

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.005

# 基于断裂理论的玄武岩纤维混凝土 双 $K$ 断裂参数及力学性能研究

兰春晖<sup>1,2</sup>, 高建军<sup>1,3</sup>, 田叶<sup>1,4</sup>, 王楠星<sup>1,5</sup>, 高跃云<sup>1</sup>

(1. 山西大学 电力与建筑学院, 山西 太原 030013;

2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 中国中铁六局集团呼和浩特铁路建设有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010000;

4. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250100;

5. 北京建工集团有限责任公司, 北京 101117)

**摘要:** 混凝土基体中纤维材料的加入可以有效抑制开裂,提升其抗变形能力。为深入了解纤维对提升混凝土抗开裂破坏能力的作用,基于断裂理论并通过试件三点弯曲试验,对掺入不同长度和体积分数玄武岩纤维的混凝土在开裂破坏时的力学性能进行了研究,同时通过扫描电镜技术观察纤维的微观断裂特征。结果表明,掺入玄武岩纤维对试件劈裂抗拉强度和抗折强度均有明显改善,较素混凝土试件分别提升29%和22%,其中纤维长度对劈裂抗拉强度影响较小,对抗折强度影响明显;长纤维试件具有较高的韧性和抑制裂缝扩展能力,短纤维试件在荷载施加后后期易产生明显的应变软化现象,表现出显著的脆性断裂特征,而含有中等纤维的试件则同时兼具最高的抵抗初裂和抑制裂缝扩展的能力。研究内容对指导实际工程改善纤维混凝土抗裂性能有一定理论价值。

**关键词:** 起裂初度;失稳断裂初度;玄武岩纤维;断裂能;扫描电镜技术

中图分类号: TU377.9<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0034—09

## Double - $K$ Fracture Parameters and Mechanical Performance of Concrete Incorporating Basalt Fiber

LAN Chunhui<sup>1,2</sup>, GAO Jianjun<sup>1,3</sup>, TIAN Ye<sup>1,4</sup>, WANG Nanxing<sup>1,5</sup>, GAO Yueyun<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030013, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

3. China Railway Sixth Group Hohhot Railway Construction Co., Ltd., Hohhot, InnerMongolia 010000, China;

4. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;

5. Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 101117, China)

**Abstract:** The abilities of anti-crack and deformation of concrete could be significantly prohibited by adding different kinds of fibers. In order to further analyze the influence of fibers on promoting the abilities of anti-crack and damage of concrete materials, the three-point bending test of specimens based on theory of fracture was conducted. The influence of basalt fiber with different length and volume percentage to the mechanical properties of concrete materials during the process of fracture failure was tested. At the meantime, the characters of micro-cracks of basalt fibers were also investigated by SEM technology. The results shown that the splitting tensile strength and flexural strength of concrete adding basalt fibers could be greatly improved. And compared with plain concrete, the splitting tensile strength and flexural

收稿日期:2021-10-30

修稿日期:2021-11-24

基金项目:中铁六局集团有限公司集宁至通辽铁路电气化改造工程研究项目(1101081626797)

作者简介:兰春晖(1995—)男,硕士研究生,研究方向为土木工程结构及材料性能实验及数值模拟。

通讯作者:高建军(1990—)男,技术总工,主要从事土木工程材料性能实验方面的工作。E-mail:bluecat2012@163.com

strength of basalt fiber concrete were increased by 29% and 22%, respectively. The length of fiber has less effect on splitting tensile strength but prominent effect on flexural strength. The concrete with long fiber has higher toughness and better capabilities of prohibiting the propagation of cracks, while the concrete with mid length fiber could control the incipient cracks and prohibit the cracks propagate to the best effects. The concrete with shorter fiber shown obvious phenomenon of strain softening and characters of brittle rupture. This result has certain theoretical value for conducting practical engineering to improve the ability of anti-cracks of fiber concrete.

**Keywords:** Double - K fracture model; fracture parameters; basalt fibers; fracture energy; SEM technology

混凝土是一种良好的复合材料,拥有较高的抗压强度及承压能力,其抗拉强度和应变能力相对较低。将单一或复合纤维作为增强材料加入混凝土中可极大改善混凝土的抗拉抗压强度,提高应变能力与基体韧性,提升混凝土抵抗脆性破坏的能力。由于纤维的几何特征及其与混凝土基体的粘结相互作用,可增强混凝土基体塑性,从而增强脆性混凝土基体的应变能力与抗裂性能<sup>[1-2]</sup>。在混凝土中加入纤维的主要目的是控制裂缝,并借助联结作用提高脆性胶凝基质的断裂韧性。联结作用主要由纤维与基体的抗脱粘、抗滑动的能力控制,这些能力主要和纤维与基体之间的粘结强度情况有关。纤维直径是一个重要参数,较短直径的纤维在混凝土基体中分布更为均匀。如果不考虑添加纤维后可能出现的分散均匀性问题,纤维的存在对减少混凝土中微裂缝和降低渗透性具有很大作用<sup>[3-4]</sup>。除了直径外,纤维长度也是一个重要的参数,目前对于纤维长度对纤维在混凝土基体中分散的均匀性及对混凝土相关力学性能影响的研究还存在争议。

玄武岩纤维是一种新型的绿色无机纤维材料,起源于火成岩玄武岩。与其他纤维相比,玄武岩纤维力学性能优良,化学稳定性高<sup>[5]</sup>。然而玄武岩纤维与混凝土基体的结合在一定程度上会影响纤维力学性能的发挥,使得纤维力学性能稳定性较差。在大量研究中,学者们主要通过试验研究纤维对混凝土韧性、抗裂性能及抗压抗拉性能的改善作用<sup>[6-7]</sup>,而对相关力学理论及微观结构分析较少。本研究主要揭示玄武岩纤维对混凝土的增强作用,研究纤维长度和含量对混凝土力学性能的影响,引入双 K 断裂参数,从机理层面研究玄武岩纤维混凝土在三点弯曲试验断裂破坏下的力学性能。通过分析两个断裂参数的变化研究结构开裂过程力学的性能,以期可以更好地控制裂缝发展,提高结构整体寿命。

## 1 试验双 K 断裂参数研究

混凝土是一种准脆性材料,破坏区域在断裂前

经历了较长的稳定裂纹扩展,称为断裂过程区,且断裂过程区对混凝土的断裂行为有显著影响<sup>[8]</sup>。研究人员提出了几种模型来模拟混凝土的应变软化行为和断裂特性<sup>[9-10]</sup>。根据徐世焱等<sup>[11]</sup>的研究,断裂过程区发展分为三个阶段:裂缝产生、裂缝稳定扩展和失稳断裂。为了研究模拟准脆性材料裂纹扩展规律的力学机理解析解,学者们提出了双 K 断裂参数理论,针对断裂过程区发展的不同阶段,引入了两个断裂参数,均以应力强度因子的形式给出。 $K_{IC}^{ini}$ 为起裂韧度,用以判断结构是否出现开裂现象,通过根据加荷顺序和初始裂缝宽度得到的初始开裂荷载  $P_{ini}$  来计算起裂韧度。失稳断裂韧度  $K_{IC}^{un}$  用以判断裂缝延展是否稳定,通过获得最大开裂荷载  $P_{max}$  和临界有效裂隙长度来计算失稳断裂韧度。裂纹的产生和扩展阶段可以根据材料的两个韧度参数来判断,当加载韧度值低于起裂韧度时,裂纹不扩展,当加载韧度值介于  $K_{IC}^{ini}$  和  $K_{IC}^{un}$  之间时,出现稳定的裂纹扩展;当加载韧度值大于  $K_{IC}^{un}$  时,出现不稳定的裂纹扩展。

断裂能  $G_f$  是裂纹开展方向上单位面积吸收的能量,Hillerborg 等<sup>[12]</sup>提出计算断裂能的标准方法,可以通过计算缺口梁的荷载 - 裂缝张口位移曲线下的总面积和裂缝带总面积的比值得到:

$$G_f = \frac{W_0}{A} = \frac{W_0}{b(h - a_0)} \quad (1)$$

式中: $W_0$  为荷载 - 挠度曲线下的总面积,也指外荷载作用于缺口梁上所做的功; $A$  为裂隙带面积。起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$  和失稳断裂韧度  $K_{IC}^{un}$  通过下式计算:

$$K_{IC}^{ini} = \frac{3(P_0 + mg \times 10^{-2})10^{-3}S \sqrt{a_0}}{2bd^2} g(\alpha_0) \quad (2)$$

$$g(\alpha_0) = \frac{1.99 - \alpha_0(1 - \alpha_0)(2.15 - 3.93\alpha_0 + 2.7\alpha_0^2)}{(1 + 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: $P_0$  为初现裂缝时的荷载; $S$  为底部支撑间距; $a_0$  为缺口梁缺口深度; $b$  和  $d$  分别为试件横截面的宽度和高度; $\alpha_0 = a_0/h$ 。

$$K_{IC}^{un} = \frac{3(P_{max} + mg \times 10^{-2})10^{-3}S \sqrt{a_c}}{2bd^2} g(\alpha_c) \quad (4)$$

$$g(\alpha_c) = \frac{1.99 - \alpha_c(1 - \alpha_c)(2.15 - 3.93\alpha_c + 2.7\alpha_c^2)}{(1 + 2\alpha_c)(1 - \alpha_c)^{3/2}} \quad (5)$$

式中： $P_{max}$  为开裂最大荷载； $S$  为裂隙张开宽度； $\alpha_c$  为临界有效裂隙长度； $b, d$  和  $m$  分别为试件横截面的宽度、高度和试件质量。

$$a_c = \frac{2}{\pi}(d + h_0) \arctan \sqrt{\frac{bEV_c}{32.6P_{max}} - 0.1135} - h_0 \quad (6)$$

式中： $h_0$  为夹式引申义夹片的厚度； $V_c$  是在最大开裂荷载下对应的裂缝张口位移临界值； $E$  为弹性模量。

$$E = \frac{1}{bc_i} \left[ 3.70 + 32.6 \tan^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{a_0 + h_0}{d + h_0} \right) \right] \quad (7)$$

式中： $c_i$  是由荷载 - 裂缝张口位移曲线计算得到的初始挠度， $\mu\text{m}/\text{kN}$ 。

表 2 水泥与粉煤灰的性能及成分

类型	SiO <sub>2</sub> /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	CaO/%	MgO/%	SiO <sub>3</sub> /%	Na <sub>2</sub> O/%	K <sub>2</sub> O/%	烧失量 LOI/%	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
水泥	19.81	5.50	3.35	63.70	1.31	3.34	0.24	0.66	1.85	3110
粉煤灰	52.56	26.46	6.77	2.24	2.13	0.20	0.38	4.22	3.30	2380

表 3 材料用量配合比和塌落度

组别	不同材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )									塌落度/mm
	水泥	硅灰	水	粗骨料 1	粗骨料 2	天然碎砂	河砂	纤维	减水剂	
对照组	350	56	170	472	430	496	483	0.0	3.97	150
FC6-1	350	56	170	471	429	495	482	2.7	4.37	125
FC12-1	350	56	170	471	429	495	482	2.7	4.37	130
FC24-1	350	56	170	471	429	495	482	2.7	4.37	130
FC6-3	350	56	170	470	428	493	480	8.1	4.96	125
FC12-3	350	56	170	470	428	493	480	8.1	4.96	135
FC24-3	350	56	170	470	428	493	480	8.1	4.96	140
FC6-5	350	56	170	468	425	492	479	13.5	5.56	125
FC12-5	350	56	170	468	425	492	479	13.5	5.56	140
FC24-5	350	56	170	468	425	492	479	13.5	5.56	150
FC6-10	350	56	170	459	422	490	475	27.0	7.54	125
FC12-10	350	56	170	459	422	490	475	27.0	7.54	140
FC24-10	350	56	170	459	422	490	475	27.0	7.54	155

注：FC6-1 代表加入长度为 6 mm，体积分数为 0.1% 的玄武岩纤维，其余表示均以此类推；粗骨料 1 为粒径 4 mm ~ 8 mm 的骨料，粗骨料 2 为粒径 8 mm ~ 16 mm 的骨料。

## 2.2 试验方法

对含有不同长度和含量的混凝土缺口梁试件进行三点弯曲试验，抗压强度试验，劈裂抗拉强度试验

## 2 试验方法

### 2.1 试验材料

试验以玄武岩纤维为材料，制备玄武岩纤维增强混凝土 (BFRC) 试件，试验用水泥为山西吉港水泥公司生产的强度为 42.5R 的普通硅酸盐水泥，玄武岩纤维用量按体积比 0.0%、0.1%、0.3%、0.5% 和 1.0% 分别加入，纤维长度分别为 6 mm、12 mm 和 24 mm。粗集料采用最大骨料粒径为 16 mm 的碎石集料，细集料采用天然碎砂和河砂，表观密度分别为 2.68 kg/m<sup>3</sup>、2.72 kg/m<sup>3</sup> 和 2.74 kg/m<sup>3</sup>。玄武岩纤维的性能，水泥和粉煤灰的性能以及混凝土配合比分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 试验用玄武岩纤维性能

直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
9~23	6,12,24	4920	90	2700

以及抗弯强度试验，研究不同玄武岩纤维长度与掺量对试件力学性能的影响。通过 150 mm × 150 mm × 300 mm 的纤维混凝土试件测其轴心抗压和劈裂

抗拉强度。抗弯强度测试采用  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  的纤维混凝土梁试件。弯曲韧性测试采用  $50\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  的纤维混凝土梁试件,梁的跨中处有宽度为  $3\text{ mm}$  的缺口,示意图图 1。试件加载底部支撑间距  $S$  为  $400\text{ mm}$ ,裂隙深度  $a_0$  为  $33\text{ mm}$ ,满足  $S/h = 4$  和  $h/a_0 = 3$ 。试验采用位移控制闭环伺服液压测试系统对试件进行三点弯曲试验,最大加荷为  $100\text{ kN}$ ,加载速率为  $0.01\text{ mm/min}$ 。通过夹式引伸仪测量裂缝张口位移 (CMOD)。在试件两侧各放置两个位移传感器,同时记录试件的竖向垂直挠度,试件裂缝张口位移值达到  $0.2\text{ mm}$  时停止试验。之后对所有试件裂隙进行微观表征,用 SEM 技术观察试验中试件剥离混凝土基质碎片中混凝土与玄武岩纤维相互粘结的情况。

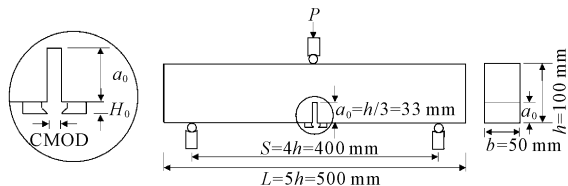


图 1 三点弯曲试验示意图

## 3 试验结果及分析

### 3.1 纤维混凝土和易性

表 3 给出了各试件纤维混凝土的塌落度。通过调整聚羧酸减水剂的用量使混凝土拥有足够的坍落度,纤维含量相同的混凝土加入同等量的减水剂。发现含有较短纤维的混凝土和易性较差,同样纤维含量越高的混凝土和易性也越差,原因可能是随着单一纤维数量的增加,纤维分布的不均匀性变得更为复杂,众多纤维与水泥基质之间的微观结构相互作用使得纤维混凝土流动性变差,黏聚性能下降。一些学者同样得出相似的结论<sup>[13]</sup>,Kabay 等<sup>[14]</sup>指出在同样纤维含量下,随着纤维长度增加,相应的和易性变差,可通过增加减水剂用量来改善和易性。

### 3.2 抗压强度

图 2 给出了含有不同长度和含量纤维的混凝土试样的抗压强度。在纤维掺量为  $0.1\%$  的条件下,混凝土的抗压强度几乎不随掺入纤维长度的变化而改变,然而随着纤维含量的增加,抗压强度与对照组相比均有所提升,这证实了纤维添加对混凝土抗压强度的影响。当掺入体积分数  $0.5\%$  的  $12\text{ mm}$  纤维时,试件的抗压强度达到最高,较对照组增幅为  $3.79\%$ 。掺入  $6\text{ mm}$  纤维的混凝土抗压强度均低于掺入等量其余长度纤维的混凝土抗压强度,而掺入  $1.0\%$ ,  $24\text{ mm}$  纤维的混凝土抗压强度最低,较对照

组降低  $6.18\%$ 。结果表明纤维混凝土的抗压强度与纤维长度和掺量之间存在耦合作用关系,且较高掺量的纤维混凝土抗压强度与塌落度有一定关系,随着混凝土塌落度增加,纤维与混凝土之间的黏聚力下降,纤维抗拔能力减弱,且纤维含量越高影响越明显,同时较高的纤维掺量可能会影响混凝土内部结构的整体密实性,导致纤维与混凝土基体之间的微空隙,从而降低抗压强度。此外,纤维与混凝土骨料界面过渡区的存在也削弱了混凝土整体有效抗压承载面积,进一步削弱抗压强度<sup>[15-16]</sup>。

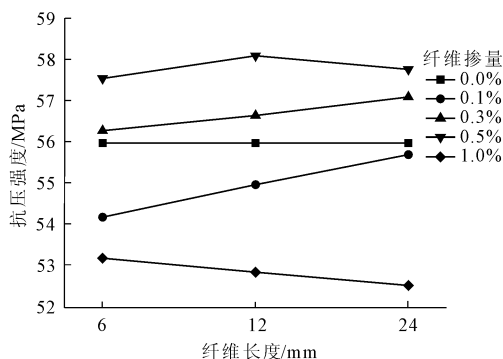


图 2 不同纤维掺量下的试件抗压强度

### 3.3 劈裂抗拉强度和抗折强度

试件的抗折强度和劈裂抗拉强度分别见图 3 和图 4。随着纤维含量的增加,试件劈裂抗拉强度均得到提升,可知纤维含量是影响试件劈裂抗拉强度的决定性因素。当纤维掺量达到最高  $1\%$  时,试件劈裂抗拉强度较对照组均增加  $29\%$ ,与所掺纤维长度无关,且在其余百分比掺量相同的情况下,三种长度的纤维对试件抗拉强度的提升能力极为接近,可知在纤维掺量相同的情况下,纤维长度对试件劈裂抗拉强度几乎没有影响,而掺有高含量且短长度纤维的试件往往具有更好地抵抗开裂与抑制宏观裂纹形成的能力。

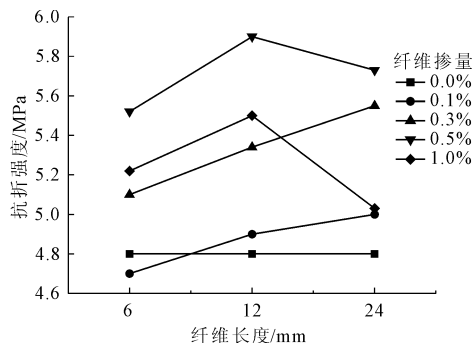


图 3 不同纤维掺量下的试件抗折强度

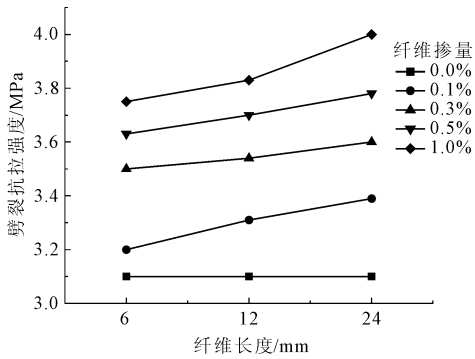


图4 不同纤维掺量下的试件劈裂抗拉强度

掺有体积分数 0.5% 的 12 mm 纤维的试件具有最高的抗折强度,较对照组提升了 22%,同样在纤维长度相同的情况下,0.5% 的掺量的试件具有最高的抗折强度。而掺入 24 mm,掺量 1% 纤维的试件的抗折强度仅提升 4.2%,同样掺入较短长度而较高含量纤维的试件抗折强度提升程度也较低,这可能是在掺入高含量纤维的情况下,纤维之间发生絮凝现象,纤维彼此交互团聚,在一定程度上造成了纤维局部分散不均匀,整体力学性能下降。总体而言,较高含量纤维对试件劈裂抗拉强度提升较为明显,而中等长度中等掺量纤维下试件的抗折强度较高。

### 3.4 荷载 - CMOD 曲线及临界有效裂隙长度分析

从图 5 可以得出,与其他力学性能相比,纤维长度对试件断裂能的提升最为显著,掺入 24 mm, 1.0% 纤维含量的纤维增强混凝土试件 (FC24-10) 的断裂能较对照组提升了 37%,而试件 FC6-10 的断裂能提高仅为 20%,可见在纤维掺量相同的情况下,混凝土的断裂韧性主要受纤维长度影响,且随着纤维长度的增加而显著提升。同样掺有较低含量而较长纤维试件 (如 FC12-5 和 FC24-5) 的断裂韧性仍高于试件 FC6-10。由此可得相较于高含量而短长度纤维试件,含有长纤维的试件具有更好地断裂韧性。

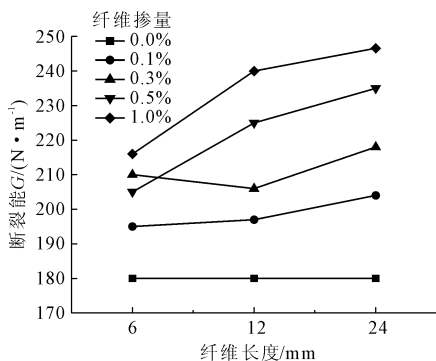
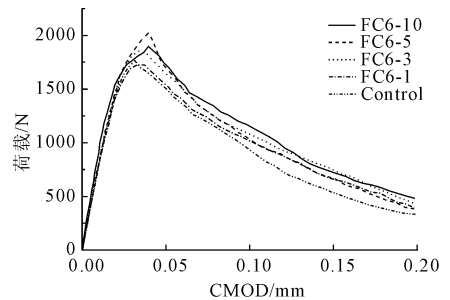
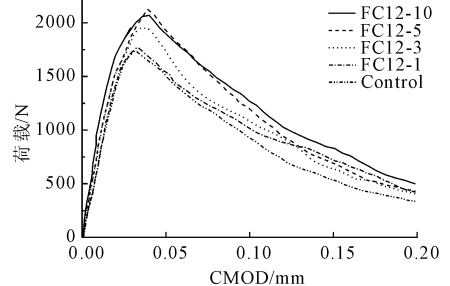


图5 不同纤维掺量下的试件断裂能

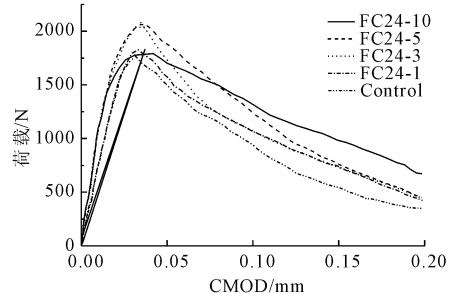
从图 6 和图 7 即含有不同纤维长度和纤维含量试件的荷载 - CMOD 曲线可以看出,纤维的加入显著改善了试件整体抗断裂性能,增加了峰值载荷和断裂强度,明显改善了峰后应变软化行为,使结构更为坚固。分析可得,玄武岩纤维混凝土在三点弯曲试验下的开裂过程与其余如紧凑拉伸或楔入劈拉试件的开裂行为较吻合<sup>[17-18]</sup>。在第一阶段,随着荷载增加,荷载 - CMOD 曲线呈近似线性增长,曲线呈线性增长趋势,这一阶段可认为是线弹性阶段;第二阶段当荷载达到裂缝初现荷载  $P_0$  时,试件下端中部开始有尖锐裂纹出现,且由于混凝土基体存在的粘聚性能,在荷载达到开裂最大荷载  $P_{max}$  前,裂缝宽度随着荷载增加而平稳扩展;当荷载超过  $P_{max}$  后,裂隙扩展进入第三阶段,即裂缝宽度进入不稳定扩大阶段,且开裂速度明显快于上一阶段。



(a) 含 6 mm 纤维试件的荷载 - CMOD 曲线



(b) 含 12 mm 纤维试件的荷载 - CMOD 曲线



(c) 含 24 mm 纤维试件的荷载 - CMOD 曲线

图6 含不同长度纤维试件的荷载 - CMOD 曲线

本试验中,在纤维掺量相同的情况下,长纤维试件 (FC24-10, FC24-5, FC24-3, FC24-1) 在第三阶段荷载的下降较平缓,而其余试件均一定程度上存在

荷载陡降现象,即存在明显的荷载峰后应变软化现象。如前分析,由于较长纤维的存在,试件断裂能增大,对应断裂韧性提升,有效提升试件抗开裂能力,在达到开裂峰值荷载  $P_{\max}$  后可以有效削弱继续开裂过程中的应变软化现象,一定程度上削弱试件的脆性提高延性,而含有短纤维试件在加载开裂过程中仍是材料的脆性特征为主导,且较短纤维无法为试件提供足够的断裂能,致使其在达到峰值荷载后续阶段出现明显的应变软化现象,表现出显著的脆性断裂特征。随着裂缝宽度继续扩张并宽通整个试件时完全断裂破坏。裂缝扩展过程中,裂纹基本表现为垂直扩张,即可以忽略扩张过程中偶尔的偏离现象,可认为 II 型断裂影响产生的效应可以忽略<sup>[19]</sup>,断裂过程主要为 I 型断裂。

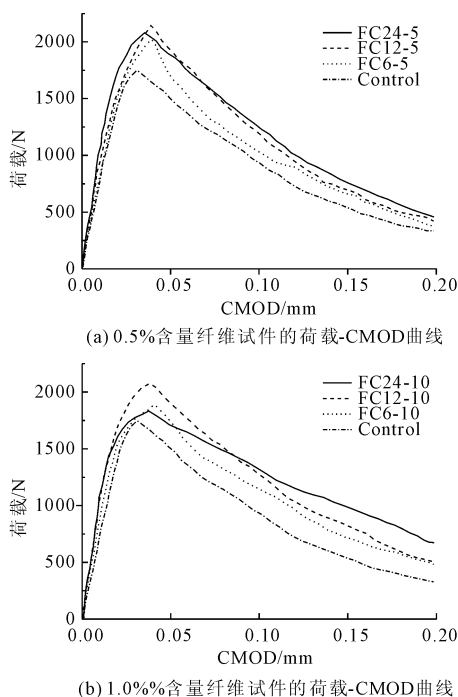


图 7 不同纤维掺量试件的荷载 - CMOD 曲线

试验发现试件 FC6-10 的临界有效裂隙长度最大,反映了试件在达到失稳破坏时的开裂程度最大,进一步印证了短纤维混凝土较差的抗裂能力。根据荷载 - CMOD 曲线得出的规律可以检测实际含纤维试件的预裂行为,但试件整体的韧性要根据裂前和裂后行为及力学性能共同评判。根据试验及式(6)分别计算各试件的临界有效裂隙长度  $a_c$ ,并计算平均等效临界裂隙长度,由图 8 可知含 24 mm 纤维试件的平均等效临界裂隙长度为 0.167 mm,较含 6 mm 纤维试件降低了 40.7%,同时在试验中验证当裂缝向试件上不断扩散时,由于边界效应<sup>[20-21]</sup>的影

响,试件边界会对对裂缝的扩展起到约束作用,且本试验通过 SEM 观察并推广到微观层面得出较长长度纤维的存在可以起到类边界效应,即纤维的存在一定程度上可以在微裂缝与纤维交互区域对裂隙的扩展起到抑制作用,且在试验范围内纤维长度越长,可约束的微裂隙数量越多,直至纤维断裂。

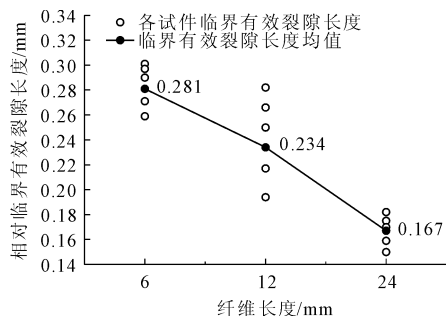


图 8 试件相对临界有效裂隙长度

### 3.5 弹性模量计算分析

弹性模量由式(7)并根据从荷载 - CMOD 曲线斜率获得的初始柔度值  $c_i$  计算得出,结果如图 9 所示,试验所得弹性模量值与计算值基本符合。含有较高含量长纤维试件(FC24-3, FC24-5, FC24-10)计算弹性模量值较高,刚度较高,分别达到 30.5 MPa、31.3 MPa 和 32.5 MPa,而含有较低含量纤维的试件(如 FC6-1, FC12-1, FC24-1)弹性模量较对照组变化很小,可见纤维长度对试件弹性模量的影响十分明显。同样,1% 含量纤维试件(BF6-10, BF12-10, BF24-10)的弹性模量明显高于其余试件,较对照组分别增长 9.6%、23% 和 25%,各达到 28.5 MPa、32.0 MPa 和 32.5 MPa,可知高含量纤维对试件弹性模量及整体刚度有较大提升作用,但在纤维较长情况下弹性模量随纤维含量增加而增长的趋势不再明显。

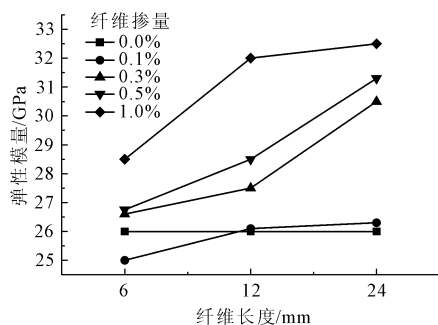


图 9 不同纤维掺量下的缺口梁试件三点弯曲试验弹性模量

### 3.6 双 K 断裂参数结果分析

通过试验数据及式(2)一式(5)分别计算得到各试件在不同纤维含量及长度下的起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$  与

失稳断裂韧度  $K_{IC}^{III}$  以及两者各自的均值,如图 10 所示,以此表征裂隙产生与扩展的过程以及纤维混凝土试件在弯曲荷载作用下抵抗开裂的能力。含有体积分数 0.5% 纤维的试件 (FC6-5, FC12-5, FC24-5) 拥有较高且相近的起裂韧度  $K_{IC}^{I}$ , 分别为 0.572 MPa/m<sup>1/2</sup>、0.603 MPa/m<sup>1/2</sup> 和 0.581 MPa/m<sup>1/2</sup>, 当相同纤维长度试件的纤维含量提升至 1% 时,  $K_{IC}^{I}$  较含量 0.5% 时均有所下降, 且试件 FC24-10 的  $K_{IC}^{I}$  较 FC24-5 降幅最为明显, 高达 14.8%, 为 0.495 MPa/m<sup>1/2</sup>, 可见纤维含量 0.5% 时试件具有最好的抵抗初裂性能, 而试件在含有最长 24 mm 纤维且较高含量时 (FC24-5, FC24-10) 的起裂韧度较 FC12-5 和 FC12-10 有明显下降, 可知含有长纤维的试件更易最先产生初裂, 尤其在较高含量长纤维试件中最为显著, 总体可知在 0.5% 纤维含量下中等纤维长度的试件抗初裂能力最强。对失稳断裂韧度  $K_{IC}^{III}$  的分析发现, 在含 6 mm 和 12 mm 纤维的试件中, 失稳断裂韧度  $K_{IC}^{III}$  均随纤维含量的增加而增加, 而对于含 24 mm 纤维的试件当纤维含量达到 1% 时, 试件  $K_{IC}^{III}$  反而下降。其中试件 FC12-10 的  $K_{IC}^{III}$  最高, 较对照组增幅为 37%, 达到 1.26 MPa/m<sup>1/2</sup>, 同样试件 FC12-5, FC24-5 的  $K_{IC}^{III}$  也较高, 较对照组分别增长 28.3% 和 27.9%, 因而当超过最大开裂荷载  $P_{max}$  后, 试件 BF12-10 可以更好削弱裂隙的进一步不稳定扩展, 综上可知含有中等长度纤维的试件具有较高的  $K_{IC}^{I}$  和  $K_{IC}^{III}$  值, 且在此长度下纤维含量 0.5% 和 1.0% 时试件拥有良好的综合抗开裂能力, 试验结论也与国内外一些学者的相关试验相符合<sup>[22]</sup>。

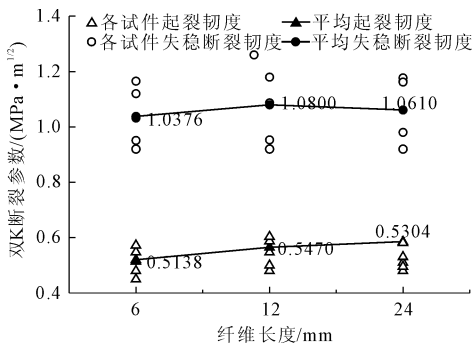


图 10 双 K 断裂参数计算值

国外学者 Kumar 等<sup>[23]</sup> 首次提出利用脆性指数  $\beta_B$  作为表征试件在荷载作用下由起裂韧度  $K_{IC}^I$  向失稳断裂韧度  $K_{IC}^{III}$  变化过程的指标。通过计算每个试件  $K_{IC}^I$  与  $K_{IC}^{III}$  的比值得到其脆性指数, 脆性指数越低表明材料的延性越好, 抗裂性能越好。各试件脆性

指数结果见图 11, 试件 FC6-10, FC12-10 和 FC24-10 的脆性指数均低于其余纤维含量的试件, 分别为 0.480, 0.455 和 0.470, 综合得出掺入较高含量纤维对试件整体延性的较好改善作用。

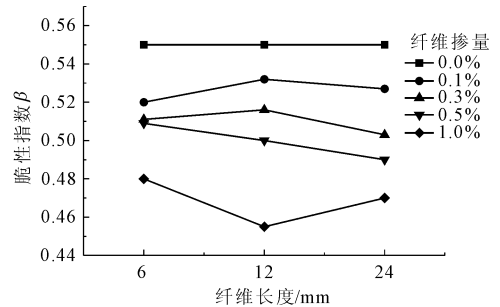


图 11 不同纤维掺量下的脆性指数值

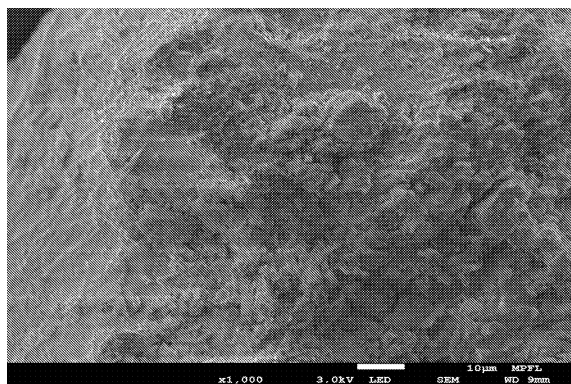
### 3.7 微观界面分析

对试件开裂处剥离物进行扫描电镜观察, 发现纤维含量较高的试样有大量破碎的松散纤维滑落并包覆于断裂纤维周围, 同时在较短纤维试样中发现纤维取向一致, 团聚紧密的集中分散不均匀现象。在所有试样中均发现玄武岩纤维表面上覆盖着大量的水化产物水化硅酸钙相, 在微观层面上增强纤维的机械粘合性能, 使其与混凝土基体更紧密地结合而避免相对滑动。随着水泥基体裂隙的出现, 开裂处玄武岩纤维开始消耗其积聚的断裂能, 并通过桥接粘结作用抑制裂缝的扩展, 从而提高混凝土的极限强度和延性。纤维含量较高的试样在开裂后也可保持较完整的基体结构, 而在含较短纤维的试样有纤维拔出脱离混凝土基体而产生的空隙, 见图 12。

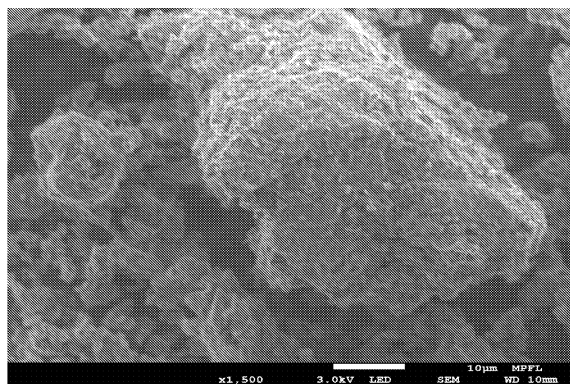
## 4 结论

本试验充分考虑玄武岩纤维的添加对混凝土试件力学性能及双 K 断裂参数的影响, 缺口梁试件在三点弯曲试验过程中跨中处于纯弯状态, 不考虑横力弯曲的影响, 裂隙沿缺口方向近似直线扩展而忽略偏离效应, 因而试件整体开裂可视为 I 型断裂过程。通过给出纤维长度和含量两个变量, 结合断裂力学, 脆性指数, 边界效应等相关理论对玄武岩纤维混凝土开裂过程进行了系统研究, 主要得出以下结论:

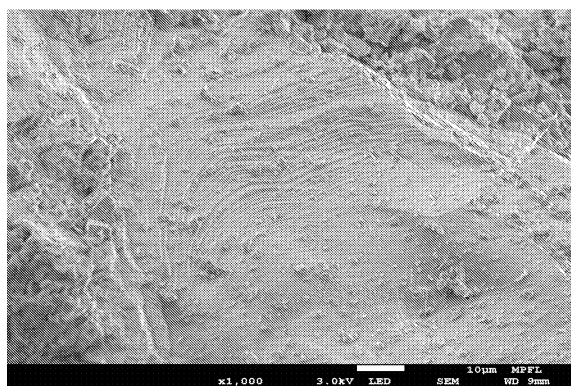
(1) 加入玄武岩纤维的试样的抗压强度并没有显著提高, 其中掺入体积分数 0.5% 的 12 mm 纤维试件抗压强度提升幅度最高为 3.79%, 而掺入体积分数 1.0% 的 24 mm 纤维的混凝土抗压强度较对照组降幅最高达 6.18%。



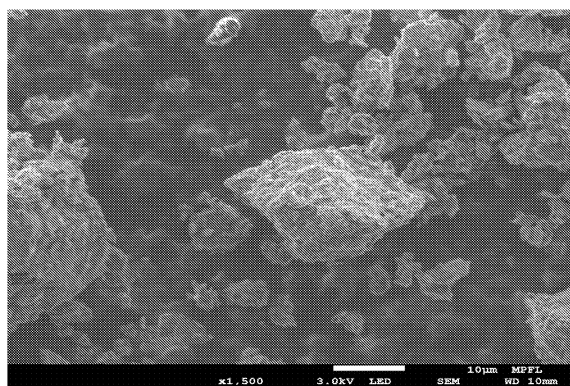
(a) 纤维韧性断裂区域



(b) 纤维团聚集分布现象



(c) 纤维表面少量水化产物



(d) 纤维脱离混凝土基体

图 12 微观扫描电镜图像

(2) 试件的拉伸性能有较大提升,劈裂抗拉强度和抗折强度均有较大幅度改善。当纤维掺量达到最高 1% 时,试件劈裂抗拉强度最高增加 29%,且与纤维长度无关,而掺有体积分数 0.5% 的 12 mm 纤维的试件具有最高的抗折强度,较对照组提升 22%,可知纤维长度中等,含量适中条件下对试件抗折强度改善最明显。

(3) 研究基于宏观裂隙扩展的边界效应提出了微观层面的“类边界效应”概念,即纤维的存在一定程度上可以在微裂缝与纤维交互区域对裂隙的扩展起到抑制作用,且在试验范围内纤维长度越长,可约束的微裂隙数量越多,直至纤维断裂,并通过 SEM 观察得到相应验证。

(4) 掺有 1% 含量的 24 mm 纤维试件拥有最高的断裂能,较对照组提高 37%,且中长纤维试件断裂能明显高于缩短纤维试件的断裂能,具有更高的韧性与抗裂能力,短纤维试件荷载施加后期易产生明显的应变软化现象,表现出显著的脆性断裂特征。由双 K 断裂参数分析知 0.5% 纤维含量下中等纤维长度的试件抗初裂能力最强,而含有长纤维试件更易产生初裂。含有中等长度纤维试件的  $K_{IC}^{ini}$  与  $K_{IC}^{un}$

值均最高,此类试件具有较好的抗裂能力。

#### 参考文献:

- [1] 赵继忠,史玉良,李鑫磊,等. 纤维分布对聚合物水泥混凝土力学性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(11):55-58,72.
- [2] 池寅,尹从儒,徐礼华,等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土单轴循环受压力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2021(11):1-15.
- [3] 邓国强,王安宝,杨秀敏,等. 配筋超高强混凝土抗侵蚀性能对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10):30-35,46.
- [4] Smarzewski P. Flexural toughness evaluation of basalt fibre reinforced HPC beams with and without initial notch [J]. Composite Structures, 2020, 235:111769.
- [5] 赵高锦,赵卓,陈歆,等. 玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1):103-107.
- [6] Baasankhuu B, Choi D, Ha S. Behavior of small-scale concrete cylinders in compression laterally confined by basalt fiber and PEN fiber reinforced polymer composites [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14(2):484-490.
- [7] 陈倩. 聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土抗拉

- 强度的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6):113-116, 199.
- [8] 张俊, 陈红鸟, 王德强. 基于 DIC 技术的混凝土往复荷载下断裂力学特性研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4):1636-1643.
- [9] Wolenski A, Monteiro A B, Penna S S, et al. Damage propagation using novel G/XFEM strategies: computational aspects and numerical investigations[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(13):80-93.
- [10] 吴乔, 董伟, 李杰. 长期荷载对混凝土断裂性能影响的试验与数值研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3):155-160, 174.
- [11] 徐世焯, 张秀芳, 郑爽. 小骨料混凝土双 K 断裂参数的试验测定[J]. 水利学报, 2006, 37(5):543-553.
- [12] 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, 2008, 6(6):773-781.
- [13] 陈峰宾, 许斌, 焦华喆, 等. 玄武岩纤维混凝土纤维分布及孔隙结构表征[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2):273-280.
- [14] Kabay N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50:95-101.
- [15] 刘钢, 王伟亚, 陈北齐, 等. 粉煤灰对玻化炉渣路面混凝土界面微观结构改善影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8):7-11.
- [16] 王志良, 张跃, 申林方, 等. 考虑微观结构影响的混凝土界面过渡区裂隙渗流-溶蚀耦合模型[J]. 工程力学, 2021, 38(6):133-142.
- [17] Qing L B, Li Q B. A theoretical method for determining initiation toughness based on experimental peak load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 99(1):295-305.
- [18] 陆洲导, 俞可权, 苏磊, 等. 高温后混凝土断裂性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6):836-840.
- [19] Hu X Z, Duan K. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ[J]. International Journal of Fracture, 2008, 154(1/2):3-14.
- [20] Hu X Z, Guan J F, Wang Y S, et al. Comparison of boundary and size effect models based on new developments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175(7):146-167.
- [21] 管俊峰, 王强, 等. 考虑骨料尺寸的混凝土岩石边界效应断裂模型[J]. 工程力学, 2017, 34(12):22-30.
- [22] 管俊峰, 姚贤华, 白卫峰, 等. 由小尺寸试件确定混凝土的断裂韧度与拉伸强度[J]. 工程力学, 2019, 36(1):70-79.
- [23] Kumar S, Barai S V. Determining double - K fracture parameters of concrete for compact tension and wedge splitting tests using weight function[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76:935-948.

(上接第 25 页)

- [14] 何春梅. 循环动载下泥质软岩力学行为及库区软硬互层边坡动力稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [15] 黄达, 黄润秋, 雷鹏. 贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7):1229-1237.
- [16] 王刚, 张学朋, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的岩石节理面剪切破坏微观机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4):1442-1453.
- [17] 刘新荣, 许彬, 黄俊辉, 等. 多形态贯通型岩体结构面宏观细观剪切力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3):406-415.
- [18] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 岩石节理峰前循环直剪试验颗粒流宏观细观分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7):2103-2115.
- [19] 王雅婷, 崔精. 基于 PFC<sup>2D</sup> 的断续岩桥直剪强度特征及能量演化机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5):234-238.
- [20] 郑泽松, 熊传祥, 王涛. 发育软弱结构面土坡破坏细观机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1):92-96.
- [21] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [22] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [23] 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB 51016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.