

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220714003

## 加载速率对CFRP加固混凝土梁断裂特性 影响研究\*

赵少伟, 冯心溟, 郭蓉, 郭喜旺

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 采用CFRP加固带裂缝混凝土梁,能明显提高构件的承载力和刚度,减小结构变形并延缓裂缝的扩展。由于混凝土材料本身和CFRP-混凝土界面的率敏感性,在动态加载速率下CFRP加固梁的断裂性能与准静态荷载下有着明显不同。为研究CFRP加固混凝土梁的动态力学性能,通过不同加载速率下三点弯曲梁断裂试验,对比分析了0.000 5、0.1、1、10 mm/s加载速率下CFRP加固预裂混凝土梁的断裂性能。结果表明:CFRP在混凝土梁裂缝扩展过程中承担着很强的阻裂作用和增强效果,与未加固混凝土梁相比,CFRP加固混凝土梁的极限荷载得到显著提高;随加载速率提高,混凝土梁固有的阻裂性能和断裂过程区骨料黏聚力的阻裂作用提高,混凝土梁断裂面骨料被拉断的数量增多,裂缝扩展路径更趋向平直;最后计算得到不同加载速率下CFRP加固混凝土梁裂缝扩展阻力曲线,分析了不同加载速率下CFRP加固混凝土梁裂缝扩展阻力曲线的变化规律。

**关键词:** 断裂性能; 加载速率; CFRP加固混凝土; 裂缝扩展阻力曲线

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0210-12

## Influence of Loading Rate on the Fracture Characteristics of CFRP Reinforced Concrete Beams

ZHAO Shaowei, FENG Xinhao, GUO Rong, GUO Xiwang

(College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The use of CFRP to reinforce concrete beams with cracks can significantly improve the bearing capacity and stiffness of the members, reduce structural deformation and delay the expansion of cracks. Due to the rate sensitivity of the concrete material itself and the interface between CFRP and concrete, the fracture performance of CFRP-strengthened beams under dynamic loading rates is significantly different from that under quasi-static loading. In order to study the dynamic mechanical properties of concrete beams strengthened with CFRP, the fracture behavior of pre-cracked concrete beams strengthened with CFRP at different loading rates of 0.000 5 mm/s, 0.1 mm/s, 1 mm/s and 10 mm/s was compared and analyzed through three-point bending fracture tests. The results show that CFRP plays a strong role in crack resistance and reinforcement during the process of crack propagation in concrete beams. Compared with unreinforced concrete beams, the ultimate load of CFRP rein-

\* 收稿日期:2022-07-14;修回日期:2022-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51878238)资助

作者简介:赵少伟(1972—),男,教授,博士。主要从事工程改造与加固研究。E-mail:zhaoshaowei@hebut.edu.cn

通讯作者:郭蓉(1974—),女,副教授,博士。主要从事工程改造与加固研究。E-mail:13834785@qq.com

forced concrete beams is significantly improved; With the increase of loading rate, the inherent crack resistance of concrete beams and the crack resistance of aggregate cohesion in the fracture path increase, the number of broken aggregates at the fracture surface of concrete beams increases, and the crack propagation path tends to be more straight; Finally, the crack propagation resistance curves of CFRP-concrete beams under different loading rates were calculated, and the variation law of crack propagation resistance curves of CFRP-reinforced concrete beams under different loading rates was discussed.

**Keywords:** fracture property; loading rate; CFRP reinforced concrete; crack propagation resistance curve

## 0 引言

CFRP具有强度高、耐疲劳性好、成本低等优点,被广泛应用于混凝土结构的维修加固中,在实际工程中CFRP加固结构,往往会受到动态荷载的作用,如高层建筑和桥梁等要承受风荷载、水坝和港口等要承受动水压力和波浪荷载、以及各种结构可能会遭受不同程度的撞击、爆炸和地震荷载的影响。

近年来部分学者针对加载速率对混凝土梁的断裂力学性能的影响展开了研究。其中X. X. Zhang等<sup>[1]</sup>在 $10^{-4} \sim 10^3$  mm/s的加载速率范围内对三点弯曲梁的断裂能进行了试验研究,发现在较低的加载速率下,由于孔隙自由水的粘性效应,断裂能的率效应并不显著;在高加载速率下,由于大量裂纹的产生与扩展,断裂能的率效应更显著。王晨捷<sup>[2]</sup>和马民华<sup>[3]</sup>在0.012~120 mm/s的加载速率范围内,对混凝土三点弯曲梁的断裂参数进行了研究,得出混凝土梁的起裂韧度、失稳韧度与断裂能均随着加载速率的增加而呈对数线性增长的趋势,而不同加载速率下预制裂缝梁的初始缝高比对混凝土梁的起裂韧度、失稳韧度与断裂能的影响较低。上述研究均为针对素混凝土梁在不同加载速率下断裂力学性能的研究,说明加载速率会对混凝土结构的断裂特性产生影响。在静荷载作用下,CFRP在混凝土梁裂缝扩展过程中承担着很强的阻裂作用和增强效果。易富民等<sup>[4]</sup>和韩艳等<sup>[5]</sup>在静载下对CFRP加固的带I型裂缝的混凝土梁进行三点弯曲试验,说明外贴CFRP能显著提高混凝土梁的承载力与延性,延缓裂缝开裂,减缓裂缝尖端应力强度因子增加速度。Z. M. Wu等<sup>[6]</sup>在考虑预制裂缝在混凝土中的垂直扩展与FRP-混凝土界面的粘

性能的情况下对CFRP加固混凝土梁进行三点弯曲试验和数值分析,讨论了混凝土初始开裂后的四个阶段。M. Sangi等<sup>[7]</sup>研究了CFRP厚度、混凝土强度、梁体高度和粘结强度等参数的变化对加固效果的影响,发现 $P-CMOD$ 曲线存在两个峰值荷载点。第一峰值点和第二峰值点随着混凝土强度和梁高增加而提高,其中CFRP片材的粘结强度和厚度对第二峰值点影响最大。目前对于动荷载作用下FRP加固混凝土构件动态力学性能的研究相对较少,范向前等<sup>[8]</sup>在加载速率0.000 5~1 mm/s时,研究了CFRP加固三点弯曲梁的力学性能,得出随着加载速率的增加,加固梁的各特征荷载、延性及断裂能均出现了不同程度的提高。

由于实际工程中CFRP加固结构往往受到动态荷载的影响,在动态荷载作用下,CFRP加固结构的断裂力学性能会由于各组成材料及界面粘结性能的率敏感性与静载作用存在较大的差异。所以有必要开展对不同加载速率下CFRP加固混凝土梁的断裂特性研究,为混凝土加固结构的动态断裂力学的延伸奠定一定的理论基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本试验所用混凝土设计强度为C30,其质量配合比见表1。

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix ratio

单位:kg/m<sup>3</sup>

强度等级	水	水泥	砂	石子	矿粉	粉煤灰	外加剂
C30	174	237	735	1 090	74	59	7.4

本试验采用的CFRP布是由天津市卡本科技集团股份有限公司生产,其主要力学性能指标见表2。

表2 CFRP布的力学性能

种类	厚度/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	伸长率/ %	层间剪切 强度/MPa
CFRP	1.67	3 400	$2.30 \times 10^5$	1.6	51.8

试验使用的环氧树脂胶是用于CFRP布加固混凝土的专用胶黏剂,其主要力学性能见表3。

表3 环氧树脂胶力学性能

种类	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	伸长率/%
环氧树脂胶	38	2 400	1.5

## 1.2 试件设计

试验采用的试件为三点弯曲梁,如图1所示,尺寸为:100×100×440 mm,计算跨度 $2L$ 为400 mm,预制裂缝高度 $a_0$ 为40 mm,为了避免在加载过程中梁底预制裂缝口应力集中<sup>[9]</sup>,粘贴CFRP布时在预制裂缝两端预留 $2L_d=40$  mm的非粘结区。

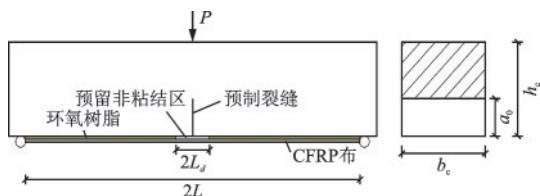


图1 CFRP布加固三点弯曲切口梁示意

Fig.1 Schematic diagram of CFRP reinforced three-point bending notched beam

该试验考虑的影响因子为:(1)加载速率:分别为0.000 5、0.1、1、10 mm/s,并以0.000 5 mm/s作为准静态加载速率。(2)CFRP的宽度:分别为0、100 mm宽。试验具体分组见表4。

## 1.3 加载方式与测量方案

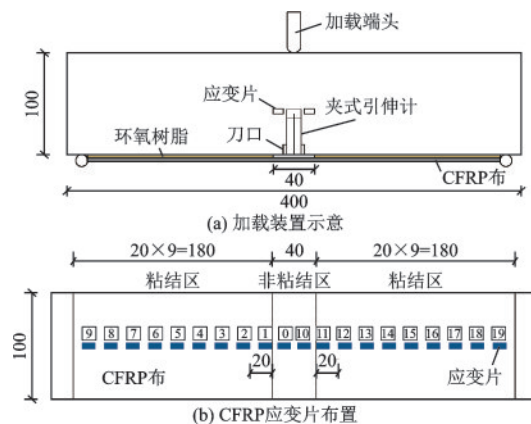
试件加载与测点布置如图2所示。试验中将夹式引伸计安装在梁底预制裂缝侧面处,用于直接测量出试件加载过程中的裂缝张开位移。同时,在预制裂缝尖端两侧各10 mm位置粘贴两应变片,用于

表4 试件设计

Table 4 Specimen design

试件编号	加载速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	CFRP宽度/mm
C-0-V1	0.000 5	0
C-0-V2	0.1	0
C-0-V3	1	0
C-0-V4	10	0
C-100-V1	0.000 5	100
C-100-V2	0.1	100
C-100-V3	1	100
C-100-V4	10	100

注:表中试件编号含义为混凝土-CFRP布宽度-加载速率,V1代表准静态加载速率,为0.000 5 mm/s,V2、V3、V4分别代表加载速率为0.1、1、10 mm/s



(b) CFRP应变片布置

(c) 加载装置

单位: mm

图2 测点布置与加载装置

Fig.2 Measuring point arrangement and loading device

监测梁的起裂应变;如图2(b)、(c)所示,通过在梁底CFRP布粘结区每隔20 mm布置一应变片,用于监测加荷过程中CFRP布上的应变分布,在非粘结区的0°及10°应变片用于监测裂缝两侧CFRP布的拉应变。

通过MTS液压伺服试验机对梁施加不同速率的荷载,试验现场如图2(c)所示,加载均采用单轴加载方式位移控制,分别加载至试件发生完全断裂破坏为止。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 混凝土力学性能

本试验共制作4组尺寸为100×100×100 mm混凝土立方体试块,每组3个,共12个试块。在MTS液压伺服试验机上分别测定试件在加载速率分别为0.000 5、0.1、1、10 mm/s下的立方体抗压强度。各组试块的混凝土力学参数见表5。

表5 不同加载速率下混凝土力学参数

Table 5 Concrete mechanical parameters under different loading rates

混凝土强度等级	加载速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	$f_{cu}$ /MPa	$f_t$ /MPa
C30	0.000 5	33.1	2.68
C30	0.1	38.0	2.94
C30	1	40.2	3.05
C30	10	42.1	3.15

注:表中混凝土轴心抗拉强度 $f_t$ 由混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}$ 计算所得, $f_t=0.26f_{cu}^{2/3}$

### 2.2 试件破坏模式

#### 2.2.1 CFRP-混凝土梁破坏模式

CFRP加固梁的破坏形态均为CFRP-混凝土界面发生剥离,裂缝沿预制裂缝方向开展至完全断裂破坏,梁体破坏状态如图3所示。试件的CFRP-混凝土界面破坏模式如图4所示,从图中可以看出,随着加载速率的提高,CFRP布粘下的混凝土逐渐减少,并有少部分零散区域发生了CFRP布与环氧树脂胶层的界面脱粘破坏,其原因为,界面破坏的具体位置会发生在抗剪强度相对薄弱的部位,由于CFRP布和环氧树脂胶体的强度相对于混凝土较高,故低速加载下界面破坏层常发生在混凝土的表

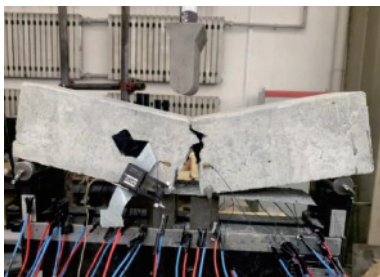


图3 CFRP加固梁破坏形态  
Fig.3 Failure mode of CFRP-reinforced beams

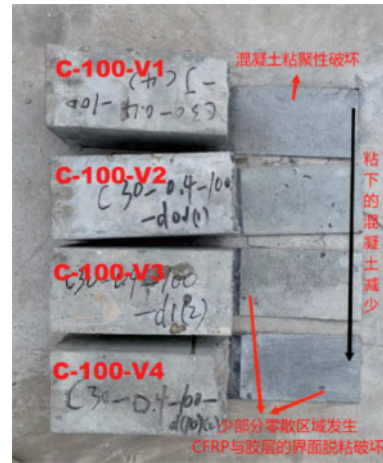


图4 CFRP-混凝土界面破坏模式  
Fig.4 Failure mode of CFRP-concrete interface

层,在高加载速率下,由于混凝土的力学性能有所提高(表5),相对薄弱的层面转变为CFRP与胶层粘结界面,故破坏层从较低加载速率下的混凝土剥离破坏转变为较高加载速率下的CFRP与环氧树脂胶层的界面剥离破坏。

#### 2.2.2 未加固混凝土梁断裂形态

未加固的C30混凝土梁破坏后断裂形态如图5所示。随着加载速率的提高,梁的裂缝扩展路径从准静态的曲折逐渐趋近于平直,断裂面中发生骨料直接断裂的数量逐步增多。产生此现象的原因为:在准静态加载速率下,裂缝有足够的时间沿着混凝土内部内聚力最弱的路径方向进行扩展,裂缝扩展路径即为沿砂浆和骨料界面的曲折方向;随着加载速率的提高,要求构件的耗能速率增加,由于不能及时沿薄弱界面进行散能,裂缝就会直接切断阻碍裂缝扩展的骨料沿最短路径进行延伸扩展,所以未加固混凝土梁断裂面断裂的粗骨料数目增多,裂缝扩展路径更趋于平直。

### 2.3 荷载—张口位移曲线

根据试验结果,4种加载速率下试件的 $P-CMOD$ 曲线分别如图6所示,其中 $P$ 为外荷载, $CMOD$ 为裂缝张口位移。

对比图6中各试件在不同加载速率下的 $P-CMOD$ 曲线可知,加载速率的提高可以提高试件的极限荷载;同时,更高加载速率下的 $P-CMOD$ 曲线基本将更低加载速率下的 $P-CMOD$ 曲线全部覆盖在其中,说明整个加载过程中试件所需要消耗的能量也是随加载速率的增加而提高。这与目前

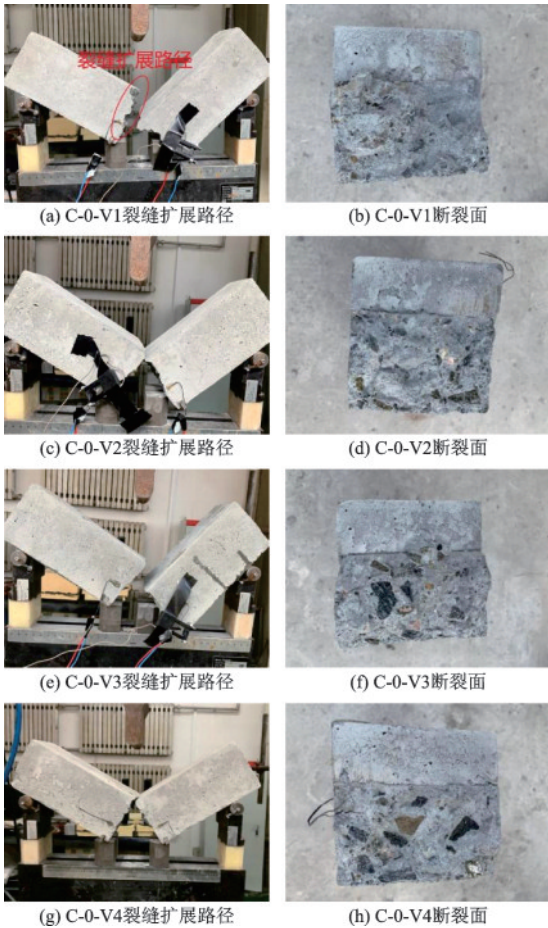
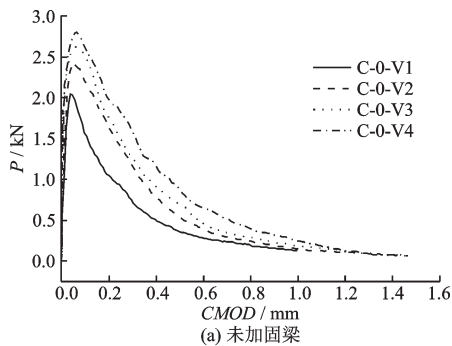
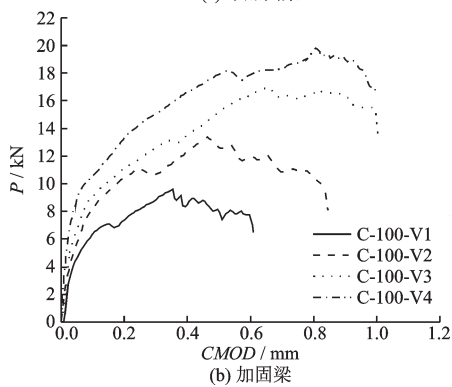


图5 混凝土梁断裂形态

Fig.5 Fracture mode of concrete beam



(a) 未加固梁



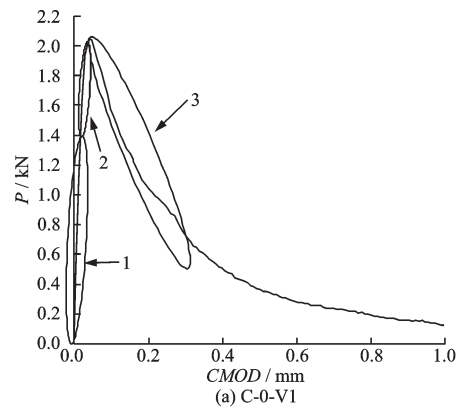
(b) 加固梁

图6 P—CMOD 曲线

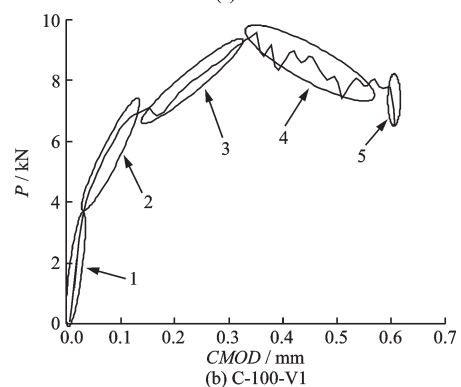
Fig.6 P—CMOD curves

三点弯曲梁动态断裂破坏的研究<sup>[2-3,8]</sup>相符,即试件的极限荷载和耗能能力都具有一定的率敏感性,均随加载速率的提高而提高。

未加固混凝土梁和CFRP加固混凝土梁的破坏过程有很大区别,如图7所示,未加固梁试件破坏过程分为1~3三个阶段(图7(a)):裂缝尚未扩展的弹性阶段、裂缝开裂并进入稳定期的裂缝稳定扩展阶段、以及达到极限荷载后的裂缝失稳扩展阶段。而对于CFRP加固混凝土梁(图7(b)),其裂缝发展的1~2两个阶段与未加固混凝土梁类似,分别为弹性阶段及裂缝开裂后的非线性上升段组成,随后裂缝扩展产生的变化趋势,是由于CFRP布对梁裂缝产生阻裂作用的影响,分为3~5三个阶段:宏观裂缝出现并扩展阶段、CFRP布开始剥离阶段、CFRP布完全剥离阶段。在准静态加载速率下,未加固梁的极限承载力为2.07 kN,而CFRP加固混凝土梁的极限承载力达到9.62 kN,与未加固梁相比,CFRP加固混凝土梁的极限荷载提高了365%,梁的最大裂缝张口位移减小,说明CFRP具有很强的阻裂作用,可明显提高梁的极限荷载,降低梁的变形进而延缓裂缝的发展。



(a) C-0-V1



(b) C-100-V1

图7 破坏过程对比

Fig.7 Comparison of the destruction process

### 3 不同加载速率下CFRP加固混凝土梁断裂特性

#### 3.1 有效裂缝长度

根据实测的  $P-CMOD$  曲线上将任一时刻的  $P$  及对应的  $CMOD$  值, 代入有效裂缝长度的表达式<sup>[10]</sup>, 可得到断裂过程中各时刻的有效裂缝长度  $a$ 。

$$a = \frac{2}{\pi} (h_c + H_0) \arctan \sqrt{\frac{b_c E C M O D}{32.6 P}} - 0.1135 - H_0 \quad (1)$$

其中,

$$E = \frac{24 P a_0}{b_c h_c C M O D} V(\beta) \quad (2)$$

$$V(\beta) = 0.76 - 2.28\beta + 3.87\beta^2 - 2.04\beta^3 + \frac{0.66}{(1-\beta)^2} \quad (3)$$

式中,  $H_0$  为刀口厚度, 本试验中  $H_0 = -0.01$  m;  $\beta = a/h_c$ ;  $E$  为素混凝土梁弹性模量, 可任取试件  $P-CMOD$  曲线弹性阶段的三个点坐标代入上式, 得到三点的弹性模量, 求得均值即为试件的弹性模量  $E$ 。

素混凝土梁在断裂全过程中有三个特征有效裂缝长度, 分别为:

(1) 初始裂缝长度  $a_0$  (图 8(a))。此时混凝土预制裂缝尖端的主拉应力还未达到混凝土材料本身的抗拉强度, 裂缝未发生扩展, 对应的试件处于弹性阶段, 此刻  $a_0$  处的骨料黏聚力为零。

(2) 临界裂缝长度  $a_c$  (图 8(b))。此时梁断裂过程区为临界裂缝失稳时刻, 此刻荷载达到最大值  $P_{max}$ , 对应的临界裂缝张口位移为  $CMOD_c$ , 临界裂缝尖端张开位移为  $CTOD_c$ , 在距梁底裂缝位置为  $x = a_0$  的黏聚力为  $\sigma_s$ , 在  $x = a_c$  处的黏聚力为  $f_t$ 。将此刻的  $P_{max}$ 、 $CMOD_c$  代入公式(1)~(3)可求得临界裂缝长度  $a_c$ 。将  $x = a_0$ ,  $CMOD = CMOD_c$ ,  $a = a_c$  代入计算裂缝张开宽度  $w$  的公式(4)中<sup>[11]</sup>, 即可求得预制裂缝尖端临界失稳时刻裂缝张开宽度  $w_s$ , 且此刻  $CTOD_c = w_s$ 。

$$w(x) = C M O D \left\{ \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^2 + \left( 1.018 - 1.149 \frac{a}{h_c} \right) \left[ \frac{x}{a} - \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

(3) 最大张开宽度  $w_0$  时刻对应的有效裂缝长度为  $a_{w_0}$  (图 8(c))。此时在裂缝扩展长度区段  $(a_0, a_{w_0})$  上, 素混凝土内聚力呈全应力分布状态, 裂缝尖端张开位移  $CTOD = w_0$ , 在  $x = a_0$  处的黏聚力为 0, 在  $x = a_{w_0}$  处的黏聚力为  $f_t$ 。此刻将  $x = a_0$ ,  $w(a_0) = w_0$  以及试验中实测的  $CMOD$  值和由  $P-CMOD$  曲线各点对应的  $P$  和  $CMOD$  值代入公式(1)~(3)确定的  $a$  值代入公式(4)中, 使等式成立时的  $a$  值即为  $a_{w_0}$ 。

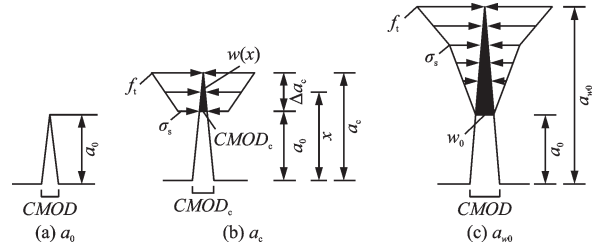


图 8 素混凝土断裂过程区三个特定裂缝长度示意

Fig.8 Schematic diagram of three specific crack lengths in the fracture path zone of plain concrete

#### 3.2 素混凝土双线性软化本构关系

图 9 为素混凝土双线性软化本构关系, 涉及 3 个特征参数:  $w_s$ 、 $\sigma_s$  和  $w_0$ 。本试验对于素混凝土梁的特征参数确定采用改进的双线性软化关系式<sup>[12]</sup>, 如式(5)所示。

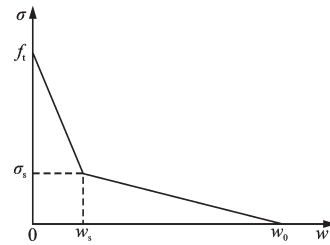


图 9 素混凝土双线性软化本构关系

Fig.9 Bilinear softening constitutive relation of plain concrete

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{\left( 2 - \frac{f_t w_s}{G_f} \right) f_t}{\alpha_f} \\ w_s &= C T O D_c \\ w_0 &= \frac{\alpha_f G_f}{f_t} \\ \alpha_f &= \lambda - \frac{d_{max}}{8} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $G_f$  为试件的断裂能, 计算公式如式(6)所示<sup>[13]</sup>;  $\lambda$  为与素混凝土力学性能相关的校正系数, 范

围为5~10,可通过试验结果确定 $\lambda$ 的值; $d_{\max}$ 为骨料最大粒径,本试验取31.5 mm。

$$G_f = \frac{W_0 + \frac{1}{2} mg \delta_{\max}}{A_{\text{lig}}} \quad (6)$$

式中, $W_0$ 为试件完全断裂的外力功,为试件荷载—挠度曲线与横坐标所围成的总面积,本试验测得未加固C30混凝土梁试件的荷载—挠度曲线如图10所示; $mg$ 为跨间自重,本试验C30素混凝土梁质量 $m$ 为5.36 kg; $\delta_{\max}$ 为破坏时的最大挠度; $A_{\text{lig}}$ 为韧带面积, $A_{\text{lig}} = b_c(h_c - a_0)$ 。

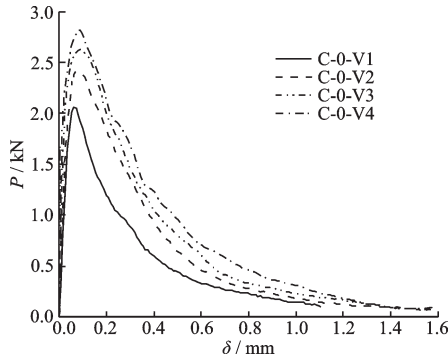


图10 未加固梁荷载—挠度曲线

Fig.10 Load-deflection curves of unreinforced concrete beam

对于未加固混凝土三点弯曲梁,断裂过程中临界失稳时刻对应的梁跨中截面应力分布如图11所示,图中未知量为 $\sigma_s$ 、 $\sigma_c$ 、 $x_c$ 与 $x_t$ ,由截面几何关系和力矩平衡,得到方程组(7)。

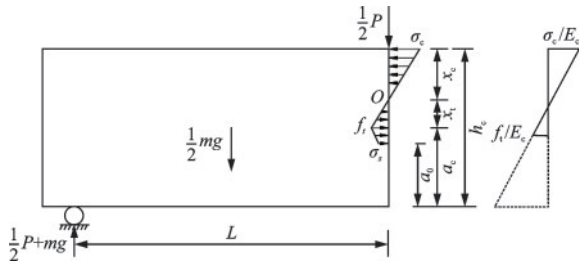


图11 临界失稳时刻对应的梁跨中截面应力分布

Fig.11 The stress distribution at the beam mid-span section corresponding to the critical instability moment

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{x_c}{x_t} \\ a_c + x_t + x_c = h_c \\ \frac{1}{2} \sigma_c x_c = \frac{1}{2} f_t x_t + \frac{1}{2} (f_t + \sigma_s) (a_c - a_0) \\ \frac{1}{2} (P_{\max} + mg) L - \frac{1}{2} mg \times \frac{1}{2} L - \\ \quad \frac{1}{2} \sigma_c x_c b_c \times \frac{2}{3} x_c - \frac{1}{2} f_t x_t b_c \times \frac{2}{3} x_t - \\ \quad \frac{1}{2} f_t (a_c - a_0) b_c \left[ x_t + \frac{1}{3} (a_c - a_c) \right] - \\ \quad \frac{1}{2} \sigma_s (a_c - a_0) b_c \left[ x_t + \frac{2}{3} (a_c - a_0) \right] = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

由方程组(7)可求得 $\sigma_s$ 的公式表达式为:

$$\sigma_s = \frac{-f_t b_c h_c^2 + 2f_t b_c a_0 h_c - f_t b_c a_0^2 + 3P_{\max} L + 1.5mgL}{2b_c (a_c - a_0) (h_c - a_0)} \quad (8)$$

通过试验中计算的 $\sigma_s$ 值代入到式(5)中可得到未加固C30混凝土梁的混凝土变形性能的校正系数 $\lambda$ ,然后将计算所得 $w_0$ 值代入式(4)便可求得 $a_{w_0}$ 的值,各断裂参数计算结果见表6。

通过表6可以得到不同加载速率下素混凝土梁断裂的规律:校正系数 $\lambda$ 随加载速率的提高而减小;弹性模量 $E$ 、断裂能 $G_f$ 、 $\sigma_s$ 、 $w_s$ 、 $w_0$ 、 $CMOD_c$ 、 $a/h_c$ 和 $a_{w_0}/h_c$ 均随加载速率有增大的趋势,说明混凝土材料具有一定的率敏感性,加载速率的提高能提升试件的耗能能力,且骨料提供的黏聚力增强,断裂过程区长度范围变长,试件的变形能力变大。

### 3.3 不同加载速率下素混凝土梁 $K_R$ 阻力曲线

对于带有裂缝的素混凝土的 $K_R$ 阻力曲线由两部分叠加构成<sup>[10]</sup>:(1)素混凝土本身固有的阻裂性能,即素混凝土的起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$ ;(2)在裂缝扩展过程中,断裂过程区黏聚力提供的阻裂作用 $K_c$ 。素混凝土梁的 $K_R$ 阻力曲线表达式为:

$$K_R = K_{IC}^{ini} + K_c \quad (9)$$

表6 素混凝土梁断裂参数

Table 6 Fracture parameters of plain concrete beams

试件编号	$E/\text{GPa}$	$G_f/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$\lambda$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$w_s/\mu\text{m}$	$w_0/\mu\text{m}$	$CMOD_c/\mu\text{m}$	$a_c/h_c$	$a_{w_0}/h_c$
C-0-V1	30.8	106	6.47	1.27	13.55	100.2	32	0.59	0.83
C-0-V2	32.1	155	6.09	1.63	17.94	113.4	41	0.61	0.86
C-0-V3	32.6	181	5.98	1.83	22.49	121.0	50	0.62	0.88
C-0-V4	33.1	209	5.85	1.99	26.54	126.7	58	0.63	0.89

### 3.3.1 起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$

通过未加固的相同尺寸的C30混凝土梁所测得的起裂荷载  $P_{mi}$ , 代入公式(10)~(11)中计算得到素混凝土的起裂韧度  $K_{IC}^{ini[14]}$ 。

$$K_{IC}^{ini} = \frac{3\left(P_{mi} + \frac{mg}{2}\right)2L}{2h_c^2 b_c} \sqrt{a_0} F\left(\frac{a_0}{h_c}\right) \quad (10)$$

$$F\left(\frac{a_0}{h_c}\right) = \frac{1.99 - \left(\frac{a_0}{h_c}\right)\left(1 - \frac{a_0}{h_c}\right)\left[2.15 - 3.93\frac{a_0}{h_c} + 2.7\left(\frac{a_0}{h_c}\right)^2\right]}{\left(1 + 2\frac{a_0}{h_c}\right)\left(1 - \frac{a_0}{h_c}\right)^{3/2}} \quad (11)$$

通过计算得到C30素混凝土梁在0.0005、0.1、1、10 mm/s加速率下的起裂韧度分别为0.37、0.43、0.47、0.49  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

### 3.3.2 断裂过程区黏聚力提供的阻裂作用

根据裂缝扩展的规律, 整个裂缝扩展过程可分为4个阶段<sup>[15]</sup>, 根据各扩展阶段的黏聚力分布情况可以得到  $K_c$  的曲线。

(1) 第一阶段:  $a = a_0$

此阶段裂缝未扩展, 试件处于弹性阶段, 黏聚力未发挥作用, 即  $K_c = 0$ 。

(2) 第二阶段:  $a_0 < a \leq a_c$

此阶段的双线性软化关系曲线和断裂过程区的黏聚力分布, 如图12所示, 此时  $0 < w(x) \leq w_s$ 。

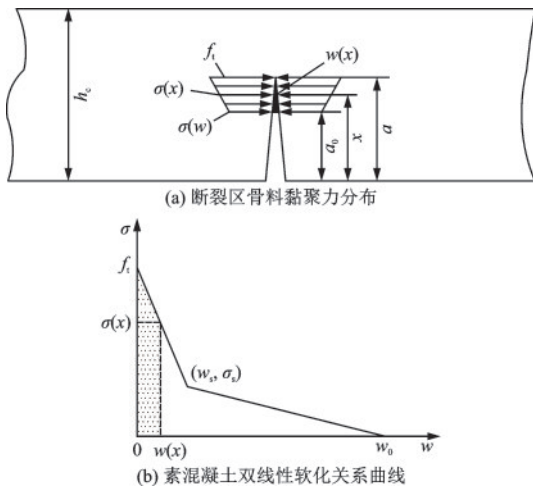


图12  $a_0 < a \leq a_c$  时的黏聚力分布情况示意

Fig.12 Schematic diagram of the cohesion distribution for  $a_0 < a \leq a_c$ .

该阶段的黏聚力表达式如下:

$$\sigma(x) = \sigma(w) + [f_t - \sigma(w)](x - a_0)/(a - a_0) \quad (12)$$

式中,  $\sigma(w)$  为预制缝尖端处 ( $x = a_0$ ) 的黏聚力, 可通过双线性软化本构曲线来确定, 关系式如下:

$$\frac{\sigma(w) - \sigma_s}{f_t - \sigma_s} = \frac{w_s - w(a_0)}{w_s} \quad (13)$$

联立公式(1)~(4)、(12)~(13)可得到该阶段各个时刻的  $\sigma(x)$  值和  $a$  值。该阶段的  $K_c$  表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$K_c = \int_{a_0}^a \left[ 2\sigma(x) F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) / \sqrt{\pi a} \right] dx \quad (14)$$

$$F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) = \frac{3.52(1-x/a)}{(1-a/h_c)^{3/2}} - \frac{4.35-5.28x/a}{(1-a/h_c)^{1/2}} + \left[ \frac{1.30-0.30(x/a)^{3/2}}{\sqrt{1-(x/a)^2}} + 0.83 - 1.76\frac{x}{a} \right] \cdot \left[ 1 - \left(1 - \frac{x}{a}\right) \frac{a}{h_c} \right] \quad (15)$$

(3) 第三阶段: 裂缝非正常扩展 ( $a_c < a \leq a_{w_0}$ )

当裂缝扩展长度大于临界裂缝扩展长度后, 裂缝处于非正常扩展阶段<sup>[14]</sup>, 此刻  $a_c < a \leq a_{w_0}$ ,  $CTOD > CTOD_c$ 。徐世焯<sup>[10]</sup>采用裂缝非正常扩展对断裂过程的第三阶段和第四阶段的黏聚力分布进行了修正。

此阶段的双线性软化关系曲线和断裂过程区的黏聚力分布, 如图13所示, 此时  $w_s \leq w(x) \leq w_0$ 。

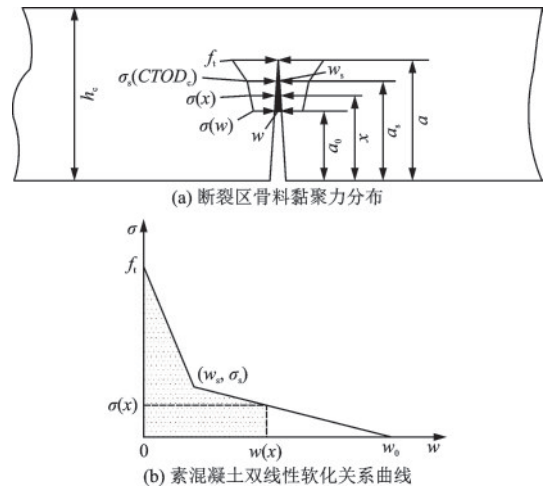


图13  $a_c < a \leq a_{w_0}$  时的黏聚力分布情况示意

Fig.13 Schematic diagram of the cohesion distribution for  $a_c < a \leq a_{w_0}$ .

素混凝土黏聚力双线性转折点  $w_s$  处对应的有效裂缝长度为  $a_s$ , 可通过公式(16)计算出该阶段各时刻的  $a_s$ , 具体表达式为:

$$\frac{CTOD_c}{CMOD} = \left\{ \left( 1 - \frac{a_s}{a} \right)^2 + \left( 1.018 - 1.149 \frac{a}{h_c} \right) \left[ \frac{a_s}{a} - \left( \frac{a_s}{a} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

该阶段的黏聚力表达式如下:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_1(x) = \sigma(w) + [\sigma_s(CTOD_c) - \sigma(w)](x - a_0)/(a_s - a_0) & a_0 \leq x \leq a_s \\ \sigma_2(x) = \sigma_s(CTOD_c) + [f_s - \sigma_s(CTOD_c)](x - a_s)/(a - a_s) & a_s \leq x \leq a \end{cases} \quad (17)$$

$\sigma(w)$  可通过双线性软化本构曲线来确定, 关系式如下:

$$\frac{\sigma(w)}{\sigma_s} = \frac{w_0 - w(a_0)}{w_0 - w_s} \quad (18)$$

联立公式(1)~(4)、(17)~(18)可得到该阶段各个时刻的  $\sigma(x)$  值和  $a$  值。该阶段的  $K_c$  表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$K_c = \int_{a_0}^a \frac{2\sigma(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx = \int_{a_0}^{a_s} \frac{2\sigma_1(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx + \int_{a_s}^a \frac{2\sigma_2(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx \quad (19)$$

(4)第4阶段: 裂缝非正常扩展 ( $a > a_{w_0}$ )

当  $a$  大于  $a_{w_0}$  时, 断裂过程区长度并不是一个定量, 而是随时间不断变化的裂缝扩展<sup>[16]</sup>。断裂区黏聚力为零时所对应的  $a'_{w_0}$  需要确定。此阶段断裂过程区的黏聚力分布, 如图 14 所示, 此时  $w(x) > w_0$ 。

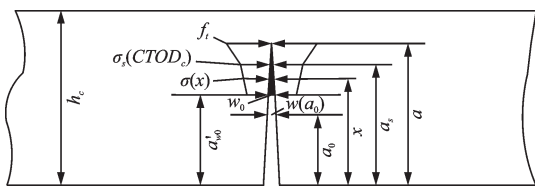


图 14  $a > a_{w_0}$  时的断裂过程区黏聚力分布

Fig.14 Schematic diagram of the cohesion distribution for  $a > a_{w_0}$

通过公式(4)计算出该阶段各个时刻下  $a'_{w_0}$  的值, 具体表达式为:

$$\frac{w_0}{CMOD} = \left\{ \left( 1 - \frac{a'_{w_0}}{a} \right)^2 + \left( 1.018 - 1.149 \frac{a}{h_c} \right) \left[ \frac{a'_{w_0}}{a} - \left( \frac{a'_{w_0}}{a} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

假定裂缝口张开面为平面, 则得到关系式:

$$CMOD = \frac{w_0 a'_{w_0}}{a'_{w_0} - a_0} \quad (21)$$

将该阶段各时刻对应的  $CMOD$  和  $a$  值代入公式(20)~(21), 就可以求得各时刻的  $a'_{w_0}$  值。

该阶段的黏聚力表达式如下:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_1(x) = 0 & a_0 \leq x \leq a'_{w_0} \\ \sigma_2(x) = \sigma_s(CTOD_c)(x - a'_{w_0})/(a_s - a'_{w_0}) & a'_{w_0} \leq x \leq a_s \\ \sigma_3(x) = \sigma_s(CTOD_c) + [f_s - \sigma_s(CTOD_c)](x - a_s)/(a - a_s) & a_s \leq x \leq a \end{cases} \quad (22)$$

该阶段的  $K_c$  表达式如下<sup>[15]</sup>:

$$K_c = \int_{a_0}^a \frac{2\sigma(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx = \int_{a'_{w_0}}^{a_s} \frac{2\sigma_2(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx + \int_{a_s}^a \frac{2\sigma_3(w)}{\sqrt{\pi a}} F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{h_c}\right) dx \quad (23)$$

最后, 利用 Wolframalpha 软件计算结果, 求得相同尺寸下未加固的 C30 混凝土梁在不同加载速率下断裂过程区骨料黏聚力的阻裂作用曲线如图 15 所示。

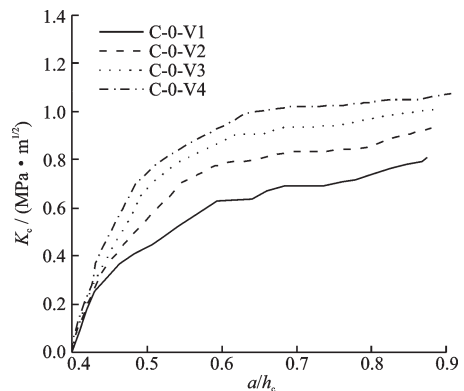


图 15 不同加载速率下的  $K_c$  阻力曲线

Fig.15 Curves of  $K_c$  at different loading rates

### 3.4 不同加载速率下CFRP加固梁 $K_R$ 阻力曲线

对于CFRP加固的混凝土梁,  $K_R$  阻力曲线可由三部分叠加构成<sup>[17]</sup>: (1)混凝土材料自身所固有的阻裂性能, 即相同尺寸下未加固梁的起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$ ; (2)相同尺寸下未加固混凝土梁断裂过程区骨料黏聚力提供的阻裂作用  $K_c$ ; (3)CFRP布的闭合力对素混凝土梁的阻裂作用  $K_f$ 。可表示为:

$$K_R = K_{IC}^{ini} + K_c + K_f \quad (24)$$

当计算CFRP布对素混凝土裂缝的阻裂作用  $K_f$  时, 应考虑CFRP布中轴力的合力  $P_f$  的大小, 以及合力  $P_f$  作用点的位置  $a_f$ , 如图16所示。易富民<sup>[17]</sup>在D. P. Rooke等<sup>[18]</sup>计算板材边缘任意分布的应力强度因子的基础上提出了计算  $K_f$  的数学表达式:

$$K_f = K_Q \varphi(\xi) \quad (25)$$

其中,

$$K_Q = P_f / \sqrt{\pi a} \quad (26)$$

$$\varphi(\xi) = (1 - \xi^2)(1.2943 + 0.0044\xi + 0.1289\xi^2 + 10.89\xi^3 - 22.14\xi^4 + 10.96\xi^5) \quad (27)$$

$$\xi = (1 + a/a_f)^{-1} \quad (28)$$

$$P_f = E_f \epsilon_f b_f t_f \quad (29)$$

式中,  $a_f$  为CFRP中合力  $P_f$  的作用点位置, 由于该试验中梁底CFRP在预留裂缝的两端各预留了20 mm的非黏结区, 所以当CFRP-混凝土界面未发生剥离时,  $a_f$  取值为20 mm; 当CFRP-混凝土界面发生剥离时,  $a_f$  取值随剥离点的位置变化而发生改变。

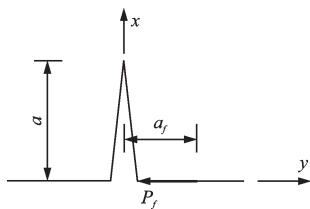


图16 CFRP中的轴力作用示意

Fig.16 Schematic diagram of axial force in CFRP

#### (1) 界面剥离点位置的确定

当CFRP-混凝土界面发生剥离时,  $a_f$  的值可以通过CFRP布上轴力分布曲线而获得。已剥离区域的应变基本保持不变, 界面粘结剪应力为零, CFRP的轴力为均匀分布<sup>[19-20]</sup>。各应变片所在位置的剥离时刻, 对应有有效裂缝长度下的CFRP中轴力变化如图17所示。

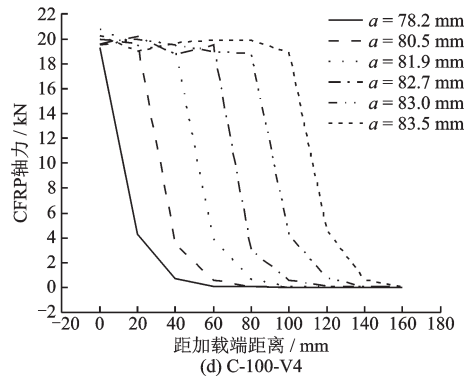
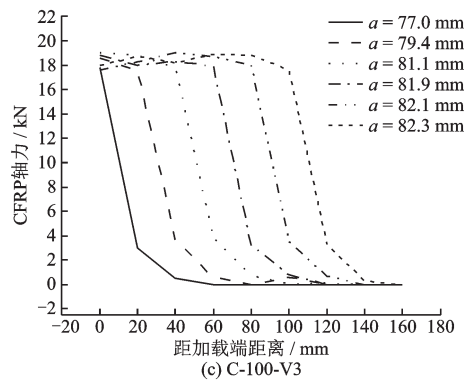
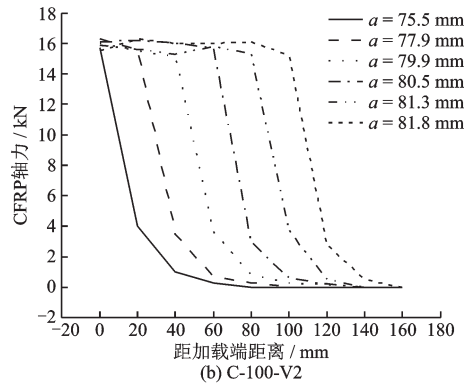
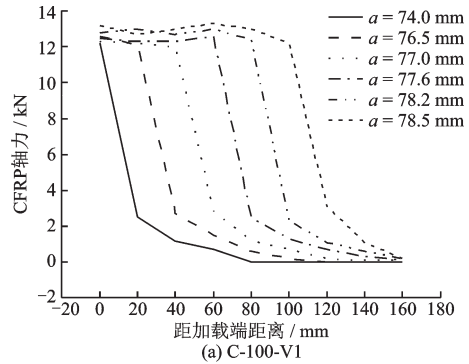


图17 试件CFRP-混凝土界面剥离过程

Fig.17 The debonding process of the CFRP-concrete interface of the specimen

各试件界面剥离位置  $a_f$  值对应的有效裂缝长度见表7。

#### (2) 不同加载速率下 $K_f$ 、 $K_R$ 最大值

本文考虑了CFRP与混凝土界面间的粘结滑移

表7 界面剥离位置 $a_f$ 对应的有效裂缝长度 $a$

Table 7 Effective crack length /mm corresponding to interface debonding position  $a_f$  单位: mm

试件编号	$P_u$ / kN	不同 $a_f$ /mm						
		20	40	60	80	100	120	140
C-100-V1	12.2	74.0	76.5	77.0	77.6	78.2	78.5	/
C-100-V2	15.5	75.5	77.9	79.9	80.5	81.3	81.8	/
C-100-V3	17.8	77.0	79.4	81.1	81.9	82.1	82.3	/
C-100-V4	19.3	78.2	80.5	81.9	82.7	83.0	83.5	/

剥离破坏,通过公式(25)~(26)计算各试件 $K_f$ 最大值与 $K_R$ 最大值及对应的参数见表8。CFRP闭合力产生的阻裂作用 $K_f$ 最大值与加固梁 $K_R$ 最大值随加

表8 各试件 $K_f$ 、 $K_R$ 最大值及所对应的参数

Table 8 The maximum values of  $K_f$  and  $K_R$  and the corresponding parameters of each specimen

试件编号	$P_{max}$ /kN	$CMOD_c$ /mm	$E_{fc}$ /GPa	$a$ /mm	$P_u$ /kN	$K_f$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	$K_R$ /(MPa·m <sup>1/2</sup> )
C-100-V1	9.6	0.33	41.1	74.0	12.2	33.0	34.2
C-100-V2	13.5	0.48	45.6	75.5	15.5	41.5	42.8
C-100-V3	16.9	0.65	48.2	77.0	17.8	47.1	48.1
C-100-V4	20.0	0.83	50.5	78.2	19.3	50.7	51.2

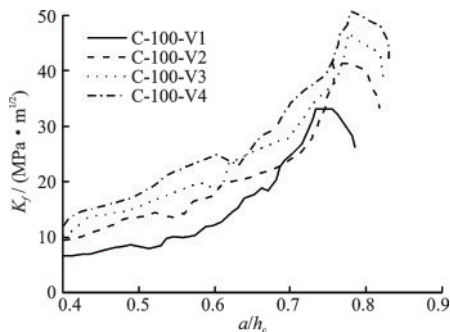


图18  $K_f$ 阻力曲线

Fig.18  $K_f$  resistance curves

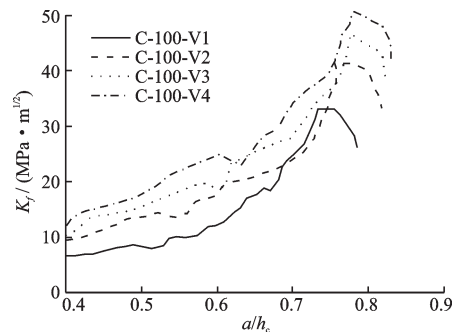


图19  $K_R$ 阻力曲线

Fig.19  $K_R$  resistance curves

## 5 结论

(1)混凝土梁的断裂破坏形态和CFRP-混凝土界面的破坏模式均受加载速率的影响。随着加载速率的提高,混凝土梁断裂面上骨料被切断的数量增多,裂缝扩展路径更趋向平直;CFRP-混凝土界面更多区域发生CFRP布与胶层的界面脱粘破坏。

(2)CFRP加固混凝土梁中CFRP提供的阻裂作用 $K_f$ 占CFRP加固梁整体阻裂作用 $K_R$ 的96.4%以上,且占比随着加载速率的提高而提高。CFRP所提供的阻裂作用成为裂缝扩展 $K_R$ 阻力曲线的主要组成部分,混凝土固有的阻裂性能和混凝土梁断

载速率的提高而提高。

## 4 裂缝扩展 $K_f$ 与 $K_R$ 阻力曲线

本试验由式(25)计算得到的 $K_f$ 阻力曲线如图18所示,由式(24)计算得到的 $K_R$ 阻力曲线如图19所示。通过对比看出,CFRP提供的阻裂作用是CFRP加固混凝土梁阻裂性能的最主要组成部分。CFRP加固梁的 $K_f$ 和 $K_R$ 阻力曲线均分为上升段和下降段,在上升段曲线呈现非线性增长趋势且斜率越来越大,达到最大值时,梁承载力达到极限荷载,CFRP-混凝土界面发生剥离,随后曲线进入下降段,直到整个试件达到断裂破坏。

裂过程区黏聚力提供的阻裂作用与之相比基本可以忽略不计。

(3)CFRP加固混凝土梁的裂缝扩展 $K_f$ 与 $K_R$ 阻力曲线均分为上升段和下降段。当 $K_f$ 阻力曲线与 $K_R$ 阻力曲线达到上升段的峰值时,CFRP-混凝土界面开始发生剥离,随后 $K_f$ 阻力曲线与 $K_R$ 阻力曲线进入下降段,直至CFRP完全剥离后,整个试件瞬间发生断裂破坏。另外, $K_f$ 阻力曲线与 $K_R$ 阻力曲线最大值随加载速率增加呈现出增大的趋势。

## 参考文献:

[1] Zhang X X, Ruiz G, Yu R C, et al. Fracture behaviour

- of high-strength concrete at a wide range of loading rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10):1204-1209.
- [2] 王晨捷. 混凝土 I 型裂缝扩展过程的率敏感性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Wang C J. Study on rate sensitivity of concrete type I crack propagation process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 马民华. 率相关的混凝土裂缝扩展全过程 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Ma M H. Rate-related whole process of concrete crack propagation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [4] 易富民, 董伟, 吴智敏, 等. CFRP 加固混凝土梁断裂特性的试验研究 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 193-199, 205.  
Yi F M, Dong W, Wu Z M, et al. Experimental study on fracture characteristics of concrete beams strengthened with CFRP [J]. Journal of Hydropower, 2009, 28(6): 193-199, 205. (in Chinese)
- [5] 韩艳, 王龙龙, 刘志浩. CFRP 板加固含 I 型裂纹混凝土的断裂扩展规律 [J]. 材料导报, 2019, 33(增 2): 304-308.  
Han Y, Wang L L, Liu Z H. The fracture propagation law of concrete with type I crack reinforced by CFRP plate [J]. Material Reports, 2019, 33(Sup2): 304-308. (in Chinese)
- [6] Wu Z M, Yang S T, Hu X Z, et al. Analytical solution for fracture analysis of CFRP sheet-strengthened cracked concrete beams [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(10): 1202-1219.
- [7] Sangi M, Vaseghi A J, Abdollahzadeh G, et al. Numerical study on fracture behavior of CFRP-strengthened self-compacting concrete beams [J]. The European Physical Journal Plus, 2019, 134(7): 1-14.
- [8] 范向前, 刘决丁, 胡少伟, 等. 不同加载速率下 CFRP 加固混凝土梁动态力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 201-206.  
Fan X Q, Liu J D, Hu S W, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete beams strengthened with CFRP under different loading rates [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 201-206. (in Chinese)
- [9] 谢雷. 碳纤维布加固混凝土三点弯曲梁断裂性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
Xie L. Study on the fracture performance of three-point bending concrete beams strengthened with CFRP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 徐世焯. 混凝土断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 312-348.
- Xu S L. Concrete fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2011: 312-348. (in Chinese)
- [11] Jenq Y, Surendra S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227-1241.
- [12] Xu S L, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture part I: Experimental investigation of crack propagation [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 111-1149.
- [13] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.
- [14] Xu S L, Reinhardt H W. Crack extension resistance and fracture properties of Quasi-Brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(1): 71-99.
- [15] 赵志方, 徐世焯. 混凝土强度对基于粘聚力的新  $K_R$  阻力曲线的影响 [J]. 水力发电学报, 2001(3): 11-21.  
Zhao Z F, Xu S L. Influence of concrete strength on new  $K_R$  resistance curve based on cohesive force [J]. Journal of Hydropower, 2001(3): 11-21. (in Chinese)
- [16] 张秀芳. 混凝土裂缝扩展全过程的新  $G_R$  阻力曲线理论和能量转化分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
Zhang X F. New  $G_R$  resistance curve theory and energy conversion analysis of the whole process of concrete crack propagation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 易富民. CFRP 加固带缝混凝土梁的断裂特性 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
Yi F M. Fracture characteristics of concrete beams strengthened with CFRP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] Rooke D P, Jones D A. Stress intensity factors in fretting fatigue [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979, 14(1): 1-6.
- [19] 韩强. CFRP-混凝土界面粘结滑移机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
Han Q. Study on bond-slip mechanism of CFRP-concrete interface [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] 王珍珍, 周智, 白石, 等. 端部锚固 CFRP 板加固 RC 梁 IC 剥离过程非线性分析 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 1-11.  
Wang Z Z, Zhou Z, Bai S, et al. Nonlinear analysis of IC debonding process of RC beams strengthened with end-anchored CFRP plates [J]. Journal of Civil Engineering, 2020, 53(1): 1-11. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)