

# 聚合物乳胶粉改性碳纤维增强混凝土的配合比设计

秦立军<sup>1</sup>, 白二雷<sup>1,\*</sup>, 王志航<sup>1</sup>, 夏伟<sup>1</sup>, 杨宁<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 75840 部队, 广州, 510000)

**摘要** 为提高碳纤维在混凝土中的分散性, 利用可再分散聚合物乳胶粉与短切碳纤维对混凝土进行复合改性, 运用正交试验方法, 基于  $L_9(4^3)$  正交试验表, 设计两批 18(2×9) 组聚合物乳胶粉-碳纤维复合改性混凝土 (PMCFRC) 的坍落度、28 d 抗压强度及纤维分散性检测试验。第 1 批正交试验研究了水灰比、聚合物掺量、碳纤维掺量对 PMCFRC 性能的影响, 第 2 批正交试验研究了分散剂种类、分散剂掺量、减水剂掺量对 PMCFRC 性能的影响, 获得 PMCFRC 的坍落度、抗压强度、电阻率等基本参数, 并利用极差和方差分析方法, 研究各因素的主次顺序, 分析其是否影响显著, 基于此寻找出 PMCFRC 最优配合比。结果表明: 第 1 批正交试验中, 对于坍落度、电阻率以及电阻率变动系数, 碳纤维掺量为显著因素; 对于 28 d 抗压强度, 水灰比为显著因素; 第 2 批正交试验中, 对于坍落度和 28 d 抗压强度, 减水剂掺量为显著因素; 对于电阻率和电阻率变动系数, 分散剂掺量为显著因素。PMCFRC 最佳配合比为: 水灰比 0.49, 聚合物掺量 12%, 碳纤维掺量 0.3%, 砂率 34%, 分散剂选用羟乙基纤维素, 分散剂掺量 0.4%, 减水剂掺量 1.2%, 消泡剂掺量 0.3%。

**关键词** 聚合物乳胶粉; 碳纤维; 复合改性; 配合比设计

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.013

**中图分类号** TB332 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0102-09

## Mix Proportion Design of Polymer Modified Carbon Fiber Reinforced Concretes

QIN Lijun<sup>1</sup>, BAI Erlei<sup>1,\*</sup>, WANG Zhihang<sup>1</sup>, XIA Wei<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>2</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Unit 75840, Guangzhou 510000, China)

**Abstract** To improve the dispersion of carbon fiber in carbon fiber reinforced concrete, using redispersible polymer latex powder and short cut carbon fibers for composite modification of concrete, two batches of 18 (2×9) groups of polymer latex powder-carbon fiber composite modified concrete (PMCFRC) were designed based on the  $L_9(4^3)$  orthogonal test table for the slump, 28 d compressive strength and fiber dispersion. The first batch of orthogonal tested investigated the effects of water-cement ratio, polymer admixture and carbon fiber admixture on the performance of PMCFRC. The second batch of orthogonal tested investigated the effects of dispersant type, dispersant admixture and water-reducing agent admixture on the performance of PMCFRC, obtained the basic parameters of the slump, compressive strength and resistivity of PMCFRC, and used the extreme difference and ANOVA methods respectively, the primary and secondary order of each factor was studied to analyze whether their effects were significant or not, based on which the optimal mix ratio of PMCFRC was found. The results

**收稿日期:** 2023-06-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(52278287)

**作者简介:** 秦立军(2000-), 男, 河北衡水人, 硕士生, 研究方向为防护工程材料动力学性能。E-mail: 17531896049@163.com

**通信作者:** 白二雷(1979-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 研究方向为防护工程。E-mail: bwxkgy@163.com

**引用格式:** 秦立军, 白二雷, 王志航, 等. 聚合物乳胶粉改性碳纤维增强混凝土的配合比设计[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(5): 102-110.  
QIN Lijun, BAI Erlei, WANG Zhihang, et al. Mix Proportion Design of Polymer Modified Carbon Fiber Reinforced Concretes[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 102-110.

show that in the first batch of orthogonal tests, for the slump, resistivity and resistivity coefficient of variation, the amount of carbon fiber admixture is significant factor; for 28 d compressive strength, the water-cement ratio is significant factor; in the second batch of orthogonal tests, for slump and 28 d compressive strength, the amount of water-reducing agent admixture is significant factor; for resistivity and resistivity coefficient of variation, the amount of dispersant admixture is significant factor. The optimum ratio of PMCFRC is 0.49 water/cement ratio, 12% polymer, 0.3% carbon fiber, 34% sand rate, 0.4% hydroxyethyl cellulose as dispersant, 1.2% water reducing agent and 0.3% defoamer.

**Key words** synthesis polymer latex powder; carbon fiber; composite modification; compound ratio design

因传统混凝土存在抗冲击性能差、抗拉强度低、易发生脆性破坏等缺陷,导致其在工程应用中受到一定限制。为改善这些缺陷,20世纪70年代,有学者提出利用纤维改善基体脆性的途径<sup>[1]</sup>。国内外学者针对钢纤维、玄武岩纤维、碳纤维等改性混凝土的性能进行了大量研究,取得了较好的效果<sup>[2-6]</sup>。其中,碳纤维在混凝土基体中既能作为复合材料的一部分承担荷载,又能作为功能性填料发挥作用。碳纤维增强混凝土既有良好的力学性能,又有优异的电磁特性,显示出巨大的工程应用潜力<sup>[7-8]</sup>。

目前,关于碳纤维增强混凝土静动态力学性能和耐久性的研究已取得丰富成果,但也发现碳纤维在混凝土基体中的作用并没有得到充分发挥<sup>[9-13]</sup>。刘玉娟等<sup>[14]</sup>研究了短切碳纤维分散性对混凝土力学性能的影响,指出纤维与混凝土基体间存在明显缺陷,混凝土在破坏时,多数纤维被拔出。师海霞等<sup>[15]</sup>研究了不同性质的苯丙乳液改性混凝土的工作性能和力学性能,并采用扫描电镜观察了其微观结构,结果表明,聚合物乳液通过影响聚合物成膜对混凝土力学性能产生较大影响,能够显著改善混凝土的和易性,并起到一定的减水作用。杨建森等<sup>[16]</sup>研究了可再分散醋酸乙烯(vinyl acetate ethylene, VAE)乳胶粉改性混凝土的力学性能,结果表明,掺加聚合物乳胶粉可以有效改善聚合物改性混凝土(polymer modified concrete, PMC)的力学性能,但不能单纯依靠增加乳胶粉掺量改善 PMC 性能。王志航等<sup>[17]</sup>研究了聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能,结果表明,在碳纤维增强混凝土中加入聚合物,一方面可以发挥聚合物的改性效果,另一方面能进一步改善碳纤维在混凝土中的分散性,从而综合呈现出聚合物-纤维复合改性效果。

然而,聚合物乳胶粉-碳纤维复合改性混凝土(polymer modified carbon fiber reinforced concrete, PMCFRC)的性能主要受水灰比、聚合物掺量、碳纤维掺量及助剂种类和掺量等因素影响,且各因素间交互作用尚不明确。鉴于以上问题,本研究通过采用正交设计的试验方法进行 PMCFRC 配合比设计,选取坍落度、28 d 抗压强度、电阻率、电阻率变动系数作为混凝土配合比研究的试验指标。由于配合比研究涉及

的因素较多且相互之间具有耦合作用,为提高试验效率,减少试验量,增强试验数据的可读性,采用分批正交试验方法设计试验,通过对正交试验结果进行极差分析和方差分析,研究各因素的影响程度,并确定 PMCFRC 配合比设计优化方案。

## 1 实验

### 1.1 实验原材料

原材料包括水泥、砂、石、水、可再分散聚合物乳胶粉、碳纤维、分散剂、减水剂、消泡剂和成膜助剂。  
①水泥:42.5级普通硅酸盐水泥,陕西尧柏水泥有限公司;②砂:灞河中砂;③石:5~20 mm的石灰岩碎石;④水:洁净的普通自来水;⑤可再分散聚合物乳胶粉:VINNAPAS © 5044N 德国瓦克公司;⑥碳纤维: PAN 基短切碳纤维,日本东丽公司;⑦分散剂:羟乙基纤维素分散剂(HEC)、甲基纤维素分散剂(MC)、羧甲基纤维素分散剂(CMC),山东省济宁市百川化工有限公司;⑧减水剂:STHPC-03A型 FDN 高效减水剂母液,河北圣通建材科技有限公司;⑨消泡剂: NOPCONXZ 型金属皂类消泡剂,日本诺普科公司;⑩成膜助剂: DN-12 型成膜助剂,江苏天音化工有限公司。

聚合物乳胶粉、碳纤维分别如图 1 和图 2 所示,主要性能指标见表 1 和表 2。



图 1 可再分散聚合物乳胶粉



图 2 短切碳纤维

表 1 聚合物乳胶粉的主要性能指标

外观	固含量/%	灰分/%	容积密度/(g/cm <sup>3</sup> )	颗粒尺寸/ $\mu\text{m}$	玻璃化温度/ $^{\circ}\text{C}$	最低成膜温度/ $^{\circ}\text{C}$
白色粉末	$\geq 99$	13 $\pm$ 2	0.40~0.55	1~7	0	0

表 2 碳纤维的主要性能指标

直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	含碳量/wt%	相对密度/(g/cm <sup>3</sup> )	拉伸模量/GPa	抗拉强度/GPa	断裂伸长率/%	电阻率/( $\Omega \cdot \text{mm}$ )
7 $\pm$ 0.2	6	$\geq 93$	1.76	220~240	$> 3.0$	1.25~1.60	$1.5 \times 10^{-2}$

## 1.2 试件制备

根据《混凝土物理力学性能试验方法》<sup>[18]</sup>(GB/T 50081-2019),试件的制备分为称料、纤维分散、聚合物分散、拌合、成型和养护 6 个步骤,具体制备流程为:①称料,使用电子秤称取原料。②纤维分散,将称量好的自来水装入分散操作的容器中,使用 D-8401W 型高速电动搅拌机进行低速搅拌(120 r/min),搅拌过程中缓慢掺入分散剂,形成均匀凝胶后缓慢加入碳纤维并搅拌 10 min;碳纤维均匀分散并成单丝状态后,添加减水剂、成膜助剂和部分消泡剂继续搅拌 60 s,制成碳纤维分散液。③聚合物分散,人工搅拌可再分散聚合物乳胶粉与水泥至均匀分散,制得聚合物乳胶粉与水泥的混合粉体。④拌合,将细集料和一半碳纤维分散液倒入搅拌机搅拌 60 s,加入粗集料搅拌 60 s,加入聚合物乳胶粉与水泥的混合粉体搅拌 60 s,加入剩余碳纤维分散液搅拌 60 s,加入剩余消泡剂搅拌 120 s,将混合物从搅拌机中及时倒出并人工翻拌 60 s。⑤成型。⑥养护。

## 1.3 试验方法

良好的工作性能及静态力学性能是混凝土在实际施工、使用过程中应满足的两项基本性能,本研究主要从原料种类和配比参数两方面考虑其对 PMC-FRC 基础配合比设计的影响。配比参数是基础配合比的研究重点,本文主要研究水灰比、聚合物掺量、碳纤维掺量以及分散剂和减水剂掺量对 PMC-FRC 性能的影响。在原料种类研究中,选取 3 种使用较广的碳纤维分散剂进行试验,暂不考虑水泥、聚合物以及其他助剂种类对 PMCFRC 性能的影响。

由于配合比研究考虑的因素较多,采用分批正交试验的方法,拆分正交表,将研究的因素分为 2 批,分开进行试验研究。具体试验方案如下:第 1 批试验:选取水灰比、聚合物掺量、碳纤维掺量作为正交试验因素,根据前期研究结果选取各试验因素的水平,设计四因素三水平正交试验。各正交试验因素具体水平选取情况见表 3,其中砂率取 34%,分散

剂选用 CMC,掺量为 1.22 kg/m<sup>3</sup>,减水剂、消泡剂掺量采用生产厂商给出的建议值,分别为 2.04 kg/m<sup>3</sup>、0.61 kg/m<sup>3</sup>;第 2 批试验:选取分散剂种类、分散剂掺量、减水剂掺量作为正交试验因素,其中空白列为误差项,在后续极差计算过程中需要考虑,方差分析则不需要考虑其影响。设计四因素三水平正交试验,各正交试验因素具体水平选取情况见表 4,其中,砂率取 34%,水灰比、聚合物掺量、碳纤维掺量均取表 3 中的中间水平,消泡剂掺量采用生产厂商给出的建议值 0.61 kg/m<sup>3</sup>。

表 3 第 1 批正交试验的因素和水平表

水平	水灰比(A)	聚合物掺量(B)	碳纤维产量(C)	空白(D)
1	0.48	4%	0.1%	1
2	0.49	8%	0.3%	2
3	0.50	12%	0.5%	3

表 4 第 2 批正交试验的因素和水平表

水平	分散剂种类(A)	分散剂掺量(B)	减水剂掺量(C)	空白(D)
1	甲基纤维素(MC)	0.2%	0.8%	1
2	羧甲基纤维素(CMC)	0.4%	1.0%	2
3	羟乙基纤维素(HEC)	0.6%	1.2%	3

### 1.3.1 坍落度试验

坍落度试验严格按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》<sup>[19]</sup>(GB/T 50080-2016)进行操作,坍落度 S 的计算方法为:

$$S = h_0 - h_1 \quad (1)$$

式中:S 为混凝土坍落度(mm); $h_0$  为试验前拌合物高度(mm); $h_1$  为试验后坍落度高度(mm)。

### 1.3.2 抗压试验

试验参照《混凝土物理力学性能试验方法》<sup>[18]</sup>(GB/T 50081-2019)进行,试件抗压强度按下式进行计算:

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$f_{c,u} = f_{cc}\alpha \quad (3)$$

式中:  $f_{cc}$  为标准试件抗压强度(MPa);  $f_{c,u}$  为本试验试件 28 d 抗压强度(MPa);  $F$  为试件破坏荷载(N);  $A$  为试件承压面积( $\text{mm}^2$ );  $\alpha$  为换算系数, 本试验中抗压试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,  $\alpha$  取 0.95。

### 1.3.3 碳纤维分散性检测试验

混凝土导电性的研究表明, 混凝土中存在离子导电、电子导电和空穴导电 3 种导电方式。PMCFRC 的电导率的计算式为:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为 PMCFRC 电导率(S/mm);  $\rho$  为混凝土电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}$ );  $\sigma_1$  为离子电导率(S/mm);  $\sigma_2$  为自由电子电导率(S/mm);  $\sigma_3$  为空穴电导率(S/mm)。对于 PMCFRC, 导电方式主要为电子导电和空穴导电, 在碳纤维掺量相同情况下, 碳纤维的分散效果是影响混凝土电阻率的主要因素, 可用硬化试件电阻率测试法测试碳纤维在混凝土中的分散效果。测试时, 用导线将直流电源、万用表和混凝土预埋电极按照图 3 所示连接, 打开电源供电, 待电流稳定后, 分别记录电压与电流的数值, 图 4 为连接好的测试电路。电阻率的计算式为:

$$\rho = \frac{US}{IL} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为试件电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}$ );  $S$  为试件面积( $\text{mm}^2$ );  $L$  为试件长度(mm);  $U$  为测试电压(V);  $I$  为测试电流(A)。

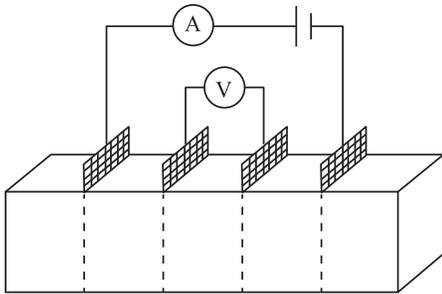


图3 试件电阻率测试电路示意图



图4 连接好的测试电路

由于 PMCFRC 电阻率受纤维分散剂、消泡剂等诸多因素对水泥水化的影响, 水泥水化则会进一步影响 PMCFRC 的导电方式, 仅通过混凝土电阻率大小评价碳纤维在 PMCFRC 中的分散效果是片面的, 完善碳纤维分散性评价体系需要补充其他指标。碳纤维在 PMCFRC 基体中分散情况不同将导致导电方式不同, 碳纤维分散不均匀时, PMCFRC 中部分区域纤维密集分布, 相互搭接, 导电方式以沿碳纤维网络的电子导电为主; 而在纤维量不足以构建网络的区域, 导电方式以水泥浆基体的离子导电为主, 不同的纤维分散情况对应的试件电阻率存在巨大差异。根据该性质可设立试件电阻率变动系数  $\Psi(\rho)$ , 该指标表征同组试件的电阻率差异, 与 PMCFRC 电阻率共同反映纤维在混凝土中的分散情况。  $\Psi(\rho)$  计算式如下:

$$\Psi(\rho) = S(\rho) / \bar{\rho} \quad (6)$$

$$S(\rho) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2 / (n-1)} \quad (7)$$

式中:  $S(\rho)$  为试样电阻率的标准差值;  $\bar{\rho}$  为试样电阻率的平均值( $\Omega \cdot \text{mm}$ );  $\Psi(\rho)$  为试样电阻率变动系数(%);  $n$  为试验的重复次数, 本试验中  $n=3$ 。当纤维均匀分散时,  $\Psi(\rho)$  较小, 反之  $\Psi(\rho)$  较大。

## 2 结果与讨论

### 2.1 直观分析

试验依据正交试验方案进行, 对两批正交试验中各试验试件进行检测。从表 5、表 6 中的试验结果可以看出, 对于坍落度, M8 试验组坍落度最大, 对应的各因素取值为: 水灰比 0.50, 聚合物掺量 8%, 碳纤维产量 0.1%; M3 试验组坍落度最小, 对应的各因素取值为: 水灰比 0.48, 聚合物掺量 12%, 碳纤维产量 0.5%。对于 28 d 抗压强度, M2 试验组性能最好, 对应的各因素取值为: 水灰比 0.48, 聚合物掺量 8%, 碳纤维产量 0.3%。而当碳纤维掺量为 0.3% 时, N9 试验组纤维分散效果最好, 对应的各因素为: HEC 型分散剂, 分散剂掺量为 0.6%, 减水剂掺量为 1.2%。PMCFRC 的电阻率随碳纤维掺量、分散剂掺量的变化趋势相反; 电阻率变动系数随碳纤维掺量的变化趋势相似, 随分散剂掺量相反。

表5 第1批正交试验结果

试件 编号	正交试验因素				坍落度/ mm	28 d 抗 压强度/ MPa	电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	电阻率 变动系数/%
	水灰比 (A)	聚合物 掺量(B)	碳纤维 掺量(C)	空白(D)				
M1	0.48(1)	4%(1)	0.1%(1)	1	63	35.1	160.34	2.10
M2	0.48(1)	8%(2)	0.3%(2)	2	52	37.8	106.37	5.09
M3	0.48(1)	12%(3)	0.5%(3)	3	43	36.3	86.80	9.32
M4	0.49(2)	4%(1)	0.3%(2)	3	55	34.1	105.79	4.56
M5	0.49(2)	8%(2)	0.5%(3)	1	45	32.8	84.98	10.94
M6	0.49(2)	12%(3)	0.1%(1)	2	68	32.1	159.95	2.26
M7	0.50(3)	4%(1)	0.5%(3)	2	49	29.5	82.76	10.45
M8	0.50(3)	8%(2)	0.1%(1)	3	72	29.1	157.96	1.12
M9	0.50(3)	12%(3)	0.3%(2)	1	59	31.1	102.43	5.92

表6 第2批正交试验结果

试件 编号	正交试验因素				坍落度/ mm	28 d 抗 压强度/ MPa	电阻率 / ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	电阻率 变动系数/%
	分散剂 种类(A)	分散剂 掺量(B)	减水剂 掺量(C)	空白(D)				
N1	MC(1)	0.2%(1)	0.8%(1)	1	59	31.2	145.20	8.60
N2	MC(1)	0.4%(2)	1.0%(2)	2	62	34.4	114.03	5.88
N3	MC(1)	0.6%(3)	1.2%(3)	3	65	35.3	98.09	3.91
N4	CMC(2)	0.2%(1)	1.0%(2)	3	63	33.3	146.09	9.54
N5	CMC(2)	0.4%(2)	1.2%(3)	1	66	35.6	117.35	6.47
N6	CMC(2)	0.6%(3)	0.8%(1)	2	56	31.9	99.54	4.56
N7	HEC(3)	0.2%(1)	1.2%(3)	2	69	35.2	142.07	8.13
N8	HEC(3)	0.4%(2)	0.8%(1)	3	58	32.7	109.12	5.39
N9	HEC(3)	0.6%(3)	1.0%(2)	1	60	34.3	94.76	3.54

## 2.2 极差分析

通过对试验数据进行直观分析,可得知各因素对混凝土不同性能指标的影响趋势,而不同因素的影响程度则需要对试验数据进行进一步的极差和方差分析。

极差计算方法为:

$$R = \max[k_1, k_2, k_3] - \min[k_1, k_2, k_3] \quad (8)$$

如表7、表8所示,极差描述了某一因素对试验指标的影响程度,通过比较不同因素的极差大小,可以定性评价各因素对该指标的影响程度。

表7 第1批正交试验极差分析

指标	因素水平	水灰比	聚合物掺量	碳纤维掺量	空白
坍落度/mm	$k_1$	52.70	55.69	67.73	55.79
	$k_2$	56.08	56.69	55.34	56.37
	$k_3$	60.16	56.56	45.87	56.78
	极差	7.46	1.00	21.86	0.99
28 d 抗压强度/MPa	$k_1$	36.42	32.90	32.10	33.02
	$k_2$	33.02	33.24	34.35	33.17
	$k_3$	29.89	33.19	32.88	33.15
	极差	6.53	0.34	2.25	0.15
电阻率/( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	$k_1$	117.84	116.30	159.42	115.92
	$k_2$	116.91	116.44	104.86	116.36
	$k_3$	114.38	116.39	84.85	116.85
	极差	3.46	0.14	74.57	0.93
电阻率变动系数/%	$k_1$	5.50	5.70	1.83	6.32
	$k_2$	5.92	5.72	5.19	5.93
	$k_3$	5.83	5.83	10.24	5.00
	极差	0.42	0.13	8.41	1.32

表 8 第 2 批正交试验极差分析

指标	因素水平	分散剂种类	分散剂掺量	减水剂掺量	空白
坍落度/mm	$k_1$	61.99	63.50	57.62	61.77
	$k_2$	61.95	62.18	61.85	62.49
	$k_3$	62.25	60.51	66.72	61.93
	极差	0.30	2.99	9.10	0.72
28 d 抗压强度/MPa	$k_1$	33.64	33.25	31.95	33.70
	$k_2$	33.61	34.23	34.00	33.83
	$k_3$	34.09	33.85	35.38	33.80
	极差	0.48	0.98	3.43	0.13
电阻率/( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	$k_1$	119.11	144.45	117.95	119.10
	$k_2$	120.99	113.50	118.29	118.55
	$k_3$	115.32	97.46	119.17	117.77
	极差	5.67	46.99	1.22	1.33
电阻率变动系数/%	$k_1$	6.13	8.76	6.18	6.20
	$k_2$	6.86	5.91	6.32	6.19
	$k_3$	5.69	4.00	6.17	6.28
	极差	1.17	4.76	0.15	0.09

第 1 批正交试验中相应的因素水平变化趋势如图 5 所示,可以看出:

以坍落度为评价指标,影响 PMCFRC 和易性因素的主次排序为:碳纤维掺量>水灰比>聚合物掺量。当混凝土的坍落度低于需要时,可以适当减少碳纤维掺量,增大水灰比来改善混凝土和易性。以 28 d 抗压强度为评价指标,水灰比是影响 PMCFRC 静

力学性能的主要因素,其次是碳纤维掺量,碳纤维掺量为 0.3%时,28 d 抗压强度均值最大。当 PMCFRC 的抗压强度低于要求时,可以适当减小水灰比,提高碳纤维产量。以电阻率与电阻率变动系数作为 PMCFRC 导电性的评价指标,碳纤维掺量是影响 PMCFRC 导电性能的主要因素,其次是水灰比,可以看出碳纤维分散程度对混凝土导电性具有重要影响。

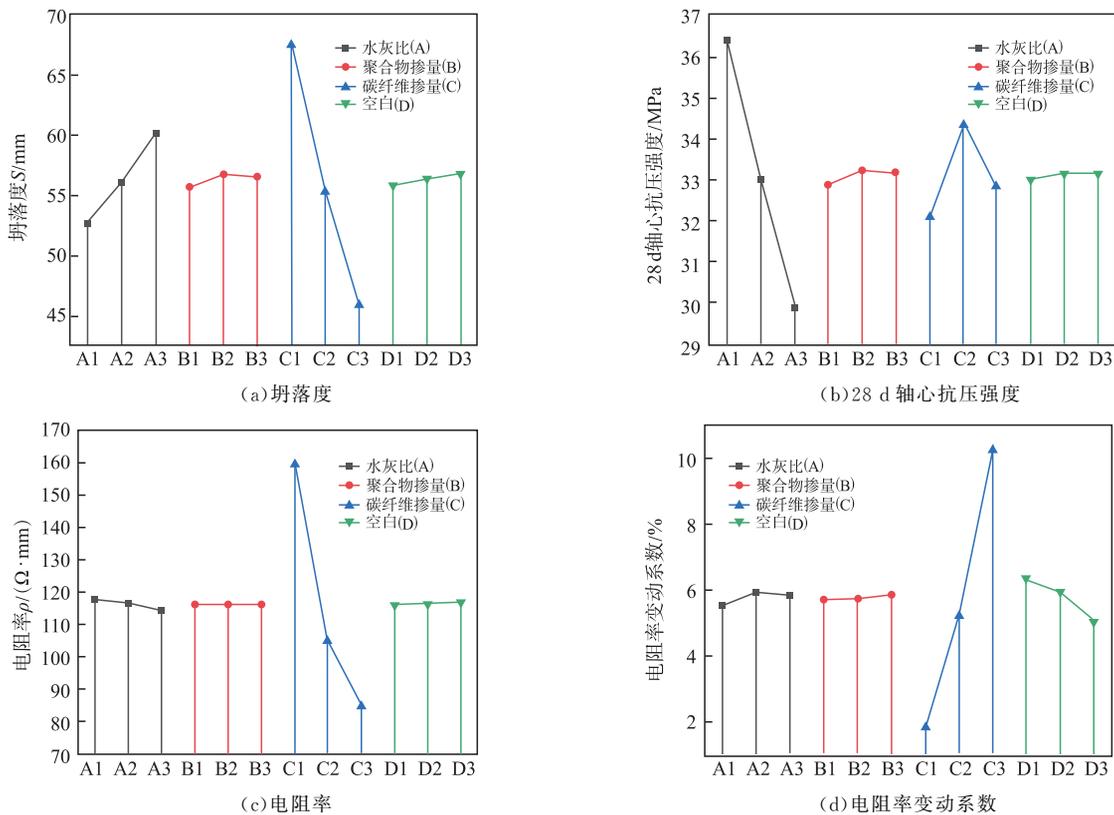


图 5 第 1 批正交试验结果

第 2 批正交试验中相应的因素水平变化趋势如

图 6 所示,可以看出:

以坍落度为评价指标,影响 PMCFRC 和易性因素的主次排序为:减水剂掺量>分散剂掺量>分散剂种类,当 PMCFRC 的坍落度低于需要时,可适当增大减水剂掺量,减小分散剂掺量。以 28 d 抗压强度为评价指标,减水剂掺量是影响 PMCFRC 静

态力学性能的主要因素,其次是分散剂掺量,在一定程度上,减水剂掺量越高,PMCFRC 静态力学性能越好。以电阻率与电阻率变动系数为评价指标,分散剂掺量为影响 PMCFRC 导电性能因素的最主要因素,其次为分散剂种类。

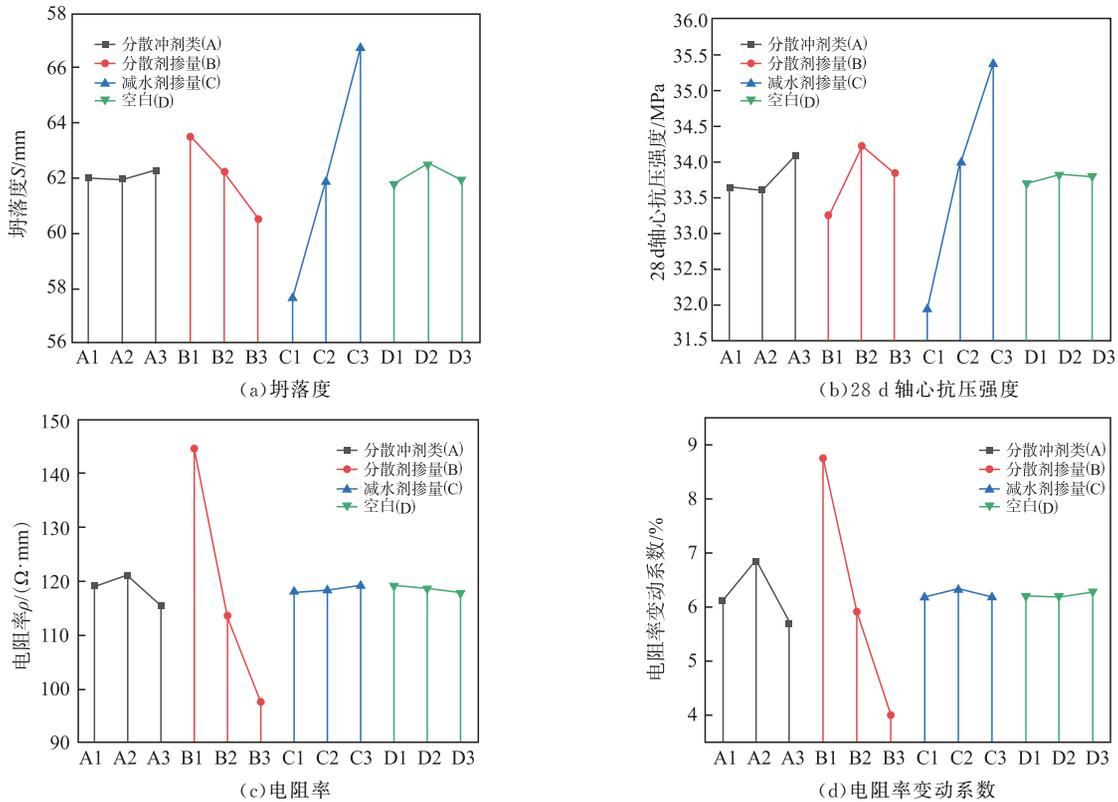


图 6 第 2 批正交试验结果

2.3 方差分析

方差分析可以定量地度量各因素对 PMCFRC 不同性能指标的影响程度,从而精确地评价各因素

影响的显著性。各因素的方差分析结果如表 9、表 10 所示。

表 9 第 1 批正交试验方差分析

指标	因素	离差平方和	自由度	均方	F 值	置信概率
坍落度/mm	水灰比	83.79	2	41.90	56.13	95%
	聚合物掺量	1.79	2	0.90	1.20	不明显
	碳纤维掺量	720.99	2	360.50	482.96	99%
	空白	1.49	2	0.75		
28 d 抗压强度/MPa	水灰比	63.94	2	31.97	1 606.41	99%
	聚合物掺量	0.21	2	0.10	5.25	不明显
	碳纤维掺量	7.85	2	3.92	197.17	99%
	空白	0.04	2	0.02		
电阻率/(Ω·mm)	水灰比	19.16	2	9.58	14.65	不明显
	聚合物掺量	0.03	2	0.02	0.02	不明显
	碳纤维掺量	8 937.42	2	4 468.71	6 834.17	99%
	空白	1.31	2	0.65		
电阻率变动系数/%	水灰比	0.29	2	0.14	0.10	不明显
	聚合物掺量	0.03	2	0.02	0.01	不明显
	碳纤维掺量	107.51	2	53.75	38.91	95%
	空白	2.76	2	1.38		

注:  $F_{0.05}(2,2) = 19.00$ ;  $F_{0.01}(2,2) = 99.00$

表10 第2批正交试验方差分析

指标	因素	离差平方和	自由度	均方	F值	置信概率
坍落度/mm	分散剂种类	0.16	2	0.08	0.19	不明显
	分散剂掺量	13.48	2	6.74	15.77	不明显
	减水剂掺量	124.34	2	62.17	145.51	99%
	空白	0.85	2	0.43		
28 d 抗压强度/MPa	分散剂种类	0.43	2	0.22	17.17	不明显
	分散剂掺量	1.45	2	0.72	57.20	95%
	减水剂掺量	17.94	2	8.97	710.04	99%
	空白	0.03	2	0.01		
电阻率/( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	分散剂种类	50.15	2	25.07	18.54	不明显
	分散剂掺量	3 423.34	2	1 711.67	1 265.58	99%
	减水剂掺量	2.36	2	1.18	0.87	不明显
	空白	2.70	2	1.35		
电阻率变动系数/%	分散剂种类	2.09	2	1.05	147.89	99%
	分散剂掺量	34.33	2	17.16	2 424.97	99%
	减水剂掺量	0.04	2	0.02	2.92	不明显
	空白	0.01	2	0.01		

注: $F_{0.05}(2,2)=19.00$ ;  $F_{0.01}(2,2)=99.00$

从表9第1批正交试验方差分析结果可以看出,碳纤维掺量在坍落度、28 d 抗压强度、电阻率中的  $F$  值均大于  $F_{0.01}(2,2)=99.00$ ,因此可认为碳纤维掺量在置信概率 99% 区间内对 PMCFRC 的坍落度、28 d 抗压强度、电阻率影响显著;在电阻率变动系数中  $F$  值大于  $F_{0.05}(2,2)=19.00$ ,因此可认为碳纤维掺量在置信概率 95% 区间内对 PMCFRC 的电阻率变动系数影响显著。水灰比对 PMCFRC 的 28 d 抗压强度影响显著的概率超过 99%,对坍落度影响显著的概率超过 95%。聚合物掺量对坍落度、28 d 抗压强度、电阻率、电阻率变动系数无明显影响。

从表10第2批正交试验方差分析结果可以看出,减水剂掺量在置信概率 99% 区间内对 PMCFRC 的坍落度、28 d 抗压强度影响显著,而对 PMCFRC 的电阻率、电阻率变动系数无明显影响。分散剂掺量在置信概率 99% 区间内对 PMCFRC 的电阻率、电阻率变动系数影响显著,对 28 d 抗压强度影响显著的概率超过 95%。

分散剂种类对 PMCFRC 的电阻率变动系数影响显著的概率超过 99%,而对 PMCFRC 的电阻率影响不显著。导致这一试验结果可能与混凝土电阻率受诸多因素影响有关。部分纤维分散剂对水泥的水化作用以及混凝土的孔隙结构有一定的影响作用,可能存在掺加分散剂后试件电阻率上升,而多个试件的电阻率差异减小的情况。

#### 2.4 基础配合比确定

《混凝土结构设计规范》<sup>[20]</sup>(GB50010-2015)规

定,配筋密列的结构,混凝土灌注时的坍落度宜为 50~70 mm,而碳纤维掺量为 0.5%(水平 3)时,坍落度均值为 45.87 mm,不符合设计规范要求,故碳纤维掺量不宜大于 0.5%。此外,减水剂掺量、水灰比以及分散剂掺量对混凝土和易性均有较大的影响,为确保混凝土具有较好的工作性能,减水剂掺量、水灰比以及分散剂掺量均不宜过大。

由正交试验结果可知,水灰比、碳纤维掺量、分散剂种类、分散剂掺量、减水剂掺量等 5 项配合比设计参数对混凝土的抗压力学性能均有明显影响。为确保混凝土具有较好的力学性能,应选择 HEC 分散剂,水灰比不宜设置过大,并适量设置碳纤维掺量和分散剂、减水剂掺量。

在碳纤维分散性方面,由正交试验结果可知,碳纤维掺量、分散剂掺量、分散剂种类 3 项配合比设计参数对试件的电阻率影响较为明显,碳纤维掺量、砂率、分散剂掺量以及分散剂种类 4 项参数对试件的电阻率变动系数影响较为明显,综合分析 2 项指标可得:

1) HEC 分散剂对碳纤维的分散效果优于其他 2 种分散剂;

2) 增大分散剂掺量能在一定程度上改善碳纤维的分散效果;

3) 增加碳纤维掺量将在一定程度上降低碳纤维的分散效果,适量掺加碳纤维才能发挥最优性能。

根据对正交试验结果的综合分析,最终确定 PMCFRC 的最佳配合比如表 11 所示。

表 11 PMCFRC 最佳配合比

水灰比	聚合物掺量	碳纤维掺量	分散剂种类	分散剂掺量	减水剂掺量	砂率	消泡剂掺量
0.49	12%	0.3%	HEC	0.4%	1.2%	34%	0.3%

对 PMCFRC 最佳配合比进行验证性试验, 坍落度为 65.24 mm、28 d 抗压强度为 36.70 MPa、电阻率为 112.18  $\Omega \cdot \text{mm}$ 、电阻率变动系数为 5.41%, 试验性能良好。

### 3 结论

本研究以正交试验设计为基础, 通过坍落度试验、抗压试验和碳纤维分散性检测试验, 研究了不同原料种类及配比参数对 PMCFRC 施工性能和力学性能的影响, 分析了各因素水平变化对各指标值的影响程度及规律, 并依此确定了 PMCFRC 的基础配合比。得到的主要结论有:

1) 在本研究的众多影响因素中, 水灰比、碳纤维掺量、分散剂种类、分散剂掺量、减水剂掺量对 PMCFRC 坍落度、28 d 抗压强度以及碳纤维分散性影响较大, 聚合物掺量对其影响相对较小。

2) 不同种类分散剂对碳纤维的分散效果依次为 HEC>MC>CMC, 且分散剂选用 HEC 的 PMCFRC 拥有最高的 28 d 抗压强度均值。

3) 综合各因素对 PMCFRC 性能的影响规律, 得到的基础配合比为水灰比 0.49, 聚合物掺量 12%, 碳纤维掺量 0.3%, 砂率 34%, 分散剂种类 HEC, 分散剂掺量 0.4%, 减水剂掺量 1.2%, 消泡剂掺量 0.3%, 试验验证效果良好。

### 参考文献

[1] 王闯, 李克智, 李贺军, 等. 短碳纤维的分散性与 CFRC 复合材料的力学性能[J]. 精细化工, 2007, 24(6): 521-525.

[2] 赵苏政, 张文. 温度对不同掺量纤维混凝土孔隙结构劣化影响分析[J]. 复合材料科学与工程, 2023(5): 59-64.

[3] 邓友生, 陈国军, 李培鹏, 等. 高韧性纤维混凝土特性及工程应用[J]. 混凝土, 2023(5): 158-162, 174.

[4] 王闯, 李克智, 李贺军, 等. CVI 处理短碳纤维在 CFRC 中分散性的评价[J]. 材料科学与工程学报, 2008(1):

20-26.

[5] LUCA L, SIMONE M, GIUSEPPE F, et al. Cement-Based Composites Containing Functionalized Carbon Fibers[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 88: 165-171.

[6] CHEN P W, CHUNG D D L. Concrete Reinforced with up to 0.2 vol% of Short Carbon Fibres [J]. Composites, 1993, 24(1): 33-52.

[7] 黄军福, 王福胜, 崔辉, 等. 制备工艺对再生骨料透水混凝土中聚乙烯醇纤维分散性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 896-900.

[8] 陈舜杰. 纤维分散性与吸水性对混凝土拌合物的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(1): 169-170.

[9] 李炳良, 王闯, 马婷, 等. 碳纤维在水泥基体中的分散性研究[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(4): 147-150.

[10] 李家兴, 杨勇新, 贾彬, 等. 纤维混凝土中聚乙烯醇纤维分散性试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(12): 91-97.

[11] 邓宗才, 丁建明. BFRC 中玄武岩纤维分散性与弯曲韧性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(1): 47-50.

[12] 周浩, 张桂霞, 王振. 纤维在水泥基材料分布状态研究[J]. 中国水运, 2022(9): 157-160.

[13] 车德会, 姚广春, 华中胜, 等. 用羟乙基纤维素(HEC)改善短碳纤维的分散性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(9): 1286-1290.

[14] 刘玉娟, 王丽娟. 短切碳纤维增强混凝土动态抗拉性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(9): 97-101, 132.

[15] 师海霞, 孔祥明, 范德科, 等. 苯丙乳液改性混凝土微观结构与性能研究[J]. 混凝土世界, 2010(9): 60-65.

[16] 杨建森, 姜晓楠. 聚合物胶粉改性混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3): 649-652.

[17] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1586-1597.

[18] GB/T 50081-2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[19] GB/T 50080-2016. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[20] GB 50010-2015. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(编辑: 杜娟)