【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

加载速率对混凝土双丝拉拔断裂性能的影响

张亚芳, 霍永杰, 卢娟, 段莉斌

广州大学土木工程学院, 广东广州 510006

摘要: 在考虑各相材料细观非均匀性前提下, 利用动力有限元分析软件 RFPA^{3D}-dynamics 建立混凝土双丝拉拔三维动态数值模型, 分析不同加载速率对混凝土双丝拉拔试件断裂性能的影响. 从细观单元的弹性损伤本构关系出发, 得到各试件的损伤破坏全过程图、界面剪应力分布曲线、声发射柱状图、累积声发射数曲线和声发射总能量分析. 结果表明, 不同加载速率下, 混凝土双丝拉拔试件的断裂过程均经历弹性阶段、弹-塑性损伤阶段、界面脱黏阶段和钢纤维拔出阶段. 随着加载速率越大, 试件的裂纹扩展速率越快, 界面剪应力传递也越快, 累积声发射数越大, 声发射总能量越大.

关键词: 混凝土; 加载速率; 双丝拉拔测试; 声发射; 断裂过程; 裂纹扩展

中图分类号: TB333

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.06670

Influence of loading rate on failure property of concrete twin fibers pull-out test

ZHANG Yafang, HUO Yongjie, LU Juan, and DUAN Libin

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Under the premise of considering the mesoscopic heterogeneity of each phase material, we use the dynamic finite element analysis software RFPA^{3D}-dynamics to establish a three-dimensional dynamic numerical model of concrete twin fibers pull-out test and study the effect of different loading rates on fracture performance of concrete twin fibers pull-out specimens. Based on the elastic damage constitutive relation of mesoscopic elements, the failure diagram of the whole process, distribution curve of interfacial shear stress, acoustic emission (AE) histogram, accumulative AE curves and AE energy analysis of each specimen have been obtained. The results show that the fracture process of concrete twin fibers pull-out specimens under different loading rates goes through the following stages: elastic stage, elastic-plastic damage stage, interface debonding stage and steel fiber pull-out stage. The higher the loading rate, the faster the crack propagation and the interfacial shear stress transmission, and the higher the cumulative acoustic emission counts and the total acoustic emission energy.

Key words: concrete; loading rate; twin fibers pull-out test; acoustic emission; failure process; crack propagation

纤维可以限制混凝土开裂后裂缝的扩展, 改善混凝土的抗拉强度, 因而被广泛应用于土木工程中. 纤维与混凝土基体间的界面层性质对纤维混凝土的性能有较大影响^[1]. 在研究纤维混凝土界面特

性的众多试验方法中, 纤维拉拔试验因方法简单、成本低和易行等优点被普遍采用^[2]. 目前研究人员通过拉拔试验对纤维增强混凝土的断裂性能进行了大量研究^[3-5], 但大多局限于(准)静态条件下. 由

Received: 2021-08-23; **Accepted:** 2021-09-28; **Online (CNKI):** 2021-10-28

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878190)

Corresponding author: Professor ZHANG Yafang. E-mail: zhangyafang2004@163.com

Citation: ZHANG Yafang, HUO Yongjie, LU Juan, et al. Influence of loading rate on failure property of concrete twin fibers pull-out test [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(6): 670-676. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

于试验设备和技术的限制,目前动载拉拔实验的文献并不多见,研究动载作用下双丝拉拔的试验更是少见.由于多丝纤维间存在耦合效应,双丝拉拔是多丝纤维混凝土研究的重要基础.加载速率对纤维拉拔混凝土试件的宏观力学性能具有较大的影响.TAI等^[6]研究发现,随着加载速率和倾角的增加,平直光滑型纤维的能量损耗也增加.JANG等^[7]研究发现,直纤维的拉拔性能随加载速率的增大而提高.KIM等^[8]研究了不同加载速率下异型钢纤维在不同的混凝土基体中拔出的行为,将拉拔行为对加载速率的敏感性归因于沿纤维方向的界面开裂.

与静载试验相比,动态拉拔试验历时极短,难以捕捉到试件破坏的全过程,尤其是界面层的损伤破裂过程.数值模拟方法能有效地开展动载作用下细观尺度的纤维拉拔过程和破坏机理研究,是物理试验分析的重要补充.近年来不少学者运用有限元方法尝试对纤维拉拔试验进行数值模拟研究,取得有价值的成果^[9-10].但目前研究大多采用二维数值模型,不能真实反映实际混凝土内部错综复杂的损伤破坏过程^[11].此外,大部分的数值模型基于材料的均匀性假设,忽略了混凝土材料非均匀性这一重要特性.为此,本研究在考虑混凝土材料细观非均匀性的前提下,采用动力有限元分析软件 RFPA^{3D}-dynamics,建立了基于界面控制的混凝土双丝拉拔三维数值模型,探讨了加载速率变化对混凝土双丝拉拔过程力学性能的影响,为纤维混凝土动态破裂机理研究提供参考.

1 基本原理

混凝土材料存在一系列微裂纹,其组分材料的物理力学性能具有随机性.为描述混凝土材料的非均匀性,假定基体、钢纤维以及钢纤维与基体之间界面三相材料细观单元的强度、弹性模量、泊松比和密度等力学参数满足 Weibull 分布,则分布密度函数表达式^[12]为

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中, $f(u)$ 是材料具有某力学性质的细观微元体的概率密度, u 是力学参数值; u_0 是单元参数的一个代表值,与单元参数的平均值相关; m 是各相材料的均质度, m 越小,组成材料的细观单元越不均匀.根据应变等效原理^[13],假定材料损伤状态下的应变本构关系可通过无损材料的名义应力得到,即

$$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} = \frac{\sigma}{E^*} \quad (2)$$

其中, ε 是损伤弹性应变; σ^* 是有效应力; E 是材料初始弹性模量; σ 是名义应力; E^* 是材料损伤后的弹性模量; D 为损伤变量, $D=0$ 对应无损伤状态, $D=1$ 对应完全损伤(破坏或断裂)状态, $0<D<1$ 对应不同程度的损伤状态.

有限元软件 RFPA^{3D}-Dynamics 把细观单元的损伤分为拉伸损伤和剪切损伤两种,细观单元的破坏准则使用考虑拉伸截断的摩尔-库伦准则^[14].

2 数值模型与参数

图1为混凝土双丝拉拔的三维数值模型.基体尺寸为50 mm×40 mm×40 mm,界面厚度为0.5 mm,钢纤维直径为2 mm,埋深30 mm,双丝中心距为8 mm.有限元网格单元尺寸为0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm.表1为材料的部分参数赋值,取值参考文献[15].

图1 数值模拟模型(单位:mm)
Fig.1 (Color online) Numerical simulation model
(unit:mm)

表1 数值模型力学参数¹⁾
Table 1 Mechanical parameters of numerical model

材料相	弹性模量/MPa	极限抗压强度/MPa	泊松比
基 体	2 0400 (3)	15 (3)	0.25 (100)
界 面	4 000 (10)	10 (10)	0.25 (100)
钢纤维	210 000(50)	1 000(50)	0.3(100)

¹⁾ 括号中数据表示材料的均质度,数值越大表示材料分布越均匀

采用三角形应力波加载,总加载时长为300 μs,时间步长取1 μs/步,总加载300步.图2为不同加载速率的加载曲线,加载速率依次为0.100、

0.050、0.033、0.025 和 0.020 MPa/ μs , 加载峰值均为 5 MPa. 为方便描述, 将上述加载速率从高到低的各试件依次命名为 P1、P2、P3、P4 和 P5.

图 2 加载曲线
Fig. 2 Loading curves

3 数值模拟结果与讨论

3.1 破坏过程

图 3 为不同加载速率下双丝拉拔试件主应力 σ_1

的演化过程图. 篇幅所限, 选择试件 P1、P3 和 P5 进行分析. 图 3 (a) 为试件 P1 的破坏过程图. 在加载初期 ($t = 6 \mu\text{s}$), 应力波沿双丝顶端传至埋入端 (钢纤维外露处), 埋入端附近的基体单元首先出现损伤. 在应力波不断往纤维纵深方向传递过程中, 界面脱黏方向与应力波传递方向一致. 当应力波传至纤维埋深 2/3 处时 ($t = 35 \mu\text{s}$), 埋置端 (钢纤维嵌入基体处) 界面单元开始出现损伤. 由于加载速率较快, 应力波迅速传至纤维埋置端, 在 $t = 38 \mu\text{s}$ 时, 界面完全脱黏, 埋置端开始形成空腔. 加载后期, 钢纤维被拔出, 直至试件失去拉拔承载能力 ($t = 236 \mu\text{s}$). 图 3 (b) 为试件 P3 的破坏过程图. 在加载初期 ($t = 25 \mu\text{s}$), 埋入端附近的界面最先发生损伤. 在 $t = 52 \mu\text{s}$ 时, 埋置端附近界面开始脱黏. 在 $t = 87 \mu\text{s}$ 时, 界面单元破坏完全, 双丝开始产生较大位移, 直至加载后期 ($t = 290 \mu\text{s}$), 双丝从基体中被拔出, 埋置端出现较大空腔. 图 3 (c) 为试件 P5 的破坏过程图. 与试件 P1 和试件 P3 相比, 加载速率的降低使纤维埋入端界面单元损伤开始的时间后延 ($t = 33 \mu\text{s}$). 在 $t = 68 \mu\text{s}$ 时, 试件损

图 3 不同加载速率下试件的应力演化过程

Fig. 3 (Color online) Stress evolution process of specimens under different loading rates

伤在纤维埋置端附近界面萌生. 界面裂纹扩展的方向从埋入端和埋置端往纤维中部延伸, 且扩展速度较慢. 在此期间, 双丝附近的混凝土基体同样发生了局部破坏. 当应力波传播至纤维埋置端 ($t = 136 \mu\text{s}$) 时, 埋置端应力集中现象较为明显. 直至加载结束 ($t = 300 \mu\text{s}$), 双丝被拔出.

根据以上分析可知, 各试件都经历了4个阶段: ① 弹性阶段, 此阶段历时较短, 各单元均未发生损伤; ② 弹-塑性损伤阶段, 此阶段纤维埋入端附近的界面单元开始出现损伤; ③ 界面脱黏阶段, 此阶段裂缝沿钢纤维纵向扩展, 界面由局部脱黏演化为完全脱黏; ④ 钢纤维拔出阶段, 此阶段界面单元已完全破坏, 纤维埋置端形成空腔, 双丝逐渐从混凝土基体中被拔出. ZHOU 等^[16]采用应力降理论, 将纤维拔出过程分为线性阶段至起始脱黏、部分脱黏至最大脱黏、最大脱黏至完全脱黏和界面摩擦4个阶段, 与本研究双丝拉拔破坏过程的4个阶段一一对应. 通过对比不同加载速率下双丝拉拔试件的破坏过程可知, 试件的破坏行为对加载速率具有敏感性, 加载速率越大, 双丝拉拔试件对应力波的响应时间越短, 界面裂纹扩展的速率越快.

3.2 界面剪应力

为探讨不同加载速率对混凝土双丝拉拔试件界面剪应力传递机制的影响, 对基体与钢纤维之间的界面单元进行信息提取, 得到不同加载速率下拉拔试件沿埋深方向的界面剪应力分布情况. 图4为 $t = 30 \mu\text{s}$ 时试件 P1 和试件 P5 的界面剪应力分布曲线, 分别选取试件 P1 和 P5 的1号钢纤维进行分析, 以左侧界面为外侧, 右侧界面为内侧. 可以看到, 在 $t = 30 \mu\text{s}$ 时, 试件 P1 的界面剪应力峰值出现在埋深的1/2处, 而试件 P5 的界面剪应力峰值出现在埋入端, 表明低加载速率下界面剪应力传递明显缓慢. 经计算, 试件 P1 的界面内侧剪应力峰值为外侧的76.3%, 试件 P5 的界面内侧剪应力峰值为外侧的53.7%, 这表明加载速率越低, 纤维内外侧剪应力峰值差异越大. 此外, 从图4(a)和图4(b)均可看出, 双丝内侧界面剪应力峰值小于外侧, 这与文献[17]的研究结果相吻合.

当双丝距离较近时, 纤维内侧界面剪应力的传递受到耦合效应的影响, 双丝间基体也发生协同效应. 试件 P1 和 P5 在 $t = 10 \mu\text{s}$ 时主应力 σ_1 的分布见图5. 从图5可见, 因为耦合效应影响, 双丝内侧界面应力及双丝间基体的应力分布都存在明显差异, 双丝内侧界面的应力值比外侧小; 双丝间基体

图4 界面剪应力分布曲线 ($t = 300 \mu\text{s}$)

Fig. 4 Interfacial shear stress distribution curves ($t = 300 \mu\text{s}$)

应力条纹呈水平分布, 而外侧应力条纹呈辐射状发散向外, 这种现象与静载作用下双丝拉拔的研究结果吻合^[18].

图5 不同加载速率下试件的主应力图 ($t = 10 \mu\text{s}$)

Fig. 5 (Color online) Principle stress diagram of specimens under different loading rates ($t = 10 \mu\text{s}$)

3.3 声发射行为

材料或构件在受力过程中产生变形或裂纹时, 以弹性波形式释放出应变能的现象, 称为声发射 (acoustic emission, AE)^[19]. 研究表明, 脆性材料的声发射与其内部微裂纹的产生直接相关, 混凝土的损伤量、声发射与损伤破坏单元数成正比^[20].

图6为试件 P1 至 P5 的声发射柱状图. 由图6

图 6 不同加载速率试件的声发射柱状图
Fig. 6 Acoustic emission histogram of specimens with different loading rates

可见, 不同加载速率下双丝拉拔试件的声发射柱状图的变化趋势相似, 均出现一个明显的峰值. 在弹性阶段, 各试件中未产生破坏单元, 故无相应的声发射记录. 随着界面单元发生损伤, 试件开始产生声发射. 加载速率越大, 单元首次出现损伤的时间越早, 即弹性阶段越短. 同时, 加载速率越高, 试件达到声发射数峰值的时间越早, 声发射数峰值越大.

表 2 为根据图 6 得到的在不同加载速率下, 试件单元开始出现破坏的时间及声发射峰值. 由表 2 可知, 加载速率较低时, 试件首次出现破坏单元的时间延后, 这表明在较低加载速率下纤维对基体的增韧效果较明显, 这与文献[21]的研究结论一致. 此外, 随着加载速率的降低, 声发射数峰值显著降低, 试件 P5 的声发射数峰值仅为试件 P1 的 45.8%, 表明试件在低加载速率下损伤破坏程度较低.

表 2 不同加载速率下单元开始破坏时间及声发射峰值
Table 2 Element damage initiation time and acoustic emission peak under different loading rates

试件	加载速率/ (MPa·μs ⁻¹)	单元开始 破坏时间/μs	AE 峰值 时间/μs	AE 峰值
P1	0.100	6	36	306
P2	0.050	13	53	231
P3	0.033	13	85	225
P4	0.025	26	109	162
P5	0.020	33	131	140

图 7 为不同加载速率下各试件累积声发射数曲线. 由图 7 可知, 加载初期(0 ~ 150 μs)各试件的累积声发射数均随加载时间呈非线性增长, 随后出现平台段. 加载速率越大, 曲线出现平台段的时间越

图 7 不同加载速率下试件的累积声发射数曲线
Fig. 7 Accumulative acoustic emission curves with different loading rates

提前. 在加载后期(150~300 μs), 声发射产生的主要原因是双丝间的混凝土基体发生局部破裂, 表现为声发射数趋于稳定后缓慢增加.

研究表明, 试件声发射能量释放率与材料损伤单元弹性应变能的释放成正比关系^[22]. 表3为不同加载速率下试件的声发射总能量. 不同加载速率下试件的声发射总能量差异较大, 试件P1的声发射总能量为2 908.1 J, 试件P5的声发射总能量为177.3 J, 仅仅是试件P1的6%, 表明加载速率越大, 试件破坏过程中释放的能量越少, 声发射总能量越小, 文献[23]认为, 加载速率较低时, 钢纤维和混凝土的抗拉强度降低, 同时塑性变形能力较高. 而在高加载速率下, 纤维拔出速度较快, 钢纤维混凝土裂纹来不及开展, 导致黏结强度提升, 耗能也提升. 本研究结果与文献[23]的研究结论一致.

表3 不同加载速率下试件的声发射总能量
Table 3 Total acoustic emission energy with different loading rates

试件	加载速率/(MPa· μs^{-1})	声发射总能量/J
P1	0.100	2 908.1
P2	0.050	2 611.3
P3	0.033	1 919.1
P4	0.025	583.8
P5	0.020	177.3

4 结 论

在考虑混凝土材料细观非均匀分布的前提下, 建立了混凝土动载条件下的双丝拉拔三维数值模型, 分析了加载速率变化对混凝土双丝拉拔试件破坏过程的影响, 可知:

1) 不同加载速率下混凝土双丝拉拔试件的破坏过程均经历4个阶段. 加载速率越大, 混凝土双丝拉拔试件对应力波的响应时间越短, 界面裂纹扩展越快.

2) 加载速率对双丝拉拔试件界面剪应力分布及传递影响显著. 高加载速率下试件界面剪应力传递更迅速, 纤维内外侧剪应力峰值差异更小.

3) 加载速率越大, 双丝拉拔试件的损伤破坏程度越明显, 累积声发射数越多, 声发射总能量越大.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878190)

作者简介: 张亚芳(1966—), 广州大学教授. 研究方向: 纤维增强混凝土细观力学性能. E-mail: zhangyafang2004@163.com

引文: 张亚芳, 霍永杰, 卢娟, 等. 加载速率对混凝土双丝拉拔断裂性能的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(6): 670-676.

参考文献 / References:

- [1] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
WU Renjie. Composite materials [J]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 董振英, 李庆斌. 纤维增强脆性复合材料细观力学若干进展[J]. 力学进展, 2001(4): 555-582.
DONG Zhenying, LI Qingbin. Advances in mesomechanics of fiber-reinforced brittle composites [J]. Advances in Mechanics, 2001(4): 555-582. (in Chinese)
- [3] WILLE K, NAAMAN A E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete [J]. Materials Journal, 2012, 109(4): 479-487.
- [4] ABU-LEBDEH T, HAMOUSH S, ZORNIG B. Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete [J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3(2): 454-463.
- [5] 赵一鹤, 孙振平, 穆帆远, 等. 钢纤维对UHPC拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 276-282.
ZHAO Yihe, SUN Zhenping, MU Fanyuan, et al. Effect of steel fibers on tensile properties of ultra-high performance concrete and its pullout behavior [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 276-282. (in Chinese)
- [6] TAI Y S, EI-TAWIL S. High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 204-218.
- [7] JANG E Y, KIM J J, YOO D Y. Dynamic pullout behavior of multiple steel fibers in UHPC: effects of fiber geometry, inclination angle, and loading rate [J]. Materials, 2019, 12(20).
- [8] KIM D J, EI-TAWIL S, NAAMAN A E. Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers [J]. ACI Material Journal, 2008, 105(6): 576-584.
- [9] 李 革, 艾智丹, 李 彦. 纤维混凝土二维细观结构中骨料与纤维随机投放的数值模拟 [J]. 内蒙古农业

- 大学学报自然科学版, 2015, 36(6): 101-104.
- LI Ge, AI Zhidan, LI Yan. Numerical simulation for random emarking of aggregate and fiber with two-dimensional meso-structure of fiber concrete [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University Natural Science, 2015, 36(6): 101-104. (in Chinese)
- [10] 张亚芳, 郭中祥, 刘浩, 等. 钢纤维对双丝拉拔试件动态破裂性能的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(2): 136-143.
- ZHANG Yafang, GUO Zhongxiang, LIU Hao, et al. Influence of steel fiber on dynamic failure property of twin fibers pull-out specimens [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 136-143. (in Chinese)
- [11] 杜修力, 金浏. 非均质混凝土材料破坏的三维细观数值模拟[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 82-88.
- DU Xiuli, JIN Liu. Numerical simulation of three-dimensional meso-mechanical model for damage process of heterogeneous concrete [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 82-88. (in Chinese)
- [12] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293-297.
- [13] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233-245.
- [14] 贾善坡, 陈卫忠, 杨建平, 等. 基于修正 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性本构模型及其数值实施[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2051-2058.
- JIA Shanpo, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2051-2058. (in Chinese)
- [15] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂: 数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- TANG Chunan, ZHU Wancheng. Concrete damage and fracture; numerical tests [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [16] ZHOU Limin, KIM J K, MAI Y W. Interfacial debonding and fibre pull-out stresses [J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(12): 3155-3166.
- [17] 张亚芳, 罗斐化, 刘浩, 等. 动荷载下间距对混凝土双丝拉拔性能的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(5): 453-459.
- ZHANG Yafang, LUO Feihua, LIU Hao, et al. Influence of spacing on twin fibers pull-out test of concrete matrix under dynamic load [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(5): 453-459. (in Chinese)
- [18] 曾向荣. 间距和埋深对双丝拉拔过程影响的细观力学研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.
- ZENG Xiangrong. Meso-mechanics influence in spacing and embedded length of twin fibers pullout test [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016. (in Chinese)
- [19] 黄展鸿, 黄春芳, 张鉴炜, 等. 声发射技术在纤维增强复合材料损伤检测和破坏过程分析中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7): 1122-1128.
- HUANG Zhanhong, HUANG Chunfang, ZHANG Jianwei, et al. Acoustic emission technique for damage detection and failure process determination if fiber-reinforced polymer composites: an application review [J]. Materials Reports, 2018, 32(7): 1122-1128. (in Chinese)
- [20] 张钟毓, 牛睿, 程广利, 等. 岩石声发射特征参数研究现状与展望[J]. 河南科技, 2021, 40(1): 141-143.
- ZHANG Zhongyu, NIU Rui, CHENG Guangli, et al. Research status and prospect of acoustic emission characteristic parameters of rocks [J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(1): 141-143. (in Chinese)
- [21] 罗斐化. 动荷载下间距及基体强度对双丝拉拔性能影响的细观数值研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- LUO Feihua. Mesoscopic simulation study of the influence of spacing and matrix strength of twin fibers pullout test under dynamic load [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [22] WANG Qingsong, CHEN Jianxun, GUO Jiaqi, et al. Strain rate effect on acoustic emission characteristics and energy mechanisms of karst limestone under uniaxial compression [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(1): 1-13.
- [23] XU Man, HALLINAN B, WILLE K. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 70: 98-109.

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之隼】