

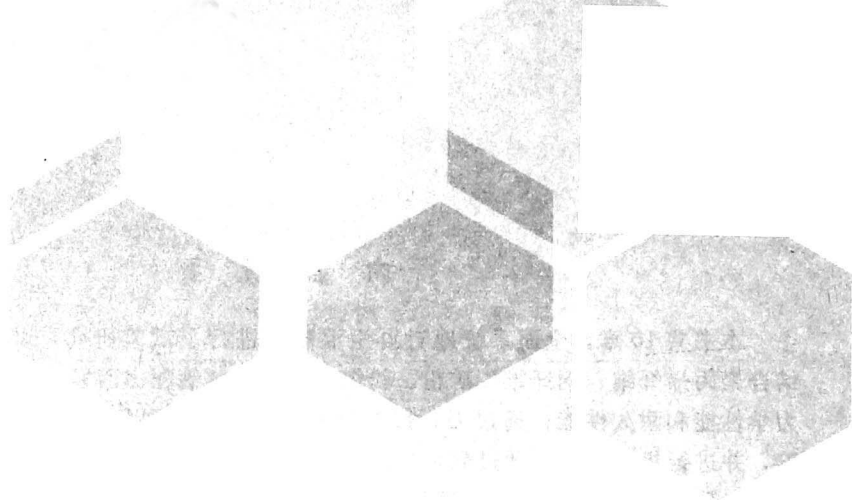
再生混凝土技术

ZAISHENG HUNNINGTU JISHU

陈爱玖 章青 王静 著

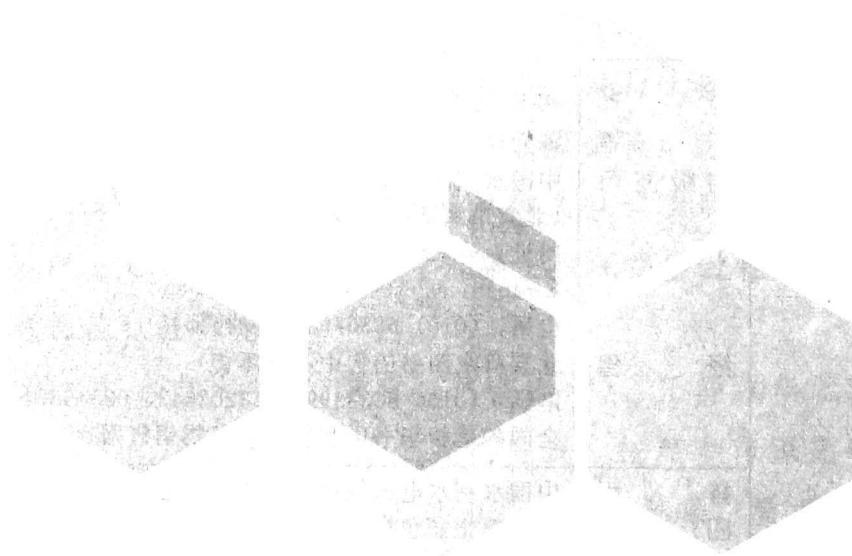


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



再生混凝土技术

陈爱玖 章青 王静 著



中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书共 10 章，全面系统地对再生混凝土进行了试验研究。以再生混凝土为基础，结合聚丙烯纤维、钢纤维、矿粉、粉煤灰、外加剂等配比因素，研究再生混凝土的基本力学性能和耐久性能；通过 CT 扫描和电镜技术，观测各因素对再生混凝土性能的影响，并进行机理分析；通过数值方法对再生混凝土试验进行模拟，所得结果与试验进行对比；研究不同骨料种类、成型方式对透水再生混凝土性能的影响；研究了不同再生骨料掺量对再生混凝土梁的抗弯性能影响。

本书可供从事城建土木工程技术人员，特别是混凝土生产和施工部门的人员学习、参考，也可供高等院校城建、建材专业的师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

再生混凝土技术 / 陈爱玖，章青，王静著. -- 北京：
中国水利水电出版社，2013. 12
ISBN 978-7-5170-1501-7

I. ①再… II. ①陈… ②章… ③王… III. ①再生—
混凝土—研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319661号

书 名	再生混凝土技术
作 者	陈爱玖 章青 王静 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 12.25 印张 290 千字
版 次	2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	40.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究



随着我国城市建设的发展,新建筑的施工和大量旧建筑物的更新改造所产生的建筑垃圾,已占到城市垃圾的30%~40%,其中的50%~60%为废弃混凝土。如何将这一资源变废为宝,解决好需求与环境的问题,已引起我国政府高度重视,再生混凝土的研究与应用也就应运而生。

本书研究了再生混凝土材料及结构的性能;将聚丙烯纤维、钢纤维与再生混凝土相结合形成纤维再生混凝土新材料,研究了其性能并建立了纤维增强理论与技术;提供了再生混凝土在不同工程应用中的配合比;系统研究了不同再生骨料掺量下再生混凝土梁的抗弯性能影响。

过去的6年中,在河南省科技攻关计划“再生混凝土的力学性能及耐久性研究”(1021022100)、郑州市科技攻关项目“再生混凝土的抗冻性研究”(10PTGS507-3)、“透水混凝土的基本性能试验研究”(0910SGYG23261-2)和郑州市生态建筑材料重点实验室课题的资助下,作者在再生混凝土材料、结构和应用等方面进行了深入研究,本书是以上工作的阶段性总结成果。

本书共10章,内容包括:材料性能,再生骨料对再生混凝土基本性能的影响,钢纤维再生混凝土试验,聚丙烯纤维再生混凝土性能试验,粉煤灰再生混凝土试验研究,活性掺合料再生混凝土力学性能及耐久性试验研究,透水混凝土性能试验,再生混凝土CT试验研究,再生混凝土细观损伤过程的数值试验,再生混凝土梁受弯性能试验研究。

本书由陈爱玖(华北水利水电大学)、章青(河海大学)、王静(华北水利水电大学)和他们的学生在试验成果的基础上共同完成。按照参与课题研究的先后顺序,他们分别是:范志甫、程枫、王凤山、吴迪、陈顺、贾亚平、杨粉、孙晓培、王璇、王辉、刘耀、赵自强、胡超、兰绍、王学军等。

在研究的过程中,得到了解伟教授、赵顺波教授、邢振贤教授、李长永副教授、盖占方高级工程师、胡志远高级工程师等专家的指导,在此表示衷心的感谢。同时,对在编写过程中参考的大量文献资料的作者们一并致谢。

由于作者水平有限，书中可能存在诸多不足甚至错误，恳请专家和读者批评指正。

作者

2013 年 10 月于郑州

目 录

前言

第 1 章 材料性能	1
1.1 再生粗骨料的特性	1
1.1.1 再生粗骨料的选择	1
1.1.2 再生粗骨料的加工	2
1.1.3 再生粗骨料的强化	3
1.2 天然骨料	4
1.3 胶凝材料	4
1.3.1 水泥	4
1.3.2 粉煤灰	5
1.3.3 矿渣微粉	6
1.4 纤维	6
1.4.1 聚丙烯纤维	6
1.4.2 钢纤维	7
1.5 外加剂	7
1.5.1 减水剂	8
1.5.2 引气剂	8
1.5.3 引气减水剂	9
第 2 章 再生骨料对再生混凝土基本性能的影响	10
2.1 配合比设计	10
2.2 混凝土试件的制作及养护	11
2.3 试验结果	11
2.4 试验结果分析	11
2.4.1 再生粗骨料掺量与混凝土坍落度的关系	11
2.4.2 再生粗骨料掺量与混凝土力学性能的关系	12
2.5 再生混凝土轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量与立方体抗压强度的关系	13
2.5.1 再生混凝土劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的关系	13
2.5.2 再生混凝土受压弹性模量与立方体抗压强度的关系	13
2.5.3 再生混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系	14

2.6	碳化试验	14
2.6.1	试验设计及试验	14
2.6.2	试验结果分析	16
2.7	小结	17
第3章	钢纤维再生混凝土试验	19
3.1	钢纤维再生混凝土基本性能的试验研究	19
3.1.1	配合比设计及试件的成型养护	19
3.1.2	试验结果分析	21
3.2	混杂纤维再生混凝土基本性能	29
3.2.1	试验方案	29
3.2.2	试验结果分析	30
3.3	正交法分析钢纤维再生混凝土性能	32
3.3.1	试验方案	32
3.3.2	力学性能试验结果分析	33
3.4	钢纤维再生混凝土冻融试验	36
3.4.1	钢纤维再生混凝土冻融试验	36
3.4.2	钢纤维再生混凝土冻融试验结果分析	36
3.5	小结	39
第4章	聚丙烯纤维再生混凝土性能试验	41
4.1	聚丙烯纤维再生混凝土试验	41
4.1.1	再生混凝土正交试验	41
4.1.2	聚丙烯纤维再生混凝土性能分析	43
4.2	再生混凝土冻融循环试验及冻融损伤模型	57
4.2.1	再生混凝土冻融循环试验方法及结果	58
4.2.2	再生混凝土冻融循环试验结果分析	59
4.2.3	再生混凝土冻融损伤模型	69
4.3	再生混凝土抗氯离子渗透试验及耐久寿命预测模型	75
4.3.1	再生混凝土抗氯离子渗透试验	76
4.3.2	再生混凝土抗氯离子渗透结果分析	77
4.3.3	冻融损伤对抗氯离子渗透性的影响	80
4.4	小结	81
第5章	粉煤灰再生混凝土试验研究	83
5.1	粉煤灰再生混凝土配合比设计及试验	83
5.2	粉煤灰再生混凝土试验结果分析	84
5.3	粉煤灰再生混凝土抗氯离子渗透性能	87
5.4	再生混凝土在海水环境下耐久寿命预测模型	88
5.5	粉煤灰再生混凝土磨耗试验	91

5.5.1	再生混凝土磨耗试验方案	92
5.5.2	再生混凝土磨耗试验方法	92
5.5.3	再生混凝土磨耗试验结果分析	93
5.6	小结	94
第6章 活性掺合料再生混凝土力学性能及耐久性试验研究		95
6.1	活性掺合料再生混凝土力学性能	95
6.1.1	活性掺合料再生混凝土试验配合比设计	95
6.1.2	活性掺合料再生混凝土试验结果	96
6.1.3	活性掺合料再生混凝土试验结果分析	97
6.2	活性掺合料再生混凝土冻融分析	103
6.2.1	活性掺合料再生混凝土冻融循环试验及结果	103
6.2.2	相对动弹性模量正交分析	105
6.2.3	含气量与相对动弹性模量和质量损失率的关系	106
6.3	活性掺合料再生混凝土抗渗性	108
6.3.1	活性掺合料再生混凝土抗渗试验方法	108
6.3.2	活性掺合料再生混凝土抗渗试验现象和结果	109
6.3.3	活性掺合料再生混凝土抗渗结果分析	110
6.3.4	水痕高度与氯离子扩散系数之间的关系	112
6.3.5	氯离子扩散系数正交分析	112
6.4	活性掺合料再生混凝土碳化试验	114
6.4.1	混凝土碳化机理	114
6.4.2	再生混凝土碳化深度结果分析	114
6.4.3	再生混凝土碳化深度与碳化龄期的关系	115
6.4.4	正交法分析各因素对碳化深度的影响	118
6.5	小结	119
第7章 透水混凝土性能试验		122
7.1	试验设计	122
7.2	孔隙率的测定	124
7.3	透水混凝土孔隙率影响因素分析	125
7.4	透水再生混凝土基本力学性能试验	126
7.4.1	抗压强度	126
7.4.2	抗折强度	126
7.4.3	劈拉强度	126
7.4.4	试验结果	127
7.5	透水再生混凝土基本力学性能影响因素分析	128
7.5.1	抗压强度影响因素分析	128
7.5.2	抗折影响因素分析	129

7.5.3	劈裂强度影响因素分析	129
7.6	抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度三者之间关系比较	130
7.7	正交法分析透水混凝土基本性能	130
7.7.1	试验方案	130
7.7.2	透水混凝土的透水性试验	131
7.8	小结	135
第8章	再生混凝土CT试验研究	137
8.1	螺旋CT成像技术	137
8.1.1	螺旋CT结构和原理	137
8.1.2	螺旋CT成像主要技术特点	138
8.2	螺旋CT试验研究	139
8.2.1	螺旋CT试验条件	139
8.2.2	螺旋CT加载设备的设计与加工	139
8.2.3	螺旋CT试验加载与扫描过程	140
8.2.4	再生混凝土螺旋CT试验结果	140
8.3	再生混凝土CT试验结果分析	143
8.3.1	再生混凝土CT图像直观分析	143
8.3.2	圆柱体CT试件的破坏形态分析	144
8.3.3	再生混凝土CT图像等值线定量分析	145
8.3.4	再生混凝土CT图像的3D重现	146
8.3.5	再生混凝土CT数与劣化演变的关系	146
8.4	再生混凝土内部裂缝分形特征研究	148
8.4.1	分形理论	148
8.4.2	再生混凝土分形维数的计算方法	149
8.4.3	再生混凝土劣化指数与分形维数的关系研究	150
8.5	小结	151
第9章	再生混凝土细观损伤过程的数值试验	152
9.1	骨料的随机生成	152
9.1.1	混凝土骨料级配理论	152
9.1.2	随机骨料方法	153
9.1.3	骨料投放原则及有效性判别	154
9.1.4	骨料的随机生成图	154
9.2	再生混凝土不同材料网格剖分	155
9.3	再生混凝土三维细观有限元模型的建立	156
9.3.1	再生混凝土各组分的本构选取	157
9.3.2	再生混凝土有限元单元信息的分布	158
9.3.3	有限元求解方法	159

9.4	单轴压缩损伤破坏过程的数值模拟及结果分析	160
9.4.1	模型参数	160
9.4.2	数值模拟结果及分析	160
9.5	小结	165
第10章	再生混凝土梁受弯性能试验研究	167
10.1	再生混凝土梁受弯性能试验设计	167
10.1.1	混凝土配合比	167
10.1.2	再生粗骨料混凝土基本力学性能	168
10.1.3	再生混凝土梁的尺寸及配筋	168
10.1.4	再生混凝土梁的制作和成型	168
10.2	再生粗骨料混凝土梁正截面受弯性能分析	169
10.2.1	再生混凝土梁正截面受力过程	169
10.2.2	跨中混凝土的平均压应变	170
10.2.3	再生混凝土梁的极限承载力试验结果与理论计算结果	171
10.2.4	试验梁正截面承载能力分析	172
10.3	再生粗骨料混凝土梁抗裂能力与裂缝分析	173
10.3.1	试验梁开裂弯矩分析	173
10.3.2	试验梁裂缝宽度分析	176
10.3.3	试验梁裂缝间距分析	178
10.4	再生混凝土梁变形性能分析	179
10.4.1	试验梁荷载挠度分析	179
10.4.2	试验梁理论计算挠度与试验值对比	179
10.5	小结	181
参考文献		183

第 1 章 材 料 性 能

本章主要介绍了再生骨料的选择、加工及强化等特性，介绍了天然骨料、水泥、粉煤灰、矿渣微粉等胶凝材料、聚丙烯纤维、钢纤维、减水剂、引气剂等原材料的性能。

1.1 再生粗骨料的特性

1.1.1 再生粗骨料的选择

建筑物或结构物解体后的混凝土经破碎分级成为再生骨料，利用再生骨料全部或部分代替混凝土中的砂石配制成的混凝土，成为再生骨料混凝土。再生骨料含水泥浆多、吸水率高、拌合物流动性差，再生骨料中含有砖块、灰渣、人造石及玻璃等对强度影响大。我国目前没有与再生骨料有关的技术标准，参考日本标准，把吸水率和稳定性作为再生骨料的指标，把再生粗骨料分为 3 类，再生细骨料分为 2 类，见表 1.1。再生混凝土的种类见表 1.2，其中再生骨料混凝土 I 类抗压强度为 18~21MPa；II 类抗压强度为 16~18MPa；III 类抗压强度为 16MPa 以下。再生骨料混凝土的应用见表 1.3。

表 1.1再生骨料的品质%

类 别	再 生 粗 骨 料			再 生 细 骨 料	
	I 类	II 类	III 类	I 类	II 类
吸水率	<3	<5	<7	<5	<10
稳定性	<12	<40	—	<10	—

表 1.2再生骨料混凝土的种类

混 凝 土 种 类	用 途	粗 骨 料	细 骨 料
I	钢筋混凝土、无筋混凝土	再生 I 类	普通骨料
II	无筋混凝土等	再生 II 类	普通骨料或再生 I 类
III	混凝土垫层	再生 III 类	再生 II 类

表 1.3再生骨料混凝土的应用

混 凝 土 种 类	结 构 物
I	桥梁下部工程，隧道护壁
II	砌块，道路附属物基础、水沟、排水槽、重力护壁，填埋混凝土等
III	基础垫层、非结构用混凝土，简易房屋混凝土基础



本书所涉及的试验用再生粗骨料均来源于废弃钢筋混凝土梁，如图 1.1 所示。参照《钻芯法检测混凝土强度技术规程》（CECS 03：2007）对该梁进行混凝土抗压强度测试。首先对废弃钢筋混凝土梁进行钻芯取样，如图 1.2 所示，从中选取直径 $d=50\text{mm}$ 、高 $h=100\text{mm}$ 的圆柱体芯样，然后将芯样切割打磨处理成直径 $d=50\text{mm}$ ，高 $h=50\text{mm}$ 的试件（图 1.3），将其放入水中进行饱水，按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081—2002）测试其抗压强度。数据处理结果见表 1.4，计算得出该废弃梁的混凝土抗压强度在 24.5~34.7MPa 之间。

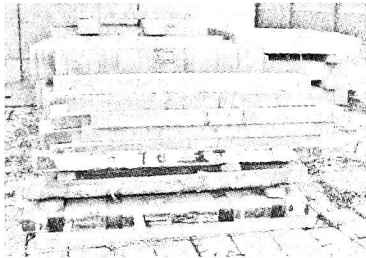


图 1.1 废弃钢筋混凝土梁

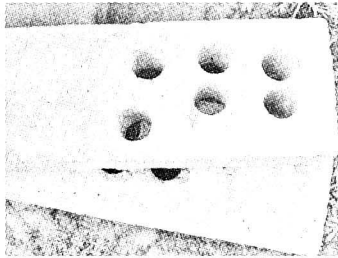


图 1.2 废弃梁取芯样

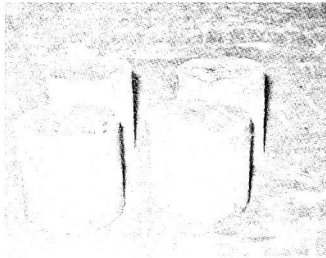


图 1.3 钻芯取样加工后的圆柱体试件

表 1.4 钻芯法检测混凝土强度

试 件 编 号	1	2	3	4	5	6
破坏荷载 (kN)	51	48	56	64	68	67
标准芯样强度 (MPa)	26.0	24.5	28.5	32.6	34.7	34.1
计算方法	$f_{cu} = \alpha \frac{P}{\pi r^2}$ 。 α 为试样高径比修正系数，当 $h/d=1$ 时， $\alpha=1$					

1.1.2 再生粗骨料的加工

用废弃混凝土梁生产再生粗骨料，由于破碎机械使混凝土受到挤压、冲撞、研磨等外力影响，再生粗骨料外表和内部存在的大量微裂纹造成损伤积累，使得混凝土块中骨料和水泥浆形成的原始界面层受到影响或破坏，骨料和水泥浆体的粘结力下降。破碎的力度越大，骨料周围包裹的水泥浆脱落就越多，生产的再生粗骨料性能就越好，越接近天然骨料的性质。对骨料的加工流程如图 1.4 所示。对废旧钢筋混凝土梁，首先人工用铁锤对其进行破碎，分离出钢筋、钢丝等杂物，再用颚式破碎机进行二次破碎，把大块混凝土破碎成再生粗骨料，用孔径为 5mm 和 40mm 的砂石筛筛出粒径小于 5mm 和大于 40mm 的再生骨料，并用水对其进行冲洗，去除表面附着的水泥浆粉末，如图 1.5~图 1.8 所示。

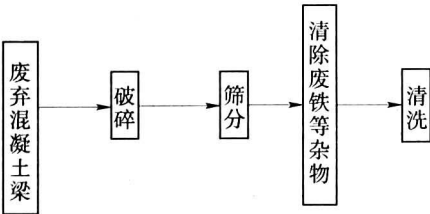


图 1.4 再生骨料生产流程图



图 1.5 人工破碎

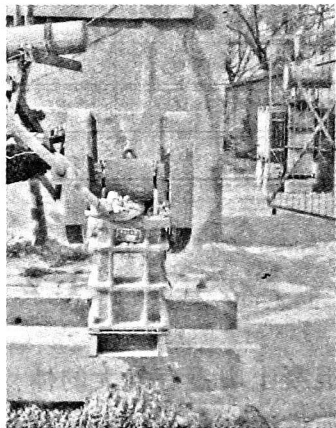


图 1.6 颞式破碎机破碎



图 1.7 人工筛分

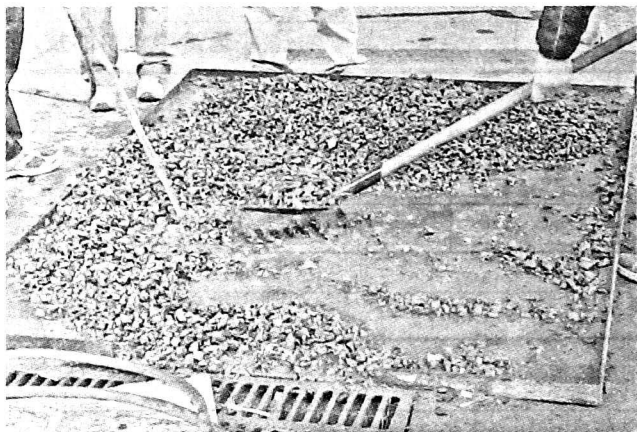


图 1.8 清洗

1.1.3 再生粗骨料的强化

再生粗骨料强度比天然骨料低，原因是废弃混凝土在破碎过程中骨料会产生一些裂缝，并且再生粗骨料的表面附着有大量的水泥砂浆，骨料与新旧水泥砂浆之间存在一些结合较弱区域。为此要对再生骨料进行强化处理，以提高再生骨料的强度。本试验用DM—Ⅱ型洛杉矶捣板式磨耗试验机对再生粗骨料进行机械强化处理，将钢球和再生粗骨料同时投入到磨耗机内，目的在于去除软弱的再生骨料颗粒和粘附在骨料颗粒表面的水泥砂浆，磨耗过程如图 1.9 所示。再生粗骨料的技术性能见表 1.5。

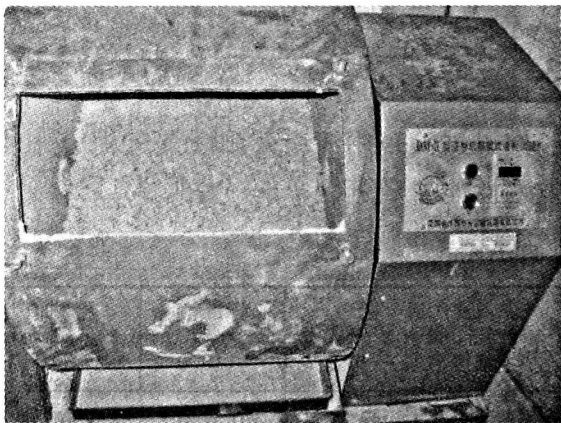


图 1.9 再生粗骨料强化处理



表 1.5 再生粗骨料的技术性能

种 类	粒径 (mm)	表观密度 (kg/m ³)	松堆密度 (kg/m ³)	吸水率 (%)	压碎指标 (%)
破碎后再生粗骨料	5~40	2390	1330	3.77	14.2
强化后再生粗骨料	5~40	2410	1460	2.98	12.5

1.2 天 然 骨 料

骨料在混凝土中占有最大的体积百分数（约 65%），其质量不容忽视。试验采用的天然粗骨料为河南新密产的碎石，用 5~20mm 和 5~40mm 两种级配进行试验，其技术性能指标见表 1.6；砂采用河南鲁山产的河砂，其实测技术性能指标见表 1.7；混凝土拌和与养护用水为郑州市自来水。

表 1.6 天然粗骨料的技术性能

种类	级配 (mm)	表观密度 (kg/m ³)	堆积密度 (kg/m ³)	空隙率 (%)	含泥量 (%)	吸水率 (%)	压碎值 (%)
碎石	5~20	2720	1460	46.0	0.30	0.40	9.6
	20~40	2710	1580	42.0	0.18	0.30	5.4

表 1.7 天然砂的物理性能指标

细度模数	表观密度 (kg/m ³)	堆积密度 (kg/m ³)	吸水率 (%)	含泥量 (%)
2.9	2630	1500	0.60	2.5

1.3 胶 凝 材 料

1.3.1 水泥

本书试验采用河南荥阳隆鑫水泥有限责任公司生产的洞林牌 P. C32.5 级水泥，其有关技术性能参数见表 1.8、表 1.9。

表 1.8 32.5 级复合硅酸盐水泥品质指标

品 质 指 标	标准值	检测值	品 质 指 标	标准值	检测值
细度 (%)	≤10.0	3.2	氧化镁 (%)	≤5.0	2.0
初凝时间 (min)	≥45	200	三氧化硫 (%)	≤3.5	2.7
终凝时间 (min)	≤600	290	烧失量 (%)	≤5.0	2.5
安定性	合格	合格	标准稠度用水量 (%)	—	30.0



表 1.9 32.5 级复合硅酸盐水泥强度指标 单位：MPa

强 度	抗 折 强 度		抗 压 强 度	
龄期	3d	28d	3d	28d
标准值	≥2.5	≥5.5	≥11.0	≥32.5
实测值	3.6	7.5	16.6	42.7

试验采用郑州天瑞牌 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥，其有关性能参数见表 1.10、表 1.11。

表 1.10 42.5 级普通硅酸盐水泥品质指标

品质指标	标准值	检测值	品质指标	标准值	检测值
标准稠度用水量（%）	—	30.0	细度（%）	≤10.0	3.0
初凝时间（min）	≥45	180	烧失量（%）	≤5.0	2.3
终凝时间（min）	≤600	280	氧化镁（%）	≤6.0	3.0
安定性	合格	合格	三氧化硫（%）	≤3.5	2.1

表 1.11 42.5 级普通硅酸盐水泥强度指标 单位：MPa

强 度	抗 折 强 度		抗 压 强 度	
龄期	3d	28d	3d	28d
标准值	≥3.5	≥7.4	≥17.0	≥42.5
实测值	5.4	8.0	29.5	46.8

1.3.2 粉煤灰

粉煤灰用作混凝土掺合料，有两方面的效果：一是可节约水泥 10%~20%；二是可以改善和提高混凝土的多项技术性能，改善新拌混凝土的工作性，降低混凝土水化热，提高混凝土抗硫酸盐性能、抗渗性，抑制碱-骨料反应等。粉煤灰对混凝土性能的影响取决于其对水泥浆体水化和亚微观结构的作用，粉煤灰的化学组成、矿物组成、颗粒细度和取代水泥量都是影响水泥-粉煤灰复合胶凝体系水硬性能的重要因素。粉煤灰对水泥浆体孔隙率和孔结构改善是粉煤灰密实效应作用的结果：一方面，粉煤灰中的未水化颗粒填充在水泥水化产物的孔隙中，将原来的大孔分割为很多细小且互不连通的小孔；另一方面，由于粉煤灰的火山灰反应生成的类似托勃莫来石次生微晶相填满了粉煤灰与水泥间水膜层的同时，又将原有水泥浆全骨架的孔隙填充，使得浆体密实度提高。粉煤灰颗粒形貌 SEM 图片如图 1.10 所示。

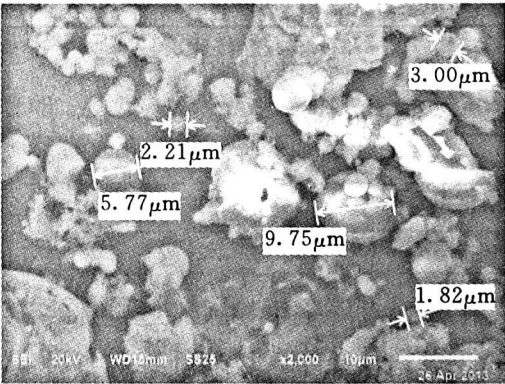


图 1.10 粉煤灰颗粒形貌 SEM 照片



本书试验采用的粉煤灰是由焦作电厂资源综合利用开发公司生产的Ⅰ级粉煤灰，需水量比为 78%，细度为 3.2%，其化学组成及性能指标见表 1.12。

表 1.12 粉煤灰的性能指标							%
项 目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
含量	61.95	23.73	6.02	2.56	1.29	0.26	0.86

1.3.3 矿渣微粉

随着粉磨工艺的发展及预拌混凝土的兴起，粒化高炉矿渣细粉作为混凝土及砂浆的掺合料，用以提高强度并改善其他性能，较大地提高了粒化高炉矿渣的利用价值。将矿渣粉作为混凝土及砂浆的掺合料，可等量取代水泥用量，而且还能显著地改善混凝土的综合性能，如改善混凝土拌合物的和易性；降低水化热的温升；提高混凝土的抗腐蚀性和耐久性；增长混凝土的后期强度。国家标准规定粒化高炉矿渣粉分为 S105、S95 和 S75 三个级别。矿渣微粉颗粒形貌 SEM 图片如图 1.11 所示。

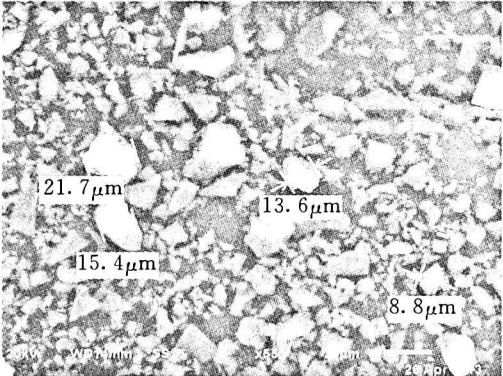


图 1.11 矿渣微粉颗粒形貌 SEM 照片

本书试验采用河南济源市国泰微粉科技有限公司生产的 S95 级矿渣微粉，其性能指标见表 1.13。

表 1.13 矿渣微粉性能指标					
密度 (g/cm ³)	比表面积 (m ² /kg)	烧失量 (%)	含水量 (%)	活 性 指 数 (%)	
				7d	28d
2.87	422	0.04	0.5	76	98

1.4 纤 维

1.4.1 聚丙烯纤维

在再生混凝土中掺入纤维是提高混凝土抗裂性能和延性的有效途径。使用较为普遍的有钢纤维、碳纤维、玻璃纤维和各种有机纤维（如聚丙烯纤维等）。钢纤维主要是提高混凝土初裂后的韧性和延性，对混凝土早期温度裂缝或收缩裂缝的贡献不大。微细有机纤维能细化混凝土结构因长期疲劳荷载作用下的裂缝，为混凝土微裂纹的自然愈合提供有利条件。本书主要研究聚丙烯纤维在氯离子环境下混凝土结构的抗渗能力。

聚丙烯纤维具有独特的表观特征和较小的纤维直径，相对于其他种类的合成纤维，在相同体积掺量下拥有更多的纤维根数及与水泥基体有良好的粘结性能。聚丙烯纤维能够与砂浆或混凝土中水泥水化物之间形成较好的粘结，同时由于加入的纤维是三维不定向分



布，有助于削弱混凝土塑性收缩，收缩的能量分散到每立方米中的千万条具有高抗拉强度和较低弹模的纤维丝上，可有效地增强混凝土的韧性，抑制微裂缝的产生和发展。再者由于无数根纤维在混凝土内部形成支撑体系，有效地阻碍骨料的离析，增加混凝土的粘聚性，从而阻止由于干缩引起的裂缝产生。所以混凝土中掺入少量聚丙烯纤维，可使混凝土内部的有害裂缝（宽度大于 0.5mm）的数量得到有效控制，降低混凝土的渗透性，有利于混凝土的硬化。因此，试验选用聚丙烯纤维作为混凝土的抗裂组分，其主要技术参数见表 1.14。

表 1.14 聚丙烯纤维产品的主要技术参数

名 称	性 能	名 称	性 能
纤维类型	束状单丝	安 全 性	无毒材料
密度 (kg/cm ³)	0.91	抗拉强度 (MPa)	≥276
吸水性	无	抗酸碱性	极高
熔点 (°C)	168	燃点 (°C)	580
导热性	极低	旦尼尔 (g/9000m)	15±2
导电性	极低	弹性模量 (MPa)	3793
拉伸极限 (%)	15	自分散性	好

1.4.2 钢纤维

钢纤维在水泥制品的应用起步比较晚，但其发展速度却相当迅猛。目前钢纤维增强混凝土已广泛应用于土木建筑工程、交通工程、水利工程、抗震工程等，应用前景十分广阔。钢纤维按外形分有圆直形、平直形、压痕形、波浪形、弯钩形等；按生产工艺分有钢丝切断法、钢板切削法、钢锭铣削法和熔抽法等。钢纤维的抗拉强度与生产纤维所用原材料有关，也与纤维的生产工艺等因素有关，钢纤维的抗拉强度一般在 350~2000MPa 之间。钢纤维的长度在 20~50mm 之间，长径比在 40~100 之间。

本书试验用钢纤维为郑州禹建钢纤维有限公司生产，性能指标见表 1.15。

表 1.15 钢纤维性能指标

种 类	指 标			
	等效直径 (mm)	平均长度 (mm)	长径比 (%)	抗拉强度 (MPa)
铣削波纹型钢纤维	0.75	40	53	600
剪切端钩型钢纤维	0.60	32	50	1000

1.5 外 加 剂

外加剂的性能及其与水泥的适应性是影响混凝土硬化前后性能的主要因素，也可以说是影响混凝土质量优劣的重要因素。选择合适的外加剂，首先是考察对于给定的胶凝系统，加入某种外加剂后，能否达到预期的效果，即在水泥和水接触后的初始 60~90min 内，大坍落度仍能保持，没有离析和泌水现象等，其次是确定外加剂的最优掺量。在配制