

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.010

# 钢纤维-混凝土基体界面粘结性能数值分析

王力

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 钢纤维混凝土破坏时纤维一般为拔出破坏, 纤维未得到充分利用。为充分发挥钢纤维对混凝土的增强、增韧、阻裂作用, 利用 PFC<sup>3D</sup>建立了不规则粗骨料混凝土离散元模型, 通过控制变量法分析不同参数对钢纤维与混凝土基体间粘结力的影响。研究表明: 粘结层厚度、摩擦系数和钢纤维埋深的增加, 均使得钢纤维与混凝土基体间的粘结力增强; 平行粘结变形模量的增加, 会导致粘结力的降低。为钢纤维混凝土离散元数值模型的建立及参数的选择提供了依据, 为工程应用提供了参考。

**关键词:** PFC; 钢纤维; 混凝土; 纤维拉拔; 粘结力

**中图分类号:** TU528.572

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2019)02-0056-05

## Numerical Analysis of the Bonding Performance of Steel Fiber-Concrete Interface

WANG Li

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Steel fiber is usually pulled out and not fully used when steel fiber concrete is damaged. In order to make the most of the reinforcement of steel fiber, the discrete element model of irregular coarse aggregate concrete was established by PFC<sup>3D</sup>, and the influence of different parameters on the bonding force was analyzed by the method of controlling a single variable to research the bonding performance of steel fiber-concrete matrix interface. The results show that as the thickness of bond layer, friction coefficient and embedding depth of steel fiber increases, the bonding force between steel fiber and concrete matrix increases. The increase of the additional deformability provided by the parallel bond will lead to the decrease of bonding force. This paper is helpful for developing discrete element numerical model of steel fiber concrete and the selecting parameters selection. At the same time, a reference for engineering application was provided as well.

**Keywords:** PFC; steel fiber; concrete; fiber pull-out; bonding force

传统的普通混凝土材料有着抗拉强度低、延性差等弱点, 难以满足复杂的结构形式的需求。在混凝土中掺入钢纤维后, 可以有效控制宏观裂缝, 同时可大幅度提升材料基本力学性能<sup>[1-4]</sup>, 因此, 钢纤维混凝土作为一种高性能混凝土正逐步应用于工程中。钢纤维混凝土在发生开裂时, 裂缝处纤维被拔出, 此时钢纤维的增强潜力并未充分发挥, 研究纤维与混凝土基体间的粘结性能及其影响因素, 进而进行合理的优化设计, 提高钢纤维混凝土力学性能、充分发挥纤维增强效果。

近年来, 各国学者对钢纤维与混凝土基体界面

间的粘结性能从多个角度展开了研究。赵丽军等<sup>[5]</sup>和陈沛然等<sup>[6]</sup>通过单根纤维拉伸试验研究基体强度对粘结性能的影响, 结果表明: 随着基体强度的增大, 最大拉拔力和耗散能有所增强。代超<sup>[7]</sup>利用丁苯乳液和硅灰来对混凝土进行改性处理, 研究了添加剂对钢纤维与混凝土基体间的界面粘结性能的增强效果。王家赫等<sup>[8]</sup>推导了圆直纤维与混凝土基体界面间粘结强度的理论模型并利用试验验证, 预测了峰值拔出荷载与纤维埋置夹角的数值关系。Edmunds Zile 等<sup>[9]</sup>提出了纤维形状对纤维从水泥基体中拔出峰值荷载的理论模型模型。赵燕茹等<sup>[10]</sup>采

用数字图像与试验相结合的方法,测量钢纤维从混凝土基体拔出过程中界面的应变分布及变化规律,并实时观测界面变化,结果表明,微细观尺度上的应变局部化导致了纤维界面剪切破坏的局部化现象,并不断产生、发展和转移。

然而,多数工程上涉及的材料种类及形状多样,无法通过传统的数学和力学方法解决实际问题,随着计算机技术的飞速发展,数值模拟逐渐成为了土木工程领域解决问题不可或缺的手段。现有的混凝土数值分析研究中,大多采用有限元软件,将混凝土等效成一种均匀而连续的材料。实际上,混凝土是一种非均质材料,有限元单元法模型无法在细观尺度上体现骨料的形状以及在基体中的随机分布情况,同时,也不能反映骨料与钢纤维间复杂相互作用,研究手段存在不足。在离散元建模的研究中, Ferelle 等<sup>[11]</sup>通过控制形状精度参数,得出了在合理数量的基本单元的情况下,生成形状和锐度精度较高的复杂单元的方法,该方法可以用于生成混凝土模型。宿辉等<sup>[12]</sup>也利用 PFC 模拟生态混凝土的双轴试验,得到了不同细观参数对混凝土应力和微裂纹的影响关系。

鉴于此,应用离散元方法,通过 PFC 软件模拟钢纤维在混凝土基体中的单根纤维拔出试验,不仅可以精确地模拟纤维和骨料的形状以及在混凝土基体中的随机分布情况,还能有效分析宏观和细观参数对钢纤维与混凝土界面间粘结性能的影响,对以后建立数值模型和参数标定提高参考,具有重要的意义。

## 1 颗粒流数值模拟基础理论

在 PFC 数值建模中,以如下假设为基础<sup>[13]</sup>:

(1) 所有的颗粒单元不会发生变形和破坏,均被视为刚体。

(2) 颗粒间的接触处允许有相对颗粒半径较小的重叠量。

(3) 接触力和颗粒间的重叠量由力 - 位移定律建立联系。

相比连续介质模型不同的是,组成 PFC 模型的基本单元是颗粒单元和墙单元。颗粒单元为圆盘或球体,是组成材料介质的基本单元,可以通过块或簇的构成方式,将多个颗粒组合形成任意形状的组合体。墙单元是生成模型边界条件的单元,不能被施加力的边界条件,只能通过施加速度从而间接达到颗粒的位移和力的边界条件。

PFC 模型中,单元间存在孔隙且可不连续,故颗粒间的运动不需要满足变形协调方程,仅需满足内置的物理方程和平衡方程。整个分析过程中,颗粒单元的运动状态(位置和力)都在时刻发生改变,一方面颗粒单元的接触力通过力 - 位移关系更新,另一方面颗粒单元的位置依据牛顿第二定律更新,以重新调整颗粒间的接触关系,二者交互作用,直至达到平衡状态或者发生破坏无法保持稳定状态,如图 1<sup>[13]</sup>所示。

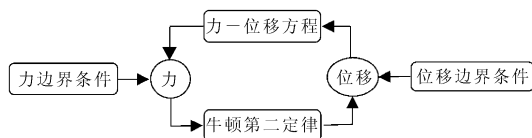


图 1 PFC 迭代过程示意图<sup>[13]</sup>

在 PFC 模型中,由接触模型来反映颗粒之间接触力与相对位移之间的关系,主要分为接触刚度模型、接触滑动模型和粘结模型。其中,粘结模型分为接触粘结模型和平行粘结模型,接触粘结模型仅靠接触点处沿法向和切向的弹簧实现,只能传递力;平行粘结模型通过颗粒间一定截面形状和尺寸的粘结材料将颗粒粘结,该粘结可视作一组有恒定法向刚度和切向刚度的弹簧均匀分布于接触处,可以传递力和弯矩,如图 2 所示。

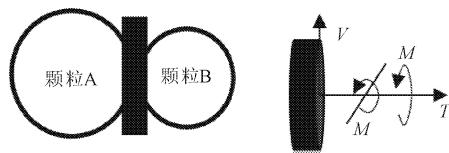


图 2 平行粘结模型示意图

对于混凝土的 PFC 接触模型,一般采用平行粘结模型,颗粒之间被赋予粘结力,当其中任意一个方向的最大应力超过相应的粘结强度时,平行粘结就会发生破坏,相互接触的颗粒发生相对滑动,受摩擦力作用。

## 2 混凝土中钢纤维拔出模型的建立

国内外对钢纤维与混凝土基体间粘结性能的研究方式主要是单根纤维拉拔试验,数值模拟可对试验研究进行重要补充,本文利用 PFC<sup>3D</sup>软件建立混凝土中钢纤维拔出模型,分析了各参数对钢纤维 - 混凝土基体界面间粘结性能产生的影响,为进一步揭示纤维拔出过程中纤维、混凝土基体以及纤维 - 基体界面的破坏和失效全过程奠定基础。

由于圆直形钢纤维形状简单,在拉拔的过程中,

可忽略其锚固作用,只通过化学粘结力和摩擦力与附近区域的混凝土基体发生相互作用。张红州<sup>[14]</sup>研究了纤维在不同厚度基体中拔出的极限载荷,并描绘了基体的应力场等值线分布图,结果表明,纤维的脱粘与拔出,对基体剪应力大小的影响是有限的,随着离开纤维距离的增大,基体应力逐渐减小,因此,在计算纤维从混凝土基体的拉拔过程时,基体尺寸不必取的太大。龙雪<sup>[15]</sup>在研究纤维-基体界面粘结机理时所取基体的尺寸为 15 mm × 10 mm。考虑纤维和石子的直径、软件计算效率以及基体影响范围,计算模型中的混凝土基体选取钢纤维附近 20 mm 范围,并以 Deng 等<sup>[16]</sup>所进行的单根圆直纤维拉拔试验为参考进行建模,步骤如下:

(1) 围绕 40 mm × 40 mm × 50 mm 的区域生成墙单元。

(2) 生成钢纤维长度为 30 mm,直径为 0.72 mm 的钢纤维。

(3) C40 混凝土配合比,生成相应数量的粗骨料单元和水泥砂浆单元以构成混凝土基体。

(4) 赋予颗粒单元间接触计算模型。

(5) 赋予钢纤维恒定速度,进行位移控制加载,同时获取钢纤维所受粘结力-滑移曲线。

PFC 混凝土模型中,粗骨料单元由 531 个基本颗粒单元组合生成,并视为一个整体,粗骨料内部颗粒无相对运动,其三视图如图 3 所示。各介质单元的位置和方向均服从随机分布,单元信息见表 1,其中,颗粒单元密度为我国石子和砂的平均表观密度。生成的钢纤维拉拔模型和钢纤维埋置处的剖面图分别如图 4 和图 5 所示。

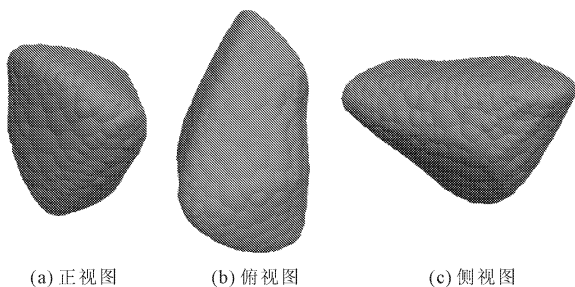


图 3 粗骨料模型

表 1 单元信息

单元类型	等效直径/mm	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积/mm <sup>3</sup>	数量/个	体积分数/%
粗骨料	16.00	2680	2144.66	12	49.28
水泥砂浆	1.60	2660	2.14	12370	50.69
钢纤维	0.72	7800	11.40	1	0.03

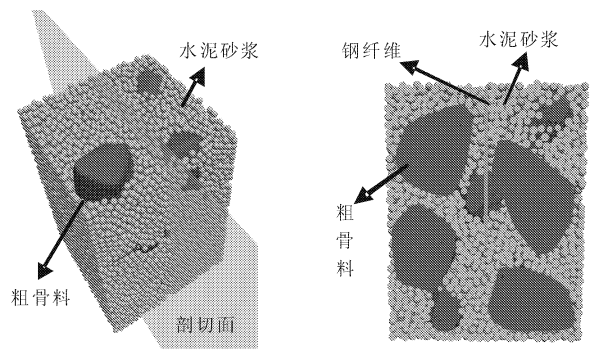


图 4 钢纤维拉拔模型

图 5 模型剖面图

对于混凝土材料的接触计算模型,选用线性平行粘结模型。为防止颗粒单元的接触关系在钢纤维拉拔的过程中随颗粒位置变化而二次生成,采用 Contact method 命令进行接触模型的参数赋值。为研究相关模型参数对钢纤维-基体粘结性能的影响,设置了相关对照组以进行计算和分析,见表 2。

表 2 模型参数

序号	$E_{pl}/\text{MPa}$	$\mu$	$h/\mu\text{m}$	$H/\text{mm}$
1	30	0.250	20	30
2	30	0.250	50	30
3	30	0.250	80	30
4	20	0.250	50	30
5	40	0.250	50	30
6	30	0.100	50	30
7	30	0.175	50	30
8	30	0.250	50	20
9	30	0.250	50	10

注:  $E_{pl}$  为平行粘结变形模量、 $\mu$  为摩擦系数、 $h$  为粘结层厚度、 $H$  为纤维埋置深度。

### 3 离散元参数影响分析

#### 3.1 粘结层厚度影响分析

粘结层厚度反映了允许颗粒单元之间产生粘结作用的最大距离,粘结层厚度分别为 20  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$  及 80  $\mu\text{m}$  时钢纤维与混凝土基体间粘结力与滑移的关系曲线如图 6 所示。

粘结层厚度不同时,纤维与基体的粘结力峰值差异较大,但粘结力峰值所对应的滑移均为 0.11 mm 左右。粘结层厚度为 20  $\mu\text{m}$  时,粘结力峰值为 46.7 N;粘结层厚度为 50  $\mu\text{m}$  时,粘结力峰值为 59.6 N;粘结层厚度为 80  $\mu\text{m}$  时,粘结力峰值为 77.2 N。对比不同粘结层厚度下的钢纤维与基体间的粘结力峰值可见,增加颗粒单元间粘结层厚度,粘结力峰值将提升,而峰值滑移基本无变化。该现象表明,粘结

层厚度增加后, 钢纤维能与附近更多的基体颗粒产生粘结作用, 与混凝土基体脱粘前, 钢纤维的拉拔会受到更大的抵抗, 从而使得钢纤维与混凝土基体间的粘结效应更好, 说明钢纤维混凝土即将发生开裂时, 粘结层厚度越大, 对抵抗混凝土开裂效果越好。

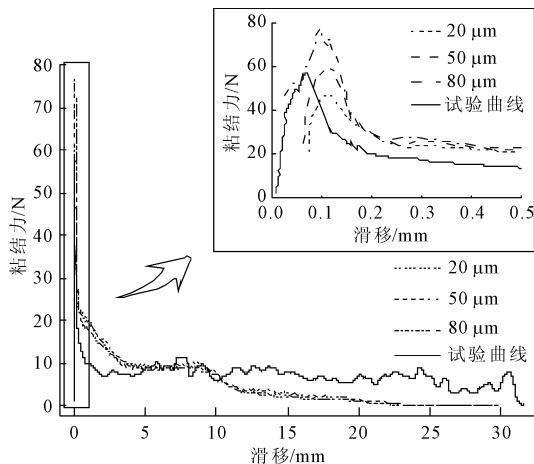


图 6 粘结层厚度对纤维 - 基体粘结性能影响

### 3.2 平行粘结变形模量影响分析

当颗粒间处于粘结状态时, 平行粘结可以抵抗弯矩和力, 一旦粘结处产生的应力达到平行粘结破坏强度时, 平行粘结就会发生破坏, 接触模型将退化为线弹性模型。

平行粘结变形模量分别为 20 MPa、30 MPa 和 40 MPa 时钢纤维与混凝土基体间粘结力与滑移的关系曲线如图 7 所示。

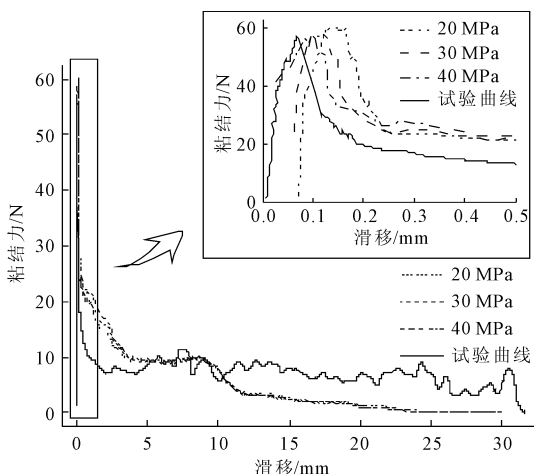


图 7 平行粘结变形模量对纤维 - 基体粘结性能影响

平行粘结变形模量不同时, 纤维与基体的粘结力在滑移为 0~0.3 mm 时差异较大, 粘结力峰值以及对应的滑移也有所差异。平行粘结变形模量为 20 MPa 时, 粘结力峰值为 60.4 N, 对应滑移为 0.145

mm 平行粘结变形模量为 30 MPa 时, 粘结力峰值为 59.6 N, 对应滑移为 0.119 mm; 平行粘结变形模量为 40 MPa 时, 粘结力峰值为 57.0 N, 对应滑移为 0.101 mm。对比可发现, 增大接触模型中的平行粘结变形模量, 粘结力峰值减少, 粘结力峰值也将提前到达, 钢纤维混凝土的脆性增加。

### 3.3 摩擦系数影响分析

在宿辉<sup>[10]</sup>的混凝土 PFC 模型中, 摩擦系数取值范围为 0.01~0.50, 摩擦系数在 0.01~0.10 范围内变化时对模型计算较小, 故在本模型中取摩擦系数分别为 0.100、0.175 和 0.250 进行研究, 钢纤维与混凝土基体间粘结力与滑移的关系曲线如图 8 所示。

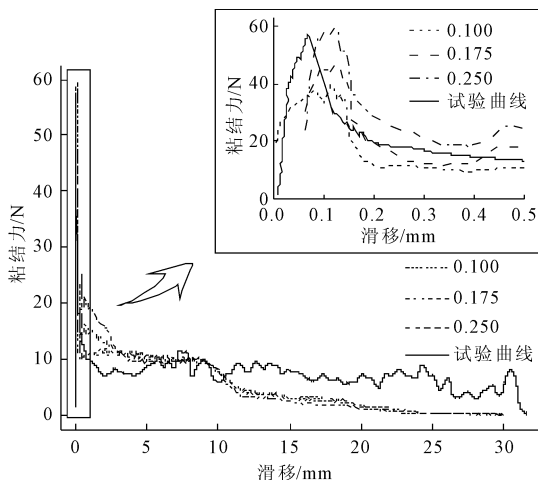


图 8 摩擦系数对纤维 - 基体粘结性能影响

滑移处于 0~3 mm 范围内时, 不同摩擦系数下的粘结力 - 滑移曲线差异较大, 摩擦系数为 0.100 时, 粘结力峰值为 39.5 N; 摩擦系数为 0.175 时, 粘结力峰值为 46.9 N; 摩擦系数为 0.250 时, 粘结力峰值为 59.6 N。粘结力 - 滑移曲线达到峰值后, 粘结力随着钢纤维的拔出而迅速下降, 滑移为 0.5 mm~3.0 mm 范围内时, 在摩擦系数越大的模型中, 钢纤维受到的粘结力越大, 说明摩擦系数对粘结力峰值以及纤维与基体脱粘后的粘结力呈正相关, 摩擦系数越大对混凝土防开裂效果越好。

### 3.4 纤维埋置深度影响分析

埋置深度分别为 10 mm、20 mm 及 30 mm 时钢纤维与混凝土基体间粘结力与滑移的关系曲线如图 9 所示。

对图 9 中曲线进行积分可得钢纤维拔出时消耗的拉拔功, 粘结力峰值除以钢纤维表面积可得粘结强度, 如表 3 所示。

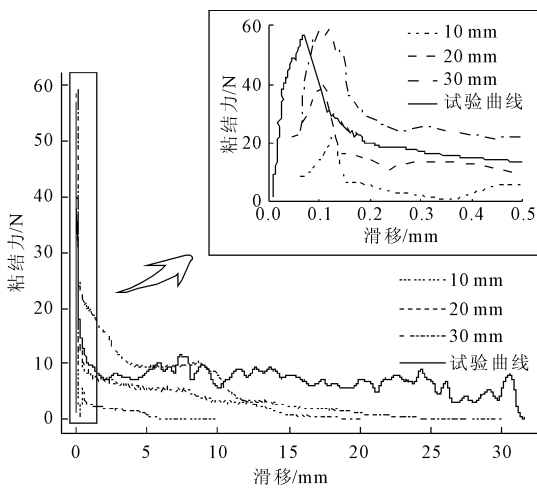


图 9 纤维埋深对纤维 - 基体粘结性能影响

表 3 纤维埋深对纤维 - 基体粘结性能影响

埋置长度/mm	10	20	30
粘结力峰值/N	23.2	40.3	59.6
粘结强度/MPa	1.02	0.89	0.88
拉拔功/J	0.012	0.076	0.154

数据表明,随着钢纤维埋置长度的增大,钢纤维与基体间的粘结力和拉拔功将大幅度增加,拉拔功的增长幅度远远大于纤维埋置长度的增加倍数,但粘结强度稍有降低,总体上粘结性能得到了较大提升,说明钢纤维长度为 10 mm ~ 30 mm 范围时,长度越长,对抵抗混凝土开裂效果越好。

## 4 结 论

本文基于单根钢纤维拔出的 PFC<sup>3D</sup>离散元数值模拟,记录了钢纤维在拔出过程中与混凝土基体间的粘结力,并分析了 PFC<sup>3D</sup>模型中钢纤维与混凝土基体间的粘结力随粘结层厚度、平行粘结变形模量、摩擦系数、纤维埋置深度的变化规律。主要结论如下:

(1) 粘结层厚度的增加,使钢纤维能与附近更多的基体颗粒产生粘结作用,从而使得钢纤维与混凝土基体间的粘结效应更好,对抵抗混凝土开裂有利。

(2) 平行粘结弹性模量的增大,会导致粘结力峰值减少,粘结力峰值的出现呈现提前性,钢纤维混凝土的脆性增加。

(3) 摩擦系数主要影响粘结力 - 滑移曲线的形状和粘结力峰值,随着摩擦系数增大,颗粒之间的相互运动受到抑制,颗粒之间的摩擦力增大,粘结力增加,对抵抗混凝土开裂有利。

(4) 纤维埋置深度在 10 mm ~ 30 mm 内增加,可

以大幅度提升纤维与混凝土间的粘结力及拉拔功,但粘结强度稍有减低,对抵抗混凝土开裂有利。

## 参考文献:

- [1] 吕进. 钢纤维在混凝土中的应用[J]. 金属制品, 2012, 38(1):68-74.
- [2] 姬小祥, 张帆, 邵景干. 不同类型钢纤维混凝土力学性能室内试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5):168-172.
- [3] 张海鹏, 陈猛, 白帅, 等. 层布式混杂纤维混凝土抗压及抗拉性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5):131-135.
- [4] 白敏, 牛获涛, 姜磊, 等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10):2084-2089.
- [5] 赵丽军, 李宁. 异型钢纤维在水泥砂浆基体中的拉拔试验[J]. 露天采矿技术, 2015(9):99-101, 105.
- [6] 陈沛然, 张亚芳, 李根. 基体强度对钢纤维单丝拉拔性能的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(6):68-74, 80.
- [7] 代超. 钢纤维 - 水泥石基体界面特征及对混凝土宏观性能影响的研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [8] 王家赫, 张君, 于蕾, 等. 钢丝与混凝土粘结拔出行为的试验与模拟[J]. 工程力学, 2016, 33(6):202-208.
- [9] Edmunds Zile, Olga Zile. Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 44:18-24.
- [10] 赵燕茹, 邢永明, 黄建永, 等. 数字图像相关方法在纤维混凝土拉拔试验中的应用[J]. 工程力学, 2010, 27(6):169-175.
- [11] Ferrellec J F, McDowell G R. A simple method to create complex particle shapes for DEM[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2008, 3(3):211-216.
- [12] 宿辉, 唐阳, 聂汉江. 基于 PFC2D 不同细观参数对生态混凝土宏观破坏分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 28(14):118-124.
- [13] 石崇. 颗粒流数值模拟技巧与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [14] 张红州. 纤维混凝土界面性能及纤维作用机理研究[D]. 广州:广东工业大学, 2004.
- [15] 龙雪. 钢纤维混凝土纤维拔出的数值模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2014.
- [16] Deng F Q, Ding X X, Chi Y, et al. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling[J]. Composite Structures, 2018, 206:693-712.