

# 纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能试验研究

冯诚

浙江省台州市三门县建设工程质量检测有限公司,浙江台州 317100

DOI:10.61369/ME.2025060027

**摘要 :** 纤维增强水泥基复合材料作为一种新型建筑材料,其力学性能直接影响工程应用效果,通过系统性试验研究,对不同纤维类型和掺量下的水泥基复合材料进行力学性能测试,分析抗压强度、抗折强度、韧性指标等关键参数变化规律,试验结果表明,适当纤维掺量能显著改善材料的力学性能,为工程实际应用提供技术支撑。

**关键词 :** 纤维增强; 水泥基复合材料; 力学性能; 抗压强度

## Experimental Study on the Basic Mechanical Properties of Fiber-reinforced Cement-based Composites

Feng Cheng

Sanmen County Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 317100

**Abstract :** Fiber-reinforced cement-based composites, as a new type of building material, their mechanical properties directly affect the engineering application effect. Through systematic experimental research, mechanical property tests were conducted on cement-based composites under different fiber types and dosages, and the variation laws of key parameters such as compressive strength, flexural strength, and toughness were analyzed. The test results show that Appropriate fiber dosage can significantly improve the mechanical properties of materials and provide technical support for practical engineering applications.

**Keywords :** fiber reinforcement; cement-based composite materials; mechanical properties; compressive strength

随着现代建筑工程对材料性能要求不断提高,传统水泥基材料已难以满足复杂工况下的应用需求,纤维增强技术作为改善水泥基材料脆性特征的有效手段,通过在基体中掺入各类纤维,能够有效提升材料的韧性和抗裂性能,当前关于纤维增强水泥基复合材料的研究主要集中在理论分析层面,而针对不同纤维类型和掺量条件下的系统性试验研究相对较少,限制了该类材料在工程中的推广应用。

## 一、试验材料与方案设计

试验采用普通硅酸盐水泥作为胶凝材料,强度等级为42.5R,比表面积为350m<sup>2</sup>/kg。细骨料选用天然河砂,细度模数2.6,含泥量控制在2%以内,粗骨料采用碎石,最大粒径20mm,压碎值指标为8.5%,纤维材料分别选择聚丙烯纤维、钢纤维和玻璃纤维三种类型,长度规格为12mm,直径分别为0.02mm、0.5mm和0.015mm,水胶比设定为0.45,确保混合料具备良好的工作性能。

试验方案采用正交设计方法,考虑纤维类型、掺量和龄期三个主要因素,纤维体积掺量设置为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%四个水平,养护龄期分别为7d、14d、28d和56d。制备标准试件尺寸为100mm×100mm×100mm立方体试件和

100mm×100mm×400mm梁式试件,每组配比制作6个试件进行平行试验,试件成型后在标准养护室内养护,温度控制在20±2℃,相对湿度大于95%,混合料搅拌采用强制式搅拌机,搅拌时间严格控制在3~5min,确保纤维分散均匀。

## 二、力学性能测试方法

### (一) 抗压强度测试

抗压强度测试采用YAW-2000型压力试验机进行,加载速度控制在0.5MPa/s,试验前对试件表面进行处理,确保上下承压面平整度误差不超过0.05mm,加载过程中记录峰值荷载并观察试件破坏形态特征。每组试件取6个试验值的算术平均值作为该组的抗压强度代表值,当单个试验值与平均值偏差超过15%时,需

剔除该数据并重新计算平均值,测试结果显示,不同纤维类型对抗压强度的影响程度存在明显差异,钢纤维增强效果最为显著,在1.5%掺量下28d抗压强度达到56.8MPa,较基准混凝土提高23.4%。

### (二) 抗折强度测试

抗折强度测试采用四点弯曲加载方式,跨距为300mm,加载点距离为100mm,试验设备选用WAW-600型万能试验机,加载速率控制在0.05MPa/s,试验过程中连续记录荷载-挠度曲线,直至试件完全破坏。抗折强度按照相关标准公式计算,同时分析荷载-挠度曲线特征参数,纤维掺入对抗折强度改善效果明显,特别是在峰值后的延性表现方面,钢纤维掺量为1.0%时,28d抗折强度为8.3MPa,破坏过程呈现明显的延性特征,聚丙烯纤维虽然对峰值强度提升有限,但能够有效抑制裂缝扩展,延长材料的服役寿命<sup>[1]</sup>。

### (三) 弹性模量测定

弹性模量测试采用应力-应变曲线法,通过在试件表面粘贴应变片记录变形数据,加载设备采用电液伺服试验机,加载速率为0.3MPa/s,测试范围控制在峰值荷载的40%以内,确保材料处于线弹性阶段。数据采集系统实时记录荷载和应变值,计算弹性模量,试验结果表明,纤维类型对弹性模量影响相对较小,主要体现在线性段斜率的微小变化上,基准材料弹性模量为29.8GPa,钢纤维增强材料为31.2GPa,聚丙烯纤维增强材料为30.1GPa,纤维掺量增加时弹性模量变化趋势不明显,说明纤维主要起到增韧作用而非增强作用。

### (四) 泊松比测试

泊松比测试需要同时测量轴向应变和横向应变,采用双向应变测量系统,在试件中部粘贴纵向和横向应变片,加载过程中同步采集两个方向的应变数据。试验加载控制在弹性范围内,应力水平不超过峰值强度的30%,计算结果显示,基准材料泊松比为0.18,纤维增强后泊松比有所降低,钢纤维增强材料泊松比为0.16,聚丙烯纤维增强材料为0.17,泊松比降低表明纤维对横向变形具有约束作用,有利于改善材料的整体变形协调性,不同纤维类型的约束效果存在差异,与纤维刚度和界面粘结特性密切相关。

## 三、纤维分布与界面特性分析

### (一) 纤维分散性评价

纤维在水泥基体中的分布均匀性直接影响复合材料的整体性能,通过切片分析方法,对不同纤维类型在基体中的分布状态进行定量评价,建立纤维分布均匀性系数,采用变异系数来衡量纤维分散程度,聚丙烯纤维由于表面光滑且密度较小,在搅拌过程中容易产生团聚现象,分布均匀性系数为0.68,钢纤维具有良好刚度,分散性相对较好,均匀性系数达到0.82<sup>[2]</sup>。

纤维长径比对分散效果具有重要影响,长径比过大增加纤维缠绕概率,降低分布均匀性,通过优化搅拌工艺参数,包括搅拌时间、搅拌速度和投料顺序等,能够有效改善纤维分散状态,试验结果表明,采用干拌2min后加水湿拌3min的工艺,纤维分散

效果最佳,超声波处理能够进一步改善纤维表面特性,提高与基体的粘结性能。

### (二) 界面粘结性能分析

纤维-基体界面是决定复合材料性能的关键因素,界面粘结强度直接影响应力传递效率,通过单纤维拔出试验,测定不同纤维类型与水泥基体的界面剪切强度。钢纤维表面粗糙度较高,与基体形成良好的机械咬合,界面剪切强度达到4.2MPa,聚丙烯纤维表面经过特殊处理后,界面粘结强度为2.8MPa,主要依靠化学粘结作用,界面微观结构观察显示,钢纤维周围形成致密的水化产物层,厚度约为10 $\mu\text{m}$ ,有效增强了界面结合,玻璃纤维在碱性环境下会发生腐蚀,界面区域出现疏松多孔结构,影响长期性能稳定性。

### (三) 界面过渡区特征

界面过渡区是纤维与基体之间的薄弱环节,其微观结构特征直接影响宏观力学性能,通过扫描电镜观察发现,界面过渡区厚度一般为5-15 $\mu\text{m}$ ,该区域内水化产物结晶度较低,孔隙率相对较高。钢纤维界面过渡区结构相对致密,主要由钙硅水化凝胶和氢氧化钙晶体组成,聚丙烯纤维界面过渡区存在微裂缝,这是由于纤维与基体热膨胀系数不匹配造成的,界面过渡区的形成机理与水泥水化过程密切相关,纤维表面的成核效应会影响水化产物的沉积和结晶,通过表面改性处理可以改善界面过渡区结构,提高界面粘结强度。

### (四) 纤维取向分布

纤维在基体中的取向分布对复合材料的各向异性具有重要影响,采用图像分析技术统计纤维取向角度分布,建立取向系数评价指标,理想情况下纤维呈随机分布,取向系数为1.0。实际试验中由于成型工艺影响,纤维取向呈现一定规律性,振动成型试件中纤维趋向于水平分布,取向系数为0.73,静压成型工艺能够改善纤维取向分布,取向系数提高到0.89,纤维取向分布不均会导致材料性能的方向性差异,在实际应用中需要考虑主应力方向与纤维优势取向的匹配关系,长径比较大的纤维更容易出现取向问题,需要通过优化成型工艺来改善。

## 四、韧性与变形特性研究

### (一) 韧性指标计算分析

材料韧性是评价纤维增强效果的重要指标,反映材料在破坏过程中的能量吸收能力,采用荷载-挠度曲线下的面积来计算弯曲韧性,建立韧性指数评价体系,基准水泥砂浆的韧性指数为1.0,作为比较基准,钢纤维掺量为1.5%时,韧性指数达到4.6,表现出优异的延性特征,聚丙烯纤维韧性指数为2.8,虽然低于钢纤维,但相比基准材料仍有显著提升<sup>[3]</sup>。

韧性与纤维掺量呈现非线性关系,存在最优掺量范围,掺量过低时纤维数量不足,难以有效阻裂;掺量过高时纤维分布不均,反而降低基体密实度,通过回归分析建立韧性指数与纤维掺量的关系模型,为工程应用提供参考依据,不同龄期下材料韧性发展规律显示,纤维作用效果在早期即可体现,后期增长趋势相对平缓。

表1 不同纤维类型和掺量下的韧性指数数据

纤维类型	掺量 (%)	7d 韧性指数	14d 韧性指数	28d 韧性指数	56d 韧性指数
聚丙烯纤维	0.5	1.8	2.1	2.3	2.4
聚丙烯纤维	1.0	2.2	2.6	2.8	2.9
聚丙烯纤维	1.5	2.4	2.8	3.1	3.2
钢纤维	0.5	2.6	3.0	3.2	3.3
钢纤维	1.0	3.4	3.9	4.2	4.3
钢纤维	1.5	4.0	4.4	4.6	4.7
玻璃纤维	0.5	2.0	2.2	2.3	2.1
玻璃纤维	1.0	2.4	2.7	2.8	2.5

## (二) 变形性能特征分析

纤维增强水泥基复合材料的变形性能包括弹性模量、泊松比和极限应变等参数，弹性模量测试采用应力-应变曲线的线性段斜率确定，试验结果显示纤维掺入对弹性模量影响相对较小，钢纤维复合材料弹性模量为31.2GPa，略高于基准材料的29.8GPa，聚丙烯纤维由于自身模量较低，对整体弹性模量贡献有限，测试值为30.1GPa。极限应变是反映材料延性的直观指标，纤维增强能够显著提高材料的极限应变值，基准材料极限应变为0.0021，钢纤维增强材料达到0.0056，提升幅度达167%，如下图1所示，不同纤维类型和掺量条件下的应力-应变关系呈现明显差异，钢纤维表现出最佳的延性特征，峰值后仍能承受较大变形而不完全失效。

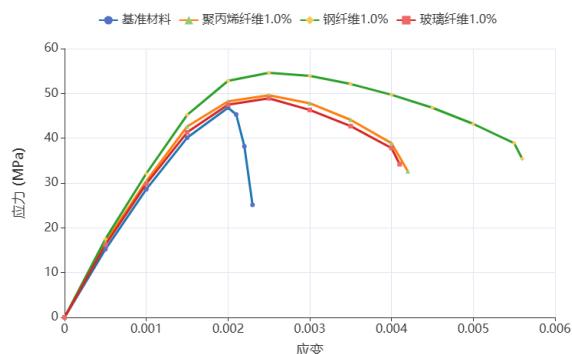


图1 不同纤维类型增强水泥基复合材料应力-应变关系

## (三) 裂缝发展规律分析

纤维增强水泥基复合材料的裂缝发展过程可分为三个阶段：弹性阶段、裂缝稳定扩展阶段和失稳破坏阶段，在弹性阶段，材料变形主要由基体承担，纤维作用不明显。当荷载达到基体开裂强度时，裂缝开始萌生并稳定扩展，此时纤维发挥桥接作用，阻

止裂缝进一步发展，随着荷载继续增加，裂缝数量增多，宽度逐渐增大，最终导致材料失效，钢纤维由于具有较高的抗拉强度，能够在较大应变范围内发挥桥接作用，有效延缓裂缝扩展，聚丙烯纤维虽然强度相对较低，但数量多且分布密集，能够控制微裂缝的发展，提高材料的整体韧性。

## (四) 疲劳性能特征

纤维增强水泥基复合材料在循环荷载作用下的疲劳性能是评价其长期服役能力的重要指标，疲劳试验采用正弦波加载，频率为10Hz，应力比为0.1，试验结果表明，纤维增强能够显著提高材料的疲劳寿命。基准材料在0.7倍抗折强度循环荷载下的疲劳寿命为 $2 \times 10^4$ 次，钢纤维增强材料疲劳寿命提高到 $8 \times 10^4$ 次，疲劳破坏过程中，纤维的桥接作用能够减缓裂缝扩展速率，延长裂缝稳定扩展阶段，疲劳裂缝主要沿着纤维-基体界面扩展，界面粘结强度对疲劳性能具有重要影响，不同纤维类型的疲劳性能差异主要与其弹性模量和界面特性有关<sup>[4]</sup>。

## (五) 冲击性能评价

冲击性能反映材料在动态荷载作用下的能量吸收能力，采用落球冲击试验进行测试，试验装置包括导向装置、冲击锤和试件支座，冲击能量通过改变落球高度来调节，测试参数包括首裂冲击次数和破坏冲击次数，评价材料的抗冲击性能。基准材料首裂冲击次数为15次，破坏冲击次数为28次，钢纤维增强材料首裂冲击次数提高到42次，破坏冲击次数达到89次，冲击韧性提升明显，聚丙烯纤维增强材料的冲击性能改善效果相对较小，但仍优于基准材料，冲击破坏模式分析表明，纤维增强材料破坏时呈现延性特征，裂缝分布较为分散，而基准材料表现为脆性断裂。

## 五、结束语

通过系统性的试验研究，深入分析了不同类型纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能特征。试验结果表明，纤维类型、掺量和龄期等因素对材料性能具有显著影响，其中钢纤维在提升抗压强度和韧性方面效果最为显著，聚丙烯纤维在改善裂缝控制方面表现优异，纤维-基体界面特性是决定复合材料整体性能的关键因素，通过优化界面粘结能够进一步提升材料力学性能，韧性和变形特性分析揭示了纤维增强机理，为工程应用中的配合比设计和性能预测提供了理论依据和技术支撑。

## 参考文献

- [1] 杜宪华, 吴继国, 谭旭翔, 等. 混杂纤维水泥基复合材料力学性能研究 [J]. 材料导报, 2025, 39(S1):172-177.
- [2] 车雅丽, 何明胜, 夏多田, 等. 钢纤维沙漠砂水泥基复合材料高温力学性能研究 [J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2025, 43(03):314-322.
- [3] 蒋博文, 黄世谋, 冯红丽, 等. 混掺纤维对水泥基复合材料的力学性能影响研究 [J]. 混凝土, 2025, (05):141-146.
- [4] 马明磊, 桂强, 白洁, 等. 碳纤维增强水泥基注浆材料试验与性能研究 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(02):77-82.