Study on the Influence of Fiber Parameters on the Mechanical Properties and Crack Behavior of Engineering Cement-based Composite Materials

Longxiang Gao

Shanxi Nuoxin Transportation Construction Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

As an important structural material in modern civil engineering and infrastructure construction, the service performance of Cheng cement-based composite materials is largely constrained by the microstructure and damage evolution mechanism of the materials. As the most typical damage form of cement-based materials, cracks not only determine the bearing capacity and ductility level of the material, but also directly affect its durability and long-term service safety. By introducing different types and parameter characteristics of reinforcing fibers into cement-based systems, the initiation conditions, propagation paths, and evolution modes of cracks can be changed to a certain extent, thereby achieving effective control over the mechanical properties of materials. The results of this study indicate that rational optimization of fiber parameter combinations can significantly improve the crack control ability and overall mechanical properties of engineering cement-based composite materials, providing theoretical basis and technical support for the design of high-performance and high durability cement-based materials.

Keywords

fiber parameters; engineering cement-based composite materials; crack behavior; mechanical properties

纤维参数对工程水泥基复合材料力学性能与裂缝行为的影响研究

高龙祥

山西诺信交通建设工程有限公司，中国·山西 太原 030000

摘　要

程水泥基复合材料作为现代土木工程与基础设施建设中的重要结构材料，其服役性能在很大程度上受材料微观结构与损伤演化机制的制约。裂缝作为水泥基材料最典型的损伤形态，不仅决定了材料的承载能力与延性水平，而且直接影响其耐久性与长期服役安全。通过在水泥基体系中引入不同类型与参数特征的增强纤维，可在一定程度上改变裂缝的起裂条件、扩展路径及演化模式，从而实现对材料力学性能的有效调控。本研究结果表明，合理优化纤维参数组合，可显著改善工程水泥基复合材料的裂缝控制能力与整体力学性能，为高性能与高耐久水泥基材料的设计提供理论依据与技术支撑。

关键词

纤维参数；工程水泥基复合材料；裂缝行为；力学性能

1 引言

随着工程结构向大跨径、高荷载与长寿命方向发展，传统水泥基材料因脆性破坏特征明显、抗裂与耗能能力有限等问题，已难以全面满足复杂服役环境下的工程需求。裂缝在水泥基材料中的产生与发展具有不可避免性，其形成往往源于材料内部微缺陷在外荷载或环境作用下的逐步扩展，并最终演化为宏观破坏。因此，如何有效延缓裂缝起裂、抑制裂缝扩展并控制裂缝形态，已成为提升工程水泥基材料性能的关键科学问题之一。基于此，本文以工程水泥基复合材料为研究对象，围绕纤维参数—裂缝行为—力学性能之间的内在关联展开分析，力求从结构与机理层面揭示纤维增强作用的本质规律。

2 工程水泥基复合材料中纤维作用的结构基础与机理

2.1 工程水泥基复合材料的多相结构特征与应力传递基础

工程水泥基复合材料本质上属于典型的多相非均质复

【作者简介】高龙祥（1988–），男，中国山西吕梁人，本科，高级工程师，从事道路桥梁研究。

合体系，其内部由水泥水化产物构成的连续基体、骨料相、孔隙结构以及分散分布的增强纤维共同组成 [1]。在宏观尺度上，该材料表现为准连续介质，而在微观与细观尺度上，则呈现出明显的结构不均匀性与力学响应差异性。水泥基体本身抗拉能力有限，内部普遍存在毛细孔隙、微裂纹及界面过渡区等结构缺陷，这些缺陷在外荷载作用下易成为应力集中源，是裂缝萌生与扩展的主要起点。

纤维的引入在材料内部构建了一种新的受力路径，使原本由基体单独承担的拉应力得以在纤维与基体之间重新分配。分散于基体中的纤维在未开裂阶段主要通过界面黏结与基体协同变形，对整体弹性模量影响有限；当微裂纹出现并逐渐扩展时，纤维开始跨越潜在裂缝面，承担部分拉应力，从而改变材料内部的应力传递机制。此种由“基体主导”向“基体—纤维协同”的应力传递转变，是纤维增强水泥基复合材料区别于普通水泥材料的结构基础。从结构层级角度看，纤维在细观尺度上的分布状态直接影响宏观力学性能的离散性与稳定性。纤维取向越均匀、空间分布越合理，其对裂缝的约束作用越稳定，有利于实现材料整体性能的可控提升。

2.2 纤维—基体界面作用机理与裂缝桥联效应

纤维增强作用的有效发挥，关键在于纤维—基体界面区域的力学行为。界面作为不同材料相之间的过渡区域，其黏结性能、摩擦特性及损伤演化规律，直接决定纤维在裂缝发展过程中的受力模式如下表 1。在外荷载作用下，当裂缝尚未贯通时，纤维主要通过界面黏结力与基体共同受力；随着裂缝张开位移的增大，界面逐渐发生损伤，纤维进入以滑移与拉拔为主的工作阶段 [2]。在裂缝扩展过程中，纤维跨越裂缝面形成典型的桥联结构，对裂缝尖端区域产生反向约束力。这种桥联效应不仅降低了裂缝尖端的应力强度因子，而且显著提高了裂缝扩展所需的能量，使裂缝扩展过程由突发失稳转变为渐进发展。同时，纤维的存在促使裂缝路径发生偏转与分叉，削弱单一主裂缝的主导作用，从而实现裂缝的细化与分散。不同纤维参数条件下，界面作用机制存在显著差异。界面黏结强度较低时，纤维易发生早期滑移，桥联作用持续时间有限；界面性能适中时，纤维可在拉拔过程中持续耗能，有利于提升材料延性；界面过强则可能导致纤维脆性拉断，不利于裂后性能的发挥。因此，纤维参数与界面特性的协同优化，是实现裂缝有效调控与力学性能提升的核心机理。

表 1 不同纤维参数条件下纤维—基体界面作用特征对比

纤维参数特征	界面主要作用形式	裂缝控制效果	对力学性能的影响特征
纤维长度较短、掺量较低	界面滑移为主	裂缝集中，控制效果有限	强度提升有限，延性改善不明显
纤维长度适中、掺量合理	拉拔—摩擦协同作用	多裂缝发展，裂缝细化	强度与延性协同提升
纤维长度较长、界面过强	纤维拉断为主	裂缝延缓但耗能不足	强度提高，延性受限

3 纤维参数对裂缝演化行为的影响规律

3.1 纤维几何参数对裂缝起裂与扩展模式的影响

在工程水泥基复合材料中，裂缝的产生与扩展本质上是材料内部应力重分布与能量释放的结果，而纤维几何参数在这一过程中发挥着关键调控作用。纤维长度与长径比直接影响其跨越裂缝面的能力，是决定裂缝起裂延缓效果与扩展稳定性的核心因素。当纤维长度较短或长径比较小时，纤维在裂缝萌生初期即易发生整体拔出，其对裂缝尖端应力的削弱作用有限，裂缝往往呈现出快速贯通的特征。随着纤维长度与长径比的增加，纤维在基体中的锚固能力显著增强，在裂缝扩展过程中能够持续跨越裂缝面并提供稳定的桥联约束。这种约束作用不仅提高了裂缝起裂所需的临界应力水平，而且促使裂缝在扩展过程中发生路径偏转和分叉，使裂缝由单一主裂缝向多裂缝形态转变。裂缝扩展速率的降低与裂缝数量的增加，有利于应变能在更大范围内耗散，从而提升材料整体抗裂稳定性 [3]。

3.2 纤维体积分数与分布特征对裂缝演化形态的影响

纤维体积分数是影响裂缝空间分布特征的重要参数之一。在低体积分数条件下，纤维数量有限，难以在材料内部形成连续有效的桥联网络，裂缝在扩展过程中仍以集中化发展为主，其宏观表现与普通水泥基材料差异不大。此时，纤维对裂缝的作用更多体现在延缓裂缝贯通时间，而非显著改变裂缝形态。

当纤维体积分数提高至一定范围后，纤维在材料内部的分布密度明显增加，裂缝在扩展过程中更容易与多根纤维发生相互作用，从而受到多点约束。这种多点桥联效应促使裂缝在不同位置重复起裂并相互竞争，使材料呈现出典型的多裂缝、细裂缝演化特征。裂缝宽度得到有效控制，裂缝扩展过程更加平缓，整体损伤演化由突发性向渐进性转变。需要指出的是，纤维体积分数并非越高越有利。过高的纤维掺量可能导致纤维分散性下降、局部团聚现象加剧，从而在材料内部形成新的弱区，反而不利于裂缝的均匀控制。因此，在工程应用中，应结合施工性能与力学需求，对纤维体积分数进行合理区间控制。

4 纤维参数通过裂缝调控对力学性能的影响

4.1 纤维参数对工程水泥基复合材料强度与破坏模式的影响

工程水泥基复合材料的宏观力学性能与其内部裂缝演化过程密切相关，而纤维参数正是通过调控裂缝行为对材料强度与破坏模式产生系统性影响。在未引入纤维或纤维参数

配置不合理的情况下，材料在受拉或受弯作用下通常表现为典型的脆性破坏特征，裂缝一旦起裂便迅速贯通，承载能力在短时间内急剧下降。合理配置纤维参数后，裂缝起裂阶段的应力集中得到有效缓解，使首裂荷载明显提高，从而在宏观层面体现为抗拉与抗弯强度的提升 [4-5]。

纤维长度与体积分数对强度发挥具有协同作用。纤维长度不足时，纤维在裂缝初期即发生滑移，难以对裂缝尖端形成有效约束；当纤维长度与长径比达到一定水平后，纤维在裂缝扩展过程中能够持续参与受力，使裂缝扩展过程受到稳定抑制。此时，材料在达到峰值荷载前能够承受更大的变形，破坏模式由单一贯通裂缝主导转变为多裂缝逐步发展的形式，整体结构安全储备显著增强。在压缩工况下，纤维对极限抗压强度的提升幅度相对有限，但其对破坏形态的改善作用尤为明显。纤维通过抑制斜裂缝的快速发展，使材料在压缩破坏过程中保持一定的完整性，峰后承载能力得以延续，从而降低突发性失稳风险。

表 2 纤维参数变化条件下裂缝演化行为特征对比

纤维参数水平	裂缝起裂特征	裂缝扩展模式	裂缝几何形态特征
纤维长度短、体积分数低	起裂应力低，起裂早	单一主裂缝快速扩展	裂缝少且宽
纤维长度适中、体积分数合理	起裂延缓，扩展稳定	多裂缝协同发展	裂缝细密、分散
纤维长度较长、体积分数偏高	起裂延缓明显	扩展受限但局部集中	局部裂缝不均

4.2 纤维参数对延性、耗能能力及峰后力学响应的影响

延性与耗能能力是评价工程水泥基复合材料安全性与适用性的重要指标，而纤维参数通过裂缝调控作用，对这两项性能具有决定性影响。裂缝扩展过程中，纤维的拉拔、滑移及逐步断裂行为构成了材料内部持续的能量耗散机制，使应力—应变关系在峰值之后仍保持较为平缓的下降趋势。这种峰后响应特征显著区别于普通水泥基材料的瞬时失稳破坏模式。

纤维体积分数的合理提高，有助于在材料内部形成多重桥联网络，使裂缝在扩展过程中不断受到新的约束点限制，从而延长裂缝稳定扩展阶段。与此同时，纤维界面性能对延性发挥具有重要影响。界面黏结性能适中时，纤维能够在较大裂缝张开位移范围内持续拉拔，显著提升材料的变形能力与耗能水平；若界面过强导致纤维提前拉断，则材料峰后耗能能力反而受到抑制。从整体力学响应角度看，纤维参数的优化配置使工程水泥基复合材料由“强度控制型”材料向“性能协调型”材料转变，在保证必要强度水平的同时，显著提升延性、耗能能力及破坏过程的可控性。这一特性对于承受复杂荷载与极端作用条件的工程结构具有重要的工程意义。

5 结论

纤维增强是改善工程水泥基复合材料裂缝行为与力学性能的重要技术手段。纤维参数通过影响裂缝起裂、扩展及演化方式，在材料损伤发展过程中发挥关键调控作用。研究表明，纤维长度、体积分数、长径比及界面性能等参数对裂缝控制效果具有显著影响，其合理匹配可促使裂缝由集中化向分散化发展，并显著提升材料的延性与耗能能力。纤维参数通过裂缝调控作用，使工程水泥基复合材料在强度、韧性与破坏安全性方面获得协同提升。相关研究成果可为高性能水泥基复合材料的设计与工程应用提供理论依据，对提升工程结构的耐久性与服役安全具有重要意义。

参考文献

[1] 李敏,路通,于禾苗,等.改性黄麻纤维协同水泥固化重金属铅污染土的强度及毒理性分析[J].岩土力学,2024,45(8):2242-2250.

[2] 刘敬福,齐莉,王一,等.热挤压对喷射沉积TiC_p/ZA35复合材料力学性能的影响[J].兵器材料科学与工程,2019,42(4):68-71.

[3] 徐长伟,张华健,杨军彩.秸秆处理方式对硅酸盐水泥基秸秆复合材料力学性能的影响[J].混凝土,2021,(2):59-62.

[4] 骆宣耀,韦粤海,马雷雷,等.硅烷偶联剂改性对玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂复合材料力学性能的影响[J].现代纺织技术,2023,31(4):103-110.

[5] 范淋,杨婴,祁小龙,等.SMAF增强PP/PVA混杂纤维工程水泥基复合材料拉伸性能[J].硅酸盐通报,2025,44(3):811-820.