

文章编号: 1005-0523(2002)03-0028-04

# 活性粉末混凝土技术

喻乐华, 钟金茹, 罗威年

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 活性粉末混凝土是一种超高强、超高性能的新型水泥基复合材料。本文介绍活性粉末混凝土的发展由来、主要理论基础与技术措施、材料选择、类型及其配合比、特性和制备方法。

**关键词:** 活性粉末混凝土(RPC); 混凝土; 水泥基复合材料; 纤维

中图分类号: TU528

文献标识码: A

## 0 引言

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简写成RPC)是二十世纪末由法国人研究成功的一种超高强、超高性能、耐久性优异的新型水泥基复合材料,特别是在混凝土材料的韧性和延性方面取得了突破性进展。它由级配石英细砂、水泥、磨细石英粉、硅灰、高效减水剂和钢纤维组成,在成型、凝结、硬化过程中适当采取加压、加热等辅助工艺制备而成。工程应用初步显示出活性粉末混凝土良好的使用性能、简便的生产和施工工艺,因而具有广阔的发展前景。

## 1 混凝土技术发展的产物

水泥基复合材料的发展以其标志性产物可分为以下几个过程:

### 1.1 普通混凝土

从十九世纪20年代波特兰水泥问世直到本世纪70年代,以硅酸盐水泥为胶凝材料的混凝土成为土木建筑工程的主要结构材料,但在工程中实际应用的混凝土最高强度只有34 MPa<sup>[1]</sup>,因而限制了其更广泛的应用。

### 1.2 高强混凝土与高性能混凝土

70年代高效减水剂的发展,促使混凝土在较低水灰比的条件下成型密实而获得较高强度( $>60$  MPa)的水泥基复合材料,即高强混凝土(High Strength Concrete, HSC)。其后,一些优质活性矿物细粉超细粉如硅灰、沸石粉等掺入混凝土,使水泥水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少而水化硅酸钙凝胶增多,同时改善了混凝土的孔结构并降低了孔隙率,特别是改善了混凝土最薄弱环节—粗集料界面的结构,致使混凝土不仅力学强度提高而且在诸多方面的耐久性增强,即高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)。

### 1.3 纤维混凝土

随着混凝土强度的不断提高,混凝土的固有弱点—抗拉强度低(仅为抗压强度的1/10)、韧性差等愈益突出。为此,在水泥基材料中掺加抗拉强度高、极限延伸率大、抗碱性好的各种纤维(金属纤维、无机纤维或有机纤维)作为增强材料而形成水泥基复合材料,即纤维混凝土(Fiber Reinforced Concrete, FRC),其中纤维材料可以约束水泥基料中裂缝的扩展,使混凝土具有较高的抗拉和抗弯强度、良好的韧性及延性,混凝土的优势得到进一步发挥<sup>[2,3]</sup>。

### 1.4 活性粉末混凝土

高强混凝土实践证明:骨料粒径的细化有助于

收稿日期: 2002-04-25

作者简介: 喻乐华(1962-),男,江西抚州市人,华东交通大学副教授。

复合材料内部结构均匀化而强度提高。纤维混凝土工程经验表明:较大的粗骨料对纤维的“架桥”作用受到限制。因此,法国人 Pierre Richard 和 Marcel Cheryzy<sup>[4]</sup>采用“高致密水泥基均匀体系”(DSP)模型,集高强混凝土、高性能混凝土和纤维混凝土之优势于一体,将粗骨料剔除,根据最紧密堆积原理,用最大粒径为 400~600  $\mu\text{m}$  的石英砂为骨料,掺入适量短纤维和活性矿物掺合料,配以成型施压、热处理养护等制备方法,得到强度和其它性能优异的活性粉末混凝土,其抗压强度可达 200~800 MPa,断裂能达到 40  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。该材料申报了专利,并在 1994 年美国混凝土学会旧金山春季会议上首次公开,1998 年 8 月在加拿大魁北克省 Sherbrooke 大学召开了第一次有关粉末混凝土和高性能混凝土的国际研讨会。

## 2 活性粉末混凝土理论与技术

### 2.1 高致密水泥基均匀体系

水泥基材料强度的提高一向以最紧密堆积密实理论为模型。首先,通过对组成材料粒度级配的选择,使不同粒径原材料形成一个最大密实的体系;其次,采用高效减水剂使混凝土用水量大大减少,可降低孔隙率;再次,掺入硅粉类超细矿物粉,可通过充填作用、火山灰作用等消除部分混凝土内部孔隙;最后,在成型过程中施加压力以消除被混入的空气及伴随水化反应而产生的化学收缩。

普通混凝土是一种非均质材料,其中集料—特别是粗集料与水泥基体界面处是应力破坏策源地,也是提高混凝土强度首要考虑减少或消除的因素。人们认识到混凝土集料粒径与其界面的微裂隙尺寸和扩展有直接关系,因而在高强、高性能混凝土强调使用粗集料的最大粒径趋小化。在活性粉末混凝土中采用石英细砂(最大粒径 600  $\mu\text{m}$ )代替粗集料,提高材料的均质性,减少材料内部缺陷。

### 2.2 纤维增强混凝土抗拉强度机理

纤维混凝土中纤维的主要作用是限制水泥基料在外力作用下裂缝的扩展<sup>[2,3]</sup>。混凝土在受应力(拉力、弯力)初期,水泥基料与纤维共同承受外力但以水泥基料为主要承力者,纤维可以极大地约束基料在应力作用下裂缝的形成和发展;随着应力增大基料发生开裂后,横跨裂缝的纤维成为主要外力承受者。若纤维的体积掺量超过某一临界值,整个

复合材料可继续承受较高的荷载并产生较大变形,直到纤维被拉断或纤维从基体中被拔出以致复合材料被破坏。

在混凝土中掺入适量钢纤维,其极限抗压强度可适当提高,单轴抗拉强度可提高 40~50%,抗弯极限强度可提高 50~150%,尤以韧性提高幅度为大,掺入 0.8~2.0% 钢纤维的混凝土冲击韧性指标可提高 50~100 倍或更高。

### 2.3 活性富硅材料的火山灰作用

硅灰由于其独特的细度、高度的无定性及富含  $\text{SiO}_2$  而具有很强的火山灰活性<sup>[5]</sup>,可与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次水化反应,增加了水泥石中 C—S—H 凝胶的数量,降低了孔隙率并改善了孔结构;同时使水泥石中粗大薄弱的氢氧化钙晶体变为许多细小的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  结晶体,类似于金属合金中粒子尺寸精细化,提高了混凝土的强度。

集料石英细砂和磨细石英粉虽然不具有硅灰那么强的火山灰活性,但因其高  $\text{SiO}_2$  含量及颗粒界面的活性而易在颗粒界面与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  二次反应,使这些集料界面结构  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  数量减少并晶体变小,同时 C—S—H 凝胶增多,导致界面大孔隙减少而胶结强度和耐久性大大提高<sup>[6]</sup>。

## 3 活性粉末混凝土类型、配合比及特性

活性粉末混凝土根据抗压强度和成型养护方式分为二类:RPC200 和 RPC800,表 1<sup>[1]</sup>和表 2<sup>[6]</sup>列举了它们的典型配合比及主要力学参数。

表 1 活性粉末混凝土类型、配合比及特性

活性粉末混凝土类型	RPC200	RPC800
硅酸盐水泥 V 型	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 955	1000
细砂(150~400 $\mu\text{m}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 1051	500
硅粉(18 $\text{m}^2/\text{g}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 229	230
极细沉淀硅(35 $\text{m}^2/\text{g}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 10	
磨细石英粉(平均 4 $\mu\text{m}$ )	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 390	
聚丙烯酸系超塑化剂	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 13	18
钢纤维	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 191	630
用水量	( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 153	180
圆柱体抗压强度	(MPa) 170~230	490~680 (钢质集料)650~810
抗折强度	(MPa) 20~60	45~102
断裂能	( $\text{J}/\text{m}^2$ ) 15000~40000	1200~2000
弹性模量	(GPa) 54~60	65~75

表2 典型的活性粉末混凝土配合比(以WT计)

	RPC200				RPC800	
	无纤维		掺加纤维		硅质集料	钢质集料
普通水泥	1	1	1	1	1	1
硅灰	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
砂 150~600 $\mu\text{m}$	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	—
石英粉 d=10 $\mu\text{m}$	—	0.39	—	0.39	0.39	0.39
超塑化剂	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
钢纤维 L=12mm	—	—	0.175	0.175	—	—
钢纤维 L=3mm	—	—	—	—	0.63	0.63
钢质集料 d<800 $\mu\text{m}$	—	—	—	—	—	1.49
水	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
成型压力	—	—	—	—	50MPa	50MPa
热养护温度 $^{\circ}\text{C}$	20	90	20	90	250—400	250—400

目前,可应用于工程的主要是 RPC200,列其配合比及力学性质于表 3<sup>[7]</sup>:

## 4 材料选择

### 4.1 水泥

选择  $\text{C}_3\text{S}$  含量高、 $\text{C}_3\text{A}$  含量低的硅酸盐类水泥胶结效果最好,不宜粉磨太细避免需水量过大而影响硬化体的密实.通常使用标号 525 以上的硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥即可配制 RPC.

### 4.2 细石英砂

石英砂因其具有很高硬度和优良界面性能且易采集和低价廉而充当 RPC 的集料,因此应考虑其矿物成分、平均粒径、颗粒形状和掺用比例.为符合最大密实理论模型,避免与水泥颗粒粒径冲突,细石英砂平均粒径应选择 250  $\mu\text{m}$ ,粒径范围为 150~600  $\mu\text{m}$  之间,颗粒多呈球形,矿物成分  $\text{SiO}_2$  含量不低于 99%.

表3 RPC200 配合比(WT)及力学性质

	配合比 I		配合比 II
	无纤维	掺纤维	
水泥	1	1	1
硅灰	0.325	0.325	0.325
细砂	1.432	1.432	1.43
石英粉	0.3	0.3	0.3
超级塑化剂	0.027	0.027	0.027
水	0.28	0.28	0.26
钢纤维	—	0.2	0.2
抗压强度(MPa)	163	217	197
变异系数(%)	4.00	11.0	9.0
弹性模量(GPa)	46	49	49
泊桑比	0.19	0.19	0.19

### 4.3 硅灰

选择硅灰应考虑以下几个参数:颗粒聚集程

度、颗粒粒径和硅灰纯度.通常硅灰化学成分  $\text{SiO}_2 \geq 90\%$ ,粒径  $< 1 \mu\text{m}$ ,平均粒径 0.1  $\mu\text{m}$ ,呈球形.硅灰与水泥比例以 0.25 较佳,这样硅灰能发挥最佳的填充作用,同时能最大限度地与水泥水化物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进行第二次水化反应.

### 4.4 磨细石英粉

对于 RPC 热处理过程而言,磨细石英粉是不可缺少的组成成分,其中以 5~25  $\mu\text{m}$  粒径范围的石英粉可最大程度地发挥活性.因此,宜采用平均粒径 10  $\mu\text{m}$  的磨细石英粉,这与水泥粒径接近.

### 4.5 高效减水剂

多使用减水率  $> 20\%$  的高浓型减水剂,萘系或可溶性树脂型高效减水剂均可,用量约为胶凝材料(水泥+掺合料)2%(WT).

### 4.6 钢纤维

为提高 RPC 韧性和延性掺入 1.5~3.0% 混凝土(Vol)的短钢纤维,其长径比约为 40~100.

## 5 制备

### 5.1 拌和

称量各材料后,将水泥、石英砂、石英粉、硅灰和钢纤维搅和干拌,以拌和物颜色均匀程度来判定直至拌匀;加入溶有高效减水剂的一半用水量搅拌约 3 分钟,再加入另一半用水量搅拌约 10 分钟.

RPC 的和易性不能以坍落度来表示,其拌合物外观不象混凝土而更象塑性的沥青.

### 5.2 浇注

RPC 试件在外部振动条件下的振动台上成型,对于梁、柱等现场浇注的则采用内部振动的插入式振捣器捣实.

### 5.3 加压成型

RPC800成型后24小时内对其进行加压,在凝结前后加压过程中,被带入的空气和早期化学收缩将大部分消除,一部分拌和水也将被挤出,从而减少了RPC的水胶比,进一步增加了密实度。

### 5.4 养护

养护条件根据RPC类型有所差异,主要有三种养护可供选择:1)标准养护:在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 水中养护28天;2)热水养护:在 $90^{\circ}\text{C}$ 热水中养护48小时;3)高温养护:热水养护后在 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 高温下养护8小时。

## 6 结束语

活化粉末混凝土是水泥基复合材料的新品种,它是根据高致密水泥基均匀体系模型,按照最大密实的要求,选择原材料粒径级配,采用加压成型和热养护,充分发挥每一种原材料的作用,达到均质和密实的效果。涉及原材料组成的措施(保证均质性和密实性)是RPC概念的基础,在所有情况下是

适用;而加压成型和热养护技术对于提高性能是可供选择的。

### 参考文献:

- [1] 阎培渝,姚燕. 水泥基复合材料科学与技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1999.
- [2] 高丹盈,刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.
- [3] 程国庆,等. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [4] Richard P, Cheyrezy M H. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200—400 Mpa Compressive Strength[J]. ACI Spring Convention, San Francisco, 1994.
- [5] 冯乃谦. 高性能混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [6] 喻乐华. 混凝土集料界面与强度关系的界面理论分析[J]. 华东交通大学学报,1999,(4):14~19.
- [7] 陈兵,李悦. 活化粉末混凝土的发展与应用[J]. 混凝土,2000,(8):34~36.
- [8] 俞瑞堂. 活化粉末混凝土的理论与实践[J]. 国外桥梁,1998,(1):76~78.

## Technology of Reactive Powder Concrete

YU Le-hua, ZHONG Jin-ru, LUO Wei-nian

(School of Civil Engineering College, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

**Abstract:** Reactive powder concrete (RPC) is a new kind of cement-base multi-material with super-high strength and super-high performance. The origin and the development of RPC and its main theory and technology, option of original material, types, composition, main mechanics properties and making-methods are introduced in this paper.

**Key words:** reactive powder concrete; concrete; cement-base multi-material; fiber