

文章编号:1007-9629(2025)01-0088-07

树脂对竹纤维耐碱性和界面黏结性能的影响

朱德举^{1,2,*}, 庄晗莉^{1,2}, 杨 焱^{1,2}, 郭帅成^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:为提升竹纤维耐碱性及其在水泥基复合材料中的界面性能,研究了树脂类型对竹纤维在碱性环境中长期力学性能和界面性能的影响.结果表明:经过环氧树脂、乙烯基树脂和呋喃树脂浸渍后,竹纤维的抗拉强度分别增长了 132.42%、36.96% 和 30.60%;在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中浸泡 60 d 后,3 种竹纤维的抗拉强度保有率分别为 55.91%、59.71% 和 29.49%;与未浸渍树脂竹纤维相比,浸渍树脂竹纤维与基体的黏结强度分别提升了 4.62、3.47、1.87 倍,乙烯基树脂对竹纤维耐碱性的提升效果最为显著.

关键词:竹纤维;黏结性能;抗拉强度;耐碱性;树脂浸渍

中图分类号:TU599

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.01.012

Effect of Resins on Alkali Resistance and Interfacial Bonding Properties of Bamboo Fibers

ZHU Deju^{1,2,*}, ZHUANG Hanli^{1,2}, YANG Ting^{1,2}, GUO Shuaicheng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to improve the alkali resistance and interfacial properties of bamboo fibers in cementitious composites, the influence of resin type on the long-term mechanical in alkaline environment and interfacial properties of bamboo fibers were investigated. The results show that after impregnation with epoxy, vinyl resins and furan, the tensile strength of bamboo fibers increases by 132.42%, 36.96% and 30.60%, respectively. The tensile strength retention of the three type fibers after 60 days of immersion in calcium hydroxide solution is 55.91%, 59.71% and 29.49%, respectively. And the corresponding bond strength to the cementitious matrix is improved by 4.62, 3.47 and 1.87 times compared to the fibers without resin impregnation, respectively. The fibers treated with vinyl resin have the best alkali resistance.

Key words: bamboo fiber; adhesive performance; tensile strength; alkali resistance; resin treatment

竹纤维的抗拉强度和模量分别可达 600 MPa 和 46 GPa^[1-2],已经被广泛应用于复合材料领域^[3-8].纤维与基体的有效黏结是竹纤维增强水泥基复合材料发挥协同作用的重要前提^[9].Hong 等^[10]和 Li 等^[11]发现,竹纤维在碱性环境中易发生化学侵蚀和纤维矿化等

反应,从而导致其性能下降.同时,竹纤维表面存在大量亲水基团,将导致其体积稳定性降低,影响竹纤维与基体间的黏结性能^[2].Zhang 等^[12]和徐灿等^[13]研究发现,树脂浸渍可以减缓竹纤维的水解,提升竹纤维的长期力学性能和耐碱性.经过树脂浸渍处理后,

收稿日期:2023-12-29; 修订日期:2024-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208246, U22A20122);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40142);长沙市自然科学基金资助项目(kq2202160);中央高校基本科研业务费(531118010493)

第一作者(通讯作者):朱德举(1978—),男,山东济宁人,湖南大学教授,博士生导师,博士. E-mail:dzhu@hnu.edu.cn

竹纤维的水解有所减缓,质量损失率明显降低,纤维表面与纤维间隙的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉积量明显减少,其力学性能得到一定程度的提高^[2].目前,对于竹纤维的研究主要集中在树脂基复合材料方面^[14-17],水泥基复合材料方面的研究相对较少,同时缺乏有效的纤维耐碱性提升方法.在植物学领域中,已有大量学者基于 NaOH 溶液对竹纤维的力学性能影响进行了试验研究^[2, 18-20],关于水泥水化过程中产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的研究则相对较少.

针对上述问题,本研究采用环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂对竹纤维进行浸渍处理,研究了不同树脂处理后竹纤维束在碱溶液中力学性能的变化规

律,以比较不同树脂浸渍处理方式对竹纤维耐碱性的影响;同时,测试了树脂处理后竹纤维及其与基体间的界面黏结性能,研究结果可以为竹纤维增强水泥基材料的耐碱性设计提供参考依据.

1 试验

1.1 原材料与配合比

竹纤维由机械法提取,产自福州竹纤材料科技有限公司;环氧树脂(JN-LS)产自湖南固特邦土木技术发展有限公司;乙烯基树脂(CHEMPULSE-901)产自上纬精细化工有限公司;呋喃树脂(GM-2)产自无锡线广化工原料有限公司.树脂的物理力学性能如表1所示.

表1 树脂的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of resins

Type	Initial viscosity after mixing/ (mPa·s)	Tensile strength/MPa	Breaking elongation/%	$m(\text{resin}):m(\text{curing agent}):m(\text{accelerator})$
JN-LS	70	46	8	100.0:40.0:0
CHEMPULSE 901	350±100	76-90	5-6	100.0:1.2:0.2
GM-2	200±100	5-15	3-4	100.0:2.0:0

普通P·O 42.5硅酸盐水泥,产自湖南南方水泥有限公司;粉煤灰,产自巩义市元亨净水材料厂;标准砂,产自厦门艾思欧标准砂有限公司.基体材料的配比为 $m(\text{水泥}):m(\text{标准砂}):m(\text{粉煤灰})=43:45:12$,水灰比(质量比,文中涉及的水灰比、含水率等除特别说明外均为质量比或质量分数)为0.47.

1.2 试验方法

1.2.1 竹纤维抗拉强度试验

在对竹纤维进行树脂浸渍处理前,先对纤维进行梳理、清洗与干燥.由于长纤维运输后易抱团,且于机械提取过程中产生的纤维末梢毛羽、截面积沿长度方向发生变化等现象均会对纤维截面积观测产生影响,因此采用“三段法”来确定竹纤维截面积,具体过程如下:

首先,假设竹纤维截面积沿拉伸测试长度方向的变化在一定长度范围内极小,在该测试长度范围内对纤维进行三等分;然后,分段测量截面积;最后,取该长度范围内的平均截面积用于计算其抗拉强度^[21].

树脂浸渍采用常压与真空2种方式.具体过程如下:

首先,将上述处理后的纤维置于恒温鼓风干燥箱,并在35℃条件下烘干处理5 h,以确保其含水率降至5%以下;随后,为保证树脂厚度沿纤维长度方向相对均匀,将纤维浸泡于调配好的树脂中1 min;然后,将纤维取出后用上下2层油纸包裹并使用滚筒施

加水平向压力进行抹平,将多余树脂黏附于油纸上,真空浸渍组则置于真空浸渍罐中处理10 min;最后,浸渍完成后的常压组和真空组纤维样品均置于风干架上固化24 h.

利用3种树脂分别对未经处理的竹纤维试件进行浸渍,浸渍后分别编号“UB(未处理竹纤维试件)”、“FB(呋喃树脂浸渍后的竹纤维试件)”、“RB(环氧树脂浸渍后的竹纤维试件)”和“VB(乙烯基树脂浸渍后的竹纤维试件)”.

参考GB/T 35378—2017《植物单根纤维拉伸力学性能测试方法》,采用美国产MTS C43.304型万能试验机,对竹纤维试件进行准静态抗拉强度测试,标距为15 cm.为消除直接使用夹具夹紧纤维加载产生的应力集中和纤维与夹具间产生的滑移,采用槽型纸质夹具,于纸片两端涂附环氧树脂,待试件于拉力机上安装完成后,再将纤维两侧纸片剪去^[18],如图1所示.采用位移控制加载程序,采样频率为20 Hz,试件加载速率为0.1 mm/min.鉴于竹纤维试验结果的离散性较大,每组选取12个试样进行测试,结果取其平均值.

1.2.2 竹纤维耐碱性测试

20℃时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在水中的溶解度仅为0.173 g,且溶解度随着温度的升高逐渐降低. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 属于强电解质,在水溶液中能完全电离出 OH^- .因此,可以根据溶液浓度确定 OH^- 浓度,进而求得溶液的pH值.

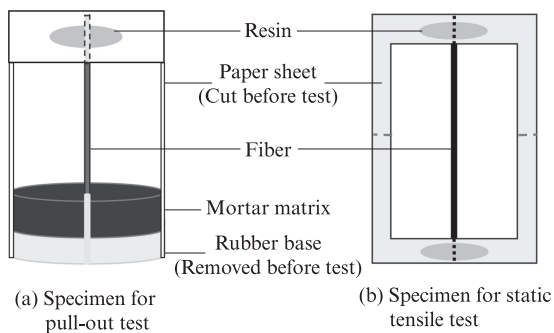


图1 竹纤维拉拔试件和静态抗拉强度测试试件
Fig. 1 Bamboo fiber specimens for pull-out test and static tensile test

$$\text{pH} = -\lg \frac{k_w}{n \cdot c} \quad (1)$$

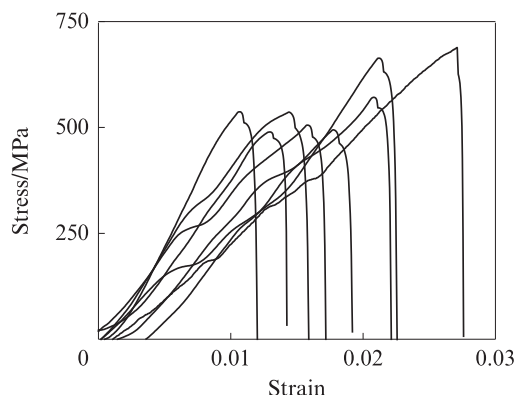
式中: k_w 为水的离子积常数, 室温下取 1×10^{-14} ; n 为多元碱元数; c 为溶液的浓度, mol/L.

由式(1)确定饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液 (20°C) 的理论 pH 值为 12.7. 调配 pH 值为 12.7 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液对 4 组竹纤维试件进行浸泡. 为保证溶液环境的稳定, 浸泡处理置于密闭环境中进行, 且定期采用雷磁 S-3C 型 pH 计测定溶液的 pH 值. 浸泡 7、28、60 d 后取出 4 组纤维, 用缓流清水冲洗, 然后置于室温环境中进行为期 1 d 的干燥处理, 最后粘贴纸质夹具并进行力学性能测试.

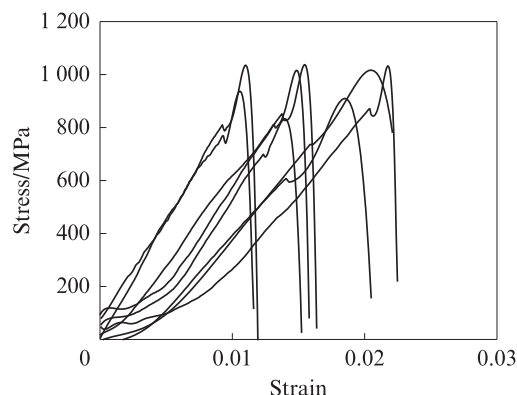
表2 试件的力学性能
Table 2 Mechanical properties of specimens

Specimen	Sectional area $\times 10^{-3}/\mu\text{m}^2$	Tensile strength/MPa	Ultimate strain	Elastic modulus/GPa
UB	22.24(0.14)	439.18(6.66)	0.025 1(6.72)	18.92
FB	22.84(0.14)	573.56(8.69)	0.027 6(0.04)	19.66
RB	30.77(0.33)	1 020.73(2.85)	0.027 6(13.57)	38.71
VB	26.35(0.23)	601.52(11.59)	0.028 7(7.89)	23.36

Note: The value in parenthesis, both for sectional area, tensile strength and ultimate strain column, are the coefficient of variation.



(a) Atmospheric pressure environment



(b) Vacuum environment

图2 乙烯基树脂浸渍竹纤维的拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of bamboo fibers after treated by vinyl resin impregnation

1.2.3 竹纤维拔出试验

竹纤维与基体界面黏结性能参考常用纤维单面拔出试验^[22], 采用美国产 MTS C43.304 型万能试验机进行试验, 加载速率为 0.1 mm/min . 在进行拔出试验前, 先将树脂浸渍后的竹纤维置于室温环境下充分干燥 1 d 后, 在纤维自由端粘贴纸质夹具以便后续测试. 竹纤维拉拔试件使用的水泥基体配比如 1.1 所示, 控制纤维埋置深度为 5 mm.

1.2.4 竹纤维形貌观测试验

使用日本产 OLYMPUS SZ2-1LST 型体视显微镜, 对竹纤维试件断面、树脂浸渍处理后的复合竹纤维与水泥基体间的界面进行观察. 同时, 使用日立分析仪器有限公司产 MIRA4 LMH 型扫描电镜 (SEM) 对树脂浸渍处理后的复合竹纤维表面进行观测.

2 结果与分析

2.1 竹纤维耐碱性

表 2 为试件的力学性能. 图 2 为乙烯基树脂浸渍竹纤维的拉伸应力-应变曲线. 由表 2 和图 2 可知:

(1) 进行树脂浸渍后, 竹纤维的抗拉强度可提升约 0.31~1.32 倍, 且在真空条件下浸渍后, 抗拉强度的提升幅度约为常压条件下的 1.10 倍. 因此, 后续采用真空法对竹纤维进行树脂浸渍处理.

(2)环氧树脂对竹纤维力学性能的提升效果最佳,乙烯基树脂次之,呋喃树脂对竹纤维的增强效果相对较弱.相应树脂浸渍后竹纤维试件抗拉强度的增长率分别为132.42%、36.96%和30.60%.

对于碱溶液中浸泡不同时间的竹纤维进行静态拉伸测试,结果如表3所示,表中括号内数值为变异系数.由表3可见:

(1)随着浸泡时间的延长,纤维素开始水解,在60 d时部分竹纤维水解成丝绒状.未处理竹纤维在碱溶液浸泡7 d后的抗拉强度出现增长.这主要是由于木质素等胶质成分的水解,导致竹纤维截面积减小和主要受力组分纤维素的体积比例提升.环氧树脂和乙烯基树脂于高碱度溶液环境中会发生水解反应,且环氧树脂水解程度较大^[23].因此,竹纤维在经过环氧树脂浸渍后,抗拉强度有了显著的提高,碱溶液浸泡7 d后的强度保有率达到了61.45%.随着碱溶液浸泡时间的延长,试件RB的力学性能发生了明显的下降.碱溶液浸泡28 d后,试件RB的抗拉强度保有

率仅为43.50%;碱溶液浸泡60 d后,试件RB的抗拉强度低于试件UB,抗拉强度保有率为29.49%.随着在碱溶液中浸泡时间的延长,试件VB力学性能的下降速率逐渐减缓.碱溶液浸泡60 d后,其抗拉强度仍然是4组中最优的,抗拉强度保有率达到了59.71%.

(2)碱溶液浸泡7 d时,试件FB的抗拉强度出现了明显的下降.这是因为GM-2型呋喃树脂是一种低黏度糠醇糠醛型树脂,所使用固化剂呈酸性.而在酸性环境下,竹纤维中的羟基会被氢离子取代生成羟离子.因此,在呋喃树脂浸渍处理前期,试件FB受到固化剂的酸性腐蚀程度大于树脂对力学性能的提升效果,这导致试件FB的抗拉强度大幅度下降.然而,随着碱溶液浸泡时间的延长,酸性腐蚀逐渐趋于稳定,树脂涂层的增强与保护效果占主导作用.在浸泡28 d后,试件FB力学性能的提升幅度超过了酸性腐蚀.并且,呋喃树脂完全固化后分子链由亚甲基与呋喃环组成,化学稳定性较高^[24-25].因此,碱溶液浸泡60 d后,试件FB的抗拉强度保有率仍可达55.91%.

表3 Ca(OH)₂浸泡下树脂浸渍纤维的抗拉强度
Table 3 Tensile strength of bamboo fibers treated by resin in Ca(OH)₂

Specimen	0 d	7 d	28 d	60 d
UB	482.24(35.95)	536.38(43.02)	363.02(46.34)	333.97(27.10)
FB	604.00(57.50)	428.14(91.13)	547.63(58.19)	337.72(62.99)
RB	959.40(31.67)	589.56(64.31)	417.38(48.77)	282.95(48.28)
VB	608.19(105.66)	642.25(40.26)	490.96(90.71)	363.16(32.86)

2.2 竹纤维与水泥基体界面黏结性能研究

为研究3种树脂浸渍后竹纤维与水泥基体的黏结强度,采用单面拔出试验.其中,为避免竹纤维受力时黏结应力沿受力方向不均匀,采用等效黏结强度(τ_m)进行计算:

$$\tau_m = \frac{F_{\max}}{CL} \quad (2)$$

式中: $F_{\max}$ 为极限拉拔力,N; C 为纤维截面周长,mm; L 为纤维埋置深度,mm.

由于拉拔试验对竹纤维的完整性要求较高,无法对竹纤维进行切片截面观测.在对竹纤维力学性能测试结果进行分析后可知,在“三点测试法”的基础上可将竹纤维界面近似圆形进行计算截面积,因此竹纤维截面周长通过近似后的截面积换算得到.

表4为不同树脂浸渍竹纤维的拉拔力学性能,表中括号内数值为变异系数.图3为树脂浸渍后竹纤维单面拔出试验黏结应力-滑移曲线.由于未处理竹纤维与水泥基体之间的黏结应力较弱,只捕捉到其峰值应力,因此于图3中未明确标出.从图3可以看出:

(1)3种树脂均能显著提升竹纤维的极限拉拔应

力.也就是说,3种树脂浸渍均能有效改善竹纤维与水泥基体间的黏结性能.试件RB和VB于水泥基体中发生水解反应后,表面粗糙度增大,与基体的黏结性能略优于试件FB.

(2)环氧树脂浸渍后,试件RB的极限拉拔力提升效果最为显著,黏结强度可达2.64 MPa,黏结强度提升了4.62倍.当使用乙烯基树脂和呋喃树脂浸渍后,试件VB和FB与基体的黏结强度分别为2.10、1.35 MPa.与试件UB相比,其与基体的黏结强度分别提升了3.47倍和1.87倍.

影响竹纤维试件拔出破坏模式的因素主要可归

表4 不同树脂浸渍竹纤维的拉拔力学性能
Table 4 Pull-out properties of bamboo fibers treated by different resins

Specimen	Pull-out stiffness/ (N·mm ⁻¹)	Ultimate pull-out force/N	τ_m /MPa
UB	6.97(4.18)	2.24(0.66)	0.47(0.11)
FB	13.79(10.41)	7.12(3.46)	1.35(0.75)
RB	12.46(5.49)	10.75(4.36)	2.64(1.05)
VB	9.53(5.16)	8.86(6.65)	2.10(1.94)

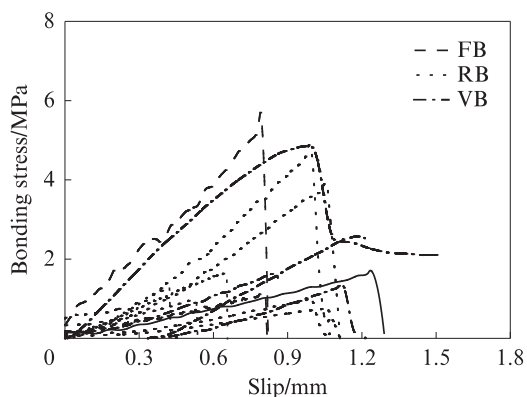


图3 竹纤维黏结应力-滑移曲线

Fig. 3 Bonding stress-slip curves of bamboo fibers

结为试件与水泥基体的黏结性能和竹纤维自身抗拉强度两方面.朱德举等^[22]发现,纤维黏结应力达到黏结强度峰值后随即发生脱黏.纤维脱黏、发生整体滑移后,纤维表面摩擦受损,且受损程度随着拔出过程的进行不断扩大,部分纤维试件迅速断裂.纤维经树脂浸渍后,沿受力方向仍存在部分缺陷,因此在拔出过程中出现应力集中现象.当基体黏结失效,达到黏

结强度峰值后,纤维表面摩擦受损,纤维发生滑移后迅速断裂.使用乙烯基树脂浸渍后,纤维的黏结应力-滑移曲线出现了滑移段,表明乙烯基树脂浸渍后竹纤维完整性较好,在与基体脱黏时受损程度较弱,竹纤维承受拉力时产生滑移.与未处理竹纤维相比,其与水泥基体的黏结强度提升了3.47倍.

2.3 竹纤维微观形貌研究

未进行树脂处理的竹纤维经碱溶液浸泡后的微观结构形貌如图4所示.树脂浸渍竹纤维经碱溶液浸泡后的微观结构形貌如图5所示.由图4、5可以看出:

(1)未进行任何树脂浸渍的竹纤维束在碱溶液浸泡后,外表面出现不同程度的化学腐蚀,出现了“毛羽现象”,介质细胞被剥离,包裹在内的竹纤维丝露出.当竹纤维经碱溶液浸泡后,除了纤维素以外,竹材的其他化学成分,如半纤维素、木质素、果胶等胶质成分会全部或部分脱除^[2],这导致纤维截面积变小,这解释了图3中竹原纤维应力随着碱溶液浸泡时间增长而明显下降的现象.

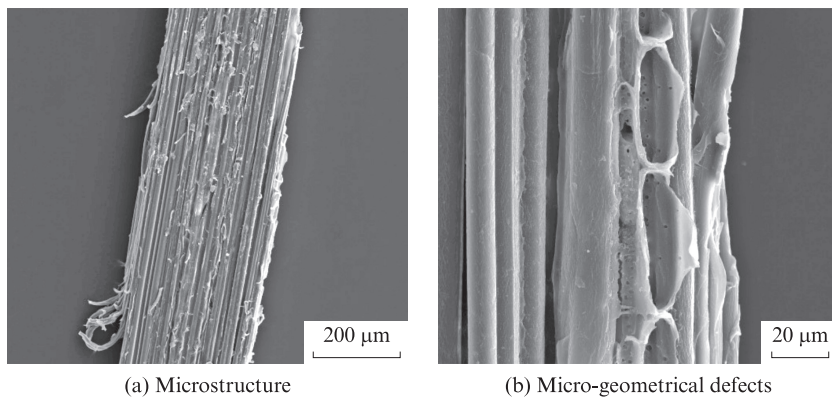


图4 未处理竹纤维经碱溶液浸泡后微观结构形貌

Fig. 4 Microstructural morphology of untreated bamboo fibers after immersion in alkaline solution

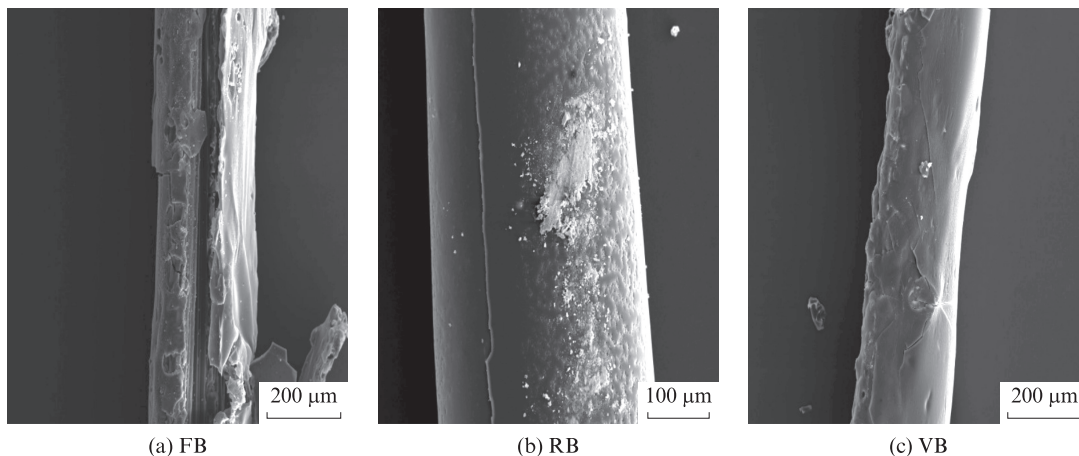


图5 不同树脂浸渍后竹纤维经碱溶液浸泡后的微观结构形貌

Fig. 5 Microstructural morphology of bamboo fibers after treated by different resins then immersed in alkaline solution

(2)树脂有效地填充了纤维表面存在的几何缺陷,在一定程度上避免了因表面缺陷导致竹纤维试件出现应力集中现象而过早失效,从而有助于提高竹纤维的力学性能.树脂可在竹纤维表面固化形成保护壳,并在一定程度上渗透到竹纤维内部,填充竹纤维空隙.此外,树脂还能填充竹纤维表面因机械提取产生的缺陷,从而提高竹纤维的拉伸性能.然而,由于竹纤维的细胞腔及细胞壁空隙相对较小,低黏度水性环氧树脂很难渗透到竹纤维内部,竹纤维内部仍存有大量缝隙.

在碱溶液浸泡后,树脂层表面因碱溶液腐蚀而出现微孔,静态拉伸过程中微裂纹进一步扩大,树脂保护作用减弱,如图6所示.这导致了在使用环氧树脂浸渍后,竹纤维抗拉强度短时间内虽有大幅提升,但在碱溶液浸泡28 d后,树脂表面龟裂而导致保护作用下降,抗拉强度下降70%,竹纤维达到极限抗拉强度后立即断裂,且在碱溶液浸泡60 d后,抗拉强度不足450 MPa,对竹纤维拉伸性能提高幅度有限^[26].在使用流动性较好的呋喃树脂和乙烯基树脂对竹纤维进行浸渍后,竹纤维外部机械损伤及内部缺陷同时被填充修复,拉伸强度提升效果明显,且随着碱溶液浸泡时间的延长,试件抗拉强度的下降速率趋缓.

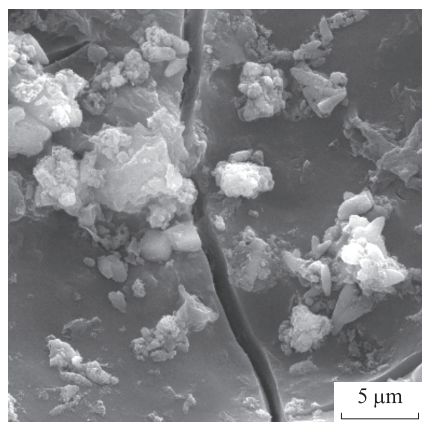


图6 碱溶液浸泡后环氧树脂表面微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of epoxy resin surface after immersion in alkaline solution

3 结论

(1)环氧树脂浸渍处理对于竹纤维力学性能的提升效果最为显著,其次为乙烯基树脂和呋喃树脂.经环氧树脂、乙烯基树脂和呋喃树脂浸渍后,竹纤维抗拉强度的增长率分别为132.42%、36.96%和30.60%.

(2)乙烯基树脂浸渍处理对竹纤维耐碱性的提升效果最为显著,优于呋喃树脂和环氧树脂.在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸泡60 d后三者的抗拉强度保有率分

别为59.71%、55.91%和29.49%.

(3)环氧树脂对于竹纤维与水泥基体间的界面黏结强度的改善效果最为显著,其次为乙烯基树脂和呋喃树脂,三者竹纤维与基体的黏结强度分别为2.64、2.10、1.35 MPa,相比未浸渍树脂竹纤维与基体的黏结强度分别提升了4.62、3.47、1.87倍.

参考文献:

- [1] RAMAGE M H, BURRIDGE H, BUSSE-WICHER M, et al. The wood from the trees: The use of timber in construction[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 333-359.
- [2] GAO X, ZHU D J, FAN S T, et al. Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19:1162-1190.
- [3] XU Z J, LIANG Y Y, MA X, et al. Recyclable thermoset hyperbranched polymers containing reversible hexahydro-s-triazine[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(1):29-34.
- [4] 张杰, 黄斐, 刘文地, 等. 改性竹纤维加气混凝土的制备与界面特性[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7):686-692.
ZHANG Jie, HUANG Fei, LIU Wendi, et al. Preparation and Interfacial characteristics of modified bamboo fibers reinforced autoclaved aerated concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):686-692. (in Chinese)
- [5] 曾晓东, 尹健, 黄中怡, 等. 改性竹纤维增强水泥基复合材料的力学特性[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3):244-250.
ZENG Xiaodong, YI Jian, HUANG Zhongyi, et al. Mechanical properties of modified bamboo fiber reinforced cement matrix composites[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3): 244-250. (in Chinese)
- [6] 杨政险, 李慷, 张勇, 等. 天然植物纤维预处理方法对水泥基复合材料性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 522-532.
YANG Zhengxian, LI Kang, ZHANG Yong, et al. Effect of pretreatment method of natural plant fibers on properties of cement-based materials—A short review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2):522-532. (in Chinese)
- [7] 赵丽, 李书进, 宋杨, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10):1021-1026.
ZHAO Li, LI Shujin, SONG Yang, et al. State-of-art of natural fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1021-1026. (in Chinese)
- [8] 李玉顺, 张秀华, 吴培增, 等. 重组竹在长期荷载作用下的蠕变行为[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):65-71.
LI Yushun, ZHANG Xiuhua, WU Peizeng, et al. Creep behavior of bamboo scrimber under long term load[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):65-71. (in Chinese)
- [9] BIAN F Y, ZHONG Z K, ZHANG X P, et al. Bamboo—An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Chemosphere, 2020, 246:125750.
- [10] HONG C K, LI H T, XIONG Z H, et al. Review of connections

- for engineered bamboo structures [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30:101324.
- [11] LI Z H, CHEN C J, XIE H, et al. Sustainable high-strength macrofibres extracted from natural bamboo [J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(3):235-244.
- [12] ZHANG Y, HUANG X A, YU Y, et al. Effects of internal structure and chemical compositions on the hygroscopic property of bamboo fiber reinforced composites [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 492:936-943.
- [13] 徐灿, 陆继倾, 白天, 等. 纳米SiO₂改性竹纤维/乙烯基树脂复合材料界面相容性[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9):2768-2778. XU Can, LU Jiqing, BAI Tian, et al. Study on interfacial compatibility of nano-SiO₂ modified bamboo fiber/vinyl ester resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 2768-2778. (in Chinese)
- [14] RAHMAN M Z, JAYARAMAN K, MACE B R. Influence of damping on the bending and twisting modes of flax fibre-reinforced polypropylene composite [J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(2):375-382.
- [15] HUANG J K, YOUNG W B. The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber reinforced epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 272-283.
- [16] SHI J J, ZHONG T H, XU X, et al. Eco-friendly and special-shaped bamboo binderless fiberboards fabricated by self-bonding technology: Effect of bamboo fibers with different sizes[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194:116300.
- [17] 王翠翠, 王朔, 张双保, 等. 纳米增强竹浆纤维/环氧树脂复合材料的热解动力学[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 314-319, 334. WANG Cuicui, WANG Shuo, ZHANG Shuangbao, et al. Pyrolysis kinetics of bamboo pulp fiber reinforced epoxy resin composites treated by nano particles [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2):314-319, 334. (in Chinese)
- [18] KAIMA J, PREECHAWUTTIPONG I, PEYROUX R, et al. Experimental investigation of alkaline treatment processes (NaOH, KOH and ash) on tensile strength of the bamboo fiber bundle[Z]. Ithaca: Cornell University Library, 2023.
- [19] SANCHEZ-ECHEVERRI L A, MEDINA-PERILLA J A, GANJIAN E. Nonconventional Ca(OH)₂ treatment of bamboo for the reinforcement of cement composites[J]. *Materials*, 2020, 13(8):1892.
- [20] AKINYEMI A B, OMONIYI E T, ONUZULIKE G. Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118405.
- [21] 朱德举, 火兴斐. 黄麻纤维束力学性能的尺寸和应变率效应[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2):446-455. ZHU Deju, HUO Xingfei. Effect of gauge length and strain rate on tensile behavior of jute yarns [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(2):446-455. (in Chinese)
- [22] 朱德举, 火兴斐. 埋置深度对黄麻纤维束与水泥基体粘结性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(2):460-467. ZHU Deju, HUO Xingfei. Effect of embedded depth on bond property between jute yarn and cement matrix [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(2):460-467. (in Chinese)
- [23] GUO X K, XIONG C S, JIN Z Q, et al. A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sea sand concrete environmental effects[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 58:105038.
- [24] IPAKCHI H, SHEGEFT A, REZADOUST A M, et al. Bio-resourced furan resin as a sustainable alternative to petroleum-based phenolic resin for making GFR polymer composites[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2020, 29(4):287-299.
- [25] DE VERGARA U L, SARRIONANDIA M, GONDRA K, et al. Polymerization and curing kinetics of furan resins under conventional and microwave heating[J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 581:92-99.
- [26] 施江靖, 陈红, 张文福, 等. 基于真空辅助树脂传递模塑成型不同纤维形态竹纤维复合材料性能研究[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(6):2930-2940. SHI Jiangjing, CHEN Hong, ZHANG Wenfu, et al. Study on properties of bamboo fiber composites with different fiber morphologies based on VARTM [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6):2930-2940. (in Chinese)

(上接第87页)

- [11] 孙国凤. 高岭石、伊利石和蒙脱石三种黏土矿物在烧结黏土制品生产中相关性能的差异(第一部分)[J]. *砖瓦*, 2015(2):60-63. SUN Guofeng. Difference of related performance of kaolinite, illite and montmorillonite in manufacturing fired clay products (Part 1)[J]. *Brick and Tile*, 2015(2):60-63. (in Chinese)
- [12] 孙国凤. 高岭石、伊利石和蒙脱石三种黏土矿物在烧结黏土制品生产中相关性能的差异(第二部分)[J]. *砖瓦*, 2015(6): 62-67. SUN Guofeng. Difference of related performance of kaolinite, illite and montmorillonite in manufacturing fired clay products (Part 2)[J]. *Brick and Tile*, 2015(6):62-67. (in Chinese)
- [13] SOKOLAR R, NGUYEN M. Sintering of anorthite ceramic body based on interstratified illite-smectite clay [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(21):31783-31789.
- [14] 高衡, 孙升, 金普军. 西安城墙明代“前街”字砖材料成分、结构与性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):122-127, 155. GAO Heng, SUN Sheng, JIN Pujun. Composition, structure and properties of the Ming Dynasty brick engraved with Qianwei used in Xi'an circumvallation [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):122-127, 155. (in Chinese)