

玻璃纤维织物增强地聚合物砂浆弯曲力学性能试验研究

陈柯¹, 孙思齐², 方强³, 史奉伟^{2,4}, 董硕^{2,4}, 杨文锋³, 郭朋³, 王坤³

(1. 西安建筑科技大学 华清学院, 陕西 西安 710043; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;
3. 泰山玻璃纤维邹城有限公司, 山东 济宁 273517; 4. 青岛市海洋土木工程材料与结构重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:为减少水泥生产中的碳排放,地聚合物砂浆作为低碳材料逐渐受到关注。为了提升其延性和韧性,将玻璃纤维织物植入地聚合物砂浆中,制备出玻璃纤维织物增强地聚合物砂浆。以织物层数、网格尺寸、环氧涂层和环境温度为参数,设计制备了12组试件进行三点弯曲试验。结果表明,纤维织物与地聚合物砂浆基体能够实现紧密结合并协同工作。随着织物层数的增加,试件表现出多缝开裂的延性破坏模式,初裂后依然保持显著的强化效应,弯曲强度和应变均呈增大趋势。在织物为3层时,试件的峰值弯曲强度和应变分别提高了71%和92%,韧性指标提升幅度超90%。随着网格尺寸的减小,弯曲强度显著增大,而弯曲韧性在网格尺寸5 mm时达到最大,主要是因为织物密度饱和,导致强度增强但延性降低,试件出现剪切破坏。环氧涂层的涂覆使得试件力学性能普遍提高,主要源于纤维束的整体性和抗拉能力增强。随着环境温度的提高,试件的弯曲力学性能显著退化,主要由于高温处理导致纤维束软化及砂浆基体孔隙率的增加。

关键词:玻璃纤维织物;地聚合物砂浆;弯曲力学性能;织物层数;网格尺寸;环氧涂层;环境温度

中图分类号:TU599

文献标志码:A

Experimental investigation on flexural mechanical properties of glass fiber textile reinforced geopolymer mortar

CHEN Ke¹, SUN Siqi², FANG Qiang³, SHI Fengwei^{2,4}, DONG Shuo^{2,4},
YANG Wenfeng³, GUO Peng³, WANG Kun³

(1. Huaqing College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710043, China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. Taishan Fiberglass Zoucheng Co., Ltd., Jining 273517, China; 4. Qingdao Key Laboratory of
Materials and Structures for Marine Civil Engineering, Qingdao 266590, China)

Abstract: To reduce carbon emissions in cement production, geopolymer mortar as a low-carbon material has gradually gained attention. To enhance its ductility and toughness, the glass fiber textile reinforced geopolymer mortar was prepared by embedding glass fiber textile into geopolymer mortar. With textile layers, grid size, epoxy coating, and environmental temperature as the main parameters, 12 groups of specimens were designed and prepared for three-point bending tests. The results show that the fiber textile and geopolymer mortar matrix can achieve strong bonding and work synergistically. With the increase of textile layers, the specimens exhibit a ductile failure mode with multiple cracking, maintaining significant strengthening effects after initial cracking, and both

收稿日期:2024-12-06

基金项目:山东省重大创新工程项目(2023CXGC010316);山东省自然科学基金项目(ZR2024QE480, ZR2023ME040, ZR2023QE307);中国博士后科学基金项目(2023M742143);国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20231497);青岛市自然科学基金项目(24-4-4-zrjj-75-jch)

作者简介:陈柯(1989—),女,陕西咸阳人,讲师,博士研究生,主要从事建筑设计与理论研究。

史奉伟(1989—),男,山东滕州人,讲师,博士,主要从事新材料及新结构体系关键技术研究,本文通信作者。

E-mail: shifengwei@tju.edu.cn

flexural strength and strain show an increasing trend. When the number of textile layers reaches 3, the peak flexural strength and strain of the specimens increase by 71% and 92% respectively, and the toughness index improves by over 90%. As the grid size decreases, the flexural strength increases significantly and the flexural toughness reaches its maximum at a grid size of 5 mm, mainly due to the saturation of textile density, which enhances strength but reduces ductility, leading to shear failure in the specimens. The application of epoxy coating generally improves the mechanical properties of the specimens, primarily due to the enhanced integrity and tensile performance of the fiber bundles. With the increase of environmental temperature, the flexural mechanical properties of the specimens significantly degrade, mainly due to the softening of fiber bundles and the increased porosity of the mortar matrix caused by high-temperature treatment.

Key words: glass fiber textile; geopolymers mortar; flexural mechanical property; textile layer; mesh size; epoxy coating; environment temperature

建筑业碳减排是实现“双碳”战略目标的重要依托,采用矿渣、粉煤灰等工业固废替代水泥制备地聚合物,可减少 40%~70% 的 CO₂ 排放量,为建筑业减碳提供有效途径^[1-2]。地聚合物砂浆具有承载力高、快硬早强、耐酸和耐硫酸盐腐蚀等优点,但其延性和韧性差、抗裂强度较低等缺陷严重制约工程应用^[3-4]。

纤维织物增强砂浆是通过纤维织物网格与砂浆基体组合而成的新型复合材料,通过织物网格与砂浆的协同作用,能够显著提升地聚合物砂浆的强度、延性和韧性,在混凝土加固方面具有广泛的应用前景^[5-6]。国内外学者对纤维织物增强砂浆的力学性能进行了大量研究。彭卓等^[7]对不同织物层数的玄武岩织物增强碱激发矿渣粉煤灰砂浆试件进行三点弯曲试验,发现当织物层数增至 3 层时,砂浆弯曲强度提升 65%,裂缝形态均得到较大改善。朱德举等^[8]对高温处理后的玄武岩织物增强碱激发矿渣粉煤灰砂浆试件进行三点弯曲试验,发现随着环境温度的升高,试件弯曲承载力呈近似线性下降。刘赛等^[9]对 -50~100 ℃ 处理后耐碱玻璃织物增强砂浆的弯曲力学性能进行试验,发现随着环境温度的升高,试件弯曲强度和韧性均降低,呈温度弱化效应。Li 等^[10]对 100~400 ℃ 处理后耐碱玻璃纤维织物增强砂浆的动态弯曲性能进行试验,发现试件动态弯曲性能同样呈现明显的高温软化现象。Raoof 等^[11]采用玻璃纤维织物增强砂浆加固钢筋混凝土梁,并在常温 and 高温环境下进行弯曲性能试验,发现织物增强加固的方式能够有效提高梁试件的受弯性能。综上,现有研究尚未系统阐明玻璃纤维织物与地聚合物砂浆的协同增强机理,且对高温环境(≥250 ℃)下界面性能劣化规律及环氧涂层改性效应缺乏相关研究。

为系统研究玻璃纤维织物增强地聚合物砂浆(glass textile reinforced geopolymer mortar, GTRGM)的弯曲力学性能,通过 12 组试件的三点弯曲试验,研究了织物层数、网格尺寸、环氧涂层和环境温度对织物增强砂浆的弯曲力学性能的影响,为此类材料的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

矿渣,密度为 2.9 g/cm³,测得比表面积为 412 m²/kg;粉煤灰,密度为 2.23 g/cm³,比表面积为 289 m²/kg。矿渣和粉煤灰的化学成分见表 1。氢氧化钠固体颗粒的纯度为 99%±1%;硅酸钠溶液的 SiO₂ 含量为 28.5%,总碱量为 29%。河砂为连续级配,细度模数为

表 1 矿渣和粉煤灰的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of slag and fly ash (mass fraction) %

材料成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃
矿渣	33.06	39.29	15.04	9.96	0
粉煤灰	45.10	4.50	24.20	0	1.20

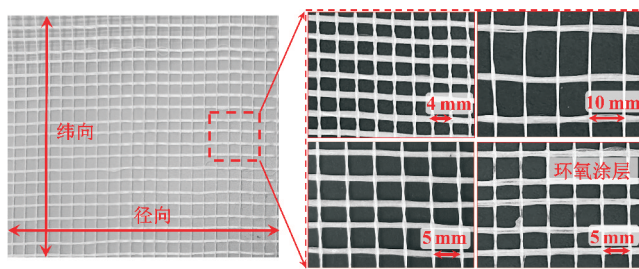


图 1 玻璃纤维织物

Fig. 1 Detail of the glass fiber textile

2.590。耐碱玻璃纤维织物采用经纬向编制方式,如图1所示。环氧树脂为米加占公司生产的M-465环氧树脂胶黏剂。根据GB/T 7689.5—2013《增强材料机织物试验方法 第5部分:玻璃纤维拉伸断裂强力和断裂伸长的测定》^[12],选取玻璃纤维织物中的径向纤维束进行力学性能试验,测试结果见表2。

表2 玻璃纤维织物性能参数

Table 2 Performance parameters of glass fiber textile

网格边长/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	线密度/(g·cm ⁻¹)	纤维束截面积/mm ²
4	502	65	89	0.321
5	542	68	85	0.315
10	556	65	86	0.304

1.2 地聚合物砂浆设计

根据前期试配结果,初步确定地聚合物砂浆的基础配合比:砂胶比($m_{\text{砂}}:m_{\text{胶凝材料}}$)为2.30,溶胶比($m_{\text{碱激发溶液}}:m_{\text{胶凝材料}}$)为0.40,水胶比($m_{\text{水}}:m_{\text{胶凝材料}}$)为0.45。在此基础上,进一步调整矿渣掺量、碱激发剂模数及碱含量等因素,并根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》^[13]和GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》^[14]对地聚合物砂浆的工作性能和力学性能进行测试,包括流动度、凝结时间、抗压和抗折强度等关键指标。通过试配结果的优化,确定满足流动度及强度要求的地聚合物砂浆基体配合比,其具体配比及性能指标如表3所示。

表3 地聚合物砂浆基体配合比及物理性能

Table 3 Mixture design and physical properties of geopolymer mortar matrix

材料用量/g						流动度	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
矿渣	粉煤灰	氢氧化钠	硅酸钠	砂	水	/mm	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
300	130	18	156	1 000	190	245	35	52	29.9	4.6	32.7	5.0

1.3 试件设计与制作

以织物层数、网格尺寸、环氧涂层和环境温度为主要变量,进行GTRGM试件设计,如表4所示。织物

表4 GTRGM试件设计及弯曲力学性能试验结果

Table 4 Design and flexural test results of GTRGM specimens

试件	织物层数	环氧涂层	网格尺寸/mm	网格布克重/g	环境温度/℃	f_A /MPa	f_B /MPa	ϵ_A /%	ϵ_B /%	D	I
GT0S5-T20	0	—	—	—	20	4.155	4.155	0.108	0.108	1.00	1.00
GT1S5-T20	1	否	5	140	20	4.165	4.165	0.121	0.959	7.94	8.73
GT2S5-T20	2	否	5	140	20	5.472	12.484	0.156	1.161	7.43	22.08
GT3S5-T20	3	否	5	140	20	4.853	14.523	0.093	1.290	13.83	51.68
GT4S5-T20	4	否	5	140	20	3.897	9.900	0.174	1.137	6.52	26.46
GT3S5E-T20	3	是	5	140	20	4.009	20.256	0.135	1.848	13.69	70.95
GT3S4-T20	3	否	4	160	20	5.071	16.412	0.105	1.050	9.99	37.84
GT3S10-T20	3	否	10	80	20	3.957	5.083	0.112	0.651	5.82	10.98
GT3S5-T200	3	否	5	140	200	0.994	5.013	0.090	0.354	3.93	26.04
GT3S5-T400	3	否	5	140	400	0.782	2.032	0.076	0.272	3.58	8.75
GT3S5-T600	3	否	5	140	600	0.152	0.866	0.027	0.324	12.09	59.72
GT3S5-T800	3	否	5	140	800	0.078	0.752	0.036	0.360	10.00	56.44

注: f_A 为初裂弯曲强度; f_B 为极限弯曲强度; ϵ_A 为初裂弯曲应变; ϵ_B 为极限弯曲应变; D 为延性系数; I 为韧性系数。

层数分别选用 0、1、2、3 和 4 层,层数的分布尺寸如图 2 所示;织物网格尺寸(边长)分别为 4、5 和 10 mm;环境温度分别采用 20(常温)、200、400、600 和 800 ℃。共设计 12 组试件,每组试件分别制备 3 个试样,试样尺寸均为 230 mm×25 mm×15 mm。试件编号以“GT3S5E-T20”为例,其中“GT3”表示玻璃纤维织物增强层数为 3,“S5”表示网格尺寸(边长)为 5 mm,“E”表示环氧树脂涂层,“T20”表示试件在 20 ℃的环境温度下进行处理。

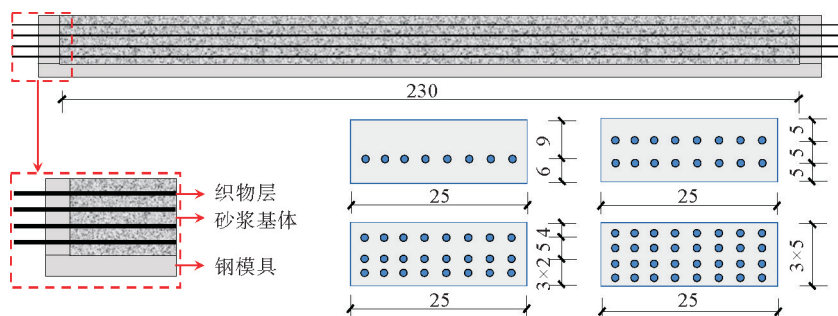


图 2 不同织物层数弯曲试件的截面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Cross section of the specimens with different numbers of textile layers (unit:mm)

GTRGM 试件采用铺网-注浆法制备,如图 3 所示。预先将玻璃纤维织物按照 300 mm×200 mm 尺寸进行裁剪,而后将其逐层铺设在模具内,每层织物需拉紧、固定且保持对齐;将硅酸钠溶液与氢氧化钠固体颗粒按表 3 中所给用量进行混合搅拌,使其充分溶解并冷却至室温,制备成碱激发溶液;而后,按照一定比例称量骨料、胶凝材料,放入砂浆搅拌机中充分搅拌 1 min,随后倒入制备好的碱激发溶液,继续搅拌 2 min,直至地聚合物砂浆拌合物混合均匀;最后,快速将砂浆浇入钢模具中并振捣均匀。试件在室温下养护 24 h 后脱模,随后置于标准养护室继续养护至 28 d 龄期。养护结束后,将试件切割为 230 mm×25 mm×15 mm 的标准尺寸试件,以进行弯曲力学性能试验。

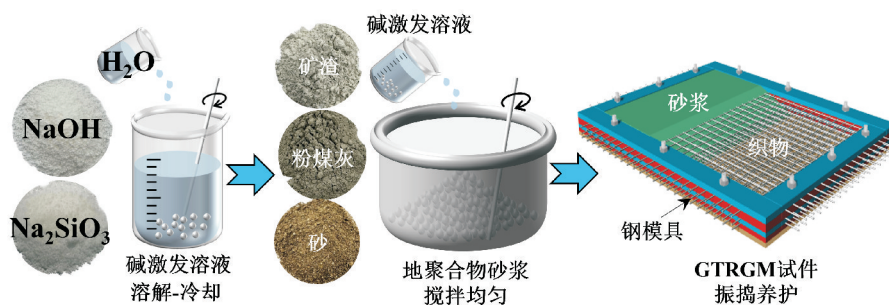


图 3 GTRGM 试件的制备

Fig. 3 Production of GTRGM specimens

1.4 加载装置与试验方法

三点弯曲试验采用 MTS-CMT5305 型万能试验机进行。试验加载装置如图 4 所示,采用位移控制加载方式,跨中距离设为 150 mm,加载速度为 0.5 mm/min。加载过程中,使用非接触式位移和应变测量系统(PMLAB DIC-3D PRO)同步监测试件的变形与裂缝发展情况,应变数据采集的拍摄范围为 80 mm,拍摄频率为 1 帧/秒。试件弯曲加载过程中的位移场和应变场等数据采用非接触式应变分析软件进行计算。环境温度的控制使用 HD-XL-500 型节能马弗炉进行,从常温(约 20 ℃)开始,以 100 ℃/min 的速率加热至所需温度,并在目标温度下保持恒温 60 min 进行环境温度处理,然后降温至常温以备后续试验。选取各试件中中部断裂区域制备样品,并使用 EM-30 Plus 型扫描电子显微镜观察试件的表面形貌特征。

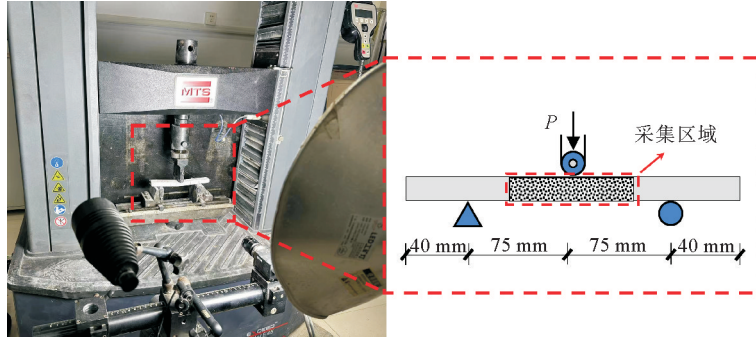


图 4 试验加载及数据采集

Fig. 4 Test setup and data acquisition

2 试验结果及其分析

2.1 弯曲应力-应变曲线

图 5 为典型 GTRGM 试件的荷载-挠度($P-\delta$)曲线示意图,图 6 给出了典型 GTRGM 试件的破坏形态。图 7 给出了各 GTRGM 试件的弯曲应力-应变($f-\epsilon$)曲线,其中应力(f)和应变(ϵ)的计算分别见式(1)和式(2)。为全面评估 GTRGM 试件的弯曲韧性能,基于试件实测的试件荷载-挠度曲线,参考复合材料的弯曲韧性评估方法^[15-16],分别取延性系数 D 和韧性系数 I 为评价指标来表征材料弯曲延展能力和挠曲硬化能力,如式(3)和式(4)。

$$f = 3PL / (2bh^2), \quad (1)$$

$$\epsilon = 6h\delta / L^2, \quad (2)$$

$$D = \delta_B / \delta_A, \quad (3)$$

$$I = T_B / T_A. \quad (4)$$

式中: L 、 b 和 h 分别为弯曲试件的净跨度、截面宽度和高度; T_A 为弯曲荷载-挠度曲线下 δ_A 前的面积; T_B 为弯曲荷载-挠度曲线下 δ_B 前的面积。

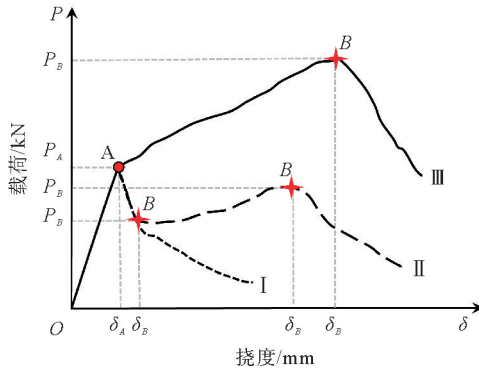


图 5 试件荷载-挠度曲线示意图

Fig. 5 Typical load-deflection curve of specimens

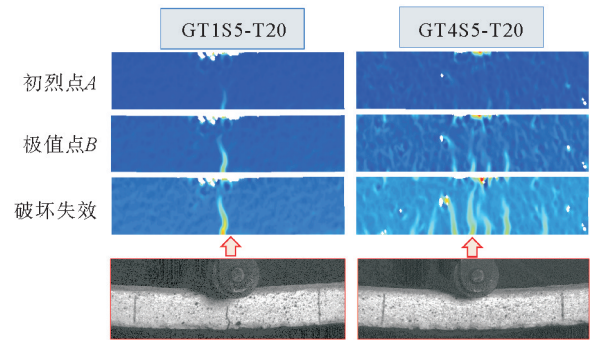


图 6 典型试件破坏形态

Fig. 6 Typical failure patterns of specimens

由图 5~7 可知,GTRGM 试件的荷载-挠度或应力-应变曲线可大致分为 I、II 和 III 3 类发展趋势,图 5 中初裂点 A 点为曲线首次出现非线性特征点,极值点或峰值点 B 点为曲线中出现明显软化的点。试件受力过程可分为 3 个阶段。OA 段为弹性阶段,此时加载初期的荷载较小,砂浆基体与纤维织物共同受力,产生弹性变形,曲线呈线性增长趋势,试件表面无开裂损伤。AB 段为弹塑性阶段,此时随着荷载持续增加,砂浆基体内部开始形成微裂缝并逐渐发展,至 A 点时跨中底部出现第一条裂缝。若无织物增强或高温处理时,

裂缝将向上延伸至顶部,试件发生脆性断裂,曲线呈现下降趋势,如图中 I 类曲线(试件 GT0S5-T20、GT0S5-T200~GT0S5-T800)。若采用织物增强时,裂缝将持续向上延伸至底层纤维处,纤维逐步承受荷载;当织物层数较少或网格尺寸较大时,试件将在初裂后发生软化现象,曲线先出现一定的下降趋势后再上升,如图中 II 类曲线(试件 GT1S5-T20、GT3S10-T20)。当纤维织物设置合理,曲线将呈非线性上升趋势,直至峰值荷载后呈下降趋势;极限弯曲强度大于初裂弯曲强度时,材料能够实现挠曲硬化和多重开裂行为,如图中 III 类曲线(如试件 GT2S5-T20、GT3S4-T20、GT3S5E-T20 等)。B 点之后为破坏阶段,此时继续加载,裂缝不断向上延伸,纤维逐层拉断,试件最终丧失承载力,曲线呈下降趋势,直至完全破坏。

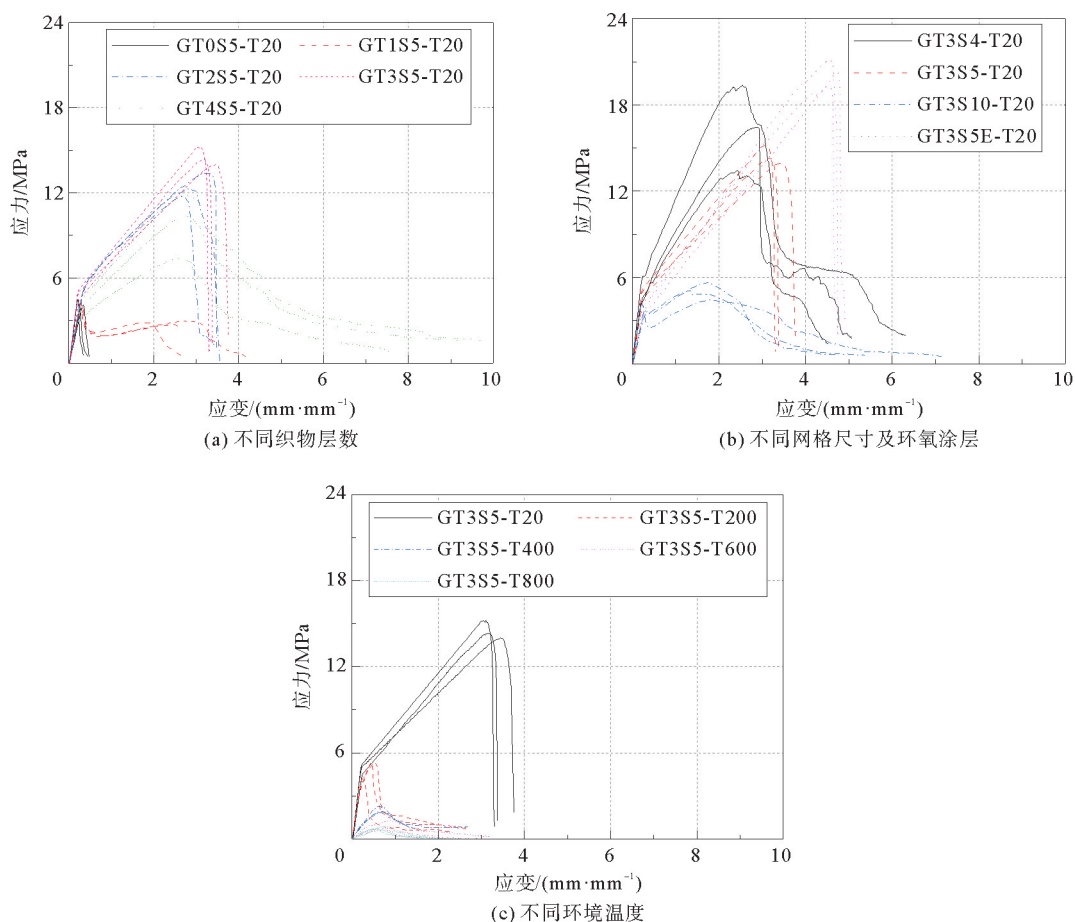


图 7 试件弯曲应力-应变曲线

Fig. 7 Flexural stress versus strain curves of specimens

2.2 织物层数对弯曲力学性能的影响

图 7(a)给出了不同织物层数时 GTRGM 试件的应力-应变曲线。可见,当未采用织物增强(I 类曲线)或织物层数较少(II 类曲线)时,试件在三点弯曲加载下呈现单缝开裂的脆性断裂模式,应力-应变曲线在达到初裂点 A 后迅速下降;而当织物层数大于 1 时,随着织物层数的增加,试件逐渐呈现多缝开裂的延性破坏模式,应力-应变曲线在到达 A 点后仍能持续上升,表现出显著的强化效应,直至达到极值点 B 后才出现下降趋势(III 类曲线)。

图 8(a)和图 9(a)分别给出了织物层数对 GTRGM 试件的弯曲强度、应变、延性和韧性的影响。由图可见,当未采用织物增强或织物层数较少时,试件未能形成有效的抗弯机制,未出现明显强化现象,各项指标均较小。随着织物层数的增加,试件的各项参数基本呈增大趋势,当织物层数为 3 时,试件的峰值弯曲强度 f_B 、峰值应变 ϵ_B 、韧性系数 D 和延性系数 I 均达到最大值。与未采用织物增强试件相比,织物为 3 层试件的

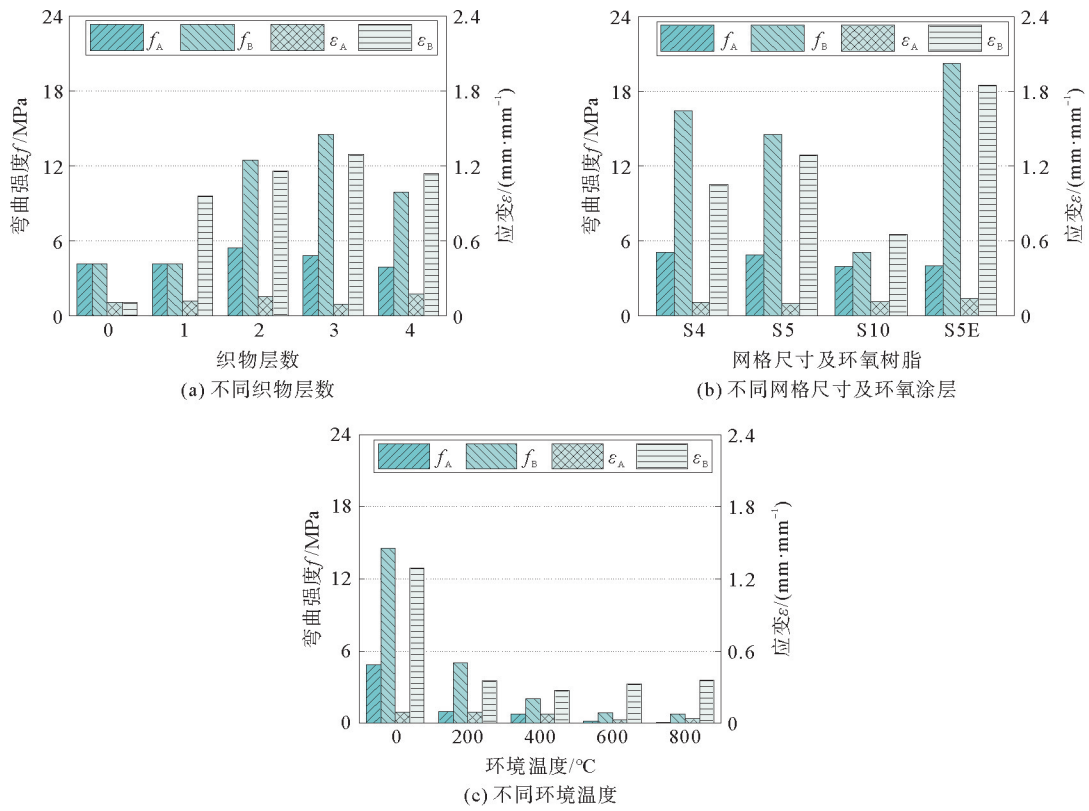


图 8 试件弯曲强度和应变

Fig. 8 Flexural strength and strain of specimens

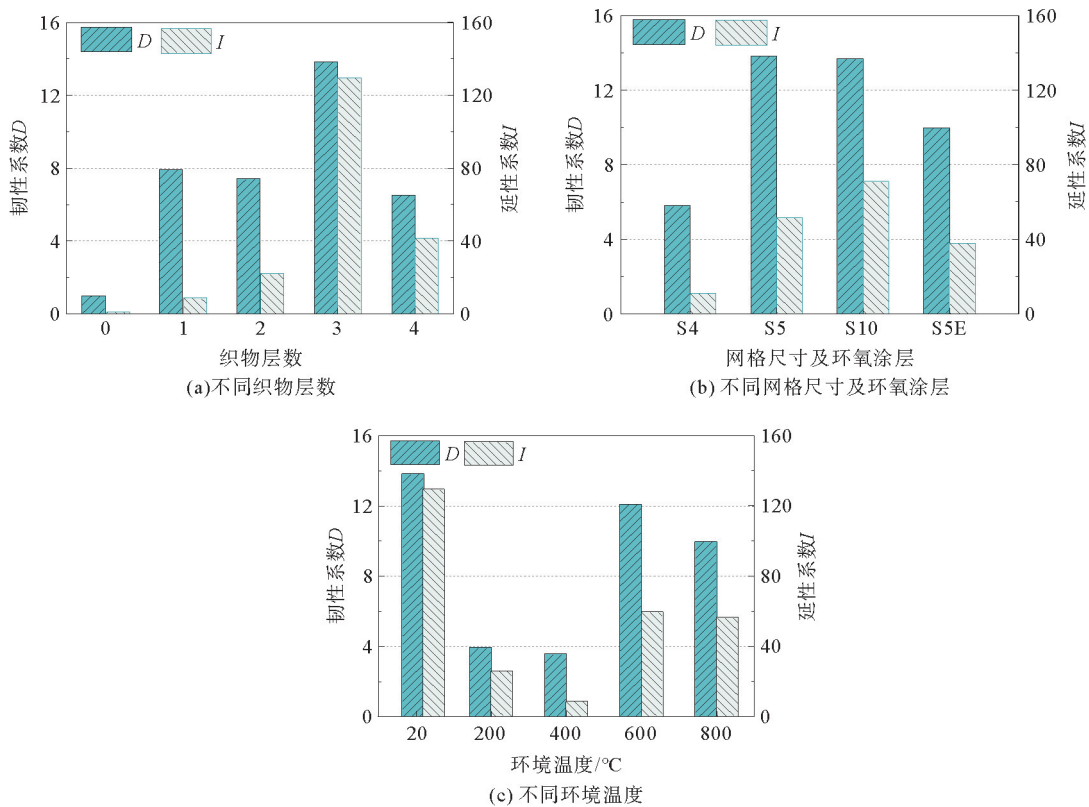


图 9 试件延性和韧性系数

Fig. 9 Toughness and ductility index of specimens

f_A 和 f_B 分别提高了 17% 和 250%, ϵ_B 、 D 和 I 激增, 表明此时试件的抗弯性能、延性和韧性显著增强。但当织物层数增至 4 时, f_A 、 f_B 和 ϵ_B 分别降低了 20%、32% 和 12%, D 和 I 分别降低了 53% 和 49%, 这主要是由于试件厚度固定不变时, 随着织物层数的增加, 过多的织物层数导致砂浆基体的密实度下降, 削弱了基体内部的有效粘结与荷载传递效率, 从而对弯曲力学性能产生不利影响。因此, 纤维织物层数的合理配置对 GTRGM 试件的力学性能尤为重要, 现有试验条件下, 3 层织物增强在提升综合弯曲性能方面表现出最优平衡, 而过度增强反而会引发负面效应。

2.3 网格尺寸及环氧涂层对弯曲力学性能的影响

图 7(b) 给出了不同网格尺寸及环氧涂层下 GTRGM 试件的应力-应变曲线。可见, 随着网格尺寸的减小, 试件在初裂点后的应力-应变曲线表现出显著的强化效应, 呈现持续的应力增长和更大的应变能力。除网格尺寸为 10 mm 的试件外, 其余试件均出现典型的 III 类曲线特征, 即在初裂点后试件仍能持续承载至峰值荷载。此外, 在纤维织物表面涂覆环氧涂层后, 试件的强化效应更加显著。

图 8(b) 和图 9(b) 分别给出了网格尺寸对 GTRGM 试件弯曲强度、应变、延性和韧性的影响。由图可见, 当网格尺寸较大(10 mm)时, 试件未能形成有效的抗弯机制, 未出现显著的强化现象, 各项韧性指标均处于最低值。随着网格尺寸的减小, 初裂点和峰值点的弯曲强度均呈逐步增大的趋势, 而相应的应变未表现出明显变化。当网格尺寸由 10 mm 减小至 4 mm 时, 弯曲强度达到最大值, f_A 和 f_B 分别提高了 22% 和 69%。而当网格尺寸由 10 mm 减小至 5 mm 时, 应变、延性和韧性达到最大值, ϵ_B 、 D 和 I 分别提高了 49%、58% 和 79%; 进一步由 5 mm 减小至 4 mm 时, 应变、延性和韧性有所降低。这一现象与钢筋混凝土梁中的超筋梁破坏模式相似, 随着纤维织物密度的增加, 增强效果逐渐饱和, 导致试件的抗弯强度提升但延性降低, 最终导致具有更高密度网格的试件(网格尺寸 4 mm)出现剪切破坏现象。

图 8(b) 和图 9(b) 还分别给出了环氧涂层对 GTRGM 试件弯曲强度、应变、延性和韧性的影响。由图可见, 当采用织物涂覆环氧涂层后, 初裂弯曲强度有所下降, 韧性系数变化不大, 但峰值弯曲强度、初裂和峰值应变、延性系数均显著提升。网格尺寸 5 mm 试件在织物涂覆环氧涂层后, f_B 、 ϵ_A 、 ϵ_B 和 I 的增幅分别为 28%、31%、30% 和 27%, 表明环氧涂层能够显著增强 GTRGM 试件的弯曲性能。这主要归因于环氧树脂的涂覆在修复纤维织物微观损伤的同时, 提高了纤维束的整体性和抗拉性能, 从而有效提升了 GTRGM 试件的弯曲力学性能。

2.4 环境温度对弯曲力学性能的影响

图 7(c) 给出了经不同环境温度处理后 GTRGM 试件的应力-应变曲线。可见, 经过高温处理后, 试件弯曲性能显著劣化, 各试件均未能形成有效的抗弯机制, 其应力-应变曲线呈现典型的 I 类曲线特征, 即在初裂点后迅速下降。

图 8(c) 和图 9(c) 分别给出了环境温度对 GTRGM 试件的弯曲强度、应变、延性、韧性的影响。由图可见, 随着环境温度的升高, 初裂、峰值弯曲强度和应变以及延性、韧性均呈下降趋势。当环境温度由室温(20 °C)增至 800 °C 时, 试件的 f_A 和 f_B 仅为常温下的 2% 和 5%, 而 ϵ_A 和 ϵ_B 也仅为常温下的不足 40%, 说明高温对试件整体弯曲性能产生显著的负面影响。这主要归因于高温环境下, 纤维束和砂浆基体的性能快速退化, 导致 GTRGM 试件在高温作用下失去原有的结构强度和韧性, 从而大幅降低了其弯曲性能和韧性。但在 600 和 800 °C 的高温下, 初裂点和极值点的韧性变化不明显, 使得 D 和 I 值有所波动, 这主要是由于高温作用下砂浆基体与织物性能均大幅下降, 此时韧性指标 D 和 I 并不适用。

3 微观形貌

图 10 给出了典型 GTRGM 试件破坏断面的 SEM 微观形貌。由图 10 可见, 在常温环境下, 试件的地聚合物砂浆基体结构致密, 表面无明显孔隙, 且砂浆紧密附着在纤维束周边, 使得纤维束和基体能够协同工作, 从而有利于多缝开裂的发生, 提高了试件的弯曲力学性能。然而, 随着环境温度的增加, 砂浆基体表面出现明显的孔隙分布, 破坏面呈现多孔形态。这主要是由于基体水化胶凝体中的水分在高温下大量蒸发, 可能还伴随着胶凝体的相变或相互作用, 从而导致砂浆基体强度的大幅下降。当环境温度低于 600 °C 时, 玻璃纤维

外观形貌未出现明显变化,仍保持良好的结构稳定性;而当温度升高至 800 ℃ 时,玻璃纤维出现软化现象,承载能力显著降低。表明高温条件下纤维和基体的性能受到严重影响,导致试件的弯曲力学性能大幅下降。

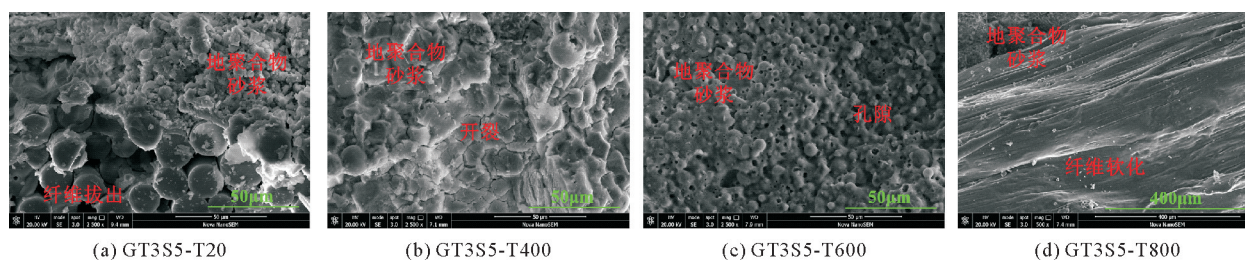


图 10 试件破坏断裂面的 SEM 微观形貌

Fig. 10 Microstructure on the fracture surface of typical specimens from SEM

4 结论

通过对玻璃纤维织物增强地聚合物砂浆(GTRGM)的弯曲力学性能试验研究,揭示了织物层数、网格尺寸、环氧涂层和环境温度等因素对其性能的影响,得出以下主要结论:

1) 纤维织物与地聚合物砂浆基体能够实现紧密结合并协同工作。随着织物层数的增加,试件呈多缝开裂的延性破坏模式,初裂后继续提供强化效应。当织物层数为 3 时,试件弯曲强度和应变达峰值,分别提高了 71% 和 92%,延性、韧性系数提高了 90% 以上。织物层数增至 4 时,峰值弯曲强度、应变、延性和韧性有所下降,主要是由于过多的织物层数导致试件密度下降。

2) 随着网格尺寸的减小,试件弯曲强度显著增大,网格尺寸由 10 mm 减小为 4 mm 时,初裂强度和峰值强度提高最为明显,分别提高 22% 和 69%;网格尺寸为 5 mm 时弯曲韧性最大。这与钢筋混凝土中的超筋梁破坏模式相似,较高的织物密度增强了抗弯强度,但也导致延性降低,发生剪切破坏。

3) 涂覆环氧树脂后,除初裂弯曲强度和韧性系数外,其余各项指标均有明显提升。这主要是由于环氧涂层增强了纤维束的整体性和抗拉能力,从而显著提升了试件的弯曲力学性能。

4) 随着环境温度的升高,试件弯曲强度、应变、延性和韧性显著下降。在高温环境下,试件未能保持有效的抗弯机制,导致各项性能指标迅速下降。这主要是由于温度升高导致纤维束软化,砂浆基体中的水化产物发生脱水和相变,进而引发基体破坏和孔隙率的增加。

参考文献:

- [1] 赵羽习,张大伟,夏晋,等. 混凝土结构全寿命减碳技术研究进展[J]. 建筑结构学报,2024,45(3):1-14.
ZHAO Yuxi,ZHANG Dawei,XIA Jin,et al. Research progress of life-cycle carbon emission reduction technologies for concrete structures[J]. Journal of Building Structures,2024,45(3):1-14.
- [2] 刘庆,臧浩宇,王俊祥,等. 矿渣基地质聚合物的制备及其性能研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3):43-49.
LIU Qing,ZANG Haoyu,WANG Junxiang,et al. An overview of preparation and performance of slag based geopolymer [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2019,38(3):43-49.
- [3] ABOULAYT A,SOUAYFAN F,ROZIERE E,et al. Alkali-activated grouts based on slag-fly ash mixtures:From early-age characterization to long-term phase composition[J/OL]. Construction and Building Materials,2020,260. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120510.
- [4] SUN B B,YE G,DE SCHUTTER G. A review:Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials[J/OL]. Construction and Building Materials,2022,326. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126843.
- [5] 刘赛,朱德举,李安令. 织物增强混凝土的研究与应用进展[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(5):134-146.
LIU Sai,ZHU Deju,LI Anling. Research and application progress of textile reinforced concrete[J]. Journal of Architecture

- and Civil Engineering, 2017, 34(5):134-146.
- [6] CHOLOSTIAKOW S, KOUTAS L N, PAPAKONSTANTINOUC G. Geopolymer versus cement-based textile-reinforced mortar; Diagonal compression tests on masonry walls representative of infills in RC frames[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130836.
- [7] 彭卓. 玄武岩织物增强碱激发矿渣粉煤灰砂浆力学性能及耐久性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021: 13-19.
- PENG Zhuo. Study on the mechanical properties and durability of basalt textile reinforced alkali-activated slag-fly ash mortar[D]. Changsha: Hunan University, 2021: 13-19.
- [8] 朱德举, 彭卓, 任京华, 等. 玄武岩织物增强碱激发砂浆高温后抗弯力学性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 1-7.
- ZHU Deju, PENG Zhuo, REN Jinghua, et al. Flexural behavior of basalt textile reinforced alkali-activated mortar after exposure to elevated temperature[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2021, 48(6): 1-7.
- [9] 刘赛, 朱德举, 李安令, 等. 应变率和温度对耐碱玻璃纤维织物增强水泥基复合材料弯曲力学行为的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 675-683.
- LIU Sai, ZHU Deju, LI Anling, et al. Effects of strain rate and temperature on the flexural mechanical properties of alkali-resistant glass fabric reinforced cementitious matrix composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(3): 675-683.
- [10] LI A L, ZHU D J, MOBASHER B, et al. Dynamic flexural behaviors of AR-glass textile-reinforced concrete after exposure to elevated temperatures [J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(12). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15833.
- [11] RAOOF S M, BOURNAS D A. TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams; Behaviour at high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 424-437.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局科技司. 增强材料 机织物试验方法 第5部分: 玻璃纤维拉伸断裂强力 and 断裂伸长的测定: GB/T 7689.5—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [13] 国家市场监督管理总局标准技术管理司. 水泥胶砂强度检测方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局科技司. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [15] KIM D J, NAAMAN A E, EL-TAWIL S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 917-928.
- [16] SHAIKH F U A. Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites[J]. Materials and Design, 2013, 50: 674-682.

(责任编辑: 吕海亮)