

文章编号: 1001-4888(2009)03-0215-08

# 光弹性贴片法研究钢纤维 活性粉末混凝土断裂性能\*

毛灵涛<sup>1</sup>, 王文贞<sup>2</sup>, 刘红彬<sup>1</sup>, 鞠杨<sup>1</sup>, 柳喜<sup>1</sup>, 张国栋<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454000)

**摘要:** 采用预制裂缝的三点弯曲试件, 应用光弹性贴片法研究了不同纤维掺量活性粉末混凝土 RPC200 的断裂性能。实验获取了光弹贴片所显示的裂缝扩展全过程, 由光弹性条纹分析了不同纤维掺量试件的初裂荷载及临界有效裂缝长度的变化规律。实验表明, 利用光弹性贴片法可以有效的获取钢纤维混凝土裂缝扩展的全过程; 随着钢纤维掺量的增加, 试件的初裂荷载和峰值荷载得到相应提高, 且峰值荷载呈近似线性的增加; 当纤维掺量为 1% 时, 临界有效裂缝长度值最大; 纤维掺量继续增加, 其分布均匀性下降, 试件的韧性降低, 临界有效裂缝长度减少。

**关键词:** 光弹性贴片; 钢纤维活性粉末混凝土; 断裂

**中图分类号:** O348.1; TU528      **文献标识码:** A

## 0 引言

活性粉末混凝土(简称 RPC)是 1993 年由 Richard 等人研发成功的一种超高强度水泥基复合材料<sup>[1]</sup>, 它具有超高强度、高韧性和高耐久性等优点, 其中掺入钢纤维能够有效地阻碍混凝土内部微裂缝的发展和阻滞宏观裂缝的发生和扩展, 从而克服高强混凝土的脆性, 改善其抗拉、韧性和变形性能。在一定工艺条件下, RPC 的抗折强度可达 100MPa, 断裂能可达  $4 \times 10^4$  J/m<sup>2</sup>。作为一种新兴的高性能混凝土, RPC 在道路、桥梁和军事工程等领域得到了迅速发展和应用<sup>[2-3]</sup>。对于 RPC 工程材料, 在工作状态下发生断裂是极不安全的, 可能导致结构的突然失效, 引发工程事故。因此, 进行 RPC 静态断裂性能研究是非常必要的<sup>[4-7]</sup>。

光弹性贴片法具有实时、直观、精确和便于保存等优点, 可直观地观测裂缝稳定扩展长度及扩展方向, 对研究混凝土的断裂机理和断裂特性有着重要的学术意义和实际应用价值<sup>[8-11]</sup>。本文将光弹性贴片法应用于钢纤维活性粉末混凝土断裂性能的研究中, 观测不同钢纤维体积掺量的活性混凝土裂缝扩展过程, 进而分析不同体积掺量对钢纤维活性混凝土断裂性能的影响。

## 1 试件的制备

### 1.1 混凝土梁的制备

本文试验采用三点弯曲梁试件, 试件尺寸见图 1。图中  $a_0$  为预置裂缝的宽度; 按纤维体积率的变化, 将试件分为 4 组, 每组 3 个试件。试件的钢纤维体积掺量分别为 0%、1.0%、2.0%、3.0%, 对应编号为 0、1、2、3, 试件配比详见表 1, 所掺钢纤维为超细超短剪切型, 直径 0.2mm~0.22mm, 平均长度

\* 收稿日期: 2008-11-07; 修订日期: 2009-04-03

基金项目: “北京市重点实验室项目(JD102900671)”和“新世纪优秀人才项目(NCET-05-0215)”资助

通讯作者: 毛灵涛(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向光测力学与图像处理。E-mail: mlt@cumtb.edu.cn

13mm,长径比为65。

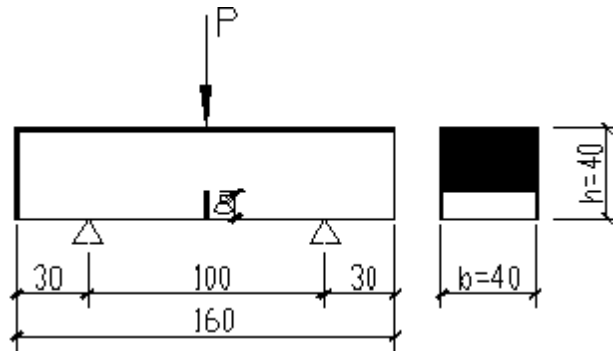


图1 三点弯曲梁试件及加载示意图

Fig. 1 Sketch map of bending specimens

裂缝采用预制法制作,在试件模具隔板内部预先设置槽缝,浇注前将厚0.1mm,宽12mm的薄铁片垂直插入槽缝。待浇注完毕,养护试件超过24h后,将薄铁片抽出,形成一道预留缝。

表1 试件成分及配合比

Tab. 1 Ingredients and mixing proportion of specimens

水胶比 (W/B)	胶凝材料组成		石英砂		石英粉 (QU/C)	减水剂 (%)	90℃热水 养护时间
	水泥(C)	硅灰(SF/C)	中砂(S/C)	细砂(S/C)			
0.19	1	0.28	0.84	0.28	0.39	3	72h

## 1.2 光弹性贴片的选择

本文试验采用 Vishay Micro-Measurements Group Inc. 生产的 PS-1 型贴片和 PC-1 型胶粘剂。在 RPC200 梁试件上贴整片贴片,贴片尺寸为  $b \times h \times l = 35\text{mm} \times 35\text{mm} \times 155\text{mm}$ ,为了使贴片上反映的应变场能尽量接近实际情况,将各试件上的光弹性贴片中部也都预制了与试件相同长度的裂缝。粘贴时,将贴片的缝端与试件的缝端相重合。由光弹性贴片法原理<sup>[12]</sup>可知:

$$\epsilon_{1c} - \epsilon_{2c} = \epsilon_{1s} - \epsilon_{2s} = \frac{f_{\epsilon} N}{2t_c} \quad (1)$$

式中:  $N$  为被测点的条纹级数;  $t_c$  为光弹性贴片的厚度;  $f_{\epsilon}$  为材料的应变条纹值,由贴片材料的光学系数及所用光源确定;  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为主应变,下标  $c, s$  分别表示贴片与试件。

试验中,采用白光光源,并经滤光镜头获取单色条纹图,贴片材料的应变条纹值为一常数。定义  $C_c = 2t_c / f_{\epsilon}$  为贴片的灵敏度,可知贴片和灵敏度与贴片厚度成正比,与材料应变条纹值成反比。贴片的灵敏度高,相同的主应变差值所产生的条纹数也相应增加,从而提高了量测的精度。增大贴片厚度,有助于提高贴片的灵敏度,但贴片过厚,将对被测件起增强作用,影响测量结果。

表2 RPC200 基本力学性能参数

Tab. 2 Mechanical performance parameter of RPC200

纤维掺量 $\rho_v$ /%	100mm 立方体 抗压强度 /MPa	Φ100 圆柱体 抗压强度 /MPa	100mm 立方体 劈裂抗拉强度 /MPa	40mm×40mm×160mm 梁弯折抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
0.0	157.53	155.97	7.63	16.63	48.13
1.0	168.83	166.27	14.67	16.65	49.30
2.0	190.67	176.30	21.90	28.05	50.23
3.0	205.23	179.17	22.53	34.51	52.37

通过早期试验所测得的 RPC200 的基本力学性能参数如表 2 所示<sup>[13]</sup>,取表中梁弯折抗拉强度所对应的应变值为极限拉伸应变值,将相应参数代入应变—光学定律可得到当试件开裂时贴片上所对应的条纹级数  $N$ :

$$N = \frac{2(1 + \mu_s) t_c \epsilon_s}{\left[ 1 + \frac{t_c}{t_s} \cdot \frac{E_c}{E_s} \cdot \frac{1 + \mu_s}{1 + \mu_c} \right] \cdot f_\epsilon} \quad (2)$$

式中,  $E_c$  为 2.5GPa;  $\mu_c$  为 0.38;  $f_\epsilon$  为  $3.83 \times 10^{-3}$  mm/条,可选的贴片厚度  $t_c$  有 3.05mm, 2.05mm, 1mm, 0.5mm, 0.25mm,图 2 给出了不同厚度情况下,每一种纤维掺量的 RPC 试件开裂时贴片所对应的条纹数,可以看出条纹级数与贴片厚度近似成正比。

一般情况下  $t_c \ll t_s, E_c \ll E_s$ ,因此:

$$\left[ 1 + \frac{t_c}{t_s} \cdot \frac{E_c}{E_s} \cdot \frac{1 + \mu_s}{1 + \mu_c} \right] \approx 1$$

式(2)可写为:

$$N \approx \frac{2(1 + \mu_s) t_c \epsilon_s}{f_\epsilon} \quad (3)$$

从而也可看出  $N$  与  $t_c$  的正比关系。

针对四种不同配比的试件,为了能得到较高的贴片灵敏度,试验中选取的光弹性贴片厚度为 3.05mm,图 3 为试件图片。此时,由式(1)可得:

$$\epsilon_{1c} - \epsilon_{2c} = \epsilon_{1s} - \epsilon_{2s} = 628 \times 10^{-6} N \epsilon$$

即贴片上的每一级条纹代表  $628\mu\epsilon$ 。

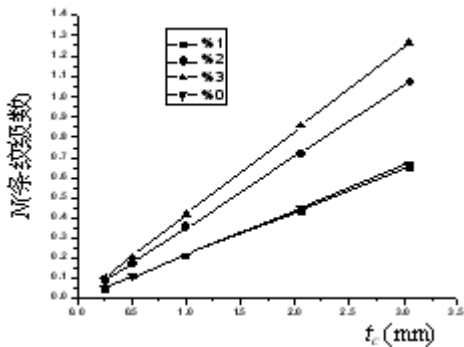


图 2 贴片厚度与条纹级数关系  
Fig. 2 Relationship between coating thickness and fringe number



图 3 粘贴贴片后的部分试件  
Fig. 3 Some specimens under coatings

## 2 三点弯曲试验及结果分析

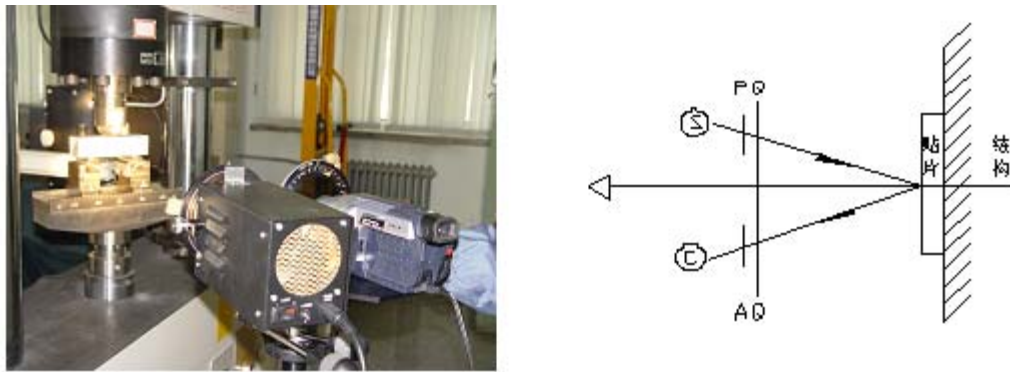
### 2.1 试验概况

在试验中,采用的加载设备为 SHIMADZU SERVOPULSER. EHF-EG 伺服疲劳试验机,加载控制方式采用位移控制,加载速度 0.0005 mm/sec。采用 Vishay 的 LF/Z-2 反射式光弹仪,利用摄像机实时记录试件整个加载过程。图 4 为试验装置及光路图,光源为白光光源,在摄像机镜头前加滤波片将图像转换为单色图像,以提高条纹的分辨率,试验中采用暗场进行观测。

### 2.2 光弹性分析

图 5 至图 8 分别为不同纤维率试件,光弹性贴片所显示的裂缝扩展过程,各图中的条纹反映了试件表面主应变差的分布情况。图 9 为各个试件载荷与挠度曲线。从图 5 至图 8 可以看出,在裂缝尖端存在严重的应变集中,光弹性贴片裂缝尖端的条纹呈双对称蝴蝶状分布特性。在裂缝扩展过程中,条纹具有良好的对称性,这反映了 RPC200 具有较高的匀质性。在距离裂缝较远的区域,见试件左右两侧边缘

区域,由于受到边界条件的影响,条纹的对称性有所降低。零纤维 RPC200 试件的断裂破坏过程短暂,破坏荷载不高,在达到荷载峰值时,贴片上的条纹级数也达到了最大值。对于掺加钢纤维的 RPC200 试件,由于钢纤维阻止了混凝土内部微裂纹等缺陷的发展,延缓了初裂的发生,提高了初裂荷载。开裂后,尽管基体已发生开裂,但跨越在裂缝处的钢纤维开始承受 RPC 基体与钢纤维接触面传递的应力,从而使试件能继续承受更大的荷载并产生弹塑性变形,此时贴片上的条纹级数不断增加,条纹的增加反映了试件承载的增加;从荷载接近峰值开始,试验中可以较清晰地听到试件中钢纤维不断被拔出的声音,而伴随着纤维不断被拔出的过程,相应  $P-\delta$  曲线产生上下波动;进入峰值后的残余应力阶段后,挠度增加很大而荷载减小缓慢,在试件几乎丧失承载力时,断面内仍有少量钢纤维相连,裂缝继续扩张;试件由于受钢纤维拉拔力的影响,试件表面应变增大,致使贴片上的条纹数增加,因此,过峰值以后,贴片上条纹的增加反映的是钢纤维拉拔力,而不再反映试件承载力了。



S:光源 P:起偏镜 Q:四分之一波片 A:分析镜 C:摄像机

图4 试验装置及光路图

Fig. 4 Experiment setup and beam path sketch

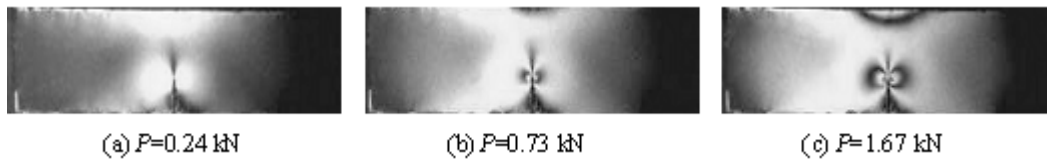


图5 纤维率为0%试件光弹性图

Fig. 5 Photoelasticity of specimen with 0% fiber volume

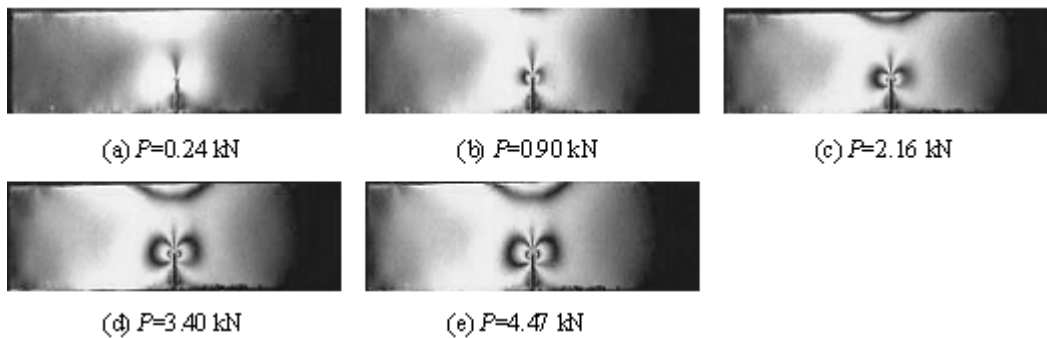


图6 纤维率为1%试件光弹性图

Fig. 6 Photoelasticity of specimen with 1% fiber volume

根据式(2)可以计算出对应不同纤维率试件开裂时的条纹级数,如  $\rho_v=0\%$  时,可知起裂时条纹级数应为  $n=0.66$ (在灰度图上,  $n=0$  时为灰度值最小,  $n=0.5$  时为灰度值最大)也即在白色即将变为灰色时,意味着试件已经开裂,此时所对应的荷载也即试件的初裂荷载  $P_{ini}$ 。条纹的发源点即为试件裂缝的延伸端点,通过达到峰值时的图像可以测取裂缝的扩展长度  $\Delta a_c$ ,则临界有效裂缝长度  $a_c = a_0 + \Delta a_c$ 。

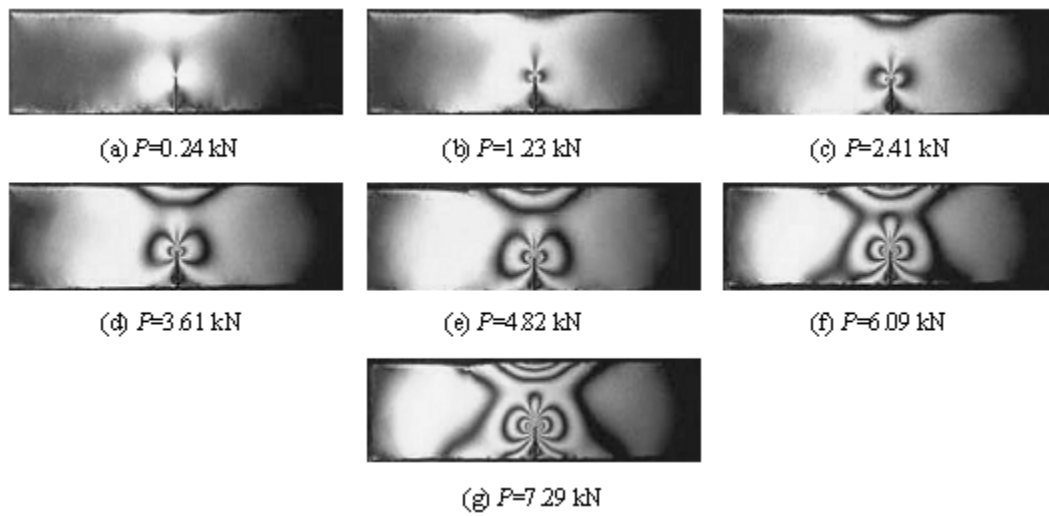


图 7 纤维率为 2% 试件光弹性图

Fig. 7 Photoelasticity of specimen with 2% fiber volume

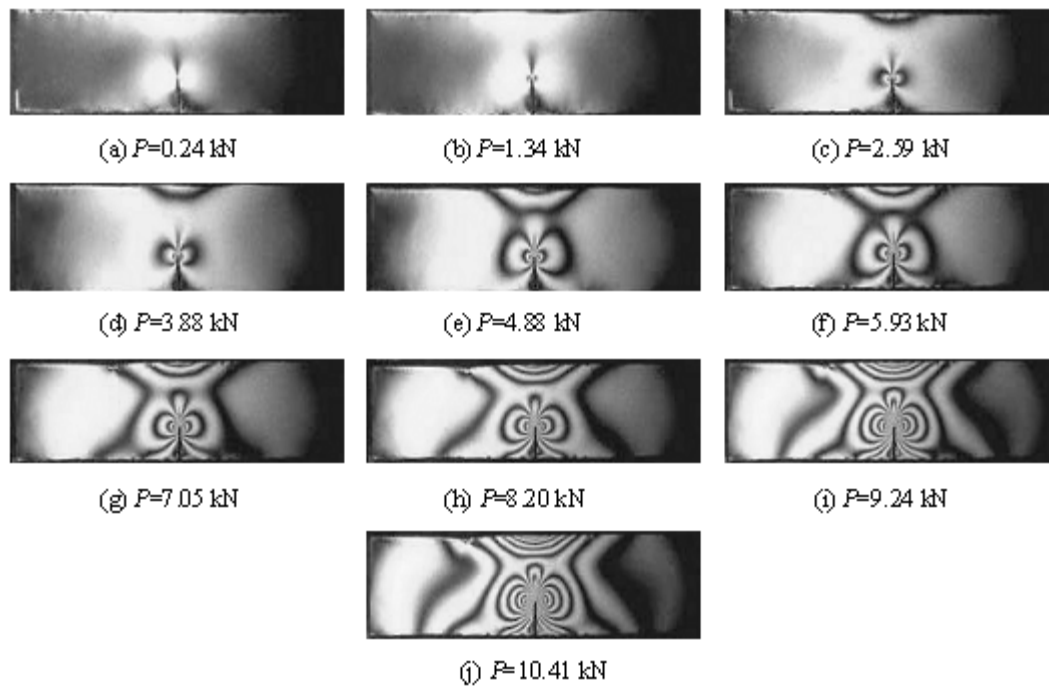
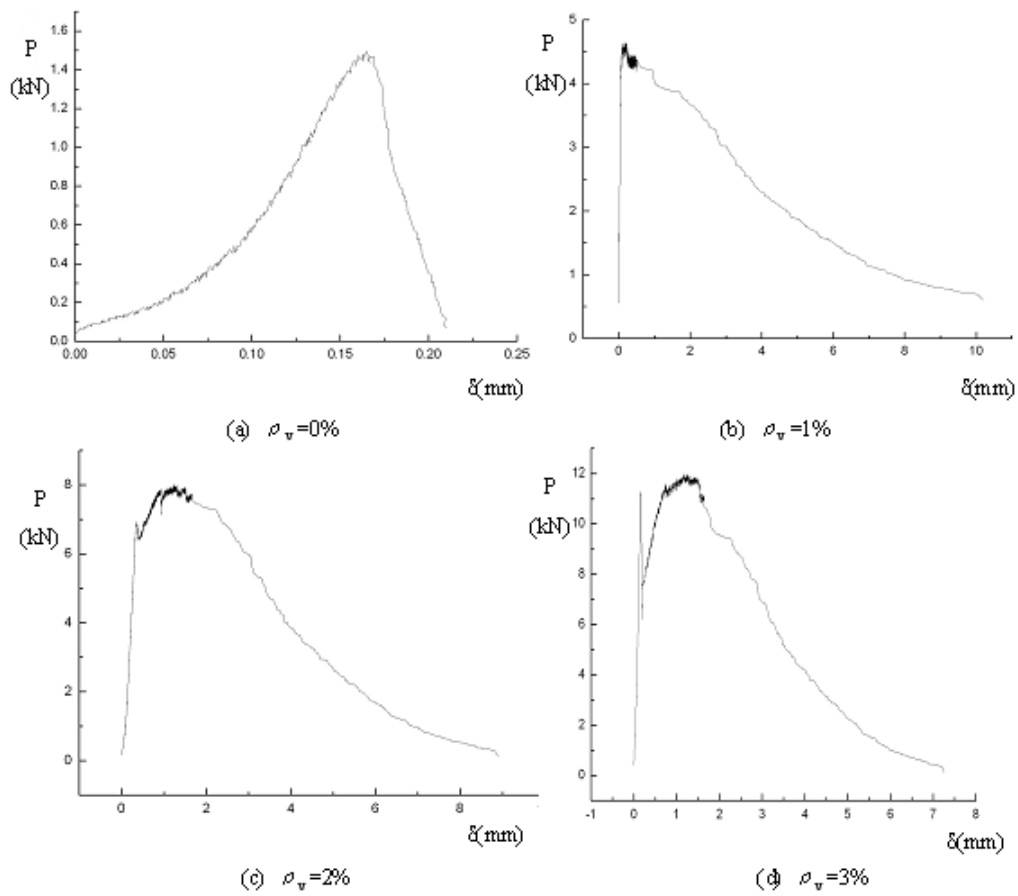


图 8 纤维率为 3% 试件光弹性图

Fig. 8 Photoelasticity of specimen with 3% fiber volume

峰值荷载  $P_{max}$  由试件的载荷与挠度曲线获得。表 3 列出了试验中所得各试件的初裂荷载  $P_{in}$ ，峰值荷载  $P_{max}$  和临界有效裂缝长度  $a_c$ 。图 10 为初裂荷载，峰值荷载随钢纤维掺量的变化曲线，可以看出，随着钢纤维掺量的增加，峰值荷载近似线性增加，初裂荷载也有明显增加，但增幅没有峰值荷载大；钢纤维掺量由 1% 增到 2%，相应的初裂荷载增幅较大。

图 11 给出了临界有效裂缝长度  $a_c$  随钢纤维掺量变化曲线，纤维率为 1% 时，裂缝扩展长度最大，当纤维掺量继续增加，裂缝扩展长度反而减少，说明纤维含量在达到一定值后，再继续增加纤维掺量无助于试件韧性的提高。笔者认为当纤维掺量超过 2% 以后，纤维分布不均匀性增加，尤其在预制裂缝的尖端，导致了试件的韧性的降低，从而裂缝扩展长度有所减少。今后课题组还将对这一现象做进一步的研究。

图9 载荷( $P$ )与挠度( $\delta$ )曲线Fig. 9 Curve of loading ( $P$ ) and displacement ( $\delta$ )表3 RPC200的 $P_{ini}$ 、 $P_{max}$ 和 $a_c$ Tab. 3  $P_{ini}$ 、 $P_{max}$  and  $a_c$  of RPC200

试件编号	$\rho_v$	$P_{ini}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$a_c$ (mm)
0-1	0	0.47	1.59	19.0
0-2		0.73	1.67	19.3
0-3		0.37	1.49	18.7
平均值		0.52	1.58	19.0
1-1	1%	0.93	4.64	32.1
1-2		0.90	4.47	32.3
1-3		0.88	4.38	32.5
平均值		0.90	4.50	32.3
2-1	2%	2.41	7.29	31.5
2-2		2.63	8.03	31.3
2-3		1.86	6.67	31.9
平均值		2.30	7.33	31.6

续表 3

试件编号	$\rho_v$	$P_{ini}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$a_c$ (mm)
3-1	3%	2.41	9.67	30.9
3-2		2.99	12.00	29.4
3-3		2.59	10.41	30.2
平均值		2.66	10.69	30.2

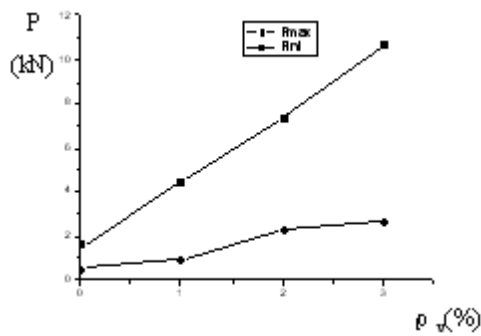


图 10 初裂与峰值荷载随钢纤维掺量  $\rho_v$  变化曲线  
Fig. 10 Relationship curve between first load (peak load) and fiber volume fractions

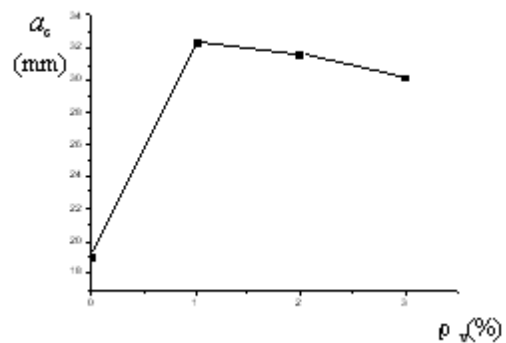


图 11 临界有效裂缝长度  $a_c$  随钢纤维掺量  $\rho_v$  变化曲线  
Fig. 11 Relationship curve between crack propagation length and fiber volume fractions

### 3 结论

通过上述试验及分析,本文得到以下结论:

- (1) 在钢纤维断裂机理研究,特别是观察原型试件或结构的裂缝扩展,光弹性贴片法是一种行之有效的方法,它具有实时、直观、准确和便于保存的优点;
- (2) 随着钢纤维掺量的增加,试件的初裂荷载也随着增加,纤维掺量由 1% 增加到 2% 时,初裂荷载提高幅度较大;随着钢纤维掺量的增加,试件的峰值荷载呈线性增加;峰值荷载的增幅要高于初裂荷载的增幅;
- (3) 当纤维掺量为 1% 时,临界有效裂缝长度值最大;纤维掺量继续增加,其分布均匀性下降,试件的韧性降低,临界有效裂缝长度减少。

作为一种尝试,本文应用光弹性贴片法观测钢纤维活性粉末混凝土的断裂特性,所得结论由于受限于试件的数量、钢纤维含量种类及试件大小,相关结论尚需在进一步的试验中进行验证。

#### 参考文献:

[1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research 1995, 25(7): 1501-1511.

[2] 刘斯凤, 孙伟, 林玮等. 掺天然超细混合材高性能混凝土的制备及其耐久性研究[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1080-1085 (LIU SiFeng, SUN Wei, LIN Wei et al. Preparation and durability of a high performance concrete with natural ultra-fine particles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11): 1080-1085(in Chinese))

[3] 赵曼, 阎贵平, 郝文秀. 高速铁路 RPC 格构型轨道板的设计与仿真分析[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 64-68(ZHAO Man, YA N Guipi ng, HAO Wenxiu, Simulation analysis and design of RPC lattice slab in high-speed railway[J]. Journal of Beijing Jiao Tong University, 2008, 32(1): 64-68(in Chinese))

[4] Dugat J, Roux N, Bernier G. Mechanical properties of reactive powder concretes[J]. Mater. & Struct., 1996, 29 (188): 233-240.

- [5] 余自若, 阎贵平. 活性粉末混凝土(RPC)的断裂力学性能[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(8):101-105 (YU Ziruo, YAN Guiping. Fracture mechanics of reactive powder concrete[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(8):101-105(in Chinese))
- [6] 姚志雄, 周健, 周瑞忠. 活性粉末混凝土断裂性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6): 654-659 (YAO Zhixiong, ZHOU Jian, ZHOU Ruizhong. Experimental study on fracture properties of reactive powder concrete (RPC)[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(6): 654-659(in Chinese))
- [7] 鞠杨, 贾玉丹, 刘红彬等. 活性粉末混凝土钢纤维增强增韧的细观机理[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(11): 1403-1416 (JU Yang, JIA YuDan, LIU HongBin, et al. Mesomechanism of steel fiber reinforcement and toughening of reactive powder concrete[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 37(11): 1403-1416 (in Chinese))
- [8] Cirello B Zuccarello. On the effects of a crack propagating toward the interface of a bimaterial system[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73:1264-1277.
- [9] Chang C W, Lien H S. Expansion stress analysis of ferroconcrete corrosion by digital reflection photoelasticity[J]. NDT&E International, 2007, 40(4): 309-314.
- [10] 吴智敏, 赵国藩, 宋玉普等. 光弹贴片法研究砼在疲劳荷载作用下裂缝扩展过程[J]. 实验力学, 2000, 15(3): 286-292 (WU Zhimin, ZHAO Guo-fan, SONG Yu-pu, et al. An Investigation on Crack Propagation Process in Concrete under Fatigue Loading by Means of Photoelastic Coating[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(3):286-292 (in Chinese))
- [11] 吴智敏, 徐世烺, 刘佳毅. 光弹贴片法研究砼裂缝扩展过程及双 K 断裂参数的尺寸效应[J]. 水利学报, 2001, 4: 4-39 (WU Zhimin, XU Shilang, LIU Jiayi. Study on crack propagation process of concrete and size effect of double-K fracture parameter by means of photoelastic coatings[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(4):34-39 (in Chinese))
- [12] 严承嵩著. 光弹性贴片技术及工程应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2003 (YAN Chengai. Photoelastic Coating Technique and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003(in Chinese))
- [13] 鞠杨, 刘红彬, 陈健等. 超高强度活性粉末混凝土的韧性与表征方法[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(4): 793-808 (JU Yang, LIU Hongbin, CHEN Jian, et al. Toughness and Characterization of Reactive Powder Concrete with Ultra-high Strength[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(4): 793-808 (in Chinese))

## Investigation on Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Based on Photoelastic Coating

MAO Ling-tao<sup>1</sup>, WANG Wen-zhen<sup>2</sup>, LIU Hong-bin<sup>1</sup>, JU Yang<sup>1</sup>, LIU Xi<sup>1</sup>, ZHANG Guo-dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. Civil Engineering Institute, Henan Polytechnic University, Henan 454000, China)

**Abstract:** Fracture properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete (RPC200) were investigated based on photoelastic coating method. Three-point flexural beams with prepared crack were employed in the test. Complete crack propagation process of concrete displayed as interference fringes on photoelastic coatings was obtained. The relations between initial cracking load and critical effective crack length and fiber volume were analyzed based on photoelastic fringes. Experiment results indicate that along with the growth of fiber volumes, both the initial cracking load and the peak load increase, moreover the peak load increases linearly. For RPC with 1% steel fibers volume fraction, the critical effective crack length has achieved its maximum value. When the fiber volume is more than 1%, its distribution uniformity decreases, which leads to decline of the ductility and the critical effective crack length.

**Keywords:** photoelastic coating; steel fiber reinforced reactive powder concrete; fracture