

水利水电工程施工实用手册



混凝土工程施工

《水利水电工程施工实用手册》编委会 编

程施工实用手册

混凝土工程施工

《水利水电工程施工实用手册》编委会 编

中国环境出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土工程施工 / 《水利水电工程施工实用手册》编委会编. —北京:中国环境出版社, 2017. 12

(水利水电工程施工实用手册)

ISBN 978-7-5111-3097-6

I. ①混… II. ①水… III. ①水利水电工程—混凝土施工—技术手册 IV. ①TV544-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 045271 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 罗永席
责任校对 尹 芳
装帧设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765(编辑管理部)
010-67112739(建筑分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405(传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 12 月第 1 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/32
印 张 9.625
字 数 255 千字
定 价 30.00 元

【版权所有。未经许可,请勿翻印、转载,违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换。

《水利水电工程施工实用手册》

编委会

总主编：赵长海

副总主编：郭明祥

编委：	冯玉禄	李建林	李行洋	张卫军
	刁望利	傅国华	肖恩尚	孔祥生
	何福元	向亚卿	王玉竹	刘能胜
	甘维忠	冷鹏主	钟汉华	董伟
	王学信	毛广锋	陈忠伟	杨联东
	胡昌春			

审 定：中国水利工程协会

《混凝土工程施工》

主 编：钟汉华 李建林

副 主 编：管芙蓉 陈启东

参编人员：项海玲 孙思施 郭家庆 杨 斌
姚登友

主 审：田育功 杨和明

水利水电工程施工虽然与一般的工民建、市政工程及其他土木工程施工有许多共同之处,但由于其施工条件较为复杂,工程规模较为庞大,施工技术要求高,因此又具有明显的复杂性、多样性、实践性、风险性和不连续性的特点。如何科学、规范地进行水利水电工程施工是一个不断实践和探索的过程。近 20 年来,我国水利水电建设事业有了突飞猛进的发展,一大批水利水电工程相继建成,取得了举世瞩目的成就,同时水利水电施工技术水平也得到极大的提高,很多方面已达到世界领先水平。对这些成熟的施工经验、技术成果进行总结,进而推广应用,是一项对企业、行业 and 全社会都有现实意义的任务。

为了满足水利水电工程施工一线工程技术人员和操作工人的业务需求,着眼提高其业务技术水平和操作技能,在中国水利工程协会指导下,湖北水总水利水电建设股份有限公司联合湖北水利水电职业技术学院、中国水电基础局有限公司、中国水电第三工程局有限公司制造安装分局、郑州水工机械有限公司、湖北正平水利水电工程质量检测公司、山东水总集团有限公司等十多家施工单位、大专院校和科研院所,共同组成《水利水电工程施工实用手册》丛书编委会,组织编写了《水利水电工程施工实用手册》丛书。本套丛书共计 16 册,参与编写的施工技术人员及专家达 150 余人,从 2015 年 5 月开始,历时两年多时间完成。

本套丛书以现场需要为目的,只讲做法和结论,突出“实用”二字,围绕“工程”做文章,让一线人员拿来就能学,学了就会用。为达到学以致用目的,本丛书突出了两大特点:一是通俗易懂、注重实用,手册编写是有意把一些繁琐的原理分析去掉,直接将最实用的内容呈现在读者面前;二是专业独立、相互呼应,全套丛书共计 16 册,各册内容既相互关

联,又相对独立,实际工作中可以根据工程和专业需要,选择一本或几本进行参考使用,为一线工程技术人员使用本手册提供最大的便利。

《水利水电工程施工实用手册》丛书涵盖以下内容:

1)工程识图与施工测量;2)建筑材料与检测;3)地基与基础处理工程施工;4)灌浆工程施工;5)混凝土防渗墙工程施工;6)土石方开挖工程施工;7)砌体工程施工;8)土石坝工程施工;9)混凝土面板堆石坝工程施工;10)堤防工程施工;11)疏浚与吹填工程施工;12)钢筋工程施工;13)模板工程施工;14)混凝土工程施工;15)金属结构制造与安装(上、下册);16)机电设备安装。

在这套丛书编写和审稿过程中,我们遵循以下原则和要求对技术内容进行编写和审核:

1)各册的技术内容,要求符合现行国家或行业标准与技术规范。对于国内外先进施工技术,一般要经过国内工程实践证明实用可行,方可纳入。

2)以专业分类为纲,施工工序为目,各册、章、节格式基本保持一致,尽量做到简明化、数据化、表格化和图示化。对于技术内容,求对不求全,求准不求多,求实用不求系统,突出丛书的实用性。

3)为保持各册内容相对独立、完整,各册之间允许有部分内容重叠,但本册内应避免出现重复。

4)尽量反映近年来国内外水利水电施工领域的新技术、新工艺、新材料、新设备和科技创新成果,以便工程技术人员参考应用。

参加本套丛书编写的多为施工单位的一线工程技术人员,还有设计、科研单位和部分大专院校的专家、教授,参与审核的多为水利水电行业内有丰富施工经验的知名人士,全体参编人员和审核专家都付出了辛勤的劳动和智慧,在此一并表示感谢!在丛书的编写过程中,武汉大学水利水电学院的申明亮、朱传云教授,三峡大学水利与环境学院周宜红、赵春菊、孟永东教授,长江勘测规划设计研究院陈勇伦、李锋教授级高级工程师,黄河勘测规划设计有限公司孙胜利、李志明教授级高级工程师等,都对本书的编写提出了宝贵的意

见,我们深表谢意!

中国水利工程协会组织并主持了本套丛书的审定工作,有关领导给予了大力支持,特邀专家们也都提出了修改意见和指导性建议,在此表示衷心感谢!

由于水利水电施工技术和工艺正在不断地进步和提高,而编写人员所收集、掌握的资料和专业技术水平毕竟有限,书中难免有很多不妥之处乃至错误,恳请广大的读者、专家和工程技术人员不吝指正,以便再版时增补订正。

让我们不忘初心,继续前行,携手共创水利水电工程建设事业美好明天!

《水利水电工程施工实用手册》编委会

2017年10月12日

目 录

前 言

第一章 混凝土材料	1
第一节 混凝土组成材料	1
第二节 混凝土的主要性质	38
第三节 混凝土配合比	55
第二章 混凝土施工工艺	60
第一节 施工准备	60
第二节 混凝土拌制	63
第三节 混凝土运输	79
第四节 混凝土浇筑	85
第五节 混凝土养护与保护	103
第六节 混凝土施工缺陷及修补	106
第七节 混凝土冬季、夏季及雨季施工	110
第三章 大体积混凝土施工	116
第一节 大体积混凝土温度控制	116
第二节 混凝土坝施工	121
第三节 厂房下部结构混凝土施工	145
第四章 碾压混凝土施工	149
第一节 碾压混凝土材料	149
第二节 碾压混凝土施工	150
第五章 钢筋混凝土结构施工	169
第一节 现浇框架混凝土施工	169
第二节 隧洞混凝土衬砌施工	175
第三节 水闸施工	183
第四节 预制及预应力混凝土施工	190
第五节 渡槽施工	203
第六章 混凝土特殊施工工艺	207
第一节 泵送混凝土施工	207

第二节	喷射混凝土施工	218
第三节	水下混凝土施工	224
第四节	自密实混凝土施工	231
第五节	埋石及堆石混凝土施工	236
第六节	混凝土真空作业	239
第七节	高性能混凝土施工	241
第八节	纤维混凝土施工	245
第九节	清水混凝土施工	247
第七章	混凝土施工安全技术	250
第一节	施工准备阶段安全技术	250
第二节	施工阶段安全技术	251
第三节	混凝土养护阶段安全技术	255
第八章	混凝土工程质量控制检查与验收	256
第一节	混凝土工程质量控制与检查	256
第二节	混凝土强度检验评定	258
第三节	混凝土工程质量等级评定	262
附录	部分混凝土工程单元工程质量评定表	266
参考文献		294

混凝土材料

第一节 混凝土组成材料

一、水泥

水泥是加水拌和成塑性浆体,能胶结砂石等材料,并能在空气和水中硬化的粉状水硬性胶凝材料。按所含化学成分的不同,可分为硅酸盐系水泥、铝酸盐系水泥、硫铝酸盐系水泥及铁铝酸盐系水泥等,其中以硅酸盐系水泥应用最广;按水泥的用途及性能,可分为通用水泥、专用水泥与特种水泥三类。

1. 硅酸盐水泥

根据现行国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)(2015年版)的规定,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,都称为硅酸盐水泥(即国外通称的波特兰水泥)。硅酸盐水泥可分为两种类型:不参加混合材料的称Ⅰ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅰ;在硅酸盐水泥熟料粉磨时参加不超过水泥质量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。

(1) 硅酸盐水泥的原料及生产。硅酸盐水泥的原料主要是石灰质原料和黏土质原料。石灰质原料有石灰石、白垩等,主要提供 CaO ;黏土质原料有黏土、黄土、页岩等,主要提供 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 。原料配合比例的确定,应满足原料中氧化钙含量占75%~78%,氧化硅、氧化铝及氧化铁含量占22%~25%。为满足上述各矿物含量要求,原料中常加入富含某种矿物成分的辅助原料,如铁矿石、砂岩等,来校正二

氧化硅、氧化铁的不足。此外,为改善水泥的烧成性能或使用性能,有时还可掺加少量的添加剂(如萤石等)。

硅酸盐水泥的生产过程主要分为制备生料、煅烧熟料、粉磨水泥三个阶段,该生产工艺过程可概括为“两磨一烧”,如图 1-1 所示。生产水泥时首先将几种原料按适当比例混合后磨细,制成生料。然后将生料入窑进行高温煅烧,得到以硅酸钙为主要成分的水泥熟料。熟料和适量的石膏,或再加入少量的石灰石或粒化高炉矿渣共同在球磨机中研磨成细粉,即可得到硅酸盐水泥。

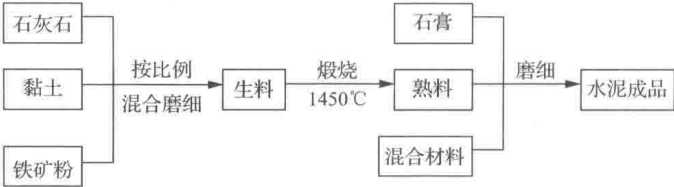


图 1-1 硅酸盐水泥生产工艺示意图

按生料制备方法不同可分为湿法和干法。由于干法比湿法产量高,且节省能源,是目前水泥生产的常用方法。

(2) 硅酸盐水泥熟料的矿物组成及其特性。以适当成分的生料,煅烧至部分熔融而得到的以硅酸钙为主要成分的物质称为硅酸盐水泥熟料。硅酸盐水泥熟料主要由四种矿物组成,其名称和含量范围见表 1-1。

表 1-1 水泥熟料的主要矿物组成及含量

矿物成分名称	基本化学组成	矿物简称	一般含量范围
硅酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	37%~60%
硅酸二钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15%~37%
铝酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	7%~15%
铁铝酸四钙	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	10%~18%

在硅酸盐水泥熟料的 4 种矿物组成中, C_3S 和 C_2S 的含量为 75%~82%, C_3A 和 C_4AF 的含量仅为 18%~25%。除以上 4 种主要矿物成分外,水泥熟料中还含有少量的 SO_3 、

游离 CaO 、游离 MgO 和碱 (K_2O 、 Na_2O)，这些成分均为有害成分，国家标准对其含量有严格限制。

不同的矿物成分单独与水作用时，在水化速度、放热量及强度等方面都表现出不同的特性。四种主要矿物成分单独与水作用的主要特性如下：

C_3S 的水化速率较快，水化热较大，且主要在早期放出。强度最高，且能不断得到增长，是决定水泥强度等级高低的最主要矿物。

C_2S 的水化速率最慢，水化热最小，且主要在后期放出。早期强度不高，但后期强度增长率较高，是保证水泥后期强度增长的主要矿物。

C_3A 的水化速率极快，水化热最大，且主要在早期放出，硬化时体积减缩也最大。早期强度增长率很快，但强度不高，而且以后几乎不再增长，甚至降低。

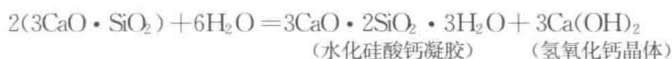
C_4AF 的水化速率较快，仅次于 C_3A 。水化热中等，强度较低。脆性比其他矿物小，当含量增多时，有助于水泥抗拉强度的提高。

由上述可知，几种矿物质成分的性质不同，改变它们在熟料中的相对含量，水泥的技术性质也随之改变。例如提高 C_3S 含量，可制成高强度水泥，降低 C_3A 和 C_3S 含量，可制成低热或中热硅酸盐水泥。水泥熟料的组成成分及各组分比例是影响硅酸盐系水泥性能的最主要因素。因此，掌握硅酸盐水泥熟料中各矿物成分的含量及特性，就可以大致了解该水泥的性能特点。

(3) 硅酸盐水泥的水化和凝结硬化。

1) 硅酸盐水泥的水化作用。硅酸盐水泥加水后，熟料中各种矿物与水作用，生成一系列新的化合物，称为水化。生成的新化合物称为水化生成物。

① 硅酸三钙水化。 C_3S 与水作用，生成水化硅酸钙（简写成 C-S-H ）和氢氧化钙，反应式如下：



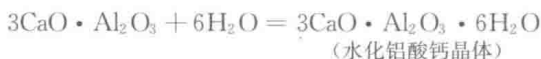
硅酸三钙水化反应快,水化放热量大,生成的水化硅酸钙几乎不溶于水,而以胶体微粒析出,并逐渐凝聚成凝胶。反应生成的氢氧化钙很快在溶液中达到饱和,呈六方板状晶体析出。硅酸三钙早期和后期强度均高,是保证强度的主要成分。但生成的氢氧化钙易溶于水、易与酸反应,所以抗侵蚀能力较差。

②硅酸二钙水化。 C_2S 与水作用,生成水化硅酸钙和氢氧化钙,反应式如下:

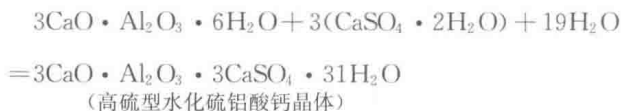


硅酸二钙水化反应最慢,水化放热量小,早期强度低,但后期强度发展最快,强度高,因此,硅酸二钙是保证后期强度的主要成分。由于水化时生成氢氧化钙很少,其抗侵蚀能力高。

③铝酸三钙水化。 C_3A 与水作用,生成水化铝酸钙,其反应式如下:

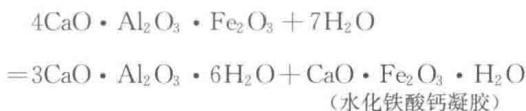


铝酸三钙水化反应速度最快,水化放热量最大,早期强度发展最快,但强度低,增长也甚微。由于本身易受硫酸盐侵蚀,所以铝酸三钙抗侵蚀性能最差。因铝酸三钙与水反应迅速,造成水泥速凝,将影响施工。因此,在水泥磨细时加入适量石膏,石膏与水化铝酸钙反应生成高硫型水化硫铝酸钙,又称钙矾石(Aft),反应式如下:



水化硫铝酸钙是难溶于水的针状晶体,沉积在熟料颗粒的表面形成保护膜,阻止水分向颗粒内部渗入,从而阻碍了铝酸三钙的水化反应,起到了延缓水泥凝结的作用。

④铁铝酸四钙水化。 C_4AF 与水作用,生成水化铝酸钙和水化铁酸钙。其反应式如下:



铁铝酸四钙水化反应快,水化放热量中等,但强度较低,后期增长甚少。

综上所述,如果忽略一些次要的成分,则硅酸盐水泥与水作用后生成的主要水化产物为:水化硅酸钙和水化铁酸钙凝胶、氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙晶体。在完全水化的水泥石构成成分中,水化硅酸钙约占 70%,氢氧化钙约占 20%,钙矾石和单硫型水化铝酸钙约占 7%。若混合材料较多时,还可能有相当数量的其他硅酸盐凝胶。

从硅酸盐系水泥的水化、凝结与硬化过程来看,水泥水化反应的放热量较大,放热周期也较长;但大部分(50%以上)热量集中在前 3d 以内,主要表现为凝结硬化初期的放热量最为明显。显然,水泥水化热的多少及放热速率的大小主要决定于水泥熟料的矿物组成及混合材料的多少。当其中 C_3A 含量较高时,水泥在凝结硬化初期的水化热与水化速率较大,从而表现出凝结与硬化速度较快;而 C_2S 含量较高或混合材料较多时,则水泥在凝结硬化初期的水化热和水化放热速率较小,从而也表现出凝结与硬化速度较慢。

2) 硅酸盐水泥的凝结硬化。硅酸盐水泥加水拌和后,最初形成具有可塑性的浆体,然后逐渐变稠失去塑性,这一过程称为初凝,开始具有强度时称为终凝,由初凝到终凝的过程为凝结。终凝后强度逐渐提高,并变成坚固的石状物体——水泥石,这一过程为硬化。水泥凝结硬化的具体过程一般如下:

水泥加水拌和后,水泥颗粒分散于水中,成为水泥浆体。水泥的水化反应首先在水泥颗粒表面进行,生成的水化产物立即溶于水中。这时,水泥颗粒又暴露出一层新的表面,水化反应继续进行。由于各种水化产物溶解度很小,水化产物的生成速度大于水化产物向溶液中扩散速度,所以很快使水泥颗粒周围液相中的水化产物浓度达到饱和或过饱和状态,

并从溶液中析出,包在水泥颗粒表面。水化产物中的氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙是结晶程度较高的物质,而数量多的水化硅酸钙则是大小为 $10\sim 1000$ 埃($1\text{ 埃}=10^{-8}\text{ cm}$)的粒子(或微晶),比表面积大,相当于胶体物质,胶体凝聚便形成凝胶。以水化硅酸钙凝胶为主体,其中分布着氢氧化钙晶体的结构,通常称为凝胶体。

水化开始时,由于水泥颗粒表面覆盖了一层以水化硅酸钙凝胶为主的膜层,阻碍了水泥颗粒与水的接触,有相当长一段时间($1\sim 2\text{ h}$)水化十分缓慢。在此期间,由于水化物尚不多,包有凝胶体膜层的水泥颗粒之间还是分离的,相互之间引力较小,所以水泥浆基本保持塑性。

随着水泥颗粒不断水化,凝胶体膜层不断增厚而破裂,并继续扩展,在水泥颗粒之间形成了网状结构,水泥浆体逐渐变稠,黏度不断增大,渐渐失去塑性,这就是水泥的凝结过程。凝结后,水泥水化仍在继续进行。随着水化产物的不断增加,水泥颗粒之间的毛细孔不断被填实,加之水化产物中的氢氧化钙晶体、水化铝酸钙晶体不断贯穿于水化硅酸钙等凝胶体之中,逐渐形成了具有一定强度的水泥石,从而进入了硬化阶段。水化产物的进一步增加,水分的不断丧失,使水泥石的强度不断发展。硬化期是一个相当长的时间过程,在适当的养护条件下,水泥硬化可以持续几年甚至几十年。水泥浆的凝结硬化过程如图 1-2 所示。

随着凝胶体膜层的逐渐增厚,水泥颗粒内部的水化越来越困难,经过较长时间(几个月甚至若干年)的水化以后,除原来极细的水泥颗粒被完全水化外,仍存在大量尚未水化的水泥颗粒内核。因此,硬化后的水泥石是由各种水化物(凝胶和晶体)、未水化的水泥颗粒内核、毛细孔与水所组成的多相不匀质结构体,并随着不同时期相对数量的变化,而使水泥石的结构不断改变,从而表现为水泥石的性质也在不断变化。

3) 影响硅酸盐水泥凝结硬化的主要因素。

①水泥熟料矿物组成。水泥的组成成分及各组分的比

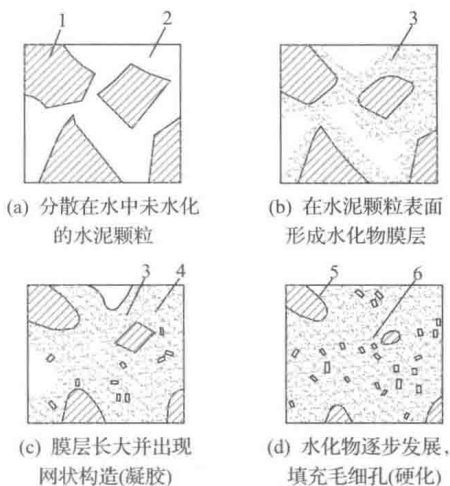


图 1-2 水泥凝结硬化过程示意图

1—水泥颗粒;2—水分;3—凝胶;4—晶体;
5—水泥颗粒的未水化内核;6—毛细孔

例是影响硅酸盐系水泥凝结硬化的最重要内在因素。一般来讲,水泥中混合材料的增加或熟料含量的减少,将使水泥的水化热降低和凝结时间延长,并使其早期强度降低。如水泥熟料中 C_2S 与 C_3A 含量的提高,将使水泥的凝结硬化加快,早期强度较高,同时水化热也多集中在早期。

②水泥颗粒细度。水泥颗粒越细,水泥比表面积(单位质量水泥颗粒的总表面积)越大,与水的接触面积也大,因此,其水化速度就越快,从而表现为水泥浆的凝结硬化加快,早期强度较高。但水泥颗粒过细时,其硬化时产生的体积收缩也较大,同时会增加磨细的能耗和提高成本,且不宜久存。

③石膏掺量。石膏是作为延缓水泥凝结时间的组分而掺入水泥的。若石膏加入量过多,会导致水泥石的膨胀性破坏;过少则达不到缓凝的目的。石膏的掺入量一般为水泥成品质量的 3%~5%。

④水泥浆的水灰比。拌和水泥浆时,水与水泥的质量之