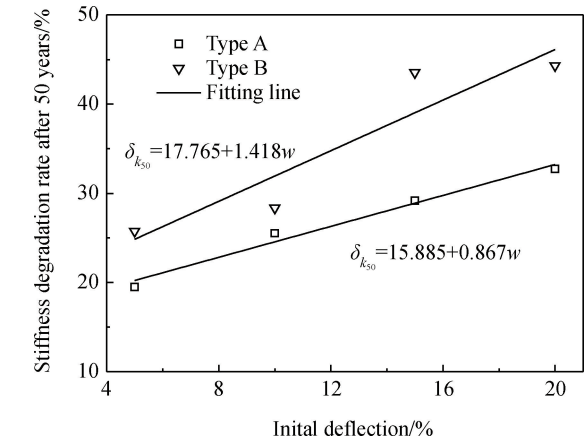


图 6 玻璃钢管 50 年后刚度降幅-初始挠度拟合曲线  
Fig. 6 Fitting lines of stiffness degradation rate after 50 years-initial deflection for glass fiber reinforced plastic pipes

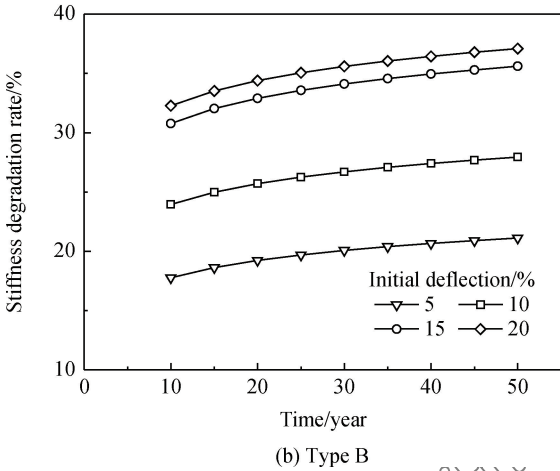
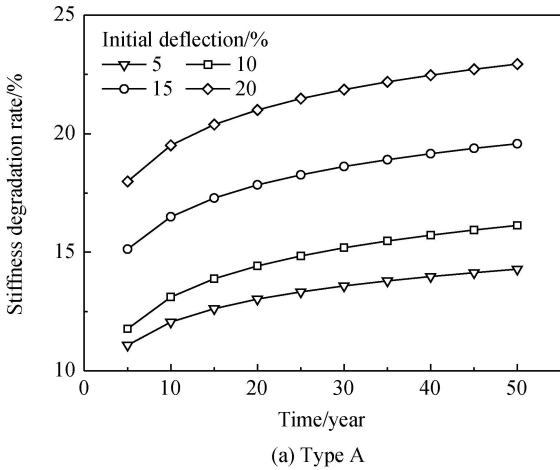


图 7 玻璃钢管的刚度降幅-时间曲线

Fig. 7 Stiffness degradation rate-time curves of glass fiber reinforced plastic pipes

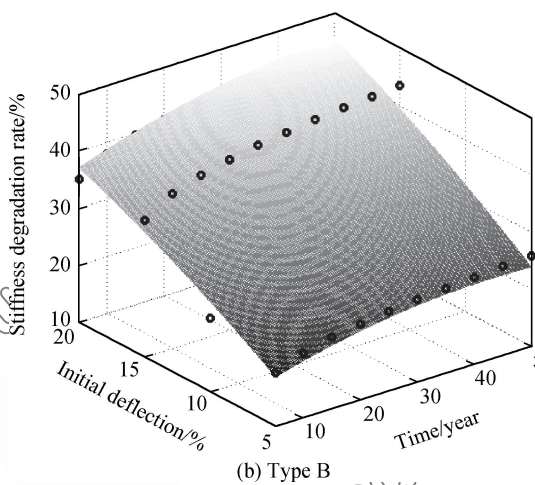
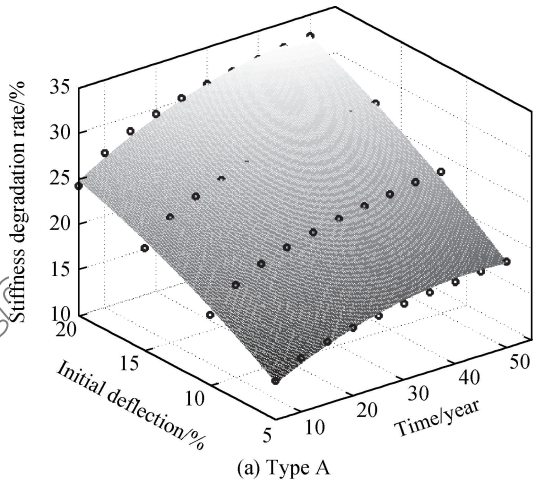


图 8 玻璃钢管刚度降幅与初始挠度、时间的关系

Fig. 8 Relationships between stiffness degradation rates and initial deflection, time of glass fiber reinforced plastic pipes

年,  $t_y = t/8\ 760$ ;  $t_y$  和  $t_y^2$ 、 $w$  和  $w^2$  项分别对应时间、初始挠度对玻璃钢管刚度降幅的影响;  $t_y w$  项对应时间和初始挠度对玻璃钢管刚度降幅的耦合影响。

以式(10)拟合图 7 中的初始挠度、时间和玻璃钢管刚度降幅, 得到玻璃钢管刚度降幅与初始挠度、时间的关系, 如图 8 所示。

Type A 刚度降幅的二次曲面拟合式为

$$\delta_k = 7.426\ 5 + 0.295\ 5t_y + 1.124\ 4w - 0.003\ 6t_y^2 - 0.017\ 4w^2 + 0.004\ 0t_y w \quad (11)$$

Type B 刚度降幅的二次曲面拟合式为

$$\delta_k = 9.305\ 0 + 0.298\ 6t_y + 1.689\ 4w - 0.003\ 8t_y^2 - 0.019\ 9w^2 + 0.004\ 9t_y w \quad (12)$$

比较式(11)和式(12)可知: 刚度降幅均随时间和初始挠度的增加而增加, 且时间和挠度的耦合项对增加长期刚度降幅起促进作用。比较式(11)和

式(12)的一次项和二次项系数可知, 二者不在一个数量级, 一次项系数明显大于二次项系数, 说明在低初始挠度条件下, 服役初期线性项占主导地位, 刚度趋向于线性衰减。对比式(11)和式(12)中  $t_y$  项、 $w$  项以及  $t_y w$  项的系数可知, 纯环向缠绕铺层时的系数均小于纯交叉缠绕铺层时的, 这也证明了纯环向缠绕铺层有助于提高玻璃钢管的抗刚度衰减性能。

为检验玻璃钢管长期刚度二次曲面模型预测结果的可靠性和准确性, 取  $t = 8\ 313.2\ \text{h}$  时玻璃钢管刚度的试验数据进行验证, 玻璃钢管的刚度试验值及预测值相对误差如表 3 所示。可以看出, 通过长期刚度预测表达式求得的刚度和试验值非常接近, 相对误差都在 8% 以内。由此可知, 所建玻璃钢管长期刚度二次曲面模型的准确度较高, 能很好地反映玻璃钢管刚度的变化趋势。

表 3 玻璃钢管的刚度试验值及预测值相对误差

Table 3 Test values and relative errors of predicted values for glass fiber reinforced plastic pipes

Initial deflection/%	Stiffness of Type A		Stiffness of Type B	
	Test value/Pa	Relative error of predicted value/%	Test value/Pa	Relative error of predicted value/%
5	97 218.74	2.32	100 620.30	2.89
10	96 006.64	1.52	92 118.53	2.79
15	92 693.54	5.17	68 931.92	7.25
20	90 510.14	3.18	86 637.35	2.46

3 结 论

(1) 在加载初期, 纯环向缠绕铺层和纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管刚度降幅较大; 随着时间的延长, 刚度降幅变小。在同等初始挠度下, 纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管刚度随时间延长的降幅明显大于纯环向缠绕铺层的玻璃钢管。

(2) 不同初始挠度下, 纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管刚度对时间的递减率大于纯环向缠绕铺层的玻璃钢管; 纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管 50 年后刚度降幅也大于纯环向缠绕铺层的玻璃钢管, 其降幅平均是纯环向缠绕铺层的玻璃钢管的 1.33 倍。

(3) 纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管 50 年后刚度降幅对初始挠度的增长率是纯环向缠绕铺层的玻璃钢管的 1.63 倍。纯环向缠绕铺层的玻璃钢管在抵抗径向变形、刚度衰减方面明显优于纯交叉缠绕铺层的玻璃钢管。如果工程上要求玻璃钢管具有较好的抗刚度衰减性, 应该选择环向缠绕铺层的玻璃钢管。

(4) 为预测玻璃钢管在任意初始挠度、时间下的管刚度降幅, 提出并建立了玻璃钢管刚度降幅关于初始挠度、时间的二次曲面预测模型, 并用时间为 8 313.2 h 试验数据对模型进行了检验, 结果表明所建模型是有效的。

参考文献:

[1] 刘洋, 董事尔, 刘倩. 玻璃钢管的应用现状及展望[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(4): 98-99.  
LIU Y, DONG S E, LIU Q. Application status and prospect of GFRP pipe[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(4): 98-99 (in Chinese).

[2] 黄宇, 刘新红. 玻璃钢管特点性能及应用[J]. 内江科技, 2007(1): 28-30.  
HUANG Y, LIU X H. The property, characteristic and application of GFRP pipe[J]. Neijiang Science and Technology, 2007(1): 28-30 (in Chinese).

[3] American Water Works Association. Fiberglass pipe design: AWWA M45—05[S]. Denver: AWWA, 2005.

[4] American Water Works Association. Fiberglass pressure pipe: AWWA C950—07[S]. Denver: AWWA, 2007.

[5] American Society for Testing Material International. Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings: ASTM D2992—12[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.

[6] American Society for Testing Material International. Standard test method for long-term ring-bending strain of “fiberglass” pipe: ASTM D5365—06[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.

[7] American Society for Testing Material International. Standard test method for chemical resistance of “fiberglass” pipe in a deflected condition: ASTM D3681—06[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.

[8] CARVALHO A. Structural life of composite pipes—A trilogy: Part 2—Weep failure[C]//2009 ACMA Conference. Arlington: American Composites Manufacturers Association, 2009: 1-14.

[9] GUEDES R M, SÁ A, FARIAS H. On the prediction of long-term creep-failure of GRP pipes in aqueous environment[J]. Polymer Composites, 2010, 31(6): 1047-1055.

[10] BODIN J M. Buried pipe life prediction in sewage type: Environment D. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

[11] FARIAS H, GUEDES R M. Long-term behaviour of GFRP pipes: Reducing the prediction test duration[J]. Polymer Testing, 2010, 29(3): 337-345.

[12] 张玉芳, 邓永容. 玻璃钢管的失效分析及失效预测技术[C]//复合材料的现状与发展——第十一届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2000: 633-637.  
ZHANG Y F, DENG Y R. Analysis and prediction of FRP tubular failure[C]// Present Situation and Development of Composite Materials—The Eleventh National Conference on Composite Materials. Beijing: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2000: 633-637 (in Chinese).

[13] 魏若齐, 王欣. 塑料管材长期性能的预测[J]. 化学建材, 1993, 9(5): 185-187.  
WEI R Q, WANG X. Prediction of long term properties of plastic piping [J]. Chemical Materials for Construction, 1993, 9(5): 185-187 (in Chinese).



- [14] 董孝理. 塑料压力管的力学破坏和对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 43-78.  
DONG X L. Plastics pressure pipe mechanical fracture and countermeasures [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 43-78 (in Chinese).
- [15] FARSHAD M. Determination of the long-term hydrostatic strength of multilayer pipes[J]. Polymer Testing, 24(8): 1041-1048.

# Measurement and prediction for long-term stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes

ZHU Sirong, LIANG Na, LI Yue, CHEN Jianzhong\*

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to establish the theoretical model for long-term stiffness of fiber reinforced plastic pipes, and predict the long-term stiffness of them, using the autonomously designed constant displacement loading test apparatus, the testing investigations for long-term stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes with of pure hoop winding and pure cross winding plies were performed under constant displacement conditions of different initial deflections firstly. Then, stiffness vs time broken line log-log regression model of glass fiber reinforced plastic pipes under different initial deflections, linear regression model of stiffness degradation rate after 50 years vs initial deflection were established based on the test, thus quadratic surfaces prediction model of glass fiber reinforced plastic pipes stiffness degradation rate vs time and initial deflection was proposed. Finally, the residual stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes after 50 years was predicted, and the effects of time and initial deflection on stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes were investigated. The results show that the ability to resist stiffness degradation of glass fiber reinforced plastic pipes with pure hoop winding ply are much more superior to that of glass fiber reinforced plastic pipes with pure cross winding ply, pure hoop winding ply can improve the stiffness of glass fiber reinforced plastic pipes and the ability to resist radial deformation of them effectively, glass fiber reinforced plastic pipes with pure hoop winding ply have better long-term mechanical performances. The test data when the time is 8 313.2 h indicates that the proposed prediction model for stiffness degradation rate of glass fiber reinforced plastic pipes has relatively high precision and relatively great applicability.

**Keywords:** glass fiber reinforced plastic pipes; stiffness; long-term prediction; double logarithmic regression model; quadric surface