

新时代 建筑材料系列教材

水泥基材料测试 分析方法

史才军 元 强 编著

中国建筑工业出版社

新时代建筑材料系列教材

水泥基材料测试分析方法

史才军 元 强 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥基材料测试分析方法/史才军, 元强编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 1

新时代建筑材料系列教材

ISBN 978-7-112-21658-1

I. ①水… II. ①史… ②元… III. ①水泥基复合材料-分析方法-教材 IV. ①TB333. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 314257 号

本书是湖南大学的作者邀请业内相关专家共同编著而成。全书共包括: 水泥基材料科学基础; 颗粒材料尺寸测试分析; 水泥的水化热测试技术; 水泥水化 H 核磁共振谱测试技术; 水泥基材料自收缩测试; 水泥基材料流变性能测试; 水泥基材料孔结构; 水泥基材料微观形貌分析; X-CT 测试技术在水泥基材料中的应用; 水泥基材料的 X-射线衍射分析; 水泥基材料物相的热分析; 水泥基材料红外光谱分析; 交流阻抗技术在水泥基材料中的应用; 水泥基材料氯离子迁移测试; 混凝土中钢筋锈蚀测试技术内容。

本书可作为水泥混凝土方向研究生的教材或相关专业研究工作者的参考用书。

责任编辑: 范业庶 张伯熙

责任设计: 李志立

责任校对: 姜小莲

新时代建筑材料系列教材 水泥基材料测试分析方法 史才军 元强 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20¼ 字数: 499 千字

2018 年 4 月第一版 2018 年 4 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-21658-1

(31514)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

水泥基材料是人类社会建造各类建筑物的基础材料，也是最大宗的人造材料。一方面，建筑物结构越来越复杂，且越来越多的建筑物处于恶劣的服役环境中，这对混凝土材料的性能或功能提出了新的要求；另一方面，全球气候变暖问题日益严重，水泥及混凝土行业节能减排需求突出，新型低碳水泥混凝土技术成为了研究热点。因此，高性能、功能化、低环境负荷是传统水泥混凝土材料的发展趋势。为适应新的发展趋势，需要全面、深入地理解传统水泥混凝土材料的本质，并创新性地发展传统水泥混凝土材料。先进的测试技术是理解材料本质及发展水泥基材料的必要手段，为推动水泥混凝土行业科学与技术的进步提供了基础。

本书涵盖了水泥基原材料表征、新拌水泥基浆体以及硬化水泥基材料的各种测试技术，着重从测试原理、取样/样品制备、测试过程及注意事项、数据采集与结果处理、结果的解释与应用、与其他方法的比较等几个方面对测试方法进行全面阐述。本书既介绍测试方法的基本原理，又阐述测试方法的实际操作，较好的将基本原理与实际操作结合起来，避免了一些同类书籍过于强调基本理论而轻实际操作，或仪器操作手册重操作而轻理论的缺点。

本书是编者邀请业内相关专家结合各自的研究领域共同编制而成，章节及作者如下：第1章水泥基材料科学基础——史才军（湖南大学）、元强（中南大学）；第2章颗粒材料尺寸测试分析——元强（中南大学）、史才军（湖南大学）；第3章水泥的水化热测试技术——王德辉和史才军（湖南大学）；第4章水泥水化H核磁共振谱测试技术——姚武和佘安明（同济大学）；第5章水泥基材料自收缩测试——胡张莉和史才军（湖南大学）；第6章水泥基材料流变性能测试——焦登武和史才军（湖南大学）、安晓鹏和刘豫（中国建筑材料研究总院）；第7章水泥基材料孔结构——张云升和杨永敢（东南大学）；第8章水泥基材料微观形貌分析——郑克仁和周瑾（中南大学）；第9章X-CT测试技术在水泥基材料中的应用——张云升和杨林（东南大学）；第10章水泥基材料的X射线衍射分析——郑克仁和周瑾（中南大学）；第11章水泥基材料物相的热分析——郑克仁和周瑾（中南大学）；第12章水泥基材料红外光谱分析——潘萧颖、李宁和史才军（湖南大学）；第13章交流阻抗技术在水泥基材料中的应用——何富强（厦门理工学院）、史才军（湖南大学）；第14章水泥基材料氯离子迁移测试——元强（中南大学）、史才军（湖南大学）；第15章混凝土中钢筋锈蚀测试技术——李悦（北京工业大学）。

本书可作为土木工程材料方向本科生或研究生的教材，及相关专业研究工作者的参考书。由于编者水平有限，书中难免出现疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

第1章 水泥基材料科学基础	1
1.1 引言	1
1.2 水泥的主要品种	2
1.2.1 硅酸盐水泥	2
1.2.2 硫(铁)铝酸盐水泥	3
1.2.3 碱激发水泥	3
1.2.4 高铝水泥/铝酸盐水泥	3
1.2.5 镁质水泥	4
1.3 混凝土的原材料	4
1.3.1 水泥	4
1.3.2 骨料	6
1.3.3 化学外加剂	8
1.3.4 矿物掺合料	9
1.4 新拌水泥基材料	11
1.4.1 水泥的水化	11
1.4.2 新拌水泥基材料流变性能	14
1.4.3 新拌水泥基材料的收缩	15
1.5 硬化水泥基材料	16
1.5.1 微观结构	16
1.5.2 力学性能	18
1.5.3 耐久性	20
1.6 小结	22
参考文献	22
第2章 颗粒材料尺寸测试分析	24
2.1 引言	24
2.1.1 颗粒材料尺寸的表征	24
2.2 颗粒材料尺寸测试方法	28
2.2.1 颗粒粒径测试方法	28
2.2.2 比表面积测试法	30
2.3 测试方法及原理	30
2.3.1 激光粒度分析法	30

2.3.2 比表面积-气体透过法	31
2.3.3 BET 比表面积	32
2.4 取样/样品制备	32
2.4.1 取样	32
2.4.2 激光粒度分析法的样品制备	32
2.4.3 透气法的样品制备	33
2.4.4 BET 法的样品制备	33
2.5 测试过程及注意事项	33
2.5.1 激光粒度分析	33
2.5.2 比表面积-气体透过法	34
2.5.3 BET 比表面积	35
2.6 数据采集和结果处理	36
2.6.1 激光粒度分析	36
2.6.2 比表面积-气体透过法	36
2.6.3 BET 比表面积	37
2.7 结果的解释和应用	38
2.8 与其他测试方法的比较	38
2.9 小结	40
参考文献	41
第3章 水泥的水化热测试技术	43
3.1 引言	43
3.2 测试方法及原理	43
3.3 取样/样品制备	44
3.4 测试过程及注意事项	44
3.4.1 仪器	45
3.4.2 校准	45
3.4.3 搅拌	45
3.4.4 测量	45
3.4.5 评价	45
3.5 数据采集和结果处理	45
3.5.1 等温量热仪	46
3.5.2 半绝热量热仪	46
3.6 结果的解释和应用	47
3.6.1 水化热测试	48
3.6.2 温度对水化的影响	48
3.6.3 水灰比对水化的影响	48
3.6.4 水化热和凝结时间及强度间的关系	49
3.6.5 硅酸盐水泥石膏掺量的优化	49

3.6.6 辅助性胶凝材料的活性·····	50
3.6.7 外加剂对水泥水化的影响·····	51
3.6.8 干混砂浆·····	52
3.7 与其他测试方法的比较·····	52
3.8 小结·····	53
参考文献·····	53
第4章 水泥水化H核磁共振谱测试技术 ·····	56
4.1 引言·····	56
4.2 测试方法及原理·····	56
4.2.1 核磁共振基本原理·····	56
4.2.2 弛豫现象·····	57
4.2.3 弛豫时间的测量·····	58
4.2.4 多孔介质中流体的弛豫·····	59
4.2.5 弛豫理论与机理·····	59
4.2.6 多孔道的弛豫与反演·····	62
4.2.7 实验仪器·····	63
4.3 取样/样品制备·····	64
4.4 测试过程及注意事项·····	64
4.5 数据采集和结果处理·····	64
4.6 结果的解释和应用·····	65
4.6.1 氢质子弛豫谱与新拌浆体中水的状态与分布·····	65
4.6.2 氢质子弛豫时间与水化过程的关系·····	66
4.6.3 氢质子弛豫信号量与水化过程中物理结合水的演变关系·····	69
4.7 与其他测试方法的比较·····	71
4.8 小结·····	71
参考文献·····	72
第5章 水泥基材料自收缩测试 ·····	73
5.1 引言·····	73
5.2 测试方法及原理·····	74
5.2.1 体积测试法·····	74
5.2.2 长度测试法·····	75
5.2.3 间接测试法·····	77
5.3 取样/样品制备·····	79
5.3.1 体积测试法·····	79
5.3.2 长度测试法·····	79
5.4 测试过程及注意事项·····	79
5.4.1 体积测试法·····	79

5.4.2	长度测试法	79
5.5	数据采集和结果处理	81
5.5.1	自收缩零点的测试和确定	81
5.5.2	结果处理	81
5.6	结果的解释和应用	82
5.6.1	水泥矿物组成对自收缩的影响	82
5.6.2	水灰比对自收缩的影响	83
5.6.3	辅助胶凝材料对自收缩的影响	83
5.6.4	其他因素对自收缩的影响	83
5.7	与其他测试方法的比较	84
5.8	小结	85
	参考文献	85
第6章	水泥基材料流变性能测试	90
6.1	概述	90
6.2	测试方法及原理	93
6.2.1	ICAR 流变仪工作原理	94
6.2.2	ConTec Visco 5 流变仪工作原理	98
6.3	样品制备	98
6.4	测试过程及注意事项	98
6.4.1	ICAR 流变仪	98
6.4.2	ConTec Visco 5 流变仪	100
6.5	数据采集与结果处理	102
6.6	结果解释和应用	104
6.7	与其他测试方法的比较	105
6.8	小结	108
	参考文献	108
第7章	水泥基材料孔结构	110
7.1	引言	110
7.2	压汞法测孔的基本理论	110
7.3	压汞测试方法	112
7.3.1	电容法	112
7.3.2	高度法	112
7.3.3	电阻法	112
7.4	取样/样品制备	114
7.4.1	样品制备	114
7.4.2	试样处理	114
7.5	测试过程及注意事项	115

7.5.1	操作方法	115
7.5.2	注意事项	116
7.6	压汞测孔的误差问题	116
7.6.1	孔形的误差	116
7.6.2	接触角的误差	116
7.6.3	汞的表面张力	117
7.7	压汞法分析水泥基材料常用的表征参数	117
7.7.1	孔隙率	118
7.7.2	孔径分布	118
7.7.3	表面积	118
7.7.4	孔隙体积分形维数	119
7.8	MIP 表征大掺量粉煤灰混凝土水化过程孔结构变化	119
7.9	与其他方法的比较	121
7.9.1	显微观察法	122
7.9.2	等温吸附法	122
7.9.3	小角 X 射线散射 (SAXS)	124
7.10	小结	125
	参考文献	125
第 8 章	水泥基材料微观形貌分析	127
8.1	引言	127
8.2	测试方法及原理	127
8.2.1	扫描电子显微镜 (SEM)	127
8.2.2	环境扫描电镜 (ESEM)	130
8.3	取样/样品制备	130
8.3.1	取样	130
8.3.2	SEM 的样品制备	131
8.3.3	BSE 的样品制备	131
8.3.4	喷涂处理	134
8.3.5	试样储存	135
8.4	测试过程及注意事项	135
8.4.1	试验参数	135
8.4.2	图像采集	136
8.4.3	物相识别	137
8.4.4	微区成分分析	139
8.4.5	图像分析	142
8.5	小结	148
	参考文献	148

第9章 X-CT 测试技术在水泥基材料中的应用	151
9.1 引言	151
9.2 测试方法及原理	151
9.3 样品制备	152
9.3.1 孔结构测试	152
9.3.2 硬化水泥浆体的碳化测试	153
9.3.3 原位监测水分传输	153
9.3.4 纤维增强水泥基材料纤维空间分布	153
9.4 测试过程及注意事项	153
9.4.1 测试过程	153
9.4.2 注意事项	154
9.5 数据采集和结果处理	154
9.6 结果的解释与应用	155
9.6.1 孔结构	155
9.6.2 硬化水泥浆体的碳化过程	156
9.6.3 原位监测水分传输	156
9.6.4 纤维增强水泥基材料纤维空间分布	158
9.7 与其他测试方法的比较	160
9.8 小结	160
参考文献	160
第10章 水泥基材料的 X-射线衍射分析	163
10.1 引言	163
10.2 测试方法及原理	163
10.2.1 X-射线的产生	163
10.2.2 X-射线粉末衍射	163
10.2.3 物相定性分析	164
10.2.4 物相定量分析	165
10.2.5 Rietveld 方法	166
10.3 取样/样品制备	166
10.4 测试过程及注意事项	170
10.4.1 试验参数设置	170
10.4.2 分析软件及常用数据库	170
10.5 定性与定量分析	172
10.5.1 物相定性分析	172
10.5.2 定量分析	176
10.6 与其他方法的比较	182
10.6.1 水化程度测试比较	182

10.6.2	氢氧化钙	183
10.6.3	钙矾石	184
10.6.4	非晶体	185
10.7	小结	185
	参考文献	185
第 11 章	水泥基材料物相的热分析	187
11.1	引言	187
11.2	测试方法及原理	187
11.3	取样/样品制备	188
11.4	测试过程及注意事项	190
11.4.1	浮力及对流的影响	190
11.4.2	升温速率	190
11.4.3	试验气氛	190
11.4.4	坩埚的影响	190
11.4.5	测试过程中注意避免试样变化	190
11.5	结果处理	191
11.5.1	基线校正	191
11.5.2	数据处理	191
11.6	结果的解释和应用	191
11.6.1	常见水化物相的 TG-DTG 曲线	191
11.6.2	定量分析	192
11.6.3	试样处理对 TGA 结果的影响	195
11.7	小结	195
	参考文献	196
第 12 章	水泥基材料红外光谱分析	197
12.1	引言	197
12.2	测试方法及原理	197
12.2.1	红外吸收的基本原理	197
12.2.2	FTIR 光谱仪原理	201
12.3	取样/样品制备	203
12.3.1	样品和溴化钾	204
12.3.2	研磨	204
12.3.3	压片	204
12.4	测试过程及注意事项	205
12.4.1	分辨率	205
12.4.2	信噪比	205
12.4.3	扫描次数	205

12.5 数据和结果处理	205
12.5.1 坐标的变换.....	206
12.5.2 基线校正.....	206
12.5.3 光谱平滑.....	206
12.5.4 光谱差减.....	206
12.5.5 定量分析.....	207
12.6 结果的解释和应用	207
12.6.1 水泥熟料.....	208
12.6.2 水化过程.....	208
12.6.3 水化产物.....	210
12.7 与其他测试方法的比较	214
12.8 小结	214
参考文献.....	215
第13章 交流阻抗技术在水泥基材料中的应用	217
13.1 引言	217
13.2 交流阻抗谱 (ACIS) 的测试原理	218
13.2.1 ACIS 上的容抗弧	218
13.2.2 ACIS 测试的工作假定	219
13.2.3 ACIS 中的参数意义	219
13.3 取样/样品制备	219
13.3.1 样品的形状.....	219
13.3.2 样品的尺寸.....	220
13.4 测试过程及注意事项	221
13.4.1 测试过程中的参数选择.....	221
13.4.2 测试过程中的注意事项.....	224
13.5 阻抗数据采集和结果处理	225
13.5.1 阻抗数据采集.....	225
13.5.2 阻抗测试结果的处理.....	225
13.6 水泥基材料 ACIS 测试结果的解析和应用	229
13.6.1 用于水泥基材料 ACIS 解析的微观结构模型.....	229
13.6.2 水泥基材料介电常数的测量.....	232
13.6.3 混凝土长期及耐久性的测量.....	233
13.7 与其他测试方法的比较	236
13.7.1 用其他测试方法验证交流阻抗测试的微观结构变化规律.....	237
13.7.2 ACIS 解析参数与孔溶液浓度及孔隙率之间的关系	238
13.8 小结	238
参考文献.....	239

第 14 章 水泥基材料氯离子迁移测试	247
14.1 前言	247
14.2 测试方法及原理	252
14.2.1 电通量法	252
14.2.2 自然浸泡法	252
14.2.3 快速电迁移法	252
14.3 样品制备	254
14.3.1 电通量法	254
14.3.2 自然扩散法	254
14.3.3 扩散电迁移法	254
14.4 测试过程及注意事项	254
14.4.1 电通量法	254
14.4.2 自然浸泡法	256
14.4.3 快速电迁移法	256
14.5 数据采集与结果处理	259
14.5.1 电通量法	259
14.5.2 自然浸泡法	259
14.5.3 快速电迁移法	259
14.6 结果的解释和应用	259
14.6.1 电通量法	259
14.6.2 自然浸泡法	260
14.6.3 快速电迁移法	260
14.7 几种方法测试结果的比较	261
14.8 小结	263
参考文献	264
第 15 章 混凝土中钢筋锈蚀测试技术	267
15.1 引言	267
15.1.1 破损检测法概述	267
15.1.2 非破损检测法概述	269
15.2 半电池电位法	280
15.2.1 前言	280
15.2.2 测试原理	281
15.2.3 取样和样品制备	281
15.2.4 测试过程及注意事项	283
15.2.5 数据采集和结果处理	284
15.2.6 结果的解释和应用	285
15.2.7 与其他测试方法的比较	286

15.2.8	小结	286
15.2.9	半电池电位法检测实例	287
15.3	线性极化法	289
15.3.1	前言	289
15.3.2	测试原理	290
15.3.3	取样和样品制备	290
15.3.4	测试过程及注意事项	291
15.3.5	数据采集和结果处理	292
15.3.6	结果的解释和应用	292
15.3.7	与其他方法的比较	293
15.3.8	小结	294
15.3.9	线性极化法检测实例	294
15.4	极化曲线法	297
15.4.1	前言	297
15.4.2	测试原理	298
15.4.3	新拌砂浆法	299
15.4.4	硬化砂浆法	300
15.4.5	极化曲线法检测实例	303
	参考文献	306

第 1 章 水泥基材料科学基础

1.1 引言

水泥混凝土是由水泥、砂、石、水、矿物掺合料和化学外加剂等组成的建筑材料，是世界上最大宗的人造材料，也是人类最主要的建筑材料。近年来，随着经济的高速发展，我国水泥的年产量已居世界首位，2014 年产量近 24 亿吨，占世界总年产量的 60% 左右 (图 1-1)^[1]。混凝土年使用量虽未见准确的统计资料，但如果所有产出水泥均用于生产混凝土，可推算我国混凝土年使用量逾 50 亿 m³ (按每方混凝土 400kg 水泥估算)。当然由于我国近年来水泥工业的产能过剩，实际并未使用如此大量的混凝土。但混凝土依旧是我国工业体系中应用量最大的材料之一。

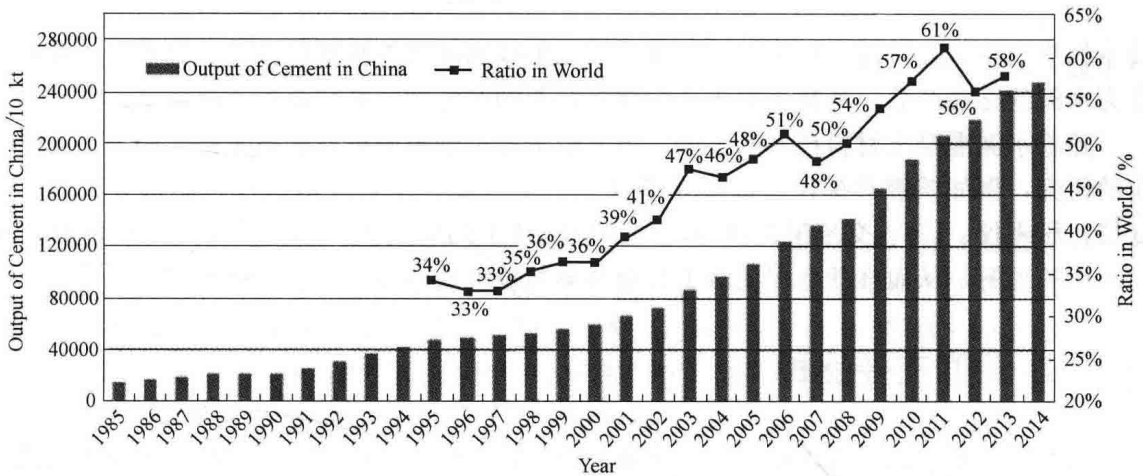


图 1-1 我国水泥产量及其所占世界比例^[1]

水泥的生产过程决定了它的高耗能及高污染性。“两磨一烧”的水泥生产过程包括磨细原材料，磨细熟料和煅烧熟料，其中煅烧熟料工序将 CaCO_3 烧成 CaO 而释放出 CO_2 ，并且需要将熟料烧至 1450°C ，能耗巨大，而两次磨细工艺亦耗能巨大。因此，水泥生产是个极为耗能，并产生大量温室气体 CO_2 的过程。各国家及各行业的温室气体排放如图 1-2 所示。水泥工业排放的温室气体占整个工业的 15%^[3]。在温室效应导致全球变暖的大背景下，减少温室气体排放成为了各国经济发展所要考虑的重要因素。我国 CO_2 排放量仅次于美国，占全球总量的 22%。我国政府承诺 2020 年比 2005 年降低 40%~45% 的 CO_2 排放量^[2]，而建筑行业是国家节能减排的重要行业，应为国家节能减排目标的实现做出相应贡献。

科学技术的进步是推动水泥工业节能减排的主要动力，近年来我国水泥工业由于科学

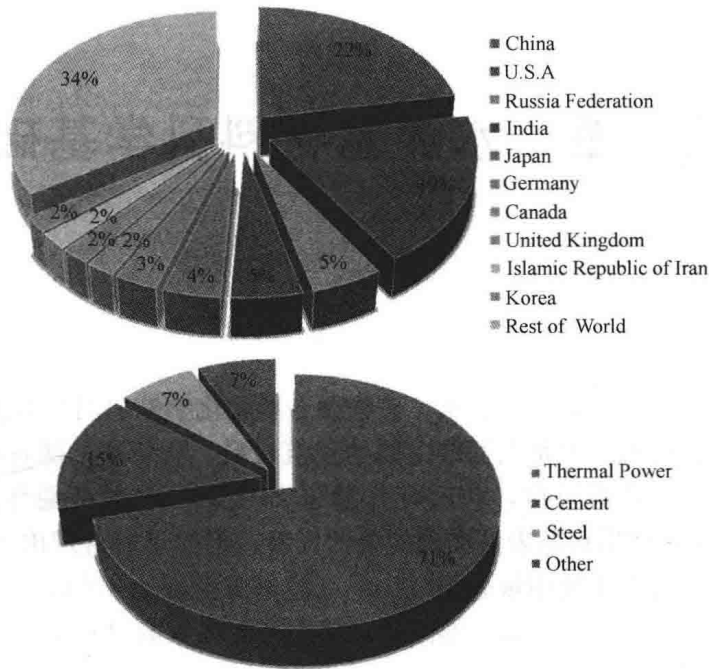


图 1-2 各国家和工业 CO₂ 排放比例^[2]

技术的进步在节能减排方面取得了巨大成果，但我国的节能减排任务仍十分艰巨。混凝土作为水泥的终端产品，其技术的进步对建筑行业的节能减排同样具有重要意义。

随着水泥混凝土材料技术的发展，越来越多先进的检测设备和技術被应用于水泥混凝土的研究，例如核磁共振仪、红外光谱仪、扫描电镜、X-射线衍射仪、热重分析仪、流变仪、压汞仪、CT、交流阻抗仪等，先进检测技术的应用极大的提升了对水泥混凝土材料本质的理解，从而推动水泥混凝土行业科学与技术的进步。

1.2 水泥的主要品种

人类建筑的演化过程反映了人类文明的进程，而建筑的形式首先取决于建筑所用的材料。人类用了近千年的时间，才从古罗马人用的罗马“水泥”发展到现代水泥。1824年英国人 Joseph Aspdin 获得了第一个波特兰硅酸盐水泥专利，标志着现代水泥的开端。现代水泥的发明为人类文明和城市的发展提供了必要的物质基础。现代水泥种类较多，根据其矿物组成，可分为五大类：(1) 硅酸盐水泥；(2) 硫（铁）铝酸盐水泥；(3) 碱激发水泥；(4) 高铝水泥/铝酸盐水泥；(5) 镁质水泥。其中硅酸盐水泥占市场应用和研究的绝对主体，下面简单介绍这几类水泥的组成和特性：

1.2.1 硅酸盐水泥

自 1824 年波特兰水泥发明以来，历经百余年的发展，形成了系列硅酸盐水泥。该水泥系列的主要特征是熟料矿物组成以 C₃S 和 C₂S 为主，该矿物决定了硅酸盐水泥的基本性能，如强度发展规律及耐久性等。硅酸盐水泥是人类基础设施建设采用的最主要的水泥品种。虽然硅酸盐水泥的生产是个高耗能、高污染的过程，各国科研人员也正在寻找硅酸

盐水泥的替代品,但在可预见的未来内,硅酸盐水泥在人类基础设施建设中的地位仍不可取代^[4-7]!因此,本书介绍的检测技术主要基于硅酸盐水泥混凝土。

1.2.2 硫(铁)铝酸盐水泥

20世纪70年代,中国建筑材料研究院发明了硫铝酸盐水泥^[8]。2000年,我国硫铝酸盐水泥产量只有67.25万吨。2005年,我国硫(铁)铝酸盐水泥产量达到了125.3万吨。目前,我国生产硫铝酸盐水泥的企业约30家,全国硫铝酸盐水泥产量基本稳定在125万吨左右。

硫铝酸盐水泥是以适量的石灰石、矾土和石膏为原料,在1300~1350℃温度下煅烧而成的以无水硫铝酸钙(C_4A_3S)和硅酸二钙(C_2S)为主要矿物组成的熟料,掺加适量混合材共同粉磨而成的水硬性胶凝材料^[8-9]。硫铝酸盐水泥包括快硬硫铝酸盐水泥、高强硫铝酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥、自应力硫铝酸盐水泥、低碱度硫铝酸盐水泥等5个品种。铁铝酸盐水泥包括快硬铁铝酸盐水泥、高强铁铝酸盐水泥、自应力铁铝酸盐水泥等4个水泥品种。硫铝酸盐水泥的水化反应主要是硫铝酸钙与水反应生成钙矾石,硅酸二钙与水反应生成CSH凝胶和氢氧化钙。

硫(铁)铝酸盐水泥的特点是早强、高强、高抗腐蚀性、高抗渗性,但由于硫(铁)铝酸盐水泥的碱度较低($pH < 12$),不能在钢筋表面形成保护膜而阻止钢筋锈蚀,因此该水泥较少与钢筋组合使用,大大限制了该水泥的广泛应用,而主要用于抢修工程、玻璃纤维增强水泥基材料、以及高腐蚀性工程等。

1.2.3 碱激发水泥

1930年,Kuhl首次研究了矿粉和苛性碱混合材料的凝结硬化行为。Glukhovsky首次发现低碱性钙或黏土与碱金属溶液组成的浆体具有胶凝性。碱激发水泥的品种繁多,根据前驱体材料的种类可分为碱-胶凝体系 $Me_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 和碱-碱土胶凝体系 $Me_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ^[4,10-11]。碱-碱土胶凝体系在早期受到了大量的关注,直到最近10年,碱-胶凝体系才成为研究热点,亦称地聚合物。Shi等^[10]将碱激发水泥根据其原材料的不同分为碱-激发矿渣基水泥、碱-激发火山灰基水泥、碱-激发火山灰/矿渣基水泥、碱-激发铝酸钙复合水泥、碱-激发波特兰复合水泥。

碱-激发水泥最大限度的利用了各种工业副产品,且其生产过程不涉及 CO_2 温室气体的排放,但碱-激发水泥的一些内在缺陷阻碍了碱激发水泥混凝土的广泛应用,包括:1)由于碱的析出并与空气中 CO_2 的反应,碱激发水泥混凝土表面易出现风化、泛白霜;2)碱激发水泥混凝土的干燥收缩较大,易出现干缩裂缝;3)碱激发水泥混凝土在干燥条件下的碳化速度非常快,不利于钢筋保护;4)混凝土由于碱-激发水泥涉及各种不同的激发剂和胶凝体系,其质量控制难以保证,水化机理亦未完全清楚;5)用于波特兰水泥的外加剂对碱-激发水泥可能不适用。但在全球倡导节能减排的背景下,碱-激发水泥成为了部分替代波特兰水泥的主要候选者,各国正在投入大量的人力和物力进行科技攻关。

1.2.4 高铝水泥/铝酸盐水泥

1908年,法国拉法基公司的研究人员申请了铝酸盐水泥的专利。高铝水泥/铝酸盐水