

椰子纤维 MPC 复合水泥基材料受压性能试验研究

吴 辉¹, 黄 旻¹, 张力文¹, 谢柱坚², 张俊平²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 磷酸镁水泥(Magnesium Phosphate Cement, 简称 MPC)是一种早期强度高、凝结硬化快、干缩变形小、粘结能力强的胶凝材料, 可用于高架桥、机场跑道和市政主干道的快速修补等方面。然而, MPC 存在韧性差、抗裂性能差的缺点, 严重限制了 MPC 在实际修复工程中的应用。经前期研究发现, 在 MPC 中掺入椰子纤维(Coconut Fiber, 简称 CF)能有效提高其抗裂性能, 然而, CF 对 MPC 力学性能的影响规律和作用机理尚未清晰, 因此, 需要对椰子纤维加固磷酸镁水泥(Coconut Fiber Reinforced Magnesium Phosphate Cement, 简称 CF-MPC)这一新型生态复合材料进行系列研究。本文主要研究不同体积掺量(1%、2%、3%、4%)CF 在不同养护龄期(7 d、28 d)下对 MPC 静态受压性能的影响。首先, 通过静态压缩试验分析了椰子纤维掺量和养护龄期对 CF-MPC 试件的破坏形态、抗压强度、应力-应变曲线和能量吸收性能的影响规律; 其次, 通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, 简称 SEM)和 X 射线衍射(X-ray diffraction, 简称 XRD)分析, 测试了不同 CF 掺量在不同养护龄期下, CF-MPC 微观结构和水化组分的变化规律, 从本质上探明了 CF 对上述宏观力学性能的影响机理。结果表明: 在 7 d、28 d 两个养护龄期下, CF 掺量对 MPC 静态抗压性能的影响相似。当 CF 掺量高于 1% 时, MPC 脆性明显降低, 且 CF 掺量为 2% 时, 试件破坏形态由脆性变为一定的延性; CF-MPC 试件抗压强度、弹性模量和割线模量随椰子纤维掺量的增加而略有降低, 但随龄期的增长而增大; 能量吸收随着 CF 掺量的增加及龄期的增长均呈增大趋势, 且当 CF 掺量为 4%、龄期为 28 d 时能量吸收达到最大; 微观分析中, 随着 CF 掺量的增长, 主要水化产物六水磷酸钾镁($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 简称 MKP)逐渐减少, 而随着龄期的增长 MKP 逐渐增加。

关键词: 桥梁加固; 抗压性能; 磷酸镁水泥; 椰子纤维; 养护龄期; 能量吸收

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0257-10

Experimental study on compressive performance of coconut fiber MPC composite cement-based materials

WU Hui¹, HUANG Min¹, ZHANG Liwen¹, XIE Zhujian², ZHANG Junping²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Magnesium phosphate cement (MPC) is a kind of cementing material with high early strength, quick setting and hardening, small drying and shrinkage deformation, and strong bonding ability, which can be used for rapid repair of viaducts, airport runways, and municipal main roads. However, some of its defects, e. g., the low toughness and poor crack resistance, become obstacle to further applications. Previous study has shown that the anti-cracking performance of MPC can be significantly improved by adding appropriate amount of coconut fiber (CF). However, the effect law and action mechanism of CF on the mechanical behavior of the MPC are not yet clear. Thus, it is necessary to carry out a systematic study on coconut fibre reinforced magnesium phosphate cement (CF-MPC), which is a new ecological composite material. In this paper, the effects of different CF volume dosages(1%, 2%, 3%, 4%) at different curing ages(7 d, 28 d) on the static compression performance of MPC has been studied. Firstly, a uniaxial static compression test was conducted to analyze the influence of CF dosage and curing age on the failure mode, compressive strength, stress-strain curve, and energy absorption performance of CF-MPC. Secondly, the microstructure and hydration components of CF-MPC with different CF dosage at different

收稿日期: 2021-04-01

修改稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(551608137); 广州市市校联合项目基础与应用基础研究基金项目(202102010431); 广州大学全日制研究生基础创新基金资助项目(2020GDJC-M36)、广州大学大学生创新训练基金资助项目(202111078042)

第一作者: 吴辉(1997—), 男, 硕士, 主要从事桥梁新结构、新材料及复合材料性能的研究。E-mail: whi1223@163.com

通信作者: 张力文(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事桥梁新结构、新材料及复合材料性能的研究。E-mail: lwzhang@gzhu.edu.cn

curing ages were tested and analyzed by means of scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD), and the influence mechanism of CF on the macroscopic mechanical properties of MPC was revealed. The results showed that the effects of CF dosage on MPC static compression performance at the curing ages of 7 d and 28 d were similar. When CF dosage was higher than 1%, the brittleness of MPC was significantly reduced, and when CF dosage was 2%, the failure mode of the specimen changed from brittleness to a certain ductility. The compressive strength, elastic modulus and secant modulus of CF-MPC specimens decreased slightly with the increase of coconut fiber content, but increased with the increase of age. Energy absorption increased with the increase of CF dosage and curing age, and reached the maximum when CF dosage was 4% and curing age was 28 d. In microscopic analysis, the main hydration product, potassium magnesium phosphate hexahydrate (MKP), gradually decreased with the increase of CF dosage, while MKP gradually increased with the growth of curing age.

Key words: bridge reinforcement; compressive properties; magnesium phosphate cement; coir fiber; curing age; energy absorption

磷镁水泥(MPC)是一种由磷酸盐、氧化镁和硼砂等混合制备而成的新型无机胶凝材料,属于化学粘结陶瓷类^[1-2],具有水化速度快、早期强度高、耐磨及抗冻性好等优点^[3].与普通硅酸盐水泥相比,其具有良好的粘结强度且干缩比远小于普通硅酸盐水泥砂浆,因此,在混凝土修补和养护工程中具有良好的应用前景^[4-5].但是,与硅酸盐水泥材料相似,MPC脆性大、延性弱的缺点限制了它的工程应用范围.为了克服这些缺点,国内外学者主要通过添加纤维的方法,如钢纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维和聚丙烯纤维等,以提高其延性.Feng等^[6]发现掺入1.6%的微钢纤维可以对MPC复合材料的抗压强度提高95.7%.冯虎等^[7]发现在MPC中掺入微钢纤维抗压强度和韧性显著提高,且随着微钢纤维掺量的提高,抗压强度也随之提高.Ahmad等^[8]发现了MPC砂浆中加入0.5%玄武岩纤维和10%硅灰粉后,MPC抗压强度提高了47.4%且拥有优越的延性.刘雪敏等^[9]通过试验研究发现在MPC中掺入不超过2 kg/m³的短切玄武岩纤维有助于提高抗压强度,且掺量为1.5 kg/m³时抗压强度达到最大值40.51 MPa.Fang等^[10]证实玻璃纤维可以有效防止MPC开裂,当掺入4%的3 mm玻璃纤维时,粘结强度最大为1.5 MPa.单春明等^[11]发现在MPC中掺入长度15 mm、体积分数1%聚丙烯纤维时,其水泥砂浆抗压强度最大,为93.2 MPa,且其延性和耗能性能都有较大提高.然而,以往添加的纤维多为人造纤维,这些纤维在生产和废物处理过程中会导致二氧化碳的过量排放和能源消耗,从而带来一系列环境问题^[12].因此,有必要寻找一种环保的材料替代人造纤维来改善这些问题.与人造纤维相比,椰子纤维作为一种天然植物纤维,具有完全可生物降解、可利用性强、

可再生、环境友好等优点^[13-14].除了这些显著的环保特性外,CF在天然纤维中具有很好的韧性^[15-17],Gautam Basu等^[18]通过研究发现:椰子纤维断裂强度达到11.25 cN/tex,断裂伸长率为21.5%,具有良好的断裂韧性及延伸性.当水泥基体在受到外加荷载时,掺入的纤维可以吸收一部分能量,帮助基体承受荷载,阻碍基体中微裂纹的扩展^[19].尽管椰子纤维和大多数植物纤维一样抗碱性较弱,但混凝土并非强碱物.根据目前对椰子纤维水泥基材料的短周期研究发现水泥基材料碱性对植物纤维影响不大.因此,椰子纤维在提高水泥复合材料的韧性和压缩性能方面具有很大潜力.Thanushan等^[20]发现CF可以提高水泥砌块的剩余强度、延性和能量吸收性能.Li等^[21]发现CF增强胶凝复合材料具有更好的抗弯强度、更高的吸能能力和延性.Zainorizuan等^[22]发现在泡沫混凝土中掺入适量椰子纤维能够显著提高其抗压强度.Nabiha等^[23]也发现在轻质泡沫混凝土中加入椰子纤维可以显著改善其脆性同时改变其破坏模式,并增强抗压性能和抗裂性能.Subramanian等^[24]发现在自密实混凝土中掺入经沸水处理过的椰子纤维可提高23.48%的抗压强度.Ali等^[15]发现在碳纤维混凝土中掺入一定量的椰子纤维能够提高其抗压强度、抗压韧性、断裂模量和弯曲韧性.鉴于对现有的椰子纤维对普通混凝土抗压强度、延性及能量吸收的影响研究发现,CF有望改善MPC的延性和能量吸收性能.目前,国内外关于椰子纤维磷酸镁水泥的研究十分有限,多数集中于CF普通水泥砂浆与混凝土或是人造纤维磷酸镁水泥,因此,有必要对CF-MPC的力学性能展开专项研究,探明这种新型水泥基复合材料的力学性能,以便在实际工程中的应用.本团队经过前期研究探明了椰子纤维掺量、长度和试

件养护龄期对 MPC 抗弯性能的影响^[25-27]。基于此,本文主要通过静态压缩试验研究不同 CF 掺量和不同养护龄期对 MPC 静态抗压性能的影响规律,并进行 SEM、XRD 微观分析从微观上研究 CF 掺量及养护龄期对 MPC 静态抗压性能的影响机理。

1 试验内容及方案设置

1.1 实验内容与方案

本试验通过对不同养护龄期下不同 CF 掺量的 MPC 试件进行静态压缩试验,研究养护龄期及 CF 掺量对 MPC 静态抗压性能的影响,并通过微观分析印证力学试验现象。试验内容主要分为三部分:

- (1)通过分析不同 CF 掺量下的破坏形态、抗压强度、应力-应变曲线和能量吸收性能,研究椰子纤维掺量对 MPC 静态抗压性能的影响规律;
- (2)通过分析不同养护龄期下的破坏形态、抗压强度、应力-应变曲线和能量吸收性能,研究养护龄期对 MPC 静态抗压性能的影响规律;

(3)结合场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, 简称 SEM)、X 射线衍射(X-Ray diffraction, 简称 XRD)等现代微观测试技术,研究 MPC 在不同 CF 掺量和不同养护龄期下微观结构及水化成分的变化,揭示其对 MPC 静态抗压性能的影响机理。

试验方案采用 5 个 CF 掺量(0、1%、2%、3%、4%)和 2 个养护龄期(7 d、28 d),对 MPC 试件进行静态压缩试验,研究不同 CF 掺量在不同养护龄期下对破坏形态、抗压强度、应力-应变行为和能量吸收的影响。试验按 GB/T17671—1999《水泥砂浆强度试验方法》规范进行,共选用 30 个试件,试件尺寸为 40 mm×40 mm×70 mm,如图 1 所示。根据龄期、纤维掺量不同将试件分为 10 组,各组试件按“纤维掺量-养护龄期”编号,每组有三个试件。例如,CF3-D7 是 CF 掺量为 3%,养护龄期为 7 d,用于研究其静态抗压性能的试件。表 1 给出了试件的配合比。

表 1 试件配合比
Tab. 1 Specimen mix ratio

组号	MPC 基体粉末成分(质量比)			(B/M ¹)/%	(W/BM ²)/%	养护龄期/d	纤维体积掺量/%
	氧化镁	磷酸二氢钾	粉煤灰				
CF0-D7	1.0	0.68	0.25	10	15	7	0.0
CF0-D28						28	
CF1-D7						7	1.0
CF1-D28						28	
CF2-D7						7	2.0
CF2-D28						28	
CF3-D7						7	3.0
CF3-D28						28	
CF4-D7						7	4.0
CF4-D28						28	

注:¹B/M 为硼砂与氧化镁的质量比;²W/BM 是水与粘结剂的质量比混凝土立方体强度 f_{cu} 的单位均为 N/mm²。

如图 1 所示,静态压缩试验参照 ASTM C109 标准使用 MTS-E45.305 万能试验机进行。首先,以 1.0 mm/min 的速率预加载试件,预加载至 0.01 kN 结束。然后以 2.0 mm/min 的加载速率开始加载,同时通过安装在受压测上的传感器在计算机上记录荷载-位移曲线数据。当加载力下降到峰值荷载的 50%时,试验停止,试件失效,并使用高清相机捕捉试件的破坏形态。随后在破坏的试件中取 4 mm×2 mm 的 MPC 薄片,同组配合比试件均取 1 个,试验龄期控制为 7 d、28 d。采用 LEO1530VP 型场发射扫描电子显微镜观察样品的微观结构形貌,同时采用 PW3040/60 型 X 射线衍

射仪测定水泥基体主要组分及含量。

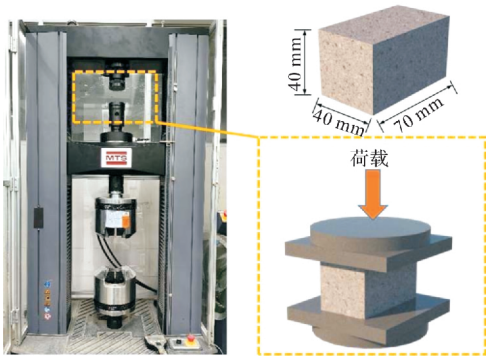


图 1 试件及压缩试验仪器
Fig. 1 Specimens and compression test instruments

根据标准规范 ASTM C109-16^[28] 计算每个试件抗压强度,按公式(1)计算.

$$f_{cu} = \frac{P_u}{A} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为抗压强度 (MPa); P_u 为最大荷载 (kN); A 是受压面积 ($A=2\,800\text{ mm}^2$).

根据标准规范 ASTM C469-14^[29], 采用式(2)计算试件的弹性模量.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量 (GPa); σ_1 为应力且 $\sigma_1 = 0.5\text{ u}\epsilon$ (MPa); σ_2 为应力增加到峰值应力的 40% (MPa); ϵ_2 为纵向应变(对应于应力轴 σ_2).

1.2 实验内容与方案

本试验采用的 MPC 基材组分为重烧氧化镁 (MgO)、磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)、硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、粉煤灰 (Fly ash, 简称 FA)、水, 材料基本配合比见表 2. 氧化镁粉由新密正阳铸造材料公司提供, 平均粒径约为 $45\text{ }\mu\text{m}$, 其化学组分见表 3; 粉煤灰由河南郑州巩义市恒诺涂料有限公司

提供, 其化学成分见表 4; 磷酸二氢钾由南京姜华化玻有限公司生产, 纯度为 99.5%; 硼砂由南京姜华化玻有限公司生产, 含量大于 99.5%. 椰子纤维由江西省佳高诚进出口贸易有限公司提供, 其物理参数及力学性能见表 5.

表 2 MPC 基本配合比

Tab. 2 Basic mix ratio

基础材料用量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)				
氧化镁	磷酸二氢钾	硼砂	粉煤灰	水
1.17	0.80	0.12	0.30	0.34

表 3 氧化镁粉末的化学成分

Tab. 3 Chemical composition of magnesium oxide powder

组分	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	烧失量
质量分数/%	96.25	0.29	1.09	1.18	1.16	0.03

表 4 粉煤灰的化学成分

Tab. 4 Chemical composition of fly ash

组分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	烧失量
质量分数/%	56.74	24.58	6.55	4.87	1.86	5.4
ASTM C618/%		≥ 70		—	—	≤ 6

表 5 椰子纤维的物理参数和力学性能

Tab. 5 Physical parameters and mechanical properties of coconut fiber

直径/ μm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	长度/mm	抗拉强度/MPa	拉伸强度/GPa	断裂伸长率/%
150~350	1 200	10~12	20	128~157	3.86~5.60	21.2~40.7

在试件制备之前对原材料进行前期处理(图 2): 磷酸二氢钾置于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥 30~40 h, 球磨机研磨 6~8 h, 42 目实验室标准筛做过筛处理; 硼砂置于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥 24~30 h, 球磨机研磨 4~6 h, 42 目实验室标准筛做过筛处理; CF 置于洁净水浸泡 30~60 min, 刷子洗涤、刚梳顺直, 重复 5~10 遍, 确保 CF 表面干净, 然后放入 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥箱干燥 24~36 h, 并每隔 2~3 h 翻转一遍. 待完全干燥后取出, 使用恒温水箱沸水煮 2 h, 随即捞出并再放入清水清洗, 直至洗出的水清澈为止. 为去除 CF 表面大量自由水, 再次放入 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥箱, 执行前述干燥过程, 得到本文试验

所需的成品 CF, 最后按照试验方案铡刀短切.

在试件制备(图 3)过程中, 首先, 将磷酸二氢钾、硼砂、粉煤灰干粉放入搅拌机中搅拌约 30 s; 其次, 将氧化镁粉末加入混合物中, 持续搅拌 30 s 至混合均匀, 随后加水搅拌 1 min 成浆体, 再将 CF 加入到浆体中, 快速搅拌 30 s; 最后, 将混合良好的拌合物注入模具, 1 h 后脱模, 在相对湿度 45% ($\pm 5\%$) 和 $20 (\pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$ 的房间中分别养护 7 d 和 28 d. 在试件将要达到养护龄期之前, 使用手磨机、高精度磨床打磨试件, 保证试件上下面平整、平行, 并在试件表面喷涂白漆以便观察试件破坏进程.

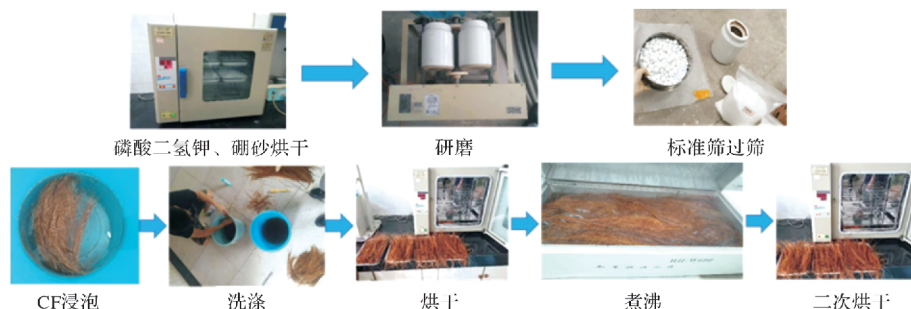


图 2 原材料前期处理

Fig. 2 Preliminary treatment of raw materials

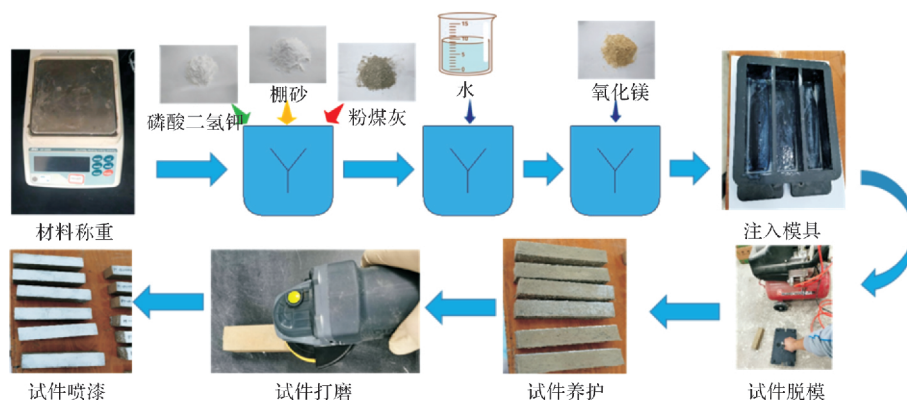


图3 试件制备流程

Fig. 3 Specimens preparation process

2 试件结果与分析

2.1 破坏模式

试件的破坏根据试件延性的增长将破坏模式总结为三种形式(见图4)。I型破坏:当加载力达到峰值时,试件瞬间失效,脆性特征明显。II型破坏:与I型破坏相似,但由于CF连接在裂缝中,试件破坏时未剥离。III型破坏:试件由脆性转变为延性,加载力达到峰值后试件仍能抵抗荷载,试件的裂缝逐渐增多,裂缝宽度小于I型和II型。IV型破坏:与III型破坏类似,但由于CF掺量过高,使其在MPC中分布不均匀,出现纤维团聚现象。

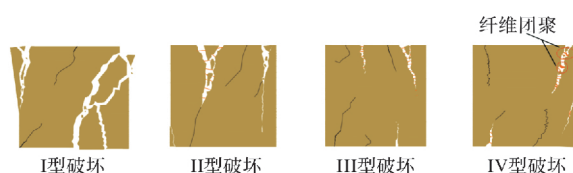


图4 试件破坏模式

Fig. 4 Failure mode of specimen

在养护龄期为7d时,CF0-D7组试件表现为I型破坏,试件破坏形态见图5(a),在受压过程中竖向试件侧表面中间区域首先产生微小裂缝,随着荷载的逐渐增大伴有水泥碎块剥落,当加载到峰值应力时,裂缝扩大并迅速贯通,伴随突发性崩裂,产生较大的压碎破坏声响,边角混凝土压碎明显。从试件的应力-应变曲线,图11(a),也能发现试件达到峰值应力后,试件在微小应变内破坏,应力迅速下降为0;CF1-D7组试件破坏表现为II型破坏,与I型破坏现象基本一致,但由于CF将破裂的碎片连接在一起,试件并没有分裂成独立的碎片;随着试件CF掺量的继续增加(CF2-D7、CF3-D7),试件破坏发展为III型破坏,

试件破坏具有一定的延性特征。在试验过程中,随着荷载的增加,裂纹以一定的速度扩展,并扩展到一定的宽度形成裂缝,可观察到部分CF从MPC基体中拔出,且由于纤维的连接,破裂的碎片并没有分裂成独立的碎片;当纤维掺量超过3%时(CF4-D7)表现为IV型破坏,试件仍具有较大延性,但由于CF掺量过高导致MPC砂浆流动性差、CF分布不均匀,一些缠绕成团的CF出现在裂缝中。

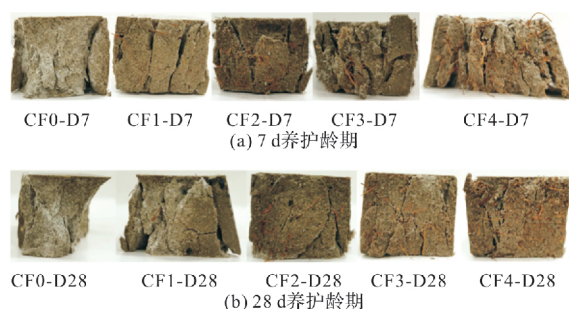


图5 各组试件破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of each sample

当养护龄期为28d时,试件随CF掺量变化的破坏形态与7d养护龄期下试件的破坏形态基本一致。但相同CF掺量的试件中,28d养护龄期的试件比7天养护龄期下的试件脆性都更大,破坏时的裂缝宽度更窄。并且从图11中可观察到28d养护龄期下峰值应力对应的应变均小于7d养护龄期。另外从试件破坏面来看28d养护龄期试件内部孔隙明显小于7d养护龄期试件,28d养护龄期试件内部结构更加致密。

2.2 抗压强度

图6(a)给出了7d、28d养护龄期下各组试件的平均抗压强度(Average Compressive Strength, 简称ACS)。在7d养护龄期下,随着CF掺量从0

增加到4%, 试件 ACS 从 47.97 MPa 持续减小到 45.03 MPa. 在不同 CF 掺量 (1%、2%、3%、4%) 下对应的 ACS 递减率分别为 0.41%、1.61%、4.21%、6.13%, 如图 6(b)所示.

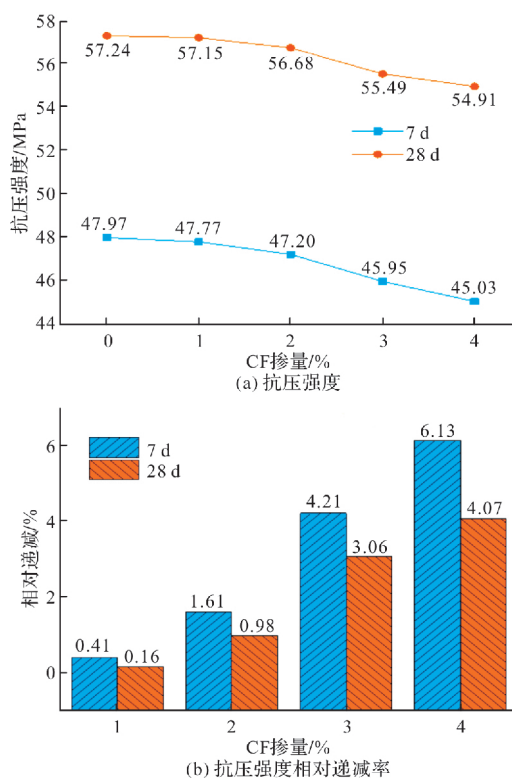


图 6 不同龄期、CF 掺量下 MPC 的抗压强度和相对递减率

Fig. 6 Compressive strength and relative relative rate of MPC at different curing ages and CF dosages

CF 掺量对 MPC 抗压强度的影响可以解释为 MPC 内部发生着如下水化反应.



其中, 主要水化产物六水磷酸钾镁 ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 简称 MKP) 包裹着未反应的 MgO 和 KH_2PO_4 形成的晶体结构如图 7 所示, 是提供 MPC 机械强度的主要部件^[30]. 而图 8(a) XRD 分析中, 同一龄期下 MKP 含量随 CF 掺量的增加而递减, 当 CF 掺量从 0 增加到 4% 时, MKP 的最大衍射强度从 566.12 a. u. 下降到 543.36 a. u., 导致 MPC 抗压强度的损失, 这主要是因为随着 CF 体积掺量的增加, MPC 在 CF-MPC 中的占比相对有所下降, 导致水化产物 MKP 也相对下降; 此外, 通过图 9 MPC 及 CF-MPC 的 SEM 图可发现随着 CF 的掺入, 过高掺量(4%)时会出现 CF 分布不均匀和 CF 团聚的现象, 致使结构整体性降低, CF 周围出现了较大的微裂缝, 导致 MPC 整体抗压性能下降.

当养护龄期为 28 d 时, ACS 随 CF 掺量的变化趋势与 7 d 养护龄期下基本一致. 如图 6(a) 所示, 随 CF 掺量从 0 增加到 4%, ACS 从 57.24 MPa 持续降低到 54.91 MPa. 在不同 CF 掺量 (1%、2%、3%、4%) 下对应的 ACS 相对递减率分别为 0.16%、0.98%、3.06%、4.07%, 相比 7 d 养护龄期的相对递减率较小. 这主要是因为 28 d 养护龄期下 MPC 水化反应更充分, MPC 基体内部和 MPC 与 CF 之间粘结力均增强, 未掺 CF 的 MPC 抗压强度基数较大, 因此 CF 对 MPC 抗压强度缩减的影响较小. 而如图 6(a) 所示, 当 CF 掺量相同时, 试件抗压强度随龄期增长明显增大, 这主要是因为 28 d 养护龄期下试件水化反应更加充分, 产生更多 MKP 包裹的晶体结构, 提高了抵抗外部压力的能力.

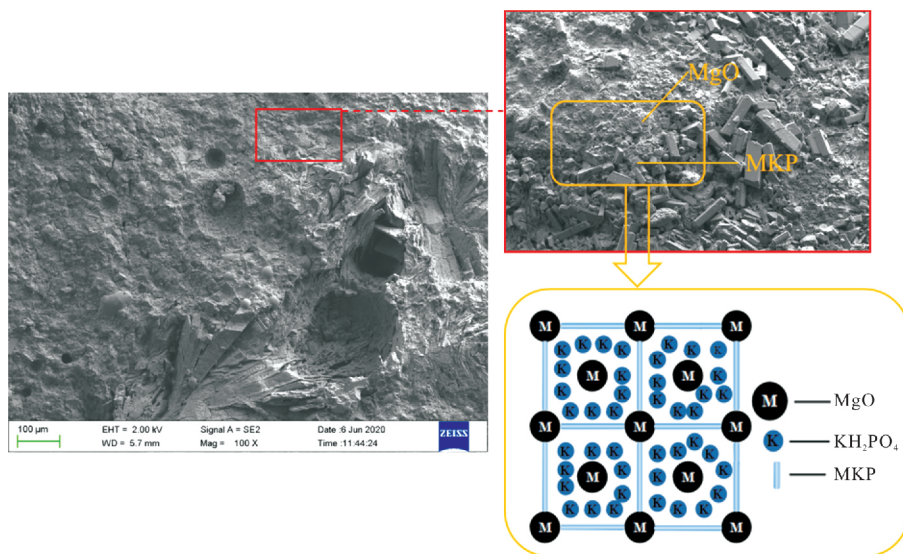


图 7 MPC 微观形貌及组成

Fig. 7 Microstructure and composition of MPC

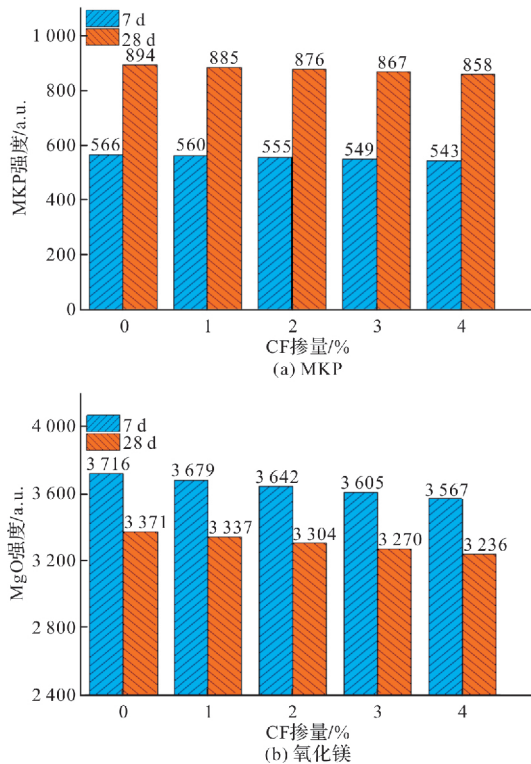


图 8 不同龄期、CF 掺量下 MKP 和氧化镁 XRD 最大峰值

Fig. 8 XRD maximum intensity of MKP and magnesium oxide at different ages and CF dosages

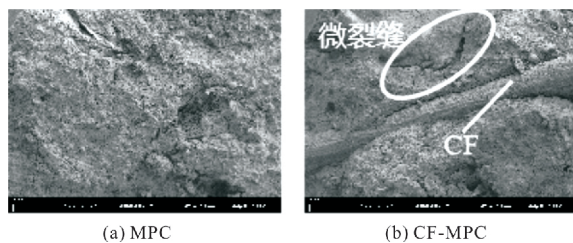


图 9 MPC 与 CF-MPC 的 SEM 图

Fig. 9 SEM diagram of MPC and CF-MPC

2.3 应力-应变

如图 10 所示, 试验得到的应力-应变曲线可总结分为三个阶段: 近似弹性阶段($O \sim A$)、裂纹稳定扩展阶段($A \sim B$)和软化下降阶段($B \sim C$, $B \sim D$)。根据应力-应变曲线可得到各个阶段的弹性模量。当 MPC 中不掺 CF 或者掺量较少(1%)时, 软化下降阶段表现为 $B \sim C$, 试件如本文 2.1 所述试件表现为明显的脆性特征。而随 CF 掺量的增加, 应力-应变软化下降阶段表现为 $B \sim D$, 这主要得益于椰子纤维的掺入改善 MPC 的延性。

图 11(a)为 7 d 养护龄期下不同 CF 掺量试件的应力-应变曲线, 所有试件的应力-应变曲线在弹性阶段($O \sim A$)相似, 都可以看作是一个近似线性上升阶段。如图 12(a)所示, 随着 CF 掺量从 0 增

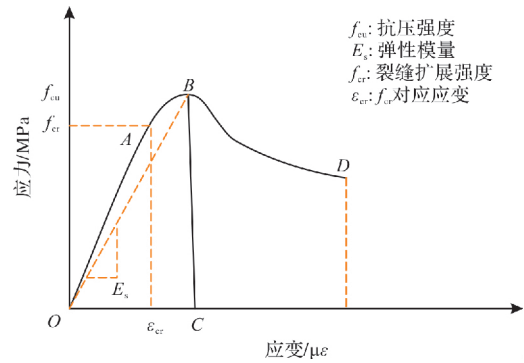


图 10 应力-应变曲线构型

Fig. 10 Stress-strain curve configuration

加到 4%, 切线弹性模量(E)从 11.06 GPa 下降到 7.56 GPa。根据复合材料理论^[31], 较低模量的 CF 掺入 MPC, 使整体弹性模量降低。随着载荷的增加, 应力增大到 A 点, 裂纹处局部应力超过了基体局部的抗裂能力, 基体中出现了一些微小裂纹。进入下一阶段($A \sim B$)后, 尽管弹性模量随着应力的增加而逐渐下降, 但由于基体间的粘结力和 CF 与 MPC 之间的“桥联效应”(图 13)未达到极限, 基体承载力仍在增大。此外, 从图 11(a)中可以看出, 随着 CF 掺量的增加, $A \sim B$ 阶段对应的应变范围也在增加, MPC 中裂缝的开展被延缓。割线模量(E_s)的变化也可以用来表现 CF 掺量对微裂纹的限制作用。如图 12(b), CF 掺量从 0 增加到 4%, 7 d 养护龄期下 E_s 由 10.50 GPa 减少到 7.11 GPa。

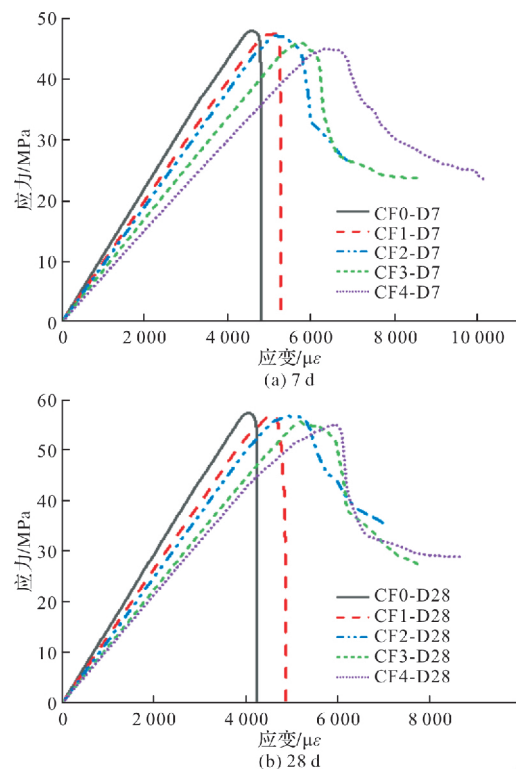


图 11 不同龄期、CF 掺量下应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves at different curing ages and CF dosages

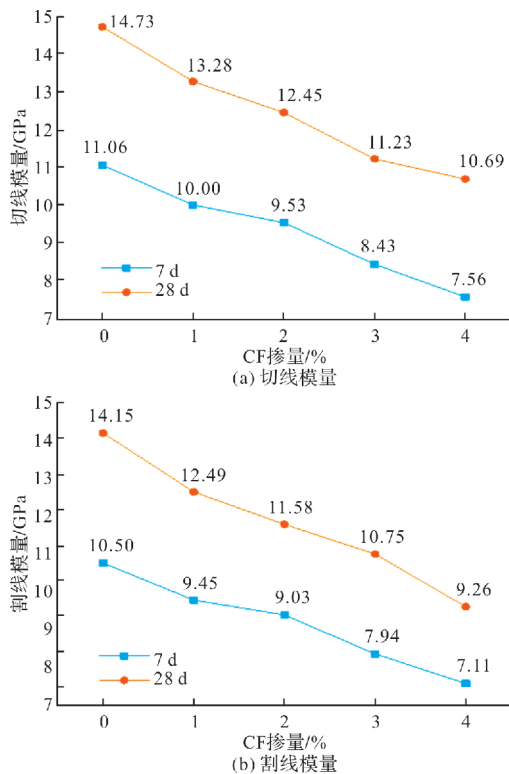


图 12 不同龄期、CF 掺量下 MPC 的切线模量和割线模量
Fig. 12 Tangent modulus and secant modulus of MPC at different curing ages and CF dosages

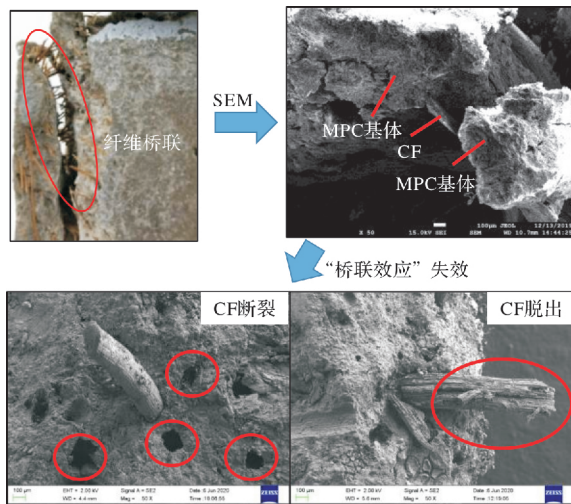


图 13 “桥联效应”及其失效形式
Fig. 13 “Bridge effect” and its failure forms

当曲线达到峰值应力 B 点后, 试件进入软化阶段。这个阶段应力-应变曲线产生了不同变化: 试件 CF 掺量为 0 和 1% 时, 曲线在极小的应变范围内应力急剧下降到点 C, 试件破坏; 当 CF 掺量超过 1% 时, 试件应力缓慢下降到点 D, 试件表现出更大的极限应变且仍有较大残余强度。试件软化阶段的差异主要是因为 CF 掺量的不同, CF 掺量较少时(在本研究中小于 1%), “桥联效应”较弱, CF 对 MPC 应力-应变行为的影响可以忽略不

计。从试件破坏面可以看出, CF1-D7 组试件受压过程中大部分 CF 迅速脱出, 裂纹迅速扩展, 直至试件破坏。随着掺量的增加, 裂纹所在截面的 CF 数量增加, 使得“桥联效应”增强, 限制了裂纹的扩展。图 11(b)为 28 d 养护龄期下不同 CF 掺量试件的应力-应变曲线, 其整体变化趋势与 7 d 养护龄期下相似, 都是经过近似弹性阶段(O~A)后呈现出了较为明显的差别, 随荷载的逐渐增加达到峰值应力, 低于 1% CF 掺量的试件发生了脆性破坏, 应力突变降至 0, 而高于 1% 掺量试件仍能承受一定荷载, 这主要是一定掺量的 CF 能够增强 CF 与 MPC 之间的联系, 使试件具有了一定的延性。

2.4 能量吸收

图 14 为 7 d、28 d 养护龄期下不同 CF 掺量试件的能量吸收情况, 能量吸收定义为图 7 所示的应力-应变曲线下面积的应变能。在本研究中, 为计算 O-B-D 阶段所包围的面积, D 点的应变限制在 7 000。从图 14(a)可清晰观察到, 7 d 养护龄期下, 随着 CF 掺量从 0 增加到 4%, 能量吸收从 124.65 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 递增到 270.99 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在不同 CF 掺量(1%、2%、3%、4%)下对应的能量吸收递增率分别为 9.3%、51.4%、79.1%、117.4%, 如图 14(b)所示。

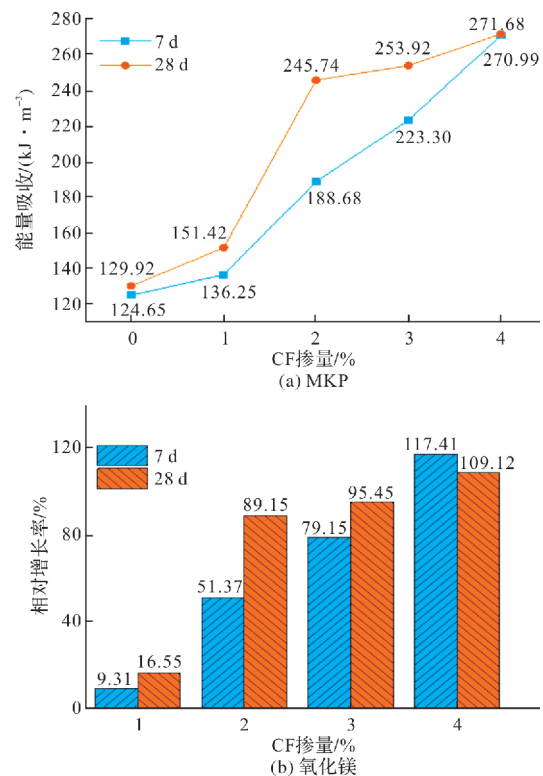


图 14 不同龄期、CF 掺量下 MPC 的能量吸收和相对增长率
Fig. 14 Energy absorption and relative growth rate of MPC at different curing ages and CF dosages

随 CF 掺量增加能量吸收递增显著主要是因为 2.3 中提到的 MPC 基体与 CF 之间的“桥联效应”增强。如图 13 所示,加入 CF 后基体之间的联系增强,这主要得益于其内部晶体产物与 CF 的连接。若基体中裂纹持续发展,CF 会脱出基体或断裂,且无论是裂纹的形成、CF 的脱出或断裂都会造成能量消耗,并随着 CF 掺量的增加,“桥联效应”随之增强,能量消耗也会更大。

28 d 养护龄期下,其整体变化趋势与 7 d 养护龄期下相似,随着 CF 掺量从 0 增加到 4%,能量吸收从 $129.92 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 递增到 $271.68 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在不同 CF 掺量(1%、2%、3%、4%)下对应的能量吸收递增率分别为 16.5%、89.2%、95.4%、109.1%,相较于 7 d 养护龄期的能量吸收,1%至 3%CF 掺量的能量吸收递增率均有所增加,而由于 0 掺量的 MPC 试件在 28 d 养护龄期下能量吸收相对 7 d 养护龄期较高,尽管 4%掺量的能量吸收值大于 7 d 养护试件,但能量吸收增长率表现略低,如图 14 所示。

3 结论

本文通过 30 个 CF-MPC 试件静态压缩试验,对比分析了养护龄期对 MPC 静态抗压性能的影响,以及 CF 掺量对 MPC 静态抗压性能的影响,结论如下:

(1)CF 对养护龄期 7 d 和 28 d 养护龄期的 MPC 静态抗压性能的影响相似。但 28 d 的试件表现出较高的脆性;

(2)CF 掺量从 0 增加到 4%时,试件抗压强度略有下降,7 d、28 d 养护龄期下强度损失最大分别为 6.13%、4.07%,试样的弹性模量和割线模量与抗压强度呈相同变化趋势;

(3)CF 的掺入可以有效改善 MPC 延性。在本试验中,当 CF 掺量大于 1%时,试件破坏形态由脆性变为延性;

(4)CF 对提高 MPC 能量吸收性能有显著贡献。虽然 MPC 的能量吸收性能随 CF 掺量的增加而增加,但 CF 掺量在 2%~3%范围时,其增加速率逐渐减缓;

(5)CF 的掺入降低了 MPC 中主要水化产物 MKP 的含量。此外,过多 CF 会降低 MPC 结构整体性。

参考文献 References

[1] ROY D M. New strong cement materials: chemically

bonded ceramics[J]. Science. 1987, 235, 651-658.

[2] ABDELRAZIG B E I, SHARP J H, El-Jazairi B. The chemical composition of mortars made from magnesia phosphate cement[J]. Cement and Concrete Research. 1988, 18, 415-425.

[3] 肖炳斐,陈玥,房琦,等.磷酸镁水泥复合材料的研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51(8): 8007-8013.

XIAO Bingfei, CHEN Yue, FANG Qi, et al. Research progresses on magnesium phosphate cement-based composites: a review[J]. Journal of Functional Materials. 2020, 51(8): 8007-8013.

[4] QIAO Fei, CHAU C K, LI Zongjin. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 695-700.

[5] YANG Q B, ZHU B R, Zhang S Q. Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete[J]. Cement and Concrete Research. 2000, 30, 1807-1813.

[6] FENG H, CHEN G, GAO D. Mechanical properties of steel fiber-reinforced magnesium phosphate cement mortar[J]. Advances in Civil Engineering. 2018, 2018 (PT.1), 1-11.

[7] 冯虎,赵晓聪,高丹盈,等.微细钢纤维磷酸镁水泥砂浆的基本力学性能[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(9): 16-20.

FENG Hu, ZHAO Xiaocong, GAO Danying, et al. Basic mechanical behavior of micro steel fiber reinforced magnesia-phosphate-cement mortar [J]. New Building Materials, 2018, 45(9): 16-20.

[8] AHMAD M R, CHEN B. Effect of silica fume and basalt fiber on the mechanical properties and micro-structure of magnesium phosphate cement (MPC) mortar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190, 466-478.

[9] 刘雪敏,申选召,贾慧娜.玄武岩纤维增强磷酸镁水泥砂浆力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (6): 49-52,56

LIU Xuemin, SHEN Xuanzhao, JIA Huina. Experimental study on the mechanical property of basalt fibre reinforced magnesium phosphate cement mortar [J]. China Concrete and Cement Product, 2020(6): 49-52, 56.

[10] FANG Y, CUI P, DING Z, et al. Properties of a magnesium phosphate cement-based fire-retardant coating containing glass fiber or glass fiber powder[J]. Construction and Building Materials. 2018, 162, 553-560.

[11] 单春明,杨建明,陈延东,等.聚丙烯纤维增韧改性磷酸

- 钾镁水泥基材料的力学性能试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 58-65.
- SHAN Chunming, YANG Jianming, CHEN Yandong, et al. Mechanical properties test of magnesium phosphate cement-based materials toughened by polypropylene fibers[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2020, 32(1): 58-65.
- [12] AHMAD M R, CHEN B, HAQUE M A, et al. Development of a sustainable and innovant hygrothermal bio-composite featuring the enhanced mechanical properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229, 128-43.
- [13] LECOMPTE T, PERROT A, SUBRIANTO A. A novel pull-out device used to study the influence of pressure during processing of cement-based material reinforced with coir [J]. Construction and Building Materials, 2015, 78, 224-233.
- [14] PAUL A, THOMAS S. Electrical properties of natural-fiber-reinforced low-density polyethylene composites: A comparison with carbon black and glass-fiber-filled low-density polyethylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 63, 247-266.
- [15] Ali M, Liu A, Sou H, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30, 814-825.
- [16] ALI M, LI X Y; CHOUW N. Experimental investigations on bond strength between coconut fiber and concrete[J]. Materials and Design, 2013, 44, 596-605.
- [17] BARUAH P, TALUKDAR S. A comparative study of compressive, flexural, tensile and shear strength of concrete with fibres of different origins [J]. Indian Concrete Journal, 2007, 81, 17-24.
- [18] Gautam Basu, Leena Mishra, Ashis Kumar Samanta. Investigation of structure and property of indian cocos nucifera L. fibre[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series E, 2017, 98(2): 135-140.
- [19] 王铁默, 吕阳, 刘卓霖, 等. 磷酸镁水泥研究进展[J]. 科技资讯, 2019, 17(2): 113-116.
- WANG Yimo, YANG Lv, LIU Zhuolin, et al. Research progress of magnesium phosphate cement[J]. Science & Technology Information, 2019, 17 (2): 113-116.
- [20] THANUSHAN K, YOGANANTH Y, SANGEETH P, et al. Strength and durability characteristics of coconut fiber reinforced earth cement blocks[J]. Journal of Natural Fibers, 2021, 18, 773-788.
- [21] LI Z J, WANG L J, WANG X G. Flexural characteristics of coir fiber reinforced cementitious composites [J]. Fibers and Polymers, 2006, 7(3), 286-294.
- [22] Zainorizuan Mohd Jaini, Shahrul Niza Mokhtar, Ammar Saifuddin Mohd Yusof, et al. Effect of pelletized coconut fibre on the compressive strength of foamed concrete[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 47: 1-7.
- [23] Nabihah Mohd Zamzani, Azree Othuman Mydin, Abdul Naser Abdul Ghani. Experimental investigation on engineering properties of lightweight foamed concrete (LFC) with coconut fiber addition[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 250(17): 1-8.
- [24] Subramanian Shanmugapuram Vivek, Chandrasekaran Prabalini. Experimental and microstructure study on coconut fibre reinforced self-compacting concrete (CFRSCC) [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2021, 22, 111-123.
- [25] ZHANG Liwen, JIANG Zuqian, WU Hui, et al. Flexural properties of renewable coir fiber reinforced magnesium phosphate cement, considering fiber length [J]. Materials, 2020, 13(17): 3692.
- [26] ZHANG Liwen, JIANG Zuqian, ZHANG Wenhua, et al. Flexural properties and microstructure mechanisms of renewable coir-fiber-reinforced magnesium phosphate cement-based composite considering curing ages [J]. Polymers, 2020, 12(11): 1-21.
- [27] JIANG Zuqian, ZHANG Liwen, GENG Tao, et al. Study on the compressive properties of magnesium phosphate cement mixing with eco-Friendly coir fiber considering fiber length[J]. Materials, 2020, 13(14): 1-12.
- [28] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars; ASTM C109-16. [S]. Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials, ASTM International, 2016.
- [29] Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression; ASTM C469-14. [S]. Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials, ASTM International, 2014.
- [30] XU B W, LOTHENBACH B, LEEMANN A, et al. Reaction mechanism of magnesium potassium phosphate cement with high magnesium-to-phosphate ratio [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108, 140-51.
- [31] SWAMY P A V B. Efficient inference in a random coefficient regression model [J]. Econometrica, 1970, 38, 311-323.