第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210298

纤维网格增强超高性能混凝土拉伸刚化机理及协同增强效应

姚一鸣[1,2]，翟梦超[1]，董路遥[1]，王景全[1,2]

(1. 东南大学土木工程学院，南京 211189；2. 爆炸安全防护教育部工程研究中心，东南大学，南京 211189)

摘　要：制备了碳纤维网格增强超高性能混凝土(TR-UHPC)，开展了纤维网格拉伸、UHPC 拉伸、网格-UHPC 拔出和 TR-UHPC 拉伸试验，并结合数值模型研究了 TR-UHPC 的拉伸刚化响应以及碳纤维网格和钢纤维协同作用。结果表明：TR-UHPC 呈现出显著的应变硬化和多裂纹开展特性，拉伸强度、裂后刚度和延性有效提高；在钢纤维体积掺量为 0.5%~1.5%时，TR-UHPC 性能的提升主要由钢纤维桥连作用控制，当体积掺量为 1.5%~2.0%时，纤维网格-UHPC 粘结滑移性能起主要作用。数值模型考虑了包括纤维网格拉伸性能、UHPC 拉伸应力-裂缝宽度响应、纤维网格-UHPC 界面粘结滑移性能在内的主要作用机理，计算结果与实验结果符合较好。

关键词：超高性能混凝土；纤维网格；拉伸刚化；应变硬化；协同效应；数值分析
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2364–11
网络出版时间：2021–10–11



Tension Stiffening and Synergistic Effect in Textile Reinforced Ultra-High Performance Concrete

YAO Yiming[1,2], *ZHAI Mengchao*[1], *DONG Luyao*[1], *WANG Jingquan*[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Textile reinforced ultra-high performance concrete (TR-UHPC) with carbon textile and steel fiber was prepared. The tension stiffening behavior of TR-UHPC and synergistic effects of textile and short fibers were investigated by means of experimental and numerical studies on the mechanical characteristics of textile, UHPC, interfacial bonding and TR-UHPC composites. The prepared TR-UHPC exhibits a pronounced strain-hardening behavior with multiple cracking. The tensile strength, post-crack stiffness and ductility are apparently improved. The tensile behavior of TR-UHPC is mainly affected by the bridging mechanism of steel fibers as the volume fraction of steel fiber is increased from 0.5% to 1.5%. The bonding characteristics between textile and UHPC governs as the fiber volume fraction further increases to 2.0%. The numerical model incorporates the primary mechanisms including tensile properties of textile, stress-crack width relationship of UHPC and interfacial bonding between textile and UHPC. It is indicated that the simulated data by the model are in reasonable agreement with the experimental results.

Keywords: ultra-high performance concrete; textile; tension stiffening; strain-hardening; synergistic effect; numerical analysis

超高性能混凝土(UHPC)因其优异的力学性能和耐久性而受到广泛关注，成为当前土木工程领域的热点和前沿之一。国内外学者针对 UHPC 的组成设计、制备工艺、力学性能以及在桥梁、建筑结构和特种结构等工程中的应用开展了大量研究[1–8]。然而，由于胶凝材料用量大以及钢纤维的掺入，UHPC 的成本明显提高[9]。

由于 UHPC 较高的原材料成本，其在薄壁结构中的应用和推广成为主要途径之一，例如建筑幕墙、钢-超薄 UHPC 组合结构、永久模板、加固、铺装

收稿日期：2021–04–23。　修订日期：2021–06–19。
基金项目：江苏省自然科学基金项目(BK20180383)；国家自然科学基金项目(51908120，U1934205)。
第一作者：姚一鸣(1988—)，男，博士，副教授。
通信作者：王景全(1976—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–04–23.　**Revised date:** 2021–06–19.
First author: YAO Yiming (1988–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: yiming.yao@seu.edu.cn
Correspondent author: WANG Jingquan (1976–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: wangjingquan@seu.edu.cn

等[3,6,10]。然而 UHPC 的流动性会随着钢纤维体积掺量的增加而降低，且掺量过高时纤维易团聚而不能发挥其效应，并增加浇筑施工难度，尤其是对薄壁结构。另一方面，虽然 UHPC 具有一定的应变硬化响应，但其极限应变仍然相对较小。2016 年瑞士颁布的 UHPC 设计指南《Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning und application》[11]根据拉伸性能将 UHPC 分为应变软化(UO)，应变硬化(UA，极限应变大于 $1\,500\times10^{-6}$)和应变硬化(UB，极限应变大于 $2\,000\times10^{-6}$)[1]。应变硬化材料的裂后强度、延性、裂纹控制对结构韧性和灾害后功能可恢复性的提升具有显著意义。

纤维网格增强混凝土(TRC)是一种新型水泥基复合材料，采用连续的耐碱纤维网格增强，具有多缝开裂的特点和优异的拉伸应变硬化性能[12]。由于高性能纤维网格材料的耐碱性较好，优于钢筋的耐腐蚀性能，因此无需考虑保护层厚度，可显著降低 TRC 薄壁结构的厚度。TRC 实际使用时，其甚至可薄至 10 mm 左右，从而大幅降低结构自重，适用于多种轻型薄壁结构以及已有结构的维修加固[13]。但研究发现 TRC 构件在达到承载力时裂缝宽度和挠度较大，并且由于基体在开裂后不再传递荷载，纤维网格通过和基体的界面继续传力，粘结力在裂缝附近达到局部最高，易发生应力集中导致脱黏，从而使得纤维网格在达到极限承载前发生拔出破坏[14]。

为了提高 TRC 构件的抗裂能力和裂缝处荷载传递效率，国内外学者提出采用短切纤维进行混合增强。Gong 等[15]研究了短切聚乙烯(PE)纤维和聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维对碳纤维网格增强 TRC 薄板的拉伸性能影响，发现 2%体积掺量的 PE 和 PBO 纤维对 TRC 抗拉强度的提升分别高达 37.4%和 48.3%，且最大裂缝宽度最高减小近 90%。Li 等[16]制备了纤维网格增强高延性水泥基复合材料(ECC)，指出网格大小对界面粘结性能有不同影响，且当网格尺寸小于短切纤维长度时，其影响相比短纤维体积掺量占据主导地位。周臻等[9]研究了网格增强 UHPC 薄板的拉伸性能，结果发现碳纤维网格对 UHPC 的抗拉性能提升效果显著，应变硬化现象明显。朱德举等[17]研究了不同短切纤维对玄武岩网格增强 TRC 的拉伸性能影响，结果表明 TRC 的强度和韧性随着钢纤维掺量的增加而持续增加，且在钢纤维体积掺量为 1.5%时达到最大，而短切碳纤维体积掺量为 1.0%时 TRC 的强度和韧性增幅最大。

UHPC 基于颗粒紧密堆积理论设计并添加了高性能减水剂，即使在极低水胶比的情况下其浆体依然具有自流平特性。因此，UHPC 浆体与纤维网格具有很好的适应性，可制备薄壁 TRC 构件，即纤维网格增强超高性能混凝土 TR-UHPC，并可通过纤维网格和短切钢纤维之间的协同增强机制进行配合比调控，降低钢纤维掺量。UHPC 的弹性模量可达 50 GPa 以上，考虑到增强材料和基体之间的力学性能的匹配性，使用高弹模的纤维网格可更加充分地发挥两种材料的性能和组合效应，制备出力学性能和耐久性能更加优异的复合材料，可在服役荷载下有效抵抗开裂，大幅提升结构韧性和使用寿命[18]。

因此，TR-UHPC 制备和设计的关键是考虑材料参数的选取、各组分的协同工作机制和不同纤维的等代关系。本工作研究了采用碳纤维增强的 TR-UHPC 拉伸性能，通过纤维网格性能、UHPC 应力-裂缝宽度行为、纤维网格-UHPC 界面粘结特性以及 TR-UHPC 复合材料性能等多个层次研究了纤维网格和短切钢纤维的等代关系和 TR-UHPC 的拉伸刚化机理。

1　实验

1.1　样品制备

采用江苏苏博特新材料股份有限公司提供的超高性能混凝土预混料(SBT®-HDC)，钢纤维采用长度 13 mm，长径比为 65 的平直钢纤维。采用碳纤维网格作为 TR-UHPC 的增强材料，网格尺寸为 5 mm×5 mm，经纬向纤维束规格为 3 K，经纬向纤维束通过扭转编织成型，其编织结点通过缠绕固定。

开展了 UHPC 抗压和双边切口拉伸、纤维网格拉伸、纤维网格–UHPC 拔出和 TR–UHPC 拉伸几种试验，研究了 4 种钢纤维体积掺量：0.5%、1.0%、1.5%和 2.0%。

1) 抗压试验。根据 GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，通过 3 个边长为 100 mm 的立方体试块和 3 个 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试块测得所用 UHPC 的抗压强度和弹性模量分别为 124.3 MPa 和 48 GPa。

2) 双边切口拉伸试验。试件尺寸参考 JCT 2461—2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》中的拉伸试件，并在试件中间两侧引入深度为 3 mm 的预制切口。

3) 纤维网格拉伸试验。参考 GB/T 3362—2017

《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》和 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》，分别制备单束碳纤维和碳纤维网格条带拉伸试件。纤维网格条带宽 40 mm，单束纤维和条带试件测试标距均为 100 mm，试件两端使用环氧树脂粘贴铝片，方便楔形钳口加持并减缓应力集中效应。

4) 纤维网格–UHPC 拔出试验。拔出试件浇筑时采用分层浇筑的方式，先在狗骨模具中段放置厚度为 6.5 mm 的泡沫挡块将狗骨模具空间分为两半，在一侧区域内浇筑半层 UHPC，然后将裁剪好的宽度为 30 mm 的纤维网格铺设在半根的 UHPC 狗骨试件中，锚固长度为 20 mm，最后在之前固定好的泡沫挡块上再放置 1 块等厚的挡块，固定纤维网格并浇筑第 2 层 UHPC。

5) TR-UHPC 拉伸试验。TR-UHPC 试件尺寸参考 Wille 等[19]，采用测试段尺寸为 50 mm×25 mm×200 mm 的大狗骨。浇筑制备采用层铺工艺，设置了 6 层碳纤维网格。先在模具底部浇筑一层 UHPC，进行轻微振捣，保证浇筑质量和 UHPC 层厚度均匀，然后铺设 1 层裁剪好的纤维网格，拉紧网格并对其进行适当的按压，以确保网格与基体之间良好的粘结接触。当布置好第 1 层网格后，再次浇筑第 2 层 UHPC，如此反复操作，直到最后 1 层网格铺好并最终浇筑顶层 UHPC。试件编号含义以 T-C6-S0.5 为例，T 代表拉伸试验，C 代表碳纤维，6 代表设置 6 层纤维网格，S0.5 代表 UHPC 短钢纤维体积掺量为 0.5%。

浇筑好的试件表面用保鲜膜密封，自然养护 1 d 后拆模，于 90 ℃高温水浴中养护 3 d，最后转入标准养护条件下[(20 ± 2) ℃，湿度不低于 95%]养护 14 d。

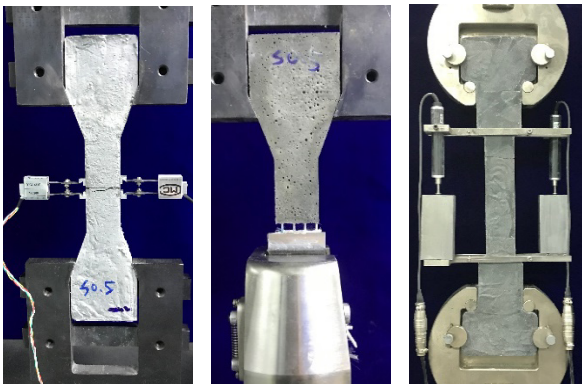
1.2 方法

1) 双边切口拉伸试验。通过双边切口拉伸试验获得拉伸断裂性能，使用深圳万测公司 ETM504C 电子万能试验机加载，采用位移控制，速率为 0.2 mm/min，荷载由试验机配套力传感器获取，使用 2 个夹式引伸计测试裂缝口张开位移(CMOD)并取其平均值，装置如图 1 所示。当加载力下降至最大荷载的 20%时，停止试验。

2) 纤维网格拉伸试验。分别进行单束碳纤维和碳纤维网格条带拉伸试验，使用深圳万测公司 ETM504C 电子万能试验机加载，采用位移控制加载，加载速率控制为 1 mm/min。

3) 纤维网格-UHPC 拔出试验。试件养护完成后，将外露纤维网格粘贴铝片加固及作为楔形夹具的夹持端。拔出试验采用深圳万测公司 ETM104B 电子万能试验机，位移控制加载，加载速率控制为 1 mm/min。加载装置如图 1 所示，其中混凝土段采用混凝土狗骨单轴拉伸试验夹具，纤维网格端使用楔形夹具固定事先粘贴好的铝片。

4) TR-UHPC 拉伸试验。试件养护完成后，在测试段 200 mm 的范围内刷白，通过贴纸生成黑色均匀散点，在加载过程中通过相机拍摄散点变化过程，后续采用数字图像相关法(DIC)进行图像处理分析，获取全域变形场。拉伸试验使用深圳万测公司 ETM504C 电子万能试验机加载，采取位移控制，加载速率为 0.1 mm/min，使用固定在试验段两侧的 LVDT 测量拉伸变形，取平均值，装置如图 1 所示。



(a) (b) (c)

图 1 (a)UHPC 双边切口拉伸试验，(b)纤维网格-UHPC 拔出试验，(c)TR-UHPC 拉伸试验

Fig. 1 (a) Double-edge-notched tension test of UHPC, (b) pull out test of textile, (c) tension test of TR-UHPC

2 结果与讨论

2.1 纤维网格拉伸性能

图 2 为单束碳纤维和网格条带拉伸力和位移的关系曲线。从图 2 可以看出：单束碳纤维在达到峰值拉力之前几乎是完全线弹性的，而网格条带在试验开始时处于松弛状态，故呈现非线性响应。随着荷载增加，径向纤维束逐渐拉直处于紧张状态，力–位移曲线开始呈现近似线弹性的特征。当拉伸力大约达到峰值力的 75%~80%时曲线开始呈现出较多的抖动，这是由于在拉伸的过程中条带从两端到中间出现明显的收缩现象，随着拉伸变形，经纬向纤维束发生脱绑，在峰值阶段发生异步断裂。根据网格拉伸试验得到的碳纤维网格力学指标见表 1。

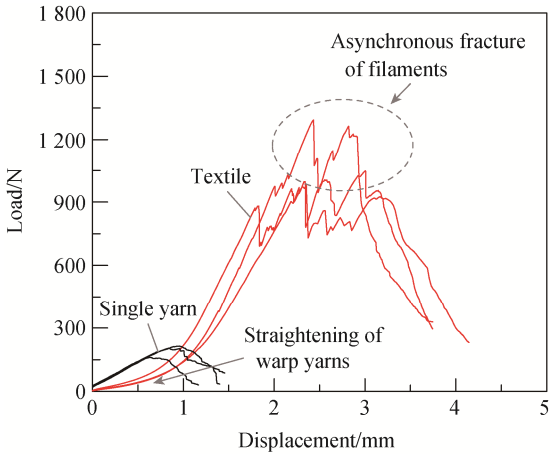


图 2　单束碳纤维与网格条带拉伸应力位移曲线

Fig. 2　Load-displacement curves of single yarn and textile

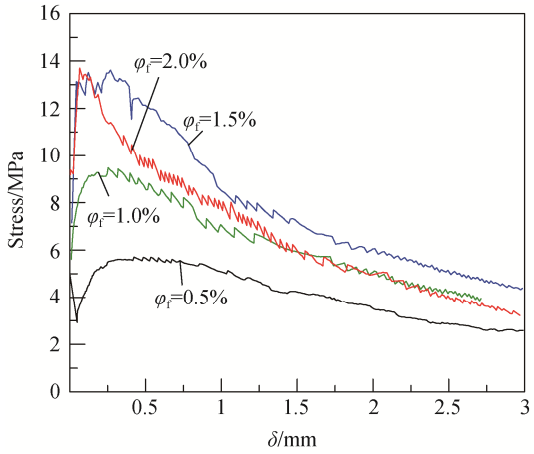
表 1　碳纤维网格性能参数

Table 1　Properties and geometry of carbon textiles

Mesh size/mm	Young's Modulus/ GPa	Tensile strength/ MPa	Peak elongation/ %
5×5	286	3431	2.8

2.2　UHPC 拉伸断裂特性

纤维增强混凝土材料的裂后拉伸性能可由应力–裂缝宽度本构关系进行表述[20–22]。图 3 和图 4 分别为不同钢纤维体积掺量的 UHPC 拉伸应力–裂缝宽度关系和试件破坏形态。从图 3 可以看出：随着钢纤维体积掺量从 0.5%提高到 2.0%，UHPC 抗拉性能显著提升，初裂应力从 4.8 MPa 提高至 9.4 MPa，极限应力从 5.6 MPa 提高至 13.7 MPa，峰值后残余强度也有明显提高，但掺量为 1.5%和 2.0%的试件拉伸性能较为接近。试件开裂后，裂缝宽度逐渐增加，应力通过钢纤维在开裂面传递，对于低纤维掺量的 UHPC 试样，其拉应力在初裂后呈现出最初的突然下降，然后上升至出现平台阶段，而掺量较高的试样在开裂后应力继续增加至平台。随着钢纤维承担的拉力继续增大，纤维–基体界面开始脱粘，钢纤维逐步被拔出，曲线呈现峰值后的软化阶段，应力随裂缝宽度的变大逐渐下降直至钢纤维被完全拔出。



φ_f is volume fraction of fiber.

图 3　不同钢纤维掺量的 UHPC 拉伸应力–裂缝宽度曲线(CMOD 指裂缝口张开位移)

Fig. 3　Stress-δ responses of UHPC with various steel fiber contents (δ is crack mouth opening displacement)



(a) φ_f=0.5%　(b) φ_f=1.0%　(c) φ_f=1.5%　(d) φ_f=2.0%

图 4　不同钢纤维掺量的 UHPC 试件破坏形态

Fig. 4　failure modes of UHPC specimens with various steel fiber contents

2.3　纤维网格–UHPC 界面性能

图 5 绘制了不同钢纤维掺量下碳纤维网格从 UHPC 中拔出的力–滑移曲线。以钢纤维体积掺量 0.5%的试件为例，纤维网格从基体中的拔出过程主要分为 3 个阶段[23]：线弹性段、脱粘段、滑动拔出段。第 1 个阶段是线弹性阶段，此时纤维网格与水泥基体间的粘结较好，其拔出力基本上随位移线性增加。当拔出力到达纤维网格与基体的界面粘结力极限时，两者间的粘结和机械咬合力出现下降，发生相互错动，出现脱粘的现象，反映在力–滑移曲线在到达峰值后随即出现的急剧下降，此为第 2 阶段。第 3 个阶段纤维网格与基体完全脱粘并滑动拔出，界面的粘结应力为滑动摩擦力，这一状态一直持续至纤维完全从基体中拔出。

碳纤维网格的经纬向纤维束通过环绕绑定，当达到极限粘结应力的时候，经向纤维束与基体发生脱粘和较大的滑移，经向纤维束的拔出即为经纬向纤维束脱绑的过程，因此在在峰值力过后，粘结滑移曲线会有一些抖动。试验后碳纤维网格发生完全的拔出破坏，其中纬向纤维束留存在混凝土中，而经向纤维束拔出，并且在纤维网格埋置的孔洞残留少数断裂的纤维丝。

试验结果表明纤维网格和 UHPC 之间的粘结力在钢纤维掺量 2.0%时达到最大，而掺量在 0.5%~1.5%之间变化时其影响并不显著。因本试验中采用的纤维网格尺寸小于所用钢纤维的长度(13 mm)，且在试件制制备时采用分层浇筑的方式，因此穿过网格的短纤维数量有限，更多地附着在网格表面和基体层之间，而更高的体积掺量下可能有更多数量的钢纤维穿过网格，从而提供额外的粘结锚固[24]。

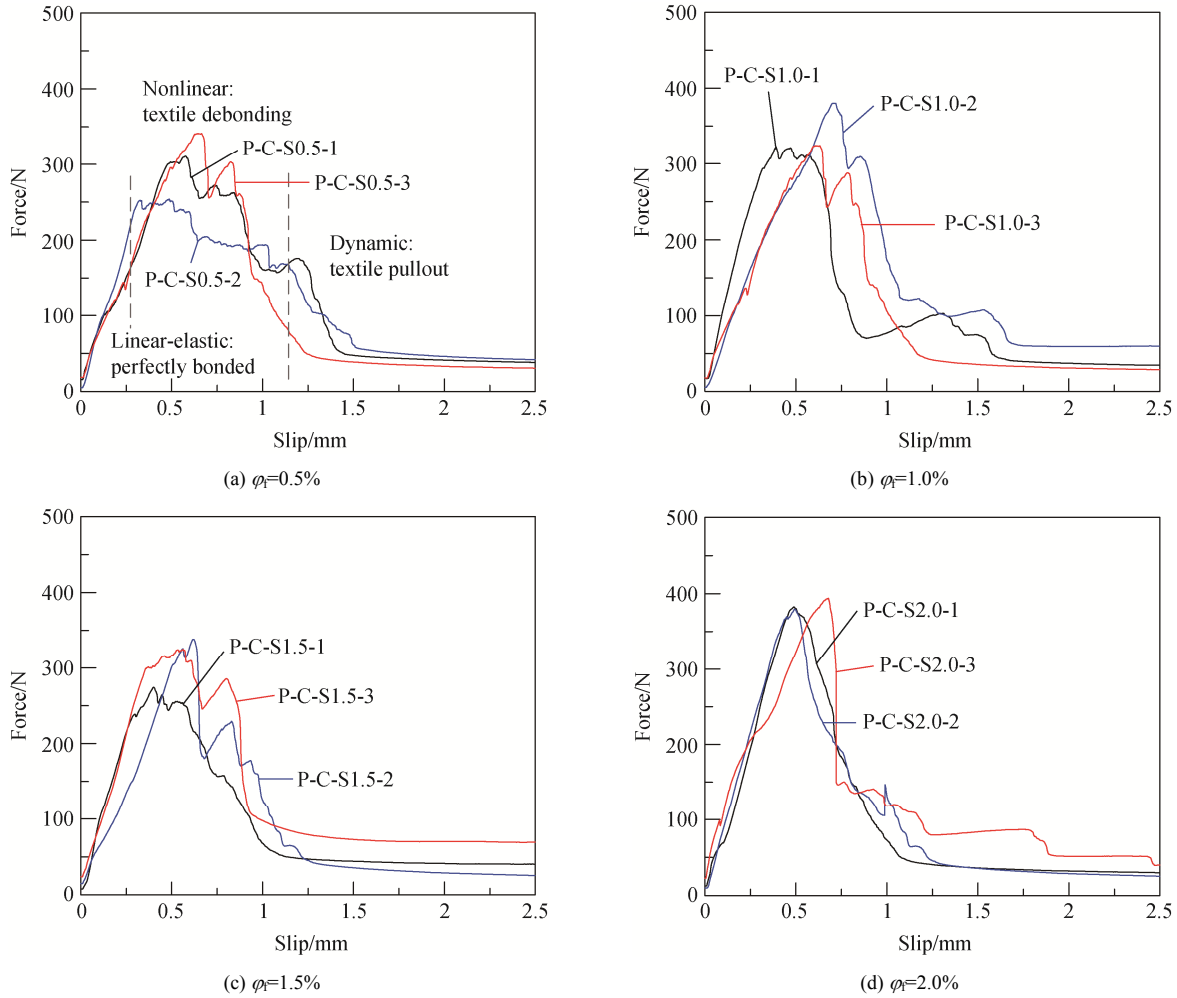


图 5 不同钢纤维掺量下碳纤维网格拔出力–滑移曲线

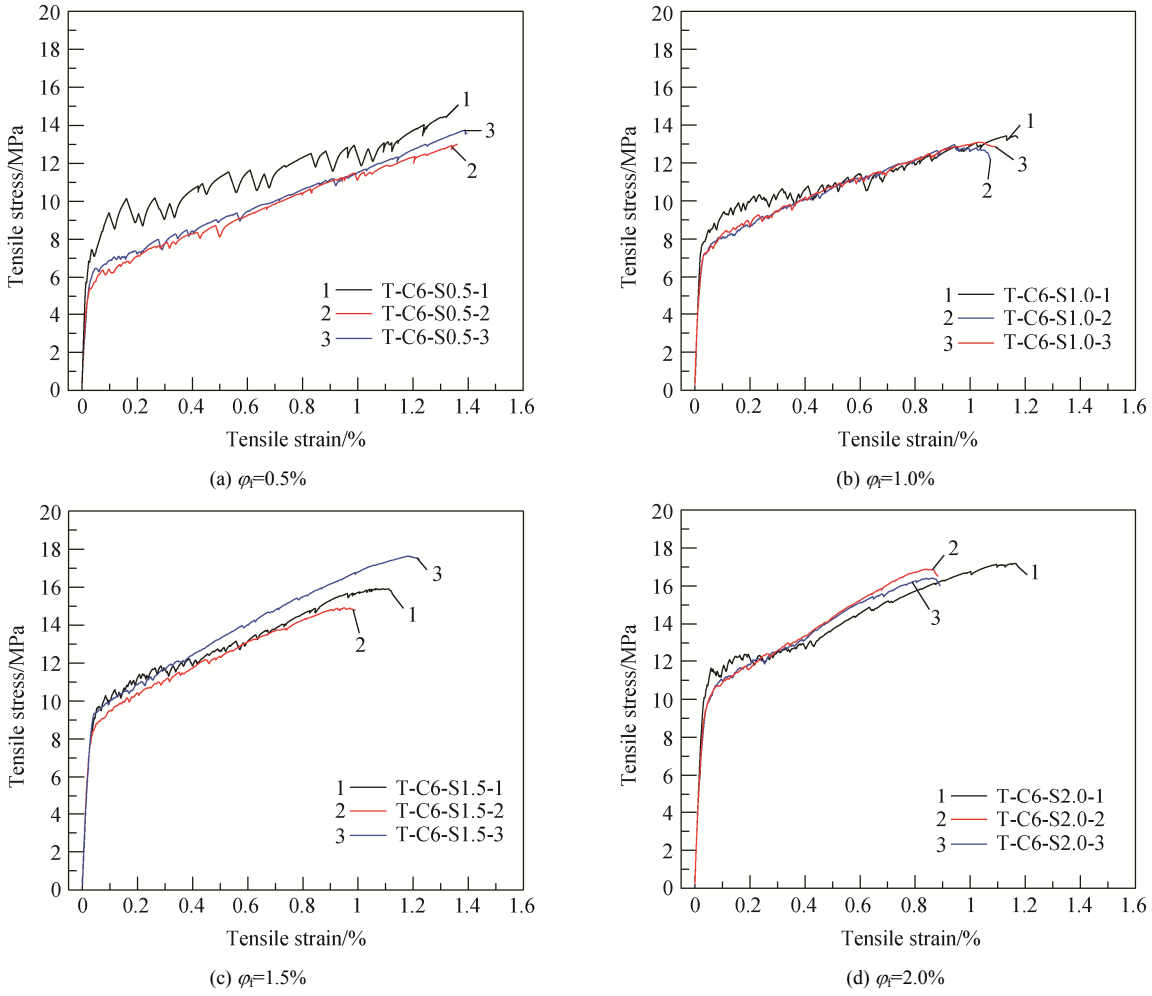
Fig. 5 Pullout load-slip responses of carbon textile embedded in UHPC with various steel fiber contents

2.4 TR-UHPC 拉伸性能

图 6 为不同钢纤维掺量下 TR-UHPC 应力–应变曲线。应力由荷载与 TR-UHPC 试件实际横截面的比值计算得到，应变为 LVDT 测得的变形除以标距。表 2 汇总了 TR-UHPC 的拉伸试验结果。可以看出 TR-UHPC 的应力–应变曲线不同于普通强度混凝土作为基体制备的 TRC。TRC 的拉伸行为一般分为 4 段[17,25]：第 1 阶段，TRC 处于线弹性范围，水泥基体未开裂；第 2 阶段，水泥基体开裂，并呈现多裂缝现象，应力–应变曲线变为波浪形，随着应变增加应力缓慢或无明显增加；第 3 阶段，拉伸强化阶段，裂缝处荷载仅由纤维网格承受，裂缝数量不再增加但宽度明显增大，应力持续上升；第 4 阶段，破坏阶段，主裂缝处纤维网格拔出或断裂破坏。由图 6 可见，TR-UHPC 多裂缝开展和拉伸强化 2 个阶段的区分并不明显，曲线在基体开裂后持续呈现波浪形，且应力持续增加直至达到极限应力，多裂纹开展贯穿了整个裂后过程，这说明 TR-UHPC 中钢纤维在裂缝处的传力机制在高应力状态下依旧有效。

作为连续纤维，网格的布置和其自身力学性能显著影响着 TR-UHPC 的裂后刚度、抗拉强度和延性。在基体中分散的短切钢纤维通过抑制基体初始缺陷和微裂纹的进一步发展提升了 TR-UHPC 的初裂荷载。基体开裂后，钢纤维和纤维网格在裂缝间共同通传递荷载，并对裂缝宽度起到控制作用，同时短纤维的掺入也影响着纤维网格与基体的粘结锚固机制。在网格与基体间的粘结锚固和钢纤维桥连传力双重作用下，基体在距离此裂缝一段距离处会重新达到开裂应力，由此产生多缝开裂。这也同时表明了在拉伸过程中 TR-UHPC 的裂缝宽度能够得到较好的控制，保持了纤维网格和钢纤维与基体间的粘结作用，因此在破坏前，应力–应变曲线没有明显的裂缝饱和阶段。随着裂缝逐步扩大，钢纤维的桥连作用逐渐减小(图 3)，荷载主要由纤维网格传递，直至最终破坏，因此在接近峰值荷载时新增裂缝数量少于低应力

阶段。由于网格和 UHPC 之间较高的粘结强度，试件均破坏于纤维网格的断裂。



(a) φ_f=0.5%　(b) φ_f=1.0%　(c) φ_f=1.5%　(d) φ_f=2.0%

图 6　不同钢纤维掺量下 TR-UHPC 拉伸应力–应变曲线

Fig. 6　Tensile stress-strain responses of TR-UHPC with various steel fiber contents

由表 2 可知，当钢掺量从 0.5%增加到 2.0%时，TR-UHPC 的初裂应力和拉伸强度分别提高了 72%和 23%。分布良好的短切钢纤维可以有效抑制微裂缝的扩展、相互连接和贯通，从而延缓可见宏观裂缝的形成，提高初裂应力。而钢纤维对拉伸强度的提高一方面是由于钢纤维在裂缝处通过桥连作用提供了额外的应力传递，裂缝宽度随着钢纤维掺量的增加而减小，保障了多裂纹开展阶段各个裂缝处的钢纤维都能够和纤维网格协同工作，持续传力。另一方面在于部分钢纤维插入到网格起到销栓作用，使基体与纤维网格协同受力[17]。网格的存在对基体内钢纤维分散带来的影响也不可忽略，因为试件中网格层间距较小，使得在分层浇筑时 UHPC 中短纤维朝向更加趋向于拉伸平面内受力方向，对于短纤维的利用率进一步提升，因此纤维网格的存在能够使 TR-UHPC 的开裂强度相比于同等钢纤维掺量下的 UHPC 有更显著的提升。

表 2　TR-UHPC 拉伸力学性能

Table 2　Tensile properties of TR-UHPC

Sample No.	Steel fiber volume fraction, φ_f/ %	Cracking stress/ MPa	Tensile strength/ MPa	Ultimate strain/ %	Toughness up to peak stress/ kPa
T-C6-S0.5	0.5	5.92	13.73	1.36	138.8
T-C6-S1.0	1.0	7.32	13.16	1.12	111.2
T-C6-S1.5	1.5	9.44	16.14	1.13	138.6
T-C6-S2.0	2.0	10.19	16.82	0.98	130.9

但当钢纤维掺量从 1.5%提高到 2.0%时，强度增加的幅度有所减缓，同时试件的峰值应变有所下降，这是由于碳纤维网格与 UHPC 的黏结性能在钢纤维体积掺量为 2.0%时有较为明显的提升(图 5)，纤维网格在拉伸过程中的滑移量降低，从而减小了 TR-UHPC 拉伸下的延性。

为了更加直观地分析 TR-UHPC 的应变分布和裂缝形态，采集拉伸过程中试件变形照片并通过 GOM Correlate 软件进行 DIC 分析[26]。图 7 给出了不同钢纤维掺量 TR-UHPC 试件的拉伸应变分布云

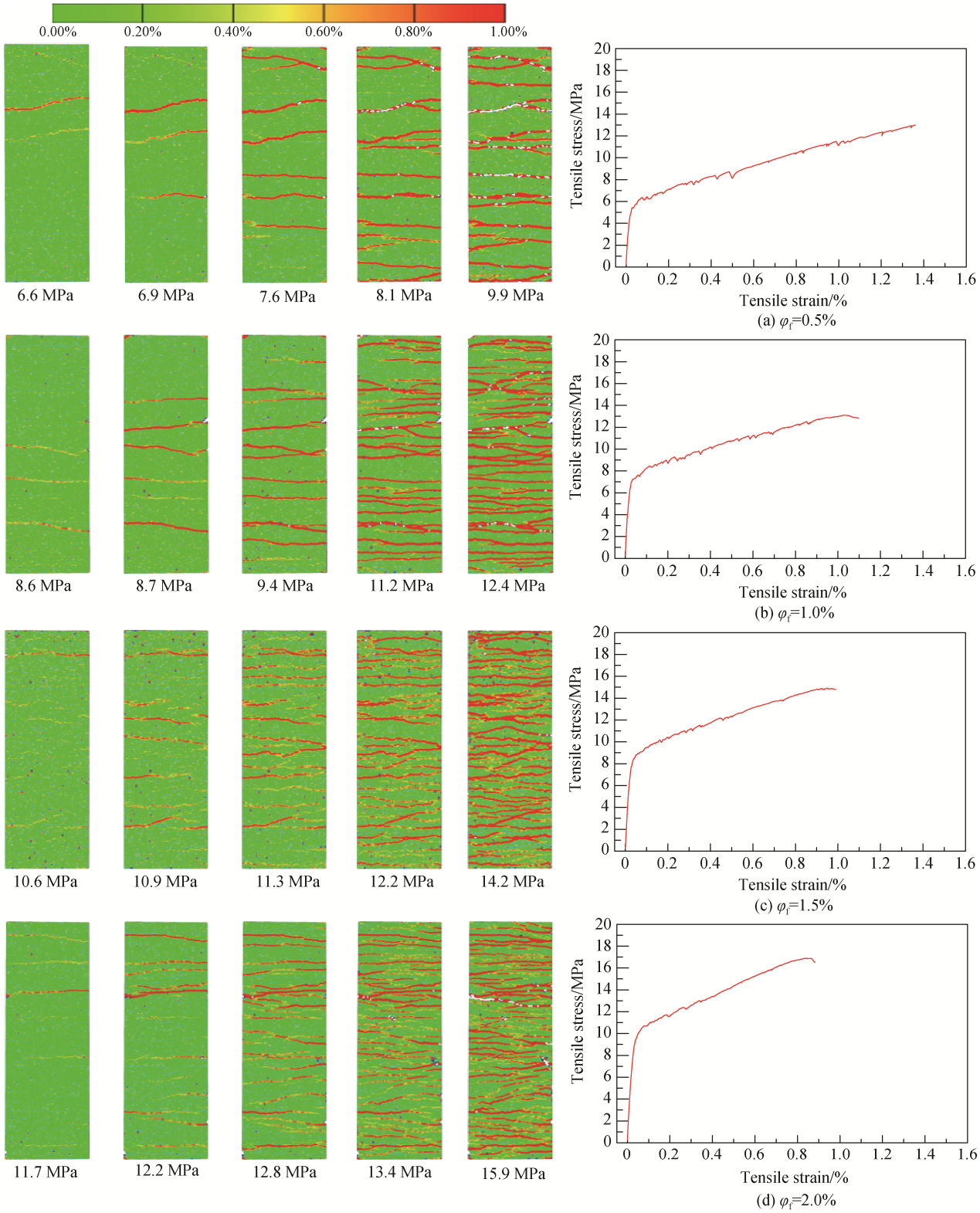


图 7 不同钢纤维掺量下 TR–UHPC 的应变云图及对应拉伸响应

Fig. 7 Strain distributions and corresponding tensile stress-strain responses of TR-UHPC with various steel fiber contents

图和相应的拉应力水平，其中绿色代表拉伸应变为0，红色代表 1%应变值。由图 7 可以看出，不同的TR-UHPC 试件均程现出明显的多缝开裂破坏形态。在加载初期 TR-UHPC 以线弹性行为为主，故开裂前云图呈现均匀的应变分布。随着荷载的增加，损伤和细微裂纹开始形成，对应云图上出现的红色和黄色的应变集中条带，且沿横向发展并最终贯穿。不同于裂缝处拉伸应变的高度集中和局部化，未开裂段的应变几乎呈均匀分布，且数值很小。其中，在红色的应变局部化区域中，DIC 的变形场并不连续，应力由纤维网格和钢纤维共同传递。在绿色的应变均匀分布区域中，可认为 UHPC 基体与纤维之间的粘结仍然保持较好，界面的滑移可以忽略。而在这两个区域之间则存在一个过渡区域，在这个区域中纤维和 UHPC 基体之间开始脱粘，拉伸荷载通过纤维和基体间的界面传递，其粘结应力分布可通过剪滞模型来描述[27]。

随钢纤维掺量的增加，裂缝的数量逐渐增多，同时间距逐渐变小，但钢纤维体积掺量为 1.5%和2.0%的试件裂缝数量相仿。试件多缝开裂更加显著是由于基体开裂后，钢纤维桥连机制可以有效阻碍裂缝进一步张开，延缓纤维网格的脱粘和拔出，形成纤维网格和钢纤维协同传力机制，提高拉伸应力在裂缝处传递的效率。同时由于裂缝张开，乱向分布的钢纤维在裂缝表面处承受的“滑轮效应力”显著提高，从而基体产生新裂缝所需的传力长度降低，因此在已有裂缝的附近可以产生新裂缝[28]。

3　数值模拟

TR-UHPC 作为一种复合材料，其力学性能主要取决于材料中各组分的协同工作，包括基体断裂、短纤维桥连作用、纤维网格拉伸性能和网格–UHPC 界面粘结性能等。基于 Soranakom 等[29–30]提出的TRC 拉伸刚化性能有限差分模型，考虑短纤维的裂后贡献进行修正，模拟 TR-UHPC 的拉伸刚化响应，分析纤维网格和钢纤维的协同效应及等代关系。

如图 8 所示，TR-UHPC 拉伸试样在开裂后的拉伸刚化行为由多个机制主导：1) UHPC 基体的开裂行为采用线性本构模型；2) 纵向纤维束的拉伸性能用拉伸应力–应变本构表达；3) 纤维网格与 UHPC 基体间的界面粘结性能使用粘结滑移本构曲线模拟；4) 裂缝间短切钢纤维的桥连传力作用使用应力–裂缝宽度本构关系表征。由以上 TR-UHPC 的拉伸过程和其中各组分的作用机理分析可得，影响TR-UHPC 拉伸性能的主要因素有 UHPC 基体开裂强度、纤维网格的配网率、纤维网格与基体间的界面粘结性能、短纤维掺量和短纤维裂缝间的桥连传力作用等。

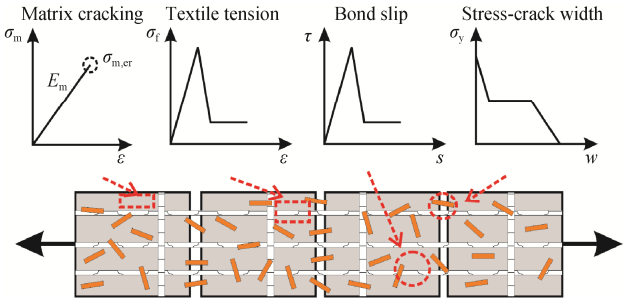


图 8　TR-UHPC 裂后各组分工作机理

Fig. 8　Mechanical behavior of cracked TR-UHPC

进一步将 TR-UHPC 直拉试件基于纤维网格的受力方向简化为一维模型(如图 9)，其中灰色部分为UHPC 基体，黑色直线表示等效的纤维网格经向纤维束。试样的一端固定，在另一端施加载荷，当拉伸应力超过基体的开裂应力时，裂缝产生，荷载开始通过纵向纤维和 UHPC 之间的界面来传递。

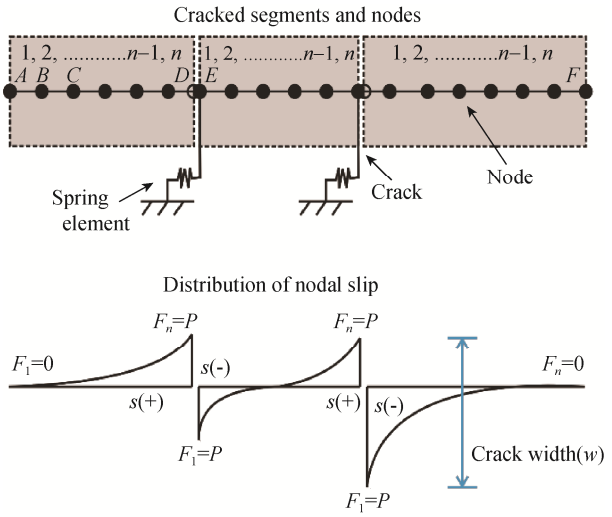


图 9　有限差分开型和滑移分布示意

Fig. 9　Schematic of finite difference model and nodal slip distribution

如图 9 所示，一维模型被等间距划分为多个微元，采用开裂后节点(图中黑点)与基体间的相对位移来模拟纤维网格在此节点处与 UHPC 基体的相对滑移，并作为未知量。依据所处位置，内部节点上作用有径向纤维拉伸力、纤维–UHPC 粘结作用力，边界节点除此之外还作用有外加荷载，钢纤维桥连作用力以弹簧单元形式施加在裂缝节点处，荷载大

小由各本构关系确定。据此建立各节点的静力平衡方程，在非线性分析中，采用迭代法求解得到节点滑移，进而解得相应的应力和应变响应。完整的推导、参数分析和实验验证详见原作[26,29–30]。

数值模型考虑了 UHPC 基体开裂强度、纤维网格的拉伸响应、粘结滑移性能以及钢纤维的桥连作用，其模型参数可基于本研究各部分试验数据选取。UHPC 的开裂应力随钢纤维掺量由低到高依次为 5.92、7.32、9.44 MPa 和 10.19 MPa。纤维网格与 UHPC 之间的粘结滑移本构关系依据网格拔出试验进行选取，如图 10 所示。纤维网格在 UHPC 内的平均粘结应力由式(1)计算：

$$\tau = \frac{F_{\mathrm{p}}}{n d_{\mathrm{s}} \pi l} \tag{1}$$

其中：τ 表示纤维束的平均粘结应力；F_{p} 代表拔出力；n 表示拔出试件中锚固的纤维束根数；d_{s} 表示一束纤维束的名义直径；l 表示纤维网格在拔出试件中的埋置深度，取 20 mm。由于钢纤维掺量在 0.5%~1.5%范围内时，其对粘结滑移性能的影响并不显著，故本构模型较为接近。

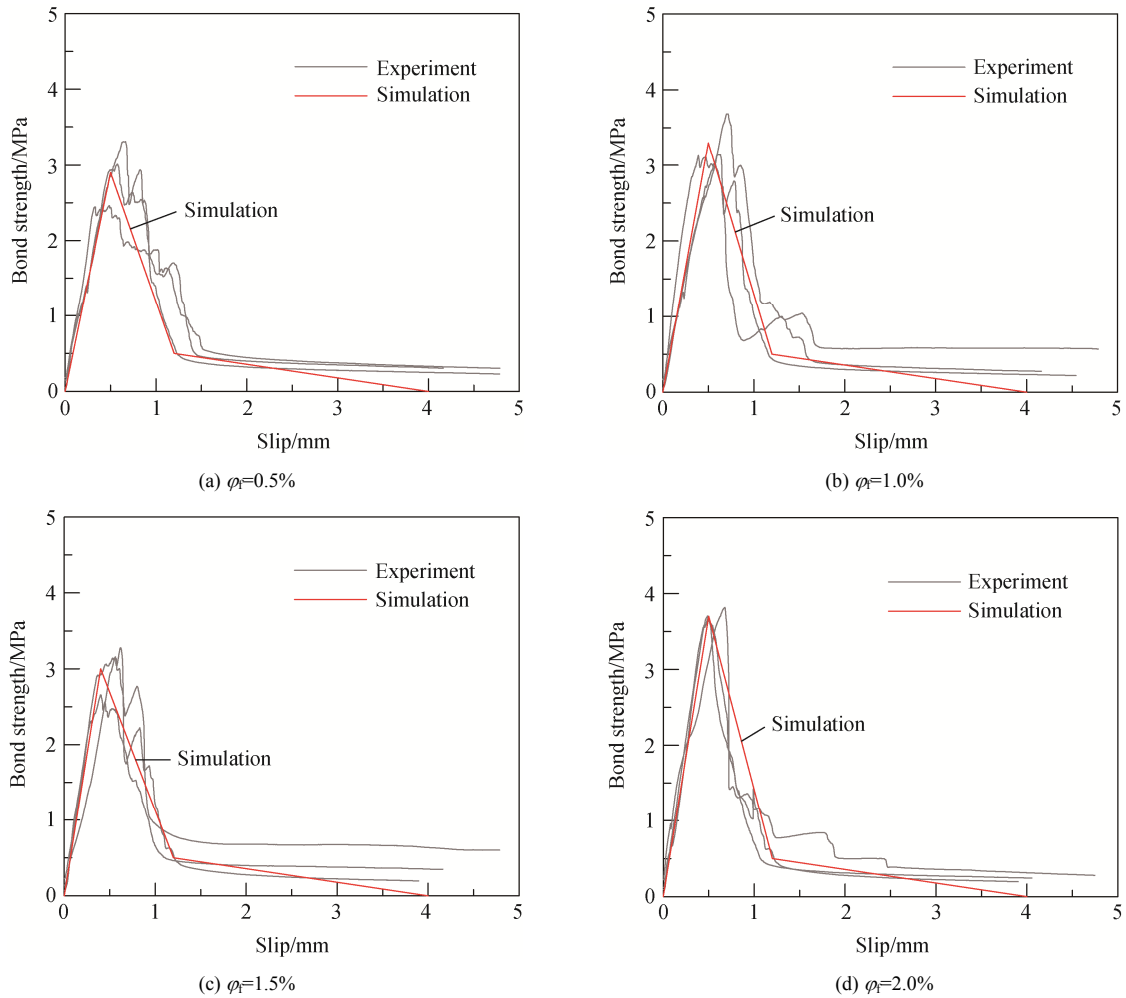


图 10 纤维网格–UHPC 粘结滑移模型选取

Fig. 10 Bond-slip model of textile embedded in UHPC

应力-裂缝宽度模型的选取如图 11 所示，纤维掺量对模型影响较为明显，拉伸应力随纤维掺量增加而提高。

将以上参数和本构关系代入有限差分数值模型计算，得到模拟的 TR-UHPC 拉伸应力–应变关系，结果与试验曲线对比如图 12 所示。由图 12 可见，数值模型和实测曲线符合良好，表明针对纤维-UHPC 粘结滑移性能和 UHPC 拉伸开裂性能的试验可以为模型计算和 TR-UHPC 拉伸刚化过程中各个力学机理的描述提供有效数据。在 0.5%~2.0%钢纤维掺量范围内，TR-UHPC 拉伸刚化性能的提升以及钢纤维和纤维网格的协同增强主要由 2 个阶段的作用决定：1) 0.5%~1.5%，钢纤维桥连应力的提高；2) 1.5%~2.0%，纤维网格–UHPC 粘结性能的提高。

该两项作用机理分别由数值分析中拉伸应力–裂缝宽度本构模型和纤维网格-UHPC 粘结滑移本构模型来反映。该方法可通过参数分析进一步揭示 TR-UHPC 纤维网格和钢纤维的协同作用，并为计算优化配比提供有效依据。

4　结论

1) 纤维网格主要作用于裂后阶段，对试件的破坏模式起控制作用，能够明显改变 UHPC 的拉伸行为，呈现出显著的应变硬化和多裂纹开展特性，促进钢纤维在多个裂缝处有效传递荷载，取代软化段，有效提高 UHPC 拉伸强度、裂后刚度和延性。

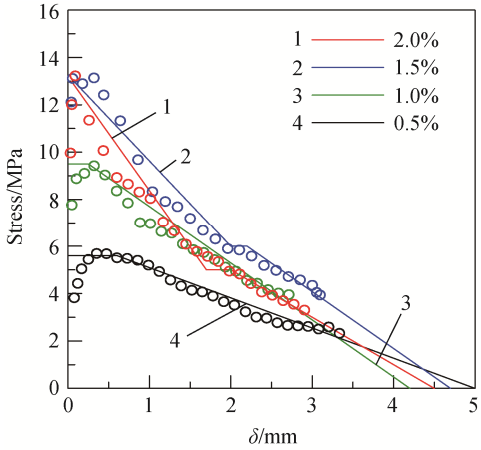
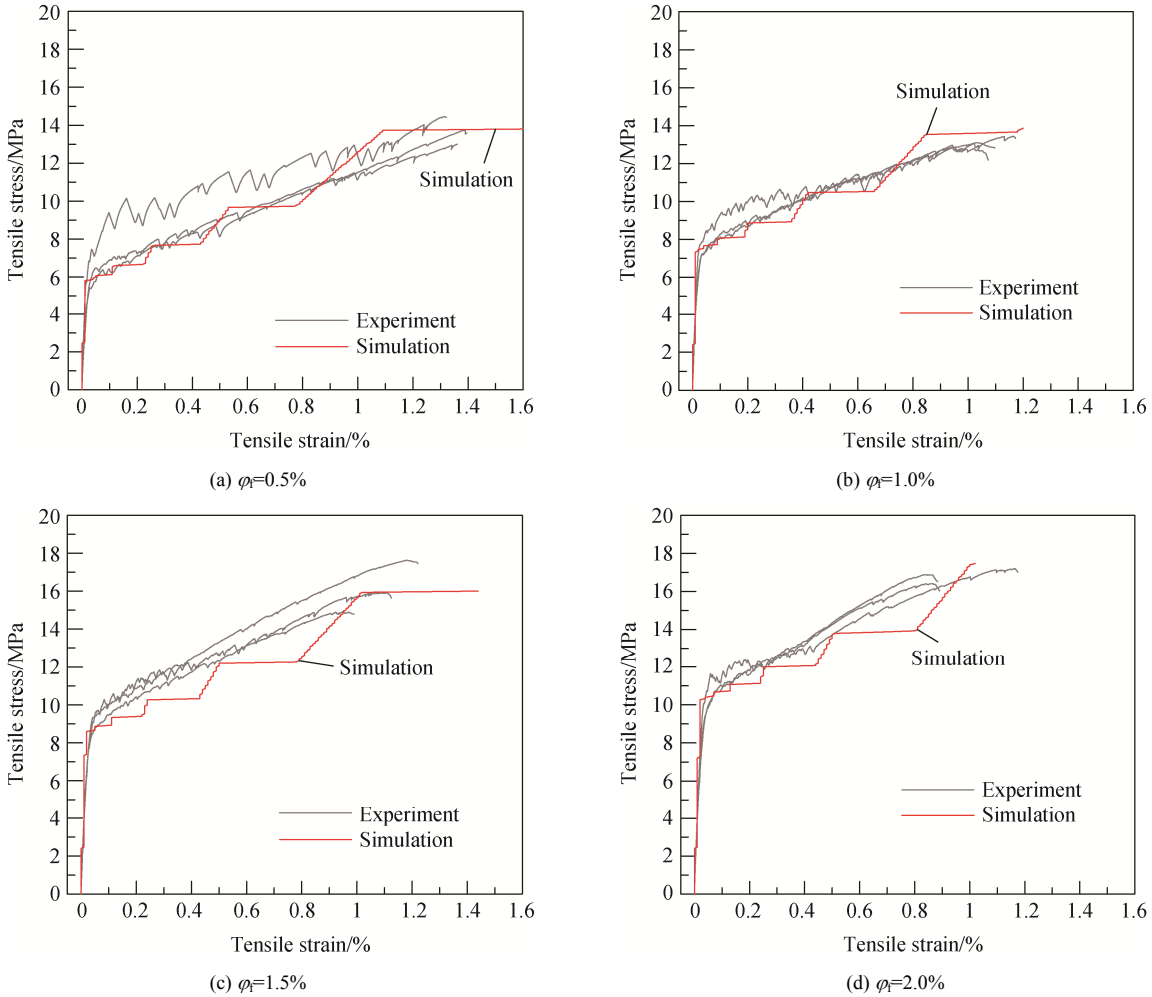


图 11　UHPC 拉伸应力–裂缝宽度模型选取

Fig. 11　Stress-crack width model of UHPC



(a) φ_f=0.5%　(b) φ_f=1.0%

(c) φ_f=1.5%　(d) φ_f=2.0%

图 12　模拟拉伸应力–应变关系与实测曲线对比

Fig. 12　Comparison of simulated tensile stress-strain relationship with experimental curves

2) 短切钢纤维作用于加载的整个过程，在基体开裂前抑制微裂纹扩展，开裂后与纤维网格协同传力，其掺量的增加可以显著提高 TR-UHPC 初裂强度和裂后强度，并通过提升局部传力效率产生更为细密的裂纹。但当体积掺量从 1.5%增加值 2.0%时其提升作用有限。

3) 当钢纤维体积掺量在 0.5%~1.5%范围内时，其对碳纤维网格–UHPC 粘结滑移性能影响有限，当掺量进一步提高至 2.0%时，粘结强度提高，但相应 TR-UHPC 拉伸性能与 1.5%掺量时接近。

4) 基于有限差分法的数值模型考虑了 TR-UHPC 拉伸过程的主要作用机理，计算结果与实验结果符合较好，该方法可为进一步分析纤维网格和钢纤维的协同作用和计算优化配比提供有效依据，从而实现基于纤维协同作用的TR-UHPC性能设计。

参考文献:

[1] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对 UHPC 力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2227–2236.
SHI Caijun, HE Wen, WU Zemei, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(8):2227-2236.

[2] 方志, 刘绍昆, 黄政宇, 等. 不同温度下超高性能混凝土的弯拉性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1732–1739.
FANG Zhi, LIU Shaokun, HUANG Zhengyu, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1732–1739.

[3] 位三栋, 马跃强, 彭斌, 等. 超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018(A2): 284–289.
WEI Sandong, MA Yueqiang, PENG Bin, et al. J Build Struct (in Chinese), 2018(A2): 284–289.

[4] 朋改非, 杨娟, 石云兴, 等. 超高性能混凝土抗高温爆裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 229–233.
PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing, et al. J Build Mater (in Chinese), 2017, 20(2): 229–233.

[5] 张文华, 张仔祥, 刘鹏宇, 等. 多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1155–1167.
ZHANG Wenhua, ZHANG Zixiang, LIU Pengyu, et al. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2020, 48(8): 1155–1167.

[6] 邵旭东, 张瀚文, 李嘉, 等. 钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面短钢筋连接件抗剪性能研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 39–51.
SHAO Xudong, ZHANG Hanwen, LI Jia, et al. J Civ Eng (in Chinese), 2020, 53(1): 39–51.

[7] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2020, 48(8): 1145–1154.

[8] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 10–17.
WANG Junyan, GUO Junyuan, XIAO Rucheng, et al. J Civ Eng (in Chinese), 2017, 50(11): 10–17.

[9] 周臻, 张逸, 王永泉, 等. 网格增强 UHPC 薄板拉伸力学性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 611–617.
ZHOU Zhen, ZHANG Yi, WANG Yongquan, et al. J Southeast Univ (Nat Sci Ed, in Chinese), 2019, 49(4): 611–617.

[10] TIAN H, ZHOU Z, ZHANG Y, et al. Axial behavior of reinforced concrete column with ultra-high performance concrete stay-in-place formwork[J]. Eng Struct, 2020, 210: 110403.

[11] SIA 2052. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement based composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application[S]. Switzerland:SIA, 2016.

[12] 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. J Arch Civ Eng (in Chinese), 2017, 34(5): 134–146.

[13] ORTLEPP R, HAMPEL U, CURBACH M. A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening[J]. Cem Concr Compos, 2006, 28(7): 589–597.

[14] 沈玲华, 王激扬, 徐世烺. 掺入短切纤维的纤维编织网增强混凝土薄板弯曲力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 98–107.
SHEN Linghua, WANG Jiyang, XU Shilang. J Arch Civ Eng (in Chinese), 2016, 37(10): 98–107.

[15] GONG T, AHMED A H, CUROSU I, et al. Tensile behavior of hybrid fiber reinforced composites made of strain-hardening cement-based composites (SHCC) and carbon textile[J]. Constr Build Mater, 2020, 262: 120913.

[16] LI B, XIONG H, JIANG J, et al. Tensile behavior of basalt textile grid reinforced engineering cementitious composite[J]. Compos Part B: Engineering, 2019, 156: 185–200.

[17] 朱德举, 李高升. 短切纤维及预应力对玄武岩织物增强水泥基复合材料拉伸力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2631–2641.
ZHU Deju, LI Gaosheng. Act Mater Compos Sin (in Chinese), 2017, 34(11): 2631–2641.

[18] NAAMAN A E. Thin TRC Products: Status, Outlook, and Future Directions[M]. Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Woodhead Publishing, 2016: 413–439.

[19] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents[J]. Mater Struct, 2011, 44(3): 583–598.

[20] LI V C, STANG H, KRENCHEL H. Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete[J]. Mater Struct, 1993, 26(8): 486–494.

[21] UCHIDA Y, NIWA J, TANAKA Y, et al. Outlines of JSCE “Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (Draft)”[J]. Concr J, 2005, 43(3): 3–8.

[22] LE HOANG A, FEHLING E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 153: 790–806.

[23] SUEKI S, SORANAKOM C, MOBASHER B, PELED A. Pullout-slip response of fabrics embedded in a cement paste matrix[J]. J Mater Civ Eng, 2007, 19(9): 718–727.

[24] JIANG J, JIANG C, LI B, FENG P. Bond behavior of basalt textile meshes in ultra-high ductility cementitious composites[J]. Compos Part B: Engineering, 2019, 174: 107022.

[25] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. Eng Fract Mech, 2012, 92: 56–71.

[26] YAO Y, SILVA F A, BUTLER M, et al. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads[J]. Cem Concr Compos, 2015, 64: 49–61.

[27] YAO Y, SILVA F A, BUTLER M, et al. Tensile and flexural behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) under impact loading[J]. Int J Impact Eng, 2021, 153: 103866.

[28] LU C, LEUNG C K Y. A new model for the cracking process and tensile ductility of strain hardening cementitious composites (SHCC)[J]. Cem Concr Res, 2016, 79: 353–365.

[29] SORANAKOM C, MOBASHER B. Modeling of tension stiffening in reinforced cement composites: Part I. Theoretical modeling[J]. Mater Struct, 2010, 43(9): 1217–1230.

[30] SORANAKOM C, MOBASHER B. Modeling of tension stiffening in reinforced cement composites: Part II. Simulations *versus* experimental results[J]. Mater Struct, 2010, 43(9): 1231–1243.