

文章编号:1007-9629(2021)05-0921-09

PVA 纤维分散程度对水泥砂浆和水泥稳定碎石力学性能的影响

袁龄卿^{1,2}, 梁乃兴², 赵春花³, 杨卓林², 曾晟⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331; 4. 重庆交通大学 材料科学与工程学院, 重庆 400074)

摘要:为研究聚乙烯醇(PVA)纤维的分散程度对水泥砂浆和水泥稳定碎石性能的影响,用粉煤灰对 PVA 纤维束进行分散处理,同时采用灰度共生矩阵图像处理法对 PVA 纤维的图像纹理进行熵分析,建立单因素方差分析数学模型,用以检验粉煤灰对 PVA 纤维分散程度的显著性影响,得出 PVA 纤维的分散程度与图像熵之间的关系;然后采用质量均分称重法对灰度共生矩阵图像处理法进行验证分析;再通过室内试验研究水泥基复合材料的力学性能与 PVA 纤维分散程度之间的关系。结果表明:PVA 纤维的分散程度随着添加的粉煤灰与 PVA 纤维质量比(简称质量比)的增加而增大,当质量比大于 50:1 时,PVA 纤维束能在水泥基复合材料中均匀分散;图像熵随质量比的增加而增加,纤维均值的变异系数随质量比的增加而减小;水泥砂浆的抗折强度、破裂能和水泥稳定碎石的劈裂强度随图像熵的增加而增大。由此可知,提升 PVA 纤维在水泥砂浆和水泥稳定碎石中的分散程度,可提升水泥砂浆和水泥稳定碎石的力学性能。

关键词:水泥砂浆;水泥稳定碎石;分散程度;破裂能;劈裂强度

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.004

Effect of PVA Fibers Dispersion on Mechanical Properties of Cement Mortar and Cement Stabilized Macadam

YUAN Lingqing^{1,2}, LIANG Naixing², ZHAO Chunhua³, YANG Zhuolin², ZENG Sheng⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to study the influence of the dispersion degree of polyvinyl alcohol(PVA) fibers on the properties of cement mortar and cement stabilized macadam, fly ash was used to disperse PVA fibers. Entropy analysis of the image texture of PVA fibers was carried out by the image processing method of gray level co-occurrence matrix, and the mathematical model of single-factor analysis of variance was established to test the significant influence of fly ash on the dispersion degree of PVA fibers, the relationship between the dispersion degree of PVA fibers and the image entropy was obtained. Then the image processing method of gray level

收稿日期:2020-06-15; 修订日期:2020-07-09

基金项目:云南省交通科技基金项目(2018-23);安徽省交通科技基金项目(Ahjtj20130051);重庆交通大学山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心开放基金资助(QLGCZX-JJ2017-2)

第一作者:袁龄卿(1991—),男,贵州德江人,同济大学博士生.E-mail:ylingqing@163.com

通讯作者:梁乃兴(1957—),男,陕西岐山人,重庆交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:liangnx@cqjtu.edu.cn

co-occurrence matrix was verified and analyzed by the mass-equipartition weighing method. The relationship between the mechanical properties of the cement-based composite material and the dispersion degree of PVA fibers were studied through laboratory experiment. The results show that the dispersion degree of PVA fibers increases with the increase of the mass ratio of fly ash and PVA fibers (abbreviated as mass ratio), when the mass ratio is greater than 50:1, the PVA fibers can be uniformly dispersed in the cement-based composite material. The image entropy increases with the increase of mass ratio, and the coefficient of variation of fiber decreases with the increase of mass ratio. The flexural strength, fracture energy of cement mortar and splitting strength of cement stabilized macadam increase with the increase of the image entropy. Increasing the dispersion degree of PVA fibers in cement mortar and cement stabilized macadam can improve the mechanical properties of cement mortar and cement stabilized macadam.

Key words: cement mortar; cement stabilized macadam; dispersion degree; fracture energy; splitting strength

目前,在水泥基材料中加入纤维来提高其抗拉强度和抗裂性能已成为国内外诸多学者的研究方向,纤维良好的韧性和较高的模量使其应用在水泥基材料中具有良好的改性效果^[1-7].俞靖洋等^[8]通过研究聚乙烯醇(PVA)纤维对水泥稳定碎石基层疲劳寿命的影响,得出掺PVA纤维水泥稳定碎石基层的疲劳寿命为普通水泥稳定碎石基层疲劳寿命的2.6~3.0倍.张鹏等^[9]通过三点弯曲试件断裂试验,得出聚丙烯纤维可以显著提高水泥稳定碎石的极限裂缝尖端张开位移和断裂能.吕林女等^[10]的报道显示,虽然粉煤灰替代部分水泥会降低应变硬化水泥基复合材料(SHCC)的抗拉强度,但随着粉煤灰掺量的增加,SHCC的应变硬化和多缝开裂特性表现出了更优异的特征.据Ma等^[11-12]研究,在水泥稳定碎石中加入聚丙烯纤维能够提升水泥稳定碎石的抗弯疲劳性能,在水泥砂浆中加入PVA纤维可提升高强度砖墙的抗剪强度.李艳等^[13-14]基于实测单轴受压和三轴圆柱体应力-应变曲线的特点,提出了单轴受压本构方程和高性能纤维增强水泥基复合材料(HPFRCC)的常规三轴受压本构模型,为高韧性PVA纤维增强水泥基复合材料(PVA-FRCC)结构非线性有限元和HPFRCC结构非线性有限元的分析提供了依据.徐世焱等^[15]对水泥基复合材料的动态压缩力学性能进行数值模拟分析后发现,相比于普通混凝土材料和掺钢纤维水泥基材料,掺PVA纤维的超高韧性水泥基复合材料(PVA-UHTCC)峰值应力动态增强因子的应变率敏感性较低.Yuan等^[16]则考虑了粉煤灰和纤维对水泥稳定碎石抗压强度和劈裂强度的共同作用.但上述文献未能充分表达出水泥基复合材料的性能与纤维分散程度之间的关系.

对于纤维分散技术和评价方法的研究,国内外均有相关报道.张丽辉等^[17]、刘建忠等^[18]用荧光显微

镜分析了水泥基复合材料中纤维的分散性,并提出了纤维分散性评价方法.曹源文等^[19-23]利用统计方法和图像处理法对纤维的分散性进行了研究和评价,但这些文献同样没有分析水泥基复合材料的性能与纤维分散程度之间的关系.

当前工程应用的PVA纤维主要呈纤维束状,未分散的束状PVA纤维直接加入砂浆或碎石混合料中搅拌时不易分散.当向纤维混合料中加水后,由于PVA纤维具有良好的亲水性,在纤维表面毛细管张力的作用下,未分散的纤维遇水后会进一步吸附在一起,形成更大的团状纤维.未分散的束状和团状PVA纤维存在于水泥砂浆或水泥稳定碎石材料中,使材料内部随机分布着缺陷,这些缺陷将降低材料的性能和使用寿命.因此,本文采用粉煤灰对PVA纤维进行分散搅拌,研究粉煤灰掺量对PVA纤维的分散效果,同时建立纤维分散性评价标准,最后再通过室内试验分析水泥砂浆的抗压强度、抗折强度、断裂能和水泥稳定碎石的劈裂强度与PVA纤维分散程度之间的关系.

1 试验

1.1 原材料

本文选用I级粉煤灰作为试验的分散剂.粉煤灰的物理参数见表1.其中: D_{50} 表示中位径; $D_{[4,3]}$ 表示体积平均径; $D_{[3,2]}$ 表示面积平均径; $D_{[2,1]}$ 表示长度平均径; R_{SPAN} 表示跨度($R_{SPAN} = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$),其中 D_{90} 、 D_{10} 分别表示颗粒累积分布为90%、10%的粒径,

表1 粉煤灰的物理参数

Table 1 Physical parameters of fly ash

$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{[4,3]}/\mu\text{m}$	$D_{[3,2]}/\mu\text{m}$	$D_{[2,1]}/\mu\text{m}$	R_{SPAN}	$S_{SA}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
41.10	98.31	15.72	3.76	6.563	0.141

即小于此粒径的颗粒体积占全部颗粒体积的90%、10%); S_{SA} 表示比表面积。

本文采用的PVA纤维的物理参数见表2。

表2 PVA纤维的物理参数
Table 2 Physical parameters of polyvinyl alcohol

Color	Diameter/ μm	Linear density (1 000 m)/g	Hot water resistance / $^{\circ}\text{C}$
Canary yellow	15	2.00 ± 0.25	100

试验选用的复合硅酸盐水泥标号为P·C32.5,为徐州中联有限公司生产.试验采用的水泥、标准砂和石灰岩均通过检验,分别满足JTG E42—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》和JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》要求。

1.2 试验方法

选择粉煤灰与PVA纤维质量比($m_{FA}:m_{PVA}$,简称质量比)为0:1、25:1、50:1和75:1;将PVA纤维与粉煤灰加入水泥胶砂搅拌机的搅拌锅中,对PVA纤维进行干拌分散处理;搅拌叶自转速率为 (140 ± 5) r/min,公转速率为 (62 ± 5) r/min,搅拌时间设置为3 min.研究粉煤灰质量对PVA纤维分散程度的影响时,每种质量比实施4次平行试验,再按质量均分称重法将经搅拌分散处理的PVA纤维和粉煤灰混合物等质量均分成3份,通过干法筛分和湿法水洗得到溶于液体中的纯净PVA纤维溶液,然后将其导入模具中,加满水让其稳定后采集图像,采用灰度共生矩阵图

像处理法求其图像熵 f_2 。

干法筛分:采用孔径为0.075 mm的标准筛对粉煤灰和PVA纤维混合物进行密封筛分,初步分离粉煤灰和PVA纤维.湿法水洗:将筛分出来的PVA纤维放置于试验盆内,加水并做微搅拌,让吸附在PVA纤维表面的粉煤灰分离沉淀,得到融于液体中的纯净PVA纤维.最后,采用孔径为0.075 mm的标准筛将PVA纤维从溶液中分离出来,并置于烘箱内烘干后称重,得到各组PVA纤维的质量损失率均小于7%。

采用质量均分称重法对灰度共生矩阵图像处理法做验证分析.首先采用对应于图像处理法的相同技术参数对PVA纤维束做同样处理,然后将搅拌后的PVA纤维和粉煤灰混合物等质量均分成10份,通过干法筛分和湿法水洗得到洗净的PVA纤维溶液,再采用孔径为0.075 mm的标准筛将PVA纤维从溶液中分离出来.将所得10份洗净的PVA纤维置于烘箱内烘干后称重,并分别标记为 $M_{25}(1, j)$ ($j=1, 2, \dots, 10$, M_{25} 表示质量比为25:1);重复上述方法,依次完成同质量比下的另外2组平行试验,分别标记为 $M_{25}(i, j)$ ($i=2, 3$,表示同质量比下的第2、3组平行试验; $j=1, 2, \dots, 10$),最终完成质量比为25:1下的3组平行试验,并做好标记.重复上述步骤,分别得到 M_{50} 、 M_{75} 下的60份样品.结果发现,各组PVA纤维的质量损失率均小于13%.采集得到质量比分别为25:1、50:1、75:1的PVA纤维图片,如图1所示。

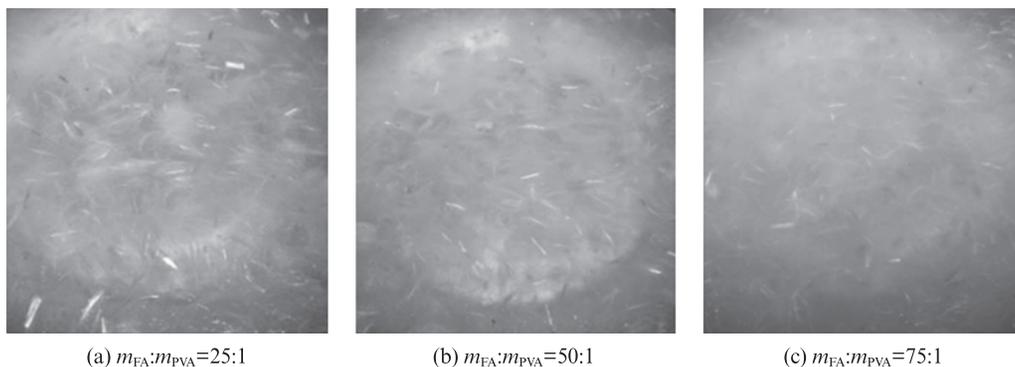


图1 质量比分别为25:1、50:1、75:1的PVA纤维图片

Fig. 1 Images of PVA fiber with mass ratios of 25:1, 50:1 and 75:1, respectively

水泥砂浆试验采用水灰比(质量比)为0.5,PVA纤维掺量为水泥质量的1%, $m_{FA}:m_{PVA}$ 分别为0:1、25:1、50:1、75:1,并采用普通水泥砂浆和粉煤灰水泥砂浆进行对比组试验,其配合比设计见表3.水泥稳定碎石试验采用的级配设计见表4,其配合比设计见表5.对掺入的PVA纤维同样采用粉煤灰做分散处理。

根据JTG E42—2005和JTG E51—2009要求,成型40 mm×40 mm×160 mm的水泥砂浆棱柱体试件及 $\phi 150$ mm×150 mm的水泥稳定碎石圆柱体试件,平行试件有6个.水泥砂浆试件和水泥稳定碎石试件置于标准养护室养护,水泥砂浆的养护龄期取7 d,水泥稳定碎石的养护龄期取7、28、90 d.最后根据

表3 水泥砂浆配合比
Table 3 Mix proportion of cement mortar

Code	Sand	Cement	Water	Fly ash	PVA fiber
A0	1 350.0	450.0	225.0	0	0
B1	1 350.0	450.0	225.0	112.5	0
B2	1 350.0	450.0	225.0	225.0	0
B3	1 350.0	450.0	225.0	337.5	0
C1	1 350.0	450.0	225.0	0	4.5
C2	1 350.0	450.0	225.0	112.5	4.5
C3	1 350.0	450.0	225.0	225.0	4.5
C4	1 350.0	450.0	225.0	337.5	4.5

表4 水泥稳定碎石级配设计
Table 4 Gradation design of cement stabilized macadam

Sieve size/mm	Gradation design (by mass)/%		
	Maximum	Minimum	Composite gradation
31.5	100.00	100.00	100.00
26.5	98.00	93.00	98.00
19	86.00	72.00	79.00
9.5	58.00	47.00	52.52
4.75	32.00	29.00	30.01
2.36	19.70	17.00	17.73
0.6	15.00	8.00	8.92
0.075	3.50	0	3.50

表5 水泥稳定碎石配合比
Table 5 Mix proportion of cement stabilized macadam

Code	Mix proportion/g				Water content (by mass)/%
	Aggregate	Cement	Fly ash	PVA fiber	
A	5 700.0	228.0	0	0	4.8
B-0	5 700.0	228.0	0	2.4	4.8
B-1	5 700.0	228.0	60.0	2.4	4.8
B-2	5 700.0	228.0	120.0	2.4	4.8
B-3	5 700.0	228.0	180.0	2.4	4.8

JTG E42—2005 和 JTG E51—2009 要求,对水泥砂浆试件进行抗压强度和抗折强度试验,对水泥稳定碎石试件进行劈裂强度试验,且保证水泥砂浆同组试验的强度测试值不超过平均值的10%,保证水泥稳定碎石同组试验的变异系数 $C_v \leq 15\%$. 本文对水泥砂浆破裂能的测试采用应变控制加载,加载速率为1 mm/min;破裂能定义为应力曲线在应变方向上的积分面积.

1.3 PVA纤维的分散性评价方法

1.3.1 灰度共生矩阵图像处理法

采用灰度共生矩阵图像处理法获得的图像熵 f_2 来表征 PVA 纤维的分散程度^[21,24]. 图像熵的表达式

如下:

$$f_2 = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{\delta}^{\wedge}(i, j, d, \theta) \lg P_{\delta}^{\wedge}(i, j, d, \theta) \quad (1)$$

式中: L 为图像的最大灰度级; (i, j) 为图像点对的灰度值; d 为灰度共生矩阵的生成步长; θ 为生成方向; δ 为2个像素间的空间位置关系,由 d 和 θ 决定; $P_{\delta}^{\wedge}(i, j, d, \theta)$ 为归一化后每组灰度对出现的概率矩阵.

熵值是图像具有信息的度量,纹理信息是图像信息的一种.若图像中没有任何纹理,则灰度共生矩阵为零阵,图像熵 f_2 接近0;若图像充满细纹理,则 $P_{\delta}(i, j, d, \theta)$ 值近似相等,图像熵 f_2 最大;若图像中分布较少的纹理,则 $P_{\delta}(i, j, d, \theta)$ 的数值差别较大,该图像熵 f_2 较小.通过编程求图像熵 f_2 ,取 $d=1$,分别计算 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 这4个方向上灰度共生矩阵的图像熵 f_2 ,并取其平均,记为 \bar{f}_2 .

1.3.2 单因素方差分析

单因素方差分析,是利用灰度共生矩阵图像处理法求得的图像熵均值 \bar{f}_2 与质量比的不同水平建立数学模型,检验质量比对 \bar{f}_2 的显著性影响.利用单因素方差分析时,应充分考虑试验条件和随机误差的影响因素.

1.3.3 质量均分称重法

质量均分称重法,是利用纤维在混合料中离散程度的变异系数来表征纤维的分散程度,其表达式如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

式中: μ 代表通过质量均分称重法求得的10份纤维质量均值; σ 代表10份纤维质量均值的标准差; C_v 表示10份纤维质量均值的变异系数.

纤维在混合料中的分散程度越高,则束状和团状纤维越少,纤维质量的集中度越小.当把这些拌和后的粉煤灰和 PVA 纤维的混合料等质量均分成10份时,各份混合料中 PVA 纤维的质量越接近,则10等份混合料中纤维均值的变异系数越小.纤维在混合料中的分散程度越低,则束状和团状的纤维越多,纤维质量的集中度越大,所计算的10等份纤维均值变异系数越大.

2 试验结果分析

2.1 PVA纤维的分散性

当搅拌时间为3 min时,粉煤灰作用下不同质量比对应的 PVA 纤维图像熵 f_2 见表6;采用质量均分称重法得到的试验结果见表7.表6、7中: $M_{i:j:k}$ 中的 i 表示粉煤灰与纤维的质量比为 $i:1$, j 表示质量比为 $i:1$

的第 j 组平行试验, k 表示第 j 组平行试验的第 k 个均分质量的试验; $M_i(j)$ 中的 i 表示粉煤灰与纤维的质量比为 $i:1$, j 表示质量比为 $i:1$ 的第 j 组平行试验; \bar{f}_2 表示每组平行试验图像熵的平均值, f_2 表示同质量比下图像熵的平均值; \bar{M} 、 P_i 、 C_V 分别表示质量均分称重法下每个试验方案对应的10份纤维质量均值、质量损失率和变异系数; \bar{C}_V 表示同质量比下对应的4个变异系数 C_V 的均值。

表6 粉煤灰作用下不同质量比对应的PVA纤维图像熵
Table 6 Image entropy of PVA fibers with different mass ratios under the action of fly ash

Experimental plan	\bar{f}_2	\bar{f}_{21}	f_2	Experimental plan	\bar{f}_2	\bar{f}_{21}	f_2
M_{0-1-1}	1.68			M_{50-1-1}	2.26		
M_{0-1-2}	1.61	1.67		M_{50-1-2}	2.06	2.15	
M_{0-1-3}	1.73			M_{50-1-3}	2.12		
M_{0-2-1}	1.64			M_{50-2-1}	2.00		
M_{0-2-2}	1.68	1.67		M_{50-2-2}	1.97	1.97	
M_{0-2-3}	1.68		1.67	M_{50-2-3}	1.95		2.10
M_{0-3-1}	1.66			M_{50-3-1}	2.10		
M_{0-3-2}	1.70	1.72		M_{50-3-2}	2.22	2.16	
M_{0-3-3}	1.79			M_{50-3-3}	2.18		
M_{0-4-1}	1.60			M_{50-4-1}	2.08		
M_{0-4-2}	1.63	1.64		M_{50-4-2}	2.16	2.11	
M_{0-4-3}	1.68			M_{50-4-3}	2.07		
M_{25-1-1}	2.06			M_{75-1-1}	2.15		
M_{25-1-2}	2.12	2.14		M_{75-1-2}	2.08	2.10	
M_{25-1-3}	2.23			M_{75-1-3}	2.07		
M_{25-2-1}	1.99			M_{75-2-1}	2.16		
M_{25-2-2}	2.07	2.02		M_{75-2-2}	2.16	2.16	
M_{25-2-3}	2.00		2.04	M_{75-2-3}	2.17		2.13
M_{25-3-1}	1.98			M_{75-3-1}	2.13		
M_{25-3-2}	2.08	2.01		M_{75-3-2}	2.11	2.11	
M_{25-3-3}	1.98			M_{75-3-3}	2.09		
M_{25-4-1}	1.92			M_{75-4-1}	2.11		
M_{25-4-2}	1.99	1.98		M_{75-4-2}	2.13	2.15	
M_{25-4-3}	2.04			M_{75-4-3}	2.21		

对表6中PVA纤维的 \bar{f}_2 进行0.05水平下的显著性检验,得到表8.其中:DF表示自由度;F表示检验水平;P表示显著性。

由表8可知,显著性 $P=0.019$,小于显著水平0.05,表明 \bar{f}_2 的总体均值显著不同,即在作为分散剂的粉煤灰作用下,3种质量比对PVA纤维的分散性影响显著.质量比为50:1时粉煤灰对PVA纤维的分散效果见图2。

表7 质量均分称重法的试验结果

Table 7 Test results of mass-equipartition weighing method

Experimental plan	\bar{M}/g	$P_i/\%$	C_V	\bar{C}_V
$M_{25}(1)$	1.852	7.4	0.092	
$M_{25}(2)$	1.739	13.0	0.132	0.042
$M_{25}(3)$	1.864	6.8	0.111	
$M_{50}(1)$	1.850	7.5	0.055	
$M_{50}(2)$	1.791	10.4	0.071	0.013
$M_{50}(3)$	1.838	8.1	0.060	
$M_{75}(1)$	1.812	9.4	0.047	
$M_{75}(2)$	1.841	8.0	0.050	0.008
$M_{75}(3)$	1.782	10.9	0.055	

表8 图像熵的显著性水平检验

Table 8 Significance level test of image entropy

Item	DF	Sum of squares	Mean square	F	P
Model	2	0.053	0.026	4.475	0.019
Error	33	0.195	0.006		
Aggregate	35	0.247			

由表6、7可知,随着质量比的增加,图像熵越来越大,PVA纤维质量均值的变异系数越来越小.当质量比从25:1增至75:1时,图像熵 f_2 从2.04单调增至2.13,变异系数均值从0.042单调降至0.008.由此可知,采用质量均分称重法与采用灰度共生矩阵图像处理法所得结论具有一致性.通过使用单因素方差分析、质量均分称重法对灰度共生矩阵图像处理法进行检验和验证,可知灰度共生矩阵图像处理法的图像熵 f_2 能合理、有效地代表纤维的分散程度,且当质量比大于50:1时,图像熵 f_2 的变化趋于平缓.结合实际纤维分散情况,认定此时PVA纤维趋于均匀分散状态,即认定质量比为50:1, $f_2=2.10$ 时,PVA纤维束刚好处于临界均匀分散点。

由图2可知,当加入粉煤灰后,较小粒径级别的玻璃球状粉煤灰颗粒在外力作用下,不断渗透到纤维束内部,并吸附在纤维表面.当对纤维束进行搅拌分散时,吸附在PVA纤维表面的粉煤灰对纤维束的分散起到了良好的润滑作用,进而使纤维在外力作用下分散.当质量比大于50:1时,纤维表面对较小粒径粉煤灰的吸附已趋于饱和,而较大粒径粉煤灰已能充分起到润滑作用,使PVA纤维束充分分散.因此,此时再加入过多粉煤灰对纤维的分散作用影响不大,图像熵和变异系数的变化最后趋于平缓。

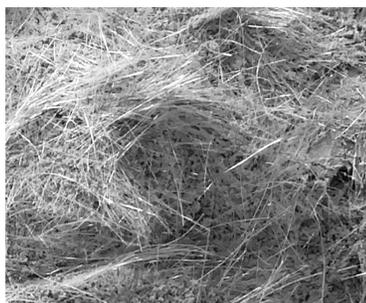


图2 粉煤灰对PVA纤维的分散效果

Fig. 2 Dispersion effect of fly ash on PVA fibers
($m_{FA}:m_{PVA}=50:1$)

2.2 PVA纤维增强水泥砂浆和水泥稳定碎石力学性能

2.2.1 PVA纤维的分散程度对水泥砂浆力学性能的改性作用

水泥砂浆7 d抗折强度、7 d抗压强度、断裂能的

试验结果见表9~11.对于普通水泥砂浆而言,其7 d抗折强度为3.59 MPa;7 d抗压强度为39.3 MPa;断裂能为72.2 J.

PVA纤维分散程度对水泥砂浆力学性能的改性作用,指的是掺有PVA纤维和粉煤灰的水泥砂浆力学性能在扣除粉煤灰增量的影响后,所得PVA纤维的分散程度对掺PVA纤维水泥砂浆力学性能的改性作用.以表9中质量比 $m_{FA}:m_{PVA}=25:1$ 为例,此时 $f_2=2.04$,掺有PVA纤维和粉煤灰的水泥砂浆抗折强度为4.24 MPa,对应的掺粉煤灰水泥砂浆抗折强度为3.91 MPa,而未采用粉煤灰进行处理(质量比为0:1)的掺PVA纤维水泥砂浆的抗折强度为3.61 MPa;扣除粉煤灰影响后,在PVA纤维分散程度的改性作用下,水泥砂浆抗折强度为3.94 MPa($4.24-3.91+3.61=3.94$ MPa).同理可分析其余质量比下PVA纤维分散程度对水泥砂浆抗折强度的改性作用.

表9 水泥砂浆7 d抗折强度试验结果

Table 9 Test results of flexural strength of cement mortar at 7 d

$m_{FA}:m_{PVA}$	f_2	Flexural strength of cement mortar at 7 d/MPa		Effect of fibers dispersion on the modification of cement mortar/MPa
		With fly ash	With PVA fiber and fly ash	
0:1	1.67		3.61	3.61
25:1	2.04	3.91	4.24	3.94
50:1	2.10	4.17	4.73	4.17
75:1	2.13	4.20	4.81	4.22

由表9可知,掺入PVA纤维能提高水泥砂浆的抗折强度,且水泥砂浆的抗折强度随着图像熵的增加而增大,即PVA纤维在水泥砂浆中的分散程度越高,水泥砂浆的抗折强度越高.另外,当 $1.67 < f_2 < 2.10$ 时,随着 f_2 的增加,水泥砂浆中束状和团状的PVA纤维逐渐减少,水泥砂浆的抗折强度随着 f_2 的增加而显著增大;当 $f_2 \geq 2.10$ 时,水泥砂浆中的PVA纤维分散程度趋于稳定,此时水泥砂浆抗折强

度随着图像熵的增加变化不大;当 $f_2 = 2.13$ 时,水泥砂浆中的PVA纤维分散均匀,此时其抗折强度相对于未掺PVA纤维的普通水泥砂浆抗折强度提升了17.5%,相对于 $f_2 = 1.67$ 即PVA纤维未均匀分散的水泥砂浆抗折强度提升了16.9%.

拟合出不同PVA纤维分散程度下,水泥砂浆抗折强度与图像熵之间的关系,见式(3).

$$y = 1.27x + 1.465, 1.67 \leq x \leq 2.13, R^2 = 0.92 \quad (3)$$

表10 水泥砂浆的7 d抗压强度试验结果

Table 10 Test results of compressive strength of cement mortar at 7 d

$m_{FA}:m_{PVA}$	f_2	Compressive strength of cement mortar at 7 d/MPa		Effect of fibers dispersion on the modification of cement mortar/MPa
		With fly ash	With PVA fiber and fly ash	
0:1	1.67		37.4	37.4
25:1	2.04	43.2	43.8	38.0
50:1	2.10	47.6	48.1	37.9
75:1	2.13	47.8	48.5	38.1

由表10可知:在水泥砂浆中掺入PVA纤维并增强PVA纤维在其中的分散程度,对水泥砂浆抗压

强度影响不大.

由表11可知:掺入PVA纤维能显著提高水泥

表11 水泥砂浆的断裂能试验结果
Table 11 Test results of fracture energy of cement mortar

$m_{FA}:m_{PVA}$	f_2	Fracture energy of cement mortar/J		Effect of fibers dispersion on the modification of cement mortar/J
		With fly ash	With PVA fiber and fly ash	
0:1	1.67		90.7	90.7
25:1	2.04	93.9	116.3	113.1
50:1	2.10	103.7	148.6	135.6
75:1	2.13	86.9	138.8	142.6

砂浆的断裂能,且水泥砂浆的断裂能随着图像熵的增加而增加,即PVA纤维在水泥砂浆中的分散程度越高,水泥砂浆的断裂能越高.原因是随着图像熵的增加,水泥砂浆中束状和团状的PVA纤维逐渐减少,致使水泥砂浆的断裂能显著增大.另外,当 $2.10 < f_2 < 2.13$ 时,水泥砂浆中的PVA纤维趋于均匀分散,随着图像熵的增加,水泥砂浆的断裂能增量有所降低,此时水泥砂浆的断裂能随图像熵的增加变化不大.

当 $f_2 = 2.13$ 时,水泥砂浆中的PVA纤维分散均匀,PVA纤维的断裂能相对于普通水泥砂浆断裂能

提升了97.5%,相对于 $f_2 = 1.67$ 即PVA纤维未均匀分散情况下的水泥砂浆断裂能提升了57.2%.

拟合出不同PVA纤维分散程度下,水泥砂浆断裂能与图像熵之间的关系,见式(4).

$$y = 95.84x^2 - 249x + 233.1, 1.67 \leq x \leq 2.13, R^2 = 0.94 \quad (4)$$

2.2.2 PVA纤维分散程度对水泥稳定碎石劈裂强度的改性作用

水泥稳定碎石劈裂强度试验结果见表12.定义 $f_2 = 1.50$ 为普通水泥稳定碎石的图像熵.

表12 水泥稳定碎石劈裂强度试验结果
Table 12 Test results of splitting strength of cement stabilized macadam

$m_{PVA}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	f_2	Splitting strength of cement stabilized macadam/MPa		
		7 d	28 d	90 d
0	1.50	0.26	0.46	0.62
	1.67	0.31	0.54	0.74
0.9	2.04	0.33	0.56	0.74
	2.10	0.33	0.58	0.76
	2.13	0.34	0.59	0.78

由表12可知:水泥稳定碎石的劈裂强度随图像熵 f_2 的增加而增大;掺有粉煤灰和PVA纤维的水泥稳定碎石劈裂强度相对于普通水泥稳定碎石而言有显著提升;当 $1.67 < f_2 < 2.13$ 时,随着 f_2 的增加,水泥稳定碎石中束状和团状的PVA纤维逐渐减少,其劈裂强度随着 f_2 的增加而增大.

以养护龄期90 d,PVA纤维掺量为 0.9 kg/m^3 的情况为例.在PVA纤维均匀分散的条件下,水泥稳定碎石的劈裂强度相对于PVA纤维未均匀分散时提升了5.4%,相对于普通水泥稳定碎石提升了25.8%.

将养护龄期为90 d的水泥稳定碎石劈裂强度与 f_2 的关系拟合成线性函数关系式,见式(5):

$$y = 0.1863x + 0.3763, 1.67 \leq x \leq 2.13, R^2 = 0.72 \quad (5)$$

2.2.3 PVA纤维的分散程度对水泥基复合材料力学性能的改性作用

纤维水泥基复合材料受到破坏时,基体中会产生裂纹,并伴有纤维脆断和拔出现象.在水泥砂浆和水泥稳定碎石中,PVA纤维具有传递应力、阻挡基体裂纹扩展的功能,而PVA纤维与水泥基界面的结合强度和有效承载面积直接影响着材料性能的发挥.

对于掺PVA纤维的水泥基复合材料,当质量比为0:1时,PVA纤维在基体材料中未均匀分散,材料内部存在束状和团状的纤维.由于这些束状和团状PVA纤维的存在,降低了纤维与水泥基界面的结合强度和有效承载面积,从而降低了纤维的有效利用率.另外,这些束状和团状PVA纤维的存在,使材料内部随机分布着缺陷,当材料受载时,这些缺陷不能起到良好的应力传递和分散作用,从而降低了材料

的力学性能和使用寿命。

当PVA纤维的图像熵 f_2 不断增大时,由于纤维的分散程度提高,材料中束状和团状的纤维减少,材料内部随机分布的缺陷减少,致使材料的密实度和纤维有效利用率不断增加.PVA纤维与基体界面的结合强度和有效承载面积增加,使PVA纤维得以在材料中充分体现其桥接作用,从而有效保护了基体,提高了材料性能。

3 结论

(1)采用图像熵对PVA纤维的分散性进行评价具有代表性.粉煤灰能有效促进PVA纤维的分散,随着粉煤灰与PVA纤维质量比的增加,图像熵 f_2 增加,PVA纤维质量均值的变异系数减小,PVA纤维束的分散程度提高.当质量比大于50:1时,PVA纤维束能在水泥基材料中均匀分散。

(2)PVA纤维的分散程度对水泥砂浆的性能影响显著.当PVA纤维图像熵 $f_2=2.13$ 时,纤维束能均匀分散,PVA纤维水泥砂浆的抗折强度、断裂能相对于 $f_2=1.67$,即纤维未均匀分散时分别提升了16.9%、57.2%;相对于普通水泥砂浆分别提升了17.5%、97.5%。

(3)水泥稳定碎石的劈裂强度随图像熵 f_2 的增加而增大.当 $f_2=2.13$ 时,PVA纤维水泥稳定碎石的劈裂强度相对于 $f_2=1.67$ 时提升了5.4%,相对于普通水泥稳定碎石提升了25.8%。

参考文献:

- [1] 邓宗才,冯琦.混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能[J].建筑材料学报,2016,19(1):14-21.
DENG Zongcai, FENG Qi. Fracture properties of hybrid fibers reinforced reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 14-21. (in Chinese)
- [2] 姜睿,徐世焯,贾金青.高轴压比PVA纤维超高强混凝土短柱延性的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(8):54-60.
JIANG Rui, XU Shilang, JIA Jinqing. An experimental study on the seismic ductility of PVA fiber super-high-strength concrete columns with high axial load ratios[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 54-60. (in Chinese)
- [3] 高淑玲,徐世焯.利用水平外力总功研究PVA纤维增强水泥基复合材料韧性[J].东南大学学报(自然科学版),2007,31(2):324-329.
GAO Shuling, XU Shilang. Toughness study on PVA fiber reinforced cementitious composites using totalwork done by horizontal load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2007, 31(2): 324-329. (in Chinese)
- [4] 高淑玲,徐世焯.PVA纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究[J].大连理工大学学报,2007,47(2):233-239.
GAO Shuling, XU Shilang. Experimental study on tensile properties of PVA fiber reinforced cement-based composites [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(2): 233-239. (in Chinese)
- [5] 李艳,刘泽军,梁兴文.高性能PVA纤维增强水泥基复合材料单轴受拉特性[J].工程力学,2013,30(1):322-330.
LI Yan, LIU Zejun, LIANG Xingwen. Tensile performance of high performance PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial tension [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 322-330. (in Chinese)
- [6] 王海龙,罗月静,彭光宇,等.掺合料对纤维增强水泥基材料拉伸性能的影响[J].西南交通大学学报,2017,52(1):61-68.
WANG Hailong, LUO Yuejing, PENG Guangyu, et al. Effect of admixtures on tensile behavior of fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 61-68. (in Chinese)
- [7] 徐世焯,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60.
XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [8] 俞靖洋,梁乃兴,童攀,等.聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石基层疲劳寿命分析[J].硅酸盐通报,2019,38(8):2408-2413,2419.
YU Jingyang, LIANG Naixing, TONG Pan, et al. Fatigue life analysis of polyvinyl alcohol fiber modified cement stability macadam base pavement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(8): 2408-2413, 2419. (in Chinese)
- [9] 张鹏,李清富,沈捷.聚丙烯纤维水泥稳定碎石的断裂能试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2008,36(6):72-77.
ZHANG Peng, LI Qingfu, SHEN Jie. Fracture energy research and study on cement stabilized macadam with polypropylene fiber [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2008, 36(6): 72-77. (in Chinese)
- [10] 吕林女,陈焱俊,肖静,等.PVA纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(1):97-101,160.
LÜ Linnü, CHEN Yaojun, XIAO Jing, et al. Tensile performance of PVA fiber reinforced cementitious composites. Engineering [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science), 2017, 50(1): 97-101, 160. (in Chinese)
- [11] MA Y H, GU J Y, LI Y, et al. The bending fatigue performance of cement-stabilized aggregate reinforced with polypropylene filament fiber [J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 230-236.
- [12] BENGI A, EMRE E, ALI D. Strengthening of brick masonry with PVA fiber reinforced cement stucco [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 255-262.
- [13] 李艳,梁兴文,邓明科.高性能PVA纤维增强水泥基复合材料常规三轴受压本构模型[J].工程力学,2012,29(1):106-113.
LI Yan, LIANG Xingwen, DENG Mingke. A constitutive

- model for high performance PVA fiber reinforced cement composites under conventional triaxial compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(1): 106-113. (in Chinese)
- [14] 李艳,刘泽军.高韧性PVA-FRCC单轴受压力学性能及本构关系[J].*建筑材料学报*,2014,17(4):606-612.
LI Yan,LIU Zejun. Study on mechanical performance and constitutive equation of high toughness PVA-FRCC under uniaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(4): 606-612. (in Chinese)
- [15] 徐世焯,陈超,李庆华,等.超高韧性水泥基复合材料动态压缩力学性能的数值模拟研究[J].*工程力学*,2019,36(9):50-59.
XU Shilang , CHEN Chao , LI Qinghua, et al. Numerical simulation on dynamic compressive behavior of ultra-high toughness cementitious-composites [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9):50-59. (in Chinese)
- [16] YUAN L Q, LIANG N X, ZHAO C H. Analysis on influence of the dispersion degree of PVA fibers on pavement performance of cement-stabilized macadam[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019.
- [17] 张丽辉,郭丽萍,孙伟,等.高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2014,44(5):1037-1040.
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Rheological property and fiber dispersion of high ductility cementitious composites [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2014, 44(5):1037-1040. (in Chinese)
- [18] 刘建忠,张丽辉,李长风,等.聚乙烯醇纤维在水泥基复合材料中的分散性表征及调控[J].*硅酸盐学报*,2015,43(8):1061-1066.
LIU Jianzhong, ZHANG Lihui, LI Changfeng, et al. Dispersive characterization and control of fiber in polyvinyl alcohol fiber cement composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(8): 1061-1066. (in Chinese)
- [19] 曹源文,李亚南,郑南翔,等.PVA纤维水泥稳定碎石拌和均匀性检测技术[J].*公路交通科技*,2019,36(2):7-13,27.
CAO Yuanwen, LI Yanan, ZHEN Nanxiang, et al. Detection technology of mixing uniformity of PVA fiber cement stabilized macadam [J].*Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(2): 7-13, 27. (in Chinese)
- [20] 曹源文,赵毅,王棋,等.PVA纤维水泥稳定碎石拌和均匀性研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2018,37(5):29-33.
CAO Yuanwen, ZHAO Yi, WANG Qi, et al. Mixing uniformity of cement stabilized macadam with PVA fiber [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2018, 37(5):29-33. (in Chinese)
- [21] 肖伟.PVA纤维束搅拌设备作用机理和分散技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
XIAO Wei. Research on the mechanism and dispersion technology of PVA fiber bundle stirring equipment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [22] WANG C, JIAO G S, LI B L, et al. Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced cement-based composites[J].*Ceramics International*, 2017, 43: 15122-15132.
- [23] GAO J, SHA A M, WANG Z J, et al.Characterization of carbon fiber distribution in cement-based composites by computed tomography [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 177: 134-147.
- [24] 杨杰,黄朝兵.数字图像处理及MATLAB实现[M].北京:电子工业出版社,2010.
YANG Jie, HUANG Chaobian. Digital image processing and MATLAB realization[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)