

活性粉末混凝土配合比研究综述

陶 毅¹, 张海镇¹, 史庆轩¹, 陈建飞²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 英国贝尔法斯特女王大学规划、建筑及土木工程学院, 英国 贝尔法斯特, BT9 5AG)

摘要: 活性粉末混凝土作为一种超高性能混凝土材料, 其配合比直接关系到其性能的优劣, 亦是研究其性能的基础。本文首先回顾了 RPC 配合比设计理论基础, 并对典型的 RPC 配合比设计方法进行了归纳和总结, 分析了各方法的适用范围和特点, 深入讨论了 RPC 配合比设计参数的适宜取值范围。目前活性粉末混凝土配合比设计主要基于试验方法、半经验半理论公式方法、编程计算方法。但是试验方法和编程计算方法无法直接进行强度预测, 配合比设计具有较大不确定性。通过对典型半经验半理论公式方法进行评价分析发现法国路桥公式的准确度较高, 可作为简易的强度预测公式使用, 但该方法未考虑钢纤维掺量及养护制度对强度的影响。

关键词: 活性粉末混凝土; 高性能混凝土; 配合比设计; 强度预测

中图分类号: TU528.57

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0839-07

State of art of mix design theory of reactive powder concrete

TAO Yi¹, ZHANG Haizhen¹, SHI Qingxuan¹, CHEN Jianfen²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Planning, Architecture and Civil Engineering Queen's Univ. Belfast, Belfast BT9 5AG, U.K.)

Abstract: The mix proportion of the reactive powder concrete (RPC) dominates its mechanical properties. It is essentially to understand the mix design theory in order to study RPC structures deeply and widen its application. This paper firstly reviewed the mix design theory of the cement-based composites and analysed the critical parameters which had been identified affect the performance of RPC. At present, the mix proportion design of RPC is mainly based on the test method, the semi empirical and semi theoretical formula method and the programming calculation method. But the test method and programming calculation method can not directly predict the strength. Based on the analysis of typical semi empirical and semi theoretical formula, the accuracy of LCPC formula is more accurate, which can be used as a simple strength prediction formula. But the method has not considered the influence of steel fiber content and curing system on the strength.

Key words: reactive powder concrete; high performance concrete; mix design; strength prediction

法国 Bouygues 公司 Richard 等人于 1993 年率先研制出一种高强、高韧性、高耐久性和体积稳定性良好的水泥基复合材料, 即活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)^[1]。随着活性粉末混凝土制备技术的发展, 目前常用的制备活性粉末混凝土的原材料包括: 水泥、硅灰、磨细石英粉、矿物细掺料、石英砂以及高效减水剂等, 根据其组成、养护方法和成型条件的不同, 活性粉末混凝土可以达到 200~800 MPa 的超高抗压强度和 1 200~40 000 N/m 的断裂能^[2]。而且 RPC 相比普通混凝土, 其内部缺陷较少, 使其具有紧密的微观结构, 从而可获得优异的耐久性能^[3-4]。活性粉末混凝土作为一种新型的超高性能建筑材料, 其研究与应用正在成为学术界与工业界关注的焦点^[5-6]。

混凝土配合比设计是混凝土材料科学中最基本且最重要的一个问题, 直接关系到混凝土性

能的优劣。普通混凝土配合比设计方法主要是基于绝对体积法和假定密度法的半理论半经验设计方法。RPC 作为一种特殊的超高强混凝土, 拥有不同于普通混凝土的制备原料与养护制度, 因此其配合比设计与普通混凝土配合比设计方法存在较大差别。国内外学者在活性粉末混凝土的配合比设计理论与试验方面进行了大量的探索, 已经较为详尽地探究了水胶比、硅粉掺量、砂胶比、石英粉掺量、减水剂、钢纤维掺量以及养护制度对活性粉末混凝土性能的影响。但对于 RPC 的配合比设计理论, 至今还未形成较为系统和被广泛接受的方法。正因为如此, 目前关于 RPC 的配合比大都基于试验进行设计。

本文对国内外 RPC 配合比设计理论的研究进展进行了总结, 并归纳了 RPC 配合比设计的关键指标与其取值范围; 通过与试验数据的对比, 分析了现有典型 RPC 配合比设计公式的准确性

与适用范围.

1 RPC 配合比设计理论基础

RPC 是一种性能优异水泥基复合材料^[1-2]. 水泥基复合材料是指以水泥为基体与其它材料组合而得到的具有较优性能的材料. 国内外学者基于不同假设已经提出了较多的水泥基复合材料配合比设计理论基础.

吴中伟等^[7]提出水泥基复合材料的中心质假说, 认为混凝土体系中包含各级中心质以及各中心质的过渡层. 骨料是大中心质, 水泥熟料颗粒及粉体掺合料(H 粒子)为次中心质, 水泥凝胶(L 粒子)为次介质, 毛细孔为负中心质. 在很低的孔隙率和很高的 H/L 粒子比值时的配合比可以得到很高的性能.

T.C.Powers^[8]提出胶空比理论来描述水泥基复合材料孔结构与强度的关系. 其认为水灰比决定了混凝土中浆体的毛细孔率, 而水泥石的强度取决于水化产物充满原始充水空间的程度.

F.Larrard 等^[9]认为水泥基复合材料的性能与原材料混合物颗粒体系的堆积密度有关, 其获得高性能的关键在于颗粒体系是否能形成较高的堆积密度, 即形成最紧密堆积的颗粒体系.

唐明等^[10]提出了具有分形几何特征的水泥基粉体颗粒群密集效应模型, 根据该模型可以评价高性能混凝土粉体颗粒体系密集效应, 确定最紧密堆积规律.

通过总结以上针对水泥基复合材料配合比设计的理论基础可以得出: (1) 当水泥基复合材料中含有的微裂缝和孔隙等缺陷最少时, 可以获得原材料所决定的最大强度; (2) 水泥基复合材料中原材料相互间的紧密堆积可以有效地改善其微观结构, 提高其性能. 因此, 为获得性能优异的活性粉末混凝土, 需采取的主要技术措施包括:

- (1) 剔除粗骨料, 使用粒径较小的石英砂, 从而改善混凝土体系的匀质性, 降低原始缺陷;
- (2) 掺入硅灰、石英粉等高活性材料, 改善胶凝材料体系级配, 提高密实度, 并且促进胶凝材料的水化反应;
- (3) 优选与活性材料相容性较好的高性能减水剂, 如聚羧酸减水剂, 在保证流动性的前提下, 减少用水量, 从而降低水胶比, 减小孔隙率;
- (4) 掺入短细钢纤维, 改善 RPC 韧性与延性;
- (5) 采用热水或高温养护, 加速和促进活性

成分的水化反应, 改善混凝土的微观结构.

2 RPC 配合比设计方法

由于活性粉末混凝土与普通混凝土在材料选用、养护制度等方面具有很大的差别, 因此普通混凝土的配合比设计方法已经不再适用, 需要针对 RPC 进行专门的研究. 本节将目前活性粉末混凝土(RPC)等(超)高性能混凝土配合比设计方法总结如下.

2.1 试验方法

RPC 包括两个混合体系: 一是胶凝材料自身体系, 包括水泥、硅灰、石英粉、粉煤灰和钢渣粉等; 二是胶凝材料与细骨料复合体系. 为实现胶凝材料体系和胶凝材料细骨料复合体系的紧密堆积, 刘娟红^[11]及其他学者^[12-13]提出了基于紧密堆积理论的配合比设计方法(以下简称试验方法 1). 该方法的步骤如下: (1) 基于最紧密堆积理论确定胶凝材料浆体体积 V_p ; (2) 基于最紧密堆积理论确定骨料体积 V_{agg} ; (3) 确定用水量 W 与胶凝材料用量 B .

法国路桥试验中心^[11]提出了基于最小需水量的配合比设计方法(以下简称试验方法 2), 该方法是为了实现胶凝材料体系的最紧密堆积. 材料粉末从固体粉末状态转变为浆体状态的瞬间需水量称为最小需水量, 颗粒孔隙由最小需水量确定, 从而确定材料密实度. 测定胶凝材料体系获得最大堆积密度时的最小需水量, 来确定复合胶凝材料之间的最佳比例.

此外, 文献[14-15]介绍了基于正交理论的设计方法(以下简称试验方法 3), 该方法采用两阶段设计, 第一阶段应用正交设计理论确定 RPC 材料的最佳基体, 第二阶段通过实验优选钢纤维掺量. 第一阶段设计过程: (1) 确定正交试验设计中考虑因素; (2) 确定各因素水平; (3) 设计并进行正交试验; (4) 确定各因素的合理水平, 然后确定最佳基体.

2.2 半经验半理论公式方法

法国路桥试验中心^[16-17]提出了基于改进的 Feret 公式的高性能混凝土强度预测公式(以下简称法国路桥公式)

$$f_c = \frac{K_G \times R_c}{[1 + 3.1 \times \frac{w/c}{1.4 + 0.4 \times e^{(-11 \times SF/C)}}]^2} \quad (1)$$

当掺入矿渣或粉煤灰时公式为

$$f_c = \frac{K_G \times R_c}{\left[1 + \frac{3.1(w+a)}{(1+k_1+k_2) \times c + BFS}\right]^2} \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度; K_G 为集料相关的系数(与集料形状相关); R_c 为水泥 28 d 抗压强度; w 、 c 分别为单位体积混凝土用水量和水泥用量; a 为单位体积混凝土中引入的空气量; k_1 为火山灰性系数; k_2 为填充料的活性系数; SF 、 BFS 分别为单方混凝土中硅灰和矿渣用量. 澳大利亚 Ken.W.Day^[18] 基于等效水泥用量提出了高性能混凝土配合比设计公式(以下简称 Day 公式)

$$f_c = \frac{25 \times c}{(w + 0.4(\alpha - 1)\sqrt{c})} - \left(\frac{c}{250}\right)^3 - 5 \quad (3)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度; α 为混凝土含气量; w 为单位体积混凝土用水量; c 为等效水泥用量.

文献[19]在水胶比定则的基础上提出了考虑骨胶比、胶凝材料颗粒级配、钢纤维掺量影响的改进鲍罗米公式(以下简称李莉公式):

$$f_{cu} = \alpha\beta\delta Af_{ce}\left(\frac{C}{W} - B\right) \quad (4)$$

式中: f_{cu} 为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的 RPC 立方体抗压强度; f_{ce} 为水泥强度; c/w 为活性粉末混凝土胶浆比; A 、 B 为根据水胶比变化的试验数据回归得到的系数; α 、 β 、 δ 分别为骨胶比、

胶凝材料颗粒级配、钢纤维影响系数.

2.3 编程计算方法

通过试验方法设计紧密堆积情况下各原材料的比值, 但试验方法工作量大, 并且由于原材料的来源变化需要重复试验, 因此计算机编程计算成为一种较为适用的方法. 崔巩^[20]和国爱丽^[21]对试验使用的原材料粉料进行粒度分析测试, 并且按 Dinger-Funk 方程得到最紧密堆积的固体颗粒粒径分布曲线. 最紧密堆积数学模型 Dinger-Funk 方程确定的粒径分布为 RPC 固体混合物体系所应达到的粒径分布(以下简称编程方法 1).

现将 RPC 配合比设计方法总结于表 1. 从中可以看出: (1) 各配合比设计方法涉及的参数或者因素都不尽相同, 其中配合比设计方法基本都涉及了水胶比、水泥特性(细度、密度、强度等级等)、硅灰特性以及矿物掺合料特性, 但是基本都没有考虑钢纤维和养护温度的影响; (2) 所总结的配合比设计方法中, 能够进行强度预测的都是基于水灰比定则, 通过引入影响系数来考虑其他因素的影响. 其他以试验和编程计算为基础的配合比设计方法都无法直接预测强度, 而需通过试验来评价其得出的配合比方案.

表 1 配合比设计方法分析
Tab.1 Analysis of the mix design methods

RPC 配合比 设计方法 [#]	参数									强度 预测	文献
	水胶比	砂胶比	胶凝材料 料级配	砂级配	水泥	硅灰	矿物掺料	钢纤维	养护温度		
法国路桥公式	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	✓	[16,17]
Day 公式	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	✓	[18]
李莉公式	✓	✓	✓	×	✓	×	×	✓	×	✓	[19]
试验方法 1	✓	×	✓	✓	×	×	×	×	×	×	[11-13]
试验方法 2	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	×	×	×	[11]
试验方法 3	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	[14,15]
编程方法 1	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	[20,21]

注: 表中✓表示考虑此参数, ×代表不考虑此参数.

3 RPC 配合比设计的影响参数分析

3.1 水胶比

水胶比指用水量与胶凝材料的质量比, 胶凝材料一般包括水泥、硅灰以及粉煤灰等. 水胶比在一定程度上决定了 RPC 的强度, 也是影响其工作性能和耐久性的主要因素. 研究表明随着水胶比的增加, RPC 的强度随之下降, 但同时由于水胶比增加, RPC 的流动性随之改善^[12,19]. 郑文忠

等^[19]分析了水胶比对强度和流动度的影响, 当水胶比低于 0.18 时, 流动度较差, 成型困难, 造成密实度下降, 最终对强度和耐久性产生不利影响; 当水胶比大于 0.22 时, 虽然流动度较好, 但用水量增多, 造成强度下降, 这一结论亦符合其他学者的研究成果^[5]. 目前的 RPC 配合比中水胶比多位于 0.14~0.22 之间.

3.2 砂胶比

砂胶比指石英砂与胶凝材料的质量比. 砂胶

比涉及 RPC 内部微观结构的匀质性问题,因此也是决定 RPC 强度的关键指标.目前国内学者针对 RPC 的研究,采用的砂胶比介于 0.5~1.5 之间.随着砂胶比的增大, RPC 流动度减小^[19],砂胶比为 0.8~1.2 左右时, RPC 抗压强度最高^[19].

3.3 胶凝材料级配与砂级配

原料的颗粒体系具有高的堆积密度是 RPC 获得高性能的关键^[22],而胶凝材料级配和砂级配决定了 RPC 颗粒体系的堆积密度以及 RPC 硬化后的孔结构分布^[8,11,22],因此,合理的胶凝材料级配和砂级配是 RPC 配合比设计的关键.

3.4 水泥与矿物细粉掺料

胶凝材料通常包括水泥和矿物细粉掺料,矿物细粉掺料一般包括:硅粉、粉煤灰、矿渣微粉等.水泥的等级越高, RPC 的抗压强度越高,流动性越好^[12].硅粉良好的孔隙填充效应和火山灰效应能有效地改善活性粉末混凝土的微观结构,提高其流动度与强度^[23].随着硅粉掺量增加, RPC 的强度有较大的增长,但当硅灰掺量超过 25%时强度增长已不明显^[23].因此,硅灰掺量多控制在 15%~25%之间.为降低造价和改善性能,也可使用其他矿物细粉掺料代替部分硅粉和水泥.粉煤灰(超细粉煤灰)和矿渣微粉等掺入可以提高 RPC 的流动度,但为保证 RPC 强度,矿物细粉掺料掺量宜为胶凝材料质量 20%左右^[24-25].

3.5 磨细石英粉

研究表明石英粉在养护条件达到 200~250 °C 才明显发挥火山灰效应^[26],在标准养护和热水养护时主要发挥微集料效应,在保证水泥和硅粉掺量的前提下,同时掺入硅粉和石英粉有利于同时提高 RPC 在标准、热水和高温养护条件下的抗压强度.研究表明磨细石英粉掺量一般取水泥用量的 25%~40%为宜^[19,26].

3.6 高效减水剂

由于 RPC 水胶比很低,为保证其具有良好的流动度和较高的密实度,一定量高效减水剂的掺入非常必要.聚羧酸减水剂具有很高的减水效果(常见减水效果在 25%~35%)和良好的相容性,因此成为制备 RPC 的常用减水剂,其用量通常可取胶凝材料掺量的 2%~3%^[11,27].此外,若采用早强型聚羧酸减水剂能进一步促进 RPC 强度提高^[28].

3.7 钢纤维

钢纤维通过闭合裂纹与稍栓拉结作用,增大 RPC 的内聚力与内摩擦角,提高抗剪强度,并使得 RPC 由脆性破坏转为塑性破坏^[29,11].但研究表

明钢纤维掺量的增加对活性粉末混凝土的抗拉与抗剪强度提高较大,而对其抗压强度的提高并不显著^[30].钢纤维含量过高时, RPC 强度提高效率降低,流动度变差,造成施工不便.因此,综合考虑成本因素,钢纤维体积掺量宜为 1.5%~3%.此外,钢纤维的长径比与端部构造形式也对 RPC 强度有较大影响,长径比多控制在为 65 上下,采用端勾型钢纤维能进一步增强 RPC 的强度^[31].

3.8 养护条件

现阶段活性粉末混凝土养护方法与制度主要有^[32-34]:标准养护、热水养护、蒸汽养护、高温干热养护,及组合养护制度.前期学者的研究已经表明:活性粉末混凝土需要以高温来促进和加速活性胶凝材料的水化反应,分析实际养护制度对 RPC 强度的影响可以发现:(1)对强度而言,高温干热养护>蒸汽养护>热水养护>标准养护;(2)对早期强度而言:相对于标准养护而言,温度较高的干热、蒸汽、热水养护制度能有效提高活性粉末混凝土的早期强度,最终强度也有较大提高;(3)高温养护完成后,后期活性粉末混凝土的后期强度增长较为缓慢;(4)对热养护时间,90 °C 左右热水养护或蒸汽养护的最佳养护时间为 3 d 左右,热养护时间进一步增加对强度影响不大^[32-34].

4 活性粉末混凝土配合比设计方法评价

为评价 RPC 配合比的设计方法,本文仅列举典型的试验配合比方案,选取了文献^[13,27,35,36]中的试验与配合比方案,使用法国路桥公式^[15-16]、Day 公式^[18]、李莉公式^[19-20]进行强度预测,并将预测强度与试验结果进行对比.针对抗压试件的尺寸效应,研究表明^[5,37],由于 RPC 中无粗骨料,建议取边长 100 mm 和边长 70.7 mm 的立方体抗压强度之比为 0.959,取 RPC 棱柱体轴心抗压强度与边长 70.7 mm 的立方体抗压强度之比为 0.845.本文采用此参数将抗压强度统一处理,其结果如表 2 所示.

图 1~3 为三种不同强度预测值与实际强度值之间的关系.可以看出,李莉公式的预测结果偏于保守,这是由于其理论中骨胶比影响系数来自统计分析,当骨胶比小于 0.778 时,将导致其公式中 α 值过大,预测结果会出现较大偏差;Day

公式所预测的抗压强度精度较差, 这是由于公式(3)中采用了绝对用水量及胶凝材料绝对用量, 和水胶比未直接相关, 一定配合比条件下, 会导致预测结果出现负值, 这说明其配合比理论对于活

性粉末混凝土而言适用性较差. 基于法国路桥公式的预测效果较好, 但由于没有其未涉及钢纤维与养护温度的影响, 预测结果亦偏于保守.

表 2 RPC 实测强度与预测结果[#]
Tab. 2 Results of the RPC actual and predicted strength from different design methods[#]

文献	水胶比	水泥	硅粉	粉煤灰	石英粉	砂	钢纤维	减水剂	养护温度 /℃	实际抗压强度 /MPa	预测强度/MPa		
											李莉公式	Day 公式	法国路桥公式
[13]	0.19	1	0.32			1.17/0.55/0.23	0.64	7	60	127.30	74.66	107.59	117.66
	0.19	1	0.32			1.07/0.50/0.21	2.2	7	60	152.30	83.53	107.59	117.66
	0.19	1	0.32			1.07/0.50/0.21	2.2	7	100	171.20	83.53	107.59	117.66
[35]	0.28	1	0.25		0.37	1.1	0	2	90	137.44	63.36	-105.73	123.88
	0.2	1	0.35		0.3	1.1	3	2.5	90	271.92	134.37	-134.03	118.50
	0.16	1	0.35		0.3	1.1	3	2.5	90	240.26	179.64	-52.72	118.50
[27]	0.18	1	0.25	0	0.37	0.9	0	2	90	81.04	146.85	13.68	130.82
	0.16	1	0.25	0.2	0.2	0.88	1	2	90	154.88	456.02	-9.76	127.16
	0.16	1	0.25	0.2	0.2	0.88	4	2	90	210.98	557.36	-9.76	127.16
[36]	0.15	1	0.25			0.82	2	3.55	22	155.37	353.20	-172.85	164.45
	0.2	1	0.15			0.89	2	1.5	22	137.89	126.78	-61.85	131.20
	0.2	1	0.25			0.72	2	1.5	22	145.27	539.73	-256.38	140.28

注: (1) 文献[13]中砂指中砂、细砂以及特细砂的比值; 钢纤维为体积掺量, %; 减水剂为胶凝材料的质量百分比, %.
(2) 实际抗压强度与预测抗压强度皆转化为边长 100mm 的立方体抗压强度.

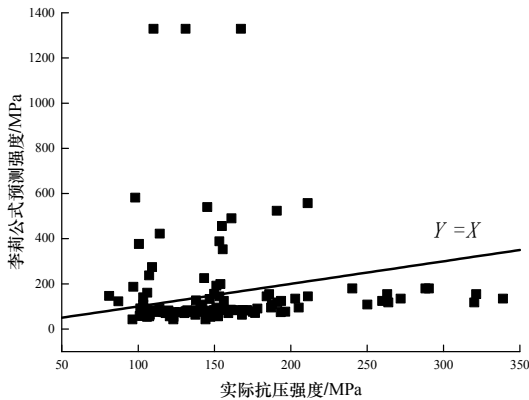


图 1 李莉公式强度预测值
Fig. 1 Comparison between RPC actual and predicted strength from Lili's model

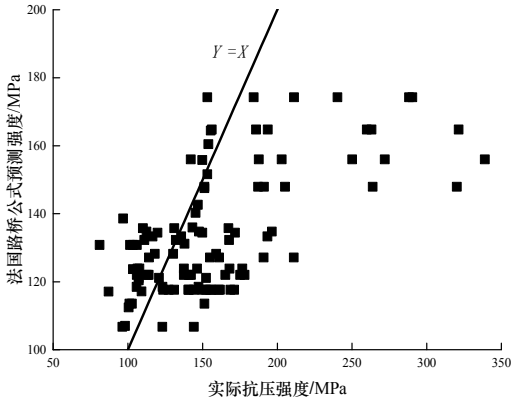


图 3 法国路桥公式强度预测值
Fig.3 Comparison between RPC actual and predicted strength from LCPC model

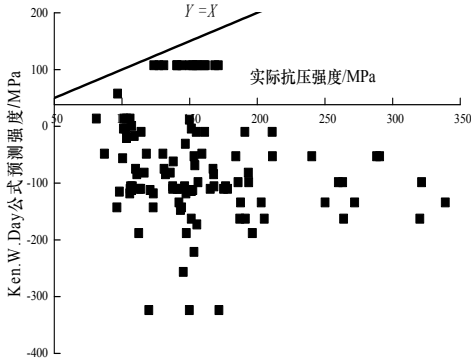


图 2 Ken. W. Day 公式的强度预测值
Fig. 2 Comparison between RPC actual and predicted strength from Day's model

对本文总结的目前现有 RPC 的强度预测公式分析可知: (1) 除了李莉公式之外, 其余方法都未考虑钢纤维掺量的影响, 其对钢纤维影响的考虑基于数据统计, 并未建立明确的物理力学意义. (2) 目前所有方法都未考虑活性粉末混凝土养护温度对于强度的贡献. (3) 由最紧密堆积理论可知, 胶凝材料的级配和砂的级配是否合理, 也将对活性粉末混凝土强度产生较大的影响, 本文总结的预测方法中尚未考虑胶凝材料的级配和砂级配的影响. (4) 硅灰或其他细矿物掺合料的掺入将产生明显的火山灰效应, 对于其活性的考虑不可或缺, 但是由于其材料来源和材料性质的不确定性, 如何考虑其活性的影响尚待研究.

6 结论

国内外学者针对活性粉末混凝土配合比设计理论与方法已经进行了较为广泛的研究,本文通过对现有RPC配合比设计理论的分析,总结了现阶段RPC配合比设计理论及相关设计方法的现状及发展趋势,主要为以下几个方面:

(1) 现阶段活性粉末混凝土配合比设计主要基于试验方法、半经验半理论公式方法、编程计算方法.其中试验方法和编程计算方法无法直接进行强度预测,配合比设计具有较大不确定性.通过对典型半经验半理论公式方法进行评价分析发现法国路桥公式的准确度较高,可作为简易的强度预测公式使用.

(2) 钢纤维和养护温度参数影响应该在配合比设计时加以考虑,例如在配合比设计时提出基于性能和经验的影响系数.

(3) 活性粉末混凝土配合比设计可将原材料的级配设计和强度预测公式相结合,从而推动活性粉末混凝土配合比设计的实用化.

参考文献 References

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [2] HALIT Y, MERT Y Y, SERDAR A, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1223-1231.
- [3] GOV N S. Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete[J]. Aci Materials Journal, 2006, 104(5):547-547.
- [4] 史庆轩, 戎翀, 张婷. 活性粉末混凝土微观层面的研究进展[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(2):155-159.
SHI Qingxuan, RONG Chong, ZHANG Ting. Development of micro-level study on reactive powder concrete materials[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(2):155-159.
- [5] 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.
ZHENG Wenzhong, LÜ Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10):44-58.
- [6] 邓宗才, 肖锐, 申臣良, 等. 超细水泥活性粉末混凝土的配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4):659-665.
DENG Zongcai, XIAO Rui, SHEN Chenliang et al. Mix proportion design of reactive powder concrete with superfine cement [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4):659-665.
- [7] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社, 1999.
- [8] WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [9] POWER T C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1985, 41(1):38-48.
- [10] LARRARD F, SADRAN T. Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6):997-1009.
- [11] 唐明, 潘吉, 巴恒静. 水泥基粉体颗粒群分形几何密集效应模型[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(5):97-100.
TANG Ming, PAN Ji, BA Hengjing. The model of the cementing matrix powder group fractal geometry denseness effect[J]. J. of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21(5):97-100.
- [12] 刘娟红, 宋少明. 活性粉末混凝土: 配制、性能与微结构[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
LIU Juanhong, SONG Shaoming. Reactive powder concrete: preparation, properties and microstructure [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [13] 何峰, 黄政宇. 活性粉末混凝土原材料及配合比设计参数的选择[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(3):74-77.
HE Feng, HUANG Zhengyu. Selection of raw materials and parameters of mix design for active powder concrete[J]. New Building Materials, 2007, 34(3):74-77.
- [14] 闫光杰, 阎贵平, 安明喆, 等. 200MPa 级活性粉末混凝土试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(2):116-119.
AN Guangjie, YAN Guiping, AN Mingzhe, et al. Experimental study on 200 MPa reactive powder concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2):116-119.
- [15] 刘数华, 刘显军, 张洁. 基于正交试验的活性粉末混凝土配合比设计[J]. 公路, 2013(2):158-160.
LIU Shuhua, LIU Xianjun, ZHANG Jie. Mix design of reactive powder concrete based on orthogonal test[J]. Highway, 2013(2):158-160.
- [16] 赵庆新, 刘朝阳, 郝圣旺. 基于正交理论的RPC配合比设计[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(1):193-197.
ZHAO Qingxin, LIU Zhaoyang, HAO Shengwang. Mix proportion design of RPC based on orthogonal theory[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(1):193-197.
- [17] F. Larrard. A survey of Recent Research performed in the French "LCPC" Network on High Performance Concrete[C]//Proceeding of High Strength Concrete, Norway: Lillehammer, 1993:20-24.
- [18] Bache H H. Densified Cement/Ultrafine Particle Based Materials[C]//Second International Conf. On Superplasticizers in Concrete, Canada: Ottawa, 1981.
- [19] KEN W. Day. Concrete mix design, quality control and specification, [M]. 3rd Ed., Taylor & Francis, 2013.
- [20] 郑文忠, 李莉. 活性粉末混凝土配制及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 13-17.
ZHENG Wenzhong, LI Li. Preparation and mix proportion calculation of reactive powder concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(2): 13-17.
- [21] 崔巩, 刘建忠, 姚婷, 等. 基于Dinger-Funk方程的活性

- 粉末混凝土配合比设计[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010(S2):15-19.
- CUI Gong, LIU Jianzhong, YAO Ting, et al. Mix proportion design of reactive powder concrete based on Dinger-Funk equation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010(S2):15-19.
- [21] 国爱丽,赵福君,巴恒静,等. 活性粉末混凝土配比优化及收缩性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2):20-24.
- GUO Aili, ZHAO Fujun, BA Hengjing, et al. Research on the mix optimization and shrinkage properties of reactive powder concrete[J]. J. of Wuhan University of Technology,2009,31(2):20-24.
- [22] SEDRAN F D L. Optimization of ultra-high- performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement & Concrete Research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [23] CHAN Y W, CHU S H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Research,2004,34: 1167-1172.
- [24] 施韬, 陈宝春, 施惠生. 掺矿渣活性粉末混凝土配制技术的研究[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(6): 867-870.
- SHI Tao, CHEN Baochun, SHI Huisheng. Research on the proportion of reactive powder concrete with blast-furnaceslag[J]. Journal of Materials Science & Engineering,2005,23(6):867-870.
- [25] 谢友均, 刘宝举, 龙广成. 掺超细粉煤灰活性粉末混凝土的研究[J]. 建筑材料学报,2001,4(3):280-284.
- XIE Youjun, LIU Baoju, LONG Guangcheng. Study on reactive powder concrete with ultra-pulverized fly ash[J]. Journal of Building Materials,2001,4(3):280-284.
- [26] 何峰,黄政宇. 硅灰和石英粉对活性粉末混凝土抗压强度贡献的分析[J]. 混凝土,2006(1):39-42.
- HE Feng, HUANG Zhengyu. Compressive strength contribution analyses of silica fume and crush quartz in RPC[J]. Concrete,2006(1):39-42.
- [27] 王震宇, 王俊亭, 袁杰. 活性粉末混凝土配比试验研究[J].混凝土,2006(6):80-82,85.
- WANG Zhenyu, WANG Juntong, YUAN Jie. Experimental research on preparation of reactive powder concrete[J]. Concrete, 2006(6): 80-82,85.
- [28] 郝利炜. 超高强 RPC 专用早强型聚羧酸系减水剂的制备[J].新型建筑材料,2013,40(3):26-28,55.
- HAO Liwei. Development of a polycarboxylate superplasticizer with early-age strength on reactive powder concrete[J]. New Building Materials,2013,40(3):26-28, 55.
- [29] LEE M G, WANG Y C, CHIU C T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material[J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(1): 182-189.
- [30] OLIVITO R S, ZUCCARELLO F A. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete[J]. Composites Part B Engineering, 2010, 41(3): 246-255.
- [31] 黄育, 王必斌, 陈万祥, 等. 不同钢纤维对 RPC 性能影响的试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2004,4(2):38-40.
- HUANG Yu, WANG Bibin, CHEN Wanxiang, et al. Influence of different steel fiber on the Performance of reactive powder concrete[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2004,4(2):38-40.
- [32] 张胜,周锡玲,谢友均,等. 养护制度对活性粉末混凝土强度及微观结构影响的研究[J]. 混凝土,2007(6): 16-18.
- ZHANG Sheng, ZHOU Xiling, XIE Youjun, et al. Study on the effect of curing system on the strength and microstructure of reactive powder concrete[J]. Concrete, 2007(6):16-18.
- [33] ZHU Z G, LI B X, LIU J C, et al. Effects of Curing Systems on the Strength and Microstructure of Reactive Powder Concrete with Iron Tailing Sands[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 548-549: 247-253.
- [34] 江桂华,林东,林永权,等. 养护制度对活性粉末混凝土强度的影响及其机理研究[J]. 广东建材,2010, 26(1):18-21.
- JIANG Guihua, LIN Dong, LIN Yongquan, et al. Research on effect of curing conditions on the strength of reactive powder concrete and its mechanism[J]. Guangdong building materials, 2010,26(1): 18-21.
- [35] 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.
- HE Feng, HUANG Zhenyu. Research on preparation technology of 200~300 Mpa reactive powder concrete (RPC)[J]. China Concrete and Cement Products, 2000 (4): 3-7.
- [36] AHMAD S, ZUBAIR A, MASLEHUDDIN M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Construction & Building Materials, 2015, 99:73-81.
- [37] 吕雪源, 王英, 符程俊, 等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(10):1-9.
- LÜ Xueyuan, WANG Ying, FU Chengjun, et al. Basic mechanical property indexes of reactive powder concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(10):1-9.

(编辑 吴海西)