

活性粉末混凝土配合比设计及耐久性研究

李枫*

(深圳市翠策科技绿化工程有限公司 广东深圳 518000)

【摘要】 活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)凭借其良好的性能,得到了研究学者的广泛关注。本研究从配合比角度出发,考虑到硅粉作为RPC的主要组分比较昂贵,且容易产生收缩裂缝,故采用粉煤灰、矿渣和偏高岭土部分或全部替代RPC中的硅粉,通过对抗折、抗压强度的正交分析,得出一个最优的RPC配合比方案。同时对最优配合比的RPC试样进行耐久性研究,包括氯离子渗透和碳化试验。结果表明,掺和料(粉煤灰)50%替代硅粉并且水胶比为0.21为RPC的最优配合比;RPC材料的抗氯离子渗透性等级为不渗透,可以有效防止氯离子渗透对钢筋造成的危害;RPC可以有效防止碳化对结构造成的危害,从碳化的角度验证了活性粉末混凝土优良的耐久性。

【关键词】 活性粉末混凝土;矿物掺合料;正交试验;氯离子渗透;碳化

DOI: 10.18686/jyfyj.v3i12.68288

混凝土是目前应用最广的建筑材料,它是有骨料和粘结材料等组成的复合材料^[1,2]。研究表明,界面过渡区,存在于骨料和浆体之间,是影响材料力学性能和耐久性能的主要原因。因此,改变材料的组成进而提高界面过渡区的性能对混凝土结构的使用寿命意义重大^[3]。

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),由于其材料级配和反应活性的改变,拥有良好的力学性能和耐久性能^[4-5],其基本配制原理如下:

- (1) 不含粗骨料,提高材料的均匀性;
- (2) 优化颗粒级配,并在成型和凝结过程中施压,提高密实度;
- (3) 降低水胶比,提高材料强度,同时降低了孔隙率;
- (4) 采用蒸养,改善微观结构^[6-7]。作为一种新型混凝土,RPC具有广泛的应用前景^[8-10]。

硅粉是RPC中的重要组分,RPC采用蒸汽养护主要是充分发挥硅粉的活性。但硅粉价格较贵,且RPC中硅粉掺量较大时易产生收缩裂缝。故本组试验考虑采用粉煤灰、矿渣和偏高岭土部分或全部替代RPC中的硅粉,通过正交试验找出三因素,三水平中的各自影响大小,从而得出最优配合比^[11-13]。同时,由于RPC结构材料自身和使用环境的特点,结构存在着严重的耐久性问题。本研究进行RPC的耐久性研究,包括RPC抗氯离子渗透性试验和碳化试验。

1、实验原材料及实验方法

1.1 原材料

水泥:深圳海星小野田P-O 52.5水泥,化学成分、矿物相及烧失量见表1,基本力学性能见表2。

粉煤灰:深圳妈湾电力有限公司生产,化学成分与物理性能见表3。

硅粉:硅铁合金冶炼厂烟尘收集微粉,其化学成分与物理性能见表4。

偏高岭土:内蒙古超牌偏高岭土有限公司提供,其化学成分及烧失量见表5。

矿渣:河北灵寿县博矿产品贸易有限公司提供,其化学组成见表6。

细骨料:石英砂、石英粉粉或用孔径0.63 mm标准筛过筛的河砂。

外加剂:N型高效泵送剂,减水率20%~25%,固含量40%,掺量3%~5%。

超细矿渣:山东潍坊大元实业公司生产,棕灰色,比表面积450m²/kg。

表1 水泥化学成分与矿物组成/%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	f-CaO	烧失量	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
18.96	6.05	3.42	63.22	1.21	0.56	3.07	65.35	5.06	10.23	10.40

表 2 水泥基本力学性能

比表面积 (m ² /kg)	初凝时间 /min	终凝时间 /min	抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa	
			3d	28d	3d	28d
362	140	245	34.7	62.8	7.2	10.6

表 3 粉煤灰化学成分与物理性能 /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	需水量比	烧失量	细度 (45 μm 方孔筛筛余)	含水量
54.16	23.58	10.98	4.61	0.77	0.06	91.7	3.36	10.80	0.23

表 4 硅粉的化学成分与物理性能

SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	TiO ₂ /%	MgO/%	Na ₂ O/%	CaO/%	比表面积/(kg/m ³)	烧失量/%	水分/%	粒径/μm
99.4	0.20	0.003	0.02	0.10	0.10	0.01	20000	0.10	0.20	0.1~0.3

表 5 偏高岭土化学成分 /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
48.96	45.05	0.55	0.26	2.61	0.16	0.27	1.51	1.62

表 6 矿渣化学成分 /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
32.56	16.67	1.16	38.11	5.25	2.63	0.87	0.24	1.02

1.2 试验方法

1.2.1 试件成型与制作

按 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，采用 60 L 混凝土搅拌机，加入胶凝材料和细砂干搅 3 min，再加入一半水和外加剂（外加剂采用同掺法）搅拌 4 min，最后加入另一半水搅拌 4 min。将拌合物装入模具进行振捣。

1.2.2 试件养护

采用蒸汽养护。试样养护一天后拆模放进蒸养箱内，在 6 h 内升温至 90℃，在 90±2℃条件下蒸汽养护 48 h 或 72 h。

2、RPC配合比参数的确定

2.1 正交试验设计概述

正交试验是一种设计多因素试验的分析方法。在水泥基材料中，水泥、掺合料、外加剂等都会影响最终材料的性能，确定最优配合比时，影响因素较多，需要合理有效地安排试验，否则会造成人力物力的浪费。正交试验设计，可以用比较少的试验确定最好的材料配比^[14-16]。

正交试验设计中，对结果有影响的方面称为因素。本试验中，水胶比、掺合料种类和替代掺量，就是三个因素。因素掺量的变化称为水平，它的次数叫水平数。如本试验中 50%，75%，100%是替代掺量因素的不同水平，0.19、0.21、0.23 是水胶比因素的不同水平。他们的水平数均取为 3。所以，本研究是一个三因素三水平的正交试验问题。本试验中以 RPC 的抗折强度和抗压强度作为试验指标来评判试验结果。试验结果的分析采用极差法，以便从试验数据中提取更多的信息。

2.2 正交试验有两大特点：

2.2.1 均衡分散性

以一个因素三水平的试验为例，如果做全面试验，则有 A1B1C1，A1B1C2，A1B1C3，A1B2C1，A1B2C2……A3B3C3 等共

33 = 27 个试验条件。全部测试的话试验次数太多，正交试验设计只要 9 组试验就可以达到全部测试的效果，如图 1 中所示，所选地 9 个点是均衡分散的，有很强的代表性。图中用 3 个坐标轴代表三个因素，坐标轴上的点代表每个因素的水平数，立方体内的 27 个“·”点，代表全面试验的 27 个点，立方体内的 9 个“o”点，代表按正交设计的 9 组试验，保证每个面上有三个点，立方体每条线有 1 个点。

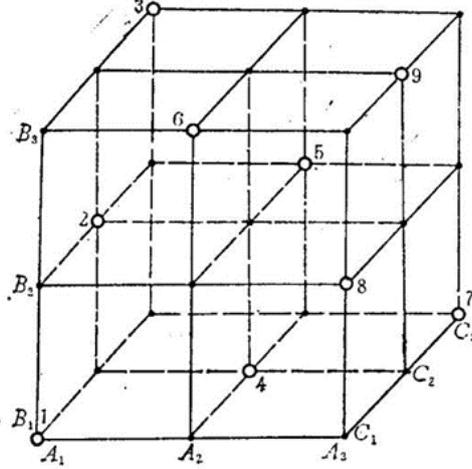


图 1 正交试验选点示意图

2. 整齐可比性

一般来讲，正交试验是保证所有因素有规律的变化，在变化中进行因素、水平差异的比较。以本研究的试验方案为例，我们是在其他因素有规则地变化下比较某一因素的三水平的。

A 因素的各个水平都在试验中重复了 3 次，且在 A 的某一水平下，B 的三个水平，C 的三个水平都考虑了。B 因素、C 因素在某一水平下也是如此。以此，来达到试验条件相同条件下的可比性。

2.2 RPC 配合比正交试验及结果分析

本试验所采用的基准配合比如表 7:

表 7 正交试验的基准配合比

水胶比	水	水泥	硅粉	粉煤灰	矿渣	偏高岭土	砂	减水剂	胶凝材料
0.19	0.172	0.743	0.184	0.149	0.000	0.000	0.927	0.054	1.076

在以下的各正交配合比中，水泥、砂和减水剂均保持不变。胶凝材料总量保持不变，通过加水调整水胶比，以粉煤灰、矿渣和偏高岭土部分或全部替代硅粉，以测试这些因素的变化对于 RPC 力学性能的影响。力学性能测试参照 GB/T 50080-2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》规定。

进行检测。

本试验为三因素三水平的正交试验，三因素分别为 A 水胶比，B 掺合料种类，C 为替代掺量。各因素的不同水平数如下：

- A 水胶比 A1 — 0.19 A2 — 0.21 A3 — 0.23
 B 掺合料种类 B1 — 偏高岭土 B2 — 矿渣 B3 — 粉煤灰
 C 替代掺量 C1 — 50% C2 — 75% C3 — 100%
- ① A1B1C1: 水胶比为 0.19，采用偏高岭土替代 50% 的硅粉；
 - ② A1B2C2: 水胶比为 0.19，采用矿渣替代 75% 的硅粉；
 - ③ A1B3C3: 水胶比为 0.19，采用粉煤灰替代 100% 的硅粉；
 - ④ A2B1C2: 水胶比为 0.21，采用偏高岭土替代 75% 的硅粉；
 - ⑤ A2B2C3: 水胶比为 0.21，采用矿渣替代 100% 的硅粉；
 - ⑥ A2B3C1: 水胶比为 0.21，采用粉煤灰替代 50% 的硅粉；
 - ⑦ A3B1C3: 水胶比为 0.23，采用偏高岭土替代 100% 的硅粉；
 - ⑧ A3B2C1: 水胶比为 0.23，采用矿渣替代 50% 的硅粉；
 - ⑨ A3B3C2: 水胶比为 0.23，采用粉煤灰替代 75% 的硅粉。

表 8 RPC 正交试验配合比

编号	配合比(质量分数)/%								
	水胶比	水	水泥	硅粉	粉煤灰	矿渣	偏高岭土	砂	减水剂
① A1B1C1	0.19	0.172	0.743	0.092	0.149	0.000	0.092	0.927	0.054
② A1B2C2	0.19	0.172	0.743	0.046	0.149	0.139	0.000	0.927	0.054
③ A1B3C3	0.19	0.172	0.743	0.000	0.333	0.000	0.000	0.927	0.054
④ A2B1C2	0.21	0.192	0.743	0.046	0.149	0.000	0.139	0.927	0.054
⑤ A2B2C3	0.21	0.192	0.743	0.000	0.149	0.185	0.000	0.927	0.054
⑥ A2B3C1	0.21	0.192	0.743	0.092	0.241	0.000	0.000	0.927	0.054
⑦ A3B1C3	0.23	0.215	0.743	0.000	0.149	0.000	0.185	0.927	0.054
⑧ A3B2C1	0.23	0.215	0.743	0.092	0.149	0.092	0.000	0.927	0.054
⑨ A3B3C2	0.23	0.215	0.743	0.046	0.287	0.000	0.000	0.927	0.054

表 9 RPC 正交试验强度与流动度

序号	抗折强度 /MPa	抗压强度 /MPa	流动度 /mm
① A1B1C1	17.733	113.488	204/202
② A1B2C2	16.214	123.939	239/238
③ A1B3C3	15.200	113.292	214/216
④ A2B1C2	14.084	93.246	204/202
⑤ A2B2C3	13.247	104.797	259/263
⑥ A2B3C1	17.866	139.968	自流满盘
⑦ A3B1C3	10.716	90.891	181/178
⑧ A3B2C1	15.652	131.221	自流满盘
⑨ A3B3C2	12.403	114.933	自流满盘

RPC 正交试验配合比如表 8 所示,不同 RPC 正交试样组的抗压、抗折强度和流动度如表 9 所示。可以看出,第⑥组(A2B3C1:水胶比为 0.21,采用粉煤灰替代 50%的硅粉)无论抗折,抗压强度都是最高,第⑦组(A3B1C3:水胶比为 0.23,采用偏高岭土替代 100%的硅粉)抗折、抗压强度都是最低。在试验过程中可以知道,三种掺料中,掺加了偏高岭土的组总是比较干硬,流动度较低,以至于振捣后密实度不如其他组好,内部缺陷较多。

表 10 抗折强度正交分析(极差法)

试验序号	水胶比 A	掺料种类 B	替代掺量 C	D	Xi	Yi = Xi - 8
1	0.19(A1)	偏高岭土(B1)	50%(C1)	(D1)	17.733	9.733
2	0.19(A1)	矿渣(B2)	75%(C2)	(D2)	16.214	8.214
3	0.19(A1)	粉煤灰(B3)	100%(C3)	(D3)	15.200	7.200
4	0.21(A2)	偏高岭土(B1)	75%(C2)	(D3)	14.084	6.084
5	0.21(A2)	矿渣(B2)	100%(C3)	(D1)	13.247	5.247
6	0.21(A2)	粉煤灰(B3)	50%(C1)	(D2)	17.866	9.866
7	0.23(A3)	偏高岭土(B1)	100%(C3)	(D2)	10.716	2.716
8	0.23(A3)	矿渣(B2)	50%(C1)	(D3)	15.652	7.652
9	0.23(A3)	粉煤灰(B3)	75%(C2)	(D1)	12.403	4.403

K1	25.147	18.533	27.251	19.383	Σyi = 61.115
K2	21.197	21.113	18.701	20.796	
K3	14.771	21.469	15.163	20.936	
K1	8.38	6.18	9.08	6.46	
K2	7.07	7.04	6.23	6.93	
K3	4.92	7.16	5.05	6.98	
ω	3.46	0.98	4.03	-0.05	

Ki(第j列) = 第j列中数字“i”所对应得试验指标之和;

Ki(第j列) = Ki(第j列)/第j列中“i”的重复次数;

极差 ω(第i列) = 第j列各个K中, 最大值与最小值之差。

然后进行各列的极差比较, 极差大表示在这个水平变化范围内造成的差别大, 是影响试验指标的主要因素, 极差小的水平属于次要因素。

从表 10 中可以看出, 影响的 RPC 抗折强度因素主次为替代掺量 (ω = 4.03) > 水胶比 (ω = 3.46) > 掺料种类 (ω = 0.98)。而在替代掺量水平中, 50% 替代掺量影响最大, 75% 则次之; 在水胶比水平中, 水胶比为 0.19 时影响最大, 水胶比为 0.21 则次之。

从表 11 中可以看出, 影响 RPC 抗压强度的因素主次为替代掺量 (ω = 25.23) > 掺料种类 (ω = 23.52) > 水胶比 (ω = 4.56)。而在替代掺量水平中, 50% 替代掺量影响最大, 75% 则次之; 在掺料种类水平中, 粉煤灰影响最大, 矿渣则次之。在抗压强度中, 起着重要主导作用的是试块的密实程度, 如果替代硅粉多, 对于粉体的堆积密实度是不利的, 从而造成抗压强度的降低。掺料种类中, 矿渣和粉煤灰相差不大, 水胶比在抗压强度中影响不大。

通过对抗折, 抗压强度的正交分析, 得出一个较好的配合比方案: 掺和料 (粉煤灰) 50% 替代硅粉, 水胶比为 0.21。

表 11 抗压正交分析 (极差法)

试验序号	水胶比 A	掺料种类 B	掺料水平 C	D	Xi	Yi = Xi - 70
1	0.19(A1)	偏高岭土 (B1)	50% (C1)	(D1)	113.488	43.488
2	0.19(A1)	矿渣 (B2)	75% (C2)	(D2)	123.939	53.939
3	0.19(A1)	粉煤灰 (B3)	100% (C3)	(D3)	113.292	43.292
4	0.21(A2)	偏高岭土 (B1)	75% (C2)	(D3)	93.246	23.246
5	0.21(A2)	矿渣 (B2)	100% (C3)	(D1)	104.797	34.797
6	0.21(A2)	粉煤灰 (B3)	50% (C1)	(D2)	139.968	69.968
7	0.23(A3)	偏高岭土 (B1)	100% (C3)	(D2)	90.891	20.891
8	0.23(A3)	矿渣 (B2)	50% (C1)	(D3)	131.221	61.221
9	0.23(A3)	粉煤灰 (B3)	75% (C2)	(D1)	114.933	44.933
K1	140.719	87.625	174.677	123.218	Σyi = 395.775	
K2	128.011	149.957	122.118	144.798		
K3	127.045	158.193	98.98	127.759		
K1	46.91	29.21	58.23	41.07		
K2	42.67	49.99	40.71	48.27		
K3	42.35	52.73	32.99	42.59		
ω	4.56	23.52	25.23	7.19		

3、RPC材料的耐久性研究

由于混凝土结构材料自身和使用环境的特点, 混凝土结构存在着严重的耐久性问题, 并且随着环境的变迁和功能要求的提高, 耐久性问题越来越突出。耐久性指标成为对混凝土质量进行综合评判的重要指标之一。RPC 作为一种新的混凝土材料, 其耐久性的研究也非常重要^[17-18], 所以, 本研究进行 RPC 的耐久性研究, 包括 RPC 抗氯离子渗透性试验和碳化试验。

3.1 RPC 抗氯离子渗透性试验

氯离子引起的钢筋锈蚀是影响混凝土结构使用寿命的主要原因。目前, 混凝土抗氯离子渗透性尚无统一的试验标准, 本文采用电势显示混凝土抗氯离子渗透性的标准试验方法 (美国标准, ASTM 1202-97), 实测并对 RPC 抗氯离子渗透性进行评判^[19]。

根据 ASTM 标准试验方法, 参照最优配合比制备圆柱体试样 (直径 100 mm, 高度 50 mm), 试样为两组, 分别编号 1, 2。监测 RPC 试样在 6 h 期间通过的电流, 试样一端浸入氯化钠溶液中, 另一端浸入氢氧化钠溶液中, 并在试片两端施加并保持 60V 直流电压。根据通过的总电量对 RPC 的抗氯离子渗透性进行评判。表 12 表示氯离子渗透性与通过电量的关系。

表 12 氯离子渗透性与通过电量的对应关系

通过的电量 / 库仑	氯离子渗透性
>4000	高
2000-4000	中等
1000-2000	低
100-1000	很低
<100	不渗透

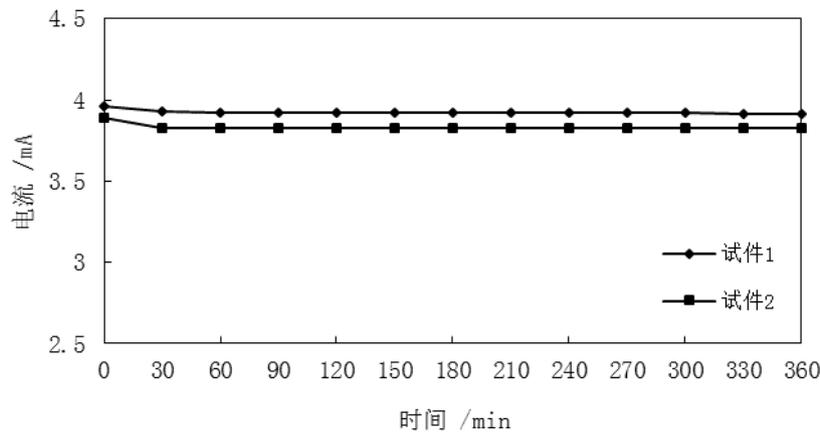


图 2 RPC 抗氯离子渗透性结果

通过电量计算及结果评判: 绘制电流—时间关系 (图 2), 以光滑曲线连接数据点, 并对曲线下方的面积做积分得到试验 6 h 通过的电量。

$$Q = 900 \times (A_0 + 2A_{30} + 2A_{60} + \dots + 2A_{300} + 2A_{330} + A_{360}) \quad (3.1)$$

式中: Q 是通过的电量, 库仑; A_i 施加电压后第 i min 的电流, 安培;

表 13 RPC 氯离子渗透性试验结果

编号	试件在 60 伏直流电压下 6 h 期间内每 30 min 通过的电流 /mA													分计 Q	平均 Q
	A10	A30	A60	A90	A120	A150	A180	A210	A240	A270	A300	A330	A360		
1	3.96	3.93	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.91	3.91	84.7	83.8
2	3.89	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	82.8	

表 13 为 RPC 氯离子渗透性试验结果。由结果可知, 试样的抗氯离子渗透性试验时通过的总电量平均为 83.8 库仑, 小于 100 库仑, 说明试样的抗氯离子渗透性等级为不渗透, RPC 材料可以有效防止氯离子渗透对钢筋造成的危害。

3.2 RPC 碳化试验

碳化是影响结构耐久性的另一个主要原因, 当混凝土发生碳化并达到一定深度时, 可能造成钢筋的钝化膜脱落导致钢筋锈蚀, 进而影响结构耐久性 [20]。

快速碳化试验: 将试样 (100 mm × 100 mm × 400 mm) 制备好后放入标准养护室中养护 28 d, 然后在 60°C 的烘箱中烘干, 侧面用石蜡密封。放入温度为 $70 \pm 5\%$ 、二氧化碳浓度为 $20 \pm 3\%$ 的碳化箱中进行碳化试验。最后用酚酞乙醇指示液喷洒试样断裂面, 测其碳化深度。

试验选用 RPC 试样碳化龄期 7、14、28 d 后, 分别测试其碳化深度, 在三组碳化龄期下碳化深度基本为零, 说明 RPC 可以有效防止碳化对结构造成的危害, 从碳化的角度验证了活性粉末混凝土优良的耐久性。

4、结论

本研究通过对 RPC 进行配合比及耐久性方面进行研究,得出如下结论:

- 1) 通过对抗折、抗压强度的正交分析,得出一个最优的 RPC 配合比方案:掺和料(粉煤灰)50%替代硅粉,水胶比为 0.21。
- 2) RPC 材料的抗氯离子渗透性等级为不渗透,可以有效防止氯离子渗透对钢筋造成的危害,保护钢筋,提高结构服役寿命。
- 3) RPC 可以有效防止碳化对结构造成的危害,从碳化的角度验证了活性粉末混凝土优良的耐久性。

参考文献

- [1] 李根,胡康旭.复掺纤维活性粉末混凝土高温力学性能研究[J].混凝土与水泥制品,2019,000(002):48-51.
- [2] 苏春雷.不同弹性模量纤维混杂增强活性粉末混凝土的力学性能研究[J].粉煤灰综合利用,2020,034(001):81-84.
- [3] 潘松,程东辉.活性粉末混凝土研究综述[J].山西建筑,2019,045(002):97-98.
- [4] 王朋,李龙堂,丁耀宗.活性粉末混凝土耐久性研究综述[J].建筑结构,2019(S02):610-616.
- [5] 安明喆,杨志慧,余自若,等.活性粉末混凝土抗拉性能研究[J].铁道学报,2010(01):54-58.
- [6] 郑文忠,吕雪源.活性粉末混凝土研究进展[J].建筑结构学报,2015(10):44-58.
- [7] 余自若,秦鑫,安明喆.活性粉末混凝土的常规三轴压缩性能试验研究[J].中国铁道科学,2012,33(002):40-44.
- [8] 王凯,林静,杨为德,等.活性粉末混凝土长期性能与耐久性研究进展[J].混凝土,2017(11):27-30.
- [9] 郝文秀,徐晓.钢纤维活性粉末混凝土力学性能试验研究[J].建筑技术,2012(01):35-37.
- [10] 鞠彦忠,王德弘,李秋晨,等.钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J].实验力学,2011(03):254-260.
- [11] 鞠彦忠,王德弘,张超.活性粉末混凝土的研究与应用进展[J].东北电力大学学报,2011,31(Z1):9-15.
- [12] 曹霞,金陵志,付强,等.钢纤维活性粉末混凝土力学性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2013,000(001):54-56.
- [13] 耿春雷,许零,陈红岩,等.活性粉末混凝土的研究与工程应用进展[J].材料导报,2012(05):70-73.
- [14] 董如何,肖必华,方永水.正交试验设计的理论分析方法及应用[J].安徽建筑大学学报,2004(06):103-106.
- [15] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,27(09):52-55.
- [16] 李俊,尹健,周士琼,等.基于正交试验的再生骨料混凝土强度研究[J].土木工程学报,2006,39(009):43-46.
- [17] 姜凤娇,贡金鑫,王幻.基于电化学阻抗谱的氯离子侵蚀混凝土研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019(05):682-687.
- [18] 陈正,胡以婵,赵宇飞,等.标准碳化环境下基于材料参数的混凝土碳化深度多因素计算模型[J].硅酸盐通报,2019,038(006):1681-1687.
- [19] 陆益军,王晓妮,孙茜.复杂交通荷载作用下粉煤灰混凝土碳化及强度研究[J].广东建材,2020,036(001):47-49,42.
- [20] 陈琨.粉煤灰掺量对混凝土碳化特性的试验研究[J].江西建材,2020(1):22-23.

第一作者与通讯作者:李枫(1976-),男,硕士,研究方向:混凝土结构耐久性研究。