

文章编号:1007-9629(2025)02-0110-08

## 粉煤灰水泥砂浆早期断裂性能试验研究

范颖芳\*, 李鑫杰, 陈昊, 李秋超

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为了研究粉煤灰(FA)水泥砂浆早期断裂性能,采用粉煤灰内掺替代水泥,制作了水泥砂浆切口梁,对1~3 d龄期下的试件进行了三点弯曲试验和抗压强度试验. 试验过程中采用数字图像相关技术监测试件应变和位移,采用声发射技术记录试件内部损伤过程. 结果表明:FA 导致水泥砂浆早期断裂性能、抗压性能、抗裂缝扩展能力和抗断裂能力降低,断裂过程区及内部损伤范围显著缩小;FA 掺量越大,龄期越早,断裂参数降幅越显著,裂缝扩展越快;断裂参数与抗压强度之间存在线性关系.

**关键词:** 粉煤灰;水泥砂浆;早期;断裂性能;数字图像相关;声发射技术

中图分类号: TU578.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.003

### Experimental Study on Fracture Behavior of Cement Mortar Containing Fly Ash at Early Age

FAN Yingfang\*, LI Xinjie, CHEN Hao, LI Qiuchao

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to investigate the fracture behavior of cement mortar with fly ash(FA) at early age, cement was replaced with FA to fabricate cement mortar notched beams. Specimens at 1, 2, 3 d were subjected to three-point bending tests and compressive strength tests. Digital image correlation(DIC) technology was adopted to monitor the strain and displacement of specimens, while acoustic emission(AE) technology was used to record the occurrence and accumulation of internal damage. The results show that FA leads to an obvious decrease in the fracture behavior, compressive properties, crack propagation and fracture resistance of cement mortar at early age. It is worthwhile to note that both the fracture process zone and the internal damage range are significantly narrowed for FA cement mortar at early age. With the increase of FA content and shortening of curing age, the fracture parameters of the cement mortar decrease, while the cracks propagation accelerates. It is found that a linear relationship exists between fracture parameters and cube compressive strength.

**Key words:** fly ash; cement mortar; early age; fracture behavior; digital image correlation; acoustic emission technology

粉煤灰(FA)能够改善混凝土工作性<sup>[1]</sup>、后期强度和耐久性,是混凝土绿色化的重要手段之一<sup>[2]</sup>. 然而,水泥粉煤灰体系早期强度发展缓慢<sup>[3]</sup>,直接影响混凝土构件承载力和施工期可靠度,诱发结构早期损伤和裂缝,甚至导致结构施工期破坏. 探明水泥粉煤灰体系早期断裂破坏机理对确保混凝土结构全寿

命周期安全性和耐久性至关重要,相关研究具有十分重要的科学意义与工程价值.

近年来,国内外学者围绕FA对水泥基材料物理力学性能及耐久性的影响展开了一系列试验研究<sup>[4-6]</sup>,但研究多针对28 d水泥基材料,少数涉及早期性能<sup>[7-9]</sup>. 研究结果表明FA可在一定程度上提高混

收稿日期:2024-02-12;修订日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578099)

第一作者(通讯作者):范颖芳(1972—),女,河南开封人,大连海事大学教授,博士生导师,博士.E-mail: fanyf@dlmu.edu.cn

土中后期抗压性能和断裂性能<sup>[4,10]</sup>.然而不容忽视的是,FA混凝土早期(尤其前3d)力学性能显著降低<sup>[8,9,11]</sup>,且FA掺量越高,早期力学性能降低越显著<sup>[11]</sup>.与普通水泥砂浆相比,掺5%~40%FA的水泥砂浆2、7、28d抗压强度降低<sup>[3]</sup>;掺20%~40%FA的水泥砂浆4、7、28d抗压强度降低、氯离子结合能力增强<sup>[12]</sup>;掺5%~20%FA的水泥砂浆28、56d抗压强度提高、吸水率降低<sup>[13]</sup>;掺45%、55%FA的水泥砂浆28、90d抗压、抗折强度和断裂韧性均降低<sup>[14]</sup>.迄今为止,有关FA水泥砂浆性能研究并不全面,尤其在FA水泥砂浆早期性能方面尚不清晰.因此,研究3d内FA水泥砂浆断裂性能对确保混凝土结构施工期安全性十分重要.

本文设计了5种FA掺量,制作了45根水泥砂浆预制切口梁,对养护1~3d内FA水泥砂浆试件进行三点弯曲试验和抗压强度试验;讨论FA对水泥砂浆早期断裂性能的影响规律,以期粉煤灰水泥基材料在土木工程领域的应用提供科学依据和参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

采用P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,Ⅰ级粉煤灰,ISO标准砂.水泥和粉煤灰的化学组成<sup>1)</sup>见表1.拌制用水为自来水.

表1 水泥和粉煤灰化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of cement and fly ash

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> O	Other
Cement	21.91	6.27	3.78	59.30	1.64	2.41			4.69
Fly ash	49.89	34.81	2.17	4.78	1.28	1.10	2.97	1.25	1.75

Unit: %

### 1.2 试件制备

试件水胶比为0.5,胶砂比为1:3.制备尺寸为40mm×40mm×160mm的水泥砂浆预制切口梁试件.其中设计缝高比为0.4,通过埋置2mm厚钢片预制切口,预制裂缝高度 $a_0$ 为16mm.以0%、10%、20%、30%、40%粉煤灰等量替代水泥,对应试件编号分别记作FMB-0、FMB-10、FMB-20、FMB-30、FMB-40,每组制备9个试件,共45个试件.试件浇筑24h后脱模,随后迅速覆盖塑料薄膜并置于养护箱中于(20±1)℃下养护1、2、3d.选取光滑、孔洞少的一面作为数字图像相关(DIC)技术测量面,先用砂纸将试件表面打磨光滑,再用酒精去除试件表面浮灰.在DIC测量区域均匀喷涂一层较薄的白色哑光底漆,待

白漆完全风干后喷涂黑漆,形成随机黑白散斑图.

### 1.3 试验方法

粉煤灰水泥砂浆三点弯曲梁断裂试验采用ZCTS-2M微机控制电液伺服试验机加载,利用DIC测试系统监测加载过程中试件表面应变场和裂缝扩展路径、长度、水平张开位移.所用DIC系统由大恒水星高速摄像机、StreamPix 8图像采集存储软件以及金贝LX100型无频闪大功率LED光源组成,相机满幅分辨率和帧率分别为1920×1200像素和168帧/s,拍摄帧率设置为10帧/s.试验采用美国物理声学公司(PAC)PCI-2型声发射系统监测试件内部损伤以及裂缝出现及发展过程,在试件前后共布置4个声发射(AE)传感器,采集频率设为3MHz.加载方式采用位移控制,加载速率为0.02mm/min,当加载至峰值荷载10%左右时试件几乎完全丧失承载能力,接近破坏状态,随即停止试验.将受弯试验后的试件切割成边长为40mm的立方体试块,测试其抗压强度 $f_c$ ,加载速率为0.3MPa/s.

### 1.4 断裂参数的计算

水泥砂浆断裂韧度是表征其断裂性能的参数.其中起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$ 为裂缝从线性到非线性稳定扩展的转折点,是抵抗裂缝扩展的指标;失稳断裂韧度 $K_{IC}^c$ 为裂缝非线性稳定扩展到失稳破坏的控制点,可保证裂缝开裂后的稳定性.双K断裂模型能准确描述水泥基材料的断裂过程.本文利用双K断裂模型计算试件起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$ 和失稳断裂韧度 $K_{IC}^c$ .黏聚韧度 $K_{IC}^c$ 为材料内部各相黏聚力在裂缝尖端产生的应力强度因子,可以评价水泥基材料内部各相黏聚力的强弱<sup>[16]</sup>.断裂能 $G_F$ 为裂缝扩展单位面积所需的外力做功(假定外力做功全部用于裂缝扩展),可以表征材料断裂性能,采用荷载-裂缝口张开位移(P-CMOD)曲线近似计算 $G_F$ <sup>[17]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 荷载-裂缝口张开位移曲线

在三点弯曲试验中,利用DIC技术获得预制切口下端两侧横向位移之差,得到FA水泥砂浆切口梁P-CMOD曲线,如图1所示.选取典型P-CMOD曲线(图1(a))上5个点(A~E)进行重点分析,其荷载水平分别为峰前60%、峰前90%、峰值100%、峰后80%、峰后20%,其中峰值荷载对应临界裂缝口张开位移记作CMOD<sub>c</sub>.由图1(b)~(d)可以看出:(1)在1~3d内,随着FA掺量的增加,试件P-CMOD曲线弹性阶段斜

1)文中涉及的组成、比值等均为质量分数或质量比.

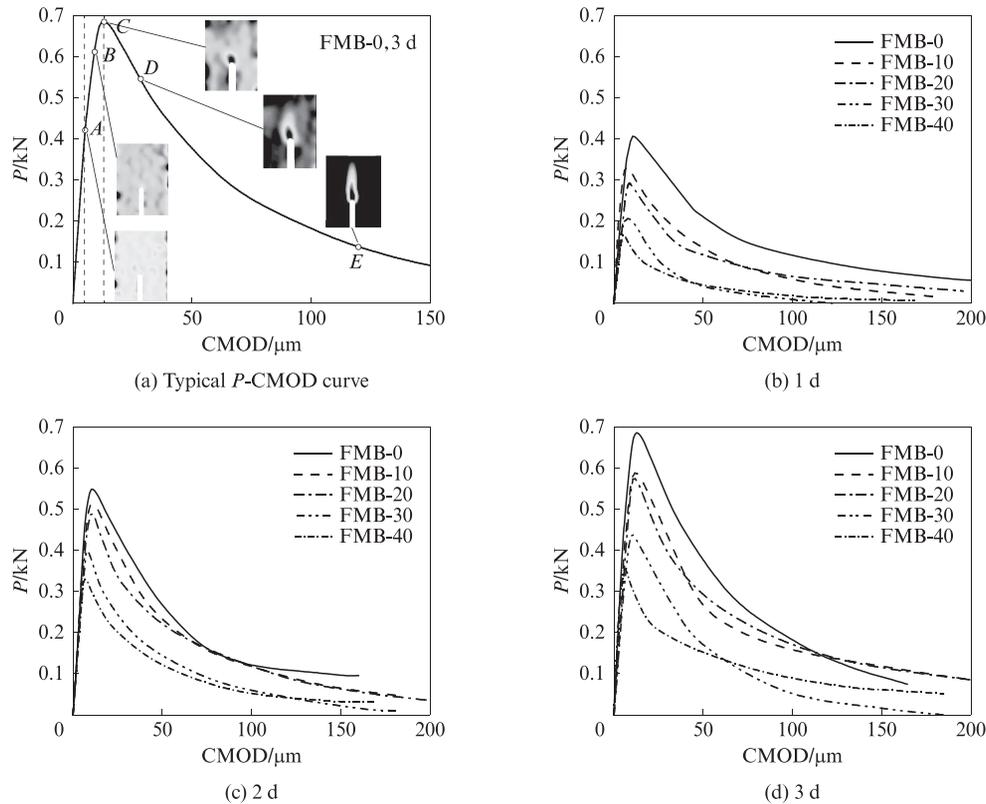


图1 FA水泥砂浆试件P-CMOD曲线

Fig. 1 P-CMOD curves of FA cement mortar specimens

率降低,即水泥砂浆早期弹性模量降低;(2)随龄期增加,相同FA掺量下试件弹性模量提高,这由水泥水化程度增加所致;(3)随FA掺量增加,CMOD<sub>c</sub>逐渐降低,说明FA导致试件抗断裂能力减弱;(4)过峰值荷载后,CMOD<sub>c</sub>增速变大,直至试件发生断裂。

为了较准确地确定起裂荷载 $F_{ini}$ ,将通过DIC技术得到的切口尖端上部荷载-应变曲线斜率突变点对应荷载、P-CMOD曲线上由线性转为非线性时拐点对应荷载、声发射法得到的振铃计数突变点对应荷载及累计振铃计数曲线第1个拐点对应荷载进行综合分析获得 $F_{ini}$ 。

1~3 d内FA水泥砂浆三点弯曲梁试验结果也汇总至表2,其中 $E_c$ 为砂浆弹性模量、 $\alpha_c$ 为临界有效裂缝长度。由表2可以看出:(1)试件 $F_{ini}$ 为 $F_{max}$ 的60%~65%;(2)FA导致水泥砂浆3 d内 $F_{ini}$ 、 $F_{max}$ 降低,且FA掺量越大, $F_{max}$ 降幅越大。(3)当FA掺量超过20%时, $F_{max}$ 降幅急剧增大;当FA掺量为40%时试件1、2、3 d的 $F_{max}$ 较未掺FA的对照组试件分别降低58.97%、39.89%、47.87%。(4)随龄期增加,试件 $F_{max}$ 增大,增幅减小; $F_{ini}$ 也增大。

## 2.2 断裂韧度与断裂能

由表2可以看出:(1)FA导致水泥砂浆试件1~3 d起裂断裂韧度 $K_{IC}^{ini}$ 、失稳断裂韧度 $K_{IC}^{un}$ 和黏聚韧度

$K_{IC}^c$ 降低,且FA掺量越大, $K_{IC}^{ini}$ 、 $K_{IC}^{un}$ 降幅越显著。(2)FA对1~3 d水泥砂浆的 $K_{IC}^{un}$ 影响更为显著,对于掺40%FA的砂浆试件来说,其1 d时 $K_{IC}^{ini}$ 和 $K_{IC}^{un}$ 较对照组试件分别降低59.76%、60.32%;随龄期增加,其断裂韧度降幅略有降低,2 d时 $K_{IC}^{ini}$ 和 $K_{IC}^{un}$ 较对照组试件分别降低42.13%、52.19%,3 d时 $K_{IC}^{ini}$ 和 $K_{IC}^{un}$ 较对照组试件分别降低45.77%、58.18%。(3)FA大幅降低了水泥砂浆1~3 d断裂能 $G_F$ 。当FA掺量超过20%时,龄期越早,水泥砂浆 $G_F$ 降低越明显;当FA掺量为30%、40%时,水泥砂浆1 d的 $G_F$ 降幅分别为78.18%、79.29%,2、3 d水泥砂浆 $G_F$ 降幅为45.19%~56.02%。

## 2.3 抗压强度与断裂参数的关系

由表2可以看出:(1)掺入FA导致水泥砂浆试件抗压强度降低,且FA掺量越大,抗压强度降幅越显著;(2)随龄期增长,相同FA掺量下水泥砂浆试件抗压强度逐渐增加,但增幅逐渐减小。FA水泥砂浆力学性能降低的原因主要包括:3 d龄期内,粉煤灰在水泥砂浆中反应缓慢,主要发挥填充作用<sup>[12,18]</sup>;粉煤灰替代水泥,致使水泥砂浆中水泥用量减少,水化产物生成量降低<sup>[19]</sup>,进而导致粉煤灰水泥砂浆早期强度发展不足。

FA水泥砂浆试件抗压强度与断裂参数的关系如图2所示。由图2可以看出试件 $K_{IC}^{ini}$ 、 $K_{IC}^{un}$ 、 $G_F$ 和抗压强度呈现线性关系。

表2 1~3 d内FA水泥砂浆三点弯曲梁试验结果  
Table 2 Test results of FA cement mortar three-point bending beams at 1-3 d

Age/d	Specimen	$F_{ini}/kN$	$F_{max}/kN$	$F_{ini}/F_{max}$	$CMOD_c/\mu m$	$E_c/GPa$	$\alpha_c/mm$	$K_{IC}^{ini}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^{un}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^c/(MPa \cdot m^{1/2})$	$G_F/(N \cdot m^{-1})$	$f_c/MPa$
1	FMB-0	0.265	0.407	0.651	10.6	30.78	19.09	0.164	0.315	0.151	32.45	9.40
	FMB-10	0.207	0.330	0.627	7.9	28.44	17.98	0.128	0.217	0.089	18.76	8.83
	FMB-20	0.184	0.291	0.632	8.4	24.14	18.13	0.114	0.210	0.096	18.71	5.96
	FMB-30	0.129	0.206	0.626	7.6	23.44	19.66	0.080	0.167	0.087	7.08	4.31
	FMB-40	0.107	0.167	0.641	5.6	22.25	18.58	0.066	0.125	0.059	6.72	3.17
2	FMB-0	0.349	0.549	0.636	10.2	48.61	20.00	0.216	0.456	0.240	35.94	20.99
	FMB-10	0.319	0.514	0.621	10.7	44.30	20.12	0.198	0.432	0.234	33.48	19.92
	FMB-20	0.306	0.489	0.626	11.1	33.23	18.66	0.190	0.367	0.177	32.73	17.49
	FMB-30	0.236	0.400	0.590	8.0	32.03	17.53	0.146	0.276	0.130	19.70	14.51
	FMB-40	0.202	0.330	0.612	6.4	30.63	16.96	0.125	0.218	0.093	17.32	9.87
3	FMB-0	0.420	0.681	0.617	12.8	45.73	19.53	0.260	0.550	0.290	48.04	25.63
	FMB-10	0.387	0.588	0.658	11.8	35.74	18.30	0.240	0.429	0.189	45.43	23.09
	FMB-20	0.363	0.574	0.632	11.9	35.16	18.46	0.225	0.424	0.199	46.48	17.97
	FMB-30	0.254	0.438	0.580	10.8	32.28	19.09	0.157	0.339	0.182	22.14	16.47
	FMB-40	0.228	0.355	0.642	6.5	31.24	16.63	0.141	0.230	0.089	21.13	15.49

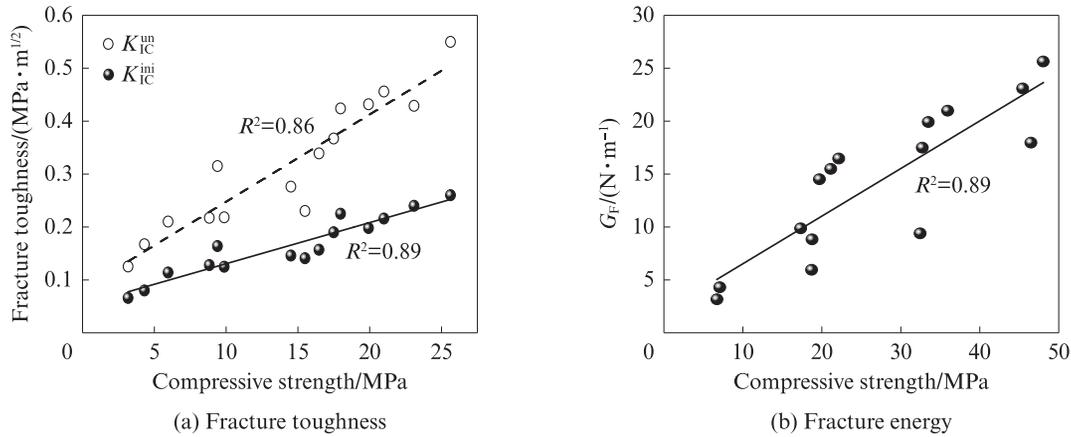


图2 FA砂浆抗压强度与断裂参数的关系  
Fig. 2 Relationship between compressive strength and fracture parameters of FA cement mortars

2.4 裂缝扩展过程

2.4.1 荷载-裂缝尖端张开位移曲线(P-CTOD)

裂缝尖端张开位移(CTOD)表征裂缝顶端附近应力、应变场等.根据DIC技术得到FA掺量与裂缝尖端张开位移临界值(CTOD<sub>c</sub>)的关系,见图3.由图3可以看出:当达到CTOD<sub>c</sub>时,裂缝失稳扩展;相同FA掺量下试件CTOD<sub>c</sub>随龄期增加而增大;相同龄期下FA试件CTOD<sub>c</sub>随FA掺量增加而减小,即FA导致试件抗断裂性能降低.

2.4.2 裂缝尖端应变场

不同FA掺量试件1~3 d的 $F_{ini}$ 、 $F_{max}$ 对应应变值( $\epsilon_{ini}$ 、 $\epsilon_{un}$ )如图4所示.由图4可以看出:随龄期发展,水泥水化程度提高, $\epsilon_{ini}$ 、 $\epsilon_{un}$ 增加, $\epsilon_{un}$ 增幅高于 $\epsilon_{ini}$ ,试件断裂性能(抗裂缝扩展能力、抗断裂能力)不断增强;FA

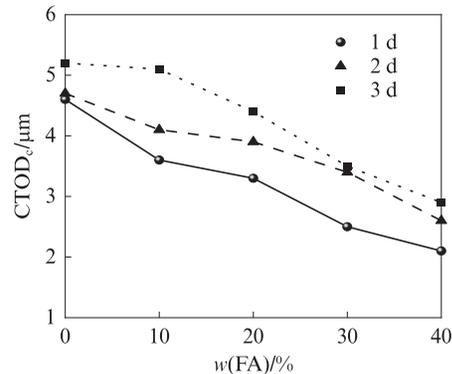


图3 FA掺量与CTOD<sub>c</sub>的关系  
Fig. 3 Relationship between CTOD<sub>c</sub> and FA content

试件 $\epsilon_{ini}$ 、 $\epsilon_{un}$ 较同龄期对照组试件要低,且FA掺量越高, $\epsilon_{ini}$ 、 $\epsilon_{un}$ 越低,这进一步说明FA导致试件1~3 d抗裂缝扩展能力和抗断裂能力降低.

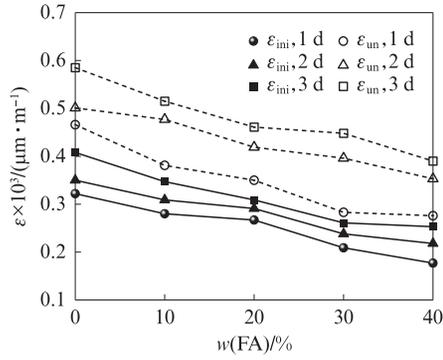


图4 FA掺量对水泥砂浆  $\epsilon_{ini}$ 、 $\epsilon_{un}$  的影响  
Fig. 4 Influence of FA content on  $\epsilon_{ini}$  and  $\epsilon_{un}$  of cement mortars

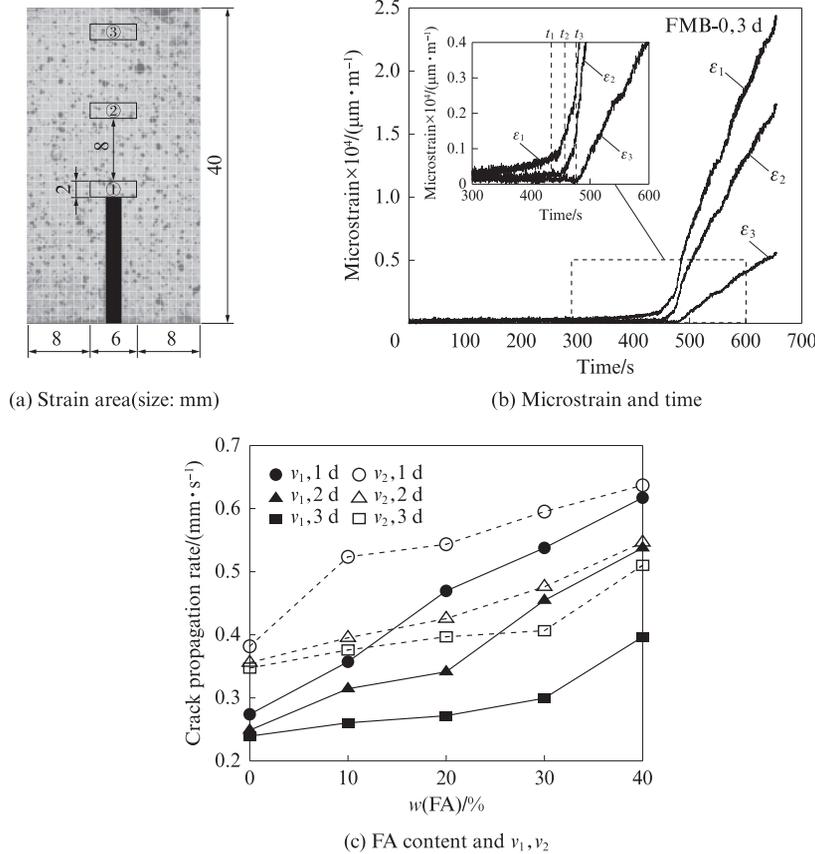


图5 裂缝扩展速率与FA掺量的关系

Fig. 5 Relationship between crack propagation rate and FA content

$$v_1 = \frac{s}{t_2 - t_1} \tag{1}$$

$$v_2 = \frac{s}{t_3 - t_2} \tag{2}$$

式中:s为区域之间距离,取10 mm.

由图5(c)可以看出:(1)相同龄期对照组试件在1~3 d的  $v_2$  较  $v_1$  分别高39.31%、43.06%、45.14%,掺40%FA试件在1~3 d的  $v_2$  较  $v_1$  分别高3.18%、1.64%、28.57%.(2)随龄期增长, $v_1$ 、 $v_2$  逐渐减小,掺40%FA试件裂缝扩展速率  $v_1$ 、 $v_2$  与对照组试件相比,1 d时分别增加125.31%、63.69%,2 d时增加

### 2.4.3 裂缝扩展速率

裂缝扩展速率与材料的脆性和韧性相关,扩展速率越慢,材料阻裂性能越强.在切口尖端正上方间隔8 mm选取3个6 mm×2 mm的长方形区域,见图5(a),自下而上区域①②③的应变分别记作  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ .以3 d时对照组试件FMB-0为例, $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  与时间的关系如图5(b)所示,其中应变突变时刻即为试件起裂时刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ .1~3 d内试件裂缝从①到②的扩展速率  $v_1$ 、从②到③的扩展速率  $v_2$  与FA掺量的关系如图5(c)所示. $v_1$ 、 $v_2$  的计算式见(1)、(2).

116.13%、54.64%,3 d时增加65.87%、51.02%.并且龄期越早,与对照组试件相比FA试件裂缝扩展速率增幅越大.(3)相同龄期下,随FA掺量增加,试件加载过程中裂缝扩展速率增大,且龄期越早,增幅越显著.掺40%FA试件加载过程中裂缝扩展速率  $v_1$ 、 $v_2$  与掺10%FA试件相比,1 d时分别增加78.84%、21.66%,2 d时增加70.97%、38.25%,3 d时增加52.38%、35.71%.这说明FA降低了试件抗裂缝扩展能力.

### 2.5 试件内部损伤发展过程

为进一步描述加载过程中试件内部损伤位置及

程度,利用声发射三维定位技术获得试件内部破坏点分布及沿试件长度方向AE事件数分布<sup>[20]</sup>,利用AE事件位置变化得到试件断裂过程区宽度<sup>[21]</sup>,根据弹性波到达传感器的时间差,实现声发射源的三维定位<sup>[20, 22-23]</sup>.图6给出了1~3 d对照组试件和掺30%FA试件内部损伤位置分布.由图6可以看出:(1)试件切口尖端附近首先出现损伤(起裂阶段);随荷载增加,损伤沿切口正上方发展(裂缝稳定扩展阶段);荷载继续增加,损伤沿切口正上方及两侧急剧

延伸(裂缝失稳扩展阶段).(2)相同龄期下,掺30%FA试件内部损伤较对照组试件要少,断裂过程区减小,损伤位置分布宽度缩小,1、2、3 d掺30%FA试件损伤定位点数较同龄期对照组试件分别降低80.15%、58.46%、47.24%.(3)加载及破坏状态下FA试件损伤范围较对照组试件要小,且龄期越早,试件损伤范围越小;相同龄期下,1、2、3 d掺30%FA试件预制切口位置AE事件数较对照组试件分别降低68.42%、53.49%、39.06%.

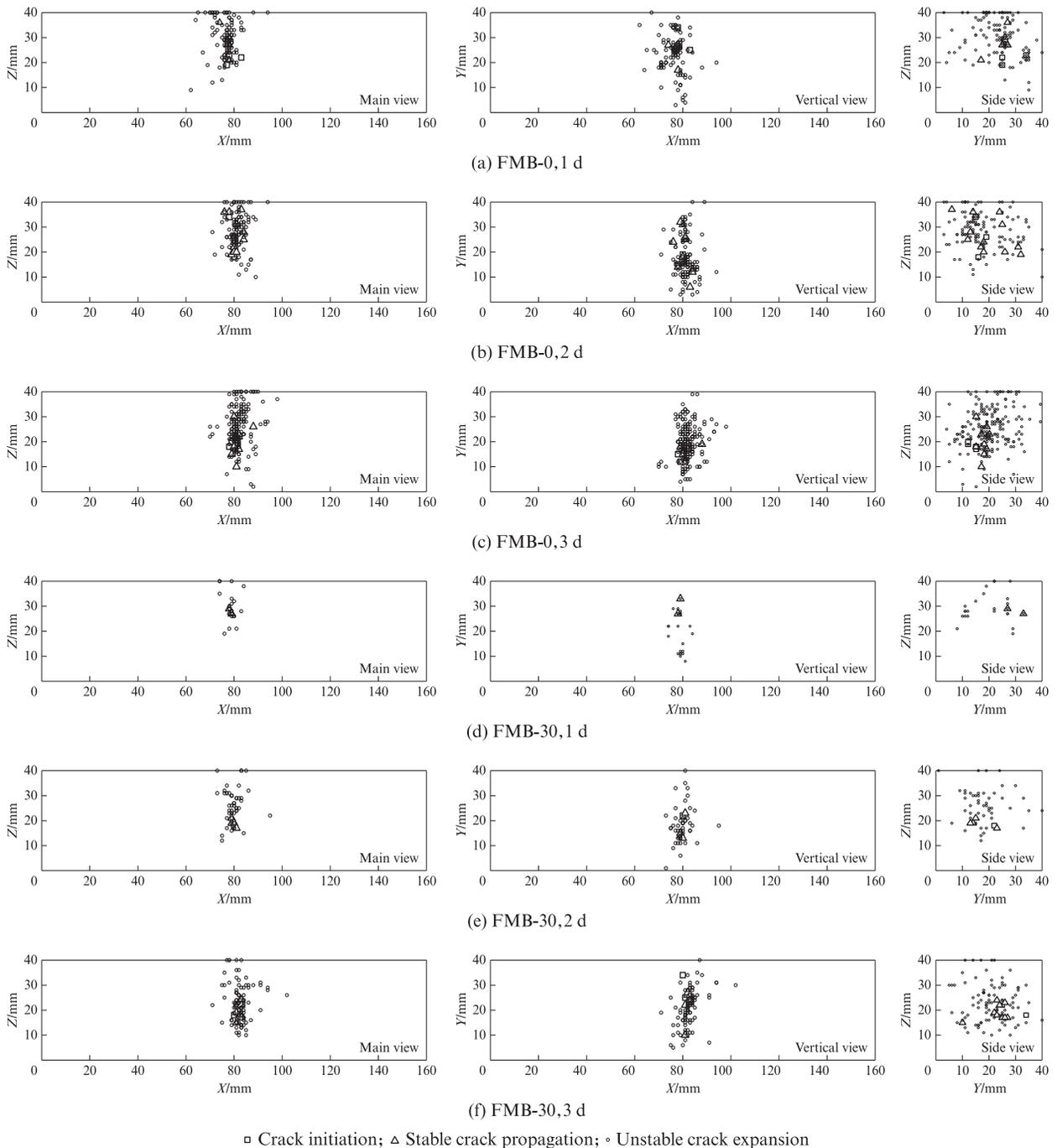


图6 加载过程中水泥砂浆试件内部损伤位置分布  
 Fig. 6 Distribution of internal damage in cement mortar specimens during loading process

### 3 结论

(1)粉煤灰导致水泥砂浆早期断裂性能(起裂荷载、峰值荷载及断裂韧度等)和抗压性能(抗压强度及弹性模量)降低.断裂参数(起裂断裂韧度、失稳断裂韧度、断裂能)与试件立方体抗压强度之间存在线性关系.粉煤灰掺量越大,龄期越早,断裂参数降幅越显著.掺40%粉煤灰试件起裂断裂韧度和失稳断裂韧度较对照组试件1 d时分别降低59.76%、60.32%,2 d时降低42.13%、52.19%,3 d时降低45.77%、58.18%.

(2)粉煤灰导致水泥砂浆早期抗裂缝扩展能力和抗断裂能力降低.粉煤灰掺量越大,峰值荷载对应的裂缝口张开位移、裂缝尖端张开位移和应变越低,裂缝扩展越快,并且龄期越早,粉煤灰的影响越明显.掺40%粉煤灰试件加载过程中裂缝扩展速率 $v_1$ 、 $v_2$ 较掺10%粉煤灰试件1 d时分别增加78.84%、21.66%,2 d时降低70.97%、38.25%,3 d时降低52.38%、35.71%.

(3)粉煤灰导致水泥砂浆早期断裂过程区减小,内部损伤位置分布范围显著缩小.1、2、3 d时掺30%粉煤灰试件损伤定位点数较同龄期对照组试件分别降低80.15%、58.46%、47.24%;预制切口位置AE事件数较对照组试件分别降低68.42%、53.49%、39.06%.

#### 参考文献:

- [1] THONGSANITGARN P, WONGKEO W, CHAIPANICH A, et al. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 410-417.
- [2] LIU J X, ZANG S J, YANG F, et al. Fracture mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete under dry-wet cycle sulfate attack[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1623.
- [3] YILMAZ B, OLGUN A. Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(3): 194-201.
- [4] WU C H, HUANG C H, KAN Y C, et al. Effects of fineness and dosage of fly ash on the fracture properties and strength of concrete[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11):2266.
- [5] GOLEWSKI G L, SADOWSKI T. Macroscopic evaluation of fracture processes in fly ash concrete[J]. Solid State Phenomena, 2016, 254:188-193.
- [6] GOLEWSKI G L. Estimation of the optimum content of fly ash in concrete composite based on the analysis of fracture toughness tests using various measuring systems[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213:142-155.
- [7] LAM L, WONG Y L, POON C S. Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(2):271-283.
- [8] GUO J J, ZHANG Z, WU J J, et al. Early-age mechanical characteristics and microstructure of concrete containing mineral admixtures under the environment of low humidity and large temperature variation[J]. Materials, 2021, 14(17):5085.
- [9] GOLEWSKI G L. Effect of curing time on the fracture toughness of fly ash concrete composites[J]. Composite Structures, 2018, 185:105-112.
- [10] ZHANG P, LI Q F, ZHANG H. Fracture properties of high-performance concrete containing fly ash[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2012, 226(2):170-176.
- [11] SUN J F, SHEN X D, TAN G, et al. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136(2):565-580.
- [12] SHAIKH F U A, DOBSON J. Effect of fly ash on compressive strength and chloride binding of seawater-mixed mortars[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(5): 275-289.
- [13] HSU S, CHI M, HUANG R. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176:250-258.
- [14] WONG Y L, LAM L, POON C S, et al. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(12):1905-1913.
- [15] 徐世焯. 混凝土断裂力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011:296. XU Shilang. Concrete fracture mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011:296. (in Chinese)
- [16] 张均良. 纳米偏高岭土水泥砂浆断裂性能试验研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020. ZHANG Junliang. Experimental study on fracture performance of nano metakaolin cement mortar[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [17] 张秀芳, 徐世焯. 采用荷载-裂缝张开位移曲线确定混凝土三点弯曲梁的断裂能[J]. 水利学报, 2008(6):714-719. ZHANG Xiufang, XU Shilang. Determination of fracture energy of three-point bending concrete beam using relationship between load and crack-mouth opening displacement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(6):714-719. (in Chinese)
- [18] CHO Y K, JUNG S H, CHOI Y C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 255-264.
- [19] SUN J F, SHEN X D, TAN G, et al. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136(2):565-580.
- [20] 陈徐东, 黄业博, 陈晨. 橡胶自密实混凝土断裂性能及声发射

- 特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):758-765.
- CHEN Xudong, HUANG Yebo, CHEN Chen. Fracture properties and acoustic emission characteristics of rubber self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):758-765. (in Chinese)
- [21] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12):2339-2346.
- [22] XU J, SHU S R, HAN Q H, et al. Experimental research on bond behavior of reinforced recycled aggregate concrete based on the acoustic emission technique[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191:1230-1241.
- [23] CHEN C, FAN X Q, CHEN X D. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117472.

---

(上接第109页)

- [9] HUANG Z, YANG Y, RAN Q P, et al. Preparing hyperbranched polycarboxylate superplasticizers possessing excellent viscosity-reducing performance through in situ redox initialized polymerization method [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93:323-330.
- [10] QIAN S S, YAO Y, WANG Z M, et al. Synthesis, characterization and working mechanism of a novel polycarboxylate superplasticizer for concrete possessing reduced viscosity[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169:452-461.
- [11] STECHER J, PLANK J. Novel concrete superplasticizers based on phosphate esters[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 119:36-43.
- [12] 张倩倩, 舒鑫, 杨勇, 等. 减水剂吸附行为对水泥-硅灰浆体黏度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11):1716-1721.
- ZHANG Qianqian, SHU Xin, YANG Yong, et al. Adsorption of superplasticizer and its effect on viscosity of cement-silica fume paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11):1716-1721. (in Chinese)
- [13] PLANK J, SACHSENHAUSER B. Impact of molecular structure on Zeta potential and adsorbed conformation of  $\alpha$ -allyl- $\omega$ -methoxypolyethylene glycol-maleic anhydride superplasticizers[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(2):233-239.
- [14] 张艳荣. 水泥-化学外加剂-水分散体系早期微结构与流变性[D]. 北京:清华大学, 2014.
- ZHANG Yanrong. Study on the microstructure and rheological properties of cement-chemical admixtures-water dispersion system at early stage [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)