

# PVA 纤维增韧地聚合物动态压缩试验研究\*

Study on Dynamic Compression Properties of Geopolymer Composites Reinforced by Polyvinyl Alcohol Fiber

朱 星, 姜荣斌, 黄 杰

(泰州职业技术学院, 江苏 泰州 225300)

**摘要:** 为了改善地聚合物韧性, 以粉煤灰、高炉矿渣和无水硅酸钠为原料制备地聚合物, 利用 PVA 纤维对其进行增韧。采用响应面模型研究粉煤灰和矿渣比例、纤维长度、纤维掺量对地聚合物动态压缩强度和韧性的影响, 利用霍普金森压杆试验考察地聚合物韧性。结果表明: 加入纤维组试件动态压缩强度在 123.21 ~ 226.23 MPa 之间, 是空白组的 1.2~2.2 倍, 韧性在 0.52~1.22 MJ/m<sup>3</sup> 之间, 比空白组试件提高了 1.2~2.9 倍, 纤维掺量、纤维长度以及两者的交互效应的  $F$  值大于 1,  $P$  值小于 0.05, 对试件动态压缩强度的影响大于其他因素, 纤维长度、粉煤灰和矿渣比例以及两者的交互效应对韧性的影响大于其他因素; 在最优试验因素下, 地聚合物动态压缩强度和韧性理论值为 228.19 MPa 和 1.25 MJ/m<sup>3</sup>, 与试验结果非常吻合。

**关键词:** PVA 纤维; 增韧; 地聚合物; 霍普金森压杆试验

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0031-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.006

ZHU Xing, JIANG Rongbin, HUANG Jie

(Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** In order to improve the toughness of geopolymer, fly ash, blast furnace slag, and anhydrous sodium silicate were used as raw materials to prepare geopolymers, and PVA fibers were used to toughen geopolymer. The response surface model was used to study the effects of fly ash and slag ratio, fiber length, and fiber content on the dynamic compressive strength and toughness of geopolymer. The Hopkinson pressure bar test was used to investigate the toughness of geopolymer. The results showed that the dynamic compressive strength of the samples with added fibers ranged from 123.21 to 226.23 MPa, which was 1.2 to 2.2 times that of the blank group. This was because the bridging effect effectively blocked the propagation of stress waves in the specimen, improving the compressive strength. The toughness ranged from 0.52 to 1.22 MJ/m<sup>3</sup>, which was 1.2 to 2.9 times higher than that of the blank group samples; The  $F$  values of fiber content, fiber length, and their interaction effect were greater than 1, and the  $P$  values were less than 0.05, indicating that they had greater impacts on the dynamic compressive strength of the specimen than other factors, the influences of fiber length, fly ash and slag ratio and their interaction effect on toughness were greater than other factors; Under the optimal experimental factors, the theoretical values of dynamic compressive strength and toughness of geopolymer were 228.19 MPa and 1.25 MJ/m<sup>3</sup>, which were in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** PVA fiber; toughness; geopolymer; Hopkinson pressure bar test

\* 基金项目: 江苏省高等职业教育高水平专业群建设项目 (2020-80); 江苏省发改委省级工程研究中心建设项目 (JPERC2021-168); 江苏高校“青蓝工程”(苏教师函[2023]27号); 泰州市职业教育联合会重点项目 (2024BZD03)。

作者简介: 朱 星 (1987—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 混凝土材料及耐久性。

收稿日期: 2023-03-21

## 材料科学

## 0 引言

地聚合物 (geopolymer) 是一种在碱激发剂作用下形成的具有三维网络结构的无机凝胶材料, 以硅氧四面体和铝氧四面体为结构单元。地聚合物通常以高炉矿渣、粉煤灰为原料, 具有硬化快、强度高、耐高温、耐腐蚀的优点, 是一种能够代替普通硅酸盐水泥的新型绿色胶凝材料, 广泛用作建筑、密封和耐高温材料<sup>[1]</sup>。

与传统水泥相似, 地聚合物具有脆性大、延展性低的缺点, 在很大程度上限制了地聚合物的工程应用<sup>[2]</sup>。利用纤维对地聚合物进行增韧, 可以有效提高其韧性, 克服地聚合物的缺点, 拓宽其应用范围。

陈娅等<sup>[3]</sup>采用化学沉积法将纳米 SiO<sub>2</sub> 附着在聚乙烯醇 (PVA) 纤维和聚乙烯 (PE) 纤维表面, 发现经 SiO<sub>2</sub> 疏水改性后的 PVA 纤维掺入到地聚合物中后, 其抗压、抗折强度有所下降; 经 SiO<sub>2</sub> 亲水改性后的 PE 纤维掺入后, 地聚合物的抗压、抗折强度得到提升。沈珂羽<sup>[4]</sup>将 10 组不同体积掺量的碳纤维掺进粉煤灰-偏高岭土地聚合物中, 发现掺入碳纤维可同时提高其强度和韧性, 最优碳纤维掺量为 0.8%~1.0%。王瑞杰等<sup>[5]</sup>研究了玻璃纤维、玄武岩纤维、聚丙烯 (PP) 纤维和 PVA 纤维对赤泥-煤系偏高岭土地聚合物力学性能的影响, 发现玄武岩纤维和 PVA 纤维在强度增强方面效果接近, 而 PVA 纤维可以有效改变地聚合物的脆性破坏模式, 与基体的粘结效果优于其他纤维。周圣杰等<sup>[6]</sup>研究了不同植物纤维对低钙粉煤灰和高炉矿渣地质聚合物增韧效果的影响, 发现 1% 掺量的椰壳纤维增韧效果最显著。

在众多纤维中, PVA 纤维具有较高的抗拉强度, 可以显著增强基体的强度和韧性。吴胧阳<sup>[7]</sup>研究了

PVA 纤维对粉煤灰、矿渣地聚合物在高温作用下物理性质和力学性能的影响, 当纤维长度 9 mm、纤维掺量 2% 时, 地聚合物力学性能最佳; 满向阳<sup>[8]</sup>研究 PVA 纤维对粉煤灰地聚合物增韧效果的影响, 当纤维体积掺量不超过 2% 时, 试件抗折强度和韧性显著提高, 基体呈现出多缝开裂和应变硬化特征; 阚鑫禹等<sup>[9]</sup>研究了 PVA 纤维对矿粉/粉煤灰地质聚合物韧性的影响, 发现当 PVA 掺量为 0.5% 时, 地聚合物抗压和抗折强度分别提高了 9.6% 和 25%; Lee 等<sup>[10]</sup>研究 PVA 纤维对矿渣地聚合物应变硬化行为的影响, 地聚合物拉伸应变最高可以达到 4.7% 的应变硬化; Nematollahi 等<sup>[11]</sup>发现 PVA 纤维增韧的地聚合物表现出优异的断裂性能和弯曲强度; Ohno 等<sup>[12]</sup>利用 PVA 纤维制备 4% 拉伸延性的粉煤灰地聚合物, 在单轴拉伸作用下裂缝最大宽度和平均宽度分别为 117 和 45 μm; Xu 等<sup>[13]</sup>研究了两种 PVA 纤维长度对地聚合物增韧效果的影响, 发现长度 12 mm 的 PVA 纤维增韧效果优于 8 mm。

从已有的研究可以看到, PVA 增强的地聚合物在静态荷载条件下表现出了优秀的力学强度, 但在动态压缩荷载下的力学性能研究不多。基于此, 利用 PVA 纤维对粉煤灰-高炉矿渣地聚合物进行增韧, 采用响应面设计研究了粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量对地聚合物动态压缩强度和韧性的影响, 为纤维增韧地聚合物的实际应用提供了借鉴。

## 1 试验

## 1.1 原材料

粉煤灰为低钙灰, 物理性能、化学成分见表 1; 高炉矿渣为 S140 级, 物理性能、化学成分见表 2; PVA 纤维性能指标见表 3; 碱激发剂为无水硅酸钠粉末。

表 1 低钙粉煤灰物理性能、化学成分

Table 1 Physical properties and chemical composition table of low calcium fly ash

| 物理性能       |                             |                               |           |           | 化学组分/%           |                                |                                |      |                  |                  |      |      |                 |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|------|------|-----------------|
| 细度/<br>/μm | 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 比表面积/<br>(m <sup>2</sup> /kg) | 含水量<br>/% | 烧失量<br>/% | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MgO  | NaO  | SO <sub>3</sub> |
| 52         | 2.7                         | 310                           | 0.7       | 3.57      | 51.21            | 33.24                          | 5.01                           | 4.11 | 1.59             | 1.18             | 0.94 | 0.74 | 0.42            |

表 2 高炉矿物理性能、化学成分

Table 2 Physical properties and chemical composition table of blast furnace ore

| 物理性能                        |            |       | 化学组分/%           |                                |                                |       |                  |                  |      |      |                 |  |  |
|-----------------------------|------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|------------------|------|------|-----------------|--|--|
| 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 28 d 活性指数% | 流动性比% | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MgO  | NaO  | SO <sub>3</sub> |  |  |
| 3.1                         | 143        | 115   | 23.14            | 12.24                          | 1.32                           | 56.36 | 0.42             | 1.64             | 2.98 | 0.30 | 1.51            |  |  |

表3 PVA 纤维性能指标

Table 3 Performance indicators of PVA fiber

| 平均长度<br>/mm | 直径<br>/μm | 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 抗拉强度<br>/MPa | 模量<br>/GPa | 断裂延<br>伸率/% |
|-------------|-----------|-----------------------------|--------------|------------|-------------|
| 10~20       | 25        | 1.09                        | 1 202        | 35         | 6.2         |

## 1.2 试验方案

为了研究地聚合物中各个组分对其动态压缩试验中压缩强度和韧性的影响,选择粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量这三个变量作为试验因素,每个因素取3个水平,采用响应面试验设计进行研究,中心试验次数为3,采用 Design-Expert 软件进行方差分析(ANOVA),响应面试验设计见表4<sup>[14]</sup>。

表4 响应面试验设计

Table 4 The design table of response surface experiment

| 水平 | 因素              |                |               |
|----|-----------------|----------------|---------------|
|    | A<br>(粉煤灰和矿渣比例) | B<br>(纤维长度/mm) | C<br>(纤维掺量/%) |
| 1  | 0.5             | 10             | 1             |
| 2  | 1.5             | 15             | 2             |
| 3  | 2.5             | 20             | 3             |

## 1.3 试件制备

为了制备动态力学测试用试件,按照表4的响应面试验方案制备不同组成的地聚合物试件。首先称量一定质量的粉煤灰、高炉矿渣、碱激发剂、PVA 纤维,将粉煤灰和矿渣放入搅拌机中混合5 min,然后加入一定量的自来水,继续搅拌5 min,随后加入纤维,搅拌5 min。将搅拌好的物料注入 $\phi 50 \times 50$  mm的模具中,放于振动台上振动3 min,1 d后拆模。然后,将成型试件置于养护箱中,在标准养护条件下(温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%以上)养护28 d。在进行动态力学测试之前,对试件端面进行打磨,打磨精度为0.02 mm。试验中激发剂配合比为0.07,水胶比为0.4。

## 1.4 动态压缩测试

采用分离式霍普金森压杆装置测试地聚合物试块的动态压缩强度和韧性,冲击压力0.5 MPa,应变率在 $70 \sim 180 \text{ s}^{-1}$ ,采用 $\phi 10 \times 4$  mm的橡胶片进行波形整形,每个编号的试验测试5个试块,取平均值作为最终结果。分离式霍普金森压杆测试原理如图1所示。

测试时,将试件夹在入射杆和透射杆之间,撞击杆以一定压力撞击入射杆,产生压缩应力波,当入射杆中的应力脉冲到达试件接触面时,一部分被反射,在入射杆中形成反射波;另一部分则通过试件

进入透射杆中,形成透射波。通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片连续记录随时间变化的脉冲信号,利用一维波理论和均匀性假定<sup>[15]</sup>,得到试件的应力和应变,利用应力-应变曲线得到试件的压缩强度,对应力-应变曲线进行面积积分可以表示试件韧性大小。

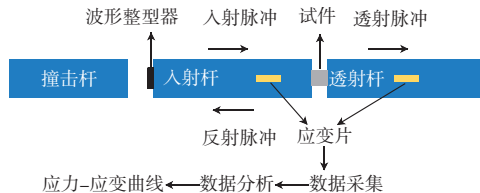


图1 分离式霍普金森压杆测试原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of split Hopkinson pressure bar test

## 2 试验结果分析

### 2.1 纤维对试件动态压缩性能的影响

采用响应面试验设计研究粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量对地聚合物动态压缩过程中压缩强度和韧性的影响,结果见表5,典型的地聚合物试件碎块级配曲线和应力-应变曲线如图2~3所示。

表5 响应面试验

Table 5 Design scheme Response of response surface method experimental

| 编号 | 粉煤灰和<br>矿渣比例 | 纤维长度<br>/mm | 纤维掺量<br>/% | 动态压缩强<br>度/MPa | 韧性/<br>(MJ/m <sup>3</sup> ) |
|----|--------------|-------------|------------|----------------|-----------------------------|
| 0  | 0.5          |             |            | 102.06         | 0.42                        |
| 1  | 0.5          | 10          | 2          | 165.44         | 0.86                        |
| 2  | 0.5          | 20          | 2          | 154.36         | 0.57                        |
| 3  | 0.5          | 15          | 3          | 213.56         | 1.15                        |
| 4  | 2.5          | 15          | 3          | 226.23         | 1.16                        |
| 5  | 1.5          | 10          | 1          | 130.65         | 0.81                        |
| 6  | 2.5          | 20          | 2          | 156.45         | 0.62                        |
| 7  | 1.5          | 20          | 1          | 123.21         | 0.74                        |
| 8  | 1.5          | 10          | 3          | 192.41         | 0.80                        |
| 9  | 1.5          | 15          | 2          | 166.54         | 1.22                        |
| 10 | 1.5          | 15          | 2          | 168.67         | 1.20                        |
| 11 | 1.5          | 20          | 3          | 172.31         | 0.52                        |
| 12 | 2.5          | 15          | 1          | 136.57         | 1.18                        |
| 13 | 1.5          | 15          | 2          | 169.45         | 1.21                        |
| 14 | 0.5          | 15          | 1          | 130.09         | 1.17                        |
| 15 | 2.5          | 10          | 2          | 148.01         | 0.93                        |

由表5可知,空白组试件,动态压缩强度和韧性分别为102.06 MPa和0.42 MJ/m<sup>3</sup>。粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量,对动态压缩强度提升显著,当上述参数分别在0.5~2.5、10~20 mm和1%~3%之间变化时,动态压缩强度在123.21~226.23 MPa之间,是空白组试件的1.2~2.2倍。这是由于空白组试件,在动态冲击下,应力波在试件

## 材料科学

内部沿着多条裂纹传播直至贯通；当在试件中加入纤维后，由于桥连作用，可以有效阻断应力波在试件中的传播，保持了试件的完整性，提高了其压缩强度。从图2的不同试件碎片级配曲线可知，不加入PVA纤维的0#试件，体积分率小于60%的碎片粒径在14 mm以下，随着纤维的加入，体积分率小于60%的碎片粒径逐步增加到20~46 mm，试件动态压缩强度增加，完整性不断提高。

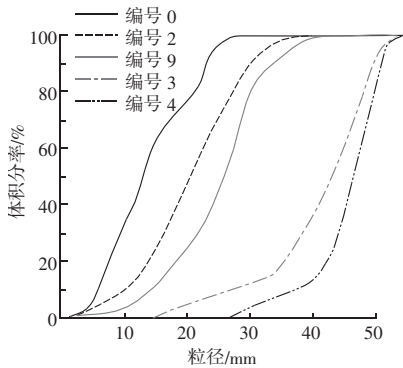


图2 不同试件碎块级配曲线

Fig. 2 Grading curves of different samples fragments

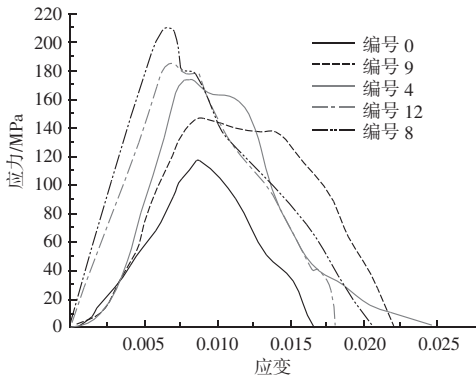


图3 不同试件的应力-应变曲线

Fig. 3 Strain-stress curves of different samples

加入PVA纤维后，试件的韧性在 $0.52 \sim 1.22 \text{ MJ/m}^3$ 之间，是空白组试件的1.2~2.9倍。这是由于受到动态冲击后，试件中的纤维并没有随着裂纹的发展同时断裂，而是相对于基体发生了滑动，或者在冲击过程中被拔出，这两种情况都会吸收冲击能，提高试件韧性。

从图3的不同试件应力-应变曲线可知，在动态冲击初始阶段，所有曲线的应力随着应变线性增加，在加入PVA纤维后，试件峰值应力比不加纤维的0#样品明显提高。超过峰值应力后，未加PVA纤维的试件应力迅速下降，表现出明显的脆性特征；加入

纤维后，曲线出现平台区，应变不断增加，而应力下降缓慢，表现出韧性特征。这是由于纤维的加入，吸收了大部分入射能量，仅有一小部分转化为动能，提高了材料韧性。

### 2.2 试验因素的方差分析

利用方差分析(ANOVA)对表5的响应面试验结果进行分析，判断粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量这三个变量对试件动态压缩强度和韧性影响的显著程度，结果见表6、表7。当某一试验因素的 $F$ 值远大于1，同时 $P$ 值小于0.05(95%置信概率)时，说明该因素的影响显著。

表6 试件动态压缩强度的方差分析  
Table 6 The ANOVA analysis of dynamic compression strength of samples

| 项目             | 自由度 | $F$ 值  | $P$ 值   | 显著性 |
|----------------|-----|--------|---------|-----|
| 模型             | 9   | 9.03   | 0.01    | 显著  |
| A (粉煤灰和矿渣比例)   | 1   | 0.01   | 0.92    | 不显著 |
| B (纤维长度)       | 1   | 12.80  | 0.003 2 | 显著  |
| C (纤维掺量)       | 1   | 70.46  | 0.000 4 | 显著  |
| A × B          | 1   | 0.67   | 0.45    | 不显著 |
| A × C          | 1   | 0.07   | 0.80    | 不显著 |
| B × C          | 1   | 9.28   | 0.02    | 显著  |
| A <sup>2</sup> | 1   | 0.62   | 0.47    | 不显著 |
| B <sup>2</sup> | 1   | 7.51   | 0.04    | 不显著 |
| C <sup>2</sup> | 1   | 0.31   | 0.60    | 不显著 |
| 失拟项            | 3   | 104.44 | 0.11    | 不显著 |

表7 试件韧性的方差分析  
Table 7 The ANOVA analysis of toughness of samples

| 项目             | 自由度 | $F$ 值  | $P$ 值   | 显著性 |
|----------------|-----|--------|---------|-----|
| 模型             | 9   | 36.57  | 0.005   | 显著  |
| A (粉煤灰和矿渣比例)   | 1   | 9.89   | 0.003   | 显著  |
| B (纤维长度)       | 1   | 40.95  | 0.001 4 | 显著  |
| C (纤维掺量)       | 1   | 0.89   | 0.13    | 不显著 |
| A × B          | 1   | 7.04   | 0.006   | 显著  |
| A × C          | 1   | 0.03   | 1.00    | 不显著 |
| B × C          | 1   | 4.00   | 0.10    | 不显著 |
| A <sup>2</sup> | 1   | 0.10   | 0.76    | 不显著 |
| B <sup>2</sup> | 1   | 278.99 | 0.90    | 不显著 |
| C <sup>2</sup> | 1   | 1.76   | 0.24    | 不显著 |
| 失拟项            | 3   | 45.25  | 0.82    | 不显著 |

动态压缩强度响应面模型 $F$ 值大于1， $P$ 值小于0.05；同时失拟项 $F$ 值大于1， $P$ 值大于0.05，这表明模型显著、失拟不显著，即分析结果可靠，没有发生失拟。

在研究的3个变量中，纤维掺量和纤维长度是影响试件动态压缩强度的显著因素，粉煤灰和矿渣比例为不显著因素；在所有的交互效应和二阶效应中，

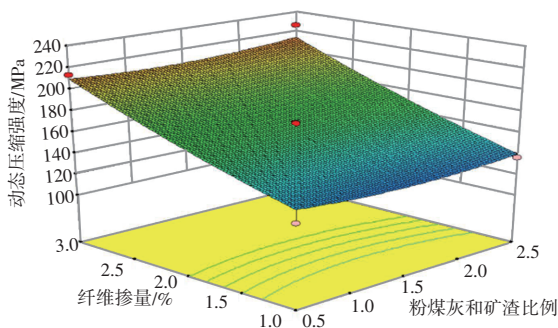
只有纤维掺量 × 纤维长度这个交互效应为影响显著的因素。这一分析结果表明, 在地聚合物中掺入 PVA 纤维, 由于桥连作用的存在, 有效阻断了应力波在试件中的传播, 提高了试件动态压缩强度。

由表 7 可知, 模型  $F$  值和  $P$  值分别为 36.57 和 0.005, 大于 1 且小于 0.05; 失拟项  $F$  值和  $P$  值分别为 45.25 和 0.82, 分别大于 1 和 0.05, 表明模型的分析可靠。在三个变量中纤维长度和粉煤灰和矿渣比例是影响试件韧性的显著因素, 两者的交互效应

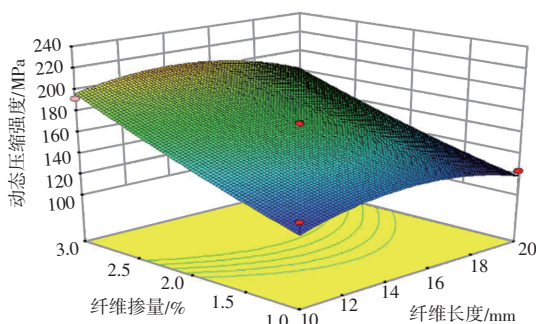
同样影响显著。这一分析结果表明, 在地聚合物中掺入 PVA 纤维, 当试件受到动态冲击后, 纤维会由于滑动和拔出而消耗入射能量, 从而提高地聚合物的韧性。

### 2.3 试验因素对试件动态压缩性能的影响

图 4 为不同试验因素对试件动态压缩强度影响的 3D 曲面图, 图 5 为不同试验因素对试件韧性影响的 3D 曲面图。



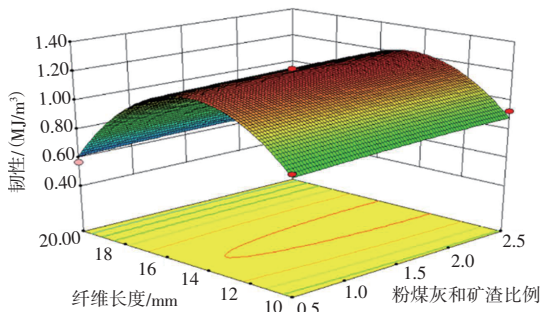
(a) 粉煤灰和矿渣比例与纤维掺量



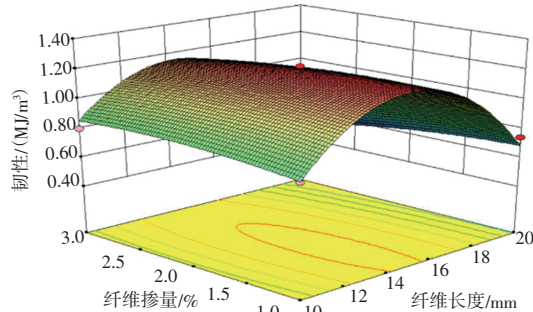
(b) 纤维长度和掺量

图 4 试件动态压缩强度影响因素

Fig. 4 Diagram of factors affecting the dynamic compressive strength of test specimens



(a) 粉煤灰和矿渣比例与纤维长度



(b) 纤维长度和掺量

图 5 试件韧性影响因素图

Fig. 5 Diagram of factors affecting test piece resilience

随着试件中纤维掺量的增加, 试件动态压缩强度不断提高, 从 130 MPa 增加到了 220 MPa。这是由于随着纤维掺量的增加, 试件中形成更多的桥连结构, 有利于提高压缩强度。而粉煤灰和矿渣比例对压缩强度的影响不显著, 这与表 6 的方差分析结果一致。

纤维掺量和纤维长度对试件动态压缩强度均有影响。在同样纤维掺量情况下, 采用 15 mm 的 PVA 纤维更有利于提高压缩强度。这可能是由于当纤维较短时 (如 10 mm), 在试件中形成的桥接长度不

足; 而纤维过长 (如 20 mm), 在试件制备时不利于均匀分散所致。

在粉煤灰和矿渣比例、纤维长度两个因素中, 纤维长度对试件韧性的影响更显著, 当 PVA 纤维长度为 15 mm 时, 试件的韧性明显更高。这是由于中等长度的纤维不仅能更均匀地分散到基体中, 还能通过滑动和拔出作用, 更好地提高试件韧性。纤维长度为 10 mm 时, 消耗的人射能量偏低; 长度为 20 mm 时, 会因为基体中分散不均匀, 形成纤维的交叠, 降低了试件韧性。

## 材料科学

在纤维长度和掺量两个因素中,纤维长度对试件韧性的影响更显著,当纤维长度为 15 mm 时,试件韧性在  $1.2 \text{ MJ/m}^3$  左右。

### 2.4 试验因素优化

基于响应面模型,采用多元线性回归方法得出了 PVA 增韧地聚合物动态压缩强度、韧性与粉煤灰和矿渣比例 (A)、纤维长度 (B)、纤维掺量 (C) 之间的关系,如式 (1)~(2) 所示。利用这些关系计算地聚合物动态压缩强度和韧性的预测值,并

与试验结果进行对比,结果如图 6 所示。

$$\text{动态压缩强度} = -13.13 - 31.98A + 19.52B + 28.73C + 1.55BC \quad (1)$$

$$\text{韧性} = -3.00 + 0.059A + 0.55B + 0.27C - 2.63AB \quad (2)$$

由图 6 可知,式 (1)、(2) 对试件动态压缩强度和韧性的计算结果与试验值非常吻合,说明文中建立的响应面模型可以很好描述自变量与因变量之间的关系。

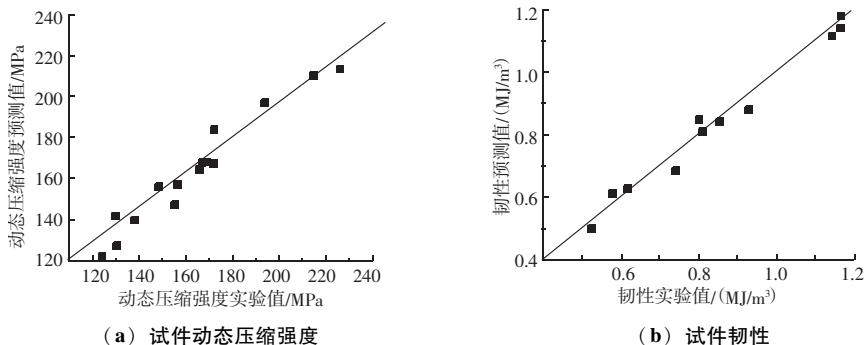


图 6 试验值与理论值对比图

Fig. 6 Comparison chart between experimental and theoretical values

基于响应面模型,对 PVA 增韧地聚合物制备过程中粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量这三个因素进行优化,以试件动态压缩强度和韧性这两个指标最大化为目标,发现当粉煤灰和矿渣比例为 1.5、纤维长度为 15 mm、纤维掺量为 3% 时,上述两个指标最优,计算结果分别为  $228.19 \text{ MPa}$  和  $1.25 \text{ MJ/m}^3$ 。在上述最优条件下进行了 3 次平行试验,动态压缩强度分别为  $226.39$ 、 $228.01$ 、 $229.34 \text{ MPa}$ ,韧性为  $1.23$ 、 $1.26$ 、 $1.24 \text{ MJ/m}^3$ ,均值分别为  $227.91 \text{ MPa}$  和  $1.24 \text{ MJ/m}^3$ ,计算结果与试验值非常吻合。

### 3 结论

以粉煤灰、高炉矿渣、无水硅酸钠为原料制备了地聚合物,利用 PVA 纤维对其进行增韧,利用霍普金森压杆试验,基于响应面模型研究了粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量对地聚合物动态压缩强度和韧性的影响,得到以下主要结论:

(1) PVA 纤维增韧后,试件动态压缩强度在  $123.21 \sim 226.23 \text{ MPa}$  之间,是空白组试件的 1.2~2.2 倍,韧性在  $0.52 \sim 1.22 \text{ MJ/m}^3$  之间,是空白组试件的 1.2~2.9 倍。

(2) 纤维掺量和纤维长度以及两者的交互效应,以及纤维长度和粉煤灰和矿渣比例以及两者的交互效应分别是影响试件动态压缩强度和韧性的因素。

(3) 基于 PVA 增韧地聚合物动态压缩强度、韧性与粉煤灰和矿渣比例、纤维长度和纤维掺量之间的函数关系,计算的压缩强度和韧性理论值与试验结果非常吻合。

(4) 在粉煤灰和矿渣比例为 1.5、纤维长度为 15 mm、纤维掺量为 3% 的最优条件下,试件动态压缩强度和韧性分别为  $227.91 \text{ MPa}$  和  $1.24 \text{ MJ/m}^3$ ,与  $228.19 \text{ MPa}$  和  $1.25 \text{ MJ/m}^3$  的理论值非常吻合。

### 参考文献

- [1] 杨兴春,吴渊,孙志高,等.富镁镍渣-粉煤灰基多孔地质聚合物性能研究[J].粉煤灰综合利用,2023,37(3):77-83.
- [2] WANG Z H, BAI E L, HUANG H, et al. Dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced geopolymers at different ages [J]. Ceramics International, 2023, 49 (1): 834-846.
- [3] 陈娅,万小梅,崔允铮,等.纤维表面改性对 EGC 力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2023,42(4):1-11.
- [4] 沈珂羽.碳纤维改性粉煤灰-偏高岭土地聚合物混凝土的力学性能研究[J].太原理工大学学报,2023,(下转第 42 页)

## 材料科学

能,并提高混凝土力学性能和降低混凝土干燥收缩。

(2) 采用高钛重矿渣配制的混凝土具有优异的耐久性能,对于普通等级的高钛重矿渣混凝土,其抗渗等级在 P6 以上,抗冻等级大于 F100,抗氯离子渗透系数可低至  $1.421 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ,28 d 碳化深度可低至 0.5 mm,而其用于超高性能混凝土配制时,具有显著优于普通混凝土的耐久性能。

## 参 考 文 献

- [1] 丁庆军, 牟廷敏, 刘小清, 等. C30 高钛重矿渣自密实混凝土研究与应用 [J]. 施工技术, 2015, 44 (3): 57-69.
- [2] KOTZÉ H. A literature review and interpretation of the properties of high-TiO<sub>2</sub> slags [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, 120 (2): 121-130.
- [3] 王伟, 汪杰, 梁月华. 高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (4): 87-93.
- [4] WANG W, WANG J, SHEN J, et al. High titanium heavy slag powder as a sustainability filler and its influence on the performance of asphalt mortar [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 5586-5599.
- [5] 霍红英, 刘国钦, 邹敏, 等. 攀钢高钛型高炉渣综合利用探讨 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (增刊1): 134-137.
- [6] 叶新, 李朝政, 张虹. 高钛重矿渣粗骨料在抗冲耐磨混凝土中的应用研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (5): 83-86.
- [7] 陈超, 张恒. 高钛重矿渣砂对超高性能混凝土 (UHPC) 性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023, 321 (1): 74-78.
- [8] 李鹏, 钱波, 娄元涛. 西昌高钛重矿渣混凝土骨料性能试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (6): 259-263.
- [9] 梁贺之, 陈伟, 杨贺. 盐冻作用下高钛重矿渣混凝土耐久性试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (4): 100-106.
- [10] 江海民. 高钛重矿渣集料制备高性能混凝土的研究与应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [11] 丁庆军, 刘小清, 牟廷敏, 等. 高钛重矿渣制备低收缩耐磨桥面铺装层混凝土的研究 [J]. 混凝土, 2014, 295 (5): 138-147.
- [12] 何小龙. 全高钛矿渣混凝土的研究与应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [13] 江海民, 牟廷敏, 丁庆军. 高钛重矿渣混凝土的工作性能研究 [J]. 混凝土, 2011 (5): 125-127.
- [14] 孙金坤, 刘静, 张茜, 等. 复高钛重矿渣混凝土长期变形性和耐久性研究 [J]. 建筑科学, 2015, 31 (11): 92-97.
- [15] 丁庆军, 刘小清, 管理, 等. 高钛重矿渣砂对混凝土自收缩与徐变影响及其机理研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36 (1): 5-8.
- [1] 丁庆军, 牟廷敏, 刘小清, 等. C30 高钛重矿渣自密实混凝土研究与应用 [J]. 施工技术, 2015, 44 (3): 57-69.
- [2] KOTZÉ H. A literature review and interpretation of the properties of high-TiO<sub>2</sub> slags [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, 120 (2): 121-130.
- [3] 王伟, 汪杰, 梁月华. 高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (4): 87-93.
- [4] WANG W, WANG J, SHEN J, et al. High titanium heavy slag powder as a sustainability filler and its influence on the performance of asphalt mortar [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 5586-5599.
- [5] 霍红英, 刘国钦, 邹敏, 等. 攀钢高钛型高炉渣综合利用探讨 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (增刊1): 134-137.
- [6] 叶新, 李朝政, 张虹. 高钛重矿渣粗骨料在抗冲耐磨混凝土中的应用研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (5): 83-86.
- [7] 陈超, 张恒. 高钛重矿渣砂对超高性能混凝土 (UHPC) 性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023, 321 (1): 74-78.
- [8] 李鹏, 钱波, 娄元涛. 西昌高钛重矿渣混凝土骨料性能试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (6): 259-263.
- [9] 梁贺之, 陈伟, 杨贺. 盐冻作用下高钛重矿渣混凝土耐久性试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (4): 100-106.
- [10] 江海民. 高钛重矿渣集料制备高性能混凝土的研究与应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [11] 丁庆军, 刘小清, 牟廷敏, 等. 高钛重矿渣制备低收缩耐磨桥面铺装层混凝土的研究 [J]. 混凝土, 2014, 295 (5): 138-147.
- [12] 何小龙. 全高钛矿渣混凝土的研究与应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [13] 江海民, 牟廷敏, 丁庆军. 高钛重矿渣混凝土的工作性能研究 [J]. 混凝土, 2011 (5): 125-127.
- [14] 孙金坤, 刘静, 张茜, 等. 复高钛重矿渣混凝土长期变形性和耐久性研究 [J]. 建筑科学, 2015, 31 (11): 92-97.
- [15] 丁庆军, 刘小清, 管理, 等. 高钛重矿渣砂对混凝土自收缩与徐变影响及其机理研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36 (1): 5-8.
- [11] NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J, SHAIKH F U A. Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 54-64.
- [12] OHNO M, LI V C. A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 57: 163-168.
- [13] XU F, DENG X, PENG C, et al. Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites [J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 179-189.
- [14] 闵亚能. 试验设计 (DOE) 应用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [15] 陈证伊. 基于 SHPB 的橡胶集料混凝土冲击压缩力学性能研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.

(上接第 36 页)

54 (4): 1-11.

- [5] 王瑞杰, 贾立军, 郭天天, 等. 不同纤维对赤泥-煤系偏高岭土地聚合物力学性能的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2023, 54 (1): 117-124.
- [6] 周圣杰, 樊亮, 张岩, 等. 不同植物纤维对地质聚合物物理特性的影响 [J]. 交通节能与环保, 2021, 17 (6): 100-106.
- [7] 吴胧阳. 纤维增韧地聚合物高温力学特性及微观损伤机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [8] 满向阳. 高延性纤维增强单组分地聚合物的制备及性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [9] 阚鑫禹, 薛平, 贾明印, 等. 聚乙烯醇改性地质聚合物复合材料的性能研究 [J]. 矿产综合利用, 2018, 211 (3): 125-128.
- [10] LEE B Y, CHO C G, LIM H J, et al. Strain hardening fiber reinforced alkali activated mortar—a feasibility study [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 15-20.