

文章编号:1007-9629(2022)10-1021-06

植物纤维增强水泥基复合材料研究进展

赵 丽^{1,2}, 李书进¹, 宋 杨¹, 张亚梅^{2,*}

(1. 常州工学院 土木建筑与工程学院, 江苏 常州 213032;

2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:在石油资源匮乏和碳减排的压力下,以天然植物纤维替代合成纤维,制备增强水泥基复合材料的研究受到广泛关注.植物纤维在水泥基材料中具有抗裂增韧、内养护、保温节能等作用,但是存在纤维性能退化和界面黏结弱化等问题.综述了国内外对植物纤维增强水泥基复合材料所采取的改善措施及效果,指出添加辅助胶凝材料和植物纤维表面包覆处理是解决上述问题的有效途径,并针对今后需要深入开展的相关研究提出建议.

关键词:水泥基复合材料;植物纤维;耐碱性;界面黏结;改性

中图分类号:TU528.33

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.004

State-of-Art of Natural Fiber Reinforced Cementitious Composites

ZHAO Li^{1,2}, LI Shujin¹, SONG Yang¹, ZHANG Yamei^{2,*}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Under the pressure of petroleum scarcity and carbon emission reduction, the research of cementitious composites reinforced with natural fibers instead of synthetic fibers had aroused considerable interest. Natural fibers could improve the crack resistance and provide the internal curing and heat preservation properties of cementitious composites. However, the degradation of natural fibers and the weak fiber-matrix interfacial bonding pose a great limitation to their practical application. The improvement approaches are intensively reviewed. It is suggested that the addition of supplementary cementitious materials and the surface coating treatment of natural fibers are effective ways to solve the problems. At last, some suggestions are put forward to carry out further research in this filed.

Key words: cementitious composite; natural fiber; alkaline resistance; interfacial bonding; modification

普通水泥基材料具有抗拉强度低、韧性差、易开裂等缺点,导致其抗渗能力下降,对结构安全造成严重威胁.为了克服上述缺陷,研究者们通过在水泥基材料中掺入一定量的纤维来抑制裂纹扩展,以改善其脆性特质.应用于水泥基材料的纤维主要包括钢纤维、碳纤维、玻璃纤维和合成纤维等.这些纤维不仅生产成本较高,增加了工程造价,而且生产过程中产生的能源消耗与废气排放也不利于环境保护与可

持续发展.

为了在 2030 年实现碳排放峰值,中国必须降低化石能源的比重,大规模发展清洁能源,走绿色低碳可持续发展道路.其中,建筑节能在整个社会节能中占据重要位置,创新的绿色建材产品能够大大降低建筑在全社会的耗能比例,是建设低排放、低耗能、环境友好型社会必然而急迫的课题.

天然植物纤维(NF)是一种可再生的农业副产

收稿日期:2021-08-27; 修订日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108191);中国博士后科学基金面上资助项目(2021M690622);常州市应用基础研究计划(CJ20210153);常州市国际科技合作项目(CZ20210032);江苏高校“青蓝工程”;常州市青年科技人才托举工程

第一作者:赵 丽(1987—),女,辽宁兴城人,常州工学院副教授,硕士生导师,博士.E-mail: xianrenqiu_xph1209@163.com

通讯作者:张亚梅(1968—),女,江苏如皋人,东南大学教授,博士生导师,博士.E-mail: ymzhang@seu.edu.cn

品,具有价格低廉、来源广泛、轻质环保、比强度高优点^[1]。目前,各国均有学者结合所在区域大量生长的植物开展植物纤维增强水泥基复合材料(natural fiber reinforced cementitious composites, NFRCC)的相关研究。本文从植物纤维在水泥基材料中发挥的作用、劣化问题及改善措施3个方面展开综述。

1 植物纤维在水泥基材料中发挥的作用

1.1 抗裂增韧

大量研究表明,添加适量的植物纤维(如纸浆纤维、纤维素纤维、农作物秸秆纤维、剑麻纤维、椰壳纤维、竹纤维和芦苇纤维等)可有效提高水泥基复合材料的韧性、延性、抗裂性、抗冲击性和抗劈拉强度等^[2-5]。尚君等^[6]采用长纤维分层平铺工艺分别制备竹原、大麻、剑麻及苧麻纤维增强水泥砂浆,这4种植物纤维的分层平铺试件均表现出明显的应变硬化特征,其极限拉应变均达到2%以上,其性价比有利于植物纤维的进一步研究与推广应用。植物纤维在其他胶凝材料体系如地聚物混凝土^[7-8]和磷酸镁水泥^[9]等中的增强作用也有较多报道。

1.2 内养护

植物纤维独特的多孔结构与亲水性使其能够蓄存大量的拌和水,在水化过程中,这部分水会缓慢释放,不仅能促使水化反应持续高效地进行,还能改善水泥基体内部相对湿度的变化,对水泥基体起到内养护作用,使收缩变形明显减少^[10-11]。徐蕾^[12]在试验中发现,与聚丙烯纤维和玻璃纤维相

比,亚麻纤维在控制水泥砂浆限制性塑性收缩开裂方面更为有效,掺加体积分数为0.3%的亚麻纤维可使水泥砂浆的裂缝总面积减少99.5%,最大裂缝宽度减少98.5%。

1.3 保温节能

随着城市化进程的加快和生活水平的不断提高,人们对建筑物宜居性能提出更高需求。植物纤维独特的多孔结构赋予其质轻、保温隔热、吸音隔声等优点,对于制备高效节能建筑构件具有突出优势。例如,陈继浩等^[13]通过向水泥板中掺入植物纤维,制备出隔热性能优异的自保温墙体。Saira等^[14]制备的软木纤维增强石膏基体不仅具有与保温材料相似的导热系数,还可抑制声音的传播。

2 植物纤维在水泥基材料中的劣化问题

2.1 植物纤维性能退化

虽然植物纤维用于增强水泥基材料有上述诸多优点,但其在碱性水泥基体中的性能会逐步退化,这是阻碍其大范围推广应用的瓶颈问题。植物纤维在水泥基体中性能退化主要包括水解与矿化^[15-16]2个机制。植物纤维的主要成分木质素和半纤维素在碱性环境中易于水解,削弱了纤维细胞间的连接,如图1所示^[15]。随着水泥浆体孔溶液向纤维内部的渗透,水化产物氢氧化钙在内腔逐渐沉积造成纤维矿化。植物纤维的水解与矿化导致水泥基材料的抗拉强度与变形能力下降,逐渐丧失其增强作用。

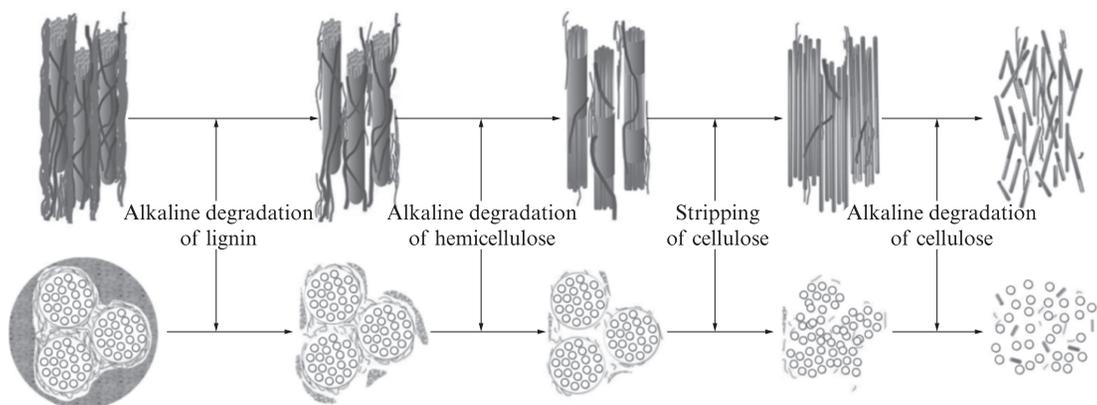


图1 植物纤维碱性退化过程示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of natural fiber's alkaline degradation process^[15]

2.2 界面黏结弱化

植物纤维与水泥基体之间较弱的界面黏结是限制其抗裂增韧效应的另一个关键问题。植物纤维在水泥碱性环境中的水解产物对水泥水化有缓凝作

用,严重阻碍纤维与水泥基体之间的界面黏结^[17]。此外,植物纤维具有较强的吸湿性,使得纤维周围局部水灰比较大,形成多孔、多裂纹、富含氢氧化钙晶体的界面薄弱区^[18]。在自然界干湿循环过程中,植物纤

维交替的膨胀和收缩使界面黏结逐渐弱化,不能有效地桥接裂缝和承担荷载^[19]。

3 植物纤维劣化的改善措施

延缓植物纤维在水泥基体中的性能退化,改善纤维与水泥基体界面黏结性能,是将植物纤维用于增强水泥基材料亟待解决的关键问题。为此,国内外研究者所采取的基本手段有2种:水泥基体改性和植物纤维改性。

3.1 水泥基体改性

3.1.1 碳化处理

研究表明,对NFRCC进行早期快速碳化处理可降低氢氧化钙含量,提高NFRCC干湿循环老化后的残余力学性能^[20-22]。然而,Teixeira等^[23]指出,碳化产物虽然能使水泥基体变得致密,抗渗性提高,但是快速碳化处理无益于NFRCC的强度和韧性,也不能有效保持NFRCC干湿循环老化后的残余力学性能。Junior等^[22]的热重测试结果表明,长时间碳化会消耗水化硅酸钙凝胶,降低NFRCC的延性和应变能力。

3.1.2 添加辅助胶凝材料

辅助胶凝材料,如硅灰(SF)、矿渣(SL)、粉煤灰(FA)、偏高岭土(MK)和纳米黏土(NC)等多以活性硅质、硅铝质为主,可与水化产物氢氧化钙发生火山灰反应,生成钙硅比较低的水化铝硅酸钙和水化硅酸钙。大量研究表明,添加辅助胶凝材料能延缓植物纤维在水泥基体中的性能退化,提高植物纤维的长期增韧效应^[4,16,22,24-25]。例如,谢晓丽^[4]和Junior等^[22]分别以40% SF和27% MK+40% FA(其中的含量均为质量分数)等量替代硅酸盐水泥获得无氢氧化钙的水泥基体,经过干湿循环后,NFRCC的抗折强度与断裂韧性仍能保持老化前的水平。但是,这些研究中所添加的辅助胶凝材料用量远超过混凝土工程实践中的常用范围,不仅成本提高,对新拌混凝土的工作性也有不利影响。

3.2 植物纤维改性

目前,应用于增强水泥基体的植物纤维改性研究主要包括:碱处理、漂白处理、蒸汽爆破处理、热处理、角质化处理、等离子体处理和表面包覆处理等。

3.2.1 碱处理

碱处理是一种常用的植物纤维改性方法。碱处理能去除植物纤维表面的木质素、半纤维素、果胶、蜡及油脂等物质,提高纤维表面粗糙度,增大纤维与水泥基体的有效接触面积,进而促进纤维与水泥基

体的界面黏结^[26]。此外,植物纤维碱处理还可以去除一些对水泥水化有延迟作用的成分(如多糖),提高植物纤维与水泥水化体系的相容性^[17]。需要注意的是,碱处理对溶液浓度、浸泡时间等参数要求十分严格,处理不当会破坏植物纤维内部起胶结作用的物质,导致纤维抗拉强度与变形能力下降^[27]。

3.2.2 漂白处理

漂白处理指用化学品去除植物纤维细胞壁中残留的木质素,提高纤维的白度和亮度。研究表明,漂白处理后的植物纤维对水泥水化阻碍作用减弱,表面粗糙度提高,与水泥基体之间的黏结增强^[28-29]。然而,Tonoli等^[28]研究发现,漂白处理不仅使植物纤维的强度和刚度降低,而且对纤维表面起屏障作用的木质素和半纤维素在漂白过程中也被大量去除,从而为有害离子向纤维内部入侵扫清障碍,加速了纤维性能退化。

3.2.3 蒸汽爆破处理

植物纤维经过高温高压蒸汽处理后,半纤维素、木质素、果胶等小分子化合物降解软化被去除,纤维素含量提高。Sellami等^[30]和Cabral等^[31]分别对甘蔗渣纤维和迪丝草纤维进行蒸汽爆破处理,处理后的植物纤维对水泥水化的阻碍作用减弱,亲水性降低,所制备的NFRCC具有更低的吸水率和膨胀性,力学性能显著提高。

3.2.4 热处理

植物纤维在加热过程中羟基之间会发生脱水缩合反应,导致亲水性官能团减少,亲水性降低;与此同时,半纤维素发生分解,使纤维结晶度提高,从而提高植物纤维的抗拉强度和弹性模量。Wei等^[32]研究表明,剑麻纤维在150℃下烘干8h后拉伸强度和杨氏模量分别提高了45%和70%,结晶度由20.27%提高至26.42%,所制备的NFRCC经过30次干湿循环后,其抗劈拉强度和抗压强度与对比样相比分别提高了24.4%和19.6%。

3.2.5 角质化处理

植物纤维角质化是指纤维细胞腔的不可逆收缩与内部氢键的形成,发生角质的纤维润胀能力降低,亲水性下降,体积稳定性提高^[33]。Ferreira等^[34]分别对凤梨叶纤维、黄麻和剑麻纤维进行连续干湿循环处理,使纤维细胞角质化,研究表明:经过5次循环处理的植物纤维不仅抗拉强度提高,与水泥基体的界面黏结强度也得到提高;但10次循环处理后,凤梨叶纤维的刚度呈下降趋势。因此,在对植物纤维进行角质化处理时,应同时考虑干湿循环次数对植物纤维结

构造成的损伤。

3.2.6 等离子体处理

等离子体处理是纤维表面改性的一种新方法,可对纤维表面进行有效的净化、活化、粗化、刻蚀与沉积。等离子体处理可提高植物纤维的热稳定性、疏水性,在提高植物纤维与基体界面黏结方面优于某些化学改性^[35-36]。Barra等^[37]通过对剑麻纤维进行甲烷等离子体处理,在其表面形成疏水性聚合层,降低了纤维吸水率,提高了纤维与水泥基体界面黏结强度。然而,等离子体表面处理技术复杂,需要借助贵重仪器设备,导致等离子体改性植物纤维在建筑材料领域难以推广应用。

3.2.7 表面包覆处理

植物纤维丰富的官能团使其易于通过物理结合或化学键合的方式与表面包覆材料发生作用。李国忠等^[38]采用质量分数为10%的脲醛树脂溶液对棉花秸秆纤维进行表面处理,形成坚固密实的界面结合层,有效提升了水泥基复合材料的强度和耐水性。王磊等^[39]采用硅酸钠溶液和水泥浆对牧草纤维进行表面包裹,避免纤维中的糖分进入砂浆阻碍水化,同时易于与水泥胶砂结合,减少薄弱界面的形成,有效提

升了橡胶粉水泥胶砂的抗折性能。国外研究团队通过在植物纤维表面包覆防水涂层^[30]、硅烷偶联剂^[40]、聚合物乳液^[41]等来提高纤维与水泥基体界面黏结强度。

以上包覆改性主要改善植物纤维与水泥基体的界面黏结性能,对植物纤维耐碱性方面的研究则很少兼顾。为延缓植物纤维性能退化,姜平伟等^[42]用改性聚乙烯醇对棉花秸秆纤维进行浸泡处理,在纤维表面形成固化膜,隔绝纤维与水 and 空气的直接接触。徐辉^[43]、Tonoli等^[44]、Wei等^[32]研究证明,对植物纤维进行聚合物、硅烷偶联剂、 Na_2CO_3 结晶包覆处理可阻止水化产物向纤维内腔迁移,所制备的NFRCC经过人工加速老化后力学性能保留值均高于未改性试样。Zhao等^[45]将具有选择透过性的3种氧化石墨烯基膜(氧化石墨烯GO、还原氧化石墨烯rGO和还原氧化石墨烯负载镍纳米粒子rGO/Ni NPs)包覆在剑麻纤维表面,经过NaOH和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸泡处理后,剑麻纤维的质量损失与抗拉强度损失均远低于未包覆纤维,证明3种氧化石墨烯基膜能有效阻碍有害离子向纤维内部迁移,对纤维起到保护作用(图2)。

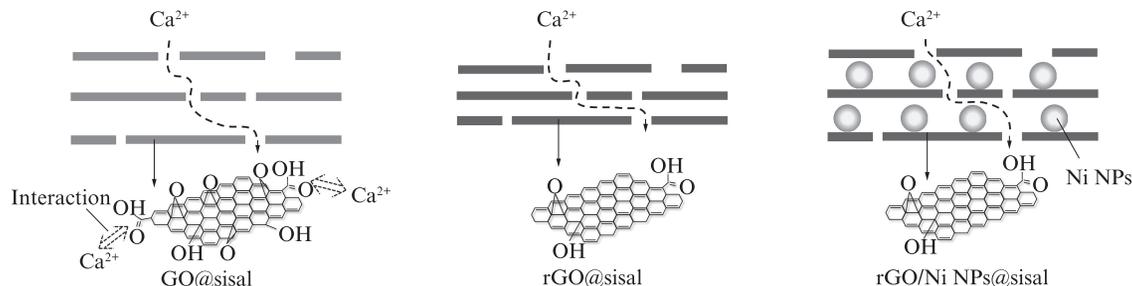


图2 表面包覆的氧化石墨烯基膜阻碍有害离子向纤维内部渗透示意图

Fig. 2 Schematic drawing of protection provided by the GO-based membranes against the migration of harmful ions into the fiber^[45]

有研究者将具有火山灰活性的微粒,如硅灰、高岭土等包覆在植物纤维表面,利用火山灰反应消耗氢氧化钙,以降低纤维周围的碱性,从而减弱水泥基体对植物纤维的侵蚀^[46]。与直接将火山灰活性微粒加入水泥基体相比,将它们包覆在植物纤维表面能够避免其在水泥基体中团聚,是一种更有效、更经济的方法。

4 结论与展望

植物纤维作为一种绿色水泥基增强材料,具有抗裂增韧、内养护、建筑节能等优势。但是植物纤维在碱性水泥基体中存在性能退化与界面黏结弱化等缺点。尽管已有大量研究表明添加辅助胶凝材料和表面包覆植物纤维是解决这2个问题的有效途径,但是远未达到理想效果,尚需继续深化研究。在后续研

究工作中,建议注意以下几点:

(1)对复合胶凝体系进行优化设计,使其同时满足混凝土工作性、强度、耐久性等多方面要求。

(2)优选表面包覆材料,优化制备工艺,进一步提升对植物纤维的保护作用。

(3)在混凝土生产实践中,剧烈搅拌对表面包覆层的损坏也是值得关注的问题。

相信随着研究的不断深入与各学科交叉融合,上述问题将逐渐得到解决,为植物纤维增强水泥基复合材料的推广应用奠定理论基础。

参考文献:

[1] LI M, PU Y Q, THOMAS V M, et al. Recent advancements of

- plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 200: 108254.
- [2] ONUAGULUCHI O, BANTHIA N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 68: 96-108.
- [3] 张鹤志, 胡浩, 张丹凤, 等. 黄蒿纤维增强混凝土的受力性能试验研究 [J]. *功能材料*, 2019, 50(11): 11138-11143.
ZHANG Huzhi, HU Hao, ZHANG Danfeng, et al. Experimental investigation on the mechanism properties of artemisia annua fiber reinforce concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(11): 11138-11143. (in Chinese)
- [4] 谢晓丽. 植物纤维改性水泥基复合材料的制备与力学性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XIE Xiaoli. Preparation of cement based composites reinforced with plant fiber and their mechanical properties [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [5] ZHOU C H, CAI L P, CHEN Z P, et al. Effect of kenaf fiber on mechanical properties of high-strength cement composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 121007.
- [6] 尚君, 赵铁军, 王兰芹, 等. 高韧性植物纤维增强水泥基材料单轴拉伸试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 218223.
SHANG Jun, ZHAO Tiejun, WANG Lanqin, et al. Research on direct tensile experiments of high ductile vegetable fiber reinforced cementitious composites [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(1): 218-223. (in Chinese)
- [7] 杨世玉, 赵人达, 曾宪帅, 等. 用自然纤维增强地聚物材料: 综述 [J]. *材料导报*, 2021, 35(7): 07107-07113.
YANG Shiyu, ZHAO Renda, ZENG Xianshuai, et al. Reinforced geopolymer materials with natural fibers: A Review [J]. *Materials Report*, 2021, 35(7): 07107-07113. (in Chinese)
- [8] MAZEN A, SAIDA A M, JUMA'A A K, et al. Fabrication, microstructural and mechanical characterization of luffa cylindrical fibre-reinforced geopolymer composite [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 143: 125-133.
- [9] WEI Y Q, SONG C Y, CHEN B, et al. Experimental investigation on two new corn stalk biocomposites based on magnesium phosphate cement and ordinary Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 224: 700-710.
- [10] 蹇守卫, 汪婷, 马保国, 等. 改性水稻秸秆对水泥基材料性能影响研究 [J]. *材料导报*, 2014, 28(6): 132-135.
JIAN Shouwei, WANG Ting, MA Baoguo, et al. Study on the effect of the modified rice straw on the performance of the cement-based materials [J]. *Materials Report*, 2014, 28(6): 132-135. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 徐蕾. 应用亚麻纤维减少混凝土塑性收缩开裂的研究 [J]. *混凝土*, 2013(10): 91-94.
XU Lei. Study of use of flax fibres to reduce the plastic shrinkage cracking in concrete [J]. *Concrete*, 2013(10): 91-94. (in Chinese)
- [13] 陈继浩, 冀志江. 植物纤维水泥复合板隔热性能计算机模拟与试验研究 [J]. *建筑节能*, 2017, 45(10): 31-34.
- CHEN Jihao, JI Zhijiang. Computer simulation and experiment research of vegetable fiber concrete panel's heat-insulating performance [J]. *Building Energy Efficiency*, 2017, 45(10): 31-34. (in Chinese)
- [14] SAIRA S, MANDILIB B, TAQIB M, et al. Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation [J]. *Composites Communications*, 2019, 16: 20-24.
- [15] WEI J Q, MEYER C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 73: 1-16.
- [16] FILHO J A M, SILVA F A, FILHO R D T. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 40: 30-39.
- [17] BONNET-MASIMBERT P A, GAUVIN F, BROUWERS H J 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.
- [18] JR H S, AGOPYAN V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(1): 49-57.
- [19] ZUKOWSKI B, SANTOS E R F, MENDONÇA Y G S, et al. The durability of SHCC with alkali treated curaua fiber exposed to natural weathering [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 94: 116-125.
- [20] BALLESTEROS J E M, MÁRMOL G, FILOMENO R, et al. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 52-60.
- [21] ALMEIDA A E F S, TONOLI G H D, SANTOS S F, et al. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 42: 49-58.
- [22] JUNIOR A N, FERREIRA S R, FILHO R D T, et al. Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 163: 351-362.
- [23] TEIXEIRA R S, TONOLI G H D, SANTOS S F, et al. Different ageing conditions on cementitious roofing tiles reinforced with alternative vegetable and synthetic fibres [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47: 433-446.
- [24] WEI J Q, MA S W, THOMAS D G. Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites [J]. *Corrosion Science*, 2016, 106: 1-15.
- [25] WEI J Q, MEYER C. Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 81: 94-111.
- [26] AKINYEMI B A, OMONIYI T E, 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.
- [27] KLERK M D, KAYONDO M, MOELICH G M, et al. Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 117835.
- [28] TONOLI G H D, BELGACEM M N, BRAS J, et al. Impact of bleaching pine fibre on the fibre/cement interface[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47: 4167-4177.
- [29] XIE X L, GOU G J, WEI X, et al. Influence of pretreatment of rice straw on hydration of straw fiber filled cement based composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 449-455.
- [30] SELLAMI A, MERZOUZ M, AMZIANE S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1117-1124.
- [31] CABRAL M R, NAKANISHI E Y, SANTOS V, et al. Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18(4): 1092-1102.
- [32] WEI J Q, MEYER C. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 289: 511-523.
- [33] 邵素英. 二次纤维角质化及其纸页损伤研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2002.
SHAO Suying. Study on hornification of recycled fiber and paper damage [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [34] FERREIRA S R, SILVA F A, LIMA P R L, et al. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139: 551-561.
- [35] LEE S G, CHOI S S, PARK W H, et al. Characterization of surface modified flax fibers and their biocomposites with PHB [J]. *Macromolecular Symposia*, 2003, 197(1): 89-99.
- [36] SUN D. Surface modification of natural fibers using plasma treatment: Biodegradable green composites[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2016: 18-39.
- [37] BARRA B N, SANTOS S F, BERGO P V A, et al. Residual sisal fibers treated by methane cold plasma discharge for potential application in cement based material [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 77: 691-702.
- [38] 李国忠, 于衍真, 司志明, 等. 植物纤维增强水泥基复合材料的性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 1997(3): 42-45.
- LI Guozhong, YU Yanzen, SI Zhiming, et al. Study on properties of plant fiber cement-based composite materials with steel slag[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1997(3): 42-45. (in Chinese)
- [39] 王磊, 王海龙, 王培, 等. 表面改性牧草纤维与橡胶粉的耦合作用对水泥胶砂力学性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(10): 3406-3411.
WANG Lei, WANG Hailong, WANG Pei, et al. Coupling effect of surface modified pasture fiber and rubber powder on mechanical properties of cement mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(10): 3406-3411. (in Chinese)
- [40] BILBA K, ARSENE M A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(9): 1488-1495.
- [41] FERREIRA S R, NETO A R S, SILVA F A, et al. The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120770.
- [42] 姜平伟, 方江华, 庞建勇, 等. 植物纤维喷射混凝土力学性能及微观性能分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(8): 137-141.
JIANG Pingwei, FANG Jianghua, PANG Jianyong, et al. Analysis of mechanical properties and micro-properties of plant fiber shotcrete [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(8): 137-141. (in Chinese)
- [43] 徐辉. 植物纤维增强水泥基复合材料的性能研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
XU Hui. Studies on the performance of vegetable fiber reinforced cement-based composites [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese)
- [44] TONOLI G H D, FILHO U P R, SAVASTANO H, et al. Cellulose modified fibres in cement based composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(12): 2046-2053.
- [45] ZHAO L, ZHU S Q, WU H, et al. The improved resistance against the degradation of sisal fibers under the environment of cement hydration by surface coating of graphene oxide (GO) based membranes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124694.
- [46] SILVA E J, MARQUESA M L, VELASCOB F G, et al. A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement based composites—Combined effect of natural latex/pozzolan materials [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2017, 12: 44-51.