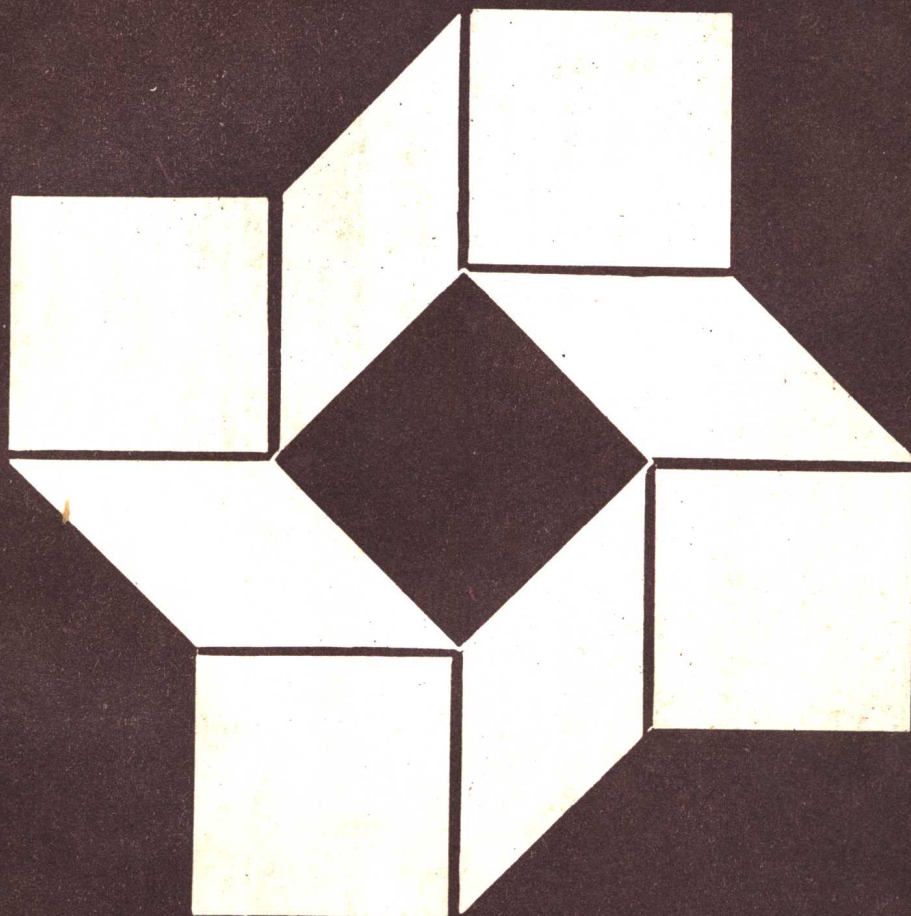


# 水泥工艺学



沈 威 黄文熙 闵盘荣 编著

高等学校试用教材



武汉工业大学出版社

高等学校试用教材

# 水 泥 工 艺 学

沈 威 黄文熙 闵盘荣 编著

武汉工业大学出版社

### 内 容 提 要

本书经高等学校无机非金属材料类专业教材编审委员会审定为无机非金属材料、硅酸盐工程专业本科教学用书。

全书系统阐述硅酸盐水泥的生产方法、矿物组成、原料配料、熟料烧成、粉磨工艺、质量控制和水化硬化的基本理论,对水泥品种和混凝土也作了较详细的叙述。本书在第一版基础上作了较大的修改和补充,进一步加强现行技术政策在教材中的体现,及时采用最新颁布的国家标准,体现近年来在工艺进展、水化研究、品种开发等方面的新成果。

本书还可供从事水泥生产、科研、设计、厂矿的有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

水泥工艺学

沈 威 黄文熙 闵盘荣 编著

责任编辑 王忠林

武汉工业大学出版社出版(武汉市武昌珞狮路14号)

新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销

中南三〇五印刷厂印刷

开本: 787×1092mm 1/32 [照排胶印] 印张: 23 字数: 560千字

1991年7月第1版 1992年11月第2次印刷

印数: 5001—8000册 定价: 7.35元

ISBN 7-5629-0451-0/TQ·32

## 前 言

《水泥工艺学》作为高等学校教材于1986年由中国建筑工业出版社第一次出版以来，水泥工艺领域不论在理论研究还是生产实践等方面都有不少新的进展，而且各校教育改革的深入也提供了更多有益的经验。鉴于以上情况，我们对原书进行了较大的修改和补充。主要是对水泥的工艺进展、水化研究、品种开发等有关内容作了必要的更新补充；进一步加强现行技术政策在教材中的体现，及时引用最新颁布的国家标准；并在删繁就简、深入浅出、有利于自学方面作了更多努力。

全书以硅酸盐水泥的组成、煅烧、粉磨和质量控制作为工艺方面的重点，有关水化、硬化的内容则主要为进一步掌握工艺要求、改善性能、研制新品种水泥提供必要的基础。对火山灰质水泥、矿渣水泥和粉煤灰水泥着重于介绍工艺、水化和性能方面的特点；至于其他品种水泥则选具有代表性的典型品种，为生产、应用和开发研究介绍方法，提供思路。

本教材系高等学校无机非金属材料、硅酸盐工程等专业的教学用书。在修订编写过程中，更好地注意了与《硅酸盐物理化学》、《水泥热工过程及设备》、《水泥生产过程及设备》以及《水泥工厂工艺设计概论》等课程的衔接与分工，避免不必要的重复，同时还保持必要的系统性。有关的计量单位全部采用国际单位制，必要时则与工程制同时并用；在书后还附有常用单位换算表，以便对照查阅。

本书由同济大学沈威主编。编写分工是，沈威：第一、八、九、十、十五章；四川建材学院黄文熙：第二章至第七章；南京化工学院闵盘荣：第十一章至第十四章。

全书由浙江大学楼宗汉主审。编者对主审人的精心审阅表示衷心的感谢。同时对参加本书初版审稿工作的天津水泥工业设计院余裕嘉、国家建材局刘公诚、吴兆正、张礼本，南京化工学院王国宾、杨南如、唐明述，中国建材研究院薛君环、山东建材学院张柏寿以及抚顺水泥厂孙仲英等水泥界专家致深切的谢意。

由于编者水平所限，谨请批评指正。

编 者  
1990年7月

# 目 录

第一章 绪 论	1
一、胶凝材料的定义和分类	1
二、胶凝材料发展简史	1
三、水泥的定义和分类	2
四、水泥在国民经济中的重要性	2
五、水泥工业发展概况	3
第二章 硅酸盐水泥的生产	6
第一节 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的标准	6
第二节 硅酸盐水泥的生产方法	10
第三节 硅酸盐水泥生产的主要工艺过程	13
第三章 硅酸盐水泥熟料的组成	16
第一节 熟料的矿物组成	16
第二节 熟料的率值	24
第三节 熟料矿物组成的计算	29
第四章 硅酸盐水泥的原料及配料计算	33
第一节 原料	33
第二节 水泥生料的易烧性	39
第三节 熟料组成的选择	41
第四节 配料计算	44
第五章 硅酸盐水泥熟料的煅烧	53
第一节 生料在煅烧过程中的物理与化学变化	55
第二节 微量元素和矿化剂对熟料煅烧和质量的影响	73
第三节 回转窑内的煅烧	81
第四节 立波尔窑、悬浮预热器窑和窑外分解窑内的煅烧	91
第五节 熟料冷却机	113
第六节 立窑内的煅烧	115
第七节 煅烧新技术的研究	127
第八节 窑用耐火材料	129
第六章 粉磨工艺	136
第一节 粉磨物料的性质	136
第二节 粉磨细度和入磨物料粒度	139
第三节 粉磨系统和粉磨设备	143
第四节 提高粉磨系统产量、质量、降低消耗的主要途径	149

第七章 生产控制与均化	161
第一节 石灰石、粘土矿山的控制	161
第二节 原、燃料的预均化和控制	161
第三节 生料的均化和控制	163
第四节 熟料和水泥的质量控制	164
第五节 生产控制的自动化	168
第八章 硅酸盐水泥的水化和硬化	175
第一节 熟料矿物的水化	175
第二节 硅酸盐水泥的水化	181
第三节 水化速率	184
第四节 硬化水泥浆体	188
第九章 硅酸盐水泥的性能	203
第一节 凝结时间	203
第二节 强度	209
第三节 体积变化	217
第四节 水化热	222
第五节 粉磨细度	223
第十章 硅酸盐水泥的耐久性	227
第一节 抗渗性	227
第二节 抗冻性	229
第三节 环境介质的侵蚀	231
第四节 碱-集料反应	237
第五节 耐久性的改善途径	239
第十一章 火山灰水泥和粉煤灰水泥	245
第一节 火山灰质混合材料	245
第二节 火山灰质混合材料的活性检定	247
第三节 火山灰质硅酸盐水泥	248
第四节 粉煤灰硅酸盐水泥	251
第五节 沸腾炉渣水泥	255
第十二章 高炉矿渣和矿渣水泥	257
第一节 粒化高炉矿渣	257
第二节 矿渣硅酸盐水泥	262
第三节 石膏矿渣水泥	266
第四节 用钢铁工业渣配制的其他无熟料水泥	268
第十三章 高铝水泥	272
第一节 矿物组成和化学组成	272
第二节 高铝水泥的生产	274
第三节 高铝水泥的水化和硬化	278

第四节	高铝水泥的水化产物、孔隙率和强度间的关系 .....	279
第五节	高铝水泥的性质 .....	282
第六节	快硬高强铝酸盐水泥 .....	285
第七节	低钙铝酸盐水泥与耐火混凝土 .....	287
第十四章	特种水泥 .....	289
第一节	快硬高强水泥 .....	289
第二节	抗硫酸盐硅酸盐水泥 .....	299
第三节	油井水泥 .....	301
第四节	白色和彩色水泥 .....	307
第五节	道路水泥 .....	311
第六节	中热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥 .....	313
第七节	低热微膨胀水泥 .....	315
第八节	膨胀水泥 .....	316
第九节	砌筑水泥 .....	323
第十节	防辐射水泥 .....	324
第十一节	耐酸水泥 .....	325
第十二节	耐高温水泥 .....	328
第十五章	混凝土和砂浆 .....	331
第一节	混凝土的组成材料 .....	331
第二节	混凝土拌合物的和易性 .....	335
第三节	混凝土的强度 .....	339
第四节	混凝土的耐久性 .....	342
第五节	混凝土的配合比设计和工艺控制 .....	344
第六节	混凝土外加剂 .....	348
第七节	特种混凝土 .....	350
第八节	砂浆 .....	354
附录		
一、	常用原子量与分子量 .....	356
二、	常用单位及其换算 .....	357
参考文献	.....	358

# 第一章 绪 论

## 一、胶凝材料的定义和分类

凡能在物理、化学作用下，从浆体变成坚固的石状体，并能胶结其他物料而具有一定机械强度的物质，统称为胶凝材料，又称胶结料，可分为无机和有机两大类。沥青和各种树脂属于有机胶凝材料。无机胶凝材料则按照硬化条件，又可分为水硬性和非水硬性两种。水硬性胶凝材料在拌水后既能在空气中又能在水中硬化，通常称为水泥，如硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等。非水硬性胶凝材料只能在空气中硬化，故又称气硬性胶凝材料，如石灰、石膏、耐酸胶结料等。

## 二、胶凝材料发展简史

胶凝材料的发展，有着极为悠久的历史。

远在距今约4000~10000年的新石器时代，由于石器工具的进步，劳动生产力的提高，挖穴建室的建筑活动已经兴起。人们就逐渐使用粘土来抹砌简易的建筑物，有时还掺入稻草、壳皮等植物纤维的加筋增强。但未经煅烧的粘土并无抗水能力，而且强度很低。另外，在我国新石器时代的遗址中，还发现用天然姜石夯实而成的柱础以及铺墁的地面和四壁等，甚为光滑坚硬。经测定，姜石是一种二氧化硅含量高的石灰质原料，是黄土中的钙质结核。在当时的建筑活动中，能有意识地将黄土中的姜石挑选出来，捣碎成粉后应用于特定场合，不能不说是当时居室建筑的一大进步。

随着火的发现，大约在公元前2000~3000年，我国、埃及、希腊以及罗马等就已开始利用经过煅烧所得的石膏或石灰来调制砌筑砂浆。例如古埃及的金字塔，我国著名的万里长城以及其他许多宏伟的古建筑，都是用石灰、石膏作为胶凝材料砌筑而成的。我国有关石灰的文字记载，最早可以上溯到公元前7世纪的周朝。从目前考古发掘的材料分析，至迟在汉朝（公元2世纪），人工烧制石灰已经达到相当高的水平。

随着生产的发展，逐渐要求有强度较高并能防止被水浸蚀和冲毁的胶凝材料。到公元初，古希腊人和罗马人都已经发现，在石灰中掺加某些火山灰沉积物，不仅强度提高，而且能抵御淡水或含盐水的侵蚀。例如罗马的“庞贝”城以及罗马圣庙等著名古建筑都是用石灰-火山灰材料砌筑而成的。又由于当时较多应用的是普佐里(Pozzoli)附近所产的火山凝灰岩，因此在意大利文中就将“Pozzolana”作为火山灰的名称，以后又扩大为凡是属于这类的矿物材料都称做“Pozzolana”，并沿用至今。在我国古代建筑中所大量应用的“三合土”，即石灰与黄土的混合，或另加细砂等，实际上也是一种石灰-火山灰材料。随后，人们又进一步发现，将碎砖、废陶器等磨细后，可以代替天然的火山灰，与石灰混合，同样能使其具有水硬性。从而使火山灰质材料由天然的发展到人工制造，煅烧过的粘土和石灰混合可以获得一定抗水性的胶凝材料。

直到18世纪后半期，又先后出现了水硬性石灰和罗马水泥，都是将含有适量粘土的粘土质石灰石经过煅烧而得。并在此基础上，发展到用天然水泥岩(粘土含量在20~25%左右的



石灰石)煅烧、磨细而制得天然水泥。然后,逐渐发现可以用石灰石与定量的粘土共同磨细混匀,经过煅烧制成由人工配料的水硬性石灰。这实际上可以看成是近代硅酸盐水泥制造的雏型。

19世纪初期(1810~1825年),用人工配合原料,再经煅烧、磨细以制造水硬性胶凝材料的方法,已经开始组织生产,并着手高温煅烧至烧结程度,以获得烧快(熟料)作为提高质量的措施。因为这种胶凝材料凝结后的外观颜色与当时建筑上常用的英国波特兰岛出产的石灰石相似,故称之为波特兰水泥(Portland Cement,我国称为硅酸盐水泥)。英国阿斯普丁(J.Aspdin)于1824年首先取得了该项产品的专利权。由于含有较多的硅酸钙,不但能在水中硬化,而且能长期抗水,强度甚高。其首批大规模使用的实例是1825~1843年修建的泰晤士河隧道工程。

硅酸盐水泥出现后,应用日益普遍,对于工程建筑起了很大的作用。但随着现代工业的发展,仅仅硅酸盐水泥、石灰、石膏等几种胶凝材料已远远不能满足工业建设和军事工程的需要。到20世纪初,就逐渐发展出各种不同用途的硅酸盐水泥,如快硬水泥、抗硫酸盐水泥、低热水泥以及油井水泥,等等,而在1907~1909年发明的以低碱性铝酸盐为主要成分的高铝水泥,具有早强快硬的特性。近20多年来,又陆续出现了硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等品种,从而使水硬性胶凝材料发展成更多类别。

由上可见,胶凝材料的发展是经历着:天然胶凝材料(如粘土)——石膏、石灰——石灰-火山灰——水硬性石灰、天然水泥——硅酸盐水泥——不同品种水泥的各个阶段。可以相信,随着社会生产力的提高,胶凝材料还将有较快的发展,以满足日益增长的各种工程建设和人民生活的需要。

### 三、水泥的定义和分类

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

水泥的种类很多,按其用途和性能,可分为:通用水泥、专用水泥以及特性水泥三大类。通用水泥为用于大量土木建筑工程一般用途的水泥,如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥等。专用水泥则指有专门用途的水泥,如油井水泥、砌筑水泥等。而特性水泥是某种性能比较突出的一类水泥,如快硬硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥、自应力铝酸盐水泥等。也可按其组成为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥以及少熟料或无熟料水泥等几种。目前水泥品种已达100余种。

### 四、水泥在国民经济中的重要性

水泥是建筑工业三大基本材料之一,使用广,用量大,素有“建筑工业的粮食”之称。生产水泥虽需较多能源,但是水泥与砂、石等集料所制成的混凝土则是一种低能耗型建筑材料,其单位质量的能耗只有钢材的 $1/5 \sim 1/6$ ,铝合金的 $1/25$ ,比红砖还低35%。根据预测,下一个世纪的主要建筑材料,还将是水泥和混凝土,水泥的生产和研究仍然极为重要。

水泥粉末与水拌和后,表面的熟料矿物立即与水发生水化反应,放出热量,形成一定的水化产物。由于各种水化产物的溶解度很小,就在水泥颗粒周围析出。随着水化作用的进行,析出的水化产物不断增多,以致相互接合。这个过程的进展,使水泥浆体稠化而凝结。随后

变硬，并能将拌在一起的砂、石等散粒胶结成整体，逐渐产生强度。因此，水泥或水泥混凝土的强度是随龄期延长而逐渐增长的。早期增长甚快，往后逐渐减缓。但是，只要维持适当的温度和湿度，其强度在几个月、几年后，还会进一步有所增长。另一方面，也可能在几十年后尚有未水化的部分残留，仍具有继续进行水化作用的潜在能力。

作为胶凝材料，除水硬性外，水泥还有许多优点：水泥浆有很好的可塑性，与砂、石拌合后仍能使混合物具有必要的和易性，可浇筑成各种形状尺寸的构件，以满足设计上的不同要求；适应性强，还可用于海上、地下、深水或者严寒、干热的地区，以及耐侵蚀、防辐射、核电站等特殊要求的工程；硬化后可以获得较高强度，并且改变水泥的组成，可以适当调节其性能，满足某些工程的不同需要；尚可与纤维或者聚合物等多种无机、有机材料匹配，制成各种水泥基复合材料，有效发挥材料潜力；与普通钢铁相比，水泥制品不会生锈，也没有木材这类材料易于腐朽的缺点，更不会有塑料年久老化的问题，耐久性好，维修工作量小，等等。因此，水泥不但大量应用于工业与民用建筑，还广泛应用于交通、城市建设、农林、水利以及海港等工程，制成各种形式的混凝土、钢筋混凝土的构件和构筑物。而水泥管、水泥船等各种水泥制品在代钢、代木方面，也越来越显示出技术经济上的优越性。同时，也正是由于钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土和钢结构材料的混合使用，才使高层、超高层、大跨度等以及各种特殊功能的建筑物、构筑物的出现有了可能。此外，如宇航工业、核工业以及其他新型工业的建设，也需要各种无机非金属材料，其中最为基本的则都是以水泥基为主的新材料。因此，水泥工业的发展对保证国家建设计划的顺利进行，人民生活水平的提高，具有十分重要的意义。而且，其他领域的新技术，也必然会渗透到水泥工业中来，传统的水泥工业势必随着科学技术的迅猛发展而带来新的工艺变革和品种演变，应用领域必将有新的开拓，从而使其在国民经济中起到更为重要的作用。

### 五、水泥工业发展概况

自从水泥工业性产品的实际应用，至今一个半世纪以来，生产持续扩大，工艺和设备不断改进，品种和质量也有极大的发展。硅酸盐水泥是在第一次产业革命中问世的。当时，用间歇式的土窑烧成水泥熟料。随着以冶炼技术为突破口的第二次产业革命的兴起，推动了水泥生产设备的更新。1877年用回转窑烧制水泥熟料获得专利权，继而出现单筒冷却机、立式磨以及单仓钢球磨等，有效地提高了产量和质量。到19世纪末与20世纪初，由于其他工业所提供的燃料、工艺技术和生产设备，使水泥工业一直进行着频繁的改造与更新。1910年立窑实现了机械化连续生产；1928年立波尔窑的出现，使窑的产量明显提高，热耗降低较多。特别是在第二次世界大战后，以原子能、合成化工为标志的第三次产业革命达到了高度工业化阶段，水泥工业又相应发生了深刻的变化。50年代初悬浮预热器窑的应用，更使热耗大幅度降低；其他的水泥制造设备也不断更新换代。到1950年全世界水泥产量为1.33亿吨。

60年代初，以电子计算机为代表的新技术在水泥工业中开始得到应用。同时，日本将联邦德国的悬浮预热器技术引进以后，于1971年开发了水泥窑外分解技术，从而带来了水泥生产技术的重大突破。又随着原料、生料预均化等多种生产技术以及X射线荧光分析等在线检测方法的发展和逐步完善，使干法生产的熟料质量明显提高，在节能方面取得了突破性的进展，干法工艺已具有压倒的优越性。到70年代中期，先进的水泥厂通过电子计算机和自动化的控制仪表等设备，已经采用全厂集中控制、巡回检查的方式，在生料、烧成车间以及包

装发运、矿山开采等环节分别实现了自动控制。另外，在水泥的科学研究中，各种高效测试仪器的应用，使水泥有关的基础理论和应用研究也取得了长足的进展。1980年世界水泥总产量达8.7亿吨。据预测，到本世纪末水泥总产量将为16~60亿吨。

我国的水泥工业不但总产量已连续5年居世界首位，1989年达2.1亿余吨，而且在工艺技术方面也有很大进展。我国早在1889年就于河北唐山首先建立了启新洋灰公司(今启新水泥厂)正式生产水泥，以后又相继建立了大连、上海、中国、广州等水泥厂。但是由于帝国主义、封建主义和官僚资本主义三座大山的压迫和剥削，水泥工业在解放前的发展非常缓慢。一直到新中国成立以后，我国的水泥工业才得到了新生。解放后水泥产量快速上升，从1952年到1987年的35年期间，水泥年产量从286万吨提高到1.86亿吨，增长了65倍之多，而且水泥工业布局基本展开，技术上有很大进步。在50年代中期，我国就开始试制湿法回转窑和半干法立波尔窑成套设备，迈出了我国水泥生产技术发展的重要一步。从50年代到60年代，我国依靠自己的科研设计力量进行了预热器窑的试验。70年代初，又先后组织了预分解窑的开发工作。并陆续建成了几条立筒预热器和旋风预热器窑生产线及预分解窑试生产线。到70年代末以后，我国水泥生产技术的发展更为加速，水泥工业面貌有了很大改观。从1978年起，相继从国外引进了一批日产2000~4000吨熟料的预分解窑干法生产成套设备，不仅增加了水泥产量，而且迅速提高了我国的新型干法技术水平。同时，我国自行设计制造了日产700吨和2000吨熟料的水泥生产设备，并在江西水泥厂建成了第一条主要设备都是国产的生产线，它的建成投产标志着我国新型干法技术达到了一个新水平。到80年代末，我国新型干法生产能力可占大中型水泥厂生产能力的1/4。值得注意的是，我国的小水泥在经过50年代末和70年代两个发展高潮后，已成为我国水泥工业的一个重要方面，其产量占整个水泥工业总产量的80%以上。1980年以后，以提高质量、降低成本为目标进行了一系列技术改造，将普通立窑改造为机械化立窑，并将电子计算机配料、控制等多种新技术逐步引入立窑生产，对提高熟料产量和质量、生产新品种、改善劳动条件以及解决粉尘污染问题等都有显著作用，使我国机立窑生产技术水平又迈进了一大步。建国以来，水泥工业的科学研究工作也得到了很快的发展。我国的水泥品种，在多品种、多标号的方针指导下，已经由建国初期仅有硅酸盐水泥和白水泥等3~4种，发展到5个通用水泥系列以及硅酸盐和铝酸盐两大类、各个系列的特种水泥，以满足石油、水电、冶金、化工、机械等工业部门以及海港和国防等特种工程的需要。另外，我国在煅烧、粉磨、熟料形成、水泥的新矿物系列、水化硬化、混合材、外加剂、节能技术等有关的基础理论以及测试方法的研究和应用方面，也取得了较好的成绩。特别是根据材料科学的发展，加强了组成、结构及其与性能的关系以及生产、应用过程中的变化和行为等方面的研究，获得了可喜的进展。我国的水泥工业虽然在若干方面已处于世界前沿，但是也应该看到，与国际先进水平相比，还存在不小差距。我国水泥总产量虽已居世界首位，但人均产量仍较低。大中型水泥厂的生产设备，陈旧落后的占相当数量，能耗高的湿法工艺仍占总生产能力的较大比例。小水泥厂成本较高，劳动生产率低。有些厂质量不够稳定，环境污染比较严重。水泥工业技术队伍力量不足，人才相当缺乏。

当前，世界水泥工业的中心课题仍是能源、资源和环境保护等。我们一定要依靠技术进步来加速发展水泥工业，要在现有的技术基础上，因地制宜地采用先进技术，减少能耗，提高质量，降低成本，改善环境，增加产量，不断提高经济效益。今后要进一步优化工厂布局，

加速发展采用预分解窑的骨干企业，合理配置以机械立窑为中心的小型生产线，大力推进水泥工业的现代化。要以节能、提高效益为目的，有选择地对老厂进行技术改造；利用资源优势，扩大品种生产，进一步提高社会效益；同时要更好地重视理论建设，加强基础研究和应用基础研究，有效开发人才。从而形成一个具有中国特色的现代化水泥工业体系，以低能耗、高质量的水泥，通过经济合理的流通渠道，保证工农业建设、国防建设和人民生活的需要。对此，我们这一代人负有重大的历史责任，我们必须奋发学习，努力工作，积极推动技术进步，才能为加速实现水泥工业和水泥科学技术的现代化作出更大贡献。

## 第二章 硅酸盐水泥的生产

硅酸盐水泥是以硅酸钙为主要成分的熟料所制得水泥的总称。在国外，硅酸盐水泥常统称为波特兰水泥。根据我国国家标准GB175—85的规定，硅酸盐水泥则专指一种不掺任何混合材料的水泥品种。如掺有少量混合材料，即称为普通硅酸盐水泥；如掺加混合材料达一定数量时，则在前面冠以混合材料的名称：如矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥。上述五个品种，即是我国当前最为常用的所谓“五大品种”水泥。当熟料成分虽仍以硅酸钙为主，但适当调整熟料矿物组成、石膏掺入量、水泥粉磨细度或掺入少量某些外加剂，使水泥具有某种特殊性质或特种用途时，则在名称前冠以特殊性质或用途，如低热硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、白色硅酸盐水泥，等等。本章主要介绍硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的技术标准以及生产硅酸盐水泥的基本方法。

### 第一节 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的标准

#### 一、国家标准

(一) 定义(根据国家标准GB175—85的定义)

##### 1. 硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为硅酸盐水泥。

##### 2. 普通硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、少量混合材料、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)。水泥中混合材料掺量按质量百分比计：

掺活性混合材料时，不得超过15%，其中允许用不超过5%的窑灰或不超过10%的非活性混合材料来代替。

掺非活性混合材料时，不得超过10%。

##### 3. 组分材料

(1) 硅酸盐水泥熟料：凡以适当成分的生料烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分的产物，称为硅酸盐水泥熟料(简称熟料)。

(2) 石膏：天然石膏，必须符合国家标准《用于水泥中的石膏和硬石膏》的规定。工业副产石膏，即工业生产中以硫酸钙为主要成分的副产品。采用工业副产石膏时，必须经过试验，证明对水泥性能无害。

(3) 活性混合材料：系指具有火山灰性或潜在水硬性的混合材料。如粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料以及粉煤灰等，其品质要求必须分别符合GB203—78、GB2847—81和GB1596—79的要求。

(4) 非活性混合材料：系指活性指标不符合标准要求的潜在水硬性或火山灰性的混合材料以及砂岩和石灰石。采用石灰石时，其中的 $Al_2O_3$ 含量不得超过2.5%，以限制石灰石

中的泥土含量。

(5) 窑灰：从水泥回转窑窑尾废气中收集下的粉尘，其质量必须符合ZBQ12001—84《掺入水泥中的回转窑窑灰》的规定。

另外，在水泥粉磨时还允许加入主要起助磨作用而不损害水泥性能的助磨剂，其加入量不得超过水泥质量的1%。加入其他外加剂时，必须经过试验，并呈报国家建材局主管部门批准。

### (二) 标号

按国家标准规定，硅酸盐水泥分为425、525、625、725四个标号；普通水泥分275、325、425、525、625、725六个标号。为了提高水泥的早期强度，加速工程进度，提高经济效益，又把同一标号的水泥分为两种类型，其中快硬型(R型)对3天强度有较高要求，对7天强度不作规定，28天的强度指标则完全相同。

### (三) 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的品质指标

1. 氧化镁：熟料中氧化镁的含量不得超过5.0%，如水泥经压蒸，安定性试验合格，则熟料中氧化镁的含量允许放宽到6.0%。

2. 三氧化硫：水泥中三氧化硫的含量不得超过3.5%。

3. 烧失量：普通水泥中的烧失量，回转窑厂的不得大于5.0%，立窑厂的不得大于7.0%。

4. 细度：0.080 mm方孔筛筛余不得超过12%。

5. 凝结时间：初凝不得早于45分钟，终凝不得迟于12小时。

凝结时间的测定可以用人工测定，也可用符合本标准人工操作要求的自动凝结时间测定仪测定，两者有矛盾时以人工测定为准。

6. 安定性：按标准测定，必须合格。

安定性测定可以用试饼法也可用雷氏法，有争议时以雷氏法为准。

7. 强度：425、525、625标号按早期强度高分为两种类型，其中R为快硬型。各标号、各类型水泥的各龄期强度不得低于表2-1数值。

硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的强度指标

表 2-1

品 种	标 号	抗压强度 MPa			抗折强度 MPa			品 种	标 号	抗压强度 MPa			抗折强度 MPa		
		3天	7天	28天	3天	7天	28天			3天	7天	28天	3天	7天	28天
硅 酸 盐 水 泥	425	17.7	26.5	41.7	3.3	4.5	6.3	普 通 硅 酸 盐 水 泥	275	—	15.7	27.0	—	3.2	4.9
	425 R	22.0	—	41.7	4.1	—	6.3		325	11.8	18.6	31.9	2.5	3.6	5.4
	525	22.6	33.3	51.5	4.1	5.3	7.1		425	15.7	21.5	41.7	3.3	4.5	6.3
	525 R	27.0	—	51.5	4.9	—	7.1		425 R	21.0	—	41.7	4.1	—	6.3
	625	28.4	42.2	61.3	4.9	6.1	7.8		525	20.6	31.1	51.5	4.1	5.3	7.1
	625 R	32.0	—	61.3	5.5	—	7.8		525 R	26.0	—	51.5	4.9	—	7.1
725 R	37.0	—	71.1	6.2	—	8.6	625	26.5	40.2	61.3	4.9	6.1	7.8		
								625 R	31.0	—	61.3	5.5	—	7.8	
								725 R	36.0	—	71.1	6.2	—	8.6	

### (四) 验收规则

1. 废品：水泥出厂后凡氧化镁、三氧化硫、初凝时间、安定性中的任一项不符合本标准规定或强度低于该品种水泥最低标号规定的指标时，均称为废品。

2. 不合格品：水泥出厂后细度、烧失量、终凝时间和混合材料掺加量中的任一项不符合本标准规定或强度低于商品标号规定的指标时，称为不合格品。

上述标准不仅直接规定了硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥等三项重要建筑性质指标（凝结时间、安定性与强度），而且还特别规定了氧化镁、三氧化硫的允许含量以及水泥细度等，以保证水泥的品质指标。

水泥的凝结时间是水泥拌水后，逐渐失去流动性，从稠浆状转变为更紧密的具有一定强度状态的过程。这个转变过程的快慢即凝结时间的长短，直接影响到施工。凝结时间过短，使砂浆与混凝土在浇灌前即已失去流动性而无法使用；时间过长，则降低施工速度与模板周转率。通常，硅酸盐水泥熟料的初凝时间往往只有几分钟。要加入适量石膏以调节凝结时间，才能达到标准所规定的要求。如果石膏掺量过多，就会降低水泥强度，导致安定性不良。因而，标准规定了水泥开始凝结（初凝）与凝结终了（终凝）的时间，也规定了水泥中三氧化硫的极限含量。石膏加入量应通过试验，作出水泥凝结时间、强度与石膏加入量的关系，以确定石膏适宜的掺量。

在水泥凝结硬化过程中，或多或少会发生一些体积变化。如这种变化发生在硬化之前，或者即使发生在硬化过程中，但不很显著，则对建筑物不会有什么影响。如果在硬化过程中产生剧烈而不均匀的体积变化（体积膨胀），即安定性不良，要降低建筑物质量，甚至发生崩溃。引起安定性不良的原因有：熟料中游离氧化钙、氧化镁含量过高以及水泥中石膏掺加量过多。熟料中游离氧化钙含量由工厂自行控制，但标准规定水泥用试饼法或雷氏法试验必须合格。过多的氧化镁在烧成温度下会形成方镁石晶体，水化很慢，其危害程度用压蒸法可以检验出来。因此，标准规定熟料中氧化镁含量不得超过5.0%，只有压蒸安定性试验合格，才允许放宽到6.0%。石膏掺加量则由水泥中的 $SO_3$ 含量控制，也可用水浸法试验检查。

强度既是水泥的一个重要指标，又是设计混凝土配合比的必要数据。由于水泥在硬化过程中，强度是逐渐增长的，常以各龄期的耐压、抗折或水泥标号来表示水泥的强度及其增长速率。一般3天、7天以前的强度称为早期强度，28天及其后的强度称为后期强度，也有将3个月以后强度称为长期强度。施工要求水泥早期强度愈高愈好，而设计既要求考虑早期强度，又要保证后期强度。由于水泥到28天时强度已大部分发挥出来，以后强度增长相当缓慢，所以通常用28天的强度作为水泥质量的分级，划分为不同的标号。凡符合某一标号与某一类型的水泥，必须同时满足表2-1规定的各龄期的抗压、抗折强度的相应指标。若其中任一龄期的抗压或抗折强度指标达不到所要求的标号的规定，则以其中最低的某一个龄期的强度指标计算该水泥的标号。

## 二、世界各国标准概况

由于水泥品种繁多，硅酸盐水泥一大类中就有几十个品种。因此，世界各国通常根据各自国民经济发展的需要和各国具体条件，制订本国的标准。1948年，水泥技术统计协会曾经对全世界31个国家水泥标准的特点以列表的形式发表了第一个出版物。随着科学技术的发展，水泥标准也迅速发展，至1980年有自己标准的国家已逐步增至68个。

各国水泥标准按其特点主要为：标准水泥的品种及其组成；制定的品质指标；技术要求

以及标准的试验方法等。

如：美国材料试验协会 (ASTM) 规定的波特兰水泥 (纯熟料) 分为五类：I 类为波特兰水泥；II 类为中等水化热波特兰水泥和中等抗硫酸盐波特兰水泥；III 类为快硬波特兰水泥；IV 类为低水化热波特兰水泥；V 类为高抗硫酸盐波特兰水泥；并对 I、II、III 类均附有加气波特兰水泥。对于掺加不同混合材料 (如火山灰、矿渣等) 的水泥，则分在混合水硬性水泥一类中，而称为火山灰派生波特兰水泥或波特兰火山灰水泥、波特兰高炉矿渣水泥等，而对每一品种水泥则不再分等级或标号。法国标准 (NF) 规定，波特兰水泥按有、无次要组分 (混合材料) 分为不掺次要组分的波特兰水泥和掺次要组分的波特兰水泥两种。每一品种又按水泥强度的不同分为几个等级 (标号)。苏联所生产的波特兰水泥，可以不加混合材料；或者加入不超过水泥质量 15% 的符合苏联国家标准 (ГОСТ) 规定的活性矿物质混合材料。当混合材料超过一定数量时，则称为混合波特兰水泥或矿渣波特兰水泥、火山灰波特兰水泥等。同时对每一个品种还分为若干强度等级，与我国标准类似。

至于品质指标和技术要求，由于各国制定的标准与试验方法的不同而有所差别。

力学强度的试验方法，过去有不少国家采用硬练法 (干硬胶砂，水灰比一般为 0.35 左右) 目前较多地采用软练法 (塑性胶砂，水灰比 0.4 ~ 0.6)，使得到的强度值与混凝土的强度有更好的相关性。我国国家标准从 1977 年开始也改用软练法，以代替硬练法。美国、英国、苏联、日本、国际标准化组织与我国的力学强度试验方法的比较示于表 2-2。

各国力学强度试验方法特点比较表

表 2-2

国 家	美 国	英 国		苏 联	ISO/CEN	中 国	日 本
标准号	ASTM C-109-77	BS 4550 第三部分 3.4 节: 1978		ГОСТ 310.4-76	ISO (a) R679 草案	GB177-84	JIS R5201-1977
灰/砂或灰/砂/集料	1/2.75	1/2.5/3.5	1/3	1/3	1/3	1/2.5	1/2
水/灰	P: 0.485 (c) AEP: 0.460	0.60 (b)	0.40	0.40	0.50	(d) 0.44、0.46	0.65
砂 (S)、集料 (A) 的来源或性质	渥太华 (I 11)	S = 雷顿勃什砂 A = 破碎花岗岩			天然圆柱 硅质砂	福建平潭 标准砂	丰浦砂
粒度尺寸 (mm)	0.15/0.60	S=0.09/2.36 A=5/10	0.60/0.85 <0.60 最大 10%	0.50/0.90	0.08/2.00	0.65: <3% (a) 0.40: 40±5% 0.25: >94%	0.10/0.30
胶砂稠度	其他水泥流 动度 = 110±5			<106 流动度 <115			
试体尺寸 (cm)	5×5×5	10×10×10	7×7×7	4×4×16	4×4×16	4×4×16	4×4×16
捣实方式	手 捣	手工棒捣	振 动 台	振 动 台	机械振击	振 动 台	手 捣
应力性质	抗 压	抗 压		抗折、抗压	抗折、抗压	抗折、抗压	抗折、抗压

注：(a) 从 1980 年 1 月 1 日起无效；(b) 超硫酸盐水泥水灰比 = 0.55，高铝水泥水灰比为 0.45；(c) P 为波特兰水泥、AEP 为加气波特兰水泥；(d) 硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥为 0.44，火山灰水泥和粉煤灰水泥为 0.46；(e) 为累计百分数。



力学强度的龄期标准各国也各有特点。我国、苏联、美国、日本等国家的波特兰水泥以3天、7天、28天三个龄期试体进行试验。有些国家则分别规定一个、二个或四个龄期。

物理品质的测定方法也有几种：如细度测定有筛析法、勃氏法（透气法测定比表面积）和华格纳法（用浊度计测比表面积）等；凝结时间测定有维卡法和吉尔摩法；安定性试验有雷氏法、试饼法、压蒸法等；水化热测定有溶解热法、保温法和传导法等。

化学品质测定有重量法、络合法、原子吸收法等。

## 第二节 硅酸盐水泥的生产方法

### 一、生产方法

硅酸盐水泥的生产分为三个阶段：石灰质原料、粘土质原料与少量校正原料经破碎后，按一定比例配合、磨细，并配合为成分合适、质量均匀的生料，称为生料制备；生料在水泥窑内煅烧至部分熔融所得以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，称为熟料煅烧；熟料加适量石膏，有时还加适量混合材料或外加剂共同磨细为水泥，称为水泥粉磨。

水泥的生产方法按照生料制备方法的不同，有干法和湿法两种：将原料同时烘干与粉磨或先烘干后粉磨成生料粉，而后喂入干法窑内煅烧成熟料，称为干法生产。将生料粉加入适量水分制成生料球，而后喂入立窑或立波尔窑内煅烧成熟料的生产方法，亦可归入干法；但也可将立波尔窑的生产方法称之为半干法。将原料加水粉磨成生料浆后喂入湿法回转窑煅烧成熟料，则称为湿法生产。将湿法制备的生料浆脱水后，制成生料块入窑煅烧，称之为半湿法生产，亦可归入湿法，但一般均称为湿磨干烧。将脱水生料块经烘干粉碎后，入预热器窑、窑外分解窑等干法窑中煅烧者，一般亦称之为湿磨干烧。

湿法生产热耗较高，但电耗较低，生料易于均化，成分均匀，熟料质量较高，且输送方便，粉尘少，所以在20世纪30年代期间得以迅速发展。

随着生产技术发展，如烘干兼粉磨机的出现，均化技术的发展、收尘设备的改进等，使干法生产的熟料质量逐步提高，干燥过程的热耗相应降低，在环境保护方面也得到改善，加之投资较低，因此在一些煤价贵、电价低的国家，在30年代到40年代，立波尔窑得到进一步发展。

50年代末，60年代初期，我国对湿法长窑和立波尔窑的技术经济指标进行了比较（示于表2-3）。当时曾确定南方以湿法生产（湿法长窑）为主，北方以干法生产（立波尔窑）为主。

湿法长窑与立波尔窑（干、湿法）生产的技术经济指标对比 表 2-3

项 目	湿法长窑	立 波 尔 窑	项 目	湿法长窑	立 波 尔 窑
热 耗(%)	100	85~88	熟料质量(硬练)	600~650	500~600
电 耗(%)	100	130~135, 144~152(苏联)	水泥成本(%)	100	104~105
钢材消耗量(%)	100	85~87 85~97.5(苏联)		100	粘土水分8% 95(苏)
投资①(%)	100	87~89 98.6(苏联)			粘土水分15% 101(苏)
					粘土水分20% 103(苏)
					粘土水分25% 106(苏)

①如均以生产500号(硬练)水泥计算，投资回收率湿法较干法为快。