

涂覆纤维含量对椰壳纤维水泥基材料性能的影响

黄小琴 董奕凌 陈晓 李淑敏

三亚学院, 中国·海南 三亚 572011

摘要: 椰壳纤维增强水泥基复合材料在隔热、吸音、轻质的建筑材料方向上有一定的应用前景和研究价值。涂覆工艺能够将椰壳纤维加工为涂层纤维, 提高了纤维的韧性与强度, 从而进一步提高水泥基复合材料性能。本实验探究环氧树脂 (EP) 涂层纤维含量因素对椰壳纤维水泥基材料新拌和浆体流动性、表观密度、开孔孔隙率、吸湿性、抗折、抗压强度等性能的影响, 结果表明: 掺入涂层纤维对材料的力学性存在一定程度的优化作用。

关键词: 椰壳纤维; 环氧树脂 (EP); 涂覆处理; 水泥基体; 力学性能

Effect of Surface-Coated Fiber Content on the Properties of Coconut Fiber Cementitious Composites

Huang Xiaoqin, Dong Yiling, Chen Xiao, Li Shumin

Sanya University, China Hainan Sanya 572011

Abstract: Coconut fiber reinforced cementitious composites hold promising application prospects and research value in the fields of thermal insulation, sound absorption, and lightweight building materials. The surface coating process transforms coconut fibers into coated fibers, enhancing their toughness and strength, thereby further improving the performance of cementitious composites. This study investigates the influence of epoxy resin (EP) coated fiber content on the fluidity of fresh mixtures, apparent density, open porosity, moisture absorption, flexural strength, and compressive strength of coconut fiber cementitious materials. Results indicate that incorporating coated fibers provides a certain degree of enhancement to the mechanical properties of the composite.

Keywords: Coconut fiber; Epoxy resin (EP); Surface coating treatment; Cementitious matrix; Mechanical properties

0 引言

椰壳纤维作为一种天然植物纤维, 因其低成本、可再生和优良的力学性能, 近年来在水泥基复合材料中的应用受到广泛关注。然而, 纤维与水泥基体间的界面粘结不足和纤维分散性差等问题限制了其实际应用。表面涂覆处理被认为是改善这些问题的有效方法之一, 而纤维含量则是影响复合材料性能的关键因素。近年来, 国外学者在椰壳纤维增强水泥基材料领域取得了显著进展。Levent Bostanci 等国外学者曾深入严谨的研究了木棉纤维和椰壳纤维掺入混凝土后在不同养护条件下的性能对比, 最终发现木棉纤维比椰壳纤维具有更显著的孔改性效果, 几入通过整合天然纤维到混凝土混合物的实验研究可促进建筑行业的可持续发展^[1]; Manota Jazth D. 等学者研究了“使用生椰子壳纤维与偏硅酸钠合成的椰壳 - 二氧化硅复合材料 (CSC) 增强混凝土机械性能及其自修复特性”^[2]。他们发现 CSC 的加入提高了混凝土的热稳定性和机械性能, 特别是在损伤后的抗压和抗拉强度愈合能力上超越了对照试样, 并开

发了一种合成方法来制备椰子壳纤维 - 二氧化硅复合材料并展示了可行的椰子壳废弃物升级回收方法。Hanlin Qiao 等人在了解“环氧树脂涂层钢筋与混凝土协同工作粘结机理”的基础上结合其性能参数, 总结了“国内外环氧树脂涂层钢筋与混凝土粘结锚固”^[3]的研究工作, 为环氧树脂涂层钢筋在建筑结构中的应用提供了帮助和参考。在椰壳纤维改性预处理研究方面, 国内学者提出了多种预处理方法, 例如潘宜健等国内研究学者对椰壳纤维进行表面改性, 通过碱处理和硅烷处理等改性方式的研究, 探究了不同改性方式对纤维水泥基材料韧性影响机制。结果表明, “煮沸处理 2h 或碱处理 5h 后, 椰壳纤维的吸水率分别降低了 40.25%、48.56%, 拉伸强度分别降低了 3.26%、5.54%, 弹性模量分别降低了 8.71%、3.32%, 表面静摩擦力分别提高了 209.41%、262.35%”^[4]。王春红等研究人员则针对椰竹类纤维生物基复合材料的制备难题, “通过研发特殊设备、模具及智能机器人生产控制系统, 并改进天然橡胶粘合剂工艺, 实现了从送料到产品成型的全自动化和智能化生产,

替代了传统手工生产”^[5]。唐振等研究人员在“基于椰壳纤维-基体界面调控的水泥基材料阻尼性能研究”中就得出：“通过氧碱法改性椰壳纤维能够构造纤维-基体局部脱粘界面，通过纤维-基体局部脱粘界面的摩擦滑移以及纤维脱粘部分的弹塑性变形来耗散振动能，进而提高椰壳纤维对水泥基材料阻尼性能的改善效果”^[6]。此外，著名的DKTEs纺织与工程研究所也经过实验研究表明：“煮沸的椰壳纤维非织造材料增强水泥板在耐热性、抗弯强度和抗压强度等方面非常优秀”^[7]。涂覆处理也能有效改善椰壳纤维在水泥基体中的分散性和界面粘结性能；纤维含量存在最优范围，通常在1%~3%之间，过高会导致性能下降；涂覆工艺的优化可以适当提高纤维含量的上限，本实验探究环氧树脂（EP）涂层纤维含量因素对椰壳纤维水泥基材料性能的影响规律，以期推动涂覆椰壳纤维水泥基材料的实际应用。

1 试样制备

水泥为普通硅酸盐水泥P·O 42.5；椰壳纤维为天然纤维，生产单位为三亚力源椰糠厂；河砂的细度模数为3.44，I区粗砂，堆积密度为1450 kg/m³；环氧树脂（EP）由A、B两种组分组成，A组分环氧树脂与聚酰胺树脂成分比为4:1；B组分环氧树脂与固化剂成分比为1:1。拟定掺入涂覆前纤维重量分别为5g、10g、15g，共计30g纤维。将这30g纤维分为30组，每组1g，涂覆并记录涂覆前后的重量，最终确定涂覆后纤维增加的重量比为2.08，如图1所示：

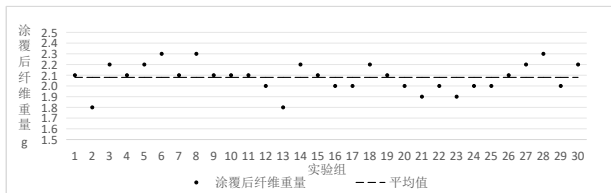


图1 涂覆后纤维重量数据分布图

经过配比设计材料选用1 000g水泥、510g水、2910g砂，按涂覆前纤维重量分别为0g、5g、10g、15g，涂覆后纤维重量0g、10.4g、20.8g、31.2g，分为4组，研究环氧树脂（EP）涂层纤维含量因素对椰壳纤维水泥基材料新拌和浆体流动性、表观密度、开孔孔隙率、吸湿性、抗折、抗压强度等性能的影响。

2 材料的性能分析

2.1 材料新拌和浆体和易性分析

椰壳纤维增强水泥基复合材料的浆体流动性分析如图2所示。

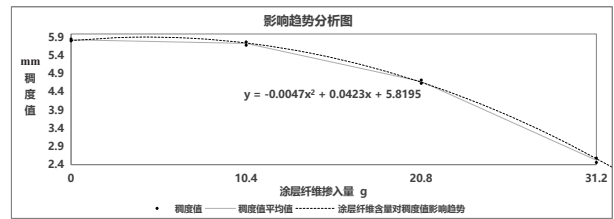


图2 稠度影响趋势分析图

涂覆椰壳纤维水泥基复合材料新拌和浆体稠度值随着覆后纤维含量增加而降低。这可能是因为涂覆椰壳纤维在浆体中随机分布时，形成三维网络骨架，限制了水泥颗粒的迁移和重排，其产生的空间占位效应导致物理阻碍增强，流动性呈现非线性衰减。

2.2 材料表观密度分析

涂覆椰壳纤维增强水泥基复合材料的表观密度分析如图3所示。

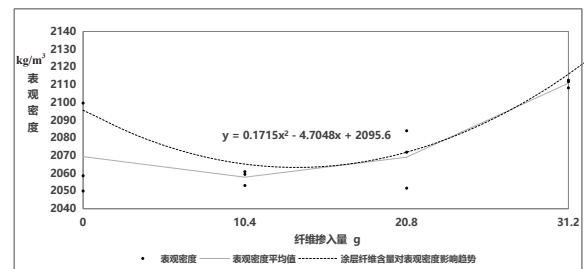


图3 表观密度影响趋势分析图

从图3中可以看出，当涂层椰壳纤维掺量在20.8g以内，椰壳纤维水泥基材料的表观密度变化不大。当涂层椰壳纤维掺量达到31.2g，椰壳纤维水泥基材料的表观密度影响呈现出明显上升趋势。综合而言，纤维含量与材料整体表观密度的关系受以下三个因素影响，一为涂层纤维的密度要远小于椰壳纤维水泥基材料基体的密度，加入涂层纤维代替了部分水泥基材料，导致整体的表观密度降低；二为纤维越多，替代基体体积越大，孔隙率降低，表观密度上升；三为纤维越多，引入纤维与基体的界面缺陷越多，导致孔隙率上升，材料整体表观密度下降。

2.3 材料开孔孔隙率、含水率分析

涂覆后纤维含量对椰壳纤维水泥基复合材料试块开孔孔隙率、含水率的影响趋势分析如图4、图5所示：

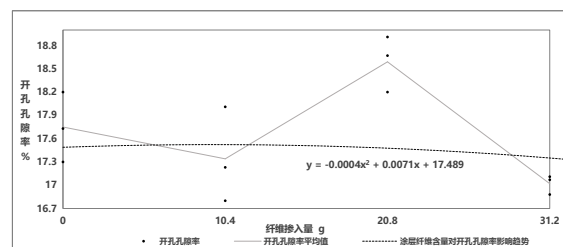


图4 开孔孔隙率影响趋势分析图

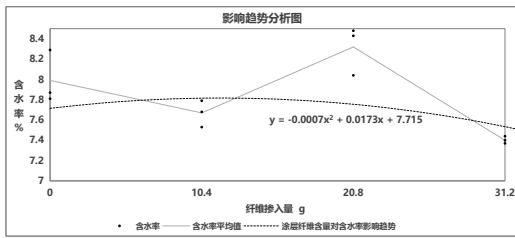


图5 吸湿性影响趋势分析图

从图 4、5 中可以看出，当掺入量较多或较少时，涂层纤维均会降低椰壳纤维水泥基材料中的开口孔隙率，但当掺入量达到一定程度时，开口孔结构占比反而会增加。这可能是纤维引入孔隙与纤维替代基体孔隙共同作用的结果；低掺量阶段因为少量的涂层纤维填充了部分水泥基材料的原生孔隙，此时纤维引入孔隙的能力略低于纤维填充孔隙的能力，从而导致开口孔隙率小幅度降低；中掺量阶段则可能是因为较多的纤维难以被椰壳纤维水泥基材料完全包裹，进而导致纤维引入孔隙的能力大大增强，此时纤维引入孔隙的能力远高于纤维填充孔隙的能力，因此开口孔隙率会大大提高；而高掺量纤维替代基体体积更大，减少孔隙的作用占主导地位，材料整体孔隙率下降。涂层纤维对吸湿性的影响由材料的开口孔隙率决定，故材料整体的含水率变化趋势与孔隙率变化趋势一致。

2.4 材料力学性能分析

2.4.1 抗压强度

两种养护条件下的涂覆椰壳纤维水泥基材料试块抗压强度的对比如图 6 所示。

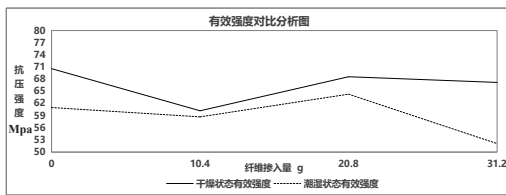


图6 抗压强度有效强度对比分析图

从图 6 中可以看出，随着涂层椰壳纤维掺量的增多，两种养护条件下的涂覆椰壳纤维水泥基材料抗压强度均呈现先降低后增高再次降低的趋势。增加养护时间，抗压强度有一定幅度的增长。这可能是因为当纤维掺入量较少时，没有形成纤维网络，破坏基体连续性，导致整体的抗压强度少许降低；而当纤维掺入量继续增加时，涂层纤维形成纤维网络增强基体材料，抗压强度增大。当涂层椰壳纤维掺量达到 31.2g，过量纤维引入过多孔隙，基体弱化效果强于纤维网络增强效果，导致抗压强度转而减弱，但延长龄期抗压强度增长明显，有可能是长龄期条件下基体强度增强导致的和多纤维起到更好的协同作用。

2.4.2 抗折强度

两种养护条件下的涂覆椰壳纤维水泥基材料试块抗折强度的对比如图 7 所示。

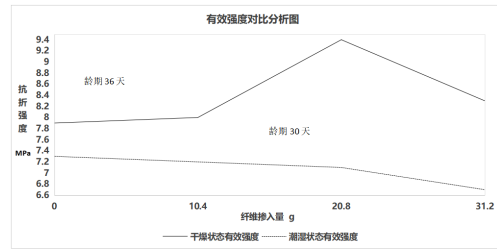


图7 抗折强度有效强度对比分析图

掺入涂覆椰壳纤维后材料的抗折强度没有明显下降，反而在延长养护期后有明显上升趋势，当涂层椰壳纤维掺量达到 20.8g，干燥状态的涂覆椰壳纤维水泥基材料的抗折强度增加明显。抗折强度主要受材料的组成、界面结合、孔隙结构以及纤维分布的影响。涂层纤维表面的光滑平整，在潮湿状态下，可能与水泥基体的粘结能力较差，导致形成了弱界面过渡区，进而导致应力传递效率降低，裂纹易沿界面扩展，材料抗折强度降低，当延长龄期后水泥基体强度增长，干燥之后，纤维与水泥基体的界面结合增强，共同导致该状态下，材料的整体抗折强度升高，且在纤维掺量为 20.8g 时候抗折强度最高。

2.5 材料破坏形貌分析

椰壳纤维水泥基复合材料的抗压、抗折破坏形貌如图 8 所示：

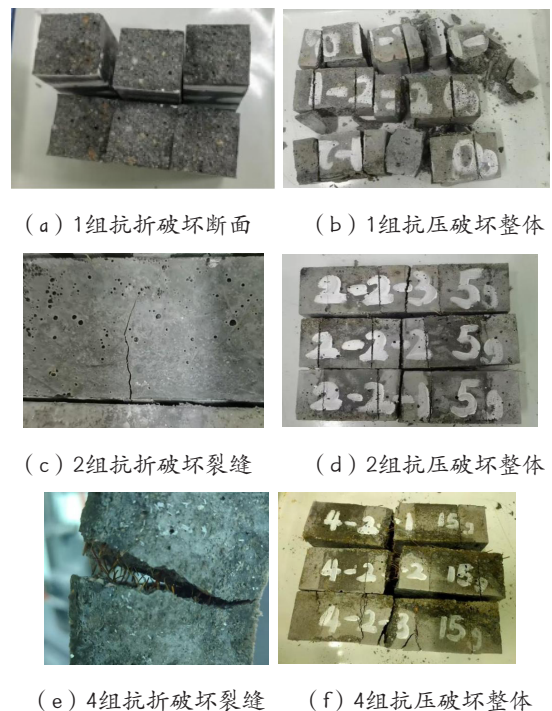


图8 材料的破坏形貌图

如图8(a)所示,未加纤维的试块抗折破坏后完全断裂,为典型的脆性断裂。试块抗压破坏后,裂缝多且贯通试块,且伴随大量碎渣,材料脆性较高(8(b))。当纤维掺入量为10.4g时,材料破坏后的试块并未完全断裂,出现了一条细小裂缝,仍能保持一定的整体性,断面出现少量纤维拔出(图8(c))。可见,试块抗折破坏时断裂模式仍为脆性断裂,但纤维的存在可能使得裂缝的扩展受到抑制。试块抗压破坏后,裂缝虽多且贯通试块,但产生碎渣极少,裂缝的发展相对未掺入涂层纤维的试块较为缓慢。可见椰壳纤维的存在,可能能够阻止裂缝的快速贯通。(图8(d))。当纤维掺入量为31.2g,试块破坏后保持整体性(图8(e)),断裂过程中几乎没有产生碎渣,断面出现大量纤维拔出。表现出一定的伪韧性断裂。抗压破坏后,裂缝为多道较短的细小裂缝交叉形态(8(f)),试块仍为整体,且几乎不产生碎渣,掺入过量的纤维能明显优化材料脆性破坏特征。

3 结语

椰壳纤维水泥基复合材料新拌和浆体稠度值随着涂覆后纤维含量增加而降低。涂层纤维掺量对椰壳纤维水泥基材料的表观密度影响趋势先降后升,开孔孔隙率在纤维掺入量为31.2g达到峰值。涂覆处理后的椰壳纤维水泥基复合材料抗压和抗折强度有峰值,且不次于基体强度。掺入涂层纤维对材料受损破坏时的状态影响较大,能明显优化材料脆性破坏特征。综合来看,该材料在轻质隔墙上有较好的运用前景,可开发出在强度不显著下降的情况下,具有较好韧性的轻质隔墙材料。

参考文献:

[1] Susurluk G, Sarikaya H, Bostanci L. Utilization

of natural kapok and coconut fiber in thermally insulated sustainable concrete design[J].Environmental Science and Pollution Research,2024,(prepublish):1-22.

[2] D. J M, Salvador R A ,P. C L .Synthesis of Coconut (Cocos nucifera) Husk Fiber-Silica Composite as Concrete Additive[J].Construction Technologies and Architecture,2023:519-26.

[3] Qiao H, Kang H,Li Q, et al.A Review on The Research and Application Development of Adhesive Properties of Epoxy Resin Coated Steel Bar and Concrete[J].World Scientific Research Journal,2024,10(6).

[4] 潘宜健,王政,刘雨时.预处理椰壳纤维对水泥基材料性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2022,(05):61-66.

[5] 王春红.椰竹类纤维生物基复合材料自动化生产关键技术及应用.天津市.天津生隆纤维材料股份有限公司,2022-08-10.

[6] 唐振.基于椰壳纤维-基体界面调控的水泥基材料阻尼性能研究[D].哈尔滨工业大学,2023.

[7] P.M.Katkar, C.A.Patil ,P.A.Khude, et al.椰壳纤维/水泥复合材料[J].国际纺织导报,2013,41(02):56+58-59.

基金项目:海南省高等学校科学研究项目,椰壳纤维增韧轻质水泥基新型复合材料设计与开发研究,编号:Hnky2022-42。

作者简介:黄小琴(1987-),女,汉族,广东汕头人,讲师,硕士(硕士研究生),研究方向:新型建筑材料。