【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

钢纤维对双丝拉拔试件动态破裂性能的影响

张亚芳¹, 郭中祥¹, 刘浩^{1,2}, 何娟¹, 卢娟¹

1) 广州大学土木工程学院, 广东广州 510006; 2) 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东深圳 518029

摘要: 采用 RFPA^{2D}-dynamics 软件, 考虑各相材料的细观非均匀分布, 建立双丝拉拔动态数值模型, 研究动荷载作用下钢纤维体积分数变化对双丝拉拔试件力学性能的影响. 从细观单元的弹性损伤本构关系出发, 分析不同钢纤维体积分数试件从微裂纹萌生、扩展直至贯通的动态拉拔破坏过程, 得到不同钢纤维体积分数试件的荷载-位移曲线和声发射累积能量曲线. 结果表明, 在动载作用下, 钢纤维体积分数变化对试件破坏模式影响较大. 随着钢纤维体积分数的增加, 试件的耗能水平先增加后降低. 钢纤维体积分数为 1.6% 时, 试件的耗能水平最高, 是素混凝土试件的 1.36 倍.

关键词: 混凝土; 钢纤维; 双丝拉拔; 声发射; 动态破坏过程; 微裂纹

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.02136

Influence of steel fiber on dynamic failure property of twin fibers pull-out specimens

ZHANG Yafang¹, GUO Zhongxiang¹, LIU Hao^{1,2}, HE Juan¹, and LU Juan¹

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

2) Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Shenzhen 518029, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: By using the realistic failure process analysis RFPA^{2D}-dynamics software, we establish a dynamic numerical model for twin fibers pull-out test. The microscopic non-uniformity of mechanical properties of concrete materials in different phases is accepted to study the influence of steel fiber volume content under dynamic load on mechanical properties. According to the elastic damage constitutive relationship of the meso-element, the dynamic tensile failure process of specimens with various steel fiber volume content, from micro-cracks initiation, propagation to crack penetration, is studied in details. Furthermore, curves of load-displacement and acoustic emission cumulative energy could also be obtained. The results show that variation of steel fiber volume content has significant influence on the failure pattern of the specimen under dynamic load. With the increase of steel fiber volume fraction, the energy consumption level of specimens first increases and then decreases. When the steel fiber volume fraction is 1.6%, the energy consumption reaches the highest, which is about 1.36 times of that of the plain concrete specimens.

Key words: concrete; steel fiber; twin fibers pull-out; acoustic emission; dynamic damage process; micro-crack

Received: 2020-10-28; **Accepted:** 2020-12-19

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51678170, 51878190)

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

Citation: 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)

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

混凝土是应用最广、用量最多的建筑材料,但抗拉强度低、脆性大、易开裂,如何提高混凝土的力学性能一直是学者们研究的重点.在混凝土基体中掺入非连续随机离散的钢纤维,可以提高基体的抗裂性、韧性、强度、抗冲击性和其他工程性能,因此得到较为广泛的研究与应用^[1].

钢纤维混凝土是在普通混凝土中掺入乱向分布的钢纤维后形成的一种新型多相复合材料^[2].钢纤维混凝土与钢筋的黏结效果是结构形成整体和共同工作的基础.研究表明,钢纤维对混凝土起到阻裂、增强和增韧作用的同时,钢筋与钢纤维混凝土的黏结性能也得到了较大的提高^[3-5].基体内钢纤维掺量的变化对试件的破坏形式、延性、韧性和能量吸收能力影响显著^[6-8].KAKEA等^[9]对6组不同的高性能纤维混凝土试件进行研究,发现纤维增强试件的耗能水平远高于素混凝土试件.WANG等^[10]研究了钢纤维掺量对轻骨料混凝土抗冲击性能的影响,指出加入一定量的钢纤维,可以提高基体的抗冲击性能.延潇等^[11]通过中心拉拔试验,研究了钢纤维体积掺量对混凝土与变形钢筋之间黏结性能的影响机理,认为钢纤维的加入提高了混凝土和钢筋之间的黏结性能及混凝土抗裂缝发展的能力.GNEYISI等^[12]通过直接拔出试验可知,在轻骨料混凝土中掺入钢纤维可提高试件的黏结强度及破坏时的延性.钢纤维混凝土在破坏时有两种形态,一种是钢纤维拔出破坏,一种是钢纤维拔断破坏^[13].

动荷载作用下钢纤维体积掺量对双丝拉拔的影响机制比较复杂,该领域的研究成果极为少见.本研究从材料细观非均匀角度出发,利用 RFPA^{2D}-dynamics 软件,探究钢纤维随机掺量变化对动态双丝拉拔过程的影响.

1 理论分析

本研究从细观角度,分别考虑钢丝(双丝)、水泥基体、钢纤维与双丝界面四相材料的非均匀分布,引入 Weibull 统计分布函数描述各相材料物理力学性质的非均匀性,分布密度函数^[14]为

$$\varphi(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中, m 为材料的均质度,均质度越高,材料越均匀; x 为满足该分布函数(强度、弹性模量和泊松比等)的参数; x_0 是一个与所有单元参数平均值有关的参数,但其数值并不是平均值.

在外界荷载作用下,当单元的应力或应变满足某个破坏准则时,单元开始现损伤. RFPA^{2D}-dynamics 软件以摩尔-库伦准则来判断单元是否发生损伤^[15].当细观单元的最大拉应力满足式(2)时,单元将出现拉伸破坏.

$$\sigma_1 \geq \sigma_t \quad (2)$$

其中, σ_1 为最大主应力; σ_t 为材料的极限拉应力.

当单元最大拉应力没有达到极限拉应力,但细观单元的应力状态满足式(3)时,单元将出现剪切损伤破坏.

$$\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_c \quad (3)$$

其中, φ 为单元的摩擦角; σ_3 为最小主应力; σ_c 为材料的极限抗压强度值.式(3)中,最大拉应力准则具有优先权.

2 建立数值模型

图1为双丝拉拔混凝土基体数值模型.定义左侧钢丝为1号,右侧钢丝为2号,双丝间距为10 mm,埋深为20 mm.模型基体尺寸为40 mm × 40 mm,钢丝直径为0.75 mm,界面尺寸为20.000 mm × 0.125 mm.试件划分为320 × 320 = 102 400个单元.因为工程上钢纤维体积分数普遍在0 ~ 2%,超过2%则基体中的钢纤维易团聚^[16],拌和料的和易性变差,施工困难,所以本实验取钢纤维的体积分数分别为0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%和2.0%.为方便讨论,试样依次标号为SF1、SF2、SF3、SF4、SF5和SF6.

图1 数值模拟模型简图

Fig. 1 (Color online) Sketch of numerical model

双丝拉拔混凝土试件各相材料的宏观力学参数及均质度见表1^[15],动态加载曲线见图2.其中, t 为加载时长;总加载时长为25 μ s;应力峰值为48

MPa; 应力波抬升时间为 $10\ \mu\text{s}$; 加载速率为 $4.8\ \text{MPa}/\mu\text{s}$; 时间步长为 $0.1\ \mu\text{s}$; 总加载 250 步。

表 1 各相材料宏观力学参数及均质度^{[15][1]}

Table 1 Macroscopic mechanical parameters and homogeneity of materials

组分	弹性模量/GPa	极限抗拉强度/MPa	泊松比
混凝土	20.4(3.0)	3.2(3.0)	0.25(100.0)
界面	3.5(1.5)	0.6(1.5)	0.25(100.0)
钢丝	210.0(15.0)	1 000.0(15.0)	0.30(100.0)
钢纤维	210.0(15.0)	1 000.0(15.0)	0.30(100.0)

¹⁾ 括号内数值为材料的均质度

图 2 双丝拉拔混凝土试件动态加载曲线

Fig. 2 Dynamic loading curve of twin fibers pull-out concrete specimen

3 数值模拟分析

3.1 不同钢纤维体积分数下试件的破坏过程

因篇幅所限, 图 3 仅列出动载作用下 SF1、SF3 和 SF5 试件的拉拔破坏过程。在双丝顶部施加三角形冲击荷载时, 双丝内的应力波通过界面以圆弧状在混凝土基体内扩散。试件中越亮的区域表示该处的拉应力作用越大。加载结束后, 由于基体内部还存在残余应力, 基体中光亮处的应力波纹未完全消失, 这与文献[17]的描述一致。

图 3 (a) 为素混凝土试件 SF1 的破坏过程图。在加载初期, 双丝埋入端 (钢丝外露处) 附近界面首先出现损伤单元。随着动荷载不断输入, 界面处的裂纹沿纵深方向扩展至距埋置端 $1/3$ 处, 并出现钢丝左右界面脱黏不对称现象。应力传递至双丝埋置端时, 出现应力集中现象, 埋置端界面脱黏, 形成空腔。加载至末期时, 双丝埋置端左右界面未脱黏, 界面层仍继续传递应力至基体, 并各自沿横向

萌生出裂纹, 不断向两侧发展形成主裂纹, 横跨大部分基体并贯通双丝埋置端。试件的破坏模式为主裂纹引起的基体失稳脆性横断破坏。

图 3 (b) 和图 3 (c) 分别为试件 SF3 和 SF5 的破坏过程图。钢纤维体积分数变化对加载初期试件的破坏模式影响不大。加载后期, 钢纤维体积分数的增加对双丝界面和基体内部裂纹的发展路径影响较大。双丝内侧界面单元损伤较少, 外侧界面单元损伤较多, 双丝界面出现局部脱黏。至加载结束, 钢纤维混凝土基体内的破坏形式不再是一条横向贯通的主裂纹, 而是沿钢纤维分布方向发生偏折, 朝着能量消耗最小的路径发展, 这与文献[18]中在静载作用下掺加玻璃纤维试件时裂纹的扩展现象一致。由于钢纤维的桥联作用, 随着纤维掺量的增加, 延缓了裂纹的扩展, 裂纹破坏路径更加曲折, 基体内产生多条相对细小的裂纹, 增强了基体的耐久性, 与文献[19]的分析结果一致。从试件 SF3 和 SF5 的破坏过程可以看到, 最大拉应力主要集中在裂纹扩展方向上的纤维和裂纹尖端处。试件破坏模式为基体内纤维桥联以及裂纹沿纤维的偏折, 双丝未拔出, 基体中出现多条细小的裂纹, 由双丝-钢纤维-基体共同承受外荷载的作用。综上所述, 在基体中加入钢纤维能够切实改善并显著提高试件的应力水平, 确保双丝拉拔试件具有更好的能量耗散模式, 这与文献[20]的研究结果相似。

图 4 为动载作用下不同钢纤维体积分数双丝拉拔试件的荷载-位移曲线。结合图 3 可见, 应力波由钢丝经过界面层传递到基体内需要一定时间, 在此阶段基体内的纤维并未发挥作用, 所以钢纤维体积分数对峰值荷载前准弹性阶段 (OA 段) 的影响较小。同时可以看到, 动载下纤维掺量对试件峰值荷载的影响不大, 各试件的峰值荷载变化很小。纤维掺量变化主要对试件达到峰值荷载后的劣化阶段有较大影响。

图 4 中 AB 段为拉拔试件双丝埋置端两侧开始出现裂纹阶段时试件的位移变化, BC 段为双丝间裂纹逐渐贯通埋置端阶段试件的位移变化, CD 段为双丝外侧裂纹发展过程试件的位移变化。由图 4 可见, 峰值荷载后荷载-位移曲线出现了“内凹”和“振动回弹”现象, 与文献[21]中得到的冲击荷载下花岗岩出现的现象相似。随着纤维掺量的增加, 试件破坏程度减小, 弹性变形逐渐恢复, “内凹”现象逐渐消失, 而“振动回弹”现象越来越明显, 即试件残余位移逐渐减小。

图 3 不同钢纤维体积分数时双丝拉拔试件的破坏过程及应力变化

Fig. 3 Failure process and stress evolution of twin fibers pull-out specimens with various steel fiber volume content

图 4 不同钢纤维体积分数时试件的荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curves of specimens with various steel fiber volume content

3.2 声发射行为分析

文献[22]指出，复合材料任何结构的突变，如基体开裂、纤维断裂和快速脱黏，都会导致能量以弹性应力波的形式从源点向各个方向传播，形成弹性应力波损耗，即声发射(acoustic emission, AE)现象. 图 5 为不同纤维体积分数下双丝拉拔试件声发射演化过程图. 其中，圆圈代表此处有单元损伤产生声发射，圆圈的大小代表单元损伤声发射释放能量的高低. 由图 5 可知，试件 SF1、SF3 和 SF5 中产生声发射的区域即是单元损伤形成微裂纹和扩展的区域. 在埋置端出现声发射前，纤维掺量的变化对双丝拉拔试件产生的声发射影响较小. 随着应力波的不断输入，在双丝埋置端出现声发射时 ($t = 16.8 \mu s$)，试件 SF3 和 SF5 的双丝埋置端声发射直

图 5 不同钢纤维体积分数时双丝拉拔试件的声发射演化过程

Fig. 5 (Color online) Acoustic emission evolution of twin fibers pull-out specimens with various steel fiber volume content

径比试件 SF1 小, 且数量较少. 加载结束时 ($t = 25.0 \mu\text{s}$), 试件 SF1 双丝左右界面发生大量声发射, 但双丝左右界面声发射并未贯通至埋置端. 试件 SF3 和 SF5 双丝界面声发射主要发生在双丝外侧, 且贯通至埋置端.

随着钢纤维体积分数的增加, 双丝拉拔试件埋置端和基体内声发射演化路径有明显区别. SF1 基体内有一条连接双丝埋置端并且沿双丝外侧扩展的声发射带. 试件 SF3 和 SF5 的基体内声发射行为比试件 SF1 更复杂. 因为钢纤维的桥联作用, 试件 SF3 和 SF5 的声发射主要集中在双丝两侧界面和钢纤维边缘处, 基体内部出现多条比试件 SF1 短的声

发射带和零星声发射集中区域. 综上可知, 随着钢纤维体积分数的增加, 基体内部产生更多分支裂纹, 这意味着在较高的钢纤维体积分数下, 损伤过程需要产生更多的声发射(能量)才能达到贯通破坏, 这与赵庆新等^[23]的研究结果一致.

图 6 为试件 SF1、SF3 和 SF5 的声发射柱状图. 由图 6 可见, 随着钢纤维体积分数增加, 声发射柱状图峰值逐渐延后, 且峰值区域面积增大. 试件 SF1 在 $t = 17.4 \mu\text{s}$ 处出现的峰值声发射数为 34, 试件 SF3 在 $t = 19.0 \mu\text{s}$ 处出现的峰值声发射数为 33, 试件 SF5 在 $t = 21.1 \mu\text{s}$ 处出现的峰值声发射数为 31. 说明随钢纤维体积分数增加, 试件峰值声发射

图6 不同钢纤维体积分数时双丝拉拔试件声发射柱状图

Fig. 6 Acoustic emission histogram of specimens with various steel fiber volume content

数出现的时间越晚,峰值声发射数也越小.由此可知,随着纤维掺量的增加,试件峰值单元损伤的时间推迟,从而减缓了裂纹扩展速度,提高了试件的耐久性,这与SUN等^[24]的研究结果相似.

图7为动荷载下纤维混凝土试件的耗能曲线.由图7(a)可见,动载作用下不同钢纤维体积分数试件的声发射累积能量曲线呈先上升后平缓的趋势.当钢纤维体积分数低于1.6%时,随着钢纤维体积分数的增加,平台转折点A逐渐抬升,转折点出现时间延后,同时AB平台段的时间逐渐变短.

由图7(b)可知,随着钢纤维体积分数增加,

声发射总能量呈先增后减趋势,钢纤维体积分数为1.6%时,耗能水平最高,是素混凝土基体的1.36倍.结合图3和图5可知,钢纤维的掺入有效阻碍了主裂纹的扩展,这与文献[25]的研究结果相似.文献[26]指出,混凝土材料的破坏是由裂纹的萌生和扩展导致的,裂纹产生所需的能量远比裂纹扩展所需的能量高.因此,合理增加钢纤维体积分数可以提高试件的耗能水平,从而提高试件的耐久性.但钢纤维体积分数过高,基体内钢纤维间的耦合效应增强,增加了试件材料分布的不均匀性,反而降低了试件的耗能水平.因此,在混凝土双丝拉拔试件中,存在一个最优的钢纤维掺入比例.本研究最优的钢纤维体积分数为1.6%.

(a) 不同钢纤维体积分数时试件的声发射累积能量曲线

(b) 不同钢纤维体积分数时试件的声发射总能量拟合曲线

图7 动荷载下纤维混凝土试件的耗能曲线

Fig. 7 Energy dissipation curves of specimens fiber cement under dynamic load

4 结 论

1) 钢纤维体积分数变化对试件破坏模式影响

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

较大. 随着钢纤维体积分数增加, 试件破坏模式从偏脆性的基体横断贯通破坏模式向偏柔性的多条细小裂纹破坏模式转变.

2) 在加载初期, 钢纤维体积分数变化对双丝拉拔试件的宏观力学性能影响甚微, 钢纤维体积分数主要对试件劣化阶段的力学性能影响较大. 双丝拉拔试件的拔出位移随钢纤维体积分数的增加逐渐减小.

3) 钢纤维体积分数的增加, 减缓了裂纹扩展速度, 提高了试件的耐久性. 双丝拉拔试件的声发射总能量随钢纤维体积分数的增加呈先增后减趋势, 钢纤维体积掺量存在最优值.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51678170, 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. E-mail: zhangyafang2004@163.com

引文: 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.

参考文献 / References:

- [1] SOUFEIANI L, RAMAN S N, JUMAAT M Z, et al. Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading: a review [J]. *Engineering Structures*, 2016, 124: 405-417.
- [2] 陈磊, 陈太林, 腾桃居. 高强钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土的动态力学性能试验研究[J]. *建筑技术*, 2006(1): 50-51.
CHEN Lei, CHEN Tailin, TENG Taoju. Test study on dynamic performances of high strength steel fiber concrete and polypropylene fiber concrete [J]. *Architecture Technology*, 2006(1): 50-51. (in Chinese)
- [3] 牛建刚, 郝吉, 孙立斌, 等. 塑钢纤维增强轻骨料混凝土与钢筋黏结性能试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报自然科学版*, 2016, 48(6): 805-812.
NIU Jiangang, HAO Ji, SUN Libin, et al. Research on bond performance between bars and HPP fiber reinforced light-weight aggregate concrete [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology Natural Science*, 2016, 48(6): 805-812. (in Chinese)
- [4] 高丹盈, 陈刚, SADRADDIN H M N, 等. 钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移性能及其关系模型[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(7): 132-139.
GAO Danying, CHEN Gang, SADRADDIN H M N, et al. Bond-slip behavior and constitutive model between rebar and steel fibre reinforced concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(7): 132-139. (in Chinese)
- [5] DANCYGIER A N K, WEXLER U. Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(6): 839-856.
- [6] 朱德举, 李向阳, 史才军, 等. 水泥基体中仿生钢纤维的拔出试验[J]. *湖南大学学报自然科学版*, 2018, 45(1): 84-89.
ZHU Deju, LI Xiangyang, SI Caijun, et al. Pullout test of bio-inspired steel fiber from cementitious matrix [J]. *Journal of Hunan University Natural Science*, 2018, 45(1): 84-89. (in Chinese)
- [7] HASSANPOUR M, SHAFIGH P, MAHMUD H B. Light-weight aggregate concrete fiber reinforcement: a review [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 37: 452-461.
- [8] LI B, XU L, SHI C, et al. Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete [J]. 2018, 181: 474-486.
- [9] KAKEA A, ACHOURA D, DUPLAN F, et al. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete [J]. *Materials and Design*, 2014, 63: 493-499.
- [10] WANG H T, WANG L C. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38(C): 1146-1151.
- [11] 延潇, 史庆轩, 徐赵东. 钢纤维对混凝土与变形钢筋之间黏结性能试验研究[J]. *湖南大学学报自然科学版*, 2020, 47(1): 45-52.
YAN Xiao, SHI Qingxuan, XU Zhaodong. Experimental study on bond behavior between concrete and deformed steel bar with different steel bar [J]. *Journal of Hunan University Natural Science*, 2020, 47(1): 45-52. (in Chinese)
- [12] GNEYISI E, GESOLU M, PEK S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes [J]. 2013, 47: 358-365.
- [13] 杨萌, 黄承逵. 钢纤维与高强砂浆基体黏结性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2004(4): 384-389.
YANG Meng, HUANG Chengkui. Bond slip characteristics between steel fiber and high strength mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2004(4): 384-389. (in Chinese)

- [14] 张娟霞,唐春安,朱万成,等. FRP加固混凝土构件中裂纹扩展规律的数值模拟[J]. 工程力学, 2006(12): 143-148.
ZHANG Juanxia, TANG Chun'an, ZHU Wancheng, et al. Numerical simulation of fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete members [J]. Engineering Mechanics, 2006(12): 143-148. (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 Chun'an, ZHU Wancheng. Concrete damage and fracture: numerical tests [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 牛龙龙,张士萍,韦有信. 钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(3): 51-54.
NIU Longlong, ZHANG Shiping, WEI Youxin. Effect of mechanical properties of concrete with steel fiber volume content [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(3): 51-54. (in Chinese)
- [17] 张亚芳,郭中祥,刘浩,等. 埋深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, 2020, 37(4): 381-388.
ZHANG Yangfang, GUO Zhongxiang, LIU Hao, et al. Influence of embedment depth on dynamic failure property of twin fibers pull-out test [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 381-388. (in Chinese)
- [18] 张亚芳,陈江平. 不同掺量玻璃纤维增强水泥细观数值研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2010, 27(1): 103-108.
ZHANG Yangfang, CHEN Jiangping. Numerical study on glass fiber reinforced cement with different incorporation rates [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27(1): 103-108. (in Chinese)
- [19] 潘慧敏,马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 956-961.
PAN Huimin, MA Yunchao. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete and its mechanism of crack resistance and toughening [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6): 956-961. (in Chinese)
- [20] 李胡勇,王丽. 掺入塑钢纤维的轻骨料混凝土与钢筋间的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 235-241, 248.
LI Huyong, WANG Li. Lightweight aggregate concrete with TB-c and mechanical property of steel bar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 235-241, 248. (in Chinese)
- [21] 贾帅龙,王志亮,巫绪涛,等. 不同冲击荷载下花岗岩力学和能量散特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 67-74.
JIA Shuailong, WANG Zhiliang, WU Xutao, et al. Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under different impact loads [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 67-74. (in Chinese)
- [22] BRYAN H. Engineering composite materials [M]. [S. l.]: IOM Communication Ltd., 1999.
- [23] 赵庆新,董进秋,潘慧敏,等. 玄武岩纤维增韧混凝土冲击性能[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 120-125.
ZHAO Qingxin, DONG Jinqu, PAN Huimin, et al. Impact behavior of basalt fiber reinforced concrete [J]. Acta Materialiae Composit Aesinica, 2010, 27(6): 120-125. (in Chinese)
- [24] SUN X, ZHAO K, LI Y, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 35-40.
- [25] MOHAMMADI Y, CARKON-AZAD R, SINGHS P, et al. Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio [J]. Construction and Building Materials, 2008, 23(1): 39-46.
- [26] 李为民,许金余,翟毅,等. 冲击荷载作用下碳纤维混凝土的力学性能[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 24-30, 38.
LI Weimin, XU Jinyu, ZHAI Yi, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete under impact loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 24-30, 38. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之隼】