

普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土材料科学

管学茂 杨 雷 主编

HUNNINGTU
CAILIAOXUE



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土材料学

管学茂 杨 雷 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

前 言

混凝土材料是土建工程、水利工程、道路工程、地下工程等基础建设工程中用量最大的结构材料，尤其是随着我国基础工程建设速度加快，对混凝土材料性能提出了更高要求。而混凝土材料是由水泥、砂、石、水、外加剂等多组分组成的一种复合材料，其使用性能决定于材料的组成、性能与结构，要制备高性能混凝土必须系统学习掌握混凝土材料的基本理论知识。

编者编写的《混凝土学》讲义，在河南理工大学材料科学与工程专业经过了5年的试用，期间编者不断地把该领域完成的国家科技支撑计划项目、国家重大基础研究项目（973项目）的最新研究成果引入讲义。为了更好地满足教学要求，经过多次修改完善，加强教材中混凝土材料的基本理论阐述，形成了《混凝土材料学》教材。本书可作为材料、建筑、土木类专业及相关各专业本科生教学用书，也可作为建筑设计、施工和建筑材料工作者的技术参考书。

“混凝土材料学”是材料科学与工程专业的主要专业课之一，本书系统地阐述了混凝土材料的基本理论知识和技术，同时也反映了混凝土及其外加剂的最新研究进展。全书共分8章，包括绪论、混凝土原材料、混凝土和砂浆外加剂、新拌混凝土的性能、硬化混凝土的结构、混凝土的物理力学性能、混凝土的耐久性、混凝土配合比设计、建筑砂浆等章节。

本书由管学茂、杨雷主编。参编人员及编写分工如下：管学茂编写绪论、第1章、第2章，郭晖编写第3章，杨雷编写第5章、第6章、第8章，罗树琼编写第4章、第7章，并且负责全书的文字处理与校对工作。

该书在编写过程中得到了河南理工大学和化学工业出版社的大力支持和帮助，在此致以衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011年8月于河南理工大学

目 录

绪论	1
1 混凝土原材料	3
1.1 水泥	3
1.1.1 水泥的定义与分类	3
1.1.2 通用硅酸盐水泥的组分	4
1.1.3 通用硅酸盐水泥的强度等级	5
1.1.4 通用硅酸盐水泥的技术要求	5
1.1.5 水泥的主要矿物组成	7
1.2 集料	7
1.2.1 集料的作用和类别	7
1.2.2 集料的主要技术性质	8
1.2.3 细集料及其技术要求	13
1.2.4 粗集料及其技术要求	15
1.2.5 集料性质对混凝土性能的影响	18
1.3 水	24
1.3.1 混凝土用水的定义	25
1.3.2 混凝土用水技术要求	25
1.4 矿物掺和料	26
1.4.1 矿物掺和料的分类	26
1.4.2 常用矿物掺和料	27
思考题	35
参考文献	36
2 混凝土和砂浆外加剂	37
2.1 化学外加剂的发展概况	37
2.1.1 外加剂的发展历史	37
2.1.2 混凝土外加剂的定义	38
2.1.3 外加剂的分类	39
2.1.4 外加剂的作用	39
2.2 混凝土外加剂的基本原理	40
2.2.1 表面现象的概念	40
2.2.2 表面活性剂的种类和结构特点	41
2.2.3 表面活性剂的作用机理	42
2.2.4 表面分散剂对水泥分散体系性质的影响	46
2.3 化学外加剂	50
2.3.1 减水剂	50
2.3.2 凝结与硬化调节剂	54
2.3.3 膨胀剂	59
2.3.4 引气剂	60
2.3.5 聚合物改性剂	62
2.3.6 保水剂和增稠剂	63
2.3.7 其他外加剂	66
思考题	71
参考文献	71
3 新拌混凝土的性能	73
3.1 新拌混凝土流变学	73
3.1.1 流变学基本模型	73
3.1.2 新拌混凝土流变方程	76
3.2 新拌混凝土工作性	79
3.2.1 新拌混凝土工作性的概念	80
3.2.2 流动性测试方法评述	80
3.2.3 影响流动性的因素	82
3.2.4 新拌混凝土的坍落度损失	83
3.3 水泥与外加剂之间的适应性	88
3.3.1 适应性的概念与评价	88
3.3.2 适应性的检测方法	90
3.3.3 适应性的影响因素	93
3.3.4 适应性的改善措施	97
3.4 影响混凝土工作性的主要因素	98
3.4.1 混凝土单位用水量对流动性的影响	98
3.4.2 砂率的影响	99
3.4.3 材料组成的影响	100
3.5 离析和泌水	101
3.5.1 离析与泌水产生的原因	101
3.5.2 离析和泌水对硬化混凝土性能的	

危害	103	思考题	105
3.5.3 离析和泌水的评价方法	103	参考文献	106
3.5.4 防止离析和泌水的措施	105		
4 硬化混凝土的结构	107		
4.1 硬化水泥浆体的组成和结构	107	4.3 国内学者有关硬化混凝土结构的 论述	121
4.1.1 水泥水化物的组成和结构	107	4.3.1 中心质假说	121
4.1.2 硬化水泥浆体的孔结构和水的 形态	113	4.3.2 黄蕴元的硬化混凝土的4个结构 层次	126
4.2 硬化混凝土的界面	116	思考题	128
4.2.1 界面过渡区	116	参考文献	128
4.2.2 界面过渡区形成机理	119		
4.2.3 界面过渡区的改善措施	120		
5 混凝土的物理力学性能	129		
5.1 混凝土的物理性能	129	5.2.3 影响混凝土强度的因素	139
5.1.1 混凝土的密实度	129	5.3 混凝土的变形性能	142
5.1.2 混凝土的渗透性	130	5.3.1 混凝土的弹性变形	143
5.1.3 混凝土的干缩与湿胀	132	5.3.2 混凝土的徐变	144
5.1.4 混凝土的热性能	133	5.3.3 混凝土收缩	146
5.2 混凝土的强度	135	思考题	149
5.2.1 混凝土强度的基本理论	135	参考文献	149
5.2.2 混凝土受力后的破坏过程	136		
6 混凝土的耐久性	150		
6.1 混凝土的抗冻性	150	6.4 混凝土中钢筋的锈蚀	165
6.1.1 冻融交替对混凝土破坏的动力	151	6.4.1 钢筋锈蚀的电化学原理	165
6.1.2 影响混凝土抗冻性的因素	152	6.4.2 混凝土的碳化	166
6.1.3 抗冻性试验	155	6.4.3 氯离子引起的锈蚀	168
6.2 环境化学侵蚀对混凝土的破坏	155	6.4.4 钢筋锈蚀的防护措施	171
6.2.1 水泥浆体组分的浸出及其原因	156	6.5 多因素协同作用下混凝土的破坏 规律	172
6.2.2 酸的侵蚀	156	6.5.1 冻融和盐综合作用对混凝土的 破坏	172
6.2.3 硫酸盐侵蚀	157	6.5.2 冻融与荷载双重因素作用下的 混凝土损伤	174
6.3 碱-集料反应	158	思考题	176
6.3.1 产生碱-集料反应破坏的条件	158	参考文献	176
6.3.2 碱-集料反应的膨胀机制	159		
6.3.3 碱-集料反应的破坏特征	162		
6.3.4 碱-集料反应的预防措施	164		
7 混凝土配合比设计	177		
7.1 普通混凝土配合比设计	177	7.1.5 试配、调整及确定	189
7.1.1 设计要领	177	7.2 高性能混凝土配合比设计	191
7.1.2 设计流程	177	7.2.1 混凝土配制强度	191
7.1.3 设计参数及运算	178	7.2.2 参数的选择	191
7.1.4 综合例题	186	7.2.3 高性能混凝土配合比确定	193

7.2.4 综合例题	193	7.3.3 试配、调整及确定配合比	198
7.3 轻集料混凝土配合比设计	194	7.3.4 综合例题	199
7.3.1 混凝土配制强度	195	思考题	200
7.3.2 参数的选择	195	参考文献	200
8 建筑砂浆	201		
8.1 概述	201	8.3 砂浆配合比设计	205
8.1.1 定义	201	8.3.1 水泥混合砂浆配合比设计	205
8.1.2 砂浆的主要技术性质	201	8.3.2 水泥砂浆配合比选用	206
8.2 砂浆的组成材料	203	8.3.3 配合比试配调整和确定	207
8.2.1 胶凝材料	203	8.4 干粉砂浆	207
8.2.2 细集料	204	8.4.1 干粉砂浆技术优势	208
8.2.3 水	204	8.4.2 干粉砂浆发展前景	208
8.2.4 掺和料	204	思考题	209
8.2.5 外加剂	204	参考文献	209

绪 论

(1) 混凝土的定义与分类

混凝土也称砼，是由水泥、粗集料（碎石、卵石、人造陶粒等）、细集料（河砂、陶砂等）、水、外加剂（第五组分）以及必要时加入的矿物掺和料（粉煤灰、矿渣、硅灰、钢渣、磷渣等）制备的复合材料。

混凝土按表观密度可分为重混凝土、普通混凝土和轻混凝土；按照在工程中用途的不同可分为结构混凝土、水工混凝土、海洋混凝土、道路混凝土、防水混凝土、补偿收缩混凝土、装饰混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、防辐射混凝土等；按照抗压强度的不同可分为低强混凝土、中强混凝土、高强混凝土及超高强混凝土等；按混凝土生产和施工方法的不同可分为预拌（商品）混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、压力灌浆混凝土、挤压混凝土、离心混凝土、真空吸水混凝土、碾压混凝土等；按组成可分为素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土等。

(2) 混凝土的发展

混凝土具有原材料来源广泛、价格低廉、能耗低、生产工艺简单、强度高、耐久性好、维修费用低等优点，是现代主要建筑材料之一，也是目前世界上生产量最大的人造材料。

混凝土是一种不断发展的材料，硅酸盐水泥混凝土的发展经历了水泥混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、纤维或聚合物增强混凝土以至最近的高强、高性能混凝土。20 世纪 50 年代（即第二次世界大战结束）后，全球经济开始复苏，科技和工业发展日益加快，对水泥及混凝土的需求量越来越大、性能要求越来越高，为了适应这种要求，陆续出现了一些早强混凝土、大坝混凝土、纤维增强混凝土、聚合物混凝土等称为“特种”混凝土的材料。20 世纪 90 年代以后，混凝土技术得到了快速发展，要求建筑用混凝土高强、轻质，具有更高的耐久性和抗渗性，为了适应这种需求，高强混凝土、防水混凝土、补偿收缩混凝土等得到了广泛的推广应用。混凝土已经成为当今文明社会的重要物质支柱，现代经济和工业的发展与混凝土技术的发展相互促进。混凝土的发展主要遵循复合、高强和高性能三条技术路线。在提高性能、增加品种与扩大应用的相互促进下，混凝土发展成为当代最主要的结构工程材料，也是最大宗的人造材料，根据专家预测，在今后相当长的时间内水泥混凝土仍将是应用最广、用量最大的建筑材料之一。

随着社会的发展和技术的不断进步，人民的物质文化水平不断提高，带动了国家基本建设项目的空前发展，人们对混凝土的品质指标和经济指标提出了更高的要求；另外随着社会的进步和经济的发展，人们越来越关注资源可持续利用与环境保护的问题。因此，高性能化、高强度、多功能化和绿色化是混凝土今后发展的方向，如高性能混凝土、再生混凝土、无熟料水泥混凝土、生态混凝土等。

(3) 混凝土材料学的研究内容

近年来,国内外都非常重视水泥混凝土的高性能化、高强度、多功能化和绿色化。虽然取得了瞩目的成就,但还面临着材料和工程方面的许多难题。随着混凝土应用技术的飞跃发展,人们还需要进一步在水泥和混凝土性能分析与评价、水泥基材料改性、固体废弃物资源循环利用及混凝土的耐久与评价等方面做出新的探索,开展有效的科学研究,攻克关键技术难题。

要想很好地对混凝土各方面的性能进行详细的研究,我们必须了解和掌握混凝土的性能特点,为此,本书主要介绍组成混凝土的原材料的性能及特点、混凝土拌和物的性能、硬化混凝土的结构、混凝土的物理力学性能、耐久性以及混凝土的制备技术等内容和知识。

本课程培养学生牢固掌握混凝土的结构、性能等基本理论以及混凝土的制备技术,使学生能够根据实际工程中对各种混凝土的使用要求,正确地选用原材料,合理设计和选用它们的配合比,最后制成经济、适用、耐久的各种混凝土。同时,也注意引导学生运用前修课程及一些现代科学知识来解释和研究混凝土的结构和性能,为学生今后从事混凝土科学研究准备好必要的理论基础,使学生今后能适应混凝土材料科学日益发展的需要。

1

混凝土原材料

1.1 水 泥

水泥是混凝土中主要的胶凝材料，因此，水泥的性能，如强度、耐久性等，在相当大的程度上影响混凝土的性能。因此，配制混凝土时，根据设计混凝土的性能和在环境中使用的要求，选用水泥时必须考虑以下几项因素：水泥强度等级；在各种温、湿度条件下，水泥早期和后期强度发展的规律；使用环境中水泥的稳定性；各种水泥的其他特殊性能。

高性能混凝土选择水泥时有更严格的要求，因为高性能混凝土的特点之一是水灰比低，通常为 0.38 以下，要满足施工工作性，水泥用量较大，但为了尽量降低混凝土内部温升和收缩，又应尽量降低水泥的用量。同时，为了使混凝土有足够高的弹性模量和体积稳定性，对胶凝材料总量也要加以限制。根据高性能混凝土的特点，选用的水泥应强度高，同时具有良好的流变性，并与目前广泛应用的高效减水剂有很好的适应性，较容易控制坍落度损失。

1.1.1 水泥的定义与分类

1.1.1.1 水泥的定义

凡细磨成粉末状，加入适量的水后成为塑性浆体，既能在空气中硬化，又能在水中硬化，并能将砂、石等材料牢固地胶结在一起的水硬性胶凝材料，通称为水泥。

根据 GB 175—2007 通用硅酸盐水泥标准，通用硅酸盐水泥的定义如下：以硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成的水硬性胶凝材料。

作为一种水硬性胶凝材料，水泥有其共同特征，但根据工程的特点及适用的环境条件不同，对水泥性能的要求又有所不同，因此，水泥具有不同的种类。不同种类的水泥根据其结构组分的差别，在具有水泥的共性外，又有其独特的性能。

1.1.1.2 水泥的分类

水泥的种类很多，目前已有 100 多种水泥问世，而且各种新型水泥仍在以较快的速度开发研究与应用中。水泥的分类方法通常有如下几种。

① 按其用途和性能可分为通用水泥、专用水泥和特性水泥三大类。

通用水泥为一般用途的水泥，主要用于大量的土木建筑工程中，按混合材料的品种和掺量，通用水泥可分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、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等，各品种的组分和代号应符合表 1-1 所列。

表 1-1 通用硅酸盐水泥的组分规定

品种	代号	组 分				
		熟料+石膏	粒化高炉矿渣	火山灰质混合材料	粉煤灰	石灰石
硅酸盐水泥	P·I	100	—	—	—	—
	P·II	≥ 95	≤ 5	—	—	—
		≥ 95	—	—	—	≤ 5
普通硅酸盐水泥	P·O	≥ 80 且 < 95	> 5 且 ≤ 20			—
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	≥ 50 且 < 80	> 5 且 ≤ 50	—	—	—
	P·S·B	≥ 30 且 < 50	> 5 且 ≤ 70	—	—	—
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	≥ 60 且 < 80	—	> 20 且 ≤ 40	—	—
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	≥ 60 且 < 80	—	—	> 20 且 ≤ 40	—
复合硅酸盐水泥	P·C	≥ 50 且 < 80	> 20 且 ≤ 50			—

专用水泥是指有专门用途的水泥，如油井水泥、砌筑水泥和道路水泥等。

特性水泥是指某种性能比较突出的水泥，如快硬硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥等。

② 按水泥的组成可将其分为硅酸盐水泥系列、铝酸盐水泥系列、氟铝酸盐水泥系列、硫铝酸盐水泥系列、铁铝酸盐水泥系列及其他水泥。

硅酸盐水泥系列是指磨制水泥的熟料以硅酸盐矿物为主要成分，如通用水泥及大部分专用水泥、特性水泥等。

铝酸盐水泥系列是指熟料矿物以铝酸钙为主，主要包括铝酸盐膨胀水泥、铝酸盐自应力水泥和铝酸盐耐火水泥等。

以 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 、 β - C_2S (C_3S) 和石膏为主要组分的氟铝酸盐水泥系列，包括快凝快硬氟铝酸盐水泥、型砂水泥、抢修水泥等。

以 C_4A_3S 、 β - C_2S 和石膏为主要组分的硫铝酸盐水泥系列包括快硬、膨胀、微膨胀和自应力 4 个品种，如快硬硫铝酸盐水泥、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、低碱硫铝酸盐水泥等。

以 C_4AF 、 C_4A_3S 、 β - C_2S 和石膏为主要成分的铁铝酸盐水泥系列，也包括快硬、膨胀、微膨胀和自应力 4 个品种，如快硬铁铝酸盐水泥、高强铁铝酸盐水泥、膨胀铁铝酸盐水泥、自应力铁铝酸盐水泥等。

其他水泥如耐酸水泥、氧化镁水泥、生态水泥、少熟料和无熟料水泥等。

③ 按需要在水泥命名中标明的主要技术特性可将水泥分为如下五类：快硬性水泥（分为快硬和特快硬）；水化热（分为中低热和高热）；抗硫铝酸盐腐蚀性（分为中抗硫铝酸盐腐蚀性和高抗硫铝酸盐腐蚀性）；膨胀性（分为膨胀和自应力）；耐高温性（铝酸盐水泥的耐高温以水泥中氧化铝的含量分级）。

1.1.2 通用硅酸盐水泥的组分

(1) 硅酸盐水泥熟料

由主要含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的原料,按适当比例磨成细粉烧至部分熔融所得以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。其中硅酸钙矿物不小于 66%,氧化钙和氧化硅质量比不小于 2.0。

(2) 石膏

① 天然石膏 应符合 GB/T 5483 中规定的 G 类或 M 类二级(含)以上的石膏或混合石膏。

② 工业副产石膏 以硫酸钙为主要成分的工业副产物。采用前应经过试验证明对水泥性能无害。

(3) 活性混合材料

符合 GB/T 203、GB/T 18046、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料。

(4) 非活性混合材料

活性指标分别低于 GB/T 203、GB/T 18046、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料;石灰石和砂岩,其中石灰石中的 Al_2O_3 含量应不大于 2.5%。

(5) 窑灰

符合 JC/T 742 的规定。

(6) 助磨剂

水泥粉磨时允许加入助磨剂,其加入量应不大于水泥质量的 0.5%,助磨剂应符合 JC/T 667 的规定。

1.1.3 通用硅酸盐水泥的强度等级

(1) 硅酸盐水泥的强度等级

硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 六个等级。

(2) 普通硅酸盐水泥的强度等级

普通硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R 四个等级。

(3) 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥的强度等级

矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 六个等级。

1.1.4 通用硅酸盐水泥的技术要求

(1) 化学指标

通用水泥的化学指标应符合表 1-2 规定。

(2) 碱含量(选择性指标)

水泥中碱含量按 $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值表示。若使用活性集料,用户要求提供低碱水泥时,水泥中的碱含量应不大于 0.60%或由买卖双方协商确定。

(3) 物理指标

① 凝结时间 硅酸盐水泥初凝不小于 45min,终凝不大于 390min;普通硅酸盐水泥、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初凝不小于 45min,终凝不大于 600min。

表 1-2 通用水泥的化学指标

品种	代号	不溶物	烧失量	三氧化硫	氧化镁	氯离子
硅酸盐水泥	P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0	≤0.06
	P·II	≤1.50	≤3.5			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	≤5.0			
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	—	—	≤4.0	≤6.0	
	P·S·B	—	—		—	
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	—	—	≤3.5	≤6.0	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

注：1. 如果水泥压蒸试验合格，则水泥中氧化镁的含量（质量分数）允许放宽至 6.0%。
2. 如果水泥中氧化镁的含量（质量分数）大于 6.0%时，需进行水泥压蒸安定性试验并合格。
3. 当有更低要求时，该指标由买卖双方协商确定。

② 安定性 沸煮法合格。

③ 强度 不同品种不同强度等级的通用硅酸盐水泥，其不同各龄期的强度应符合表 1-3 的规定。

表 1-3 强度指标

品种	强度等级	抗压强度/MPa ≥		抗折强度/MPa ≥	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0		4.0	
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0		5.0	
	62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
	62.5R	32.0		5.5	
普通硅酸盐水泥	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0		4.0	
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0		5.0	
其他通用水泥	32.5	10.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	15.0		3.5	
	42.5	15.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	19.0		4.0	
	52.5	21.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	23.0		4.5	

④ 细度（选择性指标） 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥以比表面积表示，不小于 300m²/kg；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以筛余表示，80μm 方孔筛筛余不大于 10%或 45μm 方孔筛筛余不大于 30%。

1.1.5 水泥的主要矿物组成

水泥的质量主要决定于熟料的质量,而较好的熟料应该具有适当的矿物组成和岩相结构。因此,控制熟料的矿物组成和化学成分,是提高水泥质量的重要环节。

水泥种类不同,其熟料矿物组成便有所不同。如硅酸盐水泥的主要化学成分是 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,但它们并不是以单独的氧化物存在,而是以两种或两种以上的氧化物反应组合成各种不同的氧化物集合体,即以多种熟料矿物的形态存在。而硅酸盐水泥熟料的主要矿物有如下4种:硅酸三钙, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,可简写为 C_3S ;硅酸二钙, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,可简写为 C_2S ;铝酸三钙, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,可简写为 C_3A ;铁铝酸四钙, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,可简写为 C_4AF 。

以上4种矿物主要由氧化钙(CaO)、氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)和氧化铁(Fe_2O_3)经过高温煅烧化合而成。除此之外,还含有少量的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)、方镁石($f\text{-MgO}$)、含碱矿物和玻璃体等。通常,熟料中硅酸三钙和硅酸二钙的含量占75%左右,称为硅酸盐矿物;铝酸三钙和铁铝酸四钙含量占22%左右,在煅烧过程中,它们与氧化镁、碱等在1250~1280℃下会逐渐熔融成液相以促进硅酸三钙的顺利形成,故称为熔剂性矿物。

上述各种矿物组成的特点及他们对水泥性能的影响在《水泥工艺学》中有详细的介绍,在此不再赘述。

1.2 集料

1.2.1 集料的作用和类别

(1) 集料的作用

集料是混凝土的主要组成材料,它占混凝土总体积的3/4以上。尽管说集料只能算是一种填充材料,然而集料在混凝土中的功能却是不容忽视的。集料在混凝土中有技术和经济双重作用。在技术上,集料的存在使混凝土比纯水泥浆具有更高的体积稳定性和更好的耐久性;在经济上,它比水泥便宜得多,作为水泥的廉价填充材料,使该建筑材料成本低廉。集料的具体作用如下。

① 骨架增强作用 一般来说,集料的强度比硬化水泥石的强度高。在硬化水泥石与集料较好的黏结情况下,当混凝土受到外力作用时,相当一部分应力由集料承担。在混凝土中,集料起一个骨架作用。因此,一些研究学者也将集料称为骨料。

② 稳定体积作用 水泥等一些胶凝材料在水化反应过程中通常会伴随着一些体积变化。在干燥环境下,硬化水泥石中各种水的失去也将伴随着一些体积变化。集料一般不发生化学反应,而且普通集料的吸水率很小,因此,它的体积稳定性远远优于硬化水泥石。由于集料的弹性模量较高、热膨胀系数较低,在力学作用下,当温度变化时所产生的变形也比硬化水泥石小。大量集料的存在对保持混凝土体积稳定性起了相当大的作用。

③ 调整混凝土密度作用 在混凝土中,集料占据了绝对优势的体积,因此,混凝土的密度在很大程度上取决于集料的密度。普通集料的密度为2600~2700 kg/m^3 。而有些集料非常轻,如膨胀珍珠岩,颗粒容重仅有400~800 kg/m^3 。相反,有些集料则非常重,如重晶石密度为4300~4700 kg/m^3 ,磁铁矿密度为4900~5200 kg/m^3 ,赤铁矿密度为5000~5300 kg/m^3 。

m^3 。集料密度（颗粒容重）如此大的差别为制备不同质量的混凝土提供了可能性。对于一些墙体，可用一些较轻的集料来制备轻质混凝土，以减少建筑物的质量、减轻基础和结构的负担。对于一些防护结构，可用一些较重的集料来制备重混凝土，以提高建筑物对各种射线的防护能力。不同质量的混凝土有着不同的作用，在这些混凝土中，集料起了重要的作用。

④ 控制混凝土温度变化作用 在混凝土的凝结硬化过程中，水泥及矿物掺和料与水的反应是一种放热反应。当热量不能散发时，放出的热量将使混凝土的温度升高。随着热量的散发，混凝土的温度将降低。这种温度变化常常是引起混凝土开裂的一个重要因素。而集料在混凝土水化硬化过程中不发生化学反应，不释放热量。显然，集料用量越多，混凝土的放热量越少，混凝土的温度变化也就越小。

⑤ 降低成本作用 在混凝土的组成材料中，除了水以外，集料是最廉价的组分。它比水泥和矿物掺和料都要便宜。在混凝土中集料所占的比例越大，混凝土的成本就越低。

(2) 集料的分类

为了不同的目的，对集料有不同的分类方法，最常用的分类方法有 3 种。

① 根据颗粒大小分类 可分为粗集料和细集料。混凝土的集料通常包含有从零点几毫米至几十毫米，甚至更大的粒径。一般把 $0.15 \sim 5\text{mm}$ 粒径的集料称为细集料，例如砂子等；把粒径大于 5mm 的集料称为粗集料，如碎石等。

② 根据集料的形成过程分类 可分为天然集料和人工集料。经自然条件风化、磨蚀而成的集料称为天然集料，如天然砂、天然石子（卵石）等。由天然岩石经人工破碎而成的集料称为人工集料，如人工砂、人工石子（碎石）。天然集料是由自然条件风化、磨蚀而成的，因而比较圆润、无棱角。而人工集料是由岩石破碎而得到的，因而棱角比较明显。另外，还有一些卵石较大，为了满足工程的需要，将它稍微破碎一下使用，这种集料的相当一部分未破碎的表面仍具有天然集料的特征，比较圆润，而一些破碎所产生的新表面则形成一些棱角，这种集料的性能介于天然集料和人工集料之间，工程上称为碎卵石。

③ 根据集料的容重或密度分类 可分为普通集料（用以配制普通混凝土，如砂、碎石、卵石等）、轻集料（用以配制轻集料混凝土，如浮石、陶粒等）、重集料（用以配制特殊用途的防护混凝土，如重晶石等）。其具体分类情况见表 1-4 所列。

表 1-4 混凝土集料按容重的分类

种 类	干燥捣实集料的容重 /(kg/m^3)	混凝土的容重 /(kg/m^3)	典型的混凝土强度 /MPa	用途
超轻质	<500	$300 \sim 1100$	<7	非结构用隔热材料
轻质	$500 \sim 800$	$1100 \sim 1600$	$7 \sim 14$	非结构用
结构用轻质	$650 \sim 1100$	$1450 \sim 1900$	$17 \sim 35$	结构
正常重	$1100 \sim 1750$	$2100 \sim 2550$	$20 \sim 40$	结构
特重	>2100	$2900 \sim 6100$	$20 \sim 40$	防辐射

1.2.2 集料的主要技术性质

1.2.2.1 集料的强度和弹性模量

集料的强度应高于混凝土的设计抗压强度，这是因为在承载时集料中的应力大大超过混凝土的抗压强度。混凝土破坏时，如发现许多集料被压碎，说明这种集料的强度低于混凝土的名义抗压强度。

从耐久性意义上说，强度中等或适当低的集料更适合配制混凝土。因为过强、过硬的集料价格稍高，还可能在混凝土因温度或湿度原因发生体积变化时，使水泥石受到较大的应力

而开裂。

岩石的抗压强度和弹性模量取决于它的组成和结构，并随其风化的程度而有很大的差别。坚实致密的岩石，其抗压强度平均可达 200MPa 以上，但大多数集料岩石的抗压强度都在 80MPa 左右。

混凝土受压时，大量的集料处于受折、受剪状态，所以为了更接近地反映集料实际受力情况，常用压碎试验表示集料的力学性能，即将一定粒级（如 10~20mm）的干燥集料装在一个圆筒形模内，按规定的方法捣实，然后装上压头，在压力机上进行压碎试验。在各国的现行标准中，有两种不同的表示压碎值的指标，一种是以一定的加荷速度加至规定的荷载后，倒出经压碎的集料，筛除小于 1/4 试样下限尺寸（如 2.5mm）的部分，然后用筛余重量与原试样重量之百分比作为压碎值指标。另一种是以达到 10% 压碎值时的荷载表示，这种表示指标是考虑到某些压碎值超过 25%~30% 的脆弱集料用规定荷载法试验时，在达到规定荷载之前，相当部分集料已被压碎，使集料紧密，从而影响随后继续加荷的压碎量。压碎试验方法还可用于鉴定轻集料如陶粒、炉渣等的强度性能。集料的压碎指标与集料岩石的抗压强度之间虽无直接的数学关系，但在定性上，这两种试验结果是一致的。

集料岩石的弹性模量和强度之间并不存在通常的关系，例如：花岗岩的弹性模量为 4.6×10^4 MPa，辉长岩和辉绿岩的弹性模量为 8.5×10^4 MPa，它们的强度在 145~160MPa 之间。一般说，集料的弹性模量愈高，配制的混凝土的弹性模量也愈高。同时，集料的弹性性质还会影响混凝土的徐变和收缩。

1.2.2.2 集料的比重和容重

混凝土中集料比重（相对密度）的概念是指包括非贯通毛细孔在内的集料的重量与同体积水的重量之比，这样的比重称为“视比重”[又称“表观比重”（即表观密度）]。测定集料的视比重必须按规定的方法进行。但对于集料试样的重量有两种计量方法：一种是以干燥集料的试样重，即在 105~110℃ 条件下烘干至恒重时的重量作为计算基准；另一种是对饱和面干状态的集料毛细孔干状态的集料试样重作为计算基准，后者更适合于混凝土的配料计算，这是因为集料毛细孔中所饱和的水并不参与与水泥的化学反应，不影响混凝土混合料的流动性能，因此可以看成是集料的组成部分。反之，干燥的集料在混凝土混合料中却要吸收水分达到或接近饱和状态，影响有效的水灰比。集料的视比重取决于集料组成矿物的比重和孔隙的数量。大多数天然集料的视比重在 2.6~2.7 之间。

集料的容重反映集料在堆积情况下的空隙率。很显然，它取决于集料堆积的紧密程度（即捣实的方法）以及集料的颗粒形状和大小分布，因为颗粒形状和大小分布决定了集料可能压紧的程度。相同粒径的颗粒只能堆紧到一定的极限范围。而不同粒径的颗粒，有可能使小的颗粒填充在大颗粒间的空隙中，增加容重。对于一定视比重的集料而言，容重愈大，意味着需要用水泥浆填充的空隙愈少。因此，集料的容重试验与计算是混凝土配合比设计的基础。集料的容重有松散容重和紧密容重之分，它们的测定必须按规定的方法进行。

根据集料的容重和视比重，可以按式(1-1) 计算出集料的空隙率：

$$p = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma}\right) \times 100\% \quad (1-1)$$

式中， p 为集料的空隙率，%； γ_0 为集料的容重； γ 为集料的视比重。

1.2.2.3 集料的孔隙率、吸水率和含水率

集料中存在孔径变化范围很大的毛细孔，最大的孔甚至肉眼都能看到，最小的孔一般也比水泥石的凝胶孔大。这些孔有的封闭在集料的内部，有的扩展到颗粒的表面。集料中孔的

状态影响集料和水泥石的黏结、混凝土的抗冻性以及集料的化学稳定性和抗磨性。

集料的吸附水量用吸水率表示，它在一定程度上反映集料中孔的特性（孔隙率、孔大小及贯通性）。集料的吸水率是表示饱和面干集料的含水率。集料的含水率则表示集料实际的含水量，以试样在 105~110℃ 条件下烘干至恒重确定。

由于集料的水分含量随气候而变化，同一料堆各个部位也可能不一样，因此必须经常测定，以便调整混凝土配合比中水和集料的称量。

1.2.2.4 集料的体积稳定性

在这里，集料的体积稳定性专指集料抵抗由于自然条件的变化而引起体积过分变化的能力。引起集料体积变化的自然因素有冻融循环、干湿交替等。集料的体积变化可能导致混凝土的局部开裂、剥落甚至使整个结构处于危险状态。有些多孔燧石、页岩、带有膨胀黏土的石灰岩等常表现为体积稳定性差。例如一种变质粗玄岩，由于干湿交替引起的体积变化达 600×10^{-6} 之多，含有这种集料的混凝土在干湿变化的条件下就会发生破坏。

多孔岩石制成集料，当它们吸水至临界值的水量时，容易受冻而遭到破坏。鉴定集料的抗冻性，可用硫酸钠或硫酸镁溶液浸泡法。一定级配的集料试样交替地在硫酸钠饱和溶液中浸泡及烘箱中烘干，使集料毛细孔内形成盐的结晶（类似于结冰作用）。经过一定次数循环后，用筛分析确定试样各级粒径的集料重量损失百分数，并以总的重量损失百分数作为评定集料的抗冻性能指标，即：

$$\text{总的重量损失 } P = \frac{a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_4 P_4}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， $a_1 \sim a_4$ 分别为试样各级粒径的重量百分率； $P_1 \sim P_4$ 分别为试样试验后各级粒径的重量损失百分率。

值得指出的是，单纯集料和它在混凝土中包裹有水泥浆时的情况是不同的。一方面受自然因素侵害的条件不一样，另一方面集料的强度可能足以抵抗冻结引起的压力，但它的体积膨胀却可能引起水泥石的开裂。所以很难预言集料的耐久性对混凝土的耐久性有什么确定的影响。因此，对集料稳定性的鉴定只能作为集料本身质量好坏的比较，或在对集料发生怀疑的情况下，才对集料体积稳定性作鉴定分析。

1.2.2.5 颗粒形状和表面状态

集料除了岩石学上的特征之外，它们的颗粒形状和表面状态也是很重要的。比较方便的方法是确定这些颗粒的某些几何特征。对于混凝土而言，主要不在于知道颗粒的个别外形，而是要知道由不同形状的颗粒所组成的整体集料的某些特征。

集料的颗粒形状，从实用角度上大致可以分为球形（蛋形）、棱角形、片状、针状等 4 种类型。

一种尺寸的颗粒，堆实的程度取决于它们的形状。在英国用“棱角系数”表示集料的颗粒形状对堆实程度的影响。所谓“棱角系数”即以 67 减去按规定的方法将集料填满容器时，固体体积所占的份数。67 代表最圆的卵石用同样的填充方法所得的固体体积分数。所以“棱角系数”即表示超过圆形卵石空隙率的百分率。“棱角系数”愈大，集料颗粒的棱角愈多，堆积时的空隙率也愈大。

另一种表示颗粒形状的特征数是颗粒表面积对其体积之比。这个比值愈小，愈接近于球形；比值愈大，愈趋向于长方体。表面积与体积之比值很大的颗粒，像针状与片状颗粒，影响混合料的工作性，并倾向于一个方面排列，对混凝土的耐久性不利。所以在国家规定的集料标准中，限定了针状或片状颗粒的含量。

集料颗粒的表面状态主要是指粗糙程度和孔的特征。它们影响集料与水泥石的黏结,从而影响混凝土的强度,尤其是抗弯强度。特别是配制高强混凝土时,黏结强度往往低于水泥石的抗拉强度,此时,集料的颗粒形状和表面状态具有更大意义。一般来说,粗糙的表面和多孔的表面与水泥石的黏结性能较好。经验证明,在水灰比相同的条件下,碎石混凝土较卵石混凝土强度可提高 10% 左右。

1.2.2.6 集料的级配

集料中各级粒径颗粒的分配情况称为集料的级配。集料的级配对混凝土混合料的工作性产生很大的影响,进而影响混凝土的强度、变形性能、热学性能等。良好的集料级配可用较少的加水量制得流动性好、离析泌水少的混合料,并能在相应的成型条件下,得到均匀密实的混凝土,同时达到节约水泥的效果。因此,我们在配制混凝土时,要重视集料的级配。

(1) 细集料的级配

细集料的级配通常用筛分方法来确定。表示细集料粗细程度的方法有 3 种,即级配曲线法、细度模数法和平均粒径法。

① 级配曲线法 将细集料筛分后计算出各级筛上的累计筛余质量分数,并将计算结果绘制成级配曲线,如图 1-1 所示。根据曲线所处的位置可以判断细集料的粗细程度。级配曲线给出了细集料比较详细的情况,从曲线中可以知道哪些粒级的细集料缺乏、哪些粒级的偏多,这有助于调整集料的级配。我国的标准将砂的级配划分为三个区段,如图 1-2 所示。Ⅰ区相当于细度模数为 2.8~3.7 范围,属于粗砂或中粗砂;Ⅱ区相当于细度模数为 2.1~3.2 范围,基本上属于中砂;Ⅲ区相当于细度模数为 1.6~2.4 范围,基本上属于细砂。

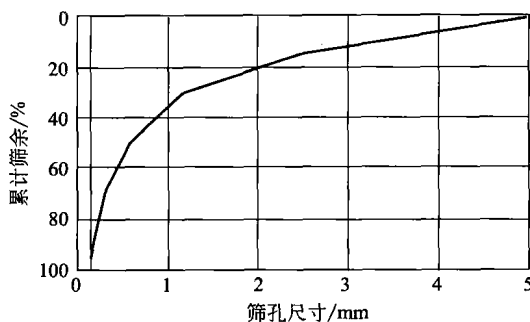


图 1-1 级配曲线

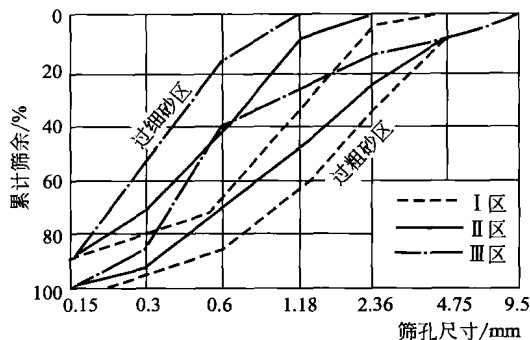


图 1-2 砂筛分曲线

② 细度模数法 细度模数为各级筛上的累计筛余百分数的总和,即:

$$M_k = \sum A_i \quad (1-3)$$

式中, M_k 为细度模数; A_i 为各号筛上的累计筛余, %。

根据细集料的定义,注意 5mm 以上的筛余不属于砂的范围,因此,在计算时,各级筛上的累计筛余必须扣除 5mm 筛上的筛余,即:

$$M_k = \frac{(A_{2.5} + A_{1.2} + A_{0.6} + A_{0.3} + A_{0.15}) - 5A_5}{1 - A_5} \quad (1-4)$$

式中, A_5 、 $A_{2.5}$ 、 $A_{1.2}$ 、 $A_{0.6}$ 、 $A_{0.3}$ 、 $A_{0.15}$ 分别为筛孔尺寸为 5mm、2.5mm、1.2mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm 各筛上的累计筛余百分数。

一般说,粗砂需水量较小,但容易离析。在低水灰比富水泥浆拌和物中,由于水灰比较