

文章编号:1674-2869(2013)03-0057-05

# 白云石砂为骨料高强混凝土的制备

曹 宏,罗 丽,孙飞龙,梁 实,安子博,薛 俊

(武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为了降低活性粉末混凝土的制备成本同时获得高强度制品,根据活性粉末混凝土的制备原理,采用价格相对较低的白云石砂、白云石粉取代其原料中价格较高的石英砂、石英粉来制备高强混凝土。利用水泥、硅灰、粉煤灰三元胶凝材料体系,在水泥、白云石粉、减水剂的相对掺量不变的条件下,用单元变量的方法分别改变水胶比,以及硅灰、粉煤灰、白云石砂和钢纤维的掺量,探讨了不同配合比设计对样品强度的影响。通过研究发现:水胶比,以及粉煤灰、硅灰、白云石砂的掺量变化对样品的抗压强度影响较大,抗折强度的影响较小,而钢纤维掺量变化对样品的抗压和抗折强度的变化都很明显。最后得出最佳配合比设计为:水胶比为 0.16,硅灰、粉煤灰、白云石砂、白云石粉的掺量分别为水泥用量的 0.3、0.3、0.9、0.2,钢纤维的掺量为体积分数的 2%,减水剂的掺量为胶凝材料总量的 2%。制备的混凝土样品脱模后先采用水泥砂浆标准养护 2 天,再于 90 ℃热水中养护 3 天,测得样品的抗压强度超过 150 MPa,抗折强度达到 30 MPa。

**关键词:**混凝土;配合比;强度

**中图分类号:**TU528.31

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.03.012

## 0 引 言

活性粉末混凝土<sup>[1]</sup> (Reactive Powder Concrete 简称 RPC)是法国 Bougyues 公司 1995 年研制成功的一种超高强度、高耐久性及高韧性的新型水泥基复合材料。其抗压强度可以达到 200~800 MPa,抗折强度 20~150 MPa<sup>[2-4]</sup>,还具有超高的耐久性能和良好的环保性能<sup>[5]</sup>。在结构设计中能够有效减少自重,提高结构的抗震和抗冲击性能。制备活性粉末混凝土的基本思路是优化颗粒级配、采用硬度极高的细骨料和活性粉料、热养护来减少内部缺陷,改善材料的整体性能。就目前文献报道<sup>[6]</sup>,制备 RPC 所用骨料均为硬度极高的石英砂、石英粉,其价格较高(市场价 800~1 200 元/吨),也使得 RPC 成本比较高,从而难以大规模推广。本文依照制备活性粉末混凝土的原理,用价格相对较低的白云石砂和白云石粉(市场价 400~600 元/吨)为骨料制备了抗压强度超过 150 MPa、抗折强度达到 30 MPa 的高强混凝土。在此重点探讨了配合比对其强度的影响,并分析了制品的成分与结构。

## 1 实验部分

### 1.1 原料及其性能

实验用原材料及其性能指标如表 1 所示。

表 1 原料及其性能

Table 1 Raw materials and its performance

名称	性能参数
水泥	P·O42.5(华新水泥厂生产),水泥细度 3 200 cm <sup>2</sup> /g,初凝时间大于 90 min,终凝时间小于 360 min,烧失量为 0.5。
硅灰	SiO <sub>2</sub> 含量大于 90%,密度 2.21 g/cm <sup>3</sup> ,平均粒径 0.3 μm 左右,比表面积 143 100 cm <sup>2</sup> /g。
粉煤灰	经过 0.3 mm 网筛过筛,取筛下料进行实验。
白云石砂	市售,粒径为 0.15 mm。
白云石粉	市售,粒径为 0.048 mm。
减水剂	聚羧酸系一含固量 40%。
钢纤维	长径比 52,密度 7.7 g/cm <sup>3</sup> 。

### 1.2 配合比设计

本文采用水泥、硅灰、粉煤灰三元胶凝材料体系制备混凝土,对主要影响其强度的水胶比和粉煤灰、硅灰、白云石砂、钢纤维的掺量进行配合比设计,如表 2。

收稿日期:2012-12-17

作者简介:曹 宏(1965-),男,江苏盐城人,教授,博士,研究方向:新型碳材料与胶凝材料。

表 2 配合比设计

Table 2 The design of mixture ratio

水胶比 W/B	胶凝材料(B)			白云石砂 DS/C	钢纤维/%	白云石粉 DF/C	减水剂/%
	水泥 C	硅灰 SF/C	粉煤灰 FA/C				
0.16,0.17,0.18, 0.19,0.20	1	0.25	0.30	0.88	0	0.2	2
0.16	1	0.25	0.20,0.25 0.30,0.40	0.88	0	0.2	2
0.16	1	0.25	0.30	0.80,0.90 1.00,1.10	0	0.2	2
0.17	1	0.10,0.20 0.30,0.40	0.30	0.90	0	0.2	2
0.16	1	0.30	0.30	0.90	0,0.93 1.81,2.26	0.2	2

注：钢纤维掺量是体积百分比，减水剂为胶凝材料的质量百分比；硅灰、粉煤灰、白云石砂、白云石粉掺量均为与水泥的质量比；考虑到拌和效果，在讨论硅灰掺量影响时将水胶比增大到 0.17。

1.3 实验步骤

a. 搅拌：将钢纤维、白云石砂倒入搅拌机中干拌 4 min，再加入水泥、硅灰、粉煤灰、白云石粉一起干拌 4 min，然后将溶有减水剂的水加入干拌物料中拌和 5 min。

b. 成型：边填料边震动，填料完成再震动 3 min 成型结束。

c. 养护：成型完后在模具上面盖一层保鲜膜，以防止混凝土表面的水分蒸发。于 20 ℃ 的水泥砼标养箱中养护 24 h 后脱模，脱模后的试块在 20 ℃ 的水泥砼标养箱中养护 2 天，再将其放入 90 ℃ 热水中养护 3 天，养护结束待试块冷却进行测试。

d. 测试：参照 GB/T2419—2005，《水泥胶砂流动度测定方法》<sup>[7]</sup> 测试。

2 结果与讨论

2.1 水胶比的影响

用水量的多少决定着水泥的水化作用和材料火山灰效应的发挥，最终影响到混凝土的整体性能。水胶比低，拌和效果差成型困难。水胶比过大，水化反应后未反应的水，被困在混凝土结构中留下大量的孔隙，严重影响样品的强度。图 1 为水胶比对样品强度的影响。

从图 1 看到，随着水胶比的降低，抗压强度渐次明显增大，抗折强度亦呈小幅增长趋势，但增长幅度较小。从抗压强度随水胶比的变化趋势看，二者大致呈线性关系，经拟合得到拟合直线如式(1)。

$$\sigma = 264.2 - 939.8(m_w/m_B) \quad (1)$$

式(1)中： $\sigma$  为抗压强度，MPa； $m_w/m_B$  为水胶比；拟合相关度  $R^2 = 0.945\ 2$ 。

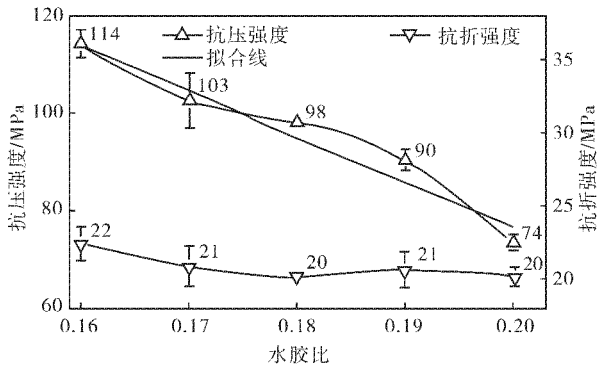


图 1 水胶比对强度的影响

Fig. 1 Effects of water-binder ratio on strength

据此可以大致预测水胶比与抗压强度间的关系，但是水胶比越低流动度越差，成型越困难。本文还尝试了在更低水胶比 0.15 下的试验，由于实验拌和效果较差，振动成型的效果不理想，随之放弃进行更低水胶比的尝试。因此，选取 0.16 作为本次实验的最佳水胶比。

2.2 粉煤灰掺量的影响

粉煤灰在水泥混凝土中的作用<sup>[8]</sup>归纳为三大效应，即形态效应、活性效应(又称火山灰效应)和微集料效应。粉煤灰为极细的玻璃态颗粒，流动性能非常好，在混凝土中既能改善拌和效果也在一定程度上起到了动态减水效果。粉煤灰对样品的强度影响如图 2。

图 2 表明，强度随 FA/C 增大先增大再减小，存在一个最佳的比值：FA/C=0.25 时抗折强度最高，为 21.56 MPa；FA/C=0.3 时抗压强度最大，为 98.21 MPa。综合考虑，粉煤灰的最佳掺量应为 FA/C=0.25~0.3。粉煤灰掺量对强度的影响不是单调关系的原因可能如下：一方面，粉煤灰的形

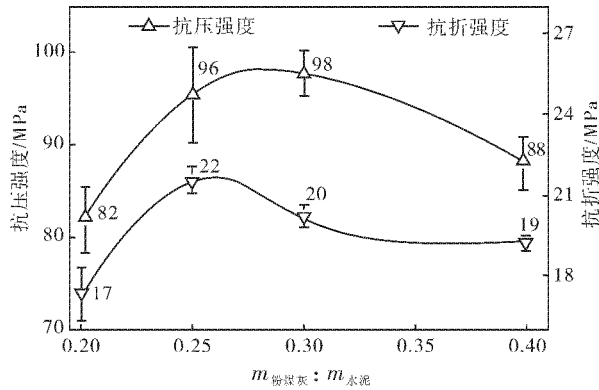


图2 粉煤灰掺量对强度的影响

Fig. 2 Effects of fly ash on strength

态减水效应使得粉煤灰掺量增大流动度增大,成型容易,成型缺陷减少;另一方面,粉煤灰中除了球形的玻璃微珠之外,还有多孔状玻璃体.这些玻璃体会吸收水分,导致流动度降低.二者相互制约,从而在某一比值形成了最大.

### 2.3 硅灰掺量的影响

硅灰由于颗粒细小,会填充在水泥颗粒之间的空隙中,改善浆体的流变性<sup>[9-10]</sup>.另外,硅灰的掺入会增加固体与液体的接触面积,进而增加内聚力.由于内聚力的增加,混合料会变得更稳定,各组分的离析倾向减小.硅灰掺量对样品强度的影响如图3所示.

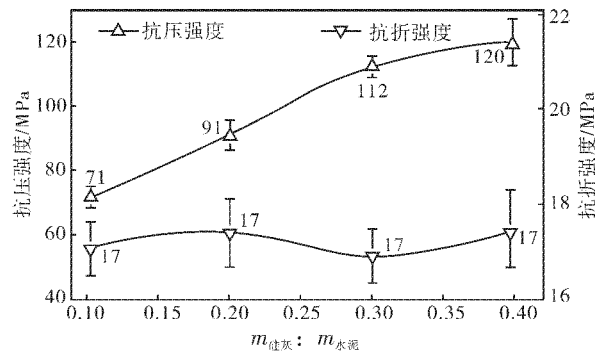


图3 硅灰掺量对强度的影响

Fig. 3 Effects of silicon ash on strength

从图3中可以很明显的看到硅灰掺量(SF/C)在0.1~0.4时抗压强度一直呈增长趋势,且增长明显,只是在0.3~0.4时开始放缓.通过硅灰的掺入就可发现密实程度对于样品的强度影响很大.抗折强度在呈下降趋势,可能是由于硅灰颗粒填充于孔隙之间使材料密实度大大提高,在受到力的剪切作用时微孔对于力的缓冲作用减弱导致抗折强度随着硅灰的掺入而缓慢降低,但是降低幅度不是很大.综合两方面考虑,硅灰掺量为水泥掺量20%~30%之间是最佳掺量.

### 2.4 白云石砂的影响

粉末混凝土中的砂子作为混凝土的骨料,是

各组分中粒径最大的.其掺量对样品强度的影响如图4所示.

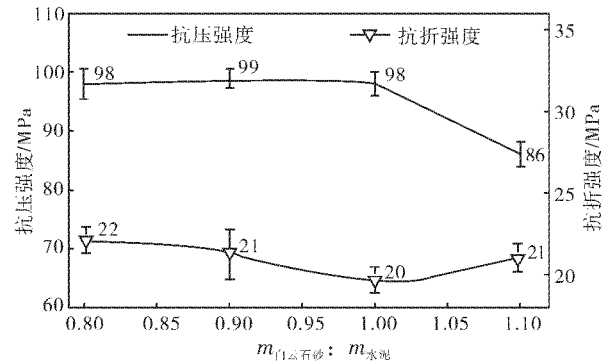


图4 白云石砂掺量对强度的影响

Fig. 4 Effects of dolomite sand on strength

图4中白云石砂掺量(DS/C)为1.0时抗压强度达到最大是99.53 MPa.砂灰比在1.0之前抗压强度呈增长趋势,但是增长不是太明显,1.0以后开始下降.在掺量为0.8的时候抗折强度最大为22.16 MPa,之后一直降低到掺量为1.0时又有上升趋势.在砂灰比为0.8至1.1之间时抗折强度有少量变化,但不是很明显.可见白云石砂掺量在这一范围内不是影响混凝土强度的主要因素.但是白云石砂的掺入并没有改变水胶比,因此在低水胶比状态下白云石砂掺量受限于材料的拌和状态.白云石砂的增多会使拌和物越来越干燥并且各种材料的粘黏性降低,对于一些特殊的构件在成型过程中有一些影响.因此,白云石砂的掺量要根据制备材料的用途合理调整.但综合考虑,砂灰比(DS/C)在0.9~1.0时为最佳掺量.

### 2.5 钢纤维掺量的影响

活性粉末混凝土材料的力学性能极其优越,可与钢材媲美,但制约其大面积运用的一大劣势就是脆性较大.为了克服脆性大这一弱势,实验中采用纤维增韧的方法.其掺量对样品强度的影响如图5所示.

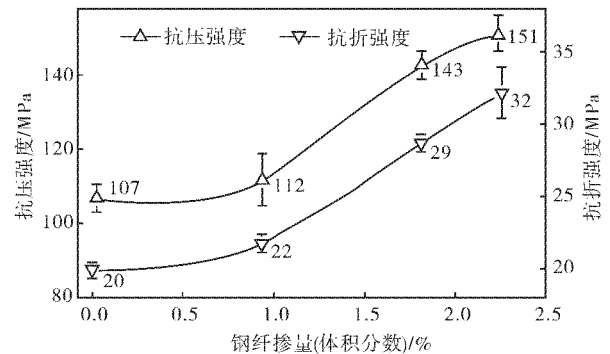


图5 钢纤维掺量对强度的影响

Fig. 5 Effects of steel fiber on strength

从图5可以看到,钢纤维对试块的抗折、抗压

都有所提高. 在钢纤维掺量较小时效果不明显, 如试验中钢纤维残量为 0.93% 的时候抗压强度只比未掺时提高了 6%, 而抗折强度提高了 10%. 但当钢纤维掺量达到 1.81% 的时候可以看到相比于 0.93% 的时候抗压和抗折强度都有较大幅度的提高, 抗压提高了 27%, 抗折提高了 35%. 当掺量从 1.81% 增加到 2.26% 的时候, 抗压强度的增长幅度有所放缓只增加了 5%, 此时抗折强度增长仍然很高达到了 12%, 但不及之前的 35%, 说明在钢纤维掺量为 2.26% 的时候对强度的贡献已经开始放缓. 虽然本次实验掺量未达到 3% 或者更高, 但是可以想像, 考虑到经济效益此后再增加钢纤维的掺量已经对强度影响不大. 所以钢纤维的最佳贡献应该在体积掺量为 2% 左右的时候.

### 2.6 最佳配合比设计

综合上述结果得出的最佳实验配比为表 3 所示, 此时所制备的活性粉末混凝土抗压强度超过 150 MPa, 抗折强度达到 30 MPa.

### 2.7 样品的成分和结构分析

对最佳配合比下制得的样品进行 X 射线衍射

以及扫描电镜分析, 其结果如图 6.

表 3 最佳配合比设计

Table 3 The optimum mixture ratio

水胶比	水泥	硅灰	粉煤灰	白云石砂	白云石粉	钢纤	减水
W/B	C	SF/C	FA/C	DS/C	DF/C	维/%	剂/%
0.16	1	0.3	0.3	0.9	0.2	2	2

通过 X 衍射图 6 分析就可看到以白云石砂为骨料的混凝土是一个部分未水化混凝土材料. 在衍射图谱图 6 中, 可以很明显看到骨料白云石砂, 以及水泥的主要成分  $C_3S$ ,  $C_2S$  的衍射峰可以很明显的观察到, 并伴有水化产物. 可以推断, 随着时间延长水泥水化进一步加深, 制备样品的性能也会随着时间推移而进一步改善. 由于制备样品的组分很细, 水化产物将组分包裹形成的过渡界面可以很清晰的在 SEM 照片图 7 中看到. 通过照片可以发现, 样品内部结构相当致密, 颗粒之间被很好的粘接, 只有很少的尺寸很小的微裂纹, 硅灰很好的散布在材料中. 这些性质都决定着制备的样品能获得良好的机械性能.

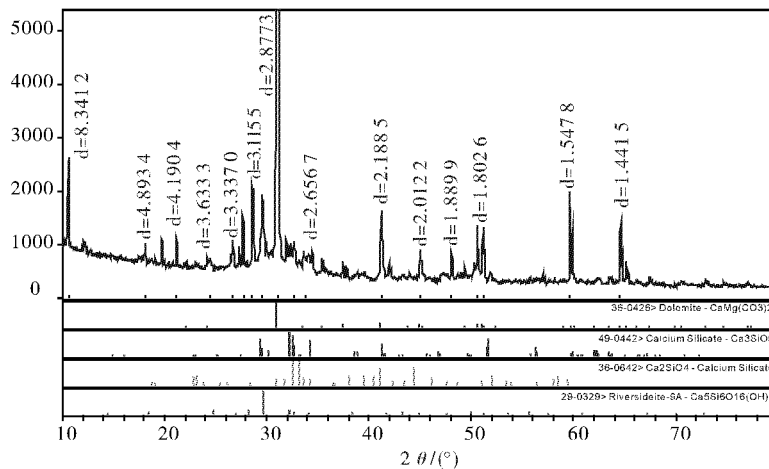


图 6 样品的 X 衍射(XRD)图

Fig. 6 XRD pattern of the sample

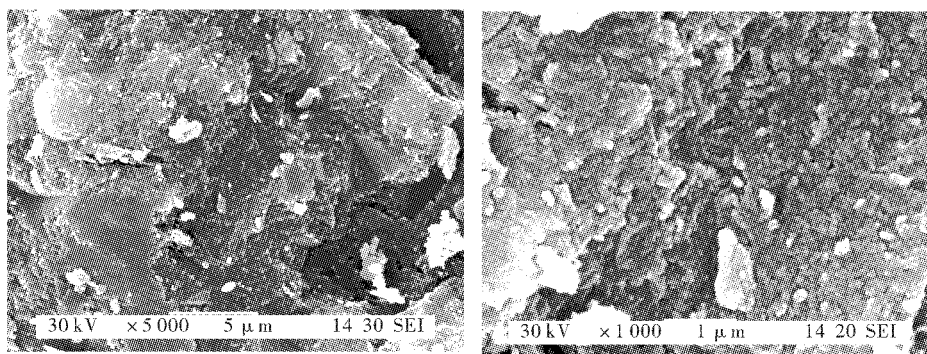


图 7 样品的扫描电镜(SEM)照片

Fig. 7 SEM patterns of the product

### 3 结 语

本文利用制备活性粉末混凝土的原理,用白云石砂、白云石粉取代石英砂、石英粉,对制备高强混凝土的最佳配比进行了研究.分别研究了水胶比以及粉煤灰、硅灰、白云石砂、钢纤维的掺量对样品强度的影响.在最佳配比下成功制备出了抗压抗折强度较高的高性能混凝土.由于这种高强混凝土具有极其优越的性能,可应用的领域也非常广泛,随着我国高层建筑和大跨结构迅速增加,也为这种高强混凝土的应用提供了广阔的市场以及应用前景.

### 致谢

本研究工作得到了国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金资助,在此表示感谢!

### 参考文献:

- [1] 覃维祖,曹峰.一种超高性能混凝土—活性粉末混凝土[J].工业建筑,1999,29(4):132-137.
- [2] Cheyrezy Marcel, Maret Vincent, Frouin Laurent. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete) [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1491-1500.
- [3] Richard Pierre, Cheyrezy Marcel. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [4] Zanni Helene, Cheyrezy Marcel, Maret Vincent, et al. Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using  $^{29}\text{Si}$  NMR [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(1): 93-100.
- [5] 沈旦申.粉煤灰混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1989.
- [6] 何峰,黄政宇.养护制度对活性粉末混凝土(RPC)的强度影响研究[J].混凝土,2000,25(2):31-34.
- [7] 中国建筑材料科学研究院. GB/T 2419—2005 水泥胶砂流动度测定方法[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [8] Richard Pierre, Cheyrezy Marcel. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [9] 姜德民.硅灰对高性能混凝土强度的作用机理研究[J].建筑技术开发,2001,28(4):44-46.
- [10] 闰光杰,刘培文,余清河.200MPa级活性粉末混凝土抗压强度试验研究[J].建筑结构学报,2007,增刊: 93-95.

## Preparation of high strength concrete with dolomite sand as aggregate

CAO Hong, LUO Li, SUN Fei-long, LIANG Shi, AN Zi-bo, XUE Jun

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To decrease the preparation cost of reactive powder concrete and obtain high strength products, high-cost quartz sand and quartz powder were replaced by low-cost dolomite sand (DS) and dolomite powder (DP) to prepare high strength concrete based on the preparation principle of reactive powder concrete. Three tapes cementing material system consisting of cement (C), silica fume (SF) and fly ash (FA) were used and the water-binder ratio (W/B) and contents of SF, FA, DS and steel fiber were respectively changed using unit variable method to study the impaction of different mixture ratio on the strength of samples under the relative proportion of C, DP and water reducing agent in a given conditions. The results show that the change of W/B and different contents of SF, FA, DS have strong influence on compressive strength and weak influence on bending strength. But the content of steel fiber has strong influence on both. The optimum mixture ratio is W/B of 0.16 and the mass ratio of SF : FA : DS : DP : C = 0.3 : 0.3 : 0.9 : 0.2 : 1. And the volume content of steel fiber is 2% and the mass ratio of water reducing agent to cementing material is 2%. The demoulded concrete samples are firstly cured for two days in concrete standard curing and then placed in 90 °C hot water for three days. The compressive strength of samples is more than 150 MPa and bending strength is up to 30 MPa.

**Key words:** concrete; mixture ratio; strength

本文编辑: 龚晓宁