



高等学校“十二五”重点规划教材
交通工程系列丛书

道路材料

李静娟◎主编



JIAOTONG
GONGCHENG
XILIE
CONGSHU

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

道 路 材 料

主 编 李静娟
副主编 孙 萌 梁 冰
编 者 苗晶晶 华英杰 李爱民



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

全书以最新的公路工程技术规范、标准、规程为依据,介绍了公路和桥梁工程常用材料的化学组成、结构构造、技术性能、性能测试及合理使用等基本知识、基本理论和基本技能,内容包括水泥混凝土、建筑砂浆、无机结合料稳定材料、沥青混合料、建筑钢材等道桥工程材料。

本书是高职高专院校道路工程技术专业教学用书,也适用于相关专业教学或作为有关专业的继续教育和职业培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

道路材料/李静娟主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011. 8
ISBN 978 - 7 - 81133 - 938 - 3

I. ①道… II. ①李… III. ①道路工程 - 工程材料
IV. ①U414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 164546 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 14.25
字 数 342 千字
版 次 2011 年 8 月第 1 次版
印 次 2011 年 8 月第 1 次印刷
定 价 31.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

近年来,我国交通事业蓬勃发展,与道路材料有关的技术规范和技术标准也多已修订,为了满足路桥类专业生产第一线应用性人才培养要求,满足路桥类专业人才的技能培养需要,由哈尔滨工程大学出版社组织有关院校编写了本教材。

在教材编写的过程中,均采用新颁布的技术规范和技术标准,力求使教材反映道路的新理论、新技术和新标准,并紧密结合工程实际,可操作性强,侧重学生应用能力的培养。

为体现公路建设的实际情况,本书与其他同类教材在内容的选取和结构上有较大的突破,教材内容对路桥工程施工中常用的几大材料分别进行系统阐述,水泥混凝土、建筑砂浆、无机结合料稳定材料、沥青混合料等常用重要工程材料各自独成一章,在基本保证内容系统性、连贯性和完整性的前提下,与工程建设的实际更加贴近,也更便于学生自学。同时,针对本课程试验较多且重要的情况,本书配有专门的辅助教材《道路材料实训》,供教师教学和学生自学之用。

本书具有以下特点:

1. 重点突出,主次分明。
2. 贯彻交通部颁发的新标准、新规范,保证了教材的时效性。
3. 各章按“学习目标、重点难点、正文、习题”组织教学内容,便于学生自学。
4. 理论知识与实践操作紧密结合。理论知识讲究概念清楚、强化应用;实践操作重点培养学生的动手能力和思维能力。
5. 对混合料设计流程和方法的掌握,在矿质混合料的组成设计、水泥混凝土配合比设计、无机结合料稳定材料配合比设计和沥青混合料的配合设计处编排了例题和习题,编排时注重理论与实践的联系。

6. 为尊重原作者的著作权,便于广大教师和学生查阅和深入研究原文,本教材各章节主要参考文献均附于书末,谨向原作者表示感谢。

本书由李静娟主编,孙萌和梁冰担任副主编,苗晶晶、华英杰、李爱民参与编写。具体编写分工为:天津交通职业学院李静娟编写第一章和第六章,并负责全书的统稿;梁冰编写第二章和第三章;孙萌编写第四章和第五章;华英杰、苗晶晶、李爱民共同编写第七章。

由于编者水平有限,书中错漏难免,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2011 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 水泥混凝土	5
第一节 水泥混凝土组成材料	6
第二节 水泥混凝土的技术性质	42
第三节 水泥混凝土配合比设计	53
第四节 普通水泥混凝土的质量控制	68
第五节 其他功能混凝土	69
习题	75
第三章 建筑砂浆	77
第一节 砂浆的组成材料及技术性质	77
第二节 砌筑砂浆	79
第三节 抹面砂浆	82
习题	83
第四章 无机结合料稳定材料	84
第一节 无机结合料稳定材料的应用及分类	84
第二节 无机结合料稳定材料的组成材料	87
第三节 无机结合料稳定材料的技术性能	108
第四节 无机结合料稳定材料的组成设计	115
第五节 无机结合料稳定材料的压实度要求	121
习题	122
第五章 沥青混合料	123
第一节 沥青路面使用性能气候分区	124
第二节 沥青混合料的组成材料	126
第三节 沥青混合料的组成结构和强度理论	155
第四节 沥青混合料的技术性质	159
第五节 沥青混合料的技术指标	166
第六节 沥青混合料的配合比设计	170
第七节 其他品种沥青混合料	185
习题	187
第六章 建筑钢材	189
第一节 建筑钢材的分类及技术性能	189
第二节 建筑钢材在道路桥梁结构工程中的应用与技术要求	196
习题	207
第七章 其他材料	208
第一节 工程高分子化合物	208

第二节 高聚物材料在道路与桥梁工程中的应用.....	210
第三节 木材和碳纤维.....	215
习题.....	218
参考文献.....	219

第一章 绪 论

一、道路材料在工程中的重要性

道路建筑材料是道路、桥梁、隧道等工程结构物的物质基础,材料的性质对工程结构物安全性、使用性能和耐久性起着决定性的作用,材料质量的好坏直接决定着工程质量的等级。

道路材料与工程造价之间有着密切关系,在实际工程中建筑材料占有工程造价较大的比重,一般工程约 30% ~ 50%,某些重要(特殊)工程到 70% ~ 80%。因此,在道路桥梁建筑中,合理选择和使用材料,尽量就地取材充分发挥材料的性能,合理地降低造价是非常重要的课题。作为一名道桥工程技术人员,必须熟悉道路材料的品种和性能才能在不同工程中合理地使用,发挥材料的功能,降低材料的成本。

道路工程结构物裸露在大自然中,长期经受环境和反复荷载等因素的考验,材料的性能和质量与结构物的使用性能和工程寿命有着极为密切的关系。分析一些道路桥梁工程在正常使用期内出现严重的波浪、拥包、车辙、较大裂缝等现象,都与材料的不合理使用有关,特别是近年来,交通事业迅猛发展,交通流量大幅增加,使这一问题更为突出。

我们看到材料科学的进步为工程建设提供了优质材料的同时,也促进了道桥工程建设的发展,20 世纪五六十年代,我国的道路主要是砂石路面,到现在我国的公路建设进入了一个新的时期,各种高强、耐久的优良道路材料不断出现在道桥工程建设中,同时工程建设的发展必将促进材料科学的发展。随着我国交通建设事业的高速发展,高等级道路桥梁建设速度的加快对材料的要求也越来越高,今后建筑材料的大家庭会越来越多地出现那些轻质、高强、耐久的高性能材料和环保节能的新型材料。

二、本课程的研究对象和内容

道路工程的各结构层由于所处位置不同,其所受行车荷载和自然因素对道路结构的作用程度不同,根据各结构层的功能要求和耐久性要求选用不同的建筑材料,道路面层结构中的常用材料主要是沥青混合料、水泥混凝土、粒料和块料等。常用的基层材料有结合料稳定类混合料、碎石或砾石混合料、天然砂砾、碾压混凝土和贫混凝土、沥青稳定集料等。常用的垫层材料有碎石或砾石混合料、结合料稳定类混合料等。用于桥梁结构的主要材料有钢材、水泥混凝土、钢筋混凝土,用于桥面铺装层的有沥青混合料及各种防水材料等。

本课程主要研究对象为以下材料:

1. 砂石材料。砂石材料是路桥工程的基本材料,砂石材料是人工开采的岩石或轧制的碎石以及地壳表层岩石经风化而得到的天然砂砾。其中尺寸较大的块状石料经加工后,可直接用于砌筑道路、桥梁工程结构物的基础,性能稳定的岩石集料和砂砾可用于配置水泥混凝土和沥青混凝土料,作为在水泥混合料和沥青混合料中起骨架和填充作用的粒料。

2. 无机结合料、水泥混凝土和砂浆。道路与桥梁工程中采用最多的无机结合料是石灰和水泥,用它们制成的无机结合料稳定类混合料通常用于高等级道路路面基层结构或低等

级道路路面结构。水泥是配制水泥混凝土和预应力混凝土结构的主要材料,广泛应用于土木工程、道路面层和桥梁工程中,水泥砂浆是各种桥梁结构物的砌筑材料。

3. 有机结合料及其混合料。有机结合料主要是指石油沥青、煤沥青和乳化沥青,它们与集料可以配置成沥青混合料,修筑成不同类型的沥青路面,沥青路面是现代高等级路面建筑中很重要的一种材料。

4. 建筑钢材。钢材包括钢结构用各种型材(如圆钢、角钢、工字钢、钢管、板材)和钢筋混凝土结构用钢筋、钢丝、钢绞线。钢材是钢结构桥梁和钢筋混凝土桥梁结构中最重要材料之一,钢材和混凝土性能和质量的优劣对桥梁工程起着至关重要的作用。

5. 高分子合成材料等新型材料。各种高聚物材料应用于道路和桥梁结构中,常用高分子聚全物材料改善水泥混凝土和沥青混合料性能,改善结构物的耐久性能。近年来根据对各种工业废料的性质的研究,以工业废料为原料,开发生产了不少新型材料,应用于路桥工程建设中。

本课程的研究内容为:上述原材料和混合料的基本组成与结构、材料的基本性能(包括物理力学性质、化学性质、耐久性和工艺性)及混合料的组成设计方法。

三、本课程的教学基本要求及学生能力目标

通过对本大纲中课程内容的学习,应到达下列要求:

(1)掌握砂石材料、石灰、水泥及水泥混凝土、无机结合料稳定材料、沥青及沥青混合料的技术性质和技术标准;

(2)熟悉水泥混凝土、石灰、无机结合料稳定材料、沥青混合料的配合比设计方法;

(3)掌握砂石材料、石灰、水泥及水泥混凝土、无机结合料稳定材料、沥青及沥青混合料性质试验的操作规程;

(4)熟悉砂石材料、石灰、水泥及水泥混凝土、无机结合料稳定材料、沥青及沥青混合料的质量检查和控制试验检测技术规范;

(5)了解建筑钢材的技术性质及选用原则;

(6)了解有机高分子材料的应用。

通过对本课程的学习,应使学生具备如下的能力:

(1)能说明道路桥涵工程常用原材料的类型、来源及用途;

(2)能说明道路桥涵工程常用原材料及混合材料的技术性质评价指标;

(3)会操作道路桥涵工程常用原材料及混合材料技术性质检验的仪器;

(4)能进行道路桥涵工程常用混合材料的组成设计;

(5)能初步根据试验检测技术规范对常用原材料及混合材料的成品质量进行检查和控制。

掌握各种常用筑路和建桥材料的原料、生产、组成、构造、性质、应用、检验、运输、验收和储存等各个方面,为后继课程及将来在设计、施工、质量检验等方面打下坚实的基础。

四、道路材料质量检验方法和技术标准

道路建筑材料性能和质量与道路桥梁工程的质量密切相关,为保证工程质量和结构物的安全性能和耐久性能,应对道路建筑材料进行检验。

(一)检验方法:室内、室外及模拟试验方法。

(二)检验内容:包括四个方面,即力学性质试验、物理性质试验、化学性质试验和工艺性质试验。

1. 力学性质实验

各种强度指标及耐磨、抗变形指标。如水泥混凝土的抗压、抗折强度,沥青混合料的稳定度、流值,石料的磨耗度等。

2. 物理性质实验

(1)物质指标:如材料的密度、孔隙率、含水量。

(2)温度稳定性:如沥青软化点、脆点等。

(3)水稳定性:如沥青混合料的残留稳定度等。

3. 化学性质实验

各种材料的化学成分及其变化规律。如水泥的各种成分与自然界之间的变化,沥青的化学成分及其变化规律。

4. 工艺性质实验

材料适于按照一定工艺要求加工的性能,如混凝土的流动性。

材料四个性质之间是相互制约、相互联系的。

(三)质量检验的标准化与技术标准

道路材料必须具备一定的技术性能才能满足工程的需要,而各种材料由于化学组成、结构及工艺的差异而带来性质的差异或因实验方法的不同而影响测定的数值结果。因此,必须有统一的技术质量要求和统一的实验方法来进行评定,在道路桥梁设计、施工和验收过程中,应以这些标准的方法和指标为基础共同遵循。

目前,我国建筑材料的标准分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准四个等级。各级标准分别由相应的标准管理部门批准并颁布。国家标准和行业标准是全国通用标准,是国家指令性文件,各级设计、施工、监理单位必须严格遵照执行。各级标准都有相应的代号,例如:GB——国家标准;GBJ——建筑工程国家标准;JTJ——交通部门基本建设方面的规范;JGJ——建设部行业标准;JC——建材行业标准;QB——企业标准。

此外,还有推荐性国家标准,以 GB/T 为标准代号,它表示也可以执行其他标准,非强制性。目前国际上较有影响的技术标准有国际标准 ISO,美国材料试验学会标准 ASTM,日本工业标准 JIS 等。

五、本课程的地位、作用、任务及其学习方法

道路建筑材料是路桥及其相关专业教学计划中一门重要的专业基础课,是研究道路与桥梁建筑用各种材料的组成、性能和应用的一门课程。它涵盖了公路桥梁工程建设的设计、施工、监理、试验检测、概预算、管理等相关行业技术人员必备知识,它为学习后面相继而来的其他课程如公路工程、桥梁工程、工程管理、工程概预算以及施工、监理等奠定了重要的基础。道路建筑材料讲述了常用筑路材料的化学组成、结构构造、技术性能、性能测试、合理使用及评定验收、运输储存等基本知识、基本理论和基本技能。本课程学习领域的任务是培养学生具备道路工程建设职业能力和职业素质技术人员,为毕业生解决实际工程中的道路工程材料问题提供一定的基本理论和基本试验技能。

本课程内容庞杂,名词、概念、专业术语及实验检验方法繁多,且各章之间联系较少,因

此,学好这门课应掌握一定的方法,达到事半功倍的作用。以下提供几个方法,以供参考:

1. 熟悉原材料的特性,掌握混合料的组成、结构和性质之间的关系。原材料的特性决定着混合料的性能,混合料的组成、配比和结构决定其性质和应用,同时还应注意外界因素对材料结构和性质的影响。

2. 运用对比的方法。通过对比各种材料的组成和结构来学习它们的性质和应用,特别是通过对比熟悉它们的共性和特性,这在学习水泥、混凝土和沥青混合料时尤为重要。

3. 密切联系工程实际,重视实践课和实践操作能力的训练。道路材料是一门实践性较强的课程,应充分利用一切机会进行实验验证,在实践中熟悉和补充书本所学内容,要认真对待实践操作课,学会检验建筑材料的实验方法,掌握一定的实验操作技能,并能对实验结果作出正确的分析和判断,为将来设计、施工、质量检验等方面打下坚实的基础。

第二章 水泥混凝土

【学习目标】

1. 掌握各种组成材料各项性质要求、测定方法及对混凝土性能的影响;
2. 熟悉混凝土拌和物的性质及其测定和调整方法;
3. 掌握硬化后水泥混凝土的技术性质及其影响因素;
4. 熟悉普通水泥混凝土的质量控制;
5. 掌握普通混凝土的配合比设计方法;
6. 了解其他功能混凝土的性能。

【本章重点】

水泥、集料的性质要求,测定方法;水泥混凝土技术性质;普通混凝土的配合比设计方法。

【本章难点】

混凝土的耐久性和普通混凝土的配合比设计。

水泥混凝土是由水泥、水、粗集料(石子)、细集料(砂)按预先设计的比例进行掺配,并在必要时加入适量外加剂、掺合料,经搅拌、成型、养护后而得到的具有一定强度和耐久性的人造石材,常简称混凝土。

水泥混凝土材料广泛应用于水泥混凝土路面、桥梁等道路工程结构物。水泥混凝土材料的快速发展及广泛应用得益于其自身的诸多特点,优点有四方面:①配制材料分布广,价格低,易于就地取材;②工艺简单,适用性强;③抗压强度高,耐久性好;④易与钢材配合使用。缺点有三方面:①自重大、韧性低,抗拉强度低,抗冲击性能差;②结硬前需要较长时间的养护,从而延长了施工期;③破坏后,修复、加固、补强困难。

水泥混凝土可从不同角度进行分类:

按表观密度可分为轻混凝土(干表观密度可达 $1\,900\text{ kg/m}^3$)、普通混凝土(干表观密度可达 $2\,400\text{ kg/m}^3$)、重混凝土(干表观密度可达 $3\,200\text{ kg/m}^3$)。

按强度可分为低强度混凝土(抗压强度小于 30 MPa)、中强度混凝土(抗压强度 $30\sim 60\text{ MPa}$)、高强度混凝土(抗压强度大于 60 MPa)。

按工作性水泥混凝土可分为干硬混凝土(坍落度值小于 10 mm)、塑性混凝土(坍落度值为 $10\text{ mm}\sim 90\text{ mm}$)、流动性混凝土(坍落度值为 $100\text{ mm}\sim 150\text{ mm}$)、大流动性混凝土(坍落度值大于 160 mm)。

按使用的场合可以分为普通混凝土和特种混凝土。普通混凝土主要用于一般的土木工程,具有一般范围的综合性能;特种混凝土主要用于一些特定的场合,具有某方面的特殊性能,如抗渗、耐酸、防辐射、抗裂、耐火等性能。

普通混凝土是道桥建设中最常用的混凝土。普通水泥混凝土具有料源丰富,便于就地取材,便于施工和浇筑成各种形状的构件,硬化后性能优越,节约能源,成本低廉等优点。

第一节 水泥混凝土组成材料

水泥混凝土是一种复合材料,由多种材料混合配制而成。组成材料的质量好坏直接影响混凝土的质量。混凝土的组成及各材料的大致比例如表 2-1 所示。

表 2-1 混凝土的组成及各材料的大致比例

组成成分	水泥	水	砂	石	空气
占混凝土总体积/%	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 33	35 ~ 48	1 ~ 3
	22 ~ 35		66 ~ 78		1 ~ 3

此外,为了改善混凝土的性质常加入各种外加剂或掺合料,但用量都不会太大。

一、水泥混凝土用水泥

混凝土的使用性能和工程经济性很大程度上取决于水泥的质量和用量。在满足工程要求的前提下,应选用价格较低的水泥品种,以节约工程造价。

选用水泥标号时,应以能使所配的混凝土强度达到要求、收缩小、和易性好和节约水泥为原则。

如果用高标号水泥配制低强度等级的混凝土,就会造成水泥强度的浪费,此时可以考虑掺加一定数量的掺合料。用低标号水泥配制高强度等级混凝土会造成用量浪费,同时影响混凝土的其他技术性质。

(一) 水泥定义及分类

水泥是一种胶结材料,即可通过胶结作用将一些固体碎块结合成一个坚实的整体。水泥不仅能在空气中硬化,而且在水中能更好地硬化,保持并继续增长其强度,因此称为水硬性胶结材料。

水泥生产技术发展至今,水泥的种类日益繁多。

按水泥的主要水硬性物质可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等。

按性能和用途不同,水泥又可分为通用水泥、专用水泥和特种水泥三大类。通用水泥是指大量用于一般土木工程的水泥,按其所掺混合材的种类及数量不同,又分为硅酸盐水泥、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。专用水泥是指适应于专门用途的水泥,如道路水泥、大坝水泥、砌筑水泥等。特种水泥指某种性能比较突出的水泥,如快硬性水泥、水化热水泥、抗硫酸盐水泥、膨胀水泥等。其中硅酸盐水泥使用最为普遍。

(二) 硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料,0% ~ 5% 的石灰石或粒化高炉矿渣和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料称为硅酸盐水泥。硅酸盐水泥分为两类,不掺混合材料的称为 I 型硅酸盐水泥、

代号P·I,掺少于5%石灰石或粒化高炉矿渣的称为Ⅱ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅱ。

1. 硅酸盐水泥的生产简述

以石灰石、黏土、铁矿石为主要原料,按一定的比例配合,磨细制成质量均匀的生料粉,送入窑中煅烧至部分熔融,得到颗粒状的熟料,再与石膏和少量石灰石或粒化高炉矿渣共同磨细,即得到硅酸盐水泥。这一流程可概括为“两磨一烧”。其流程图如图2-1所示。

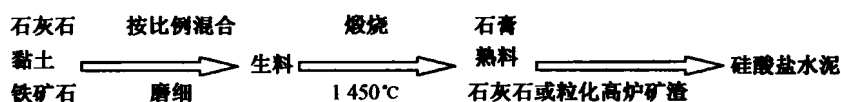


图 2-1 硅酸盐水泥生产流程图

2. 硅酸盐水泥熟料的矿物组成及化学成分

普通硅酸盐水泥熟料主要由氧化钙(CaO)、氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)、氧化铁(Fe_2O_3)四种氧化物组成。这四种氧化物经过高温煅烧后,化合成四种矿物,如表2-2所示。这四种成分化合为硅酸盐水泥熟料中的主要矿物组成。硅酸盐水泥熟料主要矿物组成的性质特点和性能比较如表2-3、表2-4所示。

表 2-2 硅酸盐水泥熟料主要矿物组成

矿物组成	化学组成	常用缩写	大致含量/%
硅酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	35 ~ 65
硅酸二钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	10 ~ 40
铝酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0 ~ 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	5 ~ 15

表 2-3 硅酸盐水泥熟料主要矿物组成的性质特点

矿物组成	主 要 特 点
C_3S	硅酸盐水泥中最主要的矿物成分,对硅酸盐水泥性质有重要影响。遇水反应速度较快,水化热高,水化产物对水泥早期和后期强度起主要作用
C_2S	硅酸盐水泥中的主要矿物成分,遇水反应速度较慢,水化热很低,水化产物对水泥早期强度贡献较小,但对水泥后期强度起重要作用,耐化学侵蚀性和干缩性较好
C_3A	含量通常在15%以下,是四种主要矿物组成中遇水反应速度最快、水化热最高的组分。它的含量决定水泥的凝结速度和释热量,它与为调节水泥凝结速度而掺入的石膏形成的水化产物对水泥早期强度起一定作用。耐化学侵蚀性差,干缩性大
C_4AF	遇水反应较快,水化热较高。强度较低,但对水泥抗折强度起重要作用。耐磨性、耐化学侵蚀性好,干缩性小

表 2-4 硅酸盐水泥熟料主要矿物组成的性能比较

矿物组成		硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙
与水反应速度		中	慢	快	中
水化热		中	低	高	中
对强度的作用	早期	良	差	良	良
	后期	良	优	中	中
耐化学侵蚀性		中	良	差	优

水泥由多种矿物成分组成,改变各种熟料的含量比例,水泥的性质就会发生相应的改变。例如,提高 C_3S 的相对含量可制得早强水泥;提高 C_2S 的相对含量并减少 C_3A 和 C_3S 的相对含量可制得低热水泥;提高 C_3S 和 C_4AF 的相对含量可制得具有较高抗折强度的道路水泥。

3. 硅酸盐水泥的水化及凝结硬化

水泥与适量的水拌合后,立即发生化学反应,水泥的各个组分开始溶解并产生了复杂的物理化学和力学变化,这种变化可以持续很长时间。随着反应的进行,形成的可塑性浆体逐渐失去流动能力,并凝结硬化成为具有一定强度的石状体。

(1) 水泥熟料矿物的水化及其生成物

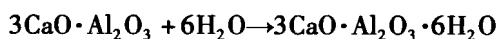
① C_3S 的水化反应式为



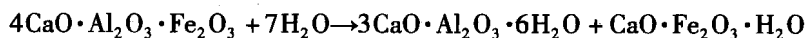
② C_2S 的水化反应式为



③ C_3A 的水化反应式为



④ C_4AF 的水化反应式为



在有石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)存在的情况下, C_3A 的水化分为四个阶段:阶段Ⅰ对应于 C_3A 的溶解和钙矾石(AFt)的形成;阶段Ⅱ中由于 C_3A 表面形成钙矾石包覆层,水化速率减慢,但随着水化继续进行,钙矾石包覆层变厚并产生结晶压力,当结晶压力超过一定数值时,包覆层会产生局部破裂;阶段Ⅲ中包覆层破裂处促使水化加速,所形成的钙矾石又使破裂处封闭,因此可以说阶段Ⅱ和阶段Ⅲ是包覆层破坏与修复的反复阶段。阶段Ⅳ则是由于石膏消耗完毕,体系中剩余的 C_3A 与已形成的钙矾石继续作用,形成新相单硫型铝酸钙(Afm)。

可见,水泥中掺入石膏形成钙矾石可以延缓水泥的凝结硬化速度,否则,水泥遇水会快速凝结,不便使用。另外,钙矾石是难溶的晶体结构,有利于提高水泥的早期强度。但需要注意的是,石膏的掺量必须是适量的,否则形成过多钙矾石,体积膨胀,引起水泥的体积安定性隐患。

C_4AF 的水化反应与 C_3A 相似,在有石膏存在时,生成钙矾石和新相单硫型铝酸钙。

不同的熟料矿物在水泥石强度发展过程中所起的作用不同, C_3S 在最初约四个星期以内水泥石强度起决定性作用; C_2S 在大约四个星期以后才发挥其强度作用,大约经过一年,与 C_3S 对水泥石强度发挥相等的作用; C_3A 在1~3天或稍长的时间内对水泥石强度起有益

作用。目前认为 C_4AF 对水泥强度的贡献居中。

(2) 凝结硬化

水泥与水拌和后,熟料矿物发生水化反应,各种水化生成物开始出现,水泥浆具有可塑性,随着时间的推移,水泥浆逐渐失去塑性,形成坚硬的水泥石,这个转变过程称为水泥浆的凝结硬化过程。从整体来看,凝结与硬化是同一过程的不同阶段,凝结标志着水泥浆失去流动性而具有一定的塑性强度,硬化则表示水泥浆固化后所形成的结构具有一定的机械强度。一般情况下,可将水泥的凝结硬化过程划分为四个阶段:

初始反应期,水泥颗粒与水接触后,立即发生化学反应,生成相应水化产物。

诱导期,水化产物逐渐在水泥颗粒表面形成以水化硅酸钙为主的渗透膜层,膜层的形成减缓了外部水分向内渗入和水化产物向外扩散的速率,水化速度减慢,放热速率也很低;水泥浆体基本保持塑性。

凝结期,由于渗透压的作用,包裹在水泥微料表面的渗透膜破裂,水泥微粒进一步水化,水泥水化产物不断填充了水泥颗粒之间的空隙,使水泥浆体逐渐失去塑性。

硬化期,由于水化产物数量不断增加,水泥浆体的孔隙率减小,水泥颗粒之间的空隙逐渐缩小为毛细孔,水泥浆体逐渐产生强度,在适当的温度和湿度条件下,水泥浆体的强度逐步增长,甚至可延续几十年时间。

水泥石强度发展的一般规律是:3~7 天内强度增长最快,28 天内强度增长较快,超过 28 天后强度将继续发展但增长较慢。

此外,水化过程还与水泥的熟料矿物组成、细度,水泥浆的水灰比,环境温度、湿度和龄期以及石膏的掺量等有关。

4. 硅酸盐水泥的技术性质与技术标准

(1) 技术性质

① 细度

细度指水泥颗粒的粗细程度。水泥颗粒越细,水化时与水的接触面积越大,水化速度越快,早期强度越高。但磨得过细,用水量大,硬化后收缩变形大,水泥石发生裂缝的可能性增加。另外,细度提高还将导致水泥磨细时所需消耗的能量增加,成本提高。因此,对水泥细度须予以合理控制。水泥细度可用下列方法表示。

筛析法:以 80 方孔筛上的筛余量百分率表示。筛析法有负压筛法和水筛法两种,有争议时,以负压筛法为准。

比表面积法:以每千克水泥总表面积(m^2)表示,比表面积采用勃氏法测定。

② 水泥净浆标准稠度

水泥的凝结时间和体积安定性测试结果与水泥浆稠度有关,在测试这两项指标时,为使检测结果具有可比性,必须用标准稠度的水泥净浆。《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2001)规定,水泥净浆稠度采用标准法维卡仪测定,以试杆沉入净浆距底板(6 ± 1)mm 时的稠度为“标准稠度”,此时的用水量为标准稠度用水量。

③ 凝结时间

凝结时间指水泥从加水开始,到水泥浆失去可塑性所需的时间。凝结时间分为初凝时间和终凝时间。初凝时间是从水泥加水到水泥浆开始失去塑性的时间,终凝时间是从水泥加水到水泥浆完全失去塑性的时间。凝结时间以从水泥加水搅拌到试针沉入水泥标准稠度净浆至一定深度的时间表示。

《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2001)规定,凝结时间采用标准法维卡仪测定。具体方法是:将标准稠度用水量制成的水泥净浆装在试模中,在标准法维卡仪上,以标准针测试。从加水时起,至初凝试针沉入净浆中距底板为 (4 ± 1) mm时所经历的时间称为“初凝时间”;从加水时起,至终凝试针沉入净浆不超过0.5 ~ 1.0 mm时所经历的时间称为“终凝时间”。水泥的凝结时间对水泥混凝土的施工有重要意义,为使水泥混凝土和砂浆有充分的时间进行搅拌、运输、浇捣和砌筑,水泥初凝时间不能过短。当施工完成,则要求尽快硬化,具有强度,故终凝时间不能太长。

④体积安定性

体积安定性反映了水泥浆在凝结硬化过程中体积膨胀变形的均匀程度。均匀轻微的变化,不致影响混凝土的质量;如果产生不均匀变形或变形太大,则混凝土构件将产生膨胀裂缝,影响工程质量,这种水泥称为体积不安定水泥。

导致水泥体积安定性不合格的原因,一般是由水泥中含有过量的游离氧化钙、游离氧化镁或掺入的石膏过量所致。水泥熟料中含有游离氧化钙,其中部分过烧的氧化钙 CaO 在水泥凝结硬化后,会缓慢与水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。该反应体积膨胀,使水泥石发生不均匀体积变化。游离氧化镁在水泥凝结硬化后,会与水生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。该反应比过烧的氧化钙与水的反应更加缓慢,且体积膨胀,会在水泥硬化几个月后导致水泥石开裂。当石膏掺量过多时,生成钙矾石,体积约增大1.5倍,引起水泥石开裂。

水泥体积安定性的测定可以用雷氏夹法和试饼法,当发生争议时,以雷氏夹法为准。雷氏夹法是用标准稠度的水泥净浆装满雷氏夹的环形试模中,用小刀插捣,盖上玻璃板后放在养护箱内养护24 h,煮沸3 h。测雷氏夹指针尖端之间的距离增大值,若不超过5.0 mm,则认为该水泥安定性合格。试饼法是将标准稠度的水泥净浆按规定方法制成试饼,养护、煮沸后,肉眼观察无裂纹,用直尺检查无弯曲的试饼为安定性合格。

⑤强度

强度是水泥技术要求中最基本的指标,它直接反映了水泥的质量水平和使用价值。我国水泥的强度检验采用《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 1767—1999)(简称ISO法)来评定水泥的强度等级。ISO法规定,以1:3的水泥和标准砂,用0.5的水灰比拌制一组塑性胶砂,制成40 mm × 40 mm × 160 mm的标准试件。在标准养护条件下,达到规定龄期(3天,28天时,测定其抗折和抗压强度,按规定的最低强度值来评定其所属等级。水泥的强度除了与水泥自身的性质(如熟料矿物组成、细度等)有关外,还与水灰比、试件制作方法、养护条件和时间等有关。

水泥分为普通型和早强型(或称R型)两个型号。早强型水泥的3d抗压强度较同标号普通型水泥提高10% ~ 24%,早强型水泥的3d抗压强度可达同标号普通水泥28d抗压强度的50%。水泥混凝土路面用水泥,在供应条件允许时,应尽量优先选用早强型水泥,以缩短混凝土养护时间,提早通车。水泥强度等级按规定龄期的抗压和抗折强度来划分,以MPa表示其强度等级,如32.5,32.5R,42.5,42.5R等。硅酸盐水泥分三个强度等级六种类型,即42.5,42.5R,52.5,52.5R,62.5,62.5R。硅酸盐水泥的强度指标如表2-5所示。

表 2-5 硅酸盐水泥的强度指标

强度等级	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
42.5	17	42.5	3.5	6.5
42.5R	22	42.5	4	6.5
52.5	23	52.5	4	7
52.5R	27	52.5	5	7
62.5	28	62.5	5	8
62.5R	32	62.5	5.5	8

⑥水化热

水泥在水化过程中所放出的热量,称为水泥的水化热。大部分的水化热是在水化初期(七天内)放出的,以后则逐步减少。水泥放热量大小及速度主要取决于水泥熟料的矿物组成和细度。

冬季施工时,水化热有利于水泥的正常凝结硬化。但对大体积混凝土工程,如大型基础、大坝、桥墩等,水化热大是不利的。因积聚在内部的水化热不易散出,常使内部温度高达 $50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。由于混凝土表面散热很快,内外温差引起的应力可使混凝土产生裂缝。因此对大体积混凝土工程,应采用水化热较低的水泥。

目前,国家标准未就该项指标作具体的规定。

(2)技术标准

国家标准 GB 175—1999《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》对硅酸盐水泥作出了技术要求:

①不溶物

I 型硅酸盐水泥中不溶物不得超过 0.75%, II 型硅酸盐水泥中不溶物不得超过 1.50%。

不溶物是指经盐酸处理后的残渣,再以氢氧化钠溶液处理,经盐酸中和过滤后所得的残渣经高温灼烧所剩的物质。不溶物含量高对水泥质量有不良影响。

②烧失量

I 型硅酸盐水泥中烧失量不得超过 3.0%, II 型硅酸盐水泥中烧失量不得超过 3.5%。烧失量是用来限制石膏和混合材中杂质的,以保证水泥质量。

③氧化镁

水泥中氧化镁的含量不宜超过 5.0%。如果水泥经压蒸安定性试验合格,则水泥中氧化镁的含量允许放宽到 6.0%。

因氧化镁水化生成氢氧化镁,体积膨胀,而其水化速度慢,须以压蒸的方法加快其水化,方可判断其安定性。

④三氧化硫

水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%。

水泥中过量的三氧化硫会与铝酸三钙形成较多的钙矾石,体积膨胀,危害安定性。