引用格式：白琳，金辰华，吴畅，等. 超高分子聚乙烯纤维应变硬化地聚物复合材料力学性能研究[J]. 工业建筑，2026，56(1)：168-175. BAI Lin，JIN Chenhua，WU Chang，et al. Research on the Mechanical Properties of Strain-Hardening Geopolymer Composites Reinforced with PE Fibers [J]. Industrial Construction，2026，56(1)：168-175 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25042104

超高分子聚乙烯纤维应变硬化地聚物复合材料力学性能研究*

白　琳[1]　金辰华[1]　吴　畅[2]　孟少平[3]

（1. 金陵科技学院建筑工程学院，南京　211199；2. 东南大学土木工程学院，南京　211189；3. 长三角碳纤维及复合材料技术创新中心，江苏常州　213125）

摘　要　通过纤维增韧复合技术，设计并配制了一种具有准应变硬化特性的纤维增强地聚物复合材料，有效改善了传统地聚物韧性差、开裂敏感等缺陷。首先通过正交试验初拟该复合材料的配合比，并在此基础上展开单因素试验研究，根据流变性能、抗压强度、抗折强度、X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)等试验结果确定该复合材料的最佳配合比，最后采用直接拉伸试验、四点弯曲试验对其拉伸性能进行研究。结果表明：在碱激发的作用下，基体材料中硅铝物质逐渐溶解，凝聚为—Si—O—Al—网状结构，材料中形成的C-S-H凝胶与N-A-S-H凝胶使其获得强度；当水胶比为0.5，纤维掺量为2%，水玻璃模数为1.2，碱激发剂掺量为20%时，该复合材料具有优异的力学性能(28 d抗压强度46.25 MPa，抗折强度7.70 MPa，拉伸应变达到了3%，抗弯强度13.3 MPa)；在拉伸性能试验中，试件表面出现多条细密裂缝，应力-应变曲线呈现出明显的准应变硬化特征。

关键词　工程地质聚合物复合材料；地质聚合物；粉煤灰；S95矿粉；偏高岭土

Research on the Mechanical Properties of Strain-Hardening Geopolymer Composites Reinforced with PE Fibers

BAI Lin[1]　JIN Chenhua[1]　WU Chang[2]　MENG Shaoping[3]

(1. *School of Architectural Engineering*, *Jinling Institute of Technology*, *Nanjing* 211199, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing* 211189, *China*; 3. *Yangtze River Delta Carbon Fiber & Composite Innovation Center*, *Changzhou* 213125, *China*)

Abstract: Through fiber toughening composite technology, a fiber-reinforced geopolymer composite with quasi-strain-hardening characteristics was designed and prepared, effectively addressing the shortcomings of traditional geopolymers such as poor toughness and crack sensitivity. First, the initial mix proportion design of the composite was proposed through orthogonal experiments, followed by single-factor experimental studies. The optimal mix ratio was determined based on test results including rheological properties, compressive strength, flexural strength, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Finally, direct tensile tests and four-point bending tests were conducted to investigate its tensile behavior. The results demonstrated that under alkali activation, silicon-aluminum substances in the matrix gradually dissolved and condensed into a —Si—O—Al— network structure. The formation of C-S-H and N-A-S-H gels within the material contributed to its strength. When the water-to-binder ratio was 0.5, fiber dosage was 2%, sodium silicate modulus was 1.2, and alkali activator con-

* 国家自然科学基金面上项目(52478146)。

第一作者：白琳，硕士研究生，主要从事高性能混凝土结构研究。

通信作者：孟少平，博士，教授，博士生导师，主要从事现代预应力结构体系及相应性能方面的研究，msp1960@vip.sina.com。

收稿日期：2025-04-21

tent was 20%, the composite exhibited excellent mechanical properties (28-day compressive strength: 46.25 MPa, flexural strength: 7.70 MPa, tensile strain: 3%, and bending strength: 13.3 MPa). During tensile testing, multiple fine cracks appeared on the specimen surface, and the stress-strain curve displayed distinct quasi-strain-hardening characteristics.

Keywords: engineering geopolymer composites; geopolymer; fly ash; GGBS; Metakaolin

地聚物是一种以富含铝硅的工业固体废弃物(如偏高岭土、粉煤灰、炉渣等)为前驱体,经碱性或酸性活化而合成的胶凝材料[1-2],不仅具有优异的力学性能和耐久性[3],还具有低CO_2排放量、生态环保、固废回收利用等优势[4],在加固修补材料、固核固废材料、环境处置材料等领域有着广泛的应用前景[5]。

然而地聚物也存在脆性系数高、抗拉强度低、变形能力不足等问题[6]。采用纤维对基体材料增强增韧是一种提高其延性的有效方法。Lee 等[7]采用聚乙烯醇(PVA)纤维增强矿渣基体聚物,获得了 12.7 MPa 的抗弯强度;Ohno 等[8]配制了具有应变硬化特性的纤维增强地聚物,在高拉伸应变(4.5%)水平下,该材料的平均裂缝宽度仅为 45 μm;Zhang 等[9]配制的矿渣/粉煤灰基应变硬化地聚物混凝土(SHGC)拉伸应变达到 4.8%,极限抗拉强度达到 3.8 MPa。合适掺量及种类的乱向分布纤维因其桥连效应、限制基体变形、改变应力传递方向等作用而增强了地聚物的抗压强度,并产生韧性破坏[10],同时纤维的添加对材料的裂后行为有着积极的影响[7],合适纤维-基体界面作用有利于应变硬化行为的产生[11]。

目前针对具有应变硬化特性的纤维增强地聚物复合材料的研究仍然较少,本文通过正交试验,研究各因素对该复合材料微观结构及力学性能的影响,并确定最优配合比;通过直接拉伸试验、四点弯曲试验对该材料的拉伸性能进行研究,为该材料在加固修复等领域的应用奠定基础。

1　试验材料及方法

1.1　原材料

本文设计的地聚物复合材料包含粉煤灰(FA)、S95 矿粉(GGBS)和偏高岭土(MK)3 种基体材料,各基体材料化学成分如表 1 所示。碱激发剂由 NaOH 和水玻璃溶液混合制成,NaOH 为纯度不小于 98% 的白色片状物,水玻璃模数为 3.26。细骨料采用机制砂,粒度级配如图 1 所示。采用超高分子聚乙烯(PE)纤维,性能指标见表 2。可知,PE 纤维长度为 12 mm,直径为 24 μm,纤维长径比为 500,意味着纤维长度远大于直径,分子链沿纤维轴向高度取向,形成类似“分子链伸直排列”的结构,使得纤维拉伸强度极高。同时,高长径比也意味着纤维单位体积的比表面积大,使得与聚合物基体接触时,界面结合力强。

表 1　基体材料化学成分

Table 1　Chemical composition of thematrix material　%

材料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	TiO_2
FA	38.68	42.85	7.04	6.22	2.38
GGBS	12.55	9.31	65.34	1.12	3.35
MK	36.19	49.32	1.79	4.43	6.35

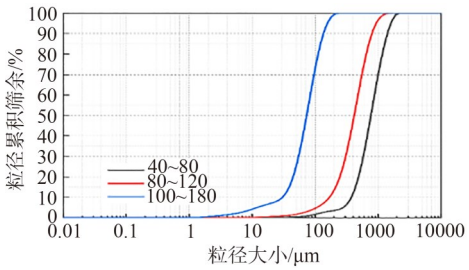


图 1　机制砂粒径分布

Fig. 1　Particle size distribution of manufactured sand

表 2　PE 纤维性能

Table 2　PE fiber performance characteristics

密度/($g.cm^{-3}$)	长度 L/mm	直径 D/μm	L/D	抗拉强度/GPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
0.97	12	24	500	3	116	1~3

1.2　试件配合比设计

通过正交试验,分析各因素(基体材料组分、水玻璃模数、碱激发剂掺量、水胶比)对试件性能的影响,对基体材料配合比进行优化设计,并在此基础上加入细骨料与纤维,制备具有应变硬化特性的地聚物复合材料。正交试验配合比设计如表 3 所示。

1.3　试验方法

参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》将粉煤灰、矿粉、偏高岭土、机制砂和 PE 纤维按照表 3 设计的配合比制备地聚物胶砂强度试件。在实验室(温度 20 ℃±2 ℃,相对湿度>50%)养

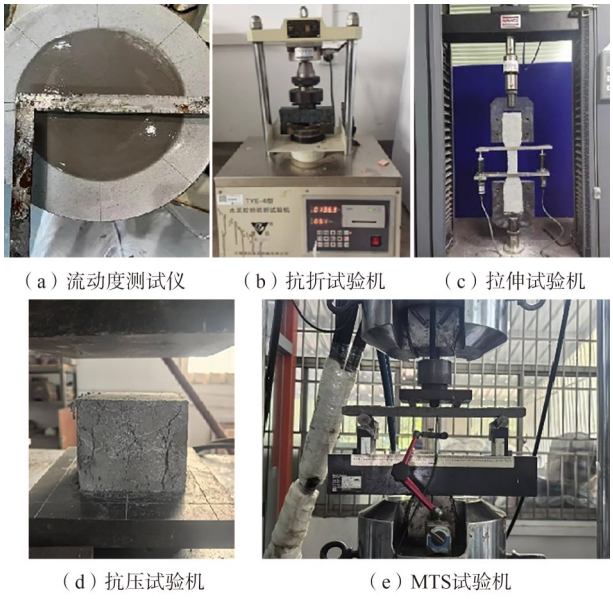
表3　正交试验配合比设计

Table 3　Mix proportion design for orthogonal experiments

试验组	基体材料构成	基体材料比(A)	水玻璃模数(B)	碱激发剂掺量(C)	水胶比(D)
1	GGBS+MK	0.2	1.2	0.2	0.50
2		0.3	1.2	0.2	0.50
3		0.5	1.2	0.2	0.50
4		0.7	1.2	0.2	0.50
5		1.0	1.2	0.2	0.50
6	FA	1.0	1..2	0.2	0.50
7		1.0	1.4	0.2	0.50
8		1.0	1.6	0.2	0.50
9		1.0	1.8	0.2	0.50
10		1.0	2	0.2	0.50
11	FA+GGBS	0.2	1.2	0.2	0.50
12		0.3	1.2	0.2	0.50
13		0.5	1.2	0.2	0.50
14		1.0	1.2	0.2	0.50
15	MK	1.0	1.2	0.1	0.50
16		1.0	1.2	0.15	0.50
17		1.0	1.2	0.25	0.50
18	MK+FA	0.2	1.2	0.2	0.50
19		0.3	1.2	0.2	0.50
20		0.5	1.2	0.2	0.50
21		1.0	1.2	0.2	0.50
22	GGBS	1.0	1.2	0.2	0.30
23		1.0	1.2	0.2	0.35
24		1.0	1.2	0.2	0.40
25		1.0	1.2	0.2	0.45

护24 h后脱模,然后标准养护(温度20 ℃±1 ℃,相对湿度>90%)至规定龄期,再测试其性能。

试验仪器及装置如图2所示,流动度试验按照GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》进行。抗压强度采用微机控制油电混合伺服压力试验机,加载速率为800 N/s。抗折强度采用水泥胶砂抗折试验仪,加载速率为30 N/s。四点弯曲强度采用MTS万能试验机测定,单轴拉伸试验参照JC/T 2461—2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》进行。试件养护28 d龄期后取样,采用无水乙醇浸泡终止水化,研磨成粉后进行微观测试。



(a)流动度测试仪　(b)抗折试验机　(c)拉伸试验机

(d)抗压试验机　(e)MTS试验机

图2　正交试验仪器及装置

Fig. 2　Test instruments and experimental apparatus

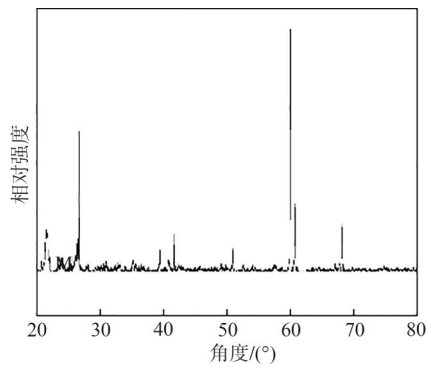


图3　28 d龄期的X射线图谱

Fig. 3　XRD patterns of samples cured for 28 days

2　试验结果与分析

2.1　微观测试

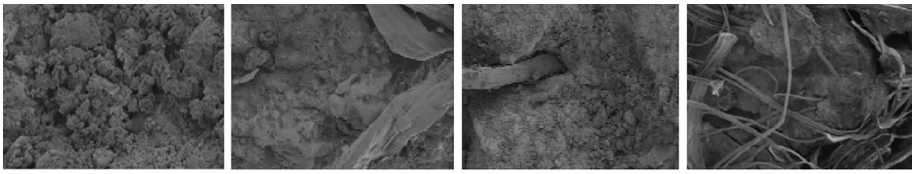
2.1.1　X射线衍射(XRD)分析

XRD结果如图3所示。结果表明,基体材料(粉煤灰、S95矿粉、偏高岭土)被碱激发剂催化后,在20°开始发生了一个小波动,25°~30°有一个比较明显的峰。此现象表明,3种材料中的玻璃体在碱激发剂作用下被溶解,使得Si—O和Al—O键发生断裂,先进行解聚,使得硅铝氧四面体快速溶出,再脱水凝聚形成—Si—O—Al—网状结构。在60°左右又出现了一个较大的峰,此时出现峰值的原因是由于基体中的CaO在碱激发剂的作用下,Ca^{2+}和OH^-发生反应生成$Ca(OH)_2$,然后$Ca(OH)_2$继续与Na_2SiO_3和$NaAlO_2$发生反应,此过程生成的NaOH会进一步与基体材料反应,使得试验中的材料硬化,有较高的强度。从XRD图谱中也可以看出,材料内部生成物相是C-S-H凝胶和N-A-S-H凝胶,并且C-S-H凝胶是大于N-A-S-H凝胶的,且C-S-H凝胶可以提高材料内部的致密性,这也说明了该材料的抗压强度较好。根据拉伸试验结

果显示，该种配合比的材料具有应变硬化行为。纤维在 N-A-S-H 凝胶中是通过化学键合主导界面，两者形成 Si-O-C 共价键，使纤维在地聚物基体中具有较高的黏结强度；纤维在 C-A-S-H 凝胶中主要是通过机械互锁与摩擦在地聚物基体中锚固。N-A-S-H 凝胶与 C-A-S-H 凝胶通过互补机制提升地聚物复合材料的断裂性能，N-A-S-H 凝胶与地聚物基体形成的纳米孔隙诱导裂纹偏转+化学键合纤维，赋予材料高延性特征；C-A-S-H 凝胶层状结构诱导裂纹分叉+机械锚固纤维，提供高锚固强度。

2.1.2　扫描电镜(SEM)图像微观分析

最优配比下的地聚物基体复合材料的 SEM 图像如图 4 所示。从图 4(a)可以看出，28 d 龄期时该种配比下地聚物基体材料试块内部表面生成了大量的凝胶物质，大大填充了材料内部的空隙，使其达到一定的密实状态。从图 4(b)和(c)可以看出，材料表面生成一些白色的 C-S-H 凝胶，附着在纤维上，并且可以推断出 PE 纤维是从地聚物基体中拔出的而非突然断裂；从图 4(d)断口表面可以观察到，PE 纤维在材料内部分布均匀，且 PE 纤维仍然嵌入在地聚物基体中，使其具有一定的拉伸性能，说明了 PE 纤维与地聚物基体之间具有较高的化学结合强度，纤维的桥接能力高于地聚物基体的首次开裂强度，避免了裂缝平面的很大破坏。拉伸试验结果也说明了一定体积比例的纤维在地聚物基体中起到了桥联作用。从 SEM 形貌特征中可以看到纤维从地聚物基体中拔出，表面上残留硅铝凝胶层。



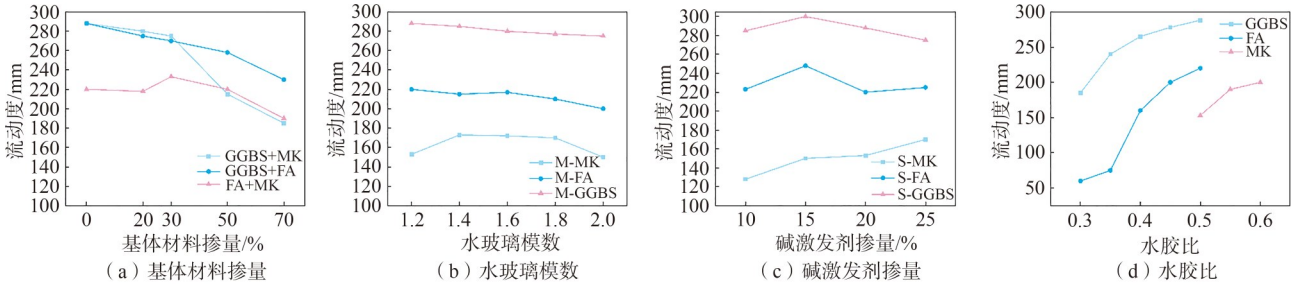
(a) 2 μm　(b) 20 μm-1　(c) 20 μm-2　(d) 200 μm

图 4　28 d 龄期地聚物复合材料 SEM 微观测试示意

Fig. 4　SEM micrographs of geopolymer composites at 28-day curing age

2.2　流动度

图 5 为不同基体材料、水玻璃模数与掺量、水胶比对流动度的影响。可知：随着基体材料中粉煤灰所占比例或偏高岭土所占比例的增大，流动度逐渐降低，所有粉煤灰基地聚物流动度均在 220 mm 以上，说明粉煤灰与偏高龄土的颗粒较细，比表面积大，需水量较多，但粉煤灰颗粒呈球形，具有“滚珠效应”，且可以与较粗的矿粉颗粒形成良好的级配，从而提高流动度；随着水玻璃模数的增加，SiO_2 含量增大，碱激发剂的黏度增大，各基体材料的流动度均呈下降趋势；随着碱激发剂掺量的增加，OH^- 浓度增加，反应速度增快，但过量的 OH^- 会使硅铝酸盐产物沉积，因此流动度先增大后降低；随着水胶比的增大，混合物黏度下降，基体材料颗粒间的摩擦力减小，流动度增大。当矿粉掺量为 0.2~0.3、粉煤灰与偏高岭土的掺量为 0.3~0.5 时，基体材料的流动度可维持在 180~220 mm 范围内，这为纤维在基体中的均匀分散提供了保证。



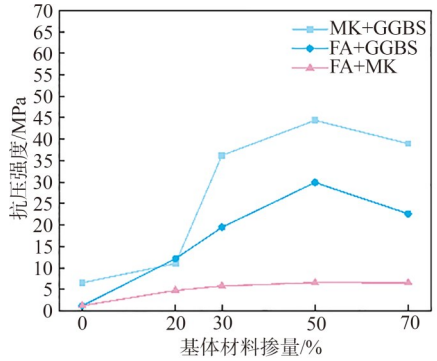
(a) 基体材料掺量　(b) 水玻璃模数　(c) 碱激发剂掺量　(d) 水胶比

图 5　正交试验流动度测试结果

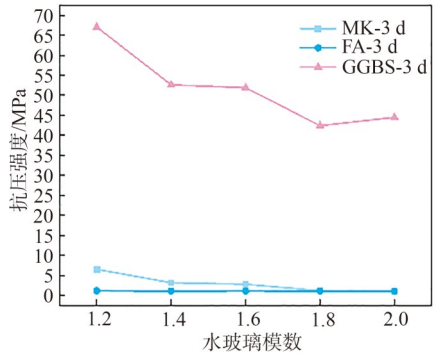
Fig. 5　Flowability test results from orthogonal experiments

2.3　抗压强度

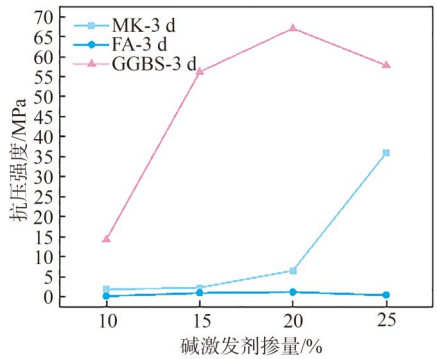
图 6 为不同基体材料、水玻璃模数与掺量、水胶比对抗压强度的影响。可知：矿粉中丰富的 CaO 可加速碱激发反应，生成高强度的 C-S-H 凝胶，但过量 Ca^{2+} 会与 OH^- 结合生成 $Ca(OH)_2$，阻碍反应的进一步发生，因此随着矿粉比例增加，基体材料的抗



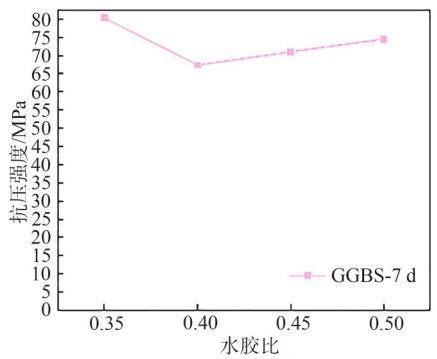
（a）基体材料掺量



（b）水玻璃模数



（c）碱激发剂掺量



（d）水胶比

图6　地聚物基体材料抗压强度测试结果

Fig. 6　Compressive strength test results of geopolymer matrix materials

压强度先增大后减小；随着碱激发剂模数的增加，SiO_2含量增多，在一定范围内可以提高地聚物的聚合程度，但模数过高，激发剂碱性较弱，基体材料反应不完全，使得聚合物的抗压强度降低；随着碱激发剂掺量的增加，OH^-浓度增加，前驱体溶解速度加快，但过多的OH^-会生成过量的Na_2SiO_3，阻碍Si和Al的进一步反应，聚合物抗压强度先增大后降低；合适的水胶比可以使浆体具有良好的流动性与反应活性，地聚物的反应充分，抗压强度较大，但当水胶比过大时，材料的孔隙率增大使结构疏松，抗压强度显著降低。当矿粉、粉煤灰与偏高岭土的掺量为0.2~0.5、水玻璃模数为1.2、水玻璃掺量为20%时，基体材料的抗压性能最优。

2.4　抗折强度

图7为不同基体材料、水玻璃模数与掺量对抗折强度的影响。可知：偏高龄土掺量对基体材料抗折强度的影响较为明显，随着偏高龄土掺量的增大，高活性无定形硅铝酸盐增多，生成的大量N-A-S-H凝胶可增强基体强度和韧性，材料的抗折强度提高；随着水玻璃模数的增加，Na_2O含量降低，抗折强度逐渐减小；随着碱激发剂掺量的增加，抗折强度先增大后减小，合适的碱激发剂掺量，可以使凝胶相分布均匀，材料结构致密。当偏高岭土的掺量为0.2~0.4、水玻璃模数为1.2、水玻璃掺量为20%时，基体材料的抗折性能最优。

2.5　折压比

由上述试验结果可知，当粉煤灰掺量为0.3~0.5，矿粉掺量为0.2~0.3，偏高岭土掺量为0.2~0.4，水玻璃模数为1.2，碱激发剂掺量为20%时，基体材料具有较好的流动性与力学性能。在此基础上进一步加入机制砂与纤维，制备地聚物复合材料，并对其力学性能进行研究。配合比设计与力学性能试验结果如表4所示。

折压比是材料抗折强度与抗压强度的比值，常被用作衡量材料韧性的指标，3组地聚物复合材料折压比如图8所示。可知，F3试验组28 d折压比分别较F1试验组与F2试验组提高23.6%与10%，这主要是由于F1与F2的基体材料中矿粉占比较多，CaO的含量较高，导致基体材料的抗压强度增长速率较抗折强度大，故折压比降低。为使地聚物复合材料获得可靠的应变硬化特性，需保证材料具有较好的韧性，因此初步选用折压比最大的F3组配合比作为地聚物复合材料的最优配合比，并进一步对其在受拉荷载作用下的力学性能进行研究。本试验每组试件数量为6~8个，其标准差如图8所示，标准

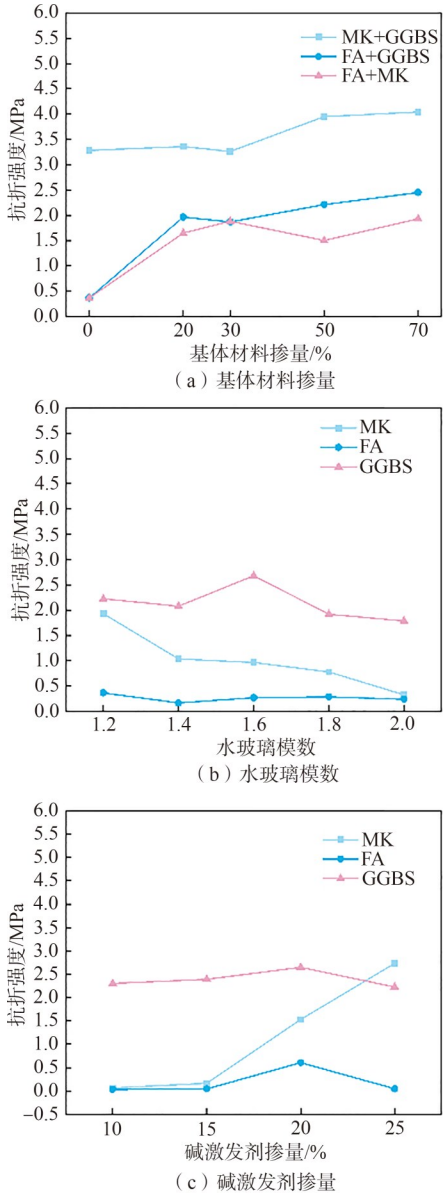


图 7　地聚物抗折强度测试结果

Fig. 7　Flexural strength test results of geopolymer composites

差(SD)分别为 2%,4% 和 7%,依据 ASTM E691 实验室间比对要求,在材料性能测试中,其 SD 均值< 10%,则被认为误差等级低,数据可靠。

2.6　直拉性能

F3 试验组试件直接拉伸试验结果如图 9 所示。

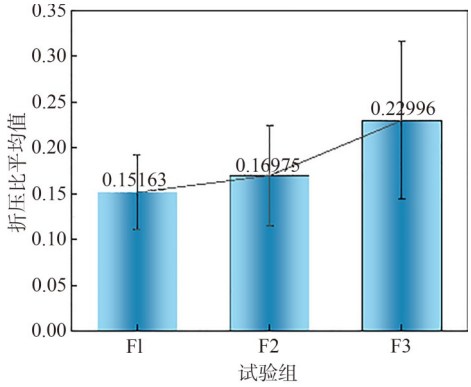


图 8　折压比均值及误差棒

Fig. 8　Mean flexural-compressive ratios with error bars

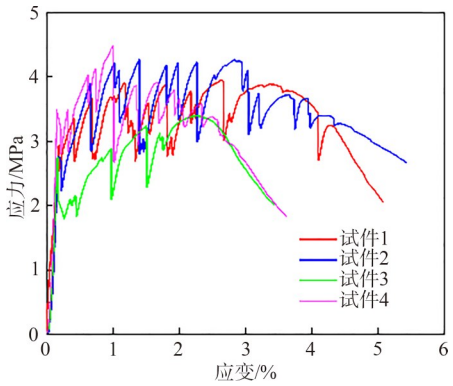
可见:在加载初期,复合材料没有达到开裂强度,试件无明显变化;当荷载持续增大,试件具有较大初始缺陷的荷载面处首先开裂,裂缝大都由试件的一侧开始发生,并很快贯穿试件,由于裂缝的产生,试件力-位移曲线有一个突降,但裂缝处的纤维马上开始承受这部分拉应力,曲线很快回升;当复合材料开裂后,能听到较为明显的纤维拔出或拉断的“霹雳”声,且试件表面不断有新的平行裂缝产生;当裂缝几乎布满整个试件观测区后,其中某条裂缝逐渐增大直至试件破坏。试验结果表明,F3 组试件具有较好的拉伸性能,极限应变达到 3%,抗拉强度达到 5 MPa,试件表面呈多缝开裂状态,力-位移曲线具有明显应变硬化特性。

图 10(a)为 F3 组试件四点弯曲试验实测的荷载-跨中挠度曲线。可以看出,加载初期,挠度曲线为直线阶段,随着裂缝的产生该曲线发生突降,但由于裂缝处纤维作用,曲线很快回升,试件表面不断产生新的平行裂缝直至裂缝几乎布满整个试件观测区[图 10(b)]。与直拉试验结果一致,F3 试验组在四点弯曲性能试验中表现出明显的应变硬化特征,最大弯曲强度为 13.3 MPa,最大挠度达到 21 mm。试验表明,本文配制的 F3 组试件具有优异的拉伸性能及明显的应变硬化特征,能够有效抵抗裂缝的扩展并在裂缝产生后继续保持较高的承载

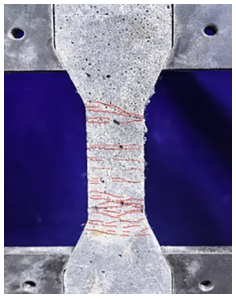
表 4　地质聚合物复合材料配合比设计与力学性能试验结果

Table 4　Test results of mix proportion design and mechanicalproperties of geopolymer composites

试验组	基体材料			胶砂比	纤维含量/%	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	FA	GGBS	MK			3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
F1	0.4	0.3	0.3	1.0	2	11.86	30.32	46.23	2.40	4.45	5.96
F2	0.5	0.3	0.2	1.0	2	15.66	37.10	42.22	3.39	3.82	8.11
F3	0.4	0.2	0.4	1.0	2	24.74	40.31	52.31	7.59	6.65	7.70



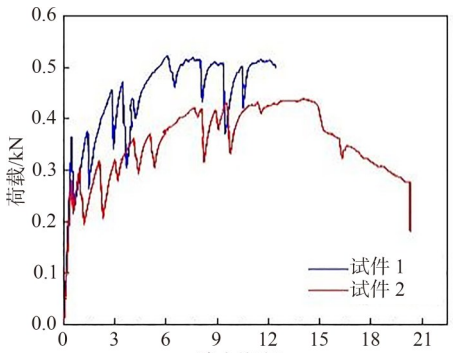
(a) 拉伸应变数据



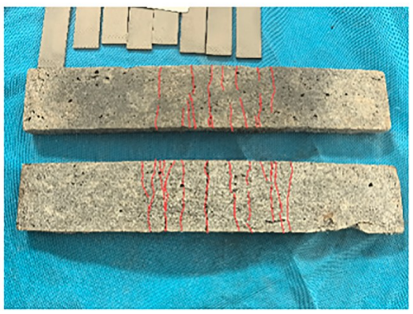
(b) 裂缝分布

图 9　抗拉强度测试结果

Fig. 9　Tensile strength test results



(a) 荷载-挠度曲线



(b) 裂缝分布

图 10　四点弯曲试验结果

Fig. 10　Four-point bending test results

能力,表现出良好的延性和韧性,能够满足修补材料在高强度、高韧性及抗裂性能方面的要求,具有广阔的应用前景。

2.7　可持续性

对本文配置的应变硬化地聚物复合材料的碳排放因子按下式进行计算:排放因子=(含碳率×3.67)+运输能耗系数。文中粉煤灰经化学成分分析得到 CO_2 含量为 46.74%,经计算碳排放因子为 171.54 $kgCO_2/t$;由于本试验用的基体材料为就近选择,运输能耗系数很小,可忽略不计,S95 矿粉和偏高岭土的化学成分中不含有 CO_2,只有运输能耗系数。而 425 普通硅酸盐水泥中碳排放因子为 795 $kgCO_2/t$。可见,粉煤灰的碳排放因子较普通硅酸盐水泥降低 80%。

从碳排放因子计算结果来看,粉煤灰、S95 矿粉和偏高岭土这类地聚物基体能够有效降低碳排放。从材料生产过程中的能源需求来看,普通硅酸盐水泥的生产需要大量的热能,主要来自燃烧化石燃料。此外,原材料的开采、运输等过程也会增加能源消耗。而地聚物基体材料的生产通常不需要高温煅烧,能源消耗较低,主要依赖于废料资源的回收与再利用。这不仅减少了能源需求,也大幅降低了环境负担。通过对比碳排放因子,可以明显看出地聚物相对于普通硅酸盐水泥具有显著的碳排放优势。采用地聚物不仅有助于减少建筑行业的碳足迹,还能够推动废弃物资源的再利用,是实现可持续发展的重要材料选择。因此,推动地聚物的应用,是应对气候变化、降低环境污染的有效途径。

3　结　论

1)XRD 分析显示,当地聚物复合材料中的碱激发剂掺量为 20% 时,激发剂与基体材料之间发生了充分的水化反应,形成了 C-S-H 和 N-A-S-H 凝胶,从而赋予了材料较高的抗压强度。SEM 形貌观察进一步揭示,当 PE 纤维的含量为 2% 时,其在地聚物复合材料中分布均匀,并与基体材料形成了强烈的桥联作用,显著提升了材料的拉伸性能。

2)通过正交试验对不同配比下材料的流动度、抗压强度、抗折强度进行综合评估,确定了地聚物复合材料的最佳配合比为 FA∶GGBS∶MK=0.4∶0.2∶0.4,水玻璃模数为 1.2,碱激发剂掺量为 20%,水胶比为 0.5,胶砂比为 1.0,并添加 2% 的 PE 纤维。在此配合比下,材料的流动度为 220 mm,28 d 抗压强度达到 46.25 MPa,28 d 抗折强度达到 7.7 MPa,折压比为 0.17。

3)折压比分析表明,随着 S95 矿粉含量的增加,

材料的折压比逐渐降低。因此，过多的 S95 矿粉不利于提升地聚物复合材料的弯曲韧性。

4）单轴拉伸和四点弯曲试验结果显示，该配比下复合材料具有优异的拉伸性能和弯曲韧性，最大拉伸应变达到了 3%，抗弯强度达到 13.3 MPa。这表明地聚物复合材料呈现出应变硬化行为和良好的弯曲性能。

参　考　文　献

[1] KHALE D, CHAUDHARY R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review[J]. J. Mater. Sci, 2007, 42: 729-746.

[2] ZHANG P, ZHENG Y, WANG K, et al. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 152 : 79-95.

[3] FU C, YE H, ZHU K, et al. Alkali cation effects on chloride binding of alkali-activated fly ash and metakaolin geopolymers [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103721.

[4] EMRE Y, NAZLI I K G, NIYAZI F K. Characterization of class C and F fly ashes based geopolymers incorporating silica fume [J]. Ceramics International, 2022, 48 (21): 32213-32225.

[5] 施惠生，夏明，郭晓潞. 粉煤灰基地聚合物反应机理及各组分作用的研究进展[J]. 硅酸盐学报，2013，41(7)：972-980.

[6] 聂嘉昕，牛相杰，王肖凯，等. 植物纤维增强地质聚合物材料力学性能[J]. 山东化工，2024，53(2)：73-75.

[7] LEE B Y , CHO C G , LIM H J , et al. Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar: a feasibility study[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 15-20.

[8] OHNO M , LI V C . An integrated design method of Engineered Geopolymer Composite[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 73-85.

[9] ZHANG S Z, LI V C, YE G. Micromechanics-guided development of a slag/fly ash-based strain-hardening geopolymer composite [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 109: 103510.

[10] KANA L , ZHANG L , ZHAO Y , et al. Properties of polyvinyl alcohol fiber reinforcedfly ash based Engineered Geopolymer Composites with zeolite replacement[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117161.

[11] HUY H N, LUONG Q H, CHOI J I, et al. ultra-ductile behavior of fly ash-based engineered geopolymer composites with a tensile strain capacity up to 13.7%[J]. Materials Engineering and Performance, 2021, 122: 104133.