

文章编号:1007-9629(2023)11-1166-07

# 苧麻纤维增强硫铝酸盐水泥基材料的 力学性能与体积变形

廖宜顺<sup>1,2,3,\*</sup>, 陈佳文<sup>1</sup>, 张天潇<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 武汉科技大学 高性能工程结构研究院, 湖北 武汉 430065; 3. 武汉科技大学 城市更新湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430065)

**摘要:**通过抗折强度、抗压强度、界面弯拉强度、体积变形以及红外光谱测试,研究了苧麻纤维(RF)掺量对硫铝酸盐水泥基材料力学性能与体积变形的影响.结果表明:随着RF掺量(体积分数,下同)的增加,硫铝酸盐水泥净浆的抗折强度和抗压强度均呈现先增加后减小的趋势,并且在纤维掺量为0.50%时同时达到峰值;在约束条件下,掺入RF对硫铝酸盐水泥净浆界面弯拉强度的提升幅度较大,纤维掺量为0.75%试样的28d界面弯拉强度较无约束条件下提高了31.82%;RF的掺入显著增加了硫铝酸盐水泥净浆的膨胀量,其自生变形和干燥变形均随着RF掺量的增加逐渐增大;改性后的RF可以在硫铝酸盐水泥基材料的碱性环境中稳定发挥作用,提高试样的整体强度.

**关键词:**苧麻纤维;硫铝酸盐水泥;抗折强度;抗压强度;界面弯拉强度;体积变形

中图分类号:TU502.6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.004

## Mechanical Properties and Volumetric Deformation of Ramie Fiber Reinforced Calcium Sulfoaluminate Cement-Based Materials

LIAO Yishun<sup>1,2,3,\*</sup>, CHEN Jiawen<sup>1</sup>, ZHANG Tianxiao<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Institute of High-Performance Engineering Structure, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** The evolution of the mechanical properties and volumetric deformation of calcium sulfoaluminate cement-based materials with different contents of ramie fiber (RF) was studied through the flexural strength, compressive strength, interfacial flexural-tensile strength, volumetric deformation and infrared spectroscopy analysis. The results show that the flexural strength and compressive strength of calcium sulfoaluminate cement pastes increase first and then decrease with the increase of RF contents (volume fraction, same as follow), and reaches their peak values when the fiber content is 0.50%. Under constraint conditions, the addition of RF greatly improves the interfacial flexural tensile-strength of cement paste. At 28 days, the interfacial flexural-tensile strength with a fiber content of 0.75% is increased by 31.82% compared to the unconstrained specimen. The expansion of cement paste is increased by RF addition, and its autogenous deformation and drying deformation both grow with the increase of RF. The modified RF can play a stable role in the alkaline condition of cement-based materials, and improve the overall strength of the sample.

**Key words:** ramie fiber; calcium sulfoaluminate cement; flexural strength; compressive strength; interfacial flexural-tensile strength; volumetric deformation

收稿日期:2023-03-18; 修订日期:2023-04-17

基金项目:湖北省建设科技计划项目(厅头[2021]2075号-38);国家自然科学基金资助项目(51608402)

第一作者(通讯作者):廖宜顺(1984—),男,湖北江陵人,武汉科技大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: liaoyishun@wust.edu.cn

目前,中国对性能优异、成本低廉的修补材料需求较大.无机类修补材料包括硫铝酸盐水泥(CSA)、磷酸盐水泥、铝酸盐水泥等快硬早强型水泥材料,其相较于有机类修补材料如环氧树脂、沥青等具有成本低、相容性好等优点<sup>[1]</sup>.其中,硫铝酸盐水泥具有快硬早强、节能和低碳等显著优势,但同时也存在韧性低、黏结性较差等缺陷<sup>[2]</sup>,限制了其使用范围.在基体中掺加合适的纤维则可以有效改善上述缺陷.

近年来,天然、可再生的植物纤维作为修补材料增强体的研究引起了诸多讨论.Liu等<sup>[3]</sup>研究发现,竹纤维对沥青材料的韧性和稳定性有明显的改善.Suriyaprakash等<sup>[4]</sup>研究发现,苧麻纤维(RF)与环氧树脂复合材料的相容性较好,且随着纤维掺量的增加,复合材料的力学性能有所提高.

目前,研究植物纤维对有机类修补材料性能的影响较多,而对掺入无机类修补材料的研究相对较少.植物纤维中苧麻纤维是一种纤维素含量极高的天然纤维,相比于其他植物纤维具有弹性模量高、密度低等优点<sup>[5]</sup>.已有研究表明<sup>[6]</sup>,苧麻纤维可以大幅提高复合材料的韧性和耐久性能.

鉴于此,本文提出了一种以硫铝酸盐水泥为主体的硫铝酸盐水泥-磷建筑石膏-硅灰三元体系修补材料,同时加入苧麻纤维作为增强体.为改善苧麻纤维与水泥浆体的界面特性,采用NaOH溶液对RF表面

进行改性.通过研究不同掺量(体积分数)的苧麻纤维对硫铝酸盐水泥基材料抗折强度、抗压强度、界面弯拉强度及体积变形的影响规律,同时结合傅里叶红外光谱(FTIR)分析,探究了苧麻纤维的最佳掺量,研究结果可以为研制新型环保修补材料提供参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

硫铝酸盐水泥(CSA)为42.5级快硬水泥,产自宣城安达特种水泥有限公司;磷建筑石膏(CPG)产自湖北楚星化工股份有限公司,pH值为5.6;硅灰(SF)采用四川朗天高密硅灰.胶凝材料的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)如表1所示.硝酸钙(CN)产自四川什邡德美实业有限公司,Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O含量大于99%;生石灰(CaO)产自贵州鸿运商贸服务有限公司,CaO含量大于99%;硫酸钠(NS)为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司生产;减水剂为聚羧酸减水剂(PCE),减水率35%;羟丙基甲基纤维素(HPMC)黏度为100 000 mPa·s;硬脂酸锌(ZS)熔点为(120±5)℃;苧麻纤维(RF)由华中农业大学提供,长度为10 mm,平均直径65 μm,密度1.45 g/cm<sup>3</sup>;拌和水为武汉市自来水.采用1 mol/L的NaOH溶液对苧麻纤维表面进行改性.

表1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	IL
CSA	40.70	6.50	23.70	6.17	1.22	0.10	10.52		9.30
CPG	43.03	9.51	0.99	0.40	0.66	0.29	36.35	1.91	4.86
SF	0.23	93.52	0.37	0.23	0.37	0.35	0.27		4.48

本文旨在研究不同掺量RF对硫铝酸盐水泥基材料力学性能和体积变形的影响规律.随着纤维掺量的增加,纤维在基体材料中的分散逐渐困难,导致试样的强度出现了明显的偏差,因此确定RF掺量分别为0%、0.25%、0.50%、0.75%和1.00%,相应材料分别编号为Control、RF0.25、RF0.50、RF0.75和RF1.00.基体材料是以硫铝酸盐水泥为主体的硫铝酸盐水泥-磷建筑石膏-硅灰三元体系,参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》,测得其初凝时间为6 min,终凝时间为10 min.基体材料的配合比见表2,水胶比为0.6.

### 1.2 试验方法

RF在掺入前均要进行表面处理:首先,将RF置于充满清水的超声容器中振动30 min,以除去RF表

表2 基体材料的配合比

Table 2 Mix proportion of matrix material

CSA	CPG	SF	CN	NS	CaO	HPMC	ZS	PCE
54.5	30.0	10.0	2.0	1.0	2.0	0.1	0.3	0.1

面的灰尘和油脂;然后,将RF放入浓度为1 mol/L的NaOH溶液中浸泡处理72 h,浸泡结束后用去离子水洗涤,并且在70℃条件下烘干.

参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》测定硬化水泥净浆的抗折强度和抗压强度,试样尺寸为40 mm×40 mm×160 mm.试样在(20±1)℃、湿度相对(60±5)%的空气中养护2 h后脱模,然后继续在(20±1)℃、相对湿度(95±5)%的条件下养护至规定龄期.

以界面弯拉强度(新旧水泥试样的抗折强度)表征水泥浆体的黏结强度,如图1所示.采用52.5级普通硅酸盐(OPC)水泥,以0.35的水灰比制备尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的试样,将其作为标准试样.养护28 d后从中间分割,将一半标准试样放入模具中,另一半浇筑苈麻纤维增强硫铝酸盐水泥基材料.脱模养护至相应

龄期后测得的抗折强度称为无约束条件下界面弯拉强度.在实际的道路裂缝修复中可以发现,对于修补材料而言四周均有约束,这种约束环境可能会对其强度有一定的提升.因此本文为模拟修补道路裂缝时的环境,将试样带模养护(即试样四周均有约束)至规定龄期后的抗折强度称为约束条件下界面弯拉强度.

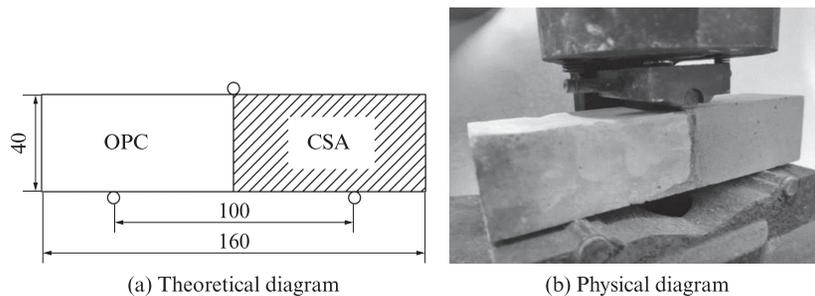


图1 界面弯拉强度测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interfacial flexural-tensile strength test(size:mm)

采用YC-JS型全自动混凝土收缩膨胀仪测定试样在168 h内的自生变形和干燥变形.试样尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,养护至终凝时拆模,随后立即用塑料薄膜包裹密封,进行自生变形测试.干燥变形测试按照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行,将终凝后的试样置于(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的条件下进行试验.

傅里叶红外光谱(FTIR)测试采用美国Thermo Fisher公司生产的Nicolet IS50型FTIR,试验采用压片法.将RF从不同龄期的试样中取出,与未经任何处理、碱溶液改性72 h的RF分别用剪刀剪成粉末并且过0.25 mm筛后进行FTIR测试.

## 2 结果与分析

### 2.1 力学性能

#### 2.1.1 抗折强度

图2为苈麻纤维对硬化水泥净浆抗折强度的影响.由图2可知:

(1)硫铝酸盐水泥净浆的抗折强度随着龄期的延长不断增大,随着RF掺量的增加呈先增大后减小的趋势,并且在RF掺量为0.50%时达到最大值;试样RF0.50的28 d抗折强度为7.4 MPa,相比于试样Control的5.3 MPa提高了39.62%.其原因是:掺入适量的RF后,RF在基体中呈三维乱向分布,起到了骨架搭接的作用.当基体受到外部荷载的作用时,其界面过渡区会产生大量的应力集中点从而形成微裂缝,此时桥接裂纹的纤维可以分担部分基体传来的应力,改善微裂缝尖端的应力集中程度<sup>[7]</sup>,延缓基体裂纹的拓展.当RF掺量超过0.50%时,大量RF的掺

入使纤维与基体的黏结面积变小,导致基体无法充分包裹纤维<sup>[8]</sup>,纤维之间相互交缠甚至结团,加剧了应力集中现象的产生,导致水泥净浆的抗折强度有所下降.

(2)在0.5 h龄期时,试样RF0.75和RF1.00的抗折强度低于试样Control,这可能是因为早期水泥基体的水化尚不充分,RF与基体之间的黏结力较差,基体受荷破坏时纤维未能完全发挥作用而被直接拔出,使试样的抗折强度降低.

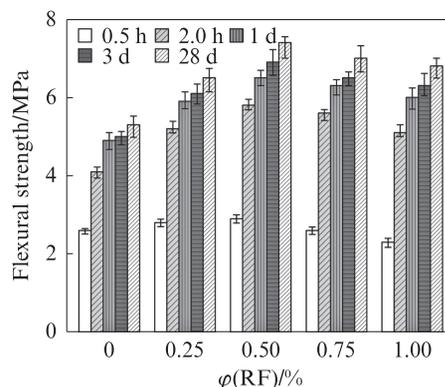


图2 苈麻纤维对硬化水泥净浆抗折强度的影响  
Fig. 2 Effects of ramie fiber on flexural strength of hardened cement pastes

#### 2.1.2 抗压强度

图3为苈麻纤维对硬化水泥净浆抗压强度的影响.由图3可知:

(1)硫铝酸盐水泥净浆的抗压强度与抗折强度表现出一致的规律,不同RF掺量试样的抗压强度都随着龄期的延长逐渐增大.当龄期为0.5 h时,试样的抗压强度随着RF掺量的增加而减小,RF掺量为

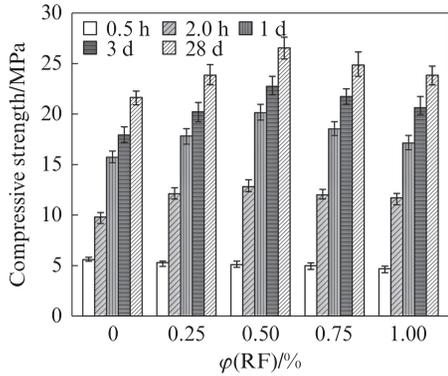


图 3 苕麻纤维对硬化水泥净浆抗压强度的影响  
Fig. 3 Effects of ramie fiber on compressive strength of hardened cement pastes

1.00% 时试样的抗压强度为 4.7 MPa, 较试样 Control 的 5.6 MPa 降低了 16.07%。RF 属于植物纤维, 其中的纤维素、半纤维素和木质素等均含有极性基团羟基, 这种多羟基结构使得植物纤维具有很强的极性和亲水性<sup>[9]</sup>。尽管用碱溶液改性 RF 破坏了纤维结构中的部分羟基<sup>[10]</sup>, 但其依然保持较强的亲水性, 后续图 8 中 RF 改性后的 O—H 伸缩振动峰的变化幅度也证实了这一点。可以推断, RF 的掺入在一定程度上延缓了周围浆体的水化进程<sup>[11]</sup>, 导致试样早期内部的孔隙较多, 从而使其 0.5 h 抗压强度降低。值得注意的是, 该龄期下试样抗压强度的变化幅度并不明显, 这可能是因为早期 RF 与基体间的黏结力较差, 此时硬化浆体的强度不足以抵抗较大的外力作用而被直接破坏, 因而 RF 对试样抗压强度的影响较小。

(2) 当龄期大于 2.0 h 时, 各组试样的抗压强度均高于试样 Control, 且抗压强度随着 RF 掺量的增加呈先增大后减小的趋势, 当 RF 掺量为 0.50% 时试样的 28 d 抗压强度最大 (26.5 MPa), 较试样 Control 提高了 18.50%。这可能是因为直径小且密度低的 RF 在基体内部中分散较为均匀, 起到了类似加强筋的作用,

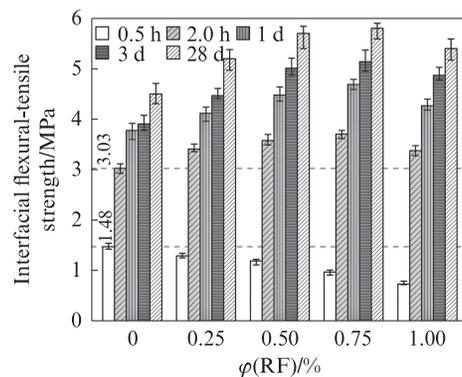
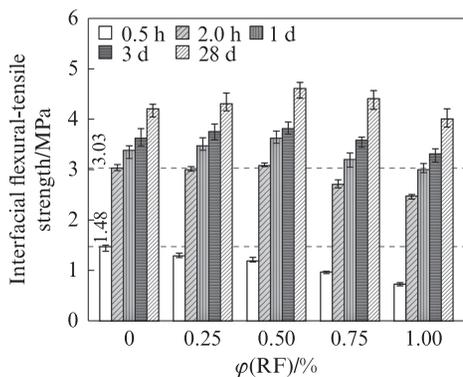
在基体受到荷载作用时与基体共同分散应力<sup>[12]</sup>, 由此提高了试样的抗压强度。当 RF 掺量超过 0.50% 时, 纤维之间的结团成簇不仅会削弱 RF 与基体间的黏结强度, 同时 RF 掺量过大还会增加基体中的含气量, 使其内部空间的密实度降低, 从而削弱了试样的抗压能力。

### 2.1.3 界面弯拉强度

图 4 为苕麻纤维对硬化水泥净浆界面弯拉强度的影响。从图 4 中可以看出:

(1) 2 种条件下不同 RF 掺量硬化水泥净浆的界面弯拉强度均随着龄期的延长而增大。在无约束条件下, 当龄期为 0.5 h 时, 掺入 RF 降低了各试样的界面弯拉强度, 1.00% RF 掺量试样的界面弯拉强度为 0.74 MPa; 当龄期大于 2.0 h 时, 各组试样的界面弯拉强度随着 RF 掺量的增加均呈先增大后减小的趋势, 在 RF 掺量为 0.50% 时达到最大, 但试样 RF0.75 和 RF1.00 的界面弯拉强度始终低于试样 Control。其原因可能是: 植物纤维中纤维素的作用主要是保证纤维的力学性能, 半纤维素和果胶等部分则起到黏合剂的作用<sup>[13]</sup>。用碱溶液改性 RF, 在去除 RF 表面半纤维素和果胶等亲水成分的同时造成了纤维内部的缺陷, 使纤维的刚性下降<sup>[14]</sup>, 对掺入 RF 后试样的韧性有所提高。当纤维掺量超过 0.50% 时, 试样的界面弯拉强度呈下降趋势: 一方面, 由于植物纤维吸水膨胀, 掺入较多的 RF 会使纤维两端的基体材料产生大量孔隙或裂缝<sup>[15]</sup>; 另一方面, 由于 RF 并未伸入到旧水泥试样中, 在新旧水泥的界面黏结处难以充分发挥“桥联”作用<sup>[16]</sup>。该现象在 0.5 h 龄期时较为明显, 掺入 RF 后试样的界面弯拉强度均低于试样 Control。除上述原因外, 还可能是由于 RF 的亲水性使得纤维与基体之间未形成较强的黏结力, 使试样的界面弯拉强度进一步下降。

(2) 在约束条件下, 当龄期大于 2.0 h 时, 硬化水泥净浆的界面弯拉强度均大于试样 Control, 且 RF 掺



(a) Unconstrained interfacial flexural-tensile strength

(b) Constrained interfacial flexural-tensile strength

图 4 苕麻纤维对硬化水泥净浆界面弯拉强度的影响

Fig. 4 Effects of ramie fiber on interfacial flexural-tensile strength of hardened cement pastes

量小于0.75%时试样的界面弯拉强度均呈增大趋势.在约束条件下掺入RF更有利于试样界面弯拉强度的提高.试样RF0.75和RF1.00在28 d时的界面弯拉强度较试样Control分别提高了28.89%和20.00%,较无约束条件下的28 d界面弯拉强度分别提高了31.82%和35.00%.这可能是因为,在四周有约束的条件下RF吸水膨胀不仅会提高基体的密实度,抑制裂缝的产生,同时模板还能对试样施加一定的压力,使基体生成的水化产物紧密地填充在新旧水泥的界面黏结处,进而增强试样的界面弯拉强度.但在约束条件下的RF掺量不宜过大,过量的纤维( $\geq 0.75\%$ )不仅会取代界面中的基体材料,减小基体与旧水泥之间的接触面积,还会出现结团现象,削弱RF与基体间的黏结力,不利于界面弯拉强度的提高.

## 2.2 体积变形

### 2.2.1 自生变形

图5为苕麻纤维对水泥净浆自生变形的影响.由图5可知:各试样的自生变形均为膨胀变形,且在一定的纤维掺量范围内,试样的自生变形随着RF掺量的增加逐渐增大;当RF掺量从0%增加到1.00%时,试样在168 h时的自生变形从539  $\mu\text{m}/\text{m}$ 增大到734  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,表明RF的掺入显著增大了试样的膨胀变形.这是因为基体材料属于膨胀性材料,在无外界水参与的密封养护环境下,该体系中水化产物产生的膨胀应力远大于由浆体内部相对湿度下降引起的收缩应力<sup>[17-18]</sup>,故试样持续膨胀.掺入RF后,由于RF具有较强的亲水性,RF吸水导致其发生横向变形,加大了试样在该过程中的膨胀,并且膨胀量随着RF掺量的增加逐渐增大.

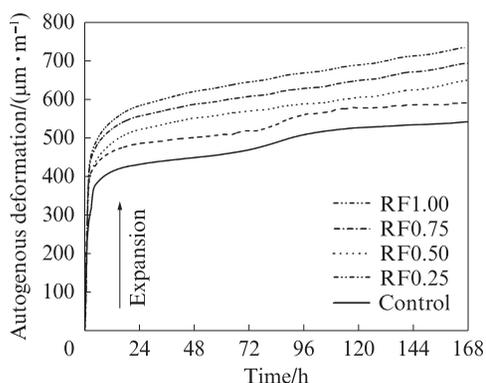


图5 苕麻纤维对水泥净浆自生变形的影响  
Fig. 5 Effects of ramie fiber on autogenous deformation of cement pastes

图6为水泥净浆7 d自生变形与苕麻纤维掺量的关系.从图6可以看出,当RF掺量从0%增加到1.00%时,各试样的7 d自生变形与RF掺量之间呈

现较好的线性相关关系,其相关系数( $R^2$ )达到0.99以上.

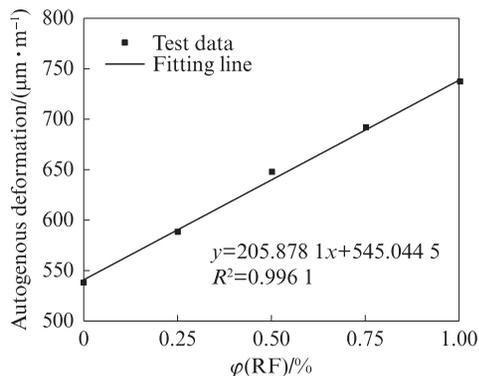


图6 水泥净浆7 d自生变形与苕麻纤维掺量的关系  
Fig. 6 Relationship between autogenous deformation of cement paste at 7 d and ramie fiber content

### 2.2.2 干燥变形

与自生变形不同的是,干燥变形是由水泥浆体内部和外部湿度交换时内部水分蒸发所引起的收缩变形<sup>[19]</sup>.图7为苕麻纤维对水泥净浆干燥变形的影响.

由图7可知:

(1)当RF的掺量从0%增加到1.00%时,试样干燥变形达到最大值的时间出现延迟,从7.03 h延长到12.94 h.这是因为RF掺量越大,其在水泥浆体中吸收的水分相应增大,从而在一定程度上减小了水泥水化过程中的用水量,延长了试样的膨胀时间.

(2)各试样的干燥变形同样均为膨胀变形,但与水泥净浆的自生变形曲线相比,干燥变形达到最大值后开始出现下降趋势,即膨胀量减小.试样Control、RF0.25、RF0.50、RF0.75、RF1.00的7 d干燥变形相比于其干燥变形峰值分别降低了106、107、130、160、164  $\mu\text{m}/\text{m}$ .这是因为水泥浆体失去水分而产生毛细管压力,使得试样发生干燥收缩,抵消了部分膨胀变形,干燥变形缓慢减小.这与文献[20]报道的结果基本一致.

## 2.3 微观分析

图8为不同条件下苕麻纤维的FTIR图谱.从图8可以看出:

(1)1618  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现的C=C双键伸缩振动峰用来表征果胶.半纤维素的主要振动峰出现在1727、1025  $\text{cm}^{-1}$ 附近,对应于C=O伸缩振动峰.与未处理的RF相比,RF改性后在1727、1618、1025  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰的强度均显著减弱,表明碱溶液改性RF能够有效去除RF表面的半纤维素和果胶等非纤维素成分,由此提高了纤维表面的粗糙度,有利于增大纤

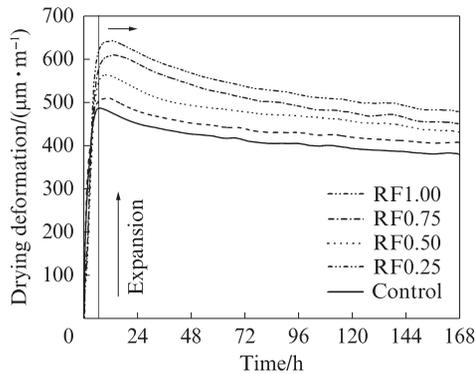


图7 苧麻纤维对水泥净浆干燥变形的影响

Fig. 7 Effects of ramie fiber on drying deformation of cement pastes

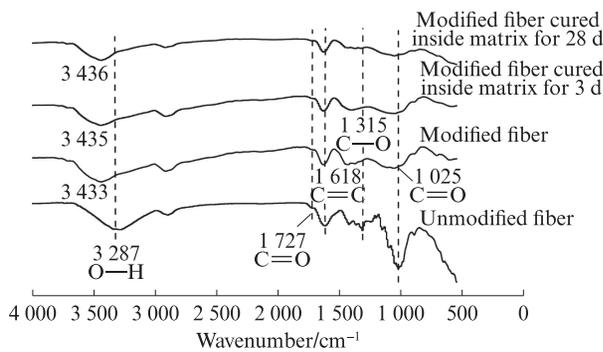


图8 不同条件下苧麻纤维的FTIR图谱

Fig. 8 FTIR spectra of ramie fiber under different conditions

纤维与试样之间的黏结力和锚固力。1315  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰用来表征木质素的C—O键伸缩振动,可以发现该特征峰几乎消失,意味着木质素在本文所提供的碱性环境下已经完全水解,这与Bonnet-Masimbert等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。此外,文献[21]表明,分子间氢键的强弱会影响纤维素红外光谱图中O—H谱带的位置。改性RF的O—H伸缩谱振动带(3287  $\text{cm}^{-1}$ )峰值减弱的同时向高频位移至3433  $\text{cm}^{-1}$ ,说明RF表面的O—H与分子间的氢键均遭到了破坏,但峰值强度的降低有限,RF中的O—H依然大量存在。

(2)值得注意的是,将改性RF掺入至水泥浆体内养护3、28 d后,其特征谱带的透光度较未掺入水泥浆体内的改性RF无明显变化,3433、1025  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰的强度仅有微小减弱的趋势。随着水泥水化的进行,水泥体系呈碱性<sup>[18]</sup>,改性RF表面残留的半纤维素、果胶等成分在碱性环境下进一步水解,其水解产物蜡质、树脂及酸性物质会影响试样的物理力学性能<sup>[22]</sup>。然而本文的水泥基材料水化速率极快,在水化早期反应基本结束,因此这些水解产物对其性能产生的负面作用微乎其微,改性RF可以在水泥基材料中稳定发挥作用,提高试样的整体强度。

### 3 结论

(1)苧麻纤维(RF)增强硫铝酸盐水泥基材料的抗折强度、抗压强度随着RF掺量的增加呈先增大后减小趋势,在RF掺量为0.50%时达到最大值。在约束条件下,掺入RF对水泥浆体界面弯拉强度相较于无约束条件下的提升幅度更大。

(2)RF的掺入显著增加了水泥净浆的膨胀量,随着RF掺量的增加,膨胀变形逐渐增大。水泥净浆的自生变形与RF掺量具有很好的相关性。改性RF可以在水泥基材料的碱性环境中稳定发挥作用,提高试样的整体强度。

(3)从强度、韧性和体积变形3个方面综合考虑,RF掺量为0.50%时的效果最佳,此时该体系兼具良好的强度、黏结性能以及体积稳定性。

### 参考文献:

- [1] 胡曙光,高达,丁庆军,等.水泥-沥青-环氧树脂复合胶结道路快速修补材料研究[J].混凝土,2019(4):155-159.  
HU Shuguang, GAO Da, DING Qingjun, et al. Study on rapid-road-repair material of cement-asphalt-epoxy[J]. Concrete, 2019(4):155-159. (in Chinese)
- [2] 王培铭,李楠,徐玲琳,等.低温养护下硫铝酸盐水泥的水化进程及强度发展[J].硅酸盐学报,2017,45(2):242-248.  
WANG Peiming, LI Nan, XU Linglin, et al. Hydration characteristics and strength development of sulphoaluminate cement cured at low temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(2):242-248. (in Chinese)
- [3] LIU K F, LI T, WU C F, et al. Bamboo fiber has engineering properties and performance suitable as reinforcement for asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123240.
- [4] SURIYAPRAKASH M, NALLUSAMY M, SHANJAI K S R, et al. Experimental investigation on mechanical properties of ramie, hemp fiber and coconut shell particle hybrid composites with reinforced epoxy resin[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 72(6):2952-2956.
- [5] DEBELI D K. Study on the improvement of fiber-matrix interphase strength of ramie fibers reinforced poly (lactic acid) bio composites via fiber surface modification and composite thermal annealing [D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [6] 张天潇,廖宜顺,刘立军,等.苧麻纤维增强磷建筑石膏复合材料耐水性能和力学性能研究[J].硅酸盐通报,2023,42(1):213-221.  
ZHANG Tianxiao, LIAO Yishun, LIU Lijun, et al. Water resistance and mechanical properties of ramie fiber reinforced calcined phosphogypsum-based composites[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1):213-221. (in Chinese)
- [7] 李福海,高浩,唐慧琪,等.短切玄武岩纤维混凝土基本性能试

- 验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2):419-427.
- LI Fuhai, GAO Hao, TANG Huiqi, et al. Basic properties and shrinkage model of chopped basalt fiber concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2):419-427. (in Chinese)
- [ 8 ] 张文斌,陶燕,李鑫鑫,等.玄武岩纤维水泥基复合材料基本力学性能试验研究[J].新型建筑材料,2022,49(6):17-22.
- ZHANG Wenbin, TAO Yan, LI Xinxin, et al. Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber cement composite[J]. New Building Materials, 2022, 49(6):17-22. (in Chinese)
- [ 9 ] CHOKSHI S, PARMAR V, GOHIL P, et al. Chemical composition and mechanical properties of natural fibers [J]. Journal of Natural Fibers, 2020, 19(10):3942-3952.
- [10] AZEVEDO A R G, MARKILA M T, TAYEH B A, et al. Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33:101675.
- [11] 刘高鹏,廖宜顺,刘立军,等.苕麻纤维水泥基材料的力学性能与自收缩试验研究[J].功能材料,2019,50(7):7176-7181.
- LIU Gaopeng, LIAO Yishun, LIU Lijun, et al. Experimental study on mechanical properties and autogenous shrinkage of cement-based materials with ramie fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(7):7176-7181. (in Chinese)
- [12] 林笑.混杂纤维混凝土力学性能对比试验研究[D].西安:长安大学,2021.
- LIN Xiao. Comparative experimental study on mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete[D]. Xi'an:Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [13] AZWA Z N, YOUSIF B F, MANALO A C, et al. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres [J]. Materials and Design, 2013, 47(9):424-442.
- [14] BONNET-MASIMBERT P A, GAUVIN F, BROUWERS H, et al. Study of modifications on the chemical and mechanical compatibility between cement matrix and oil palm fibres [J]. Results in Engineering, 2020, 7:100150.
- [15] PRASAD V, JOSEPH M, SEKAR K. Investigation of mechanical, thermal and water absorption properties of flax fibre reinforced epoxy composite with nano TiO<sub>2</sub> addition [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 115:360-370.
- [16] 顾超,许金余,孟博旭.聚丙烯纤维对两种聚合物改性砂浆力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2018,37(12):3764-3768.
- GU Chao, XU Jinyu, MENG Boxu. Effect of polypropylene fiber on mechanical properties of two kinds of polymer modified mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12):3764-3768. (in Chinese)
- [17] HE X, YANG J F, LIU M D, et al. Study on expansion effect and hydration characteristics of ultra-high strength cement-based grouting materials based on humidity compensation [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18:e01941.
- [18] LU J Y, FENG P, SHAO L J, et al. The effect of internal relative humidity on the early age deformation of cement paste containing magnesia[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283:122604.
- [19] GUO A F, SUN Z H, SATYAVOLU J. Impact of modified kenaf fibers on shrinkage and cracking of cement pastes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264:120230.
- [20] SHEN W G, LI X L, GAN G J, et al. Experimental investigation on shrinkage and water desorption of the paste in high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:618-624.
- [21] LU W C, AMARASINGHE C, ZHANG E, et al. Probing hydrogen-bond networks in plastic crystals with terahertz and infrared spectroscopy[J]. Cell Reports Physical Science, 2022, 3(8):100988.
- [22] 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)