

# 多元复配混合砂对水泥基胶砂体系性能影响研究分析

朱 杨

上海材五科技有限公司 上海 201210

**摘要：**众所周知，混凝土是现代建筑工程用量最大的建筑材料，发挥着其它材料无法替代的功能与作用，而其中的天然砂更是混凝土不可或缺的组成部分。目前我国处于工程建设的高峰期，对于建筑用砂需求十分巨大<sup>[1]</sup>。但由于我国砂资源分布不均匀，加上环境保护要求，许多河流已实施禁止采砂，天然砂的资源逐渐已不能满足工程建设的需要，因此，寻找天然砂的替代品已迫在眉睫。本文旨在将特细砂、中砂、碎屑及石粉四种材料进行不同比例的掺配，讨论分析四元复配砂的物理性能、对水泥基胶砂体系的影响以及其可行性。

**关键词：**天然砂；碎屑；石粉；特细砂；混合砂复配；胶砂体系

## 前言

随着上海经济的飞速发展，基础建设的不断推进，混凝土的需求量也随之突飞猛进。砂作为混凝土的最主要原材料之一，工程对砂的需求只增不减。上世纪90年代初，优质河砂可谓“遍地都是”，大多数天然中砂是从江西赣江船运到上海黄浦江进行中转，而且价格随环境影响猛涨，这无疑增加了混凝土生产企业的成本<sup>[2]</sup>。如今不但大城市周边的优质河砂几乎无处可找，随着对环境生态保护意识的提升，中砂尤其是天然中砂的资源越来越匮乏。虽然市面上可以被正规交易的天然砂已然成为了紧俏物资，但其一部分的物理性能指标仍然不能满足部分重点工程需要。

考虑到以上种种对天然砂的限制，以及国家一直大力倡导“固体废弃物资源化利用”。碎石在破碎过程产生的石屑、石粉及河道清理过程产生的淤泥砂均为固废，若能将其通过一些措施转化混凝土可用的细骨料，不仅符合国家政策的倡导，还可极大的缓解天然砂资源紧缺的问题。但石屑、淤沙与建筑工程上常用的中砂性能有较大差异，如石屑颗粒粗、级配差，淤沙颗粒过细等，直接使用会引起混凝土质量的严重劣化，产生重大质量隐患<sup>[3]</sup>。本文基于级配理论建立的骨料密实堆积模型，研究以石屑、淤沙为主并搭配适量中砂的复合砂配制技术，并在此基础上采用复合砂为细骨料，探究复合砂混凝土拌制的胶砂体系的性能影响及力学性能（即折比），最后浅析其应用的经济和社会效益<sup>[4]</sup>。

## 1 砂体系复配研究

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 天然中砂

由自然条件作用而形成的，公称粒径小于5mm的岩石颗粒。按期产源的不同，可分为河砂、海砂和山砂。

其中海砂由于会引入氯离子导致钢筋锈蚀，不能使用；而山砂由于风化作用使得其本身较脆，较高的压碎值使得其大多也不被建筑行业的行业使用。而河砂是天然石在自然状态下，经受水的作用力长时间反复冲撞、摩擦产生的，是一种表面有一定光滑性的颗粒。建筑规范要求中普通混凝土用砂以Ⅱ区中砂为宜。同时，不同强度等级的混凝土最好能用相适应地最佳细度模数区间的中砂，如C35混凝土以下，对应中砂的细度模数宜在2.3~2.4，如C40~C55强度等级的混凝土，对应中砂的细度模数宜在2.5~2.7之间；如C60及以上强度等级混凝土，对应中砂的细度模数宜在2.8~3.0之间，且粒径分布在Ⅱ区的最宜。

#### 1.1.2 碎屑

采石场在生产碎石过程中会产生25~30%的细颗粒尾矿，这种尾料就是碎屑，又称尾矿砂，是其中的一种石屑。碎屑的最大粒径一般小于5mm，是一种典型的废弃物资源。与天然砂相比，石屑具有质地坚硬、表面粗糙多孔、有尖锐棱角、粘结性能良好等特点，且含有一定量公称粒径小于80 $\mu\text{m}$ 的石粉。

#### 1.1.3 石粉

石粉是指人工砂及混合砂中的小于80 $\mu\text{m}$ 以下的颗粒。人工砂中的石粉绝大部分是母岩被破碎的细粒，与天然砂的泥不同，它们在混凝土中的作用也有很大区别。石粉含量高一方面使砂的比表面积增大，增加用水量；另一方面细小的球形颗粒产生的滚珠作用又会改善混凝土和易性。因此也不能随意将人工砂中的石粉视为有害物质。

#### 1.1.4 特细砂

我国特细砂资源非常丰富，四川、河南、上海、黑龙江、山东、北京、内蒙、宁夏、新疆、广东、广西等地都产特细砂。特别是长江中、下游地区特细砂的储

量很大，但缺少细、中砂。长江流域每年航道疏浚等产生大量的淤砂、淤泥。上海周边地区的淤砂细度模数在0.7~1.2，根据JGJ52的砂质量要求，说明该淤砂属于特细砂范围内。目前，这类淤砂主要用于生产加气砌块等墙体材料，在混凝土中尚不允许使用。特细砂级配较差、空隙率大，比一般中、粗砂大10%~15%；比表面积大，比一般中、粗砂约大2倍，含泥量也较高。

1.2 砂体系复配密实度试验

首先，利用碎屑、特细砂各自的特点，将碎屑、特细砂优化组合成级配良好的混合中砂，可以用来配制流态混凝土。在资源紧缺，没有天然中粗砂的情况下，对碎屑和特细砂进行优化组配，可以解决单用碎屑配制混

凝土内实外不美，也可以突破单用特细砂不能用于重要工程的现实。

其次，通过对特细砂、中砂、碎屑和石粉等多组分细骨料按一定比例复配，研究对应的特细混合砂的细度模数、颗粒分布、表观密度、堆积密度、紧密密度、堆积空隙率、紧密空隙率等因素，砂体系复配最佳密实度区域中进行相应的需水量、强度、压折比等因素的正交分析。

1.2.1 特细砂和碎屑复配

对特细砂和碎屑复配，研究不同细度模数的特细砂（0.8、1.0、1.2）和不同细度模数的碎屑对空隙率的影响。特细砂和碎屑以不同比例（3：7、4：6、5：5、6：4）复配进行试验，具体情况如下。

表1 不同复配的砂体系的密度和细度模数

砂体系	细度模数	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	松散堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率	
					松散	紧密
特细砂	0.8	2700	1420	1520	47%	44%
碎屑	3.6	2650	1590	1800	40%	32%
混合(3:7)	2.7	2670	1790	1920	33%	28%
混合(4:6)	2.5	2630	1680	1840	36%	30%
混合(5:5)	2.1	2650	1690	1770	36%	32%
混合(6:4)	1.8	2670	1600	1730	40%	35%

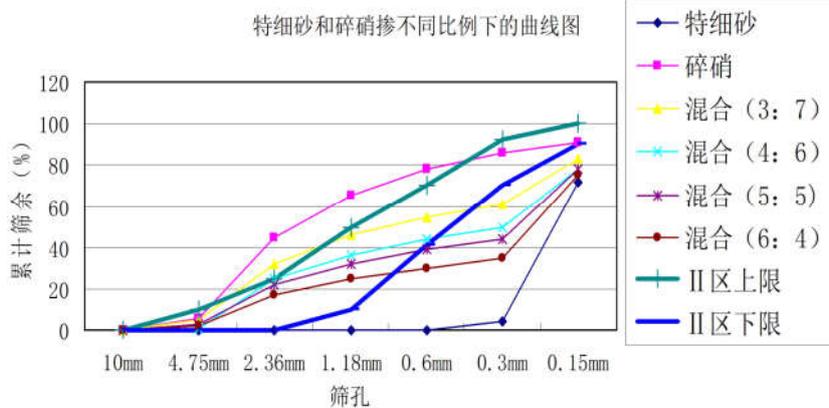


图1 细度模数为0.8的特细砂与碎屑以不同比例复配粒径分布

由表1和图1可知，特细砂细度模数为0.8，碎屑细度模数为3.6，特细砂紧密空隙率为44%，碎屑紧密空隙率为32%，3：7紧密空隙率为28%，4：6紧密空隙率为

30%，5：5紧密空隙率为32%，6：4紧密空隙率为35%。从各曲线和细度模数来看，3：7和4：6较比其他的好一点，细度模数为2.5~2.7之间在II区比例中占最多。

表2 不同复配比例的砂体系的密度和细度模数

砂体系	细度模数	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	松散堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率	
					松散	紧密
细砂	1.0	2670	1420	1560	47%	42%
碎屑	3.4	2650	1510	1630	43%	38%
混合(3:7)	2.7	2650	1640	1780	38%	33%
混合(4:6)	2.5	2650	1640	1780	38%	33%

续表:

砂体系	细度模数	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	松散堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率	
					松散	紧密
混合(5:5)	2.2	2670	1660	1780	38%	33%
混合(6:4)	1.9	2670	1630	1720	39%	36%

特细砂和碎屑掺不同比例下的曲线图

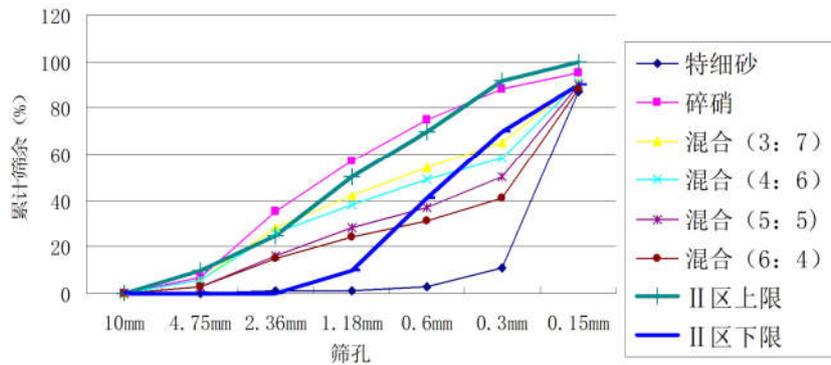


图2 细度模数为1.0的特细砂与碎屑以不同比例复配粒径分布

由表2和图2可知，特细砂细度模数为1.0，碎屑为2.5~2.7在II区比例中占较多。按紧密空隙率来讲3:7、3.4，特细砂紧密空隙率为42%，碎屑紧密空隙率为38%，4:6和5:5这三个都一样为33%，6:4的要大一点为36%。由于细颗粒过多，会需要更多的自由水来进行包裹。因此，结合紧密空隙率，我们可知3:7是比较合适和细度模数来讲3:7和4:6较比其他的好一点，细度为

2.5~2.7在II区比例中占较多。按紧密空隙率来讲3:7、4:6和5:5这三个都一样为33%，6:4的要大一点为36%。由于细颗粒过多，会需要更多的自由水来进行包裹。因此，结合紧密空隙率，我们可知3:7是比较合适的复合比例。

表3 不同复配比例的砂体系的密度和细度模数

砂体系	细度模数	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	松散堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率	
					松散	紧密
细砂	1.2	2650	1410	1600	47%	40%
碎屑	3.6	2670	1520	1720	43%	36%
混合(3:7)	2.9	2670	1720	1880	36%	30%
混合(4:6)	2.6	2670	1700	1840	36%	31%
混合(5:5)	2.5	2650	1700	1810	36%	32%
混合(6:4)	2.2	2580	1640	1780	36%	34%

特细砂和碎屑掺不同比例下的曲线图

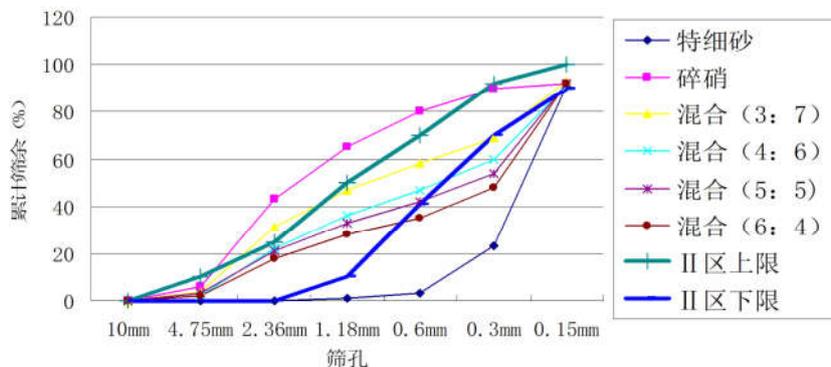


图3 细度模数为1.2的特细砂与碎屑以不同比例复配粒径分布

由图3和表3可知，特细砂细度模数为1.2，碎屑为3.6，特细砂紧密空隙率为40%，碎屑紧密空隙率为36%，3：7紧密空隙率为30%，4：6紧密空隙率为31%，5：5紧密空隙率为32%，6：4紧密空隙率为34%，按紧密空隙率来讲3：7最小，就各曲线和细度模数来讲4：6细度模数为2.6在II区比例中占较多，综合紧密空隙率和细度模数和颗粒分布来看，4：6的细度模数为2.6为最好。

细度模数0.8特细砂和3.6碎屑以3：7和4：6复配达到最佳密实度，细度模数为2.5~2.7，颗粒分布接近II区中砂，紧密空隙率为28%~30%；细度模数1.0特细砂和3.4碎屑以3：7和4：6复配达到最佳密实度区域，细度模数为2.5~2.7，颗粒分布接近II区中砂，紧密空隙率为33%；细度模数1.2特细砂和3.6碎屑以3：7、4：6和5：5复配达到最佳密实度区域，细度模数为2.5~2.9，颗粒分布接近II区中砂，紧密空隙率为30%~32%。

### 1.2.2 特细砂+中砂+碎屑+石粉四元复配

结合上一部分不同细度的特细砂和不同细度的碎屑以不同比例复配，结合复配特细混合砂的细度模数、颗粒分布和紧密空隙率来看，特细混合砂的细度模数为2.4~2.9之间，基本上能够达到较好的最佳密实度区域<sup>[1]</sup>。

为了能够更清楚的了解更加复杂的组合砂体系，对需水量、强度、压折比和紧密空隙率的影响，设计关于特细砂、中砂、碎屑和石粉组合的砂体系，确定三因素三水平的正交试验，三因素包括：砂的细度模数（细度模数为1.2、1.6和2.0）、不同石粉含量的碎屑（石粉含量为5.5%、7.5%和9.5%）和混合砂的细度模数（细度模数为2.5、2.7和2.9）。

## 2 试验及结果分析

### 2.1 砂试验

#### 2.1.1 砂的筛分析试验

表4 特细砂的各级筛余情况及细度模数

粒径/mm	5.00	2.50~5.00	1.25~2.50	0.63~1.25	0.315~0.63	0.16~0.315	筛底	细度模数
各级筛余/%	2.0	4.0	2.2	2.0	12.0	60.0	17.8	1.2

表5 天然砂的各级筛余情况及细度模数

粒径/mm	5.00	2.50~5.00	1.25~2.50	0.63~1.25	0.315~0.63	0.16~0.315	筛底	细度模数
各级筛余/%	8.0	11.4	13.0	17.4	32.4	14.0	3.8	2.6

表6 碎屑I的细度模数

粒径/mm	5.00	2.50~5.00	1.25~2.50	0.63~1.25	0.315~0.63	0.16~0.315	筛底	细度模数
各级筛余/%	5.2	32.0	20.4	16.0	10.6	6.2	9.6	3.3

表7 砂的密度试验记录汇总

砂的种类	细度模数	来源	复配比例	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密密度 (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )
			特细砂：天然中砂：碎屑：石粉			
天然中砂	2.6	天然	0：2000：0：0	2580	1810（30%）	1640（36%）
碎屑I	3.4	新开元	0：0：2000：0	2580	1690（34%）	1420（45%）
II	碎屑I+2%石粉	新开元	0：0：1960：40	2630	1720（35%）	1500（43%）
III	碎屑I+4%石粉	新开元	0：0：1920：80	2580	1780（31%）	1580（39%）
A	1.2	天然	2000：0：0：0	2630	1620（38%）	1460（44%）
B	1.6	砂A和天然中砂复配	7：3：0：0	2650	1720（35%）	1540（42%）
C	2	砂A和天然中砂复配	4：6：0：0	2600	1780（32%）	1620（38%）

砂A是天然的特细砂，砂B是由砂A和天然中砂复合而成；砂C是由砂A和天然中砂复合而成；碎屑I是新开元碎屑，碎屑II是由新开元碎屑和2%石粉复合而成，碎屑III是由新开元碎屑和4%石粉复合而成。其中2%和4%都是相对于碎屑所占的比例。

### 2.2 三因素三水平正交试验

#### 2.2.1 胶砂试验控制条件

- (1) 流动度控制保持在180±5mm；
- (2) 水泥450g：水泥采用同一批次的金峰水泥P.O42.5；
- (3) 黄砂1350g：不同种类砂的混合。

#### 2.2.2 三因素三水平特细混合砂的密度和空隙率

表8 正交试验表

	1	2	3
因素	砂的细度模数	不同含粉量的碎屑	混合砂细度模数
基准	天然中砂	/	2.6
试验1	A	I	2.5
试验2	A	II	2.7
试验3	A	III	2.9
试验4	B	I	2.7
试验5	B	II	2.9
试验6	B	III	2.5
试验7	C	I	2.9
试验8	C	II	2.5
试验9	C	III	2.7

表9 三因素三水平的混合砂的密度和空隙率

砂的种类	细度模数	来源	复配比例	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	紧密密度 (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )
			特细砂:天然中砂:碎屑:石粉			
试验1	2.5	A+I	800:0:1200:0	2520	1860(26%)	1670(34%)
试验2	2.7	A+II	600:0:1372:28	2560	1870(27%)	1680(34%)
试验3	2.9	A+III	300:0:1632:68	2560	1850(28%)	1660(35%)
试验4	2.7	B+I	800:343:1714:0	2560	1860(27%)	1710(46%)
试验5	2.9	B+II	280:120:1568:32	2630	1850(30%)	1680(51%)
试验6	2.5	B+III	630:567:2218:92	2600	1890(27%)	1680(49%)
试验7	2.9	C+I	800:1200:3714:0	2600	1880(28%)	1700(48%)
试验8	2.5	C+II	480:720:784:16	2600	1860(28%)	1680(49%)
试验9	2.7	C+III	630:945:2260:94.5	2600	1920(26%)	1720(46%)

备注:紧密密度和堆积密度括号中的百分数分别表示紧密空隙率和堆积空隙率

### 2.2.3 三因素三水平的混合胶砂正交试验分析

表10 正交试验结果汇总

因素	用水量	试验结果							
		抗折和抗压强度 (MPa)							
		3d		7d		28d		56d	
基准	244	5.0	23.1	6.1	30.5	7.1	42.3	8.7	46.2
试验1	283	5.1	25.9	5.9	34.0	7.9	44.7	8.9	47.7
试验2	278	4.9	24.3	5.4	34.1	8.6	44.8	8.8	48.7
试验3	275	5.9	29.6	7.4	36.2	9.2	49.3	9.9	52.1
试验4	273	5.3	25.1	6.7	34.8	8.6	45.0	9.6	50.8
试验5	275	5.2	24.4	6.7	34	8.2	46.1	9.0	48.2
试验6	268	5.2	23.7	5.6	32.7	7.8	42.6	8.5	47.6
试验7	272	5.3	25.1	6.7	35.4	8.2	48.3	9.0	51.5
试验8	260	5.2	23	6.6	33.2	7.3	42.7	8.2	47.9
试验9	263	5.6	22.7	5.8	31.2	7.9	44.1	9.2	48.6

## 2.3 结果分析

### 2.3.1 需水量的分析

从表10可知,对胶砂需水量影响最大的因素是砂的

细度模数,其是从1.2,1.6,2.0等三个值变动的;其次就是不同石粉含量的碎屑,从5.5%,7.5%,9.5%等三个值变动;对胶砂需水量影响最小的是混合砂细度模数(分

别为2.5、2.7和2.9)。若有效控制特细砂的细度与比例,有利于降低胶砂的需水量。

还有,从表10还可获得最佳组合:砂的细度模数为2.0,不同石粉含量的碎屑为最大值,混合砂细度模数为2.5,这个体系组合成的砂系统,胶砂需水量最优<sup>[2]</sup>。

从上述可知,从胶砂需水量角度分析,碎屑的石粉对胶砂的流动性产生正面影响,这可能是由于石粉含量较多时,相当于增加了胶砂体系的粉料总量,增加了胶砂的流动性。还有,整个胶砂体系中混合砂细度模数对胶砂的需水量影响的极差最小,这样也说明混合砂细度模数在2.5~2.9之间波动,对胶砂需水量影响程度较小。

### 2.3.2 胶砂强度的正交分析

从表10可知,从3d的强度正交分析来看,对胶砂需水量影响最大的因素是混合砂的细度模数,其是从2.5、2.7和2.9等三个值变动;其次就是不同石粉含量的碎屑,从5.5%,7.5%,9.5%等三个值变动,对28d胶砂强度影响最小的是砂的细度模数在1.2,1.6,2.0等三个值变动。从7d的强度正交分析来看,随着龄期从3天增长到7d,三个因素的极差相差越接近。从28d的强度正交分析来看,最大的影响因素是混合砂细度模数,其细度模数从2.5、2.7和2.9等三个值变动;其次就是不同石粉含量的碎屑,从5.5%,7.5%,9.5%等三个值变动,对28d胶砂强度影响最小的是砂的细度模数在1.2,1.6,2.0等三个值变动。若控制混合砂的细度模数,这有助于提高胶砂的强度。从56d的强度正交结果各因素影响程度大小与28d的强度情况一致的。

综上所述,三因素三水平的试验可知:在特细砂、中砂、碎屑和石粉等四元体系复配时,首先需有效控制特细砂的细度与比例,有利于降低胶砂的需水量;其次需控制混合砂的细度模数(2.5~2.7之间),这有助于降低混合砂复配体系的空隙率,增加砂体系的密实度,提高胶砂的强度;再者,碎屑中石粉含量在5.5%~9.5%之间对胶砂的需水量、强度、压折比和空隙率方面影响很小。

此外亦可知当细度模数0.8特细砂和3.6碎屑以3:7和4:6复配达到最佳密实度,细度模数为2.5~2.7,颗粒分布接近II区中砂,紧密空隙率为28%~30%;细度模数1.0特细砂和3.4碎屑以3:7和4:6复配达到最佳密实度区域,细度模数为2.5~2.7,颗粒分布接近II区中砂,紧密空隙率为33%;细度模数1.2特细砂和3.6碎屑以3:7、4:6

和5:5复配达到最佳密实度区域,细度模数为2.5~2.9,颗粒分布接近II区中砂,紧密空隙率为30%~32%<sup>[3]</sup>。

### 2.3.3 紧密空隙率的正交分析

从表10可知,从混合砂的紧密空隙率正交分析来看,最大的影响因素是混合砂的细度模数,其细度模数从2.5、2.7和2.9等三个值变动;其次就是不同石粉含量的碎屑,石粉含量从5.5%,7.5%,9.5%等三个值变动;影响最小的是砂的细度模数在1.2,1.6,2.0等三个值变动。这个结论与28d强度的影响因素是一致的。需控制混合砂的细度模数(2.5~2.7之间),这有助于降低混合砂复配体系的空隙率,增加砂体系的密实度<sup>[4]</sup>。

## 3 结论

(1)《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52)中建议配制混凝土时宜优先选用II区中砂,而特细砂和碎屑的颗粒分布都不在II区中砂之中,但通过按一定合理的比例复配,在细度模数和颗粒分布可以满足规范要求。

(2)采用不同细度模数的特细砂和碎屑复配时,一般复配的特细混合砂的细度模数为2.5~2.7,对应的紧密空隙率达到较低水平,进而达到特细混合砂的更加密实度区域。

(3)在特细砂、中砂、碎屑和石粉等四元体系复配时,首先需有效控制特细砂的细度与比例,有利于降低胶砂的需水量;其次需控制混合砂的细度模数,这有助于降低混合砂复配体系的空隙率,提高胶砂的强度;再者,碎屑中石粉含量在5.5%~9.5%之间对胶砂的需水量、强度和空隙率方面影响不大。

## 参考文献

- [1]洪锦祥,王嘉琪,蒋林华.石屑代砂在混凝土中的研究与应用[J].《混凝土》,2002(06):2-1
- [2]陈建大,吴德龙.碎屑在混凝土中的应用技术研究[J].《首届机制砂石生产与应用技术论坛论文集》,2010(12):23-25
- [3]王琼.复合砂配制技术及其性能研究[J].《粉煤灰》,2011(04):23
- [4]王琼,徐强,於林锋,樊俊江.复合砂混凝土的性能研究及应用效益分析[J].《2013年混凝土与水泥制品学术讨论会议论文集》,2013(07):17-18