



## 1.2 试验方法

### 1.2.1 RPC 配合比设计

实验采用 0.19 的水胶比和 1.16 的胶砂比, SF 和 FA 掺量分别占胶凝材料总质量的 0~20% 和 10~30%, 钢纤维掺量占总体积的 0~6%, 减水剂掺量为 5.4%。

### 1.2.2 RPC 的制备与养护

RPC 的制备参照 GB/T50081-2002, 首先将钢纤维置于强制式混凝土双卧轴搅拌机 (SJD100 型) 中搅拌 3 min, 然后添加胶凝材料和细砂, 干搅 3 min, 之后添加一半量的水和全部的外加剂 (外加剂采用同掺法), 搅拌 4 min, 最后加入另一半水继续搅拌 4 min。拌合均匀后, 一次性地将拌合物装入试模, 然后振动密实。

相比于传统混凝土, 常规的养护环境不利于 RPC 强度的发展, 因此额外采用高温蒸汽养护作为对比。前期的试验结果表明, 蒸养 24~72 h 时, RPC 的抗折、抗压强度总体上随着蒸养时间的增加而增长, 但其在 48~72 h 之间时, 强度的增加趋势已经平缓。因此, 蒸养时间设定为 72 h。试件成型后于常温条件下养护 24 h 后拆模, 然后放入标准养护室养护和 90±2℃蒸汽养护条件下分别养护 28 d 和 72 h。

### 1.2.3 RPC 性能测试

新拌 RPC 的流动性以及其硬化后的抗压、抗折强度测试分别参照国家标准 GB/T50080-2002 和 GB/T50081-2002。

## 2、结果与讨论

### 2.1 矿物掺合料对 RPC 强度的影响

#### 2.1.1 SF 掺量对 RPC 强度的影响

在所有的矿物掺合料中, SF 具有无法比拟的物理和化学优势, 其颗粒尺寸非常小, 可以填充混凝土内部颗粒之间的孔隙, 改善胶凝材料的级配。此外, SF 具有非常高的火山灰活性, 能够与水泥的水化产物发生火山灰反应, 从而提高凝胶产量, 使得硬化浆体更加密实。因此, RPC 配合比设计时应考虑 SF 的掺量问题, 使得 SF 在起到最佳填充作用的同时, 也能够最大程度地参与火山灰反应, 从而得到综合性能最优的产品。

图 1 (a) 和 (b) 显示了不同 SF 掺量对 RPC 抗压、抗折强度的影响, 可以看出不同养护条件下, 加入 5% 的 SF 可以显著提高 RPC 的抗折强度, 相比于未添加 SF 时, 蒸养和标准养护条件下, RPC 强度分别提高了约 50% 和 14%, 但随着 SF 掺量的继续增加, 抗折强度均变化不大。此外, 通过对比可以看出, 与蒸养相比, 标准养护条件下 SF 的掺入对抗折强度的影响不明显; 对于抗压强度, 无论蒸养还是标养, SF 掺量对试件抗压强度的影响均较大。当 SF 掺量为 5% 时, 抗压强度值最高, 但随着硅粉掺量的进一步增大, 强度反而开始下降, 这可能与增大 SF 掺量会降低混凝土的工作性有关。根据本实验前期的扩展度测试结果, 硅粉的掺入会影响拌合物的流动性能。相比于未添加 SF, 当 SF 掺量为 5% 时, 拌合物的扩展度降低最为显著, 随着硅粉掺量的继续增加, 扩展度逐渐降低。这是因为 SF 比表面积高达 20 m<sup>2</sup>/g, 其本身的需求量相当大, 故随着 SF 的加入, 拌合物粘性增加, 流动性下降。因此, 综合考虑 RPC 强度、流动性和成本, SF 的适宜掺量为 5% 左右。

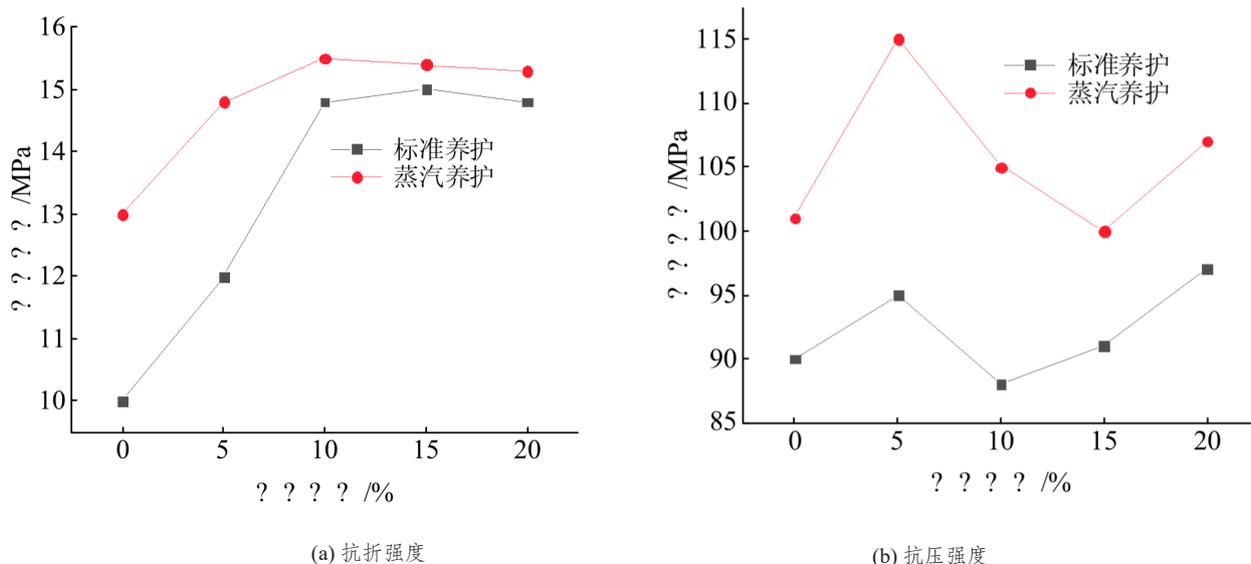


图 1 不同 SF 掺量下 RPC 的强度

#### 2.1.2 FA 掺量对 RPC 强度的影响

图 2(a) 和 (b) 为不同 FA 掺量下 RPC 得抗压、抗折强度, 可以看出当 FA 掺量由 10% 增加至 30% 时, RPC 的抗折强度逐渐提高。蒸养 72 h 和标准养护 28 d 条件下, 试件的抗折强度相差无几。对于抗压强度, 当 FA 掺量小于 20% 时, RPC 的抗压强度值随 FA 掺量的增加而提高, 但掺量超过 20% 后, 强度反而开始逐渐下降。此外, 蒸汽养

护条件下试件的抗压强度明显高于标准养护条件下试件的强度,这与抗折强度相反。综合平衡各方面的因素,FA 适宜掺量为 20% 左右。

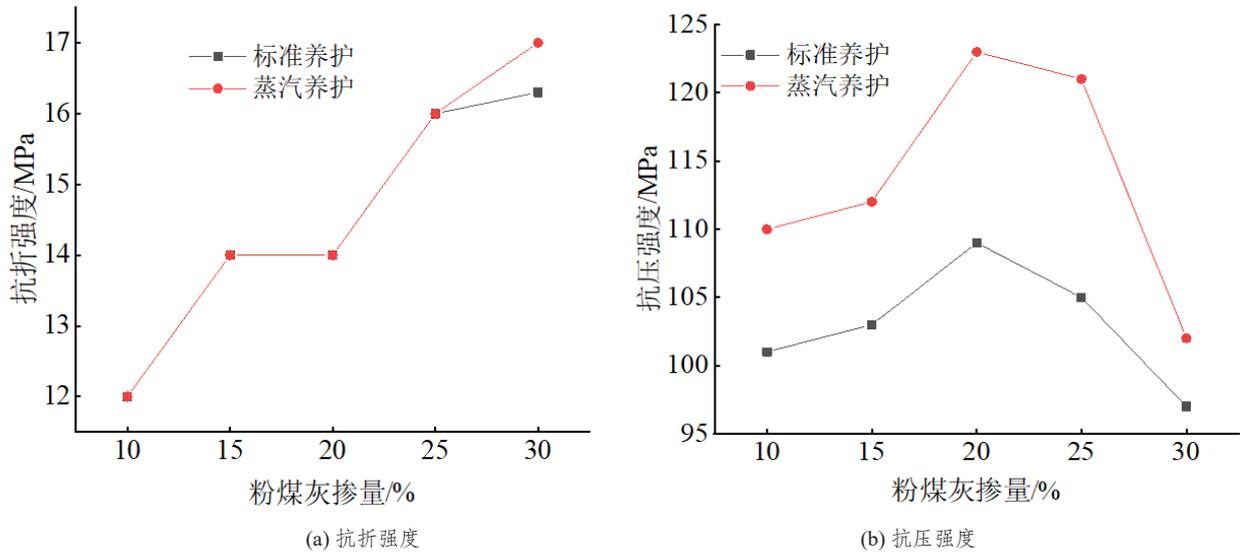


图 2 不同 FA 掺量下 RPC 的强度

## 2.2 钢纤维对 RPC 强度的影响

### 2.2.1 钢纤维种类对 RPC 强度的影响

纤维的增强效果与其自身的长径比呈正相关,纤维长度过短所起到的增强效果有限,但长度过长则会影响混凝土的可泵送性以及施工质量,甚至导致强度降低;纤维直径过细,则其在搅拌过程中易于弯折,直径过粗则其在相同的体积掺入率时起到的增强效果较差。本实验在固定钢纤维体积率(2%)的情况下,研究了4种不同种类的钢纤维(表4)对RPC强度的影响,其结果如表5所示。通过对比可以看出:

(1) 当钢纤维掺量和灰水比固定时,ZH-01-30 钢纤维 RPC 浆体的扩展度稍大于其他钢纤维混凝土,且 ZH-06-25、ZH-09-12 和 ZH-09-25 钢纤维对扩展度的影响相差不大;

(2) 当配合比相同时,RPC 抗压强度受钢纤维种类的影响较小,但受养护条件的影响较大。与标准养护条件相比,蒸汽养护条件下试件的抗压强度平均提高了约 16%,其中掺有 ZH-09-25 型钢纤维的 RPC 在蒸汽条件下达到最高强度值(140 MPa);

(3) RPC 抗折强度受养护条件的影响较小,但受钢纤维种类的影响较大。掺 ZH-09-25 型钢纤维的试件的抗折强度明显高于掺有其他三种型号钢纤维的试件,其抗折强度较 ZH-01-30、ZH-06-25 和 ZH-09-12 组分别提高了 37%、13% 和 23% (蒸养)。

此外,在强度测试实验过程中发现钢纤维 RPC 的破坏形式不同于未掺钢纤维的混凝土,前者破坏时破裂声音较小,可听到钢纤维被拨出的声音,破坏后试件碎而不散,而后者破坏时可听到巨大的破裂声,试件破碎成碎块并向四周飞溅。综合考虑工作性和力学性能,ZH-09-25 型钢纤维较适合于配制 RPC。

表 5 不同钢纤维种类下 RPC 的流动性和强度

样品编号	钢纤维	流动性 /mm	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
			蒸养	标养	蒸养	标养
1	ZH-01-30	360	14.4	14.2	136.6	122.2
2	ZH-06-25	295	17.4	18.4	137.1	122.2
3	ZH-09-25	300	19.8	19.9	140.0	114.8
4	ZH-09-12	310	16.0	16.7	139.8	118.1

### 2.2.2 钢纤维掺量对 RPC 强度的影响

普通混凝土抗拉强度与抗压强度之比非常低，表现为很大的脆性，故在普通混凝土中经常使用钢筋来弥补这方面的不足。已有的实验结果表明，RPC 的抗拉强度与抗压强度之比一般为 1/8 左右，与普通混凝土相比已有很大的提高，但脆性依然很大，通常 RPC 中加入钢纤维来提高其韧性。在 RPC 中加入钢纤维能起到较好的增强、增韧作用，但这会导致混凝土的成本大幅提高。为此，需要通过试验来寻找钢纤维掺量对 RPC 在性能和成本上理想结合点。

不同钢纤维掺量下 RPC 的抗压、抗折强度分别如图 3(a) 和 (b) 所示，与未掺钢纤维时相比，当钢纤维掺量为 4% 和 6% 时，蒸养和标准养护条件下 RPC 的抗折强度分别比提高了 147% 和 170%，136% 和 165%，抗压强度分别提高了 23.7% 和 43.1%，21.4% 和 32.8%。钢纤维掺量的增加能够显著提高 RPC 的强度，然而根据实验前期的测试结果，钢纤维掺量的增加会降低 RPC 的流动性，且当纤维掺量大于 4% 时，RPC 流动性降低最为显著。综合考虑 RPC 流动性、强度以及制备成本，钢纤维的适宜掺量为 4% 左右。

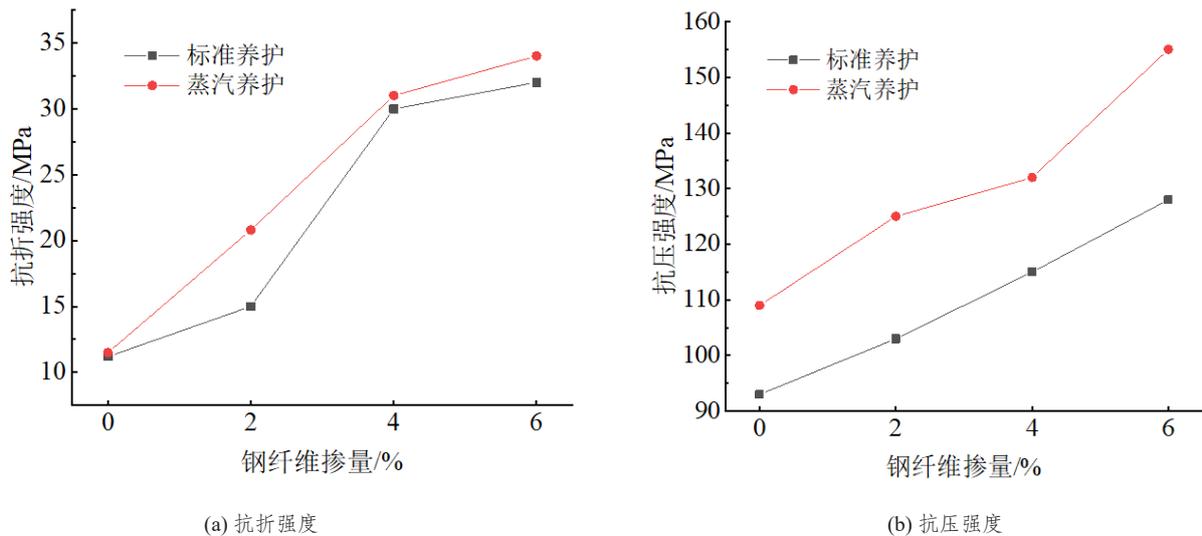


图 3 不同钢纤维掺量下 RPC 的强度

### 2.3 骨料粒径对 RPC 强度的影响

一般说来，相比于水泥石基体，骨料的硬度更高，弹性模量更大，更能够抵制各种收缩。但由此也会导致水泥 - 骨料界面过渡区产生一定的剪切力和拉应力，而这两种力又会随着颗粒尺寸增大而增大，一旦超过粘结强度限制范围，就会从混凝土内部开始引发开裂。因此，取消粗骨料，降低混凝土中骨料尺寸，成为 RPC 的设计原则之一。由表 6 可以看出，不同级配的砂对 RPC 抗折和抗压强度的影响几乎可以忽略，这表明采用粒径范围为 0~10 mm 的河砂制备 RPC 是可行的。

表 6 不同砂级配下 RPC 的强度

样品编号	砂粒径 /mm	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		蒸养	标养	蒸养	标养
1	0-0.63	14.1	14.1	123.2	103.6
2	0-1.25	13.0	16.0	124.6	111.7
3	0-2.5	13.8	14.4	124.7	111.6
4	0-5	13.6	13.9	119.7	103.2
5	0-10	13.4	13.7	116.7	98.6

## 3、结论

(1) SF 和 FA 的最佳掺量分别为 5% 和 20%，超过此限定值后 RPC 的抗折强度无明显变化，但抗压强度开始降低。

(2) 相同体积掺量下，钢纤维种类对抗压强度的影响较小，但对抗折强度的影响显著。四种钢纤维中，ZH-09-25 型钢纤维（波浪形，长径比为 50）对 RPC 强度的提升最为显著（抗压和抗折强度提升分别为 23.7% 和 147%），其最佳掺量为 4%。

(3) 采用较宽粒径范围的河砂制备 RPC 是可行, 0~10 mm 范围内, 砂的粒径对 RPC 抗折和抗压强度的影响均较小。

## 参考文献

- [1] 张荣华, 徐迅, 罗宏伟, 等. 活性粉末混凝土组成材料及制备方式研究综述 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019(10):14-18.
  - [2] 王琨, 仲振鹏, 徐冠普, 等. RPC 的研究进展及其在型钢混凝土结构中的应用 [J]. 混凝土, 2021(4):119-121.
  - [3] JI T, CHEN B H, ZHUANG Y H, et al. Effects of sand particle size and gradation on strength of reactive powder concrete[J]. Advanced Materials Research Vols, 2011, 261-263: 208-211.
  - [4] 陈浩宇, 李俊毅, 王娜, 等. 掺合料对活性粉末混凝土性能的影响 [J]. 中国港湾建设, 2013(02):34-37.
  - [5] RICHARD P, CHEYREZY M H. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
  - [6] RICHARD P, CHEYREZY M H. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength[J]. ACI Journal, 1994, 144(S1): 507-508.
  - [7] 刘小平. 活性粉末混凝土的特性及其发展前景 [J]. 混凝土与水泥制品, 2006(3):17-18.
  - [8] WANG C, YANG C H, LIU F, et al. Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34: 538-544.
  - [9] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2015,36(10):44-58.
  - [10] 白泓, 高日. 活性粉末混凝土 (RPC) 在工程结构中的应用 [J]. 建筑科学, 2003,19(4):51-54.
  - [11] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用 [J]. 硅酸盐通报, 2016(1):141-149.
  - [12] 项红梅, 刘数华, 高志扬. 矿物掺合料对活性粉末混凝土强度的影响 [J]. 粉煤灰, 2014(4):35-38.
  - [13] LARRARD F D. Ultrafine particle for making very high strength concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19: 161-172.
  - [14] 李伯勋. 低成本环保型超高性能混凝土的配制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
  - [15] 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, 2012,26(3):70-73.
- 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。