

粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究*

Study on the Optimum Mix Ratio of Fly Ash based Ultra-high Performance Concrete

刘超群¹, 朱泽文^{2,3}, 代力^{2,3}, 陈磊伟⁴, 吴福全¹, 李亮华⁴

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司项目建设管理公司, 江西 南昌 330013; 2. 江西省交通
科学研究院有限公司, 江西 南昌 330013; 3. 长大桥梁建设技术及装备交通运输行业研发中心,
江西 南昌 330013; 4. 华东交通大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 粉煤灰部分取代水泥制备 UHPC, 研究粉煤灰基矿物外加剂 FA-ad、减水剂种类及掺量、灰砂比、
胶凝材料配比、水胶比和钢纤维掺量对 UHPC 流动性和力学性能的影响, 并结合上述因素对 UHPC 的配合比进
行优化。结果表明: 粉煤灰基矿物外加剂 FA-ad 对 UHPC 流动性影响最大; SD~600P~02 减水剂效果最好;
灰砂比为 1:1 时较合适, 矿物掺合料最优掺量为 25%, 最优水胶比为 0.18, 钢纤维最优掺量为 2%。

关键词: 超高性能混凝土; 粉煤灰; 流动性; 力学性能; 配合比

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0011-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.003

LIU Chaoqun¹, ZHU Zewen^{2,3}, DAI Li^{2,3}, CHEN Leiwen⁴, WU Fuquan¹, LI Lianghua⁴

(1. Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Transportation Institute Co., Ltd., Nanchang 330013, China; 3. R&D Center for

Transportation Industry on Growing Bridge Construction Technology and Equipment,

Nanchang 330013, China; 4. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The fly ash partially replaces cement to prepare UHPC. The effects of fly ash-based mineral admixture FA-ad, the
type and content of superplasticizer, sand, the ratio of fly ash to sand, the ratio of cementitious materials, the water-binder
ratio and the content of steel fiber on the fluidity and mechanical properties of UHPC are studied, and the mix proportion of
UHPC is optimized by combining the above factors. The results show that FA-ad, a mineral admixture based on fly ash, has
the greatest influence on the fluidity of UHPC. SD~600P~02 water reducing agent has the best effect; The sand-cement ratio
of 1:1 is more suitable, the optimum content of mineral admixture is 25%, the optimum water-binder ratio is 0.18, the
optimum dosage of steel fiber is 2%.

Keywords: ultra-high performance concrete; fly ash; fluidity; mechanical properties; mix rat

* 基金项目: 江西省自然科学基金资助项目
(20202BABL214043); 江西省交通运输厅重大工程科技项目
(2021C0008); 江西省交通运输厅科技项目 (2022H0014)。

作者简介: 刘超群 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主
要从事桥梁技术与管理研究。

通信作者: 陈磊伟 (1995—), 男, 硕士, 主要从事固废利
用及材料研究工作。

收稿日期: 2023-04-26

0 引言

近年来, 随着工程建设的发展, 高层建筑、大
跨桥梁等超级工程层出不穷, 超高性能混凝土 (UH-
PC) 已经成为了当前的研究热点。与普通混凝土相
比, UHPC 有众多优点, 抗压强度高、韧性和耐久性
能好, 以及自重轻等^[1-5]。除此之外, UHPC 具有非
常好的微裂缝自愈能力, 因水胶比低, 内部含有未

材料科学

水化的水泥颗粒,在与外界水或水汽接触时会继续水化,填堵裂缝^[6-7]。尽管 UHPC 有许多优点,但是也存在一些缺点,比如:UHPC 的水泥用量高达 800~1000 kg/m³,水化热大,生产工艺更加复杂,容易产生收缩裂缝,且成本高^[8]。由于水胶比很低,超细颗粒用量高,超塑性剂掺量大,UHPC 表现出黏性很大和坍落度损失的缺点,不利于 UHPC 在实际工程中的浇筑。由于 UHPC 中含有大量未水化的水泥颗粒,这些未水化的水泥颗粒在混凝土结构使用过程中可能会继续水化,从而影响混凝土结构的尺寸稳定性^[9]。

目前,国内外对 UHPC 已有一些研究成果。何峰等^[10]研究了钢纤维及水胶比对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响,发现在高温养护条件下,掺有钢纤维的 RPC 抗压强度高达 298 MPa,在一定范围内 RPC 的抗压强度与水胶比成反比;闫光杰等^[11]研究了不同骨料级配、钢纤维掺量对 RPC 强度的影响,发现良好的级配有改善界面过渡区的密实性,提高混凝土强度,适量的钢纤维能够提高混凝土的韧性和延性,有效避免混凝土的脆性破坏;Yigiter H 与 Yazici H 等^[12-13]采用粉煤灰取代 60% 水泥,并在成型过程中施压,得到了强度达到 338 MPa 的 RPC。研究还发现采用粉煤灰和矿粉来取代部分水泥和硅灰,可减少减水剂的用量,对 RPC 的收缩起到抑制作用;Shaheen Ehab 等^[14]对掺钢纤维与不掺钢纤维

的两种配比 UHPC 进行了耐久性测试,研究其冻融循环 300 次的裂缝开展情况,结果表明经过 300 次冻融循环的 UHPC 试件并没有出现破坏以及表面混凝土剥落现象,说明 UHPC 的耐久性能较好。

虽然 UHPC 的研制与应用在国内已取得一定成果,但总体来说,国内对 UHPC 的研究相对比较分散,缺乏系统性和针对性。例如,UHPC 的制备工艺(原材料的选择与优化、搅拌、成型、养护等)缺少可靠的标准,从而导致了 UHPC 性能具有一定差异。因此,通过试验研究粉煤灰基矿物外加剂 FA-ad、减水剂种类及掺量、灰砂比、胶凝材料配比、水胶比和钢纤维掺量等方面对 UHPC 流动性能和力学性能的影响,并结合上述因素对 UHPC 的配合比进行优化,制备出满足流动性和力学性能的 UHPC。

1 试验

1.1 原材料

采用山水东岳 P·O 42.5 水泥,水泥密度为 3.10 g/cm³,比表面积为 380 m²/kg;粉煤灰密度为 2.2 g/cm³,需水量比为 95%;钢纤维为光圆钢纤维,长度为 20 mm;减水剂主要有三瑞生产的 SD~600P~02 型、苏州 PC1021、PC1031 和 PC1051 以及西卡高效减水剂,所有减水剂均为粉体聚羧酸系列;FA-as 矿物外加剂。水泥、粉煤灰、FA-ad 化学组成见表 1。

表 1 水泥、粉煤灰和 FA-ad 的化学组成
Table 1 Chemical composition of cement, fly ash and FA-ad

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₂	K ₂ O	其他
水泥	22.7	6.4	55.6	4.4	2.8	2.8	2.8	0.4	—	—	2.1
粉煤灰	43.3	37.8	3.8	4.3	1.5	7.8	1.5	—	—	—	—
FA-ad	—	26.5	4.8	5.3	1.3	0.7	1.3	1.4	56.5	2.2	—

1.2 试验方法

采用一次浇筑、辅以振动的方式进行成型,试件成型以 40 mm × 40 mm × 160 mm 的三联模为主,抗压强度采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方试件。按照规范 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行蒸汽养护。拌合物的扩展度依照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GBT 50080—2016 进行测试,力学性能按照 T/CECS 10107—2020《超高性能混凝土技术要求》进行测试。

2 结果与分析

2.1 FA-ad 对 UHPC 性能的影响

采用 FA-ad 等量取代 10% 的水泥进行试验,测试 30 min 和 60 min 时的流动度,试验材料用量和流动度测试结果分别见表 2 和表 3。

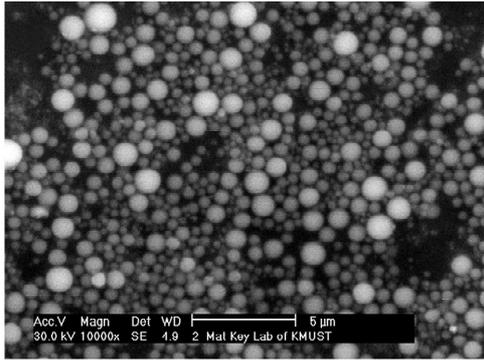
表 2 材料配合比
Table 2 Material mix proportion

编号	水泥	FA-ad	减水剂	膨胀剂	水
SP1	6000	0	18	1.8	1 680
SP2	5400	600	18	1.8	1 680

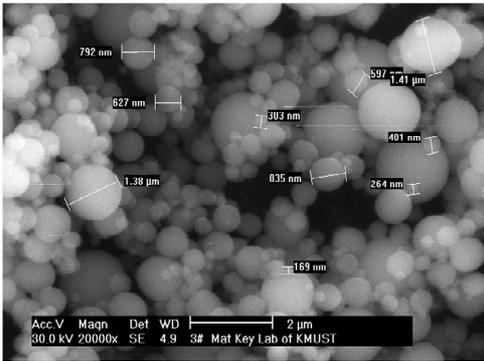
表 3 压浆料浆液工作性测试结果
Table 3 Workability test result of pressed stock

编号	流动度/s			状态描述
	初始	30 min	60 min	
SP1	31	44	52	有沉淀、有泌水
SP2	15	13	13	—

掺入 FA-ad 能够提高 UHPC 流动性, 相较纯水泥的 SP1 组, 掺入了 FA-ad 的 SP2 组的初始时间由 31 s 降到 15 s, 下降了 51.61%。图 1 为 FA-ad 的电镜扫描图, 从图中可以看出 FA-ad 是一种无孔隙的球状颗粒物质, 粒径极细, 一般在 0.1~5 μm 之间, 大小不一的微粒起到了填充孔隙的作用, 使得混凝土在微观层面上得到了较好的优化, 且球状微粒对混凝土具有“滚珠润滑”效应, 物理减水效果显著。



(a) 放大 10000 倍



(b) 放大 20000 倍

图 1 FA-ad 电镜扫描图

Fig. 1 SEM of FA-ad electron microscope

2.2 减水剂的确定

为研究不同种类减水剂对 UHPC 流动性的影响, 采用不同种类的减水剂制备 UHPC 试件, UHPC 基准配合比见表 4。减水剂的用量统一为 2%, 分别测试不同种类减水剂下拌合物的扩展度, 确定出最优减水剂; 然后对最优减水剂的用量进行调整,

分别测试减水剂掺量为 1%、2% 和 3% 时拌合物的扩展度, 获得减水剂的最佳掺量。试验结果见表 5。除西卡减水剂外, 其他几种减水剂在掺量为 2% 时均可使 UHPC 拌合物的流动度达 200 mm 以上, 作用效果的优劣顺序为 SD~600P~02 > PC1030 > PC1021 > PC1051 > 西卡减水剂。其中 SD~600P~02 减水剂在用量为 1% 时便可使 UHPC 拌合物的流动度达到 230 mm。

表 4 UHPC 基准配合比

Table 4 UHPC base mix ratio / (kg/m^3)						
水泥	粉煤灰	硅灰	FA-ad	钢纤维	砂	水
750	100	50	100	156	1000	180

表 5 不同外加剂使用情况

Table 5 Use of different admixtures			
编号	减水剂名称	减水剂用量/%	拌合物扩展度/mm
WR1	西卡	2	155
WR2	PC1030	2	230
WR3	PC1021	2	220
WR4	PC1051	2	205
WR5		2	250
WR6	SD~600P~02	3	260
WR7		1	230

2.3 胶凝材料组成与用量的确定

胶凝材料体系是指混凝土中胶凝材料的组成与用量, 在胶凝材料总量一定的情况下, 研究不同组分最佳用量。在钢纤维、砂、水和减水剂不变的情况下设计了 9 种胶凝材料搭配组合, 试验配合比见表 6。由表 6 和图 2 可知, 随着粉煤灰取代水泥用量的增加, UHPC 流动性逐渐增大, UHPC 抗压强度先增大后降低; 在粉煤灰不变情况下, 硅灰用量越大则 UHPC 流动性和抗压强度越大; 适当增加粉煤灰与硅灰掺量可改善 UHPC 流动性, 且粉煤灰的效果更优; 胶凝材料总量不变的情况下, 矿物掺合料取代水泥总量的 25% 时, 可配制出流动性和力学性能俱佳的 UHPC。

表 6 胶凝材料组成配合比 / (kg/m^3)

Table 6 The cementitious material constitutes the mix ratio							
编号	水泥	粉煤灰	硅灰	钢纤维	砂	水	减水剂
U1	820	100	80	156	1000	180	15
U2	770	150	80	156	1000	180	15
U3	720	200	80	156	1000	180	15
U4	800	100	100	156	1000	180	15
U5	750	150	100	156	1000	180	15
U6	700	200	100	156	1000	180	15
U7	780	100	120	156	1000	180	15
U8	730	150	120	156	1000	180	15
U9	680	200	120	156	1000	180	15

材料科学

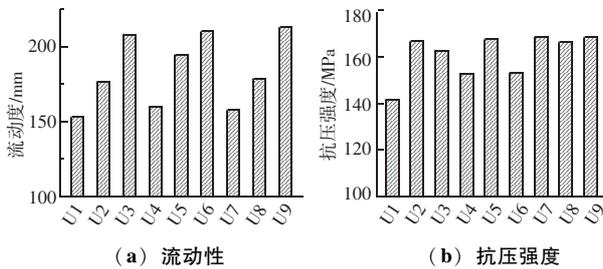


图2 胶凝材料的组成对 UHPC 性能的影响

Fig. 2 Effect of cementitious material composition on properties of UHPC

2.4 水胶比的确定

水胶比是影响混凝土力学性能和耐久性能最为显著的技术参数。为系统研究水胶比对 UHPC 性能的影响,采用 SD~600P~02 减水剂,混凝土配合比见表 7。水胶比对 UHPC 流动性和 28 d 抗压强度的影响结果如图 3 所示。

表 7 同一减水剂不同水胶比的 UHPC 配合比

Table 7 UHPC mix ratio with different water binder ratio

编号	水胶比	原材料质量/(kg/m ³)							
		水泥	粉煤灰	硅灰	FA-ad	钢纤维	砂	减水剂	水
UW1	0.15	750	100	50	100	156	1000	20	150
UW2	0.16	750	100	50	100	156	1000	20	160
UW3	0.17	750	100	50	100	156	1000	20	170
UW4	0.18	750	100	50	100	156	1000	20	180
UW5	0.19	750	100	50	100	156	1000	20	190
UW6	0.20	750	100	50	100	156	1000	20	200

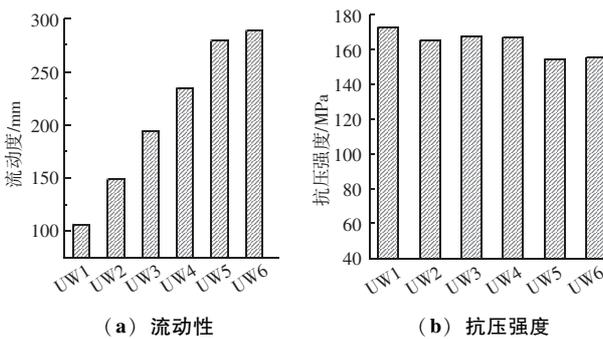


图3 水胶比对 UHPC 性能的影响

Fig. 3 Effect of water-binder ratio on properties of UHPC

水胶比对 UHPC 流动性有较大的影响。随着水胶比的增大, UHPC 流动性增大,但抗压强度降低。在当前胶凝材料体系下,水胶比大于 0.17 时能够具有良好的流动性;当水胶比为 0.18 时,拌合物具有较好的流动性且抗压强度下降较小。因此,后续的研究中水胶比采用 0.18。

2.5 灰砂比的确定

灰砂比不仅能影响混凝土的流动性,还会影响

混凝土结构物的耐久性和力学性能。采用 3 个胶凝材料体系的配合比对灰砂比为 1:1、1:1.2 和 1:1.5 进行试验研究,配合比见表 8,灰砂比对 UHPC 流动性和 28 d 抗压强度的影响如图 4 所示。在用水量不变的情况下(HS1、HS2 和 HS3),UHPC 抗压强度随着灰砂比的降低而降低;在水胶比不变的情况下(HS4、HS5 和 HS6),随着灰砂比的降低,UHPC 抗压强度降低;HS2 (W/B = 0.2) 和 HS4 (W/B = 0.18) 再次证明了水胶比越低,UHPC 的力学性能越好;由 HS5 和 HS6 相比较可知,硅灰掺量的增加有助于提高 UHPC 的力学性能。综合考虑抗压强度和流动性,UHPC 采用灰砂比为 1:1 较合适。

表 8 不同灰砂比的 UHPC 配合比 / (kg/m³)

Table 8 UHPC mix ratio with different lime sand ratio

编号	水泥	粉煤灰	硅灰	FA-ad	钢纤维	砂	水
HS1	700	100	100	100	156	1000	180
HS2	630	90	90	90	156	1100	180
HS3	560	80	80	80	156	1200	180
HS4	630	90	90	90	156	1100	162
HS5	560	80	80	80	156	1200	144
HS6	560	40	80	120	156	1200	144

注:均采用 1% 胶凝材料用量的 SD~600P~02 减水剂。

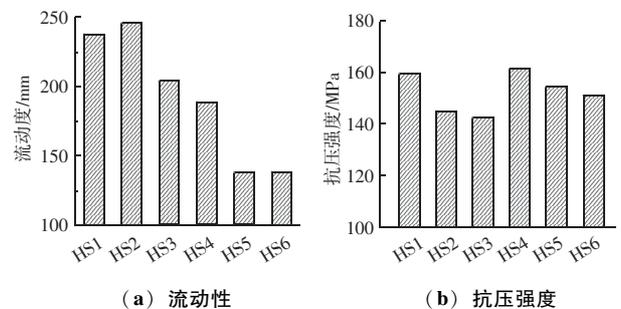


图4 灰砂比对 UHPC 性能的影响

Fig. 4 Effect of lime sand ratio on properties of UHPC

2.6 钢纤维用量的确定

在 UHPC 中掺入钢纤维的主要作用是提高其力学性质,通过试验研究寻求钢纤维最佳用量。对 7 种不同体积分数的钢纤维掺量进行了比较,配合比见表 9,图 5 为钢纤维掺量对 UHPC 流动性和 28 d 抗压强度影响的试验结果。UHPC 流动度随钢纤维掺量的增加而降低;钢纤维掺量对 UHPC 的力学性能有较大的影响,UHPC 抗压强度均随钢纤维掺量的增大而显著提高。因此,可通过提高钢纤维掺量,改善 UHPC 的力学性能。需要注意的是,在提高钢纤维的掺量,UHPC 的成本也会随之增高,考虑到要兼具流

动性和力学性能，推荐钢纤维掺量为钢纤维占 UHPC 体积的 2%。

表 9 不同钢纤维掺量的 UHPC 配合比设计
Table 9 Mix design of the influence of steel fiber dosage on the properties of UHPC

编号	钢纤维/%	原材料质量/(kg/m ³)					
		水泥	粉煤灰	硅灰	FA-ad	砂	水
SF1	0	720	120	80	80	1000	180
SF2	0.5	720	120	80	80	1000	180
SF3	1.0	720	120	80	80	1000	180
SF4	1.5	720	120	80	80	1000	180
SF5	2.0	720	120	80	80	1000	180
SF6	2.5	720	120	80	80	1000	180
SF7	3.0	720	120	80	80	1000	180

注：钢纤维掺量为钢纤维占 UHPC 的体积百分数。

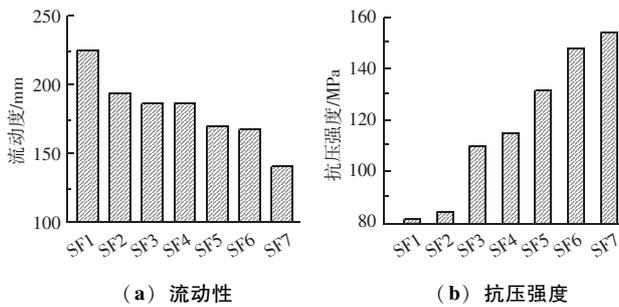


图 5 钢纤维掺量对 UHPC 性能的影响

Fig. 5 Effect of steel fiber dosage on properties of UHPC

3 结论

通过研究粉煤灰基矿物外加剂 FA-ad、减水剂种类及掺量、灰砂比、胶凝材料配比、水胶比和钢纤维掺量等方面对 UHPC 流动性能和力学性能的影响，得出粉煤灰基 UHPC 最佳配合比，结果如下：

(1) FA-ad 的掺入能够提高 UHPC 的流动性，FA-ad 掺加 10%，水泥流动度初始时间由 31 s 降低到 15 s，下降了 51.61%。

(2) 减水剂的品质对 UHPC 拌合物的流动性有较大的影响，SD~600P~02 减水剂效果最好，1%~2% 的掺量可使 UHPC 获得较好的工作性。

(3) 矿物掺合料替代水泥的最优掺量为 25%，此掺量下的 UHPC 流动性和力学性能俱佳。

(4) 灰砂比对 UHPC 的抗折强度和抗压强度具有不同的影响，综合考虑抗压强度和流动性，宜采用 1:1 的灰砂比。

(5) 水胶比对 UHPC 具有较大的影响，水胶比越大 UHPC 拌合物的流动性越好，但其抗压强度随水胶比的增大而降低，最优水胶比为 0.18。

(6) 提高钢纤维用量可有效提高 UHPC 的强度，但会降低 UHPC 的流动性能，增加生产成本，推荐掺量为 2%。

参 考 文 献

- [1] 吴林妹. 超高性能混凝土早期收缩性能与长期稳定性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [2] 郑乔木, 何倍, 李晨, 等. 超高性能混凝土裂缝自愈合研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2021 (11): 2450-2461.
- [3] 刘扬, 曾丹, 曹磊, 等. 钢-UHPC 组合结构桥梁研究进展 [J]. 材料导报, 2021 (3): 3104-3113.
- [4] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能 [J]. 复合材料学报, 2019 (8): 1949-1956.
- [5] 张立卿, 潘延念, 胡文兵, 等. 废弃瓷砖粉对超高性能混凝土的抗压强度影响规律与机制 [J]. 复合材料学报, 2022, 40 (3): 1-13.
- [6] 葛晓丽, 刘加平, 王育江, 等. 未水化水泥颗粒后期水化对 UHPC 性能的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2016 (1): 40-45.
- [7] GARCÍA CALVO J L, PÉREZ G, CARBALLOSA P, et al. Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions [J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 306-315.
- [8] 杨玉柱, 黄维蓉, 耿嘉庆, 等. 基于半经验的 UHPC 配合比设计方法 [J]. 材料导报, 2021, 35 (增刊 2): 188-193.
- [9] 王倩楠, 顾春平, 孙伟. 水泥-粉煤灰-硅灰基超高性能混凝土水化过程微观结构的演变规律 [J]. 材料导报, 2017, 31 (23): 85-89.
- [10] 何峰, 黄政宇. 200~300 MPa 活性粉末混凝土 (RPC) 的配制技术研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2000 (4): 3-7.
- [11] 闫光杰, 阎贵平, 安明喆, 等. 200 MPa 级活性粉末混凝土试验研究 [J]. 铁道学报, 2004 (2): 116-119.
- [12] YIGTER H, SERDAR A, YAZICI H, et al. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC) [J]. Composites Part B, 2012, 43 (8): 2907-2914.
- [13] YAZICI H, YIGTER H, KARABULUT ANIL-Ş, et al. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete [J]. Fuel, 2008, 87 (12): 2401-2407.
- [14] SHAHEEN E, NIGEL S. Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete [J]. Materials Journal, 2006, 103 (6): 444-451.