

《水利水电施工》  
丛书

The background features a stylized, high-contrast illustration of a dam and construction site. The dam is depicted with a grid-like pattern, and the surrounding area shows various construction elements like cranes and structures. The overall style is graphic and industrial.

# 水工混凝土用水泥

李亚杰

45

《水利水电施工》丛书

---

# 水工混凝土用水泥

李亚杰

水利电力出版社

---

(京)新登字115号

### 内 容 提 要

本书阐述了水工混凝土中常用的硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥及大坝水泥的生产知识、组成成分、凝结和硬化、水泥的特性及其品质标准；对其它品种水泥也做了一般介绍；关于水泥品种及标号的选择，外加剂及混合材料的掺用及水泥运输和保管等应用中的一些问题也进行了讨论。

本书可供从事水利水电设计和施工的工程技术人员、管理干部和工人参考，也可作为水利工程建筑及施工专业学生的教学参考书。

21061/37

《水利水电施工》丛书

水工混凝土用水泥

李亚杰

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 4.125印张 90千字

1991年9月第一版 1991年9月北京第一次印刷

印数0001—1710册

ISBN 7-120-01452-8/TV·528

定价3.30元

## 水利科普丛书编审委员会名单

主任委员 史梦熊

副主任委员 董其林

委员 (以姓氏笔划为序)

丁联臻	王万治	史梦熊	田 园
李文治	郝凤山	杨启声	张宏全
张林祥	沈坤卿	陈祖安	陈春槐
汪景琦	郑连第	郭之章	赵珂经
茆 智	陶芳轩	谈国良	徐曾衍
蒋元驹	曹述互	曹松润	董其林
颜振元			

## 序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书，包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

## 前 言

水泥作为一种主要的建筑材料，在水利工程建筑中得到了广泛地应用。尤其在大中型水电建设中，作为水工混凝土原材料应用的更为普遍。因此，了解和掌握水泥的基本知识，对于合理使用水泥、保证工程质量和降低工程造价，具有重要的实际意义。

为适应从事水电工程设计和施工的技术人员、管理干部及工人的需要，作为《水利水电施工》丛书的一个分册，希望本书能在普及有关水泥的基本知识、合理使用水泥等方面，起一点有益的作用。

本书分为七章，第一章至第四章以硅酸盐水泥为重点，介绍了硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥及粉煤灰水泥，并同时介绍了关于粒化高炉矿渣及粉煤灰等混合材料的基本知识。第五章介绍大坝水泥。第六章对其它品种水泥做了简单介绍。第七章讨论了水泥应用中的一些问题。书中附有有关水泥强度检验方法、软练与硬练强度关系等二个附录，供参考。

书中有不少内容取材于许多单位的科研成果，对此仅向有关单位表示衷心谢意。在编写工作中得到了武汉水利电力学院建筑材料教研室牛光庭等同志的帮助和指导；承长江水电科学研究所徐华荣高级工程师主审并提出了不少宝贵意见，特此致谢。

由于作者才学浅薄，经验又不足，书中缺点和错误恐难避免，希望读者多加指正。

编 者

1986年8月于武汉

# 目 录

序	
前 言	
概 述	1
第一章 硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥	5
第一节 硅酸盐水泥及普通水泥的生产知识	5
第二节 硅酸盐水泥及普通水泥的组成	7
第三节 硅酸盐水泥及普通水泥的凝结与硬化	14
第四节 硅酸盐水泥及普通水泥的性能	24
第五节 硅酸盐水泥及普通水泥的品质标准	42
第六节 环境水对硅酸盐水泥及普通水泥的侵蚀及其防止	44
第二章 粒化高炉矿渣及矿渣硅酸盐水泥	50
第一节 粒化高炉矿渣	50
第二节 矿渣硅酸盐水泥	56
第三章 火山灰质混合材料及火山灰质硅酸盐水泥	67
第一节 火山灰质混合材料	67
第二节 火山灰质硅酸盐水泥	72
第四章 粉煤灰及粉煤灰硅酸盐水泥	80
第一节 粉煤灰	80
第二节 粉煤灰硅酸盐水泥	87
第五章 大坝水泥	99
第六章 其它品种水泥介绍	107
第七章 水泥应用中的一些问题	115
附录一 水泥软练强度与硬练强度的关系	122
附录二 不同国家水泥强度检验方法的要点	124
参考文献	126

## 概 述

水泥是一种粉末状物质，它与适量的水拌和后，呈具有可塑性的浆状物体，能逐渐变成坚硬如石的固体，且能将散粒的砂、石等材料胶结成整体。水泥的这种变化过程不仅能在空气中进行，而且能更好地在水中继续进行，保持和不断增长其强度。水泥是良好的水硬性胶凝材料。

人类最早使用的是气硬性胶凝材料，如我国古代用石灰砌筑了万里长城，古埃及用石灰和石膏建造了金字塔。随着生产的发展，城市、道路、港口等工程要求建筑材料具有更高的强度，并能抵抗流水的侵蚀和冲刷。纪元初，希腊人和罗马人开始使用掺有火山灰的石灰浆，并发现这种材料具有水硬性。如古希腊人用圣多伦土（圣多伦岛的凝灰岩）和古罗马人用普佐里附近的火山凝灰岩掺入石灰中，并称火山灰为 Pozzolana。进而人们用废陶器、碎砖等磨细后混以石灰，也获得了水硬性材料。到十八世纪后半期，开始制造水硬石灰和罗马水泥。随后，人们开始探求人工配制原料烧制水泥的方法。法国人L.J.维卡、俄国人E·契利也夫首先采用人工配料制成了水泥；1824年英国人J·阿斯普丁获得了生产水泥的专利权，并把他所生产的水泥命名为波特兰水泥。波特兰水泥的出现，大大推动了各种工程建设的发展。在此之后，各国科学家运用物理的和化学的方法，以及各种现代测试手段来研究水泥的组成、结构和水化凝结硬化的机理，使水泥生产工艺不断发展和完善，生产成本不断下降，水泥品种不断增多，质量不断提高。现在人们对水泥的认识，



正从宏观到微观不断深化，逐渐揭示出了水泥性能与水泥结构之间的关系，把水泥生产和使用的经验认识上升到理论认识，为水泥品种的发展和水泥的合理使用提供了理论根据。当前水泥的生产和科学研究正处在蓬勃发展的新时期。

我国自1876年建立唐山启新洋灰公司开始生产水泥，解放前水泥工业发展缓慢。到1949年止，只能生产单一品种的硅酸盐水泥，1949年全国水泥年产量只有66万t。全国解放后，水泥工业也和各行各业一样得到迅速发展。1957年全国水泥年产量达到了686万t。党的十一届三中全会以后，水泥生产发展更为迅速，1983年年产量为10,825万t，1985年达到14,246万t。水泥品种已发展到近50个品种，除5种通用水泥外，有38种特种水泥分别制订了国家标准或部标准。

虽然我国水泥的生产有了很大发展，但水泥品种、质量及生产成本等与先进国家相比，还存在着较大的差距。大中型水泥厂生产的质量稳定的各种水泥的产量还不能满足四化建设的需要，工程中使用水泥还存在不少浪费现象。为适应四化建设的需要，一方面需要高速发展水泥的生产，另一方面在工程中必须合理使用水泥，贯彻节约原则。

水泥的品种很多，分类方法也不统一。

国际标准化组织（ISO）1967年推荐的水泥标准命名，把水泥分为五类：

（1）波特兰水泥；

（2）含有高炉矿渣的水泥，又分为：以高炉矿渣和波特兰熟料为主要成分的水泥和以高炉矿渣和硫酸钙为主要成分的水泥两种；

（3）高铝水泥；

（4）含有火山灰的水泥，又分为：波特兰火山灰水泥

和火山灰质水泥两种；

(5) 砌筑水泥。

我国习惯上根据水泥生产和使用的不同，把水泥分为三种：

(1) 通用水泥：包括硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥及混合硅酸盐水泥六种。

(2) 特种水泥：又分为特性水泥和专用水泥两种。特性水泥包括：快硬水泥、中热水泥及低热水泥（统称为大坝水泥）、耐侵蚀水泥等；专用水泥包括：型砂水泥、喷射水泥、油井水泥及各种彩色水泥等。

(3) 地方性和其它硅酸盐水泥：包括石膏矿渣水泥、石灰矿渣水泥及石灰火山灰水泥等无熟料或低熟料水泥及砌筑水泥等。

水工建筑物的混凝土对水泥性能的要求比较复杂，除决定于混凝土在建筑物中所承受作用之外，还与工程所处的环境条件（气候、水质、泥沙等）有关。水工混凝土可分为内部混凝土和外部混凝土两大类，外部混凝土又可分为基础部位混凝土、水上混凝土、水下混凝土、水位变化区的混凝土及溢流面（包括闸墩抗冲耐磨层）的混凝土等。

外部水下混凝土起挡水作用，要求水泥具有足够的强度、抗渗性和抗环境水的侵蚀性。

外部水位变动区域的混凝土，经常遭受冰冻及风化破坏作用，要求水泥具有较高的强度、抗冻性、抗风化性和抗环境水的侵蚀性。

溢流面的混凝土，要求水泥具有较强的抗冲耐磨性、抗冻性、抗风化的能力。

内部混凝土，要求水泥的发热量低，并有一定的抗裂能力。

对于骨料中含有活性骨料的工程，还必须采用低碱水泥。

为了合理使用水泥，除应按国家标准了解水泥的强度、凝结时间、安定性……等主要技术性质外，还需了解水泥的抗侵蚀性、抗冻性、抗磨性、水化热、干缩变形和抗裂性，以及水泥的需水性、泌水性……等各种特性。

## 第一章 硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥

在水泥诸品种中，硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥是应用最广和研究得最多的。国家标准 GB175-85 规定，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硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏，磨细制成的水硬性胶凝材料，称为硅酸盐水泥。

国家标准还规定，凡由硅酸盐水泥熟料，少量混合材料、适量石膏共同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重量百分比计，掺活性混合材料时，不得超过15%；掺非活性混合材料时，不得超过10%；同时掺活性和非活性混合材料时，总掺量不得超过15%，其中非活性混合材料不得超过10%。

硅酸盐水泥是硅酸盐类水泥的一个基本品种，其它品种的硅酸盐水泥，都是在此基础上或者掺加了一定量的混合材料，或者适当改变了水泥熟料的矿物组成。普通水泥成分中绝大部分仍是硅酸盐水泥熟料，因此，普通水泥性质与硅酸盐水泥相近，应用中常将其列为同一类别。但某些性能也稍有差别，如普通水泥早期硬化速度稍慢，3 d、7 d的抗压强度较硅酸盐水泥稍低，抗冻、耐磨等性能也较硅酸盐水泥稍差。

### 第一节 硅酸盐水泥及普通水泥的生产知识

生产硅酸盐水泥熟料的原料，是由石灰质原料（石灰石、白垩等）和粘土质原料（粘土、页岩等）混合而成。有

时还需配入辅助原料（铁矿石、砂岩等），以调节某些氧化物的不足。经过配料，生料中应含有75%~78%的CaCO<sub>3</sub>和22%~25%的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。此外，为了改善煅烧条件，还常加入少量矿化剂（如萤石等）。

硅酸盐水泥的生产过程有制备生料、煅烧、粉磨水泥等三个阶段。如图1-1所示。

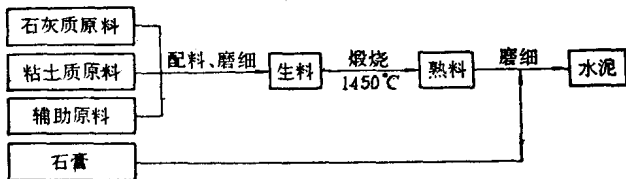


图 1-1 硅酸盐水泥生产过程框图

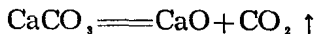
(1) 制备生料：制备生料时配料须准确，粉磨细度应符合要求，并使各种原料混合均匀，为煅烧时各成分间化学反应的进行创造良好的条件。

(2) 煅烧：水泥熟料的煅烧，可用回转窑或立窑进行。煅烧是水泥生产中的重要环节，熟料中各种矿物成分都是在这过程中形成的。

煅烧中的主要化学反应简述如下：

生料入窑后，首先被加热，水分逐渐蒸发而干燥。

500~800℃时，有机物被烧尽，粘土质原料脱水并分解为无定形的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>。600℃以后，石灰质原料中的CaCO<sub>3</sub>开始按下式分解：



并开始生成CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及少量的2CaO·SiO<sub>2</sub>。

900~1100℃时，3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>开始形成，同时，CaCO<sub>3</sub>分解完毕，此刻游离CaO含量达到

最大值。

1100~1200℃时，大量生成 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，此时 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 含量达到最大。

1300~1450~1300℃时， $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 呈熔融状态，物料中出现了液相，游离CaO和部分 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 溶解于其中，并在液相中化合形成 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 。这一阶段是煅烧水泥的关键，必须有足够的时间使生成 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的反应进行完全。否则，水泥熟料中将有较多的游离CaO，影响水泥的质量。

经以上各阶段煅烧后，迅速冷却，所得即为水泥熟料块。

(3)磨细：将冷却的熟料块和适量的天然石膏共同磨细，即为硅酸盐水泥。

普通水泥的生产过程与硅酸盐水泥基本相同，当磨细熟料时加入天然石膏和少量混合材料，所得产品即为普通水泥。

## 第二节 硅酸盐水泥及普通水泥的组成

由水泥生产过程可知，硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料和适量天然石膏组成的。加入石膏的目的是调节水泥的凝结时间，使水泥不致发生急凝现象。普通水泥中只有少量混合材料，绝大部分仍为硅酸盐水泥。因此，硅酸盐水泥和普通水泥的性质主要决定于水泥熟料的性质及矿物组成。

### 一、硅酸盐水泥熟料的主要化学成分、 矿物组成及其特性

硅酸盐水泥熟料的化学成分主要有下述四种氧化物，它

们在熟料中的含量一般在下列范围：

氧化钙 (CaO) 62%~67%；

氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 19%~24%；

氧化铝 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 4%~7%；

氧化铁 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2%~5%。

硅酸盐水泥熟料的主要矿物成分有以下四种，其含量大致在下列范围：

硅酸三钙 3CaO·SiO<sub>2</sub> (简写为C<sub>3</sub>S) 37%~60%

硅酸二钙 2CaO·SiO<sub>2</sub> (简写为C<sub>2</sub>S) 15%~37%

铝酸三钙 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (简写为C<sub>3</sub>A) 7%~15%

铁铝酸四钙 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (简写为C<sub>4</sub>AF)

10%~18%

前两种矿物称为硅酸盐矿物，一般占总量的75%~82%；后两种矿物称为熔剂矿物，一般占总量的18%~25%。

四种矿物的主要特性如下。

### 1. 水化反应速度

矿物成分的水化速度是决定水泥性能的一个重要因素。水化反应速度是指在单位时间内的水化程度（发生水化反应的重量占总重量的百分率）或水化深度。测定水化速度的方法很多，其中较常用的简便方法是测定水泥结合水量。四种主要矿物不同龄期水化程度的试验结果列于表1-1。

从表1-1可以得出以下几点看法：

(1) C<sub>3</sub>S最初反应不很快，但中、后期反应较快；

(2) C<sub>3</sub>A最初反应极快，但以后反应较慢；

(3) C<sub>4</sub>AF开始时反应速度比C<sub>3</sub>S快，以后变慢；

(4) C<sub>2</sub>S水化速度最慢，但后期仍在继续水化。

水泥熟料矿物的水化速度，也遵循化学反应的一般规

表 1-1 不同熟料矿物在不同龄期的水化程度(%)

矿物名称	水 化 时 间					完 全 水 化
	3d	7d	28d	90d	180d	
C <sub>3</sub> S	36	46	69	93	96	100
C <sub>2</sub> S	1	11	11	29	30	100
C <sub>3</sub> A	83	82	84	91	93	100
C <sub>4</sub> AF	70	71	74	89	91	100

律，即提高温度会加速反应的进程。试验结果表明，提高温度对C<sub>2</sub>S的水化速度提高得最大，对C<sub>3</sub>A和C<sub>4</sub>AF的影响最小，对C<sub>3</sub>S水化速度的影响，则主要表现在早期。

## 2. 强度及强度发展规律

四种矿物在标准试验条件下，分别测定其强度，如表 1-2所示。

表 1-2 水泥熟料单矿物的抗压强度 (MPa)

矿物名称	硬 化 龄 期				
	3d	7d	28d	90d	180d
C <sub>3</sub> S	29.0	31.4	48.6	54.5	61.3
C <sub>2</sub> S	1.4	2.2	4.5	19.0	28.0
C <sub>3</sub> A	5.9	5.1	3.9	7.8	7.8
C <sub>4</sub> AF	15.1	16.5	18.2	16.3	19.2

试验结果表明，C<sub>3</sub>S的强度最高，且能不断地增长，是决定水泥标号高低的最主要矿物。C<sub>2</sub>S的早期强度低，后期强度增长快。有资料报导，当龄期超过一年后，C<sub>2</sub>S的强度有



可能赶上或超过C<sub>3</sub>S。因此，C<sub>3</sub>S是保证水泥后期强度能够持续增长的主要矿物。C<sub>2</sub>A和C<sub>4</sub>AF的强度都在早期发挥，后期则没有什么发展。C<sub>4</sub>AF的强度大于C<sub>2</sub>A，且其抗拉强度较高。

### 3. 水化热

水泥单矿物的水化热数值，不同研究者有不同的试验结果，但其变化规律是一致的。各矿物的放热量及放热速度具有以下顺序：

表 1-3 不同熟料矿物的水化热 (J/g)

矿物名称	水 化 时 间					
	3d	7d	28d	3月	6月	1年
C <sub>3</sub> S	410	460	480	510	510	570
C <sub>2</sub> S	80	75	180	230	220	260
C <sub>2</sub> A	710	790	850	790	910	—
C <sub>4</sub> AF	120	180	200	200	300	—

表 1-4 硅酸盐水泥熟料主要矿物的特性

矿物名称	主 要 特 性							
	比重	需水性	水化速度	水化热	强度	水化收缩	抗裂性	耐磨性
C <sub>3</sub> S	3.25	中等	快	大	高	中	—	好
C <sub>2</sub> S	3.28	最小	慢	小	早期低 后期高	中	—	差
C <sub>2</sub> A	3.04	最大	最快	最大	低	最大	差	中
C <sub>4</sub> AF	3.77	中等	快	中	较高	小	好	中