

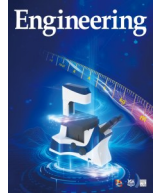


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Civil Engineering Materials—Review

## 动态荷载作用下钢纤维混凝土细观模拟方法及应用综述

张锦华<sup>a,c,#</sup>, 吴彰钰<sup>b,\*</sup>, 余红发<sup>b,\*</sup>, 麻海燕<sup>b</sup>, 达波<sup>d</sup>

<sup>a</sup> School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

<sup>b</sup> Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

<sup>c</sup> Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China

<sup>d</sup> College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 22 November 2020

Revised 20 January 2022

Accepted 26 January 2022

Available online 21 March 2022

#### 关键词

钢纤维混凝土

细观尺度建模

动态荷载

材料模型

界面特性

### 摘要

近年来钢纤维混凝土(SFRC)因对动态和冲击荷载具有优异力学响应而备受关注。现有的试验结果表明,嵌入混凝土基体中的高强度钢纤维具有很强的桥接效应,可以增强纤维与基体之间的结合力,有助于改善SFRC开裂后性能和残余强度。为了更好地了解钢纤维在基体中的行为表现,以及进一步掌握SFRC在动态荷载作用下的失效机理,细观模拟方法已被广泛用于模拟SFRC材料和结构件的动态响应。细观模拟方法假设SFRC由不同的细观组分组成,包括钢纤维、粗骨料、砂浆基体和界面过渡区(ITZ)。本文全面综述了动态荷载下SFRC的最新细观模型和模拟过程,系统对比了不同数值模拟研究中SFRC细观模型的生成方法,包括钢纤维、粗骨料及其之间的ITZ。全面总结了不同细观组分的材料模型及纤维与混凝土基体间的相互作用关系。此外,列举了不同动态荷载(即压缩、拉伸和接触爆炸)作用下SFRC细观模拟应用实例。最后,重点分析了现有SFRC细观模拟方法存在的不足,对于SFRC的未来研究及发展具有重要意义。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

混凝土作为一种多功能复合材料,主要由粗骨料、水泥、水和其他添加剂或外加剂组成。鉴于独特的性能,混凝土已广泛用于建筑工程、基础设施和其他工程结构。混凝土是一种准脆性材料,具有优异的压缩性能和较高的极限压应变,能够有效抵抗施加在混凝土结构上的巨大压缩荷载。然而,从混凝土的典型静态压缩应力-应变曲线(图1)[1]可以看出,当压缩应力达到其极限抗压强度值的75%左右时(图1中的C点),混凝土会出现裂缝扩张

现象[2–3]。此后,混凝土内部裂缝逐渐扩展,并在达到极限抗压强度后表现出明显的应变软化行为(图1中的F点)。当应变超过应变软化阶段时,混凝土中裂缝变得连续且无法承受额外荷载。由图1可以看出,当临界应变为0.002时,混凝土达到峰值抗压强度,其极限应变约为0.0035,这与混凝土强度等级无关。然而,混凝土的临界拉伸应变(0.00012~0.00016)要比临界压缩应变低一个数量级,表明混凝土的韧性要远低于其他类型的复合材料。根据大量实验结果可知,拉伸破坏是混凝土结构失效的主要形式。因此,非常有必要采用有效的方法来提高混

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [wuzhy@nuaa.edu.cn](mailto:wuzhy@nuaa.edu.cn) (Z. Wu), [yuhongfa@nuaa.edu.cn](mailto:yuhongfa@nuaa.edu.cn) (H. Yu).

# These authors contributed equally to this work.

混凝土在承受一般（静态）和极端（如疲劳、冲击和爆炸）荷载条件下的抗拉和抗剪强度[4]。鉴于此，通过采用在混凝土中添加短切和离散纤维的方法，可以充分提高新拌混凝土混合物的拉伸和剪切强度，所得到的材料即为人们熟知的纤维增强混凝土（FRC）[5-6]。

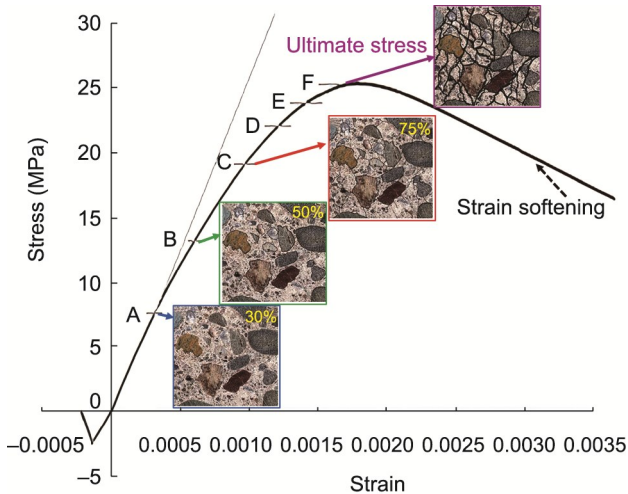


图1. 不同应力水平下混凝土的压缩行为和响应。经许可，转载自参考文献[1]。

在混凝土中添加纤维的方法可追溯到一万年前的古代遗址中的秸秆砖。自从 Bernard 于 1874 年申请第一个 FRC 专利以来，研究人员一直尝试在混凝土中掺入不同类型的纤维，如钢纤维[7-9]、合成纤维[10]、碳纤维[11-13]、玻璃纤维[14-15]和天然纤维[16-18]以改善 FRC 的抗拉性能。研究表明，相较于其他种类的纤维，掺入钢纤维的混凝土材料能够更好地抵抗爆炸和冲击荷载，这主要归功于这些随机分布于混凝土基体中的短而离散的钢纤维，可以有效抑制砂浆和界面过渡区（ITZ）中微裂缝的萌生和扩展[6]。图2描绘了钢纤维混凝土（SFRC）的横截面形态，主要包括三个部分，即粗细骨料、水泥砂浆和随机分布在砂浆基体中的短切钢纤维。由图2可知，这些钢纤维占据了粗骨料周围的空间，并在砂浆基体和 ITZ 区域形成了空间网状结构。这些随机分布的钢纤维可有效抑制混凝土内部微裂纹从 ITZ 扩展、加宽及传播到砂浆基体的过程，即表现出所谓的纤维桥接效应[19]。然而，与具有高拉伸模量的钢纤维相比，合成纤维无法在粗骨料附近形成空间网状结构。因此，钢纤维在提高混凝土的抗拉强度、改善混凝土抗裂性等方面具有比合成纤维更强的效果，而合成纤维在控制混凝土接近峰值强的力学响应及耐腐蚀性方面具有更加显著的优势。综上可知，研究 SFRC 的力学响应及其在民用基础设施中的应用是本文的重点。

Xu 等[20]发现在体积分数为  $20\sim 50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  的混凝土中

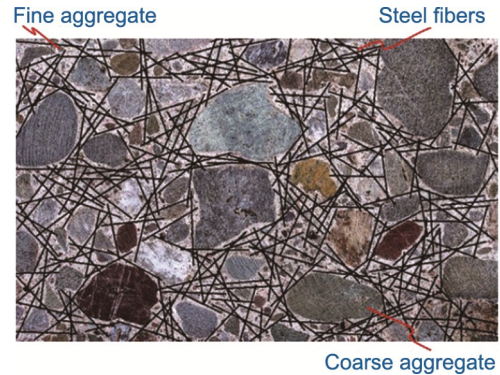


图2. 随机分布在 SFRC 中的钢纤维。经许可，转载自参考文献[1]。

添加钢纤维可以显著改善混凝土拌合物的静态力学性能，如弯曲强度、拉伸强度、抗剪强度、抗剥落性和耐磨性。自从 Suaris 和 Shah [21] 报道可以使用钢纤维来提升 FRC 的动态性能之后，学术界已经采用了许多实验技术来研究 SFRC 的动态响应。例如，许多研究人员[22-24]研究了纤维含量对 SFRC 断裂性能的影响规律，发现随着纤维体积分数的增加，SFRC 的抗弯强度和抗拉强度均可得到提升。Li 等[25]比较了含不同类型纤维（如直纤维、端勾纤维和波纹纤维）的 SFRC 的弯曲性能和声发射行为，发现在同一纤维含量下，端勾 SFRC 比其他两种类型的 SFRC 和普通混凝土具有更大的弯曲强度和声发射值。Cao 和 Yu [26]测试了在混凝土中具有不同倾斜角和嵌入深度的端勾纤维的拉拔强度，结果表明，混凝土基体中纤维的峰值抗拉强度与纤维类型、嵌入式倾斜角和长度以及纤维直径等因素有关。考虑混凝土中纤维取向的影响，Yoo 和 Banthia [19]全面研究了 SFRC 的冲击拉伸和冲击弯曲性能。研究发现，当更多的纤维排列在拉伸荷载方向上时，SFRC 将获得更好的冲击拉伸强度。Mindess 和 Zhang [27]利用落锤实验装置研究了 SFRC 的动态抗压强度和失效模式，他们发现由于纤维的力学性能，落锤的质量和高度是影响 SFRC 失效模式的主要因素。通过大量的分离式霍普金森压杆（SHPB）试验[9,28-30]，可以总结出 SFRC 不均匀、明显的应变硬化特征。然而，Wang 等[31]和 Mansur 等[32]发现，增加纤维含量对提高混凝土延性的影响比抗压强度更明显，最终使得混凝土脆性降低、抗拉性能提高。

考虑 SFRC 冲击爆炸试验的技术及成本限制，仅依靠开展大量的实验工作的方法来全面研究 SFRC 的动态响应和失效机制是十分困难和不切实际的。因此，数值模拟被认为是一种用于研究 SFRC 动态响应和失效机制的有效方法。考虑 SFRC 的非匀质特性，常规的均质 SFRC 模型[33-37]无法真实地模拟混凝土基体中随机分布的钢纤维。



相比之下,考虑混凝土非匀质特性的三相(即骨料、砂浆和ITZ)细观模型在模拟不同混凝土静态、动态力学性能响应方面具有更高的可靠性[38–42]。因此,可以采用细观模拟的方法建立可靠的计算模型,用以研究静态、动态荷载下混凝土材料中钢纤维的桥接效应。

在过去的20年间,国内外学者开展了大量的混凝土细观尺度研究,模拟和预测了冲击、爆炸荷载作用下SFRC的力学性能试验结果。Li等[37]采用细观模拟的方法研究了自由空气爆炸和接触爆炸荷载作用下SFRC板的动态响应特征,他们重现了SFRC板的失效过程和最终破坏模式,并通过对比已有试验结果分析了其抗爆性能。Liu等[43]采用均质模型研究了高强(90~190 MPa)SFRC的抗侵略性能。此外,他们还模拟了SFRC的单轴压缩和四点弯曲性能,验证了所建立的细观模型的可靠性。Xu等[20,44]开发了一个由端勾/螺旋纤维、骨料及砂浆基体组成的二维(2D)细观模型,用以模拟不同应变率冲击压缩和拉伸荷载作用下SFRC的力学性能,揭示了纤维含量和纤维形状对SFRC动态增强因子(DIF)及失效机制的影响规律。此外,为了更好地模拟和理解SFRC的动态材料特性和失效机制,研究者提出了各种各样的三维(3D)细观模型[45–46],其中包括不同的细观组分,如纤维、骨料和水泥砂浆。根据上述SFRC数值模拟研究可知,人们已经开发了多种SFRC细观模型并用于研究其动态性能。然而,受到多种因素[即纤维或骨料形状、模型尺寸(2D/3D)和材料模型]的影响,现有细观模型各具优缺点。因此,非常有必要对最新的SFRC细观模拟方法进行全面回顾,为动态荷载作用下SFRC的研究和发展提供新的思路。

本文旨在针对有关SFRC动态响应最前沿的细观数值研究进行回顾,主要包括以下几个方面的内容:①SFRC细观模型的发展;②混凝土基体中纤维模型的生成;③钢纤维与混凝土基体间的接触算法;④常用的SFRC材料模型(如钢纤维、骨料和水泥砂浆材料模型);⑤冲击和爆破荷载作用下SFRC细观模拟应用实例。细观模拟的重点主要集中于三维SFRC细观模型的应用领域,证明本研究所开发的三维细观模型在模拟冲击和爆炸荷载下SFRC材料的响应方面具有较高的可靠性。最后,本文指出了现有混凝土细观模型所存在的一些问题,可为SFRC细观模拟方法的进一步发展提供指导。

## 2. FRC细观模型的建立

如前所述,在混凝土中加入纤维材料可以提高FRC

的力学性能,包括剪切强度、拉伸强度和能量吸收能力。为了更好地理解FRC的细观结构,阐明其失效机制,研究人员开发了许多细观模型框架,对FRC中随机分布的各种类型的纤维进行了显式模拟[4–18,27–28]。本节针对含有不同纤维的FRC细观模型的开发和应用进行了详细总结,对一系列典型的细观模型进行了举例说明和相互比较,同时重点介绍了采用细观模拟方法对FRC爆炸和冲击性能的研究。

### 2.1. FRC细观模型的发展

类似于骨料混凝土模型的生成方法,建立FRC细观结构模型的方法主要分为两种:第一种是借助X射线计算机断层扫描(XCT)图像处理方法,这种方法能够生成可靠的FRC细观模型。该方法采用高分辨率的微米级XCT设备,可以描绘出不同纤维增强复合材料的内部结构,如玻璃纤维材料[47]、碳纤维复合材料[48]和钢纤维增强材料[8]。近年来,国内外学者使用基于XCT的细观模型对纤维复合材料进行很多有限元数值计算。Qsymah等[49]采用双尺度均质化方法得到了由砂浆、钢纤维和孔隙组成的SFRC的有限元模型(FEM),如图3(a)所示。Suuronen等[50]提出了一种用于测量分布在SFRC中的钢纤维取向的技术。由图3(b)可见,位于试件中心和边缘区域的纤维大多是水平方向和垂直方向的。纤维取向的识别对于研究FRC的细观结构特征具有很大的意义。Ponikiewski等[51]也采用XCT方法探索了FRC墙板中的纤维体积及分布规律[图3(c)],并认为FRC的力学性能与混凝土中的钢纤维的体积、分布和长度有关。然而,进行XCT相关的测量和建模需要耗费大量的计算时间和成本,且测试计算结果会受到XCT设备和计算机精度的限制。

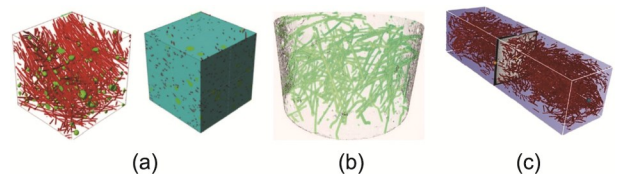


图3. 基于XCT技术的FRC模型。(a)一种由砂浆、钢纤维和孔隙组成的三相SFRC细观模型;(b)一种考虑钢纤维取向的三维SFRC细观模型;(c)一种FRC墙板的三维细观模型。经许可,转载自参考文献[49–51]。

另一种方法是建立一些随机线或实体单元来表征混凝土中的纤维模型。在现有的混凝土二维和三维细观模型中,纤维模型常被假定为随机分布在砂浆基质相中单独组分。Xu等[20]提出了一个由骨料、纤维和砂浆组成的二维轴对称SFRC模型(包含圆形骨料、端勾纤维和砂浆)来

模拟 SFRC 的动态抗压性能 [图 4 (a)]。他们使用所建立的二维细观模型,研究了纤维用量和分布对 SFRC 在动态压缩荷载下的强度和失效模式的影响规律。在文献[20]所提出的细观模型的基础上, Xu 等[44]开发了一种三相细观模型来模拟 SFRC 的动态拉伸响应,模型包括骨料、螺旋纤维和砂浆基体三部分。如图 4 (b) 所示,建立了包含圆形骨料、端勾和螺旋纤维的二维切口圆柱体模型。此外,他们针对纤维形状和用量对 FRC 拉伸性能的影响进行了数值分析,评价指标包括 SFRC 试件的 DIF、能量吸收能力和裂缝扩展速度等。

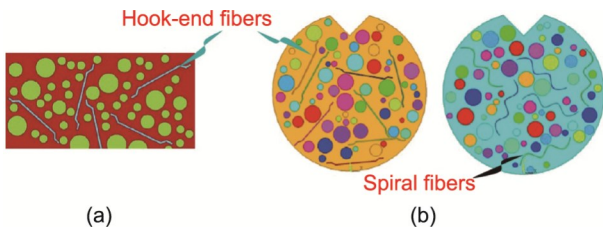


图 4. 文献中的 SFRC 二维细观模型。(a) 文献[20]报道的包含端勾纤维模型的二维细观模型;(b) 文献[44]报道的包含端勾和螺旋纤维模型的二维细观模型。

然而,上述的 FRC 模型大多是二维模型,无法有效反映纤维在混凝土中的真实分布特性,如纤维取向、交叉和平行关系。因此,通过开发高效的三维细观模型来描述混凝土中纤维的随机分布规律是十分必要的。随着计算机技术的发展,许多三维细观 FRC 模型[45,52-57]逐渐被提出并被应用于不同类型纤维复合材料力学性能的研究。Zhang [52]开发了一个由端勾纤维、球形骨料、砂浆和骨料与砂浆之间的 ITZ 组成的三维 SFRC 细观模型,如图 5 (a) 所示。他们应用该模型模拟了 SFRC 在不同应变率下的动态抗压响应,并根据现有的 SHPB 试验结果验证了模型的可靠性。在 Zhang [52]的 FRC 模型中,采用球体来模拟骨料,这在反映实际骨料的不规则特性方面存在较大的局限性。考虑混凝土中真实骨料具有形状不规则、纹理粗糙等细观结构特点, Zhang 等[53]开发了一系列算法用于

建立三维细观 FRC 模型[见图 5 (b)],其中包括具有粗糙纹理、形状不规则的骨料和不同长度、形状的纤维。此外, FRC 中骨料/纤维和砂浆之间的 ITZ 区域的两种状态也得到了很好的模拟,这为预测混凝土中 ITZ 的体积分数提供了一种有效的方法。采用这个模型,也能预测出 FRC 的弹性模量,并可以使用文献[54]中的实验数据对该模型进行验证。Naderi 和 Zhang [55]提出了一个三维四相的 SFRC 细观模型,包括具有真实形状的骨料,不同种类和尺寸的纤维、砂浆,以及骨料和砂浆之间的 ITZ,如图 5 (c) 所示。在这个模型中,研究人员使用一维 (1D) 和三维实体单元生成了三种类型的纤维(即直纤维、端勾纤维和螺旋纤维)。考虑 SFRC 细观模型中骨料和纤维具有真实的细观结构特征,使得细观模型在被用于评估 SFRC 的弹性模量方面具有很高的可靠度。

实际上,混凝土力学性能会受到其非匀质特性的显著影响,非匀质性是由骨料、水泥浆、微孔和初始缺陷等不同夹杂物造成的。因此,在混凝土中加入随机分布的纤维会影响 FRC 的非匀质性,进而使得研究人员很难确定纤维的作用机制及其对 FRC 力学性能的影响,特别是针对那些爆破和冲击条件下的力学性能。人们从实验结果中发现,纤维和水泥浆之间的结合强度是提高 FRC 动态性能的重要因素之一。因此,使用包括纤维和均质水泥基体的三维细观模型有助于研究纤维对 FRC 材料性能的影响规律[56-57]。本文作者团队在之前的研究[45]中,提出了一个两相(即混凝土基体和直纤维)三维 SFRC 细观模型,并研究了其静态、动态力学性能响应,如图 6 (a) 所示。针对钢纤维-混凝土基体间的黏结、滑移相互作用,则由爆炸流体动力学计算机程序 LS-DYNA 中的接触算法进行定义。然后,使用三维细观计算方法模拟了高应变率荷载下 SFRC 的动态压缩及拉伸力学行为。同时,也对 SFRC 的接触爆炸响应进行了数值仿真研究,并与现有的测试结果进行了对比,该部分内容将在后续的应用实例(第 4 节)中进行详细介绍。本文作者团队前期所提出的数值模

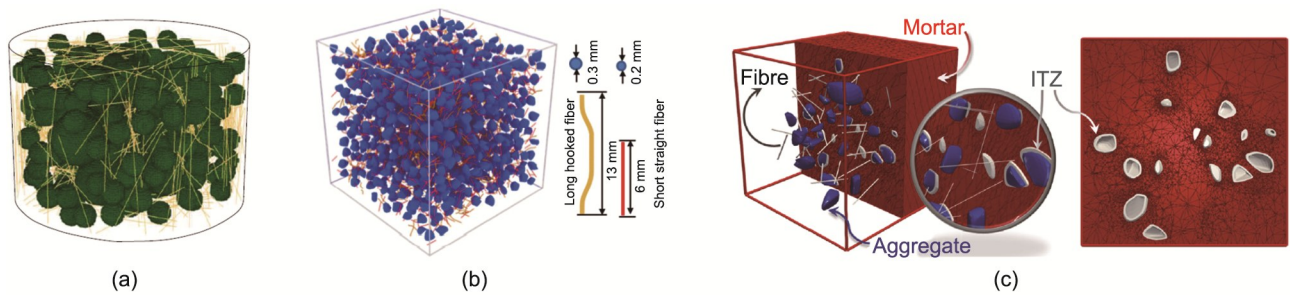


图 5. 文献中的三维 SFRC 细观模型:(a) 一种由端勾纤维、球形骨料、砂浆和骨料与砂浆之间的 ITZ 组成的三维 SFRC 细观模型;(b) 一种包含具有粗糙纹理的不规则形状骨料和纤维的三维细观 FRC 模型;(c) 一种由具有真实形状的骨料组成的三维四相细观模型。经许可,转载自参考文献[52-53,55]。



拟方法已被证明在模拟 SFRC 的动态响应方面具有很高的真实性，并被国内外研究人员进一步跟踪及应用于 SFRC 的研究。例如，Su 等[58]建立了一个由钢纤维和混凝土基体组成的三维两相细观模型[图 6 (b)]，用以模拟超高性能钢纤维增强混凝土 (UHPSFRC)。其中，采用单根纤维的拉拔行为来研究纤维-混凝土的 ITZ 效应。单根纤维的拉拔强度用于描述纤维和混凝土基体之间的黏结-滑移行为。随后，基于三维细观模型，研究 SHPB 动态劈拉荷载作用下的 UHPSFRC 的力学行为。Liang 和 Wu [46]建立了与文献[58]相同的三维 SFRC 细观模型[图 6 (c)]，模拟了不同荷载条件（包括压缩、挠曲拉伸和劈裂拉伸）下 SFRC 的力学性能，探讨了纤维含量和长径比对其力学性能的影响规律。最近，Wu 等[59]和 Zhao 等[60]采用与文献[45]类似的细观模型，研究了不同应变率条件下 SFRC 的动态劈裂拉伸和单轴压缩力学性能。采用验证过的细观模型，他们系统研究了纤维含量和长径比、试件形状和尺寸、应变率对 SFRC 动态力学行为的影响规律。最后，他们提出了 SFRC 的动态本构关系，证明该关系可用于预测 SFRC 动态拉伸、压缩强度与应变率和纤维含量之间的关系。此外，Shu 等[61]利用 ABAQUS 软件开发了一种三维 SFRC 细观 FEM 模型[图 6 (d)]，用来描述 SFRC 中的真实细观结构特征。随后，他们采用该模型模拟了 SFRC 梁的四点弯曲试验，研究了纤维体积分数和纤维腐蚀的影响规律，得到了对应于最佳抗弯性能的纤维体积分数 (2%)，并定量分析了钢纤维腐蚀对 SFRC 力学响应的影响。

## 2.2. 纤维模型的生成

本节将回顾纤维模型的建立以及纤维与混凝土或砂浆

基体之间的接触算法。Xu 等[44]采用 Matlab 程序生成了具有随机位置和方向的钢纤维模型，然后将这些纤维放入二维圆形试件中[图 7 (a)]，直至达到预先设定的纤维体积分数。但文献[44]并未给出混凝土中端勾纤维和螺旋纤维的生成方法。

在 Naderi 和 Zhang [55]的模拟工作中，他们基于 Delaunay 三角剖分及 Voronoi 镶嵌方法生成了三种不同类型的纤维模型。首先，通过控制穿过 Voronoi 单元中心的纤维生成点，生成由一维元素构成的圆形截面的直纤维。根据直纤维的生成方法，分别生成了端勾纤维和螺旋纤维。值得注意的是，螺旋纤维以恒定的距离绕矢量转动并平行于轴线移动，轴线是在目标试件模型的空间区域中随机生成的。上述纤维的生成过程如图 7 (b) 所示。

Zhang 等[53]采用欧几里得几何算法生成了线性和端勾状纤维模型，如图 7 (c) 所示。他们选择了两个参数，即纤维的长度和半径来控制线性钢纤维的形状，而端勾状纤维的特征则采用三个不同的长度参数及纤维半径来描述。他们还尝试在混凝土试件中把线性纤维和端勾状纤维混合在一起，建立含有不同类型纤维的 SFRC 模型，如图 7 (c) 所示。Han 等[62–63]也提出了一个新颖的三维数值框架，该框架包括螺旋状和环状的几何模型，用于模拟随机分布和聚集在聚合物复合材料中的碳纳米管。该模型还考虑了夹杂物和基体之间的过渡区域。然而，文献[62–63]并未采用细观模型进行有关复合材料的物理和力学性能计算。值得采用这种模拟方法来模拟混凝土中短切钢纤维的分布和聚集特性，并深入研究具有不同纤维体积分数的 SFRC 的细观力学行为。

图 7 (d) 展示了随机分布在三维 SFRC 细观模型中的

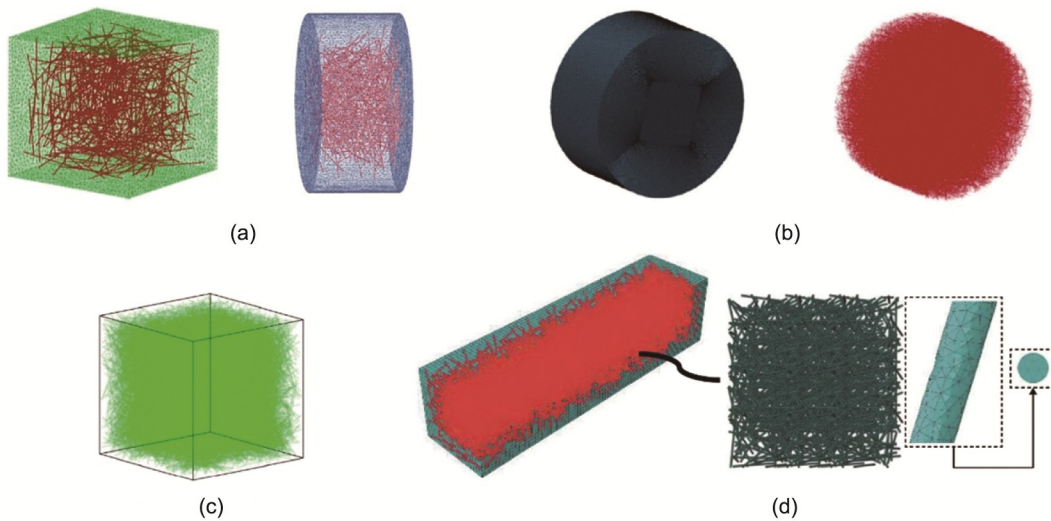


图 6. 由纤维和混凝土基体组成的超高性能混凝土 (UHPC) 的三维细观模型。(a) 由混凝土基体和直纤维组成的三维两相细观模型[45]; (b) 由钢纤维和混凝土基体组成的三维两相细观模型[58]; (c) 用于模拟 SFRC 的三维细观模型[46]; (d) SFRC 梁的三维细观模型[61]。

钢纤维模型[图5 (a)] [52]。三维直纤维的长度和体积分数分别被设定为6 mm和1%。采用取放算法 (take-and-place algorithm) 将这些钢纤维投放到圆柱体试件中[64], 并依据已生成的骨料中心判定其空间位置[图5 (a)]。最后, 所生成的钢纤维被随机地分散或嵌入砂浆基体及ITZ中。

Yu等[65]和Han等[66]提出了一种有效的计算机生成算法来生成大量的椭圆体颗粒, 用以模拟随机分布在立方体中的短切纤维。他们还开发了一种新的密实及筛选算法来提高颗粒的体积分数, 其中纤维体积分数高达29.07%。他们认为所开发的算法比传统的取放算法更具优势。类似地, Guan等[67]开发了一个多尺度计算模型来评估FRC的力学性能, 其中用如图7 (e)所示的椭圆体夹杂物表示无序纤维; 通过对纤维形状的简单假设, 在计算中可以规避纤维之间复杂的接触信息。然而, 在实际的混凝土工

程中很少或不会使用椭圆体纤维。

为了模拟SFRC中钢纤维的腐蚀行为, Shu等[61]选择了两种类型的单元来模拟钢纤维, 即杆单元和实体单元, 如图7 (f)所示。他们认为出现在实体纤维单元表面的锈坑是随机发生的, 且钢纤维腐蚀参数均来自于文献[68]中的试验数据。

考虑混凝土基体中纤维随机分布的行为, Zhang等[69]建立了含量不同的直纤维和端勾纤维模型, 如图7 (g)所示, 用以研究不同方向荷载作用下混凝土在开裂后的抗拉强度。根据数值和试验结果可知, 当SFRC试件在承受沿浇筑方向 (Z轴)的荷载作用时, 其抗拉强度要大于沿其他两个轴向荷载作用下的抗拉强度。

在前期发表的文章[45]中, 本文研究团队建立了一个具有随机分布特性的细观模拟框架, 用于生成包含直纤维和均质混凝土基体的三维SFRC细观模型, 图8展示了用

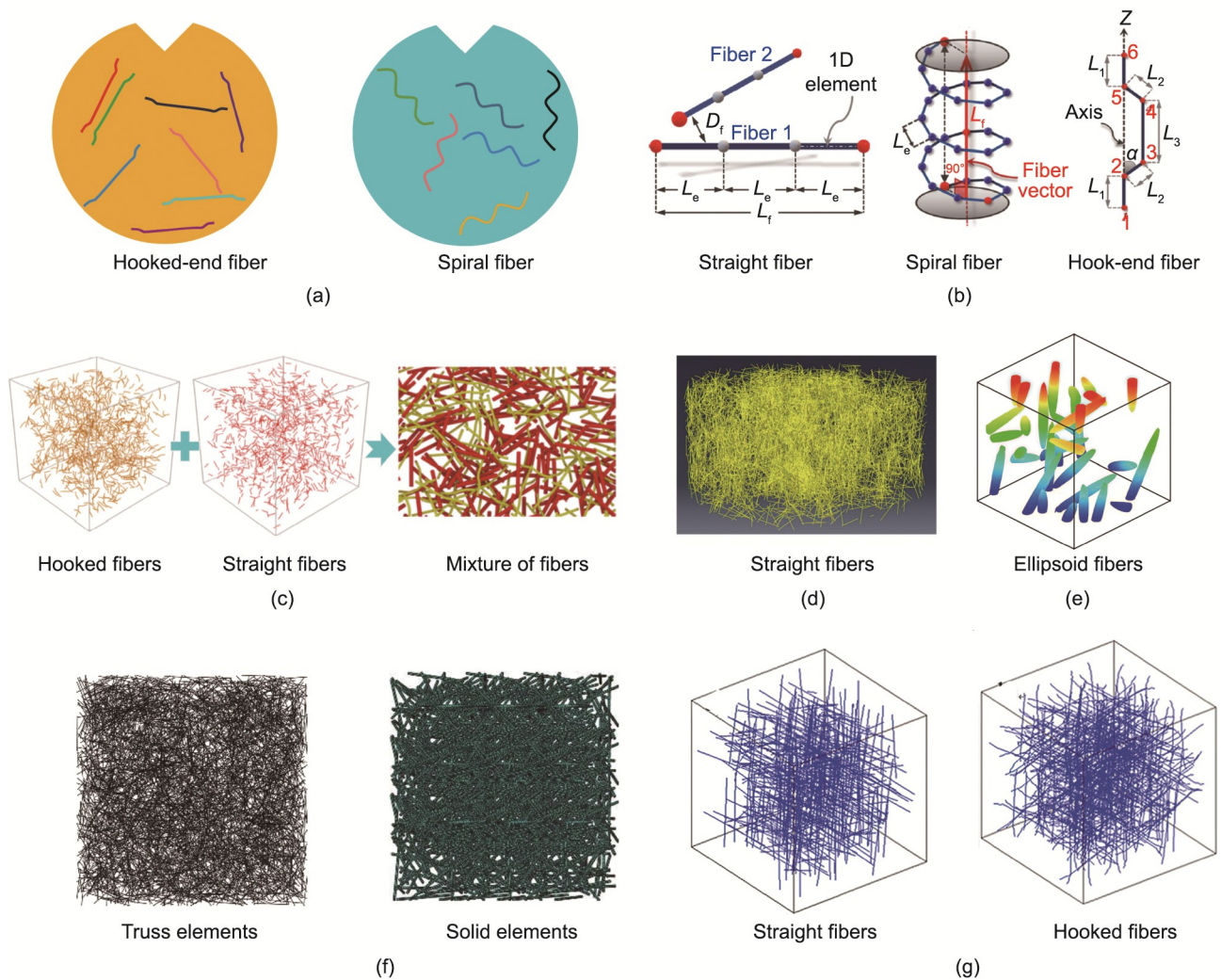


图7. 端勾和螺旋纤维中纤维节点的生成。(a) 端勾纤维和螺旋纤维[44]; (b) 直纤维、螺旋纤维和端勾纤维[55]; (c) 端勾纤维和直纤维[53]; (d) 直纤维[52]; (e) 椭圆体纤维[67]; (f) 直纤维[61]; (g) 直纤维和端勾纤维[69]。



于生成混凝土中随机分布纤维的算法步骤。首先，采用混合同余算法生成一个随机数列表，用以确定纤维的随机位置。此后，根据总纤维体积与单位纤维体积（ $V$ ）之比计算出纤维数量，其中总纤维体积可由纤维含量（ $V_f$ ）得

$$\text{Fib\_ori} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{Fib\_}(X_p, Y_p, Z_p) = \begin{cases} X_p = X_0 + (X_m - X_n) \\ Y_p = Y_0 + (Y_m - Y_n) \\ Z_p = Z_0 + (Z_m - Z_n) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\text{Fib\_ori}$  和  $\text{Fib\_}(X_p, Y_p, Z_p)$  分别表示纤维的方向及空间坐标； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别表示绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的旋转角度； $(X_0, Y_0, Z_0)$  为原始纤维的初始位置坐标； $(X_m, Y_m, Z_m)$  为原始纤维中间点的坐标； $(X_n, Y_n, Z_n)$  为试件空间区域中随机点的坐标。

随后，按照上述确定的纤维方向及位置坐标，将计算好的纤维逐一投放到试件区域。在投放过程中，要求纤维满足试件边界条件限制，并与已投放纤维间不存在交叉关系。最后，当达到目标纤维含量后，将会输出和记录最终的纤维位置及方向信息。Liang 和 Wu [46] 以及 Su 等 [58] 采用类似的算法生成了短切直纤维，并将这些纤维随机投放到 SFRC 试件中，如图 6 (b)、(c) 所示。

### 2.3. 粗骨料模型的生成

如上节所述，现有的 SFRC 细观模型主要是一些由纤

出；而单位纤维体积被定义为  $V = \pi D^2 L / 4$ ，式中  $D$  和  $L$  分别表示纤维直径和长度。根据所生成的随机数列表，纤维的随机方向和位置可由公式 (1) 和公式 (2) 进行确定 [45]。

维和砂浆基体组成的两相模型，以及一些包含粗骨料夹杂物的三相模型。本节将介绍 FRC 细观模型中一般骨料模型的细观结构配置和特征。

在将二维纤维投放于试件平面区域后，Xu 等 [44] 建立了圆形骨料模型 [图 9 (a)] 来代表混凝土试件中的粗骨料。骨料模型的粒径及含量由 Fuller 级配曲线 [70] 确定，并采用取放算法将骨料模型逐一随机放入试件空间区域。同样地，Jin 等 [71] 在细观模型中假定粗骨料为圆形 [图 9 (b)]，并在圆形骨料周围生成一个 1 mm 厚的层状结构来代表 ITZ。不同于 Xu 等 [20,44] 的工作，Jin 等 [71] 采用了两种级配的骨料模型（12 mm 和 30 mm）来模拟混凝土中的随机骨料。此外，Zhang [52] 尝试建立了一个三维圆柱体细观模型来模拟 SFRC 试件，其中粗骨料被模拟为具有随机尺寸和分布特征的球体，如图 9 (c) 所示；通过采用与 Jin 等 [71] 相同的方法将这些骨料颗粒随机分布在砂浆基体中，同时考虑了这些骨料和砂浆基体之间的 ITZ 层的存在。

众所周知，实际混凝土工程中使用的粗骨料一般为具

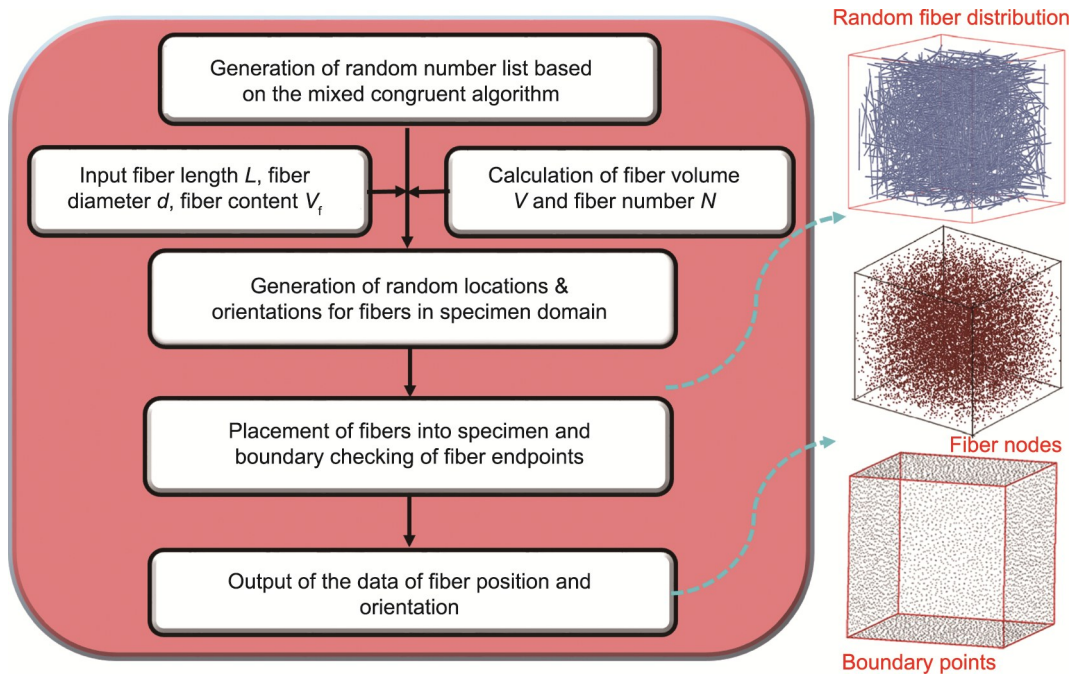


图 8. 本研究团队之前发表的直纤维的生成算法。经许可，转载自参考文献 [45]。

有随机形状特征的砾石或破碎骨料，而且其表面粗糙，拥有尖锐的外角和边缘。因此，上述圆形和球形颗粒无法有效模拟混凝土中骨料的真实形状特征，这就导致在计算混凝土局部及整体应力-应变时会产生一定的局限性[72-73]。鉴于此，除了常规的骨料颗粒[20,44,70-71,74]外，研究人员还建立了大量具有随机形状的不规则颗粒模型，用于模拟混凝土中的骨料组分[75-81]。

然而，由于纤维和随机骨料共存于三维细观模型中，会极大地增加网格数量，降低计算效率。因此，鲜见文献报道有关砂浆基体中包含随机纤维和骨料的三维SFRC细观模型。随着计算机技术和算法的快速发展，一些研究人员已逐步开发出针对四相SFRC的高效建模方法，四相包括砂浆基体、钢纤维、随机骨料及ITZ。例如，Naderi和Zhang [55]使用Voronoi镶嵌方法将随机粗骨料颗粒添加到纤维模型中，如图5(c)所示。其中，这些随机骨料颗粒[图9(d)]是基于Voronoi单元选择纤维端点作为种子点而生成的。图9(d)举例说明了在骨料颗粒中插入直纤维的情况，类似的方法也可用于螺旋纤维或端勾纤维。此外，为了建立真实的骨料模型，Zhang等[53]在骨料生成过程中引入了细胞断裂算法(cell fracture algorithm) [82]、Catmull-Clark细分算法[83]、位移映射(displacement mapping)和拉普拉斯平滑算法(Laplace smoothing algorithm)。首先，使用细胞断裂算法生成具有凸形的低多边形集合体。其次，采用Catmull-Clark细分算法，通过迭代

对骨料进行平滑处理，以得到表面平滑的骨料。最后，采用位移映射和拉普拉斯平滑算法构造具有粗糙表面纹理的骨料。如图9(e)所示，借助拉普拉斯平滑细分及简单的Catmull-Clark细分，可以分别生成类似砾石和碎石的骨料模型。

### 3. FRC的材料模型

为了使用上述细观模型开展不同荷载条件下FRC的有限元计算研究，必须选用合理的材料模型来定义每种组分，包括纤维、砂浆基体、骨料和ITZ的物理力学性能。在此，将之前应用于SFRC细观模拟中的常用材料模型总结如下。

#### 3.1. 钢纤维材料模型

在Xu等[44]的细观模拟研究工作中，采用由LS-DYNA中的MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY材料模型(Mat\_24)来模拟端勾和螺旋钢纤维。其中，主要采用等效应力和等效塑性应变来描述钢纤维的非线性软化行为，同时借助材料屈服应力的硬化参数来考虑应变速率的影响。LS-DYNA中Mat\_24材料模型的关键参数包括：质量密度、杨氏模量、泊松比和屈服应力。Naderi和Zhang [55]采用四相FRC细观模型研究了纤维含量对FRC弹性模量的影响，其中所有细观组分都被假定为由弹性模

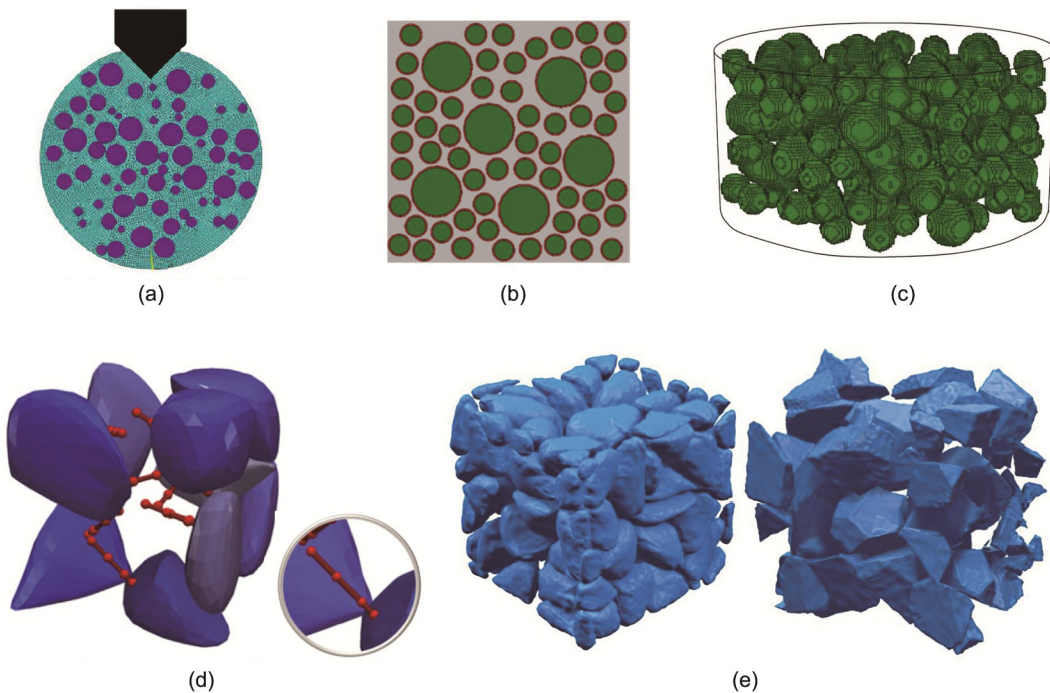


图9. FRC中骨料细观模型。(a) 二维两相细观模型中的圆形骨料[44]；(b) 二维三相细观模型中的圆形骨料[71]；(c) 三维球形骨料模型[52]；(d) 具有真实形状特征的三维随机骨料模型[55]；(e) 三维不规则形状骨料模型[53]。



量和泊松比描述的线弹性材料。此外, Zhang等[53]将钢纤维假定为弹性及各向同性材料,并用细观模拟的方法研究了含有短纤维和长纤维的超高性能混凝土(UHPC)的杨氏模量,发现当将短纤维和长纤维的体积分数分别设定为1.5%和0.5%时,UHPC的弹性模量可以达到最大值;但此结果低于实验结果,原因可能是所建立的细观模型对ITZ厚度的假设不准确。为了提高SFRC在准静态和动态荷载下的计算精度和效率,Liang和Wu[46]、Peng等[84]和Su等[58]采用桁架单元来划分钢纤维模型,同时采用LS-DYNA中的MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC(Mat\_98)材料模型来描述其力学性能,对应的关键材料模型参数包括:材料密度、弹性模量、泊松比和屈服应力。Zhang等[69]采用弹塑性模型作为钢纤维的本构模型。根据文献中的试验结果[85],他们确定了钢纤维的初始屈服强度、极限屈服强度及塑性应变。Zhang[52]和Jin等[71]采用双线性本构模型描述了钢纤维的力学响应,其中弹性阶段和硬化阶段都可在该本构模型中得到体现。钢纤维的硬化模量被设定为初始弹性模量的1%。

在本研究团队前期的数值模拟工作[45]中,采用了LS-DYNA中的Johnson-Cook(JC)材料模型(Mat\_15)描述了高应变率下钢纤维的材料特性,该模型适用于模拟高应变率条件下的金属材料。JC材料模型在考虑材料损伤断裂的前提下,采用以下关键材料参数来定义材料的应力和应变,包括损伤参数、剪切模量、温度参数、比热、泊松比和质量密度。为了研究纤维含量对SFRC动态性能的影响规律,国内外学者开展了一系列动态压缩、动态拉伸和接触引爆的细观模拟工作,本文将对这些工作进行简要回顾,以证明已有三维两相细观模拟方法的可靠性。

### 3.2. 粗骨料材料模型

为了描述SFRC中粗骨料的细观特性,在SFRC细观模拟中采用了多种材料模型。Jin等[71]假设粗骨料是脆性材料,采用弹塑性本构模型描述了SFRC中粗骨料的力学行为。Naderi和Zhang[55]假设骨料为线弹性材料,以骨料弹性模量作为其主要模型参数。Xu等[20,44]采用LS-DYNA的PSEUDO\_TENSOR(Mat\_16)材料模型来模拟骨料的力学行为,其中粗骨料的DIF由岩石材料的试验结果决定[86-87]。

根据上述粗骨料材料模型可知,大多数研究者都将骨料假定为线弹性材料,而忽略了骨料在动态荷载作用下的塑性行为。根据文献[88-91]可知,骨料被假设为弹性材料只适用于混凝土处于准静态荷载下的情况,在动态荷载

条件下骨料会表现出明显的非线性特征。因此,为了尽可能准确地模拟动态荷载下SFRC中骨料的力学行为,应采用考虑应变率效应和骨料材料塑性行为的材料模型[如Holmquist-Johnson-Cook(HJC)模型][81]、修正Drucker-Prager盖帽模型[92]、连续表面盖帽模型[88],以及LS-DYNA(K&C模型)中的CONCRETE\_DAMAGE\_REL3(Mat\_072R3)模型[93-95]。

### 3.3. 砂浆基体材料模型

为了更真实地模拟砂浆基体在动态荷载下的复杂行为,研究者在进行上述细观模拟时采用了不同的本构模型。Xu等[20]采用了LS-DYNA中的PSEUDO\_TENSOR(Mat\_16)塑性材料模型来模拟动态压缩荷载作用下的SFRC砂浆相。该模型包括两个失效面,用来描述材料的强度变化和失效行为。此外,根据Xu等的其他工作[44]可知,基于Mat\_16开发的K&C模型也被用来模拟动态拉伸荷载作用下SFRC的砂浆基体的材料行为,该模型主要由三个失效面组成。Peng等[84]采用LS-DYNA中的MAT\_BRITTLE\_DAMAGE(MAT\_096)模型来模拟砂浆基体的材料性能。该模型是一种适用于脆性材料的各向异性脆性损伤模型,其包含三个失效面,可用于描述材料的性能退化,同时还考虑了基于黏度理论的应变率效应。Fang和Zhang[45]采用HJC模型模拟了接触爆炸荷载作用下SFRC的砂浆基体。在HJC模型中,材料强度被定义为压力、应变率和损伤的函数,在粉碎破坏情况下,压力可以表示为体积应变的函数。此外,许多研究人员[46,58-60]采用K&C材料模型来模拟静态、动态荷载作用下的SFRC基体。只需要输入三个基本模型参数,即密度、无侧限抗压强度和泊松比,即可由基本参数自动计算和生成其他参数。同时,研究人员可以对这些自动生成的参数进行检查和修改。总而言之,在综合考虑细观模拟精度、效率及可用性的基础上,应采用更加合理的材料模型来模拟高应变率荷载条件下SFRC基体的力学行为。

### 3.4. SFRC界面关系

正如第2节所述,SFRC已经被建模为由纤维、砂浆基体、骨料和纤维/骨料与基体之间的ITZ组成的两相、三相或四相复合材料。考虑混凝土中ITZ区域的薄弱及非匀质特性,ITZ被公认为是影响混凝土力学性能的显著因素之一[72,96]。此外,鉴于随机分布在SFRC中的钢纤维所带来的纤维桥接效应,纤维和砂浆基体间的界面关系是分析SFRC力学性能的基础。许多研究人员通过开展纤维

拉拔试验研究了纤维和砂浆基体之间的黏结-滑移关系[97-100]。基于已有试验成果,人们已经发现单根纤维嵌入基体的拉拔试验结果会受到诸多因素的影响,包括纤维形状[101-102]、纤维表面状态[103-106]、纤维倾斜角[107-111]、纤维嵌入长度[112-117]、拉拔速率和砂浆基体性能[118-119]等。特别是在参考许多嵌入不同类型基体的纤维的拉拔试验后,人们发现嵌入低水灰比的UHPC基体中钢纤维的力学性能与嵌入普通混凝土或高强度混凝土中钢纤维的力学性能存在显著差异[120-123]。图10展示了嵌入普通混凝土和UHPC基体中的短直钢纤维的拉拔应力-滑移曲线。由图可见,普通混凝土中的钢纤维的脱黏行为发生在峰值应力后,而UHPC基体中同样的钢纤维的拉拔应力会随着滑移值的增加而不断减小。通过观察UHPC基体和普通混凝土中的纤维界面区的微观结构可知,UHPC基体中的纤维ITZ区域要比普通混凝土基体中的更加密集。因此,人们开发了多种纤维界面增强技术,包括采用高强基体及基体改性的方法来提升钢纤维和混凝土基体之间的黏结性能[108,119,124]。Bindiganavile和Banthia [125]发现,纤维和基体之间的黏结-滑移响应也会受到纤维模量的显著影响。例如,在基体与低模量纤维之间的界面强度达到峰值之前,拉伸曲线上会表现出较高的刚度。由于界面的黏弹性响应,通过使用低模量钢纤维可以使SFRC基体获得更高的能量吸收能力或韧性。此外,文献[126-127]已经证明SFRC的结构韧性取决于纤维和基体之间的黏结-滑移行为。Bindiganavile和Banthia [126]认为,当加载速率较高时,SFRC和其他类型的FRC(包含聚合物纤维)之间的韧性差异会被削弱,这主要是因为后者的黏结-滑移行为在聚合物纤维的黏弹性影响下会得到有效改善。此外,他们还发现钢纤维的拉拔耗能会随着加载速率的增大而提高。然而,当加载速率较大时,SFRC的韧性会呈现明显的下降趋势,并伴随着 $3000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的裂缝张开位移速率,这主要是由纤维的断裂失效而引起的。Banthia和Trottier [128]评论说,SFRC的能量吸收能力也与纤维形状有关,相较于平端纤维,嵌入水泥基体中的变形钢纤维具有更高的抗拉强度。

综上所述,SFRC细观模拟的要点之一是如何合理地描述纤维/骨料与砂浆基体之间的界面关系,这与在不同荷载条件下SFRC的数值模拟结果密切相关。研究者已经开发并采用了两种方法来模拟纤维和混凝土基体之间的黏结关系:一是采用显示模拟的方法将ITZ视为纤维周围的环形区域;二是采用隐式接触算法来描述纤维与混凝土基体之间的界面关系。从实验结果[129]可以看出[图11(a)],在纤维和混凝土之间确实存在一个具有一定厚度

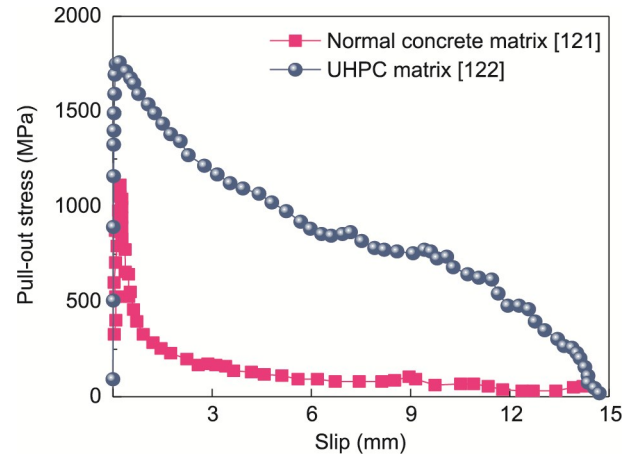


图10. 普通混凝土和UHPC基体中直纤维的拉拔应力-滑移曲线。经许可,转载自参考文献[121-122]。

的环形区域,即ITZ区域。基于Zhang等[53]所采用的缩放算法,纤维周围厚度为 $t$ 的ITZ区域可按图11(b)所示的方式进行模拟,并由相应的材料模型进行定义,以描述纤维和混凝土基体之间的界面关系。然而,由于混凝土中的纤维数量巨大,这种显式模拟方法在有限元网格划分及数值计算工作中愈发困难。因此截至目前,基于单一纤维拉拔试验数据,人们已经开发并应用了三种不同的接触算法来描述纤维-混凝土基体间的界面关系,如共节点假设[60-61]、LS-DYNA中的一维接触算法(Contact\_1D模型)[45-46],以及流固耦合算法[39,84,130]。当对圆形截面的光滑纤维进行拉拔试验时,拉拔荷载与沿纤维长度的滑动位移之间的关系表现如图12所示。由图可见,嵌入混凝土基体中的光滑纤维的拉拔过程可以分为三个部分:首先,拉拔荷载呈现线性增长趋势(OA阶段);其次,当外部荷载超过临界值( $P_{crit}$ )时,裂缝会在ITZ区域开始产生,并在AB阶段继续传播;最后,一旦达到最大荷载( $P_{max}$ ),嵌入基体的纤维保持最小长度,且在C点处纤维与混凝土基体完全脱黏。根据上述纤维工作机理,许多研究者尝试采用LS-DYNA中的Conatct\_1D算法来描述钢纤维在混凝土基体中的黏结、脱黏和滑移行为,该算法的详细介绍可参考文献[46,58]。然而,考虑前文所述的普通混凝土和UHPC基体中纤维-基体界面的性质差异,纤维和基体之间的ITZ的计算参数应根据相应的纤维拉拔试验结果来确定。

此外,一些学者也考虑了SFRC中骨料和砂浆基体之间的界面关系。在Zhang [52]和Jin等[67]的细观模拟工作中,他们在骨料模型周围生成了一个厚层[图13(a)、(b)中的红色区域]用于表示骨料和砂浆基体之间的ITZ区域。他们假设ITZ是一个弱化的砂浆相,并采用塑性损伤本构模型[131]来模拟动态压缩荷载作用下SFRC砂浆基体及



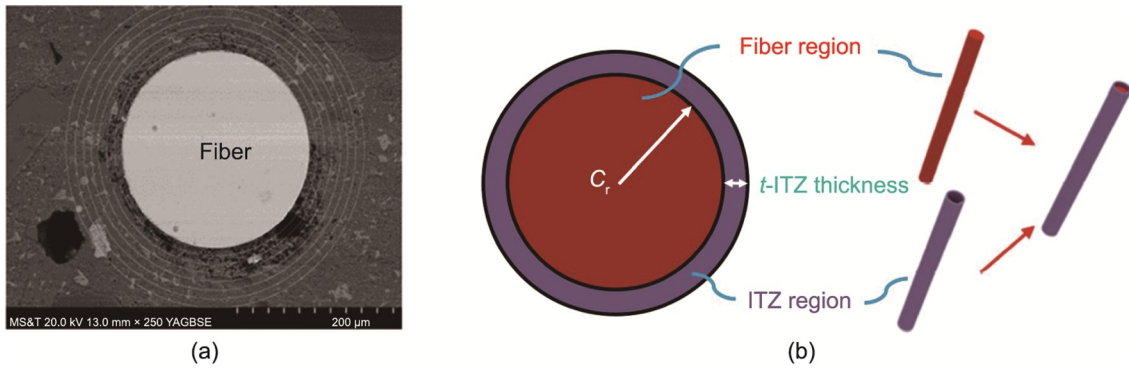


图11. FRC中纤维和骨料周围的ITZ。(a) 纤维周围的ITZ的背散射电子 (BSE) 成像；(b) 纤维周围的数值ITZ。经许可，转载自参考文献[53,129]。

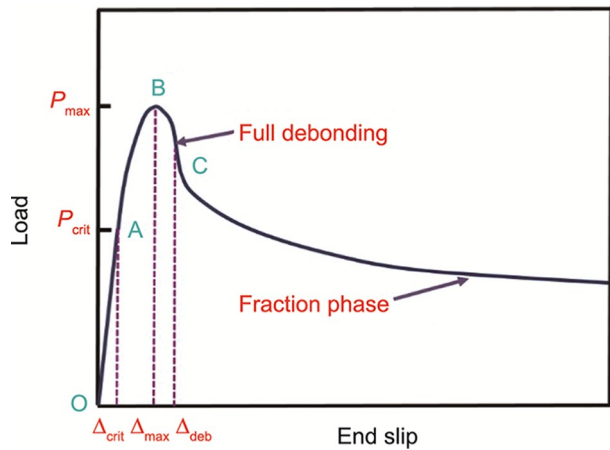


图12. 混凝土嵌入纤维的拉拔荷载与末端滑移曲线。经许可，转载自参考文献[58]。

ITZ的力学行为。在塑性损伤本构模型中，混凝土的力学响应是由材料塑性损伤进行描述的，其失效模式主要表现

为拉伸开裂和压缩开裂。Naderi和Zhang [55]在SFRC细观模型中利用修正的缩放算法生成了骨料周围的ITZ层。如图13 (c) 所示，在原始骨料和缩放骨料的表面之间产生了厚度恒定 (0.05 mm) 的ITZ层；他们将ITZ相假定为线弹性材料，并采用杨氏模量、泊松比和厚度三个材料参数对其进行表征。类似地，Zhang等[53]采用了与Naderi和Zhang [55]相同的缩放算法来建立骨料周围的ITZ区域，如图13 (d) 所示。然而，ITZ作为一个具有多孔微结构的非匀质相，其力学性能不能采用线弹性构成模型来描述。据了解，人们已经证明并使用多种非线性和弹塑性构成模型，如利用K&C模型[93,132–133]和混凝土损伤塑性模型 (CDPM) [89]来描述正常混凝土中ITZ的力学响应。因此，本文建议在SFRC的细观模型中采用K&C和CDPM模型来模拟ITZ。

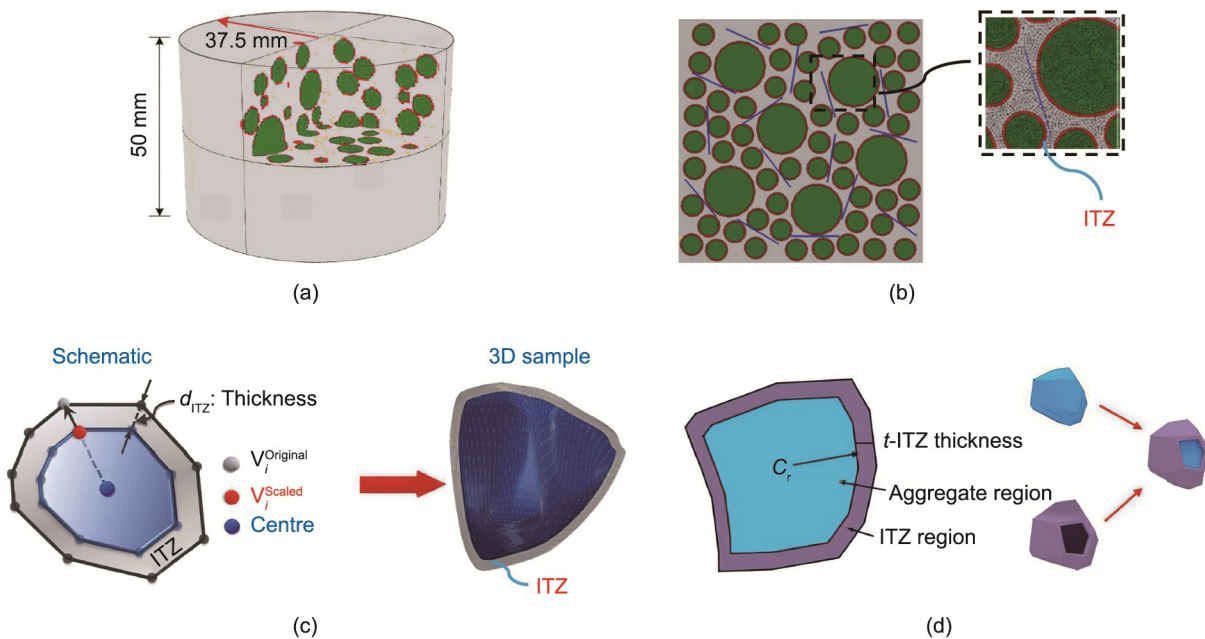


图13. SFRC模型中骨料和砂浆基体之间的ITZ区域。(a) 三维三相SFRC模型中的ITZ [52]；(b) 二维四相模型中的ITZ [71]；(c) 三维不规则骨料周围的ITZ [55]；(d) 三维骨料模型周围的ITZ [53]。

## 4. 动态荷载作用下的 SFRC 细观力学性能分析案例

针对不同高应变率荷载（如动态压缩和拉伸、接触爆炸和弹体侵彻）作用下的 SFRC 的力学性能，国内外研究人员开展了大量的细观研究工作[134–143]。基于不同的细观模拟方法，系统研究了 SFRC 的动态抗压强度、动态抗拉强度、抗爆炸和弹体侵彻性能。本节将针对采用不同细观模型所得到的 SFRC 数值结果进行综合回顾及比较。

### 4.1. SFRC 的抗压性能

近年来人们已经对 SFRC 的动态抗压强度开展了广泛的研究，一般认为在混凝土中加入钢纤维对其抗压强度影响不大[134–137]。为了研究动态压缩荷载条件下 SFRC 中钢纤维的工作机制，一些研究人员对 SFRC 的失效过程和破坏模式进行了细观模拟[45,52,59–60]。Zhang [52]模拟了 SFRC 在经受准静态和动态压缩荷载时的应力状态（图 14）。他们发现，混凝土中垂直的纤维主要承受压应力，而位于水平方向上的纤维主要承受拉应力。表明钢纤维能够在提高 SFRC 的延性和韧性方面发挥重要作用。此外，从图 14 可以发现，位于试件边缘区域的钢纤维的压应力要远高于中心区域的压应力，这表明钢纤维的桥梁作用可以有效地延缓混凝土在动态荷载下的开裂破坏。Zhao 等[60]模拟了钢纤维体积分数为 0.5% 的 SFRC 的压缩破坏过程，结果如图 15 所示。结合 SFRC 的压缩应力-应变曲线变化趋势，可以得到混凝土中钢纤维在不同的屈服荷载、峰值荷载和失效荷载下的应力状态，见图 15 (a) ~ (c)。由图 15 可知，随着荷载的逐渐增大，钢纤维对混凝土基体的约束行为逐渐增强。在加载过程中，这些钢纤维同时受到压应力和拉应力的作用，这有助于限制混凝土基体中倾斜裂缝的扩展。同样地，Wu 等[59]采用三维细观模拟的方法模拟了高应变率荷载作用下 SFRC 的 SHPB 试验（图 16），他们观察到混凝土开裂破坏主要出现在试件边缘，且混凝土碎片会被随机分布的钢纤维相互连接，这与现有的试验结果高度一致。

此外，Fang 和 Zhang [45]还利用三维随机细观模拟的方法（图 8）研究了应变率（ $\dot{\epsilon}$ ）对 SFRC 抗压性能的影响。图 17 (a) 展示了含有 3% 钢纤维的 SFRC 在不同应变率条件下的压缩应力-应变曲线。由图可见，当应变率在  $10^{-4}$ ~ $200 \text{ s}^{-1}$  的范围时，SFRC 的峰值应力不会随应变率的增大而明显增强；而当应变率在  $200$ ~ $500 \text{ s}^{-1}$  范围内变化时，SFRC 的压缩应力会明显增强。在获取了不同应变率条件下 SFRC 的动态抗压强度后，将其 DIF 值与实验数据

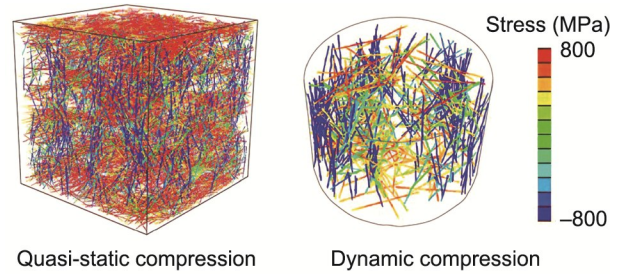


图 14. 准静态和动态压缩荷载作用下 SFRC 中钢纤维的应力状态。经许可，转载自参考文献[52]。

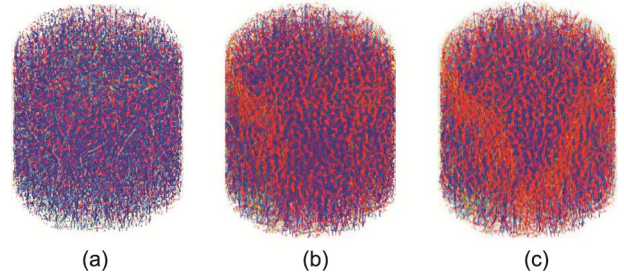


图 15. 含 0.5% 钢纤维的 SFRC 在不同荷载条件下的准静态压缩破坏过程。(a) 屈服荷载；(b) 峰值荷载；(c) 失效破坏。经许可，转载自参考文献[60]。

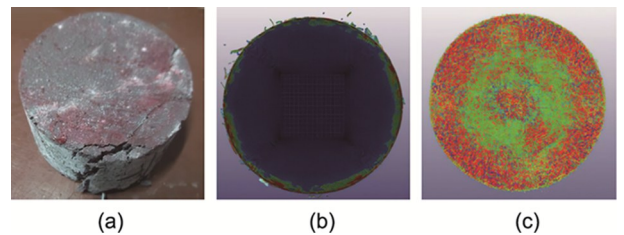


图 16. SFRC 的动态压缩破坏模式。(a) 试验结果；(b) 砂浆基体的模拟结果；(c) 钢纤维的模拟结果。经许可，转载自参考文献[59]。

及欧洲国际混凝土委员会（CEB）预测值进行比较，结果如图 17 (b) [8,45,144–147]所示。由图可见，当应变率低于  $60 \text{ s}^{-1}$  时，SFRC 和普通混凝土的 DIF 几乎没有差异；而当应变率超过  $60 \text{ s}^{-1}$  时，前者比后者略大。此外，研究发现：在低应变率条件下，纤维含量对 SFRC 的 DIF 影响不大；纤维含量较低的 SFRC 则倾向于表现出较高的 DIF。综上所述，钢纤维不能对 SFRC 的 DIF 产生明显的增强作用，在相同应变率条件下，SFRC 的 DIF 可以参考普通混凝土进行表示[145,148]。

为了研究钢纤维对含有粗骨料的 SFRC 的动态抗压性能的影响，Xu 等[20]建立了由端勾纤维、骨料和砂浆基体组成的轴对称细观模型，并利用该模型模拟了 SFRC 的冲击压缩行为[图 4 (a)]。图 18 以等效塑性应变分布为指标，展示了普通混凝土和 SFRC 的动态失效破坏模式，应变率为  $471 \text{ s}^{-1}$ 。由图可见，相较于素混凝土的完全脆性失效，SFRC 表现出了更优异的延性，且开裂破坏主要出现



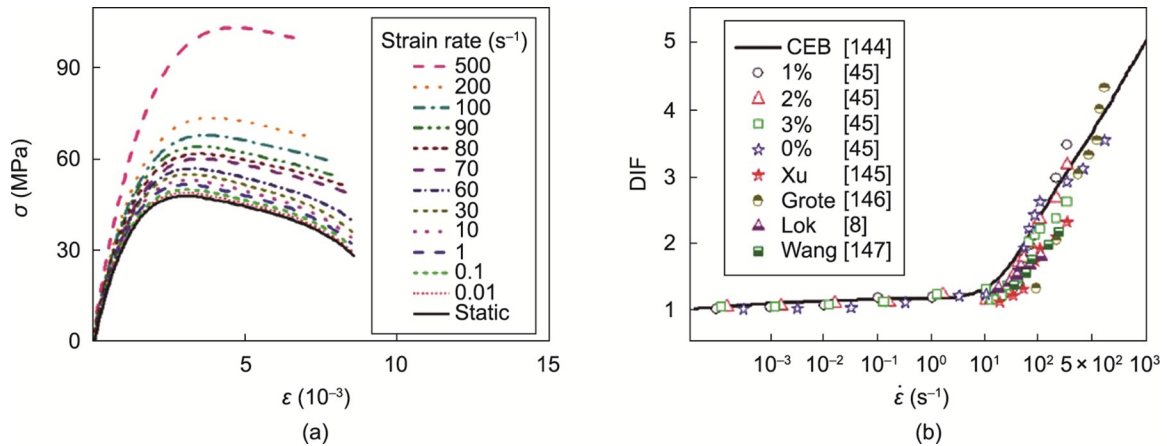


图17. 含3%钢纤维的SFRC的单轴压缩结果。(a) 应力-应变曲线 ( $\sigma$ : 应力;  $\varepsilon$ : 应变); (b) DIF ( $\dot{\varepsilon}$ : 应变率)。经许可, 转载自参考文献[8,45,144–147]。

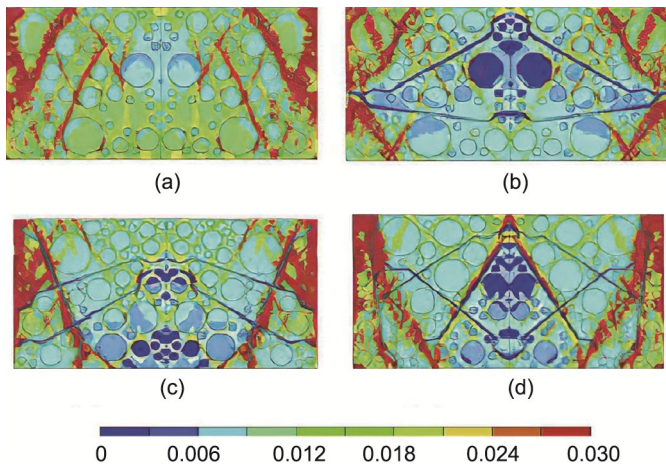


图18. 不同钢纤维含量的SFRC的等效塑性应变分布。(a) 普通混凝土; (b) 0.6% SFRC; (c) 1.2% SFRC; (d) 1.8% SFRC。经许可, 转载自参考文献[20]。

在试件边缘, 这主要与由嵌入砂浆基体的端勾纤维产生的裂缝桥接作用有关[149–151]。此外, 通过对比不同应变率条件下SFRC的数值与试验DIF [图19], 可以发现, 在低应变率条件下, 钢纤维对SFRC的抗压DIF的增强作用不明显。随着钢纤维用量的增加, SFRC在高应变率荷载作用下的抗压DIF会明显增强, 这主要是由于SFRC在高应变率荷载条件下具有更强的吸能效应[152]。

#### 4.2. SFRC的抗拉性能

如前文所述, 随机分布在混凝土基体中的钢纤维可以有效延缓或防止砂浆基体和ITZ区域的裂缝扩展。人们已经认识到, 钢纤维可以显著提高混凝土基体的延性及抗拉强度[24,153]。同时, 为了阐明拉伸荷载作用下SFRC中钢纤维的作用机制, 国内外学者已经开展了大量的SFRC拉伸数值试验, 包括劈裂拉伸[46,59,154]、落重冲击拉伸[44]和直接拉伸[45]试验等。本节将对现有的SFRC拉伸细

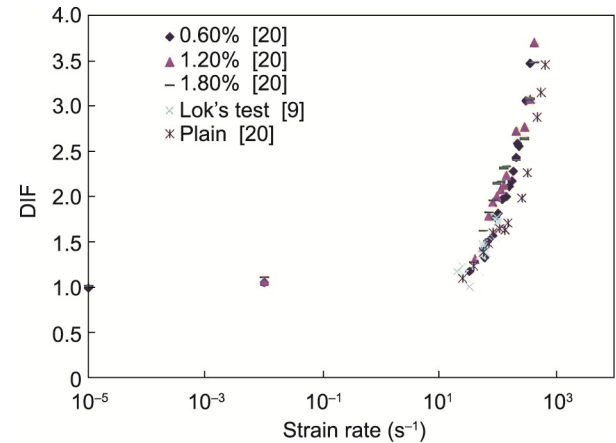


图19. 不同钢纤维含量的SFRC的数值和试验DIF的比较。经许可, 转载自参考文献[9,20]。

观模拟工作进行系统的回顾和讨论。

图20展示了动态劈裂拉伸荷载作用下SFRC的试验和数值失效模式。由基体[图20 (b)]和钢纤维[图20 (c)]的损伤分布结果可知, 断裂破坏主要出现在沿着荷载方向的直径平面, 同时在试件和承重垫片之间的加载位置也会发生压缩破坏。此外, 沿荷载方向靠近直径平面的钢纤维受到拉应力的作用, 这有利于控制试件沿荷载方向的断裂。SFRC的数值失效模式与实验结果非常一致, 如图20 (a)所示, 这为研究SFRC拉伸行为的细观建模方法提供了校准方法。Liang和Wu [46]使用与Wu等[59]类似的细观模型[图6 (c)]模拟了立方体SFRC试件的劈裂拉伸行为, 他们发现损伤裂缝首先出现在试件中心区域, 然后会垂直扩展至加载位置 (图21)。

Hao等[154]建立了一个由螺旋纤维和骨料组成的二维三相细观模型, 模拟了动态劈裂拉伸荷载作用下SFRC的力学性能。图22展示了具有不同骨料形状 (圆形和多边

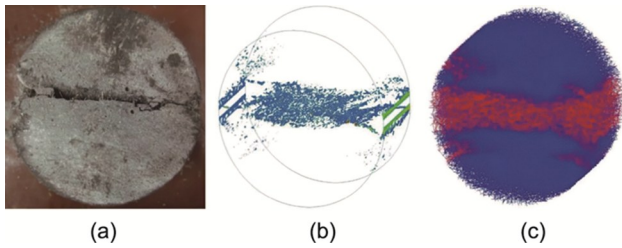


图20. 动态劈裂拉伸荷载作用下SFRC失效模式的试验及数值模拟结果。(a) 试验结果；(b) 混凝土基体模拟结果；(c) 钢纤维模拟结果。经许可，转载自参考文献[59]。

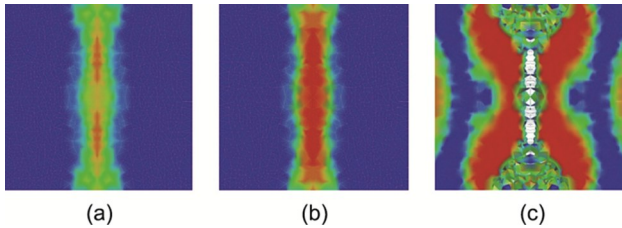


图21. 沿着加载轴方向的立方体SFRC试件破坏过程。(a) 第24/100步；(b) 第51/100步；(c) 完全破坏。经许可，转载自参考文献[46]。

形)和纤维含量(1%~3%)的SFRC的动态劈裂拉伸破坏模式。由图可见，SFRC试件的开裂模式为由直径平面上的一条主要裂纹[图22(a)]转变为许多细小的裂纹[图22

(b)、(c)]。此外，含有圆形和多边形骨料的SFRC试件的开裂模式差异不大。然后，他们得出结论：骨料形状对SFRC的开裂模式影响不大，主要是由于动载条件下的裂缝传播速度太快，导致裂缝可以穿透粗骨料，不会在薄弱区域进行传播。因此，混凝土中的裂缝路径不会受到骨料形状变化的影响[154]。

利用图4(b)所示的V型缺口SFRC细观模型，Xu等[44]研究了普通混凝土和端勾纤维SFRC的动态拉伸行为，如图23所示。由图可见，裂缝发生在缺口处，并向试件支撑处垂直传播。拉伸裂缝由一个主裂缝及其周围的许多分叉裂缝组成。随着纤维体积分数的增加，SFRC中出现了更多的分叉，表明更多的断裂能被钢纤维所吸收，这与Hao等[154]的模拟结果一致(图23)。

除了劈裂拉伸和断裂模拟，Fang和Zhang[45]还开展了一系列的数值分离式霍普金森拉杆(SHTB)试验，用以研究SFRC的动态单轴拉伸性能。图24(a)展示了应变率为 $0.001\sim 100\text{ s}^{-1}$ 时，含有3%钢纤维的SFRC的静态、动态拉伸应力-应变曲线。由图可见，SFRC的峰值拉伸应力会随着应变率的增大而逐渐增大。图24(b)是不同纤

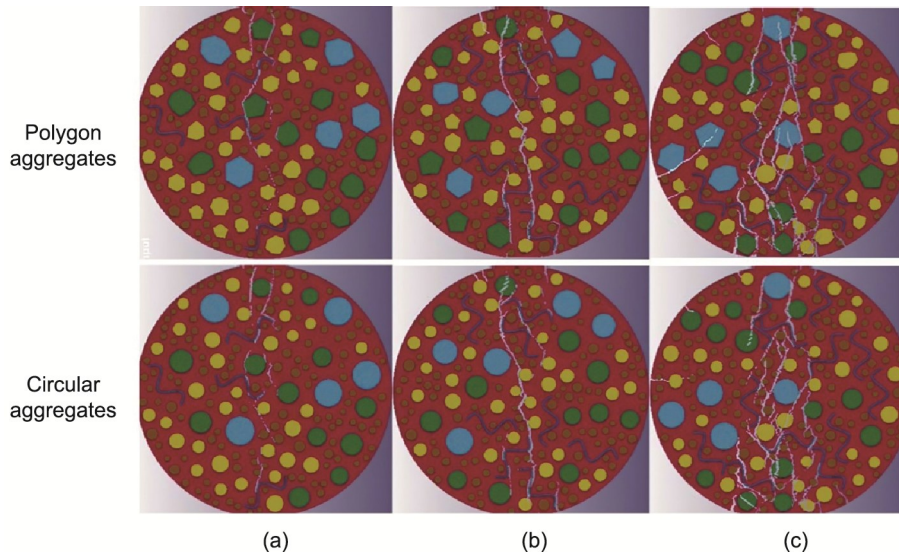


图22. 具有不同纤维含量的SFRC动态劈裂拉伸破坏模式。(a) 应变率为 $3.9\text{ s}^{-1}$ 的1.0% SFRC；(b) 应变率为 $10.9\text{ s}^{-1}$ 的2.0% SFRC；(c) 应变率为 $19.4\text{ s}^{-1}$ 的3.0% SFRC。经许可，转载自参考文献[154]。

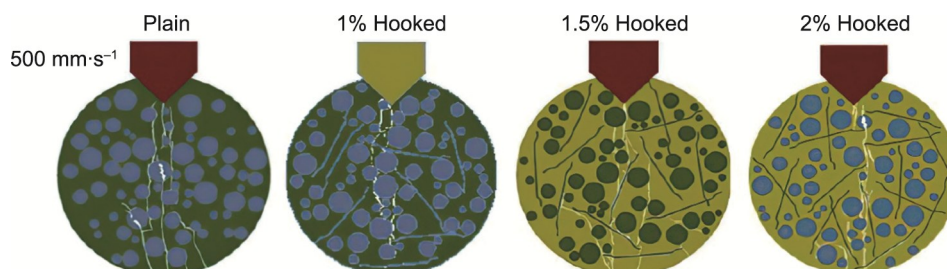


图23. 普通混凝土及具有不同纤维含量的SFRC的破坏模式。经许可，转载自参考文献[44]。



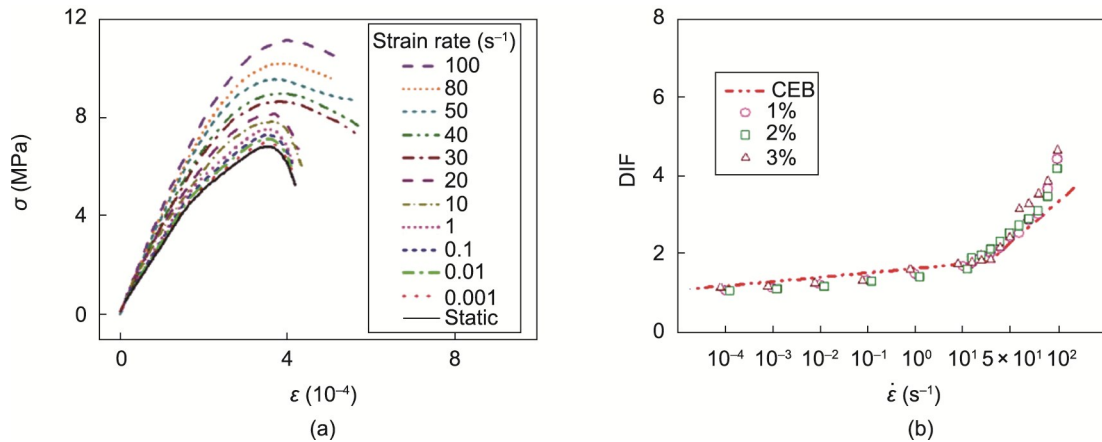


图24. 含3%钢纤维的SFRC的单轴拉伸结果。(a) 应力-应变曲线；(b) DIF。经许可，转载自参考文献[45]。

维含量的SFRC在不同应变率条件下的拉伸DIF结果。将数值DIF与CEB预测值进行比较，可以发现：当应变率低于 $30\sim 32\text{ s}^{-1}$ 时，前者相对低于后者；而当应变率超过临界应变率时，两者呈现相反的关系。此外，当应变率大于 $32\text{ s}^{-1}$ 时，SFRC的拉伸DIF出现了明显的增长，说明其临界应变率 $\dot{\epsilon}_{cr}$ 为 $32\text{ s}^{-1}$ 。与CEB所规定的临界应变率 $30\text{ s}^{-1}$ 相比，SFRC的 $\dot{\epsilon}_{cr}$  ( $32\text{ s}^{-1}$ )要相对更高。类似于抗压DIF与纤维含量的关系，当应变率低于 $50\text{ s}^{-1}$ 时，SFRC的拉伸DIF差别不大，而在 $50\text{ s}^{-1}$ 之后，可以观察到纤维含量会对其拉伸DIF产生些许影响。

#### 4.3. SFRC的爆炸行为

为了研究SFRC在近距离或接触爆炸条件下的抗爆性能，研究人员在过去几十年期间开展了大量的实验。研究证实，在SFRC中添加钢纤维可以提高其延性[87]、承载能力[155]、抗裂性能[156]及无碎片吸能效应[157]。为了简化试验程序和降低全尺寸试验的成本，现有的关于SFRC构件（如板、梁和柱）的爆炸试验主要是采用单自由度（SDOF）系统来预测构件在爆炸荷载条件下的动态响应[158–159]。目前SDOF系统的整体预测结果是十分令人满意的，但该系统在预测爆炸荷载下SFRC构件的

局部结构响应方面仍存在一定局限性。因此，采用计算机数值模拟的方法，可以提供更可靠的结构损伤和性能预测结果，目前该方法已得到广泛应用。Luccioni等[160]采用均质细观模型模拟了爆炸荷载作用下SFRC板的力学性能。通过实验和数值模拟结果的对比，发现均质模型无法再现爆炸荷载条件下SFRC的结构行为。例如，使用均质模型无法很好地模拟钢纤维对SFRC的开坑、剥落和弯曲破坏行为的影响效果。因此，应该开发一个更精确、包含钢纤维的细观模型来模拟和预测SFRC的抗爆性能。

为了提高计算效率，Peng等[84]建立了一个非均质细观模型[图6(c)]和一个宏观的均质模型来模拟SFRC板，如图25所示。其中在SFRC板的中心有一个包含随机钢纤维的立方体区域。采用有限元方法和平滑粒子流体力学（SPH）方法[161]，分别对SFRC板和炸药进行模拟。在数值模拟过程中，研究人员采用侵蚀算法来模拟SFRC板的损伤破坏，并将混凝土基体和SFRC板的最大主应变作为侵蚀标准，其值分别为0.2和0.3。由图25可知，SFRC板的中心区域发生了明显的局部失效破坏。此外，由图26可见，接触爆炸荷载作用下SFRC板的开坑数值结果

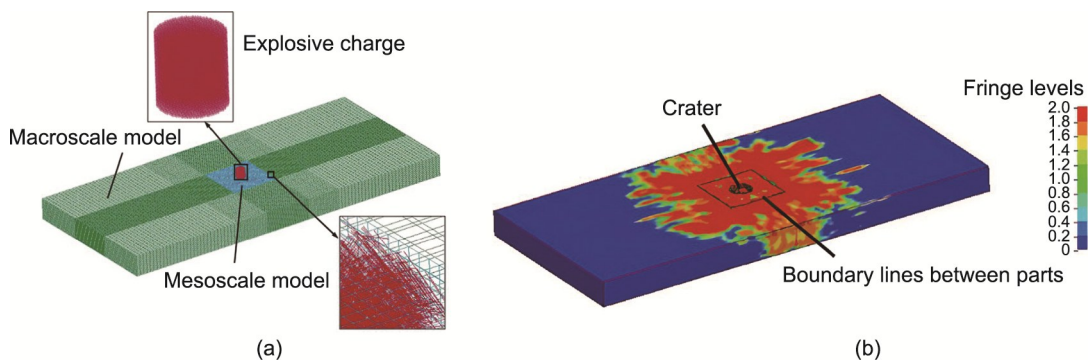


图25. 接触爆炸条件下SFRC板的数值模型 (a) 和模拟结果 (b)。经许可，转载自参考文献[84]。

(直径和深度)与试验结果(图26)吻合程度较高,表明所开发的细观模拟方法在预测SFRC板爆炸行为方面具有较高的可靠性。

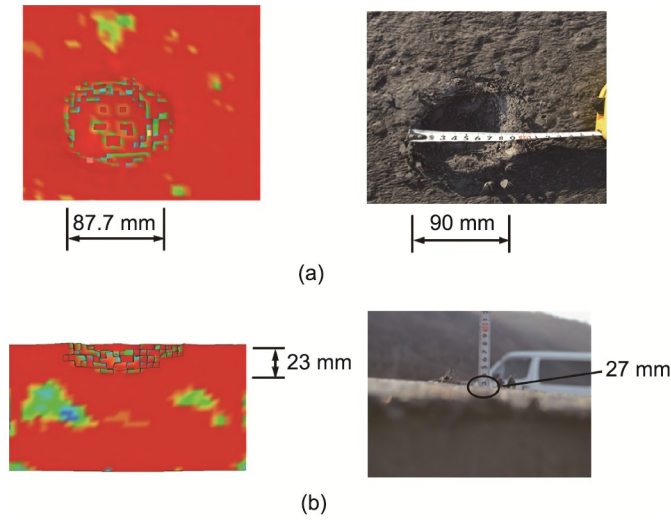


图26. 数值和试验爆炸开坑特征的比较。(a) 开坑直径;(b) 开坑深度。经许可, 转载自参考文献[84]。

Fang 和 Zhang [45]通过建立圆柱体SFRC试件和立方体炸药的三维细观模型,从细观尺度研究了具有不同钢纤维含量的SFRC的接触爆炸行为。他们采用Lagrangian-Eulerian方法来模拟SFRC的接触爆炸,其中空气和炸药部分均使用Euler网格进行划分,SFRC部分使用Lagrange网格进行模拟。SFRC试件模型的尺寸为 $\varphi 7\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ ,被钢箍环向约束,只有模型顶部和底部表面是自由的;一个立方体炸药被放置在SFRC模型顶部表面中心位置。他们研究了纤维含量和炸药质量对SFRC失效模式的影响规律。

图27显示了普通混凝土和SFRC的开坑和剥落特征。其中,试件顶部表面的凹坑是由压应力波直接形成的,而发生在底部表面的剥落现象则是由传播到试件底部表面的压应力波所产生的拉应力造成的。由图27可知,使用三维细观模型可以真实地模拟接触爆炸荷载作用下SFRC的开坑和剥落行为。此外,数值模拟得到的混凝土开坑和剥落结果与试验结果吻合程度良好,证明了所采用的三维细观模拟方法的正确性。他们还通过评估开坑和剥落的直径和深度变化,进一步研究了钢纤维含量对SFRC的爆炸响应的影响。结果表明,普通混凝土的开坑和剥落直径及深度都要大于SFRC。同时发现,SFRC的开坑或剥落的大小与纤维含量有关,这主要是由于纤维的桥接效应限制了混凝土在失效阶段后的开裂,提高了其能量吸收能力。此外,SFRC的开坑和剥落直径及深度都表现出随着炸药量的增加而线性增长的趋势。

为了深入理解接触爆炸条件下SFRC中钢纤维的作用机理,Fang 和 Zhang [45]对混凝土基体和钢纤维的爆炸响应进行了精确建模,如图28所示。与素混凝土等效塑性应变分布相比,SFRC中混凝土基体的应变分布不均匀,且随着炸药含量的增加也会发生些许变化。此外,当钢纤维含量和炸药含量保持不变时,他们注意到钢纤维的等效塑性应变会高于混凝土基体,这是因为钢纤维在接触爆炸条件下对增强混凝土韧性起到了重要作用。钢纤维与混凝土基体之间的应变差距会随着纤维含量 $V_f$ 的增加而变得明显,表明增大钢纤维 $V_f$ 在提升SFRC抗爆性能方面起到了更大的作用。综上所述,混凝土基体中随机分布的钢纤维对于提高SFRC的抗爆性能意义重大,且具有较高 $V_f$

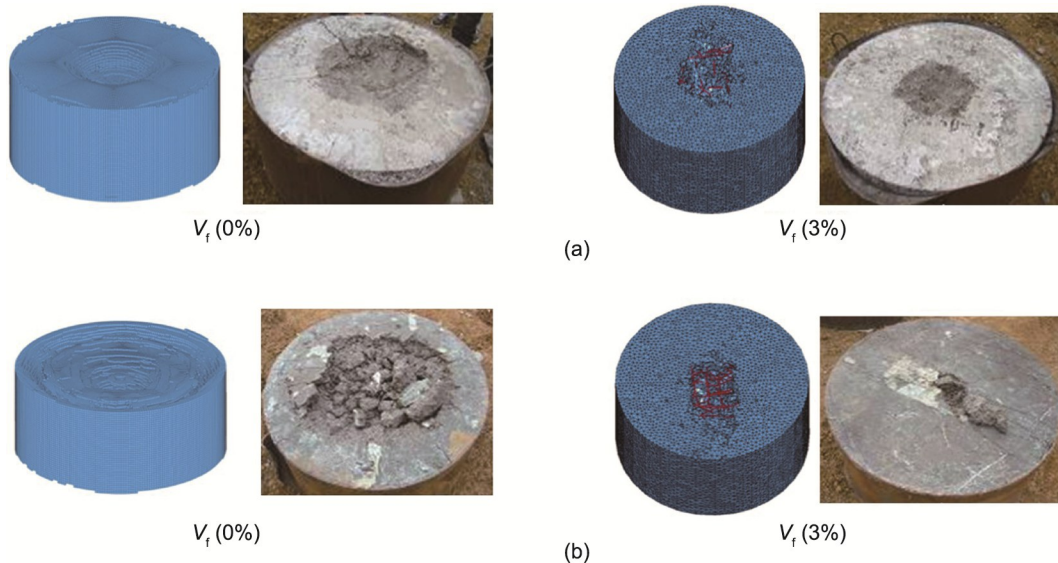


图27. SFRC数值与和试验损伤对比。(a) SFRC的开坑特征;(b) SFRC的剥落特征。经许可, 转载自参考文献[45]。



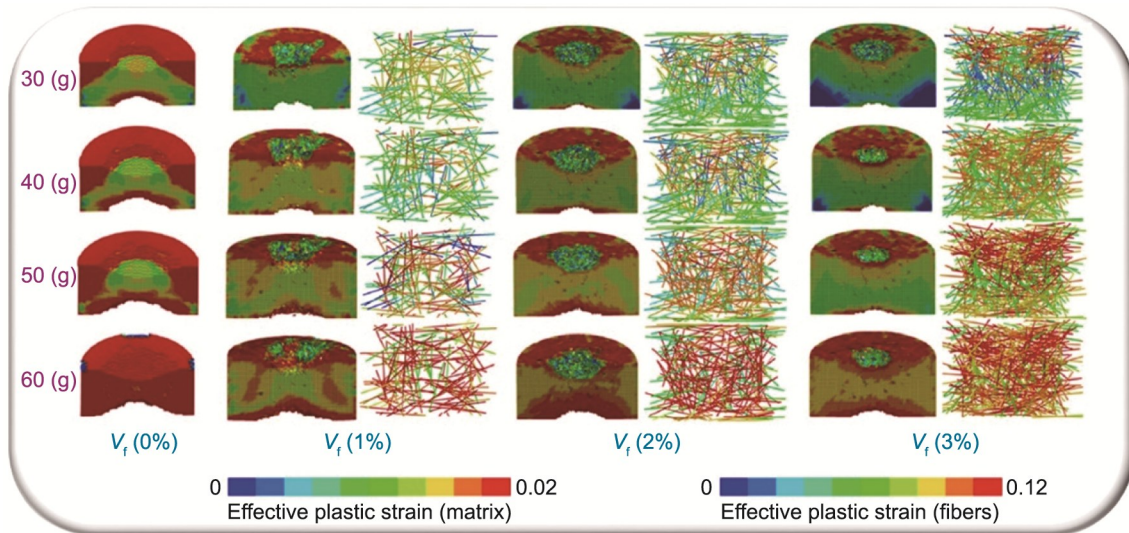


图28. SFRC的混凝土基体和纤维的有效塑性应变。经许可，转载自参考文献[45]。

(3%)的SFRC会表现出更好的韧性行为。

## 5. 结论

本文全面回顾了动态荷载（即单轴压缩、劈裂拉伸、直接拉伸以及爆炸荷载）作用下最新的SFRC细观模型和模拟方法。基于文献综述，从上述回顾和讨论中得出了一些重要的结论：

(1) 主要有两种方法用于模拟FRC的细观结构。一种方法是借助XCT图像处理方法，能够生成真实可靠的FRC细观结构模型；另一种方法是建立一些随机的线或实体单元来模拟混凝土中的纤维组分，通过这些元素可以建立二维和三维FRC细观模型。一般来说，通过第二种方法建立的细观模型足够精确，可以用于模拟和研究静态和动态荷载作用下SFRC的力学响应，而且在建模和计算方面也比XCT图像法更加经济合理。

(2) 依据细观模型中是否包含粗骨料，开发了两类适用于SFRC材料的细观模型。考虑计算成本，由钢纤维和砂浆基体组成的两相细观模型适用于不同加载条件下的SFRC细观数值模拟。

(3) 根据现有的试验和数值结果可知，SFRC的动态力学行为会受到纤维形状、长度和含量等因素的显著影响。因此，应在SFRC细观模型中建立不同类型的纤维，如直纤维、螺旋纤维和端勾纤维，用以进一步模拟该模型在动态荷载作用下的力学响应。

(4) 一些研究者尝试在SFRC细观模型中加入不同形状和尺寸的粗骨料，如圆形（2D）、多边形（2D）、球形（3D）和不规则多面体（3D）。从Hao等[154]的模拟中可

知，二维骨料形状对低/高应变率条件下SFRC后期开裂行为的影响较小。然而，目前针对包含三维纤维和随机形状骨料的三维SFRC模型的研究较少，因此有关骨料形状对SFRC细观动态力学行为的影响仍然值得探讨，这对未来SFRC细观模型的发展具有一定的指导意义。

(5) 为了合理地描述SFRC的力学响应，国内外研究者采用不同的材料模型来模拟SFRC各细观组分的力学行为，包括钢纤维、粗骨料、砂浆基体及ITZ。然而，从现有的细观模拟结果可以看出，大多数研究者假设骨料和砂浆基质是线弹性材料，忽视了它们在动态荷载作用下的塑性行为。在SFRC模型中应采用含有应变率效应和骨料塑性的弹塑性材料模型，如HJC模型、修正Drucker-Prager盖帽模型、连续表面盖帽模型和K&C模型。

(6) 结合现有研究结果可以发现，SFRC细观模拟结果与纤维/骨料和混凝土基体之间的界面关系密切相关。特别地，纤维-基体间的界面关系是分析SFRC力学性能的基础，界面性能受到诸多因素的影响，包括纤维形状、倾斜角度、表面处理、嵌入长度、拔速、纤维模量和基体性能。研究者已经开发并采用了两种方法来模拟纤维和混凝土基体之间的黏结关系，一是采用显示模拟的方法将ITZ视为纤维周围的环形区域；二是采用隐式接触算法来描述纤维与混凝土基体之间的界面关系。考虑有限元网格划分和计算工作量的问题，显示模拟方法不如隐式接触算法方法实用。目前主要有三种接触算法可以用来描述纤维-基体之间的界面关系，包括共节点假设、一维接触算法和流固耦合算法，可以根据纤维在不同基体中的拉拔行为进行选择。

(7) 根据动态荷载作用下SFRC的细观模拟结果可

知,上述细观模型在模拟和预测 SFRC 材料和构件的力学行为方面具有显著优势,包括应力-应变关系、应力分布状态、后期开裂破坏、爆炸开坑和剥落行为。但是,仍需开发更精确、有效的细观模拟方法来研究极端荷载下的 SFRC 材料和结构构件的力学行为,如包含不规则骨料和随机钢纤维的三维 SFRC 细观模型。此外,在模拟过程中应充分考虑具有不同模量的钢纤维的黏结-滑移行为及失效破坏模式,这与冲击荷载下 SFRC 的吸能效应(或韧性)密切相关。此外,细观模拟方法也可应用于预建模过程,为 SFRC 材料和结构的预测和设计提供进一步指导。综上所述,细观模拟方法在未来 SFRC 的研究、开发和应用方面具有巨大的潜力。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目(52178190和52078250)、近地探测科学与技术实验室基金项目(6142414200505)和南京航空航天大学首届研究生“拔尖创新”人才引航计划跨学科创新基金项目(KXKXJJ202005)的资金支持。衷心感谢国家留学基金管理委员会(202006830096)在吴彰钰访问伦敦大学学院期间所提供的资金支持。

## Compliance with ethics guidelines

Jinhua Zhang, Zhangyu Wu, Hongfa Yu, Haiyan Ma, and Bo Da declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Singh H. Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design. New York City: Springer; 2017.
- [2] Hsu TTC, Slate FO. Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar. *J Am Concr Inst Proc* 1963;60(4):465–86.
- [3] Hsu TTC, Slate FO, Sturman GM, Winter G. Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. *J Am Concr Inst Proc* 1963;60(2):209–24.
- [4] Fang Q, Zhang J. Three-dimensional numerical modelling of concrete-like materials subjected to dynamic loadings. In: Hao H, Li ZX, editors. *Advances in protective structures research*. Boca Raton: Routledge and CRC Press; 2012.
- [5] Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater* 2015;101:741–51.
- [6] Rios JD, Cifuentes H, Leiva C, Seitl S. Analysis of the mechanical and fracture behavior of heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete by X-ray computed tomography. *Cement Concr Res* 2019;119:77–88.
- [7] Yoo DY, Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete: a review. *Cement Concr Compos* 2016;73:267–80.
- [8] Barnett SJ, Lataste JF, Parry T, Millard SG, Soutsos MN. Assessment of fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Mater Struct* 2010;43(7):1009–23.
- [9] Lok TS, Zhao PJ. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar. *J Mater Civ Eng* 2004;16(1):54–9.
- [10] Babafemi AJ, Boshoff WP. Testing and modelling the creep of cracked macrosynthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under flexural loading. *Mater Struct* 2016;49(10):4389–400.
- [11] Guo Z, Zhuang C, Li Z, Chen Y. Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) after exposure to high temperatures. *Comp Struct* 2020;256:1113072.
- [12] Mastali M, Dalvand A, Sattarifar A. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Compos Part B Eng* 2017;112:74–92.
- [13] Tabatabaei ZS, Volz JS, Baird J, Gliha BP, Keener DI. Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading. *Int J Impact Eng* 2013;57:70–80.
- [14] Ali B, Qureshi LA. Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. *Constr Build Mater* 2019;228:116783.
- [15] Kizilkanat AB, Kabay N, Akyüncü V, Chowdhury S, Akça AH. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study. *Constr Build Mater* 2015;100:218–24.
- [16] Ramakrishna G, Sundararajan T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement Concr Compos* 2005;27(5):575–82.
- [17] Merta I, Tschegg EK. Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2013;40:991–7.
- [18] Agopyan V, Savastano Jr H, John VM, Cincotto MA. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. *Cement Concr Compos* 2005;27(5):527–36.
- [19] Yoo DY, Banthia N. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. *Constr Build Mater* 2017;149:416–31.
- [20] Xu Z, Hao H, Li H. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading. *Constr Build Mater* 2012;26(1):274–88.
- [21] Suaris W, Shah SP. Strain-rate effects in fiber-reinforced concrete subjected to impact and impulsive loading. *Composites* 1982;13(2):153–9.
- [22] Wille K, Kim DJ, Naaman AE. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater Struct* 2011;44(3):583–98.
- [23] Kang ST, Lee Y, Park YD, Kim JK. Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010;92(1):61–71.
- [24] Yoo DY, Lee JH, Yoon YS. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Compos Struct* 2013;106:742–53.
- [25] Li B, Xu L, Shi Y, Chi Y, Liu Q, Li C. Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2018;181:474–86.
- [26] Cao YYY, Yu Q. Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete. *Compos Struct* 2018;201:151–60.
- [27] Mindess S, Zhang L. Impact resistance of fibre-reinforced concrete. *Proc Inst Civ Eng Struct Build* 2009;162(1):69–76.
- [28] Cadoni E, Meda A, Plizzari G. Tensile behaviour of FRC under high strain-rate. *Mater Struct* 2009;42(9):1283–94.
- [29] Asprone D, Cadoni E, Prota A. Experimental analysis on tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain rates. *ACI Mater J* 2009;106:106–13.
- [30] Tedesco JW, Ross CA. Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting-tensile tests. *ACI Mater J* 1993;90:162–9.
- [31] Wang Z, Wu J, Wang J. Experimental and numerical analyses on effect of fiber aspect ratio on mechanical properties of SRFC. *Constr Build Mater* 2010;24(4):559–65.
- [32] Mansur MA, Chin MS, Wee TH. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. *J Mater Civ Eng* 1999;11(1):21–9.
- [33] Shafieifa M, Farzad M, Azizinamini A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC). *Constr Build Mater* 2017;156:402–11.
- [34] Liu J, Wu C, Su Y, Li J, Shao R, Chen G, et al. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. *Eng Struct* 2018;173:166–79.
- [35] Mao L, Barnett S, Begg D, Schleyer G, Wight G. Numerical simulation of ultra high performance fibre reinforced concrete panel subjected to blast loading. *Int J Impact Eng* 2014;64:91–100.



- [36] Shafieifar M, Farzad M, Azizinamini A. A comparison of existing analytical methods to predict the flexural capacity of ultra high performance concrete (UHPC) beams. *Constr Build Mater* 2018;172:10–8.
- [37] Li J, Wu C, Hao H. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Eng Struct* 2015; 102: 395–408.
- [38] Wu Z, Zhang J, Yu H, Fang Q, Ma H, Chen L. Three-dimensional mesoscopic investigation on the impact of specimen geometry and bearing strip size on the splitting-tensile properties of coral aggregate concrete. *Engineering* 2021. In press.
- [39] Zhang J, Liu X, Wu Z, Yu H, Fang Q. Fracture properties of steel fiber reinforced concrete: size effect study via mesoscale modelling approach. *Eng Fract Mech* 2022;260:108193.
- [40] Liu C, Liu Z, Zhang Y. A multi-scale framework for modelling effective gas diffusivity in dry cement paste: combined effects of surface, Knudsen and molecular diffusion. *Cement Concr Res* 2020;131:106035.
- [41] Liu C, Wang F, Zhang M. Modelling of 3D microstructure and effective diffusivity of fly ash blended cement paste. *Cement Concr Compos* 2020;110: 103586.
- [42] Wu Z, Zhang J, Fang Q, Yu H, Ma H. Mesoscopic modelling of concrete material under static and dynamic loadings: a review. *Constr Build Mater* 2021; 278:122419.
- [43] Liu J, Wu C, Chen X. Numerical study of ultra-high performance concrete under non-deformable projectile penetration. *Constr Build Mater* 2017;135: 447–58.
- [44] Xu Z, Hao H, Li H. Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Cement Concr Res* 2012;42(11):1475–93.
- [45] Fang Q, Zhang J. Three-dimensional modelling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading. *Constr Build Mater* 2013;44: 118–32.
- [46] Liang X, Wu C. Meso-scale modelling of steel fibre reinforced concrete with high strength. *Constr Build Mater* 2018;165:187–98.
- [47] Schell J, Renggli M, Van Lenthe G, Müller R, Ermanni P. Micro-computed tomography determination of glass fibre reinforced polymer meso-structure. *Compos Sci Technol* 2006;66(13):2016–22.
- [48] Sharma R, Mahajan P, Mittal RK. Fiber bundle push-out test and image-based finite element simulation for 3D carbon/carbon composites. *Carbon* 2012;50(8): 2717–25.
- [49] Qsymah A, Sharma R, Yang Z, Margetts L, Mummery P. Micro X-ray computed tomography image-based two-scale homogenisation of ultra high performance fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2017;130:230–40.
- [50] Suuronen JP, Kallonen A, Eik M, Puttonen J, Serimaa R, Herrmann H. Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography. *J Mater Sci* 2013;48:1358–67.
- [51] Ponikiewski T, Katzer J, Bugdol M, Rudzki M. Steel fibre spacing in self-compacting concrete precast walls by X-ray computed tomography. *Mater Struct* 2015;48:3863–74.
- [52] Zhang R. Failure behavior of steel fiber reinforced concrete material and beams subjected to both fire and impact loadings [dissertation]. Beijing: Beijing University of Technology; 2020. Chinese.
- [53] Zhang C, Liu P, Li K, Shi C. Generation and properties analysis of 3D mesoscale models for plain and fiber reinforced concretes. *Cement Concr Compos* 2020;114:103714.
- [54] Stock AF, Hannant DJ, Williams RIT. The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete. *Mag Concr Res* 1979; 31(109):225–34.
- [55] Naderi S, Zhang M. A novel framework for modelling the 3D mesostructure of steel fibre reinforced concrete. *Comput Struc* 2020;234:106251.
- [56] Xu Z, Hao H, Li H. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Mater Des* 2012;42:72–88.
- [57] Banthia N, Mindess S, Trottier JF. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Mater J* 1996;93(5):472–9.
- [58] Su Y, Li J, Wu C, Wu P, Tao M, Li X. Mesoscale study of steel fibre-reinforced ultra-high performance concrete under static and dynamic loads. *Mater Des* 2017;116:340–51.
- [59] Wu P, Wu C, Liu Z, Xu S. Numerical simulation of SHPB test of ultra-high performance fiber reinforced concrete with meso-scale model. *Sci Sin Phys Mech Astron* 2020;50(2):024614. Chinese.
- [60] Zhao Q, Xu S, Liu Z. Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete. *Acta Mater Compos Sin* 2018;35(6):1661–73. Chinese.
- [61] Shu G, Zhang Q, Huang Y, Bu Y. Micromechanical analysis of steel fiber corrosion in ultra-high performance concrete. *J Southwest Jiaotong Univ* 2019; 54(6):1268–76. Chinese.
- [62] Han F, Aزدoud Y, Lubineau G. Computational modeling of elastic properties of carbon nanotube/polymer composites with interphase regions. Part I: micro-structural characterization and geometric modeling. *Comput Mater Sci* 2014;81: 641–51.
- [63] Han F, Maloth T, Lubineau G, Yaldiz R, Tevtia A. Computational investigation of the morphology, efficiency, and properties of silver nano wires networks in transparent conductive film. *Sci Rep* 2018;8:17494.
- [64] Wittmann FH, Roelfstra PE, Sadouki H. Simulation and analysis of composite structures. *Mater Sci Eng* 1985;68(2):239–48.
- [65] Yu Y, Cui J, Han F. An effective computer generation method for the composites with random distribution of large numbers of heterogeneous grains. *Compos Sci Technol* 2008;68(12):2543–50.
- [66] Han F, Cui J, Yu Y. The statistical second-order two-scale method for thermomechanical properties of statistically inhomogeneous materials. *Comput Mater Sci* 2009;46(3):654–9.
- [67] Guan X, Liu X, Jia X, Yuan Y, Cui J, Mang HA. A stochastic multiscale model for predicting mechanical properties of fiber reinforced concrete. *Int J Solids Struct* 2015;56–57:280–9.
- [68] Chen G, Hadi MNS, Gao D, Zhao L. Experimental study on the properties of corroded steel fibres. *Constr Build Mater* 2015;79:165–72.
- [69] Zhang S, Zhang C, Liao L, Wang C, Zhao R. Investigation into the effect of fibre distribution on the post-cracking tensile strength of SFRC through physical experimentation and numerical simulation. *Constr Build Mater* 2020; 248:118433.
- [70] Wriggers P, Mofteh SO. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behaviour. *Finite Elem Anal Des* 2006;42(7):623–36.
- [71] Jin L, Hao H, Zhang R, Du X. Mesoscale simulation on the effect of elevated temperature on dynamic compressive behavior of steel fiber reinforced concrete. *Fire Technol* 2020;56(4):1801–23.
- [72] Zhou X, Hao H. Modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates. *Comput Struc* 2008;86(21–22):2013–26.
- [73] Xu WX, Chen HS. Numerical investigation of effect of particle shape and particle size distribution on fresh cement paste microstructure via random sequential packing of dodecahedral cement particles. *Comput Struc* 2013;114– 115:35–45.
- [74] Han F, Cui J, Yu Y. The statistical two-order and two-scale method for predicting the mechanics parameters of core – shell particle-filled polymer composites. *Interact Multiscale Mech* 2008;1(2):231–50.
- [75] Zhang Z, Song X, Liu Y, Wu D, Song C. Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm. *Compos Sci Technol* 2017;149:235–45.
- [76] Fang Q, Zhang J, Huan Y, Zhang Y. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete. *Eng Mech* 2013;30(1): 14–21. Chinese.
- [77] Xu W, Chen H, Lv Z. An overlapping detection algorithm for random sequential packing of elliptical particles. *Phys A* 2011;390(13):2452–67.
- [78] Ma H, Xu W, Li Y. Random aggregate model for mesoscopic structures and mechanical analysis of fully-graded concrete. *Comput Struc* 2016;177:103–13.
- [79] Yan P, Zhang J, Fang Q, Zhang Y, Fan J. 3D numerical modelling of solid particles with randomness in shape considering convexity and concavity. *Powder Technol* 2016;301:131–40.
- [80] Wu Z, Zhang J, Yu H, Ma H. 3D mesoscopic investigation of the specimen aspect-ratio effect on the compressive behavior of coral aggregate concrete. *Compos Part B Eng* 2020;198:108025.
- [81] Wu Z, Zhang J, Yu H, Ma H, Chen L, Dong W, et al. Coupling effect of strain rate and specimen size on the compressive properties of coral aggregate concrete: a 3D mesoscopic study. *Compos Part B Eng* 2020;200:108299.
- [82] Ledoux H. Computing the 3D voronoi diagram robustly: an easy explanation. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007)*; 2007 Jul 9–11; Glamorgan, UK. New York: IEEE; 2007. p. 117–29.
- [83] Catmull E, Clark J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Comput Aided Des* 1978;10(6):350–5.
- [84] Peng Y, Wu C, Li J, Liu J, Liang X. Mesoscale analysis on ultra-high performance steel fiber reinforced concrete slabs under contact explosions. *Compos Struct* 2019;228:111322.
- [85] Abdallah S, Fan M, Rees DWA. Analysis and modelling of mechanical anchorage of 4D/5D hooked end steel fibres. *Mater Des* 2016;112:539–52.
- [86] Zhou X, Hao H. Modelling of compressive behaviour of concrete-like materials at high strain rate. *Int J Solids Struct* 2008;45(17):4648–61.

- [87] Zhou X, Kuznetsov VA, Hao H, Waschl J. Numerical prediction of concrete slab response to blast loading. *Int J Impact Eng* 2008;35(10):1186–200.
- [88] Du X, Jin L, Ma G. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale. *Int J Impact Eng* 2014;66:5–17.
- [89] Jin L, Yu W, Du X, Zhang S, Li D. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates. *Int J Impact Eng* 2019;125:139883056.
- [90] Ma H, Wu Z, Yu H, Zhang J, Yue C. Experimental and three-dimensional mesoscopic investigation of coral aggregate concrete under dynamic splitting-tensile loading. *Mater Struct* 2020;53(1):12–22.
- [91] Wu Z, Zhang J, Yu H, Fang Q, Chen L, Yue C. Experimental and mesoscopic investigation on the dynamic properties of coral aggregate concrete in compression. *Sci China Technol Sci* 2021;64(6):1153–66.
- [92] Fang Q, Huan Y, Zhang Y, Chen L. Investigation into the static properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS. *J PLA Univ Sci Technol* 2007;8(3):254–60. Chinese.
- [93] Lu Y, Xu K. Modelling of concrete materials under blast loading. *Int J Solids Struct* 2004;41(1):131–43.
- [94] Lu Y. Modelling of concrete structures subjected to shock and blast loading: an overview and some recent studies. *Struct Eng Mech* 2009;32(2):235–49.
- [95] Guo R, Ren H, Zhang L, Long Z, Jiang X, Wu X, et al. Direct dynamic tensile study of concrete materials based on mesoscale model. *Int J Impact Eng* 2020;143:103598.
- [96] Kim S, Abu Al-Rub RK. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. *Cement Concr Res* 2011;41(3):339–58.
- [97] Abdallah S, Fan M, Rees DW. Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: overview. *J Mater Civ Eng* 2018;30(3):04018001.
- [98] Nammur JG, Naaman AE. Bond stress model for fiber reinforced concrete based on bond stress-slip relationship. *Mater J* 1989;86(1):45–57.
- [99] Zhang C, Shi C, Wu Z, Ouyang X, Li K. Numerical and analytical modeling of fiber-matrix bond behaviors of high performance cement composite. *Cement Concr Res* 2019;125:105892.
- [100] Abdallah S, Fan M, Zhou X. Pullout behavior of hooked-end steel fibers embedded in ultra-high performance mortar with various W/B ratios. *Int J Concr Struct Mater* 2017;11(2):301–13.
- [101] Tai YS, El-Tawil S. Computational investigation of twisted fiber pullout from ultra-high performance concrete. *Constr Build Mater* 2019;222:229–42.
- [102] Breitenbücher R, Meschke G, Song F, Zhan Y. Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres considering different fibre types, inclinations and concrete strengths. *Struct Concr* 2014;15(2):126–35.
- [103] Soulioti DV, Barkoula NM, Koutsianopoulos F, Charalambakis N, Matikas TE. The effect of fibre chemical treatment on the steel fibre/cementitious matrix interface. *Constr Build Mater* 2013;40:77–83.
- [104] Sugama T, Carciello N, Kukacka LE, Gray G. Interface between zinc phosphatedeposited steel fibres and cement paste. *J Mater Sci* 1992;27(11):2863–72.
- [105] Sun M, Wen DJ, Wang HW. Influence of corrosion on the interface between zinc phosphate steel fiber and cement. *Mater Corros* 2012;63(1):67–72.
- [106] Pi Z, Xiao H, Liu R, Liu M, Li H. Effects of brass coating and nano-SiO<sub>2</sub> coating on steel fiber/matrix interfacial properties of cement-based composite. *Compos Part B Eng* 2020;189:107904.
- [107] Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM. Pullout behavior of steel fibers in selfcompacting concrete. *J Mater Civ Eng* 2010;22(1):1–9.
- [108] Chanvillard G, Aïtcin PC. Pull-out behavior of corrugated steel fibers qualitative and statistical analysis. *Adv Cement Base Mater* 1996;4(1):28–41.
- [109] Robins P, Austin S, Jones P. Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Mater Struct* 2002;35(7):434–42.
- [110] Gettu R, Gardner DR, Saldívar H, Barragán BE. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Mater Struct* 2005;38(1):31–7.
- [111] Akkaya Y, Picka J, Shah SP. Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites. *J Mater Eng* 2000;12(3):272–9.
- [112] Mandel J, Wei S, Said S. Studies of the properties of the fiber-matrix interface in steel fiber reinforced mortar. *ACI Mater J* 1987;84:101–9.
- [113] Yoo DY, Je J, Choi HJ, Sukontasukkul P. Influence of embedment length on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete. *Mater Lett* 2020;276:128233.
- [114] Yoo DY, Kim S. Comparative pullout behavior of half-hooked and commercial steel fibers embedded in UHPC under static and impact loads. *Cement Concr Compos* 2019;97:89–106.
- [115] Wille K, Naaman AE. Effect of ultra-high-performance concrete on pullout behavior of high-strength brass-coated straight steel fibers. *ACI Mater J* 2013;110(4):451–61.
- [116] Xu M, Hallinan B, Wille K. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Cement Concr Compos* 2016;70:98–109.
- [117] Wille K, Naaman AE. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *ACI Mater J* 2012;109(4):479–87.
- [118] Gray RJ, Johnston CD. The effect of matrix composition on fiber/matrix interfacial bond shear strength in fiber reinforced mortar. *Cement Concr Res* 1984;14(2):285–96.
- [119] Shannag MJ, Brincker R, Hansen W. Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites. *Cement Concr Res* 1997;27(6):925–36.
- [120] Markovic I. High-performance hybrid-fiber concrete: development and utilization [dissertation]. Delft: Technische Universiteit Delft; 2006.
- [121] Kim JJ, Kim DJ, Kang ST, Lee JH. Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant. *Nucl Eng Des* 2012;252:1–10.
- [122] Park SH, Ryu GS, Koh KT, Kim DJ. Effect of shrinkage reducing agent on pullout resistance of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement Concr Compos* 2014;49:59–69.
- [123] Yoo DY, Park JJ, Kim SW. Fiber pullout behavior of HPFRCC: effects of matrix strength and fiber type. *Compos Struct* 2017;174:263–76.
- [124] Banthia N, Yan C. Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices. *Cement Concr Res* 1996;26(5):657–62.
- [125] Bindiganavile V, Banthia N. Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading—part 1: bond—slip response. *ACI Mater J* 2001;98(1):10–6.
- [126] Bindiganavile V, Banthia N. Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading—part 2: flexural toughness. *ACI Mater J* 2001;98(1):17–24.
- [127] Yoo DY, Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete—a review. *Cement Concr Compos* 2019;104:103389.
- [128] Banthia N, Trottier JF. Deformed steel fiber—cementitious matrix bond under impact. *Cement Concr Res* 1991;21(1):158–68.
- [129] Wu Z, Shi C, Khayat KH. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement Concr Compos* 2016;71:97–109.
- [130] Zhang T, Wu H, Fang Q, Huang T, Gong Z, Peng Y. UHP-SFRC panels subjected to aircraft engine impact: experiment and numerical simulation. *Int J Impact Eng* 2017;109:276–92.
- [131] Lubliner J, Olivier J, Oller S, Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *Int J Solids Struct* 1989;25(3):299–326.
- [132] Lu Y, Song Z, Tu Z. Analysis of dynamic response of concrete using a mesoscale model incorporating 3D effects. *Int J Prot Struct* 2010;1(2):197–217.
- [133] Wu C, Li J, Su Y. Development of ultra-high performance concrete against blasts: from materials to structures. Duxford: Woodhead Publication; 2018.
- [134] Yoo DY, Gohil U, Gries T, Yoon YS. Comparative low-velocity impact response of textile-reinforced concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams. *J Compos Mater* 2016;50(17):2421–31.
- [135] Suaris W, Shah SP. Strain-rate effects in fibre-reinforced concrete subjected to impact and impulsive loading. *Composites* 1982;13(2):153–9.
- [136] Mindess S, Banthia NP, Ritter A, Skalny JP. Crack development in cementitious materials under impact loading. In: Mindess S, Shah SP, editors. *MRS Online Proceedings of the Materials Research Society Symposium, Cement Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture*. Cambridge: Cambridge University Press; 1986. p. 217–23.
- [137] Banthia N, Trottier JF. Deformed steel fiber-cementitious matrix bond under impact. *Cement Concr Res* 1991;21(1):158–68.
- [138] Naaman AE, Gopalaratnam VS. Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending. *Int J Cem Compos Lightweight Concr* 1983;5(4):225–33.
- [139] Ong KCG, Basheerkhan M, Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement Concr Compos* 1999;21(5–6):391–401.
- [140] Wang HT, Wang LC. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2013;38:1146–51.
- [141] Banthia N, Gupta P, Yan C. Impact resistance of fiber reinforced wet-mix shotcrete part I: beam tests. *Mater Struct* 1999;32(8):563–70.
- [142] Gupta P, Banthia N, Yan C. Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact. *J Mater Civ Eng* 2000;12(1):81–90.



- [143] Murali G, Santhi AS, Ganesh GM. Impact resistance and strength reliability of fiber reinforced concrete using two parameter Weibull distribution. *ARNP J Eng Appl Sci* 2014;9(4):554–9.
- [144] Comite Euro-International Du Beton. CEB-FIP model code 1990: design code. London: ICE Publishing; 1993.
- [145] Xu Z, Hao H, Li H. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres. *Mater Des* 2012;33:42–55.
- [146] Grote DL, Park SW, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rate and pressure: I. experimental characterization. *Int J Impact Eng* 2001;25(9):869–86.
- [147] Wang S, Zhang M, Quek ST. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading. *Constr Build Mater* 2012;31:1–11.
- [148] Gopalaratnam V, Shah S. Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. *J Am Concr Inst* 1986;83(1):117–26.
- [149] Wang Z, Konietzky H, Huang R. Elastic-plastic-hydrodynamic analysis of crater blasting in steel fiber reinforced concrete. *Theor Appl Fract Mech* 2009;52(2):111–6.
- [150] Wang Z, Liu Y, Shen R. Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression. *Constr Build Mater* 2008;22(5):811–9.
- [151] Rong Z, Sun W, Zhang Y. Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites. *Int J Impact Eng* 2010;37(5):515–20.
- [152] Hannant PJ. Fibre cements and fibre concretes. Report. New York: Wiley; 1978.
- [153] Azmee NM, Shafiq N. Ultra-high performance concrete: from fundamental to applications. *Case Stud Constr Mater* 2018;9:e00197.
- [154] Hao Y, Huang X, Hao H. Mesoscale modelling of concrete reinforced with spiral steel fibres under dynamic splitting tension. *Adv Struct Eng* 2018;21(8):1197–210.
- [155] Ngo T, Mendis P, Krauthammer T. Behavior of ultrahigh-strength prestressed concrete panels subjected to blast loading. *J Struct Eng* 2007;133(11):1582–90.
- [156] Yi NH, Kim JH, Han TS, Cho YG, Lee JH. Blast-resistant characteristics of ultrahigh strength concrete and reactive powder concrete. *Constr Build Mater* 2012;28(1):694–707.
- [157] Aoude H, Dagenais FP, Burrell RP, Saatcioglu M. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading. *Int J Impact Eng* 2015;80:185–202.
- [158] Li Q, Meng H. Pressure-impulse diagram for blast loads based on dimensional analysis and single-degree-of-freedom model. *J Eng Mech* 2002;128(1):87–92.
- [159] Naito CJ, Wheaton KP. Blast assessment of load-bearing reinforced concrete shear walls. *Pract Period Struct Des Constr* 2006;11(2):112–21.
- [160] Luccioni B, Isla F, Codina R, Ambrosini D, Zerbino R, Giaccio G, et al. Experimental and numerical analysis of blast response of high strength fiber reinforced concrete slabs. *Eng Struct* 2018;175:113–22.
- [161] Gingold RA, Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon Not R Astron Soc* 1977;181(3):375–89.