



HUNNINGTU

ZHILIANG KONGZHI YU JIANCE JISHU

混凝土 质量控制与 检测技术

张仁瑜 王 征 孙盛佩 编著



化学工业出版社



HUNNINGTU
ZHILIANG KONGZHI YU JIANCE JISHU

混凝土

质量控制与 检测技术



张仁瑜 王 征 孙盛佩 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容涉及混凝土原材料质量控制、混凝土配合比设计、混凝土生产质量控制、早期推定混凝土强度试验方法、混凝土强度验收、混凝土强度现场检测技术、混凝土缺陷现场检测技术,尝试将工业与民用建筑中混凝土生产的全过程进行叙述,力求读者对混凝土的整个生产工艺的质量控制有所了解,对出现的质量问题可以提出技术检测方案,为最终解决问题提供技术依据。

本书适合工程设计人员,材料检验、施工技术、工程验收人员,监理人员等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土质量控制与检测技术/张仁瑜,王征,孙盛佩
编著. —北京:化学工业出版社, 2007.9
ISBN 978-7-122-01040-7

I. 混… II. ①张…②王…③孙… III. ①混凝土-
质量控制②混凝土-检测 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 134922 号

责任编辑:郭乃铎 马燕珠
责任校对:陶燕华

文字编辑:孙凤英
装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数247千字 2008年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

混凝土是我国最大宗的建筑材料，在工程建设中出现过许多质量问题，发生质量问题最主要的原因是许多工程技术人员对混凝土的质量不够重视，认为混凝土是简单的水泥、砂子、石子加水搅拌就可以了，缺少基本的质量控制。虽然随着预拌混凝土的普及，混凝土的质量得到了较大的提高，但在激烈的市场竞争和原材料资源日趋紧张的情况下，各种质量问题仍时有发生。

本书尝试将工业与民用建筑中混凝土生产的全过程进行叙述，力求读者对混凝土的整个生产工艺的质量控制有所了解，对出现的质量问题可以提出技术检测方案，为最终解决问题提供技术依据。本书内容涉及混凝土原材料质量控制、混凝土配合比设计、混凝土生产质量控制、早期推定混凝土强度试验方法、混凝土强度验收、混凝土强度现场检测技术、混凝土缺陷现场检测技术。

本书由中国建筑科学研究院建筑材料研究所张仁瑜、王征和台州市建设工程质量检测中心孙盛佩共同编写。书稿完成后，承蒙西安建筑科技大学耿维恕教授对书稿进行了审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，为本书的最后出版付出了辛勤的劳动，在此向耿维恕教授致以衷心的感谢！

限于作者的知识，书中不妥之处在所难免，请广大读者批评指正。

编著者

2007年5月于北京

目 录

第 1 章 概论	1
第 2 章 混凝土原材料质量控制	3
2.1 水泥	3
2.1.1 水泥的生产工艺	3
2.1.2 水泥的组成	4
2.1.3 水泥混合材	5
2.1.4 常见的水泥种类	6
2.1.5 质量指标	7
2.1.6 水泥质量控制	10
2.2 骨料	11
2.2.1 粗骨料	12
2.2.2 质量指标	12
2.2.3 粗骨料质量控制	16
2.2.4 细骨料	17
2.2.5 质量指标	17
2.2.6 砂质量控制	19
2.3 水	20
2.3.1 概述	20
2.3.2 水质量指标	21
2.3.3 水质量控制	22
2.4 矿物掺和料	22
2.4.1 粉煤灰	23
2.4.2 粒化高炉矿渣粉	25
2.4.3 硅灰	26
2.4.4 其他矿物掺和料	28
2.4.5 矿物掺和料质量控制	29
2.5 外加剂	31
2.5.1 减水剂	31
2.5.2 引气剂	33

2.5.3 缓凝剂	34
2.5.4 早强剂	34
2.5.5 防冻剂	36
2.5.6 膨胀剂	38
2.5.7 外加剂质量控制	40

第3章 混凝土配合比设计 46

3.1 混凝土性能确定	46
3.1.1 经济性	46
3.1.2 和易性	47
3.1.3 强度	50
3.1.4 变形	52
3.1.5 长期性能与耐久性能	57
3.2 混凝土配合比设计	69
3.2.1 普通混凝土配合比设计	69
3.2.2 有特殊要求的混凝土配合比设计	76

第4章 混凝土生产质量控制 81

4.1 混凝土拌合物质量控制	81
4.1.1 混凝土的搅拌	85
4.1.2 混凝土的运输	89
4.1.3 混凝土的泵送	90
4.1.4 混凝土的浇筑	91
4.1.5 混凝土的养护	95
4.2 混凝土强度质量控制	98
4.2.1 混凝土强度分布	99
4.2.2 混凝土强度质量控制	100

第5章 早期推定混凝土强度试验方法 104

5.1 混凝土加速养护法	105
5.1.1 沸水法	106
5.1.2 热水法	107
5.1.3 温水法	107
5.2 砂浆促凝压蒸法	107
5.3 早龄期法	109

5.4	混凝土强度关系式的建立与强度的推定	109
5.5	早期推定混凝土强度的应用	110
5.5.1	混凝土配合比的早期推测	110
5.5.2	混凝土强度的早期控制	110

第6章 混凝土强度验收 114

6.1	混凝土强度试验	114
6.1.1	抗压强度试验	114
6.1.2	抗拉强度试验	116
6.1.3	抗折强度试验	117
6.2	混凝土强度验收	118
6.2.1	抽样检验	118
6.2.2	混凝土强度检验评定	122

第7章 混凝土强度现场检测技术 127

7.1	回弹法检测混凝土强度	127
7.1.1	基本原理	128
7.1.2	回弹仪	129
7.1.3	回弹法测强度的影响因素	131
7.1.4	回弹曲线	132
7.1.5	回弹法检测技术	134
7.1.6	混凝土强度推定	136
7.2	钻芯法检测混凝土强度	140
7.2.1	检测设备	140
7.2.2	影响芯样强度的因素	143
7.2.3	芯样制作	145
7.2.4	芯样混凝土强度试验	148
7.3	拔出法检测混凝土强度	148
7.3.1	预埋拔出法	149
7.3.2	后装拔出法	153
7.3.3	拔出法测强曲线	157
7.3.4	工程检测要点	158
7.3.5	拉剥试验	160

第8章 混凝土缺陷现场检测技术 162

8.1	超声波基础	162
8.1.1	频率、波长及声速	163

8.1.2	波形	163
8.1.3	超声波声速	164
8.1.4	超声波的反射与折射	165
8.2	超声检测设备	167
8.2.1	超声仪	167
8.2.2	换能器	170
8.3	超声检测的基本原理	173
8.4	影响超声检测的因素	174
8.5	超声法检测混凝土缺陷	174
8.5.1	裂缝深度检测	175
8.5.2	不密实区和空洞检测	178
8.5.3	混凝土结合面质量检测	181
8.5.4	表面损伤层检测	182
8.5.5	灌注桩混凝土缺陷检测	184
8.5.6	钢管混凝土缺陷检测	186
8.6	冲击回波法简介	188
8.6.1	介绍	188
8.6.2	基本原理	188
8.6.3	仪器设备	189
8.6.4	信号分析方法	191
8.6.5	示例说明	192
8.6.6	ASTM 标准	192
8.6.7	FFT 频谱分析	193
参考文献		195

8.1	混凝土无损检测技术	1.1.1
8.2	混凝土无损检测技术	1.1.2
8.3	混凝土无损检测技术	1.1.3
8.4	混凝土无损检测技术	1.1.4
8.5	混凝土无损检测技术	1.1.5
8.6	混凝土无损检测技术	1.1.6
8.7	混凝土无损检测技术	1.1.7
8.8	混凝土无损检测技术	1.1.8
8.9	混凝土无损检测技术	1.1.9
8.10	混凝土无损检测技术	1.1.10
8.11	混凝土无损检测技术	1.1.11
8.12	混凝土无损检测技术	1.1.12
8.13	混凝土无损检测技术	1.1.13
8.14	混凝土无损检测技术	1.1.14
8.15	混凝土无损检测技术	1.1.15
8.16	混凝土无损检测技术	1.1.16
8.17	混凝土无损检测技术	1.1.17
8.18	混凝土无损检测技术	1.1.18
8.19	混凝土无损检测技术	1.1.19
8.20	混凝土无损检测技术	1.1.20
8.21	混凝土无损检测技术	1.1.21
8.22	混凝土无损检测技术	1.1.22
8.23	混凝土无损检测技术	1.1.23
8.24	混凝土无损检测技术	1.1.24
8.25	混凝土无损检测技术	1.1.25
8.26	混凝土无损检测技术	1.1.26
8.27	混凝土无损检测技术	1.1.27
8.28	混凝土无损检测技术	1.1.28
8.29	混凝土无损检测技术	1.1.29
8.30	混凝土无损检测技术	1.1.30
8.31	混凝土无损检测技术	1.1.31
8.32	混凝土无损检测技术	1.1.32
8.33	混凝土无损检测技术	1.1.33
8.34	混凝土无损检测技术	1.1.34
8.35	混凝土无损检测技术	1.1.35
8.36	混凝土无损检测技术	1.1.36
8.37	混凝土无损检测技术	1.1.37
8.38	混凝土无损检测技术	1.1.38
8.39	混凝土无损检测技术	1.1.39
8.40	混凝土无损检测技术	1.1.40
8.41	混凝土无损检测技术	1.1.41
8.42	混凝土无损检测技术	1.1.42
8.43	混凝土无损检测技术	1.1.43
8.44	混凝土无损检测技术	1.1.44
8.45	混凝土无损检测技术	1.1.45
8.46	混凝土无损检测技术	1.1.46
8.47	混凝土无损检测技术	1.1.47
8.48	混凝土无损检测技术	1.1.48
8.49	混凝土无损检测技术	1.1.49
8.50	混凝土无损检测技术	1.1.50
8.51	混凝土无损检测技术	1.1.51
8.52	混凝土无损检测技术	1.1.52
8.53	混凝土无损检测技术	1.1.53
8.54	混凝土无损检测技术	1.1.54
8.55	混凝土无损检测技术	1.1.55
8.56	混凝土无损检测技术	1.1.56
8.57	混凝土无损检测技术	1.1.57
8.58	混凝土无损检测技术	1.1.58
8.59	混凝土无损检测技术	1.1.59
8.60	混凝土无损检测技术	1.1.60
8.61	混凝土无损检测技术	1.1.61
8.62	混凝土无损检测技术	1.1.62
8.63	混凝土无损检测技术	1.1.63
8.64	混凝土无损检测技术	1.1.64
8.65	混凝土无损检测技术	1.1.65
8.66	混凝土无损检测技术	1.1.66
8.67	混凝土无损检测技术	1.1.67
8.68	混凝土无损检测技术	1.1.68
8.69	混凝土无损检测技术	1.1.69
8.70	混凝土无损检测技术	1.1.70
8.71	混凝土无损检测技术	1.1.71
8.72	混凝土无损检测技术	1.1.72
8.73	混凝土无损检测技术	1.1.73
8.74	混凝土无损检测技术	1.1.74
8.75	混凝土无损检测技术	1.1.75
8.76	混凝土无损检测技术	1.1.76
8.77	混凝土无损检测技术	1.1.77
8.78	混凝土无损检测技术	1.1.78
8.79	混凝土无损检测技术	1.1.79
8.80	混凝土无损检测技术	1.1.80
8.81	混凝土无损检测技术	1.1.81
8.82	混凝土无损检测技术	1.1.82
8.83	混凝土无损检测技术	1.1.83
8.84	混凝土无损检测技术	1.1.84
8.85	混凝土无损检测技术	1.1.85
8.86	混凝土无损检测技术	1.1.86
8.87	混凝土无损检测技术	1.1.87
8.88	混凝土无损检测技术	1.1.88
8.89	混凝土无损检测技术	1.1.89
8.90	混凝土无损检测技术	1.1.90
8.91	混凝土无损检测技术	1.1.91
8.92	混凝土无损检测技术	1.1.92
8.93	混凝土无损检测技术	1.1.93
8.94	混凝土无损检测技术	1.1.94
8.95	混凝土无损检测技术	1.1.95
8.96	混凝土无损检测技术	1.1.96
8.97	混凝土无损检测技术	1.1.97
8.98	混凝土无损检测技术	1.1.98
8.99	混凝土无损检测技术	1.1.99
8.100	混凝土无损检测技术	1.1.100

第 1 章

概 论

我国是当今世界上建设规模最大的国家,随着我国社会的不断进步,建设规模会越来越大,在这些建设项目中,混凝土结构占有重要地位,工程质量要求日益提高。

自 1985 年起,我国水泥产量已连续多年居世界第一,目前占世界总产量的 50% 左右,2006 年水泥产量达到 12.2 亿吨,屡创历史新高。60% 以上的水泥用于拌制混凝土,据此推算,我国混凝土的年用量大约为 (25~30) 亿立方米,主要用于房屋建筑和土木工程的水利、交通、市政等行业,从结构材料类型方面来讲,混凝土结构约占全部工程结构的 90% 以上,可以说混凝土是当代主要的建筑材料之一,也是目前世界上生产量最大的人造材料。由于混凝土具有原料易得、便于生产、成本较低等特点,预计在今后相当长的时期内,混凝土仍将是一种最主要的建筑材料。

近年来,在巨大工程建设任务,特别是重点建设项目和大型工程的带动下,我国的混凝土工程技术水平有了很大的提高,向高强度、高性能、多品种和绿色化方向发展。如最大限度地减少水泥熟料用量,代之以工业废渣为主的矿物掺和料,主要是磨细矿渣、粉煤灰、硅灰等,从而减少水泥生产过程中 CO_2 、 SO_2 及 NO 等气体的排放量,降低对天然资源与能源的消耗,并在改善混凝土耐久性的同时保护环境;最大限度地发挥高强高性能混凝土的优势,减少结构面积或结构体积,节省混凝土用量,减轻自重;通过大幅度提高混凝土耐久性,延长结构的使用寿命,使材料和工程充分发挥其功能等。

尽管我国的混凝土技术取得了长足的进步,在混凝土的应用中,各种质量问题仍时有发生。例如有的混凝土存在收缩大、早期易开裂;有的工程因混凝土强度不合格和碱骨料反应等导致工程需进行加固处理,甚至被拆除重建;有的工程使用不合格的原材料,尤其是沿海地区使用不合格海砂,在使用若干年后,大部分在十年左右出现因钢筋锈蚀导致的顺筋裂缝,使一些建筑物成为危房而遭拆除。近年来,混凝土裂缝成为社会的热点问题,开发商、施工单位和用户饱受困扰。

为了对混凝土的质量进行控制,发展了许多检测技术。如对新拌混凝土快速推定 28 天抗压强度。对已硬化混凝土采用回弹法、钻芯法、拔出法、超声法、冲击回波法等无损检测技术进行混凝土质量的现场检测等。

在混凝土质量的生产控制中,主要是利用试验所得的早期强度或快速分析新拌

混凝土所得的某些表征质量指标进行分析,并将分析结果反馈到生产中,提出排除产生质量问题的对策和措施,以使混凝土生产的全过程都处于科学管理和严格的控制状态,保证所生产的混凝土具有较高的质量。

无损检测技术所检测的混凝土质量主要是强度和缺陷。例如检测由于施工控制不严或施工过程中某种意外事故可能影响混凝土的质量;当需要了解混凝土在施工期间的强度增长情况时,以便满足结构或构件的拆模、养护出池、出厂、吊装、预应力筋张拉或放张,以及施工期间负荷对混凝土强度的要求;施工中混凝土未捣实或模板漏浆,以及施工缝黏结不良等原因,造成局部疏松、蜂窝、孔洞、施工缝结合不良等缺陷;施工中产生的混凝土裂缝等。

因此,对混凝土的质量进行控制和检测是保证混凝土工程质量的重要手段。

第 2 章

混凝土原材料质量控制

混凝土原材料质量控制是混凝土质量控制的一个重要内容。为有效地进行混凝土质量控制,保证混凝土质量符合相关要求,首先必须控制所用各种原材料的质量及其变异,为混凝土的生产控制提供相关组成材料的各种参数。

2.1 水泥

水泥是一种水硬性胶凝材料,即水泥加水拌合以后,其拌合物不仅可以在空气中硬化,而且可以在水中硬化,保持并继续发展其强度。从 1824 年约瑟夫·阿斯普丁获得“波特兰”水泥专利到现在,水泥作为一种重要的建筑材料,已有近 200 年的历史。

2.1.1 水泥的生产工艺

水泥的基本组成是水硬性硅酸钙,在水泥生产过程中,原材料必须以适当的形式和比例提供钙和硅。常用的钙质原材料有石灰石、白垩、泥灰岩和贝壳等;常用的硅质原材料有黏土、页岩或其他泥质岩石。自然界中的石英岩或砂岩中的二氧化硅是石英化的二氧化硅,是一种非活性材料,其熔化温度大约在 2000°C 以上,较难参与烧成反应。另外,黏土等原材料中含有的铁铝等氧化物具有助熔的效果,可以有效地降低烧成温度。

在水泥生产过程中,首先将石灰石与黏土等钙硅质原料按适当的比例混合,在磨机中粉磨与均化,制成生料;然后将生料送入回转窑中,在 $1300\sim 1450^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行高温煅烧,钙质原料与硅质原料发生复杂的化学反应,制成水泥熟料;最后在烧成的熟料中掺加适量的石膏以控制水泥的凝结、硬化反应,或根据水泥品种的不同而掺加不同的混合材,将熟料混合物在磨机中磨至适当的细度,即制成水泥成品。

概括地说,水泥的生产过程主要可分为生料粉磨、熟料烧成、熟料粉磨三部分,也即是人们通常所说的“两磨一烧”。在实际生产中,由于各种原料都需要特定处理并进行高温煅烧,要获得质量稳定的水泥,必须对工序的各个环节进行严格的生产控制。

2.1.2 水泥的组成

水泥熟料主要由硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等矿物组成，各矿物组成情况如表 2-1 所示。

表 2-1 水泥熟料的化学组成

化学名称	化 学 式	缩写符号	含量/%
硅酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50~60
硅酸二钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	20 左右
铝酸三钙+铁铝酸四钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$	22 左右

(1) 硅酸三钙 C_3S

C_3S 是水泥熟料的主要组成部分，其含量为 50%~60%。 C_3S 水化反应较快，凝结时间正常，水化反应放热较大。 C_3S 对水泥混凝土制品早期强度发展较为有利。含有少量其他氧化物的 C_3S 称作阿利特 (Alite)，其水化反应速度比 C_3S 更快。

(2) 硅酸二钙 C_2S

C_2S 也是组成水泥熟料的主要成分，其含量大约在 20% 左右。 C_2S 水化反应较慢，凝结时间较长，水化放热较低。 C_2S 对水泥混凝土制品后期强度发展较为有利。固溶有少量氧化物的 β 型的 C_2S 称作贝利特 (Belite)。

(3) 铝酸三钙 C_3A

C_3A 水化反应极快，凝结时间较短。 C_3A 水化放热量甚至大于 C_3S 。在大体积混凝土施工中，采用 C_3S 与 C_3A 含量较低、 C_2S 含量较高的水泥，采取有效的控温措施，可有效地消除温度裂缝，是控制温度应力破坏的有效途径。另一方面，硫酸盐与 C_3A 水化产物之间复杂的化学反应将会对混凝土产生严重的侵蚀作用，降低 C_3A 含量，将其转化为 C_4AF 是控制硫酸盐侵蚀的有效途径。

(4) 铁铝酸四钙 C_4AF

C_4AF 是铁相或铁的固溶体。其早期水化速度介于铝酸三钙与硅酸三钙之间，但其后期发展速度不如硅酸三钙。其早期强度类似于铝酸三钙，但其后期强度还能像硅酸二钙一样持续增长。 C_4AF 水化热较 C_3A 低，具有良好的抗冲击性能与抗硫酸盐侵蚀性能。纯净的 C_4AF 呈巧克力色，当 MgO 存在时，使其显黑色，当 MgO 含量较低时，使水泥呈褐色，多数情况下，存在的 MgO 常使水泥呈灰白色。

(5) 石膏

水泥熟料磨成粉末之后与水反应常会发生速凝现象。为调节水泥凝结时间，常在熟料中掺入适量的石膏。掺入水泥的石膏主要与铝酸三钙 C_3A 及铁铝酸四钙 C_4AF 发生反应，生成三硫型水化硫铝酸钙（钙矾石），随后三硫型水化硫铝酸钙逐渐转化为单硫型水化硫铝酸钙。在水化过程中，约 30% 的石膏参与了钙矾石的

形成, 70%的石膏则进入 C-S-H 凝胶结构, 有助于强度的提高。石膏掺量过少, 不能有效地调节水泥凝结时间; 若掺量过多, 容易导致水泥发生假凝现象, 甚至会导致水泥体积安定性不良。石膏的掺量主要与熟料中铝酸三钙 C_3A 含量及混合材种类有关。

2.1.3 水泥混合材

水泥混合材主要可以分为活性混合材与非活性混合材两大类。

2.1.3.1 活性混合材

水泥中的活性混合材主要包括粒化高炉矿渣、火山灰质混合材、粉煤灰等。

(1) 粒化高炉矿渣 粒化高炉矿渣是高炉炼铁时的残渣熔融物经快速水淬粒化后得到的产物。当矿渣在空气中缓慢冷却时, 其表面常形成惰性的硅酸镁钙, 活性较低; 当采用水淬粒化时, 高炉矿渣主要以玻璃相存在, 具有较高的化学反应活性。

粒化高炉矿渣主要化学成分是 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 等, 通常, CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 含量在 90% 以上。根据化学成分含量的不同, 常采用质量系数来评定粒化高炉矿渣活性:

$$M = \frac{w_{CaO} + w_{MgO} + w_{Al_2O_3}}{w_{SiO_2} + w_{MnO}} \quad (2-1)$$

式中 M ——质量系数。

当质量系数大于 1.2 时, 矿渣为活性矿渣; 当质量系数小于 1.2 时, 矿渣为非活性矿渣。

(2) 火山灰质混合材

凡天然或人工的以活性氧化铝、氧化硅为主要成分的矿物质材料经磨成细粉、加水拌合后其自身不能硬化, 但与石灰拌合后再加水, 在空气与水中都能继续水化反应, 生成硬化反应产物者称为火山灰质混合材。

火山灰质混合材按其化学成分与矿物结构可分为三类。

① 含水硅酸质混合材 其主要活性成分是无定形的含水硅酸, 代表产物有硅藻土、硅藻石、蛋白石等。

② 火山玻璃质混合材 其主要活性成分是玻璃质的 SiO_2 和 Al_2O_3 , 代表产物有火山灰、凝灰石、浮石。

③ 烧黏土质混合材 其主要活性成分是偏高岭石分解出来的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 , 代表产物有烧黏土、煤渣、煤灰、石岩灰。

(3) 粉煤灰

粉煤灰是发电厂煤粉燃烧过程中, 熔融的残渣在随烟气排除过程中冷却, 经电除尘器收集得到的细灰。粉煤灰是具有一定活性的火山灰质混合材, 属于大宗的工

业废渣。其粒径一般为 $1\sim 50\mu\text{m}$ ，呈玻璃质的球状实心或空心颗粒。

粉煤灰的主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 与 Fe_2O_3 。根据粉煤灰中 CaO 含量的高低，可将其分为高钙灰与低钙灰。低钙灰 CaO 含量低于 10%，一般是无烟煤燃烧所得的副产品；高钙灰 CaO 含量典型的可达 15%~30%，通常是褐煤和次烟煤燃烧所得的副产品。与低钙灰相比较，高钙灰通常活性较高，因为它所含的钙绝大部分是以活性结晶化合物的形式存在的。此外，其所含的钙离子量使铝硅玻璃的活性得到加强。

2.1.3.2 非活性混合材

非活性混合材主要包括磨细的石灰石、石英砂等。它们一般与水泥成分不发生化学反应，其中一些在特定条件下可以发生微弱的反应。水泥中掺入的非活性混合材，主要起到改善水泥的工作性与保水性、调节水泥强度、增加水泥产量及降低水化热等作用。

2.1.4 常见的水泥种类

根据掺加的矿物掺和料及其数量的不同，我国常用的水泥大致可分为：硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等。

(1) 硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、0~5% 石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为硅酸盐水泥（即国外通称的波特兰水泥）。硅酸盐水泥分两种类型，不掺加混合材料的称Ⅰ类硅酸盐水泥，代号 P·I。在硅酸盐水泥粉磨时掺加不超过水泥质量 5% 的石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的称Ⅱ型硅酸盐水泥，代号 P·II。

(2) 普通硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、6%~15% 混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为普通硅酸盐水泥（简称普通水泥），代号 P·O。

掺活性混合材料时，最大掺量不得超过 15%，其中允许用不超过水泥质量 5% 的窑灰或不超过水泥质量 10% 的非活性混合材来代替。

掺非活性混合材时，最大掺量不得超过水泥质量 10%。

(3) 矿渣硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为矿渣硅酸盐水泥（简称矿渣水泥），代号 P·S。水泥中粒化高炉矿渣掺加量按质量分数计为 20%~70%。允许用石灰石、窑灰、粉煤灰和火山灰质混合材中的一种材料代替矿渣，代替数量不得超过水泥质量的 8%，替代后水泥中粒化高炉矿渣不得少于 20%。

(4) 火山灰质硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和火山灰质混合材、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为火山灰质硅酸盐水泥（简称火山灰水泥），代号P·P。水泥中火山灰质混合材料掺量按质量分数计为20%~50%。

(5) 粉煤灰硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料和粉煤灰、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为粉煤灰硅酸盐水泥（简称粉煤灰水泥），代号P·F。水泥中粉煤灰掺量按质量分数计为20%~40%。

(6) 复合硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上规定的混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为复合硅酸盐水泥（简称复合水泥），代号P·C。水泥中混合材料总掺量按质量分数计应大于15%，但不超过50%。水泥中允许用不超过8%的窑灰代替部分混合材料；掺矿渣时，混合材料掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。

2.1.5 质量指标

水泥主要有以下几个方面的质量要求。

(1) 凝结时间

水泥凝结时间分为初凝时间和终凝时间。初凝时间是指水泥加水拌合为标准稠度净浆到开始失去可塑性的时间；终凝时间是指水泥加水拌合为标准稠度净浆到完全失去可塑性的时间。

水泥初凝以后，混凝土的搅拌、运输等都变得比较困难，为了满足施工需要，要求水泥初凝时间不能太短；当施工完毕以后，希望混凝土能够尽快硬化，缩短脱模时间，要求水泥终凝时间不能太长。国家标准规定：水泥的初凝时间不得早于45min，硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的终凝时间不得迟于6.5h，矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥的终凝时间不得迟于10h。实际上，国产通用硅酸盐水泥的初凝时间多为1~3h，终凝时间多为3~4h。

(2) 强度

水泥强度试验主要根据《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》进行，称取 (450 ± 2) g待测水泥样品与 (1350 ± 5) g标准砂，加入 (225 ± 1) g水，按规定制成 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ 的标准试件，在标准养护条件下养护。对硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥分别测定其3天与28天抗压和抗折强度，并按表2-2、表2-3与表2-4中的规定将其划分为不同等级，各强度等级水泥的各龄期强度不得低于表中数值。

表 2-2 硅酸盐水泥与普通硅酸盐水泥强度等级

品 种	强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3 天	28 天	3 天	28 天
硅酸盐水泥	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
	62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
	62.5R	32.0	62.5	5.5	8.0
普通硅酸盐水泥	32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
	42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0

表 2-3 矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥强度等级

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 天	28 天	3 天	28 天
32.5	10.0	32.5	2.5	5.5
32.5R	15.0	32.5	3.5	5.5
42.5	15.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	19.0	42.5	4.0	6.5
52.5	21.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	23.0	52.5	4.5	7.0

表 2-4 复合硅酸盐水泥强度等级

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 天	28 天	3 天	28 天
32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0

(3) 体积安定性

体积安定性不良是指由于水泥中 $f\text{-CaO}$ 、 $f\text{-MgO}$ 过量，石膏掺量过多等因素导致已硬化水泥石内部发生了不均匀的体积变化。体积安定性不良会使混凝土结构产生膨胀裂缝，降低建筑物质量，甚至导致严重的灾害。

① $f\text{-CaO}$ 过量 在熟料的烧结过程中，由于烧结工艺上的问题，会使熟料中存在较多的过烧 $f\text{-CaO}$ ，其水化活性很低，在水泥硬化之后， $f\text{-CaO}$ 仍可发生下列反应：



该反应过程固相体积膨胀,导致硬化水泥石因内部体积不均匀变化而破坏。

② f-MgO 过量 MgO 水化形成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 反应速度极快,但是在煅烧过程中, MgO 经过高温煅烧,其活性大大降低,在水泥浆体硬化以后才发生水化反应。研究表明,当水泥中的 f-MgO 形成结晶方镁石时,导致水泥石体积膨胀,甚至开裂破坏,即水泥石安定性不良。

③ 石膏掺量过多 在水泥生产过程中,一般在熟料中掺加少量石膏共同进行粉磨,以控制水泥中 C_3A 早期反应速度,防止水泥熟料发生瞬凝。若掺入石膏过量,水泥水化时, C_3A 与石膏会生成钙矾石,体积膨胀约 1.5 倍,从而导致硬化水泥体积安定性不良。

通常,水泥的安定性可采用试饼法与雷氏夹法进行检测。试饼法是通过观察水泥净浆试饼沸煮后的外形变化来检测水泥体积变化的均匀性。试饼法采用直观观察,没有量化的标准,人为因素干扰较大,在临界状态时,不宜判别。雷氏夹法是通过测量水泥净浆在雷氏夹中沸煮后的膨胀值,测量结果具有量化的标准,人为因素干扰较少,可重复性好。

一般来讲,企业可任意选用安定性检测方法,但当两种方法试验结果发生不一致时,应以雷氏夹法为准。

(4) 细度

水泥细度对水泥水化速度、强度增长率、水化放热、混凝土工作性与耐久性等都有较大的影响。水泥细度越细,其水化速度较快,早后期强度发展都较为迅速,相应的能量消耗也越大,宜综合经济、技术等多方面的因素,将水泥细度控制在合理的范围。

对于水泥细度,主要可从比表面积与粒径分布两个方面进行描述。现行国家标准规定,硅酸盐水泥采用透气式比表面积仪检验,其比表面积应大于 $300\text{m}^2/\text{kg}$;其他水泥可采用筛析法检验,在 $80\mu\text{m}$ 标准筛上进行检验时,其筛余量不得大于 10%。筛析法有水筛法、干筛法和负压筛法,当三种方法试验结果不一致时,以负压筛法为准。

(5) 水化热

水泥水化热一般随其矿物组分的不同而变化。在水泥的主要矿物组分中,各组分水化热及放热速度如下:

由于水泥各矿物组分的水化热具有加和性,一般可根据矿物组分的含量来估算水泥水化热。

此外,水泥水化热及放热速度还与水泥细度、混合材掺量等因素有关。水泥细度较细时,水化反应较为迅速,其水化放热速度也较快;掺加适量的混合材可有效