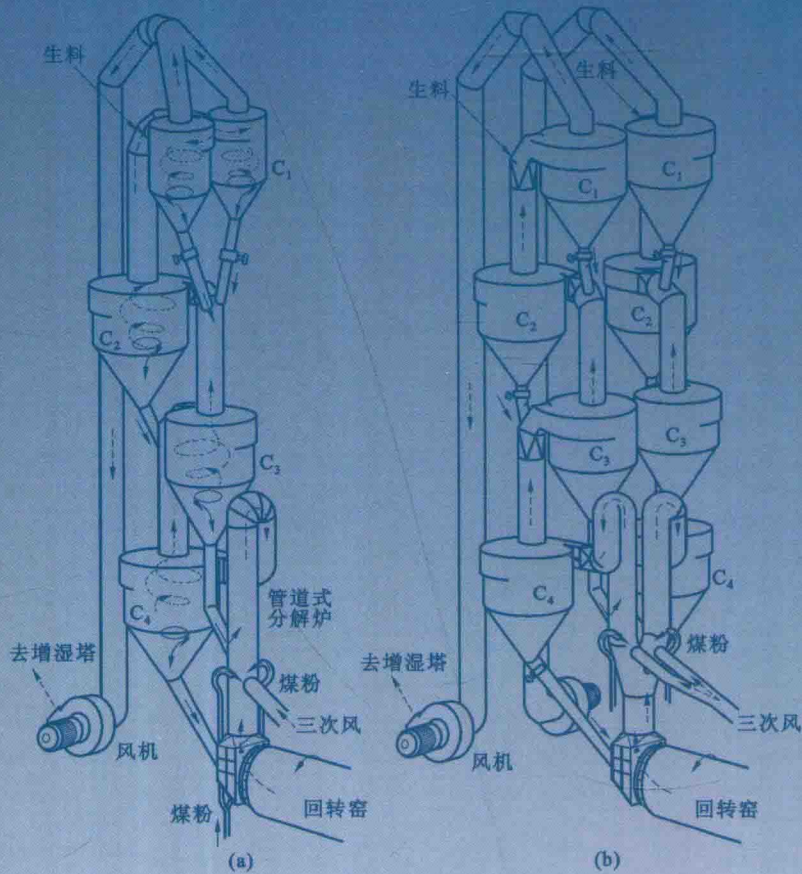


普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

New Dry Process Cement  
Production Technology and Equipment

# 新型干法水泥 生产工艺及设备

彭宝利 编著



武汉理工大学出版社  
WUTP Wuhan University of Technology Press

非外借

普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

*New Dry Process Cement Production  
Technology and Equipment*

新型干法水泥生产工艺及设备

彭宝利 编著



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

## 内 容 提 要

本书以新型干法水泥生产为主线,系统阐述了原料的破碎及预均化、水泥生料粉磨及均化、水泥熟料煅烧、水泥制成、水泥储存及发运的整个工艺过程及所涉及的生产设备,反映了国内外水泥工业的新进展、新技术应用及水泥标准等方面的最新成果。本书还对水泥品种及性能和应用、制造水泥所用原料和燃料及其配料、水泥熟料矿物组成、水泥的水化和凝结硬化与腐蚀等,也做了一般性介绍,内容丰富,翔实可靠,实用性强。

本书既可供高等学校无机非金属材料工程专业、高等职业技术学院材料工程技术专业及其他相关专业作为教学用书,也可供水泥企业的工程技术人员、管理人员、岗位操作人员阅读和参考,还可供水泥企业作为职工培训和继续教育的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型干法水泥生产工艺及设备/彭宝利编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2017. 12

ISBN 978-7-5629-4627-4

I. ① 新… II. ① 彭… III. ① 水泥-干法-生产工艺 ② 水泥-干法-化工设备 IV. ① TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 225881 号

项目负责人:田道全

责任编辑:田道全

责任校对:雷红娟

封面设计:付群

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:23

字 数:680 千字

版 次:2017 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:50.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

## Preface

### 序

水泥是建筑工业的三大基本材料之一,使用户、用量大,素有建筑工业的“粮食”之称。水泥自诞生 180 多年以来,为人类生存环境的改善做出了巨大贡献,而且在未来相当长的时期内,水泥仍将是人类社会的主要建筑材料。进入 21 世纪以来,我国新型干法水泥生产的发展驶入了快车道,产量已连续多年居世界第 1 位。随着我国工业化和城镇化进程的加快,水泥消费仍将继续保持较高的水平。为适应新世纪水泥工业以节能、降耗、环保、改善水泥质量和提高劳动生产率为中心,实现高效率、节约化生产,走可持续发展道路的要求,我国水泥工业在逐步淘汰落后生产工艺及设备的同时,加快了新工艺、新技术和新设备的产业化进程,代表着先进工艺技术水平的水泥熟料生产规模为 1000 t/d、2000 t/d、2500 t/d、3000 t/d 和 5000 t/d 级的窑外分解生产线,已全部实现国产化,从工艺设计到生产控制等各主要技术指标,都达到了欧美、日本等发达国家的水平。在此基础上,我国又采取自行研制与引进吸收相结合的方式,进一步开发了水泥熟料生产规模为 8000 t/d 和 10000 t/d 级的新型干法水泥生产成套技术装备。大型设备国产化率的提高,大大增强了企业的竞争力,实现了水泥工业“由大变强、靠新出强”的历史性跨越。

新型干法水泥生产工艺技术的发展,需要有一支由工程技术人员、生产管理人员和岗位一线操作人员所构成的强有力的团队作为支撑。与此同时,随着生产工艺技术水平的不断提高、生产设备的不断升级和生产规模的现代化、大型化的发展趋势,对从业人员的知识结构和技能要求也越来越高,需要不断更新知识,以适应现代水泥生产工艺技术和先进技术装备应用的需求。为此,学校专业教育和岗位能力培训将承担起重要角色。然而,传统的“水泥专业课程”的教学模式和教材内容,已经滞后于当今水泥工业的发展步伐,显现出了以学科为本位的知识结构与职业活动过程所“应用”的知识结构相脱节、以学科为本位的“理论体系”与职业活动的“能力体系”相脱节的现象。为了改变这种被动现状,我们很多从事水泥专业教育工作的教师,在教材的建设、规划、编写和评价等方面,一直在不断地探索,并开发出了一系列以“能力培养”为本位、贴近岗位要求、实践性和应用性较强的专业教材及科技图书,作为学校专业教育和岗位能力培训的重要教学资源,发挥着积极而不能由其他资料所替代的作用。

《新型干法水泥生产工艺及设备》及其姊妹篇《新型干法水泥生产工艺及设备图集》,是作者根据多年的专业教学及生产实践经验编写而成的,凝聚了我国水泥行业专家和学者们的专业智慧,反映了国内外新型干法水泥生产领域的最新技术成果。该书集生产工艺及操作控制、生产设备及维护管理于一体,内容丰富翔实,配图形象直观,理论知识融入生产实际当中,是一部集知识性、新颖性、普及型和实用性于一体且具有鲜明特色的全新教科书,对于水泥专业的在校学生从宏观层面上获取知识,以及对于水泥企业的岗位技工人员积累知识和更新知识,都会有所帮助,很值得一读。

济南大学 教授

程新

2017.4.6

# 前 言

新型干法水泥生产,是以悬浮预热和预分解技术为核心,将现代科学技术和工业生产最新成就广泛应用于水泥生产的全过程之中,使水泥生产具有高效、优质、节约资源、清洁生产、符合环境保护和大型化、集约化、自动化及科学管理特征的现代水泥生产方法,是当代水泥工业发展的主流和最先进的工艺技术。我国新型干法水泥生产技术,虽然起步较晚,但是,经过水泥工作者的不懈努力,在引进和消化世界先进水泥生产技术的同时,相继开发出具有自主知识产权和符合我国国情的新型干法水泥工艺和装备,现已成为我国水泥工业结构调整的主导方向。随着我国社会主义市场经济体制的建立和发展,近年来我国水泥工业实现了快速稳步推进,产量大幅度递增,自主创新取得新成效,国际化水平进一步得到提高。这就需要一大批高素质并具有较宽的知识面和较强的适应能力的专业人才。而承担着为水泥行业培养技术应用型人才的高等院校,其专业教材内容却严重滞后当今水泥技术的发展步伐,不能满足学校专业教学和企业职工培训的需要。为此,我们向高等学校无机非金属材料工程专业、高等职业技术学院材料工程技术专业的师生们推出《新型干法水泥生产工艺及设备》及其姊妹篇《新型干法水泥生产工艺及设备图集》。

《新型干法水泥生产工艺及设备》一书,从基本理论到实用技术,对新型干法水泥生产过程进行了较全面的阐述,在相关章节中还绘制了大量翔实的生产工艺及设备的立体图和局部剖视图,直观地展现了水泥生产的工艺过程及设备构造。该书不仅给读者以耳目一新的感觉,也将给教师授课带来很大方便,让指导学生实习等实践活动收到事半功倍的效果。

本书既可供高等学校无机非金属材料工程专业、高等职业技术学院材料工程专业及其他相关专业作为教学用书,也可供水泥企业的工程技术人员、管理人员、岗位操作人员阅读和参考,还可供水泥企业作为职工培训和继续教育的教学用书。

本书由济南大学程新教授作序。本书在编写过程中,得到了冀东发展集团有限责任公司、中联水泥集团有限公司等多家现代化水泥企业的支持以及武汉理工大学出版社田道全、杨学忠老师的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者学识水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,恳请从事水泥事业的广大同仁和学子们给予批评指正,以便今后再版时进行修订、补充和完善。

彭宝利

2017.4.6

# 目 录

1 水泥的基本知识 .....	(1)
1.1 水泥的起源与发展 .....	(1)
1.2 水泥的种类 .....	(2)
1.2.1 通用硅酸盐水泥 .....	(2)
1.2.2 专用水泥 .....	(4)
1.2.3 特性水泥 .....	(4)
1.3 水泥产业具有的特点 .....	(8)
1.4 我国水泥工业发展概况 .....	(8)
1.5 新型干法水泥生产工艺现状及发展方向 .....	(10)
1.6 制造水泥的原料 .....	(10)
1.6.1 硅酸盐水泥的原料及质量要求 .....	(11)
1.6.2 工业废渣的利用 .....	(16)
1.7 燃料煤 .....	(18)
1.7.1 对煤的质量要求 .....	(18)
1.7.2 燃煤基准及其表示方法 .....	(19)
1.8 石膏 .....	(19)
1.8.1 天然石膏 .....	(19)
1.8.2 工业副产石膏 .....	(20)
1.8.3 石膏的掺加量 .....	(20)
1.9 混合材料 .....	(20)
1.9.1 混合材料的分类 .....	(21)
1.9.2 粒化高炉矿渣 .....	(21)
1.9.3 火山灰质混合材料 .....	(23)
1.10 硅酸盐水泥熟料的组成及率值 .....	(24)
1.10.1 硅酸盐水泥熟料的化学组成 .....	(24)
1.10.2 硅酸盐水泥熟料的矿物组成 .....	(24)
1.10.3 硅酸盐水泥熟料的率值 .....	(27)
1.10.4 硅酸盐水泥熟料的矿物组成的测定计算和换算 .....	(29)
1.11 硅酸盐水泥的水化、凝结和硬化 .....	(32)
1.11.1 水泥熟料矿物的水化 .....	(32)
1.11.2 水泥的水化 .....	(33)
1.11.3 水泥的凝结 .....	(34)
1.12 铝酸盐系列水泥的生产原料、水泥熟料组成及生产控制参数 .....	(38)
1.12.1 铝酸盐水泥 .....	(38)
1.12.2 硫铝酸盐水泥与铁铝酸盐水泥 .....	(40)
1.13 通用硅酸盐水泥的国家标准 .....	(41)

1.13.1	定义与分类 .....	(42)
1.13.2	组分与材料 .....	(43)
1.13.3	强度等级 .....	(43)
1.13.4	技术要求 .....	(43)
1.13.5	试验方法 .....	(45)
1.13.6	检验规则 .....	(46)
1.13.7	包装、标志、运输与贮存 .....	(47)
1.14	现代水泥生产工艺流程 .....	(47)
1.14.1	生料制备 .....	(47)
1.14.2	熟料煅烧 .....	(47)
1.14.3	水泥制成 .....	(47)
<b>2</b>	<b>水泥生料的制备</b> .....	<b>(53)</b>
2.1	原料破碎 .....	(53)
2.1.1	基本概念 .....	(53)
2.1.2	破碎工艺流程 .....	(55)
2.1.3	破碎设备 .....	(55)
2.2	原料预均化 .....	(58)
2.2.1	堆料及取料过程 .....	(58)
2.2.2	预均化库 .....	(59)
2.2.3	堆料机 .....	(60)
2.2.4	桥式刮板取料机 .....	(63)
2.2.5	预均化效果 .....	(65)
2.3	原料的配制 .....	(66)
2.3.1	原料的配料站 .....	(66)
2.3.2	水泥生料的配料计算 .....	(67)
2.4	水泥生料的粉磨 .....	(80)
2.4.1	球磨机粉磨工艺系统 .....	(81)
2.4.2	立式磨机系统 .....	(106)
2.4.3	水泥生料的质量控制 .....	(121)
2.5	水泥生料的均化 .....	(123)
2.5.1	水泥生料均化库的构造及均化过程 .....	(123)
2.5.2	水泥生料均化的工艺过程 .....	(125)
2.5.3	水泥生料均化库的类型 .....	(125)
2.5.4	水泥生料均化系统的配置 .....	(127)
2.5.5	水泥生料均化库的应用实例 .....	(129)
2.5.6	水泥生料均化库的操作控制 .....	(131)
<b>3</b>	<b>水泥熟料的煅烧</b> .....	<b>(132)</b>
3.1	新型干法煅烧工艺技术 .....	(132)
3.1.1	悬浮预热技术 .....	(132)
3.1.2	预分解技术 .....	(134)
3.2	分解炉及其预分解系统 .....	(138)
3.2.1	分解炉系列 .....	(138)

3.2.2	分解炉的工艺性能	(157)
3.3	水泥回转窑	(161)
3.3.1	水泥回转窑的功能及特点	(161)
3.3.2	水泥回转窑的构造及工作原理	(162)
3.3.3	回转窑内工艺带的划分及水泥熟料的烧成	(168)
3.3.4	窑衬	(169)
3.3.5	预分解窑的操作	(172)
3.3.6	水泥熟料的质量控制	(183)
3.4	水泥熟料冷却机	(185)
3.4.1	第1代与第2代算式冷却机	(185)
3.4.2	第3代算式冷却机	(188)
3.4.3	第4代算式冷却机	(197)
3.5	煤粉燃烧器	(201)
3.5.1	煤粉燃烧器中的名词术语及其含义	(202)
3.5.2	3风道煤粉燃烧器	(204)
3.5.3	4风道煤粉燃烧器	(206)
3.5.4	煤粉燃烧器的操作	(207)
3.6	增湿塔	(211)
3.6.1	增湿塔的构造及工作原理	(212)
3.6.2	增湿塔的关键技术	(213)
3.6.3	增湿塔自动喷淋系统工艺和控制流程	(213)
3.7	煤粉的制备	(214)
3.7.1	风扫式钢球磨机	(214)
3.7.2	立式煤磨机	(218)
3.7.3	煤磨机用热风	(222)
3.8	水泥熟料煨烧系统的主机配置及工艺流程	(222)
4	水泥的制成	(224)
4.1	水泥的材料组成及要求	(224)
4.1.1	水泥的主要组分及配比	(224)
4.1.2	水泥粉磨的细度	(225)
4.1.3	水泥助磨剂	(226)
4.2	矿渣的烘干	(227)
4.2.1	回转烘干机	(227)
4.2.2	沸腾燃烧室	(229)
4.2.3	烘干机的操作控制	(229)
4.3	水泥粉磨	(232)
4.3.1	水泥粉磨工艺流程	(233)
4.3.2	辊压机	(233)
4.3.3	辊压机系统的操作维护	(238)
4.3.4	打散分级机	(242)
4.3.5	V形选粉机	(244)
4.3.6	打散分级机与带V形选粉机的粉磨工艺系统的比较	(245)



4.3.7	球磨机 .....	(246)
4.3.8	水泥粉磨工艺操作 .....	(248)
4.3.9	O-Sepa 选粉机 .....	(254)
4.3.10	立式磨机系统 .....	(259)
4.3.11	出磨水泥的质量控制 .....	(261)
4.4	水泥储存与发运 .....	(263)
4.4.1	水泥装运系统的发展 .....	(263)
4.4.2	储存及均化 .....	(264)
4.4.3	回转式水泥包装机 .....	(265)
4.4.4	水泥散装系统的主要设备 .....	(272)
<b>5</b>	<b>辅助设备 .....</b>	<b>(276)</b>
5.1	机械输送设备 .....	(276)
5.1.1	带式输送机 .....	(276)
5.1.2	螺旋输送机 .....	(287)
5.1.3	斗式提升机 .....	(291)
5.1.4	链式输送机 .....	(295)
5.2	气力输送设备 .....	(303)
5.2.1	粉状物料的气力输送 .....	(303)
5.2.2	空气输送斜槽 .....	(305)
5.2.3	气力提升泵 .....	(307)
5.2.4	螺旋气力输送泵 .....	(309)
5.2.5	仓式气力输送泵 .....	(310)
5.2.6	管道及阀门 .....	(312)
5.3	除尘与通风设备 .....	(314)
5.3.1	粉尘与除尘 .....	(314)
5.3.2	旋风除尘器 .....	(317)
5.3.3	袋式除尘器 .....	(322)
5.3.4	电除尘器 .....	(328)
5.3.5	离心通风机 .....	(334)
5.3.6	除尘系统的选择 .....	(337)
5.3.7	球磨机内通风与收尘的测定 .....	(340)
5.4	空气压缩站 .....	(349)
5.4.1	空气压缩站的组成 .....	(349)
5.4.2	空气压缩机 .....	(349)
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(356)</b>

# 1 水泥的基本知识

## 1.1 水泥的起源与发展

“躺下是大路，站起来是高楼”，这就是水泥。不论是架桥修路，还是建造楼宇，不论是乡村城市，还是边卡哨所，水泥都与我们的生产、生活、发展、建设乃至整个社会进步息息相关。如图 1-1-1 所示。

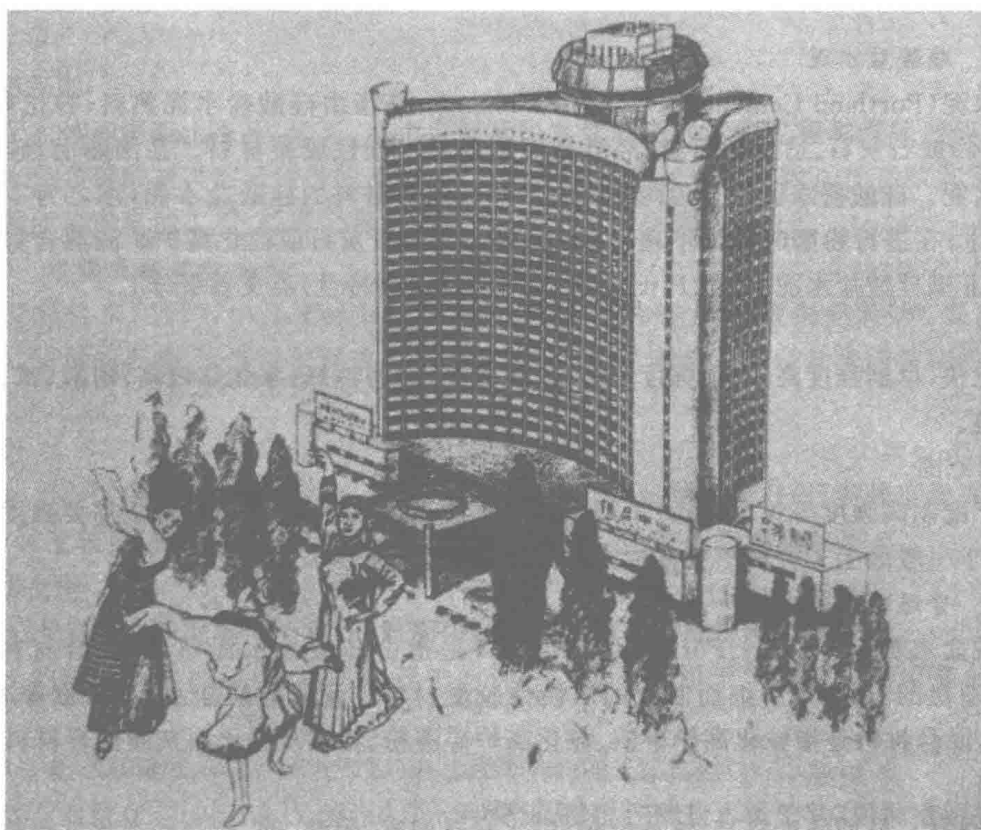


图 1-1-1 北京国际饭店

水泥(Cement, 碎石及片石的意思)起源于胶凝材料。很早以前,人类就已经使用黏土或将一些纤维材料混合在一起,加水拌和后用来建造简易的房屋居住,这是最早的胶凝材料,它具有一定的可塑性,干硬后具有一定的强度,但是强度很低,而且经不起雨水的考验。

在公元前 3000—前 2000 年,石膏岩和石灰石被人类所利用,人们开始用通过煅烧所得的石膏和石灰来调制砌筑砂浆用作胶凝材料。例如,古埃及的金字塔、我国的万里长城等,就是用这种胶凝材料建造的。随着人类生产力的发展,胶凝材料也在不断进化。1824 年,英国人阿斯普丁(J. Aspdin)以石灰石和黏土为原料,按一定比例配合后,在类似于烧石灰的立窑内煅烧成熟料,再磨成细粉,加水拌和后硬化成人工石块,具有较高的强度,这就是早期的水泥。因为它的颜色与英格兰岛上波特兰城用于建筑的石头相似,所以被称之为波特兰水泥,在我国则被称之为硅酸盐水泥。

## 1.2 水泥的种类

随着社会发展和现代工业化的进程,仅有硅酸盐水泥、石灰、石膏等胶凝材料已远远不能满足重要工程建设的需要,生产和发展多用途、多品种水泥已成为市场的客观需求。目前已形成了三大类型系列品种水泥:通用硅酸盐水泥、专用水泥和特性水泥。

### 1.2.1 通用硅酸盐水泥

通用硅酸盐水泥(Common Portland Cement),简称通用水泥(General Cement)。它是指一般土木工程通常采用的水泥的统称,它是由硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料经磨细而制成的水硬性胶凝材料。通用水泥共有6个系列品种水泥,即: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、复合硅酸盐水泥。它是产量最大、使用面最广的水泥。

#### 1.2.1.1 硅酸盐水泥

硅酸盐水泥(Portland Cement,或 Silicate Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、粒化高炉矿渣(掺加量为0~5%)或石灰石、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。在国际上,硅酸盐水泥被称为波特兰水泥。硅酸盐水泥可分为两类,即:不掺加混合材料的硅酸盐水泥,称之为Ⅰ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅰ;在进行粉磨时掺加不超过水泥质量5%的石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的硅酸盐水泥,称之为Ⅱ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅱ[P为Portland(波特兰)英文首字母]。

##### (1) 性能

凝结硬化快,早期强度高,水泥强度等级高;抗冻性、耐磨性好;水化热较高;耐酸、碱、硫酸盐类化学侵蚀性较差。

##### (2) 适用范围

主要用于配制高强度等级混凝土、早期强度要求较高的工程,在低温条件下需要强度发展较快的工程;也可用于一般地上工程和不受侵蚀的地下工程、无腐蚀性水中的受冻工程。

#### 1.2.1.2 普通硅酸盐水泥

普通硅酸盐水泥(Ordinary Portland Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、混合材料(掺加量为5%~20%)、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。普通硅酸盐水泥,简称普通水泥,代号P·O。其中,混合材料是指粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰和火山灰质混合材料。

##### (1) 性能

凝结硬化较快,早期强度较高;抗冻性较好;水化热偏高;耐酸、碱、硫酸盐类化学侵蚀性较差。

##### (2) 适用范围

用于配制一般强度等级混凝土、在低温条件下需要强度发展较快的工程;也可用于一般地上工程和不受侵蚀的地下工程、无腐蚀性水中的受冻工程。

#### 1.2.1.3 矿渣硅酸盐水泥

矿渣硅酸盐水泥(Slag Portland Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、粒化高炉矿渣、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料,矿渣硅酸盐水泥简称矿渣水泥。按掺加矿渣的含量(质量分数,%)的不同而分为A、B两种类型:A型的矿渣掺量为20%~50%(代号P·S·A);B型的矿渣掺量为50%~70%(代号P·S·B)。

##### (1) 性能

对硫酸盐类侵蚀性的抵抗能力及抗水性较好;耐热性较好;水化热较低;在蒸汽养护中强度发展较快;在潮湿环境中后期强度增进率较大;但早期强度较低,凝结较慢,在低温环境下尤甚;干缩性较

大,有泌水现象(水泥析出水分性能对制造均质混凝土有害,妨碍混凝土层与层之间的结合,将降低混凝土的强度和抗水性)。

#### (2) 适用范围

用于地下、水中和海水中工程以及经常受高水压的工程,其对硫酸盐类侵蚀性的抵抗能力及抗水性优于硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥;也可用于大体积混凝土工程、蒸汽养护工程和一般地上工程,不适用于冻融交替或干湿交替的工程。

##### 1.2.1.4 火山灰质硅酸盐水泥

火山灰质硅酸盐水泥(Pozzolana Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、火山灰质混合材料(掺加量为20%~40%)、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。火山灰质硅酸盐水泥简称火山灰质水泥(代号P·P)。

#### (1) 性能

对硫酸盐类侵蚀的抵抗能力较强;抗水性较好;水化热较低;在湿润环境中后期强度增进率较大;在蒸汽养护中强度发展较快;早期强度较低,凝结较慢,在低温环境中尤甚;抗冻性较差;吸水性大;干缩性较大。

#### (2) 适用范围

主要用于大体积混凝土工程,地下、水中工程及经常受较高水压的工程和低强度等级混凝土;也可用于受海水及含硫酸盐类溶液侵蚀的工程、蒸汽养护的工程和远距离输送的砂浆和混凝土。但不适用于早期强度要求高的工程、冻融交替的工程、长期干燥和高温的地方。

##### 1.2.1.5 粉煤灰硅酸盐水泥

粉煤灰硅酸盐水泥(Fly Ash Portland Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、粉煤灰(掺加量为20%~40%)、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。粉煤灰硅酸盐水泥简称粉煤灰水泥(代号P·F)。

#### (1) 性能

对硫酸盐类侵蚀的抵抗能力及抗水性较好;水化热较低;耐热性较好;后期强度增进率较大;干缩性较小;抗拉强度较高;抗裂性好;早期强度较低;抗冻性较差;抗碳化性能较差。

#### (2) 适用范围

主要用于水工大体积混凝土工程、一般民用和工业建筑工程配置低强度混凝土;也可用于混凝土和钢筋混凝土的地下及水中结构、用蒸汽养护的构件。但不适用于早期强度要求高的工程及受冻工程。

##### 1.2.1.6 复合硅酸盐水泥

复合硅酸盐水泥(Composite Portland Cement),是指由硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上的混合材料(掺加量为20%~50%)、适量的石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。复合硅酸盐水泥,简称复合水泥(代号P·C)。

#### (1) 性能

复合水泥与普通水泥、矿渣水泥、火山灰质水泥和粉煤灰水泥一样,都是以硅酸盐水泥熟料为主要组分的水泥,因此,复合水泥与上述几种水泥的性能基本一致,但由于复合水泥复掺混合材料,其性能与所用复掺混合材料的品种和数量有关。当选用矿渣为主,配以其他混合材料,且混合材料掺加量较大时,接近矿渣水泥;若以掺加火山灰或粉煤灰混合材料为主,再配以其他混合材料,且混合材料掺加量较大时,其性能接近火山灰质水泥或粉煤灰水泥;如选用少量的各类混合材料搭配,其特性接近于普通水泥。

#### (2) 适用范围

复合水泥可广泛应用于工业与民用建筑工程中。

### 1.2.2 专用水泥

专用水泥(Special Cement),是指具有专门用途的水泥的统称。“专用”是指专一用途,在此特定范围内,水泥能充分发挥其特性,取得最佳使用效果。例如油井水泥、道路水泥、砌筑水泥等。

#### 1.2.2.1 油井水泥

油井水泥(Oil Well Cement),又称堵塞水泥或固井水泥,是指以水硬性硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料、适量石膏和助磨剂,经磨细而制成的水硬性胶凝材料。在我国,油井水泥分为九个级别:A、B、C、D、E、F、G、H和J,每种水泥都适用于不同的井深、温度和压力。同一级别的油井水泥,根据其中 $C_3A$ 的含量不同,又可分为三种类型:普通型(O)、中抗硫酸盐型(MSR)和高抗硫酸盐型(HSR),以示抗硫酸盐侵蚀的能力。

##### (1) 性能

油井水泥具有合适的密度和凝结时间,以及较低的稠度,用其配制的预拌油井混凝土具有良好的抗沉降性和可泵性。将其注入预定(温度、压力)的井段,能迅速凝结硬化并产生一定的机械强度。混凝土固化后具有良好的抗渗性、稳定性和耐腐蚀性。

##### (2) 适用范围

专用于油井、气井的固井工程。

#### 1.2.2.2 道路水泥

道路水泥(Portland Cement for Road),是指由道路硅酸盐水泥熟料、活性混合材料(掺加量为0~10%)、适量石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料(代号R)。其中,道路硅酸盐水泥熟料是指以适当成分的生料烧至部分熔融所得的以硅酸钙为主要成分和较多量的铁铝酸四钙的硅酸盐水泥熟料。熟料仍以硅酸盐水泥熟料为主要组分。

##### (1) 性能

能经受高速车辆的摩擦、载重车辆的冲击和震荡、路面与路基的温差和干湿度差产生的膨胀应力、冬季的冻融等,耐磨性好(比同标号的硅酸盐水泥磨耗低20%~40%),收缩变形小(干缩率优于硅酸盐10%以上),抗冻性强,水化热低,抗冻性及抗冲击性强,有较好的弹性。

##### (2) 适用范围

应用于各类混凝土路面工程、广场,也适用于耐磨、抗干缩等性能要求较高的其他工程。

#### 1.2.2.3 砌筑水泥

砌筑水泥(Masonry Cement),是指由一种或一种以上活性混合材料或具有水硬性的工业废料为主要原料,加入适量硅酸盐水泥熟料和石膏,经磨细而制成的水硬性胶凝材料(代号M)。

##### (1) 性能

强度较低,不能用于钢筋混凝土或结构混凝土。

##### (2) 适用范围

主要用于工业与民用建筑的砌筑和抹面砂浆、垫层混凝土等。

### 1.2.3 特性水泥

特性水泥(Characteristic Cement),是指具有某种特殊性能的水泥的统称。它不是专用的,可以在需要和规定的特性范围内使用。目前已有很多品种的特性水泥,例如,铝酸盐水泥、快硬水泥、中低热水泥、抗硫酸盐水泥、膨胀与自应力水泥、白水泥和彩色水泥等。

#### 1.2.3.1 铝酸盐水泥

铝酸盐水泥(Aluminate Cement),又称矾土水泥,是指以铝矾土和石灰石为原料,按适当比例配合后经烧结或熔融而制成以铝酸钙为主要成分、氧化铝含量约50%的熟料,再经磨细而制成的水硬

性胶凝材料。铝酸盐水泥包括高温铝酸盐水泥、快硬高强铝酸盐水泥(高铝水泥、高铝水泥-65、膨胀铝酸盐水泥、自应力铝酸盐水泥),是继硅酸盐水泥之后的第二系列产品。

#### (1) 性能

快硬、早强,1 d 强度可达最高强度的 80%以上;水化热大且放热量集中,1 d 内放出的水化热为总量的 70%~80%;耐高温性能好。

#### (2) 适用范围

铝酸盐水泥是一种快硬早强水泥,适用于军事工程、紧急抢修工程、严寒下的冬季施工及早强的特殊工程。由于耐高温性能好,它是配制耐火混凝土(作为窑炉内衬)的最好材料。

#### 1.2.3.2 快硬硫铝酸盐水泥

快硬硫铝酸盐水泥(Rapid Hardening Sulphur Aluminate Cement),是指以石灰石、矾土、石膏为原料,经煅烧而制成含有适量无水硫铝酸钙的熟料,再掺加适量的石膏,经共同磨细而制成的早期强度高、水硬性胶凝材料。

#### (1) 性能

凝结速度快、初凝和终凝时间较短,早期强度高,抗冻抗渗性能好。

#### (2) 适用范围

用于紧急抢修工程,例如,接缝、堵漏、锚喷支护、抢修飞机跑道、抢修公路等,适合于冬季施工工程、地下工程、配制膨胀水泥和自应力水泥以及耐火性好的玻璃纤维增强水泥制品。

#### 1.2.3.3 快硬氟铝酸盐水泥

快硬氟铝酸盐水泥(Rapid Hardening Fluorine Aluminate Cement),是指以铝质原料、石灰石质原料、萤石(或再加石膏)适当配料,经煅烧而制成以氟铝酸钙为主要矿物的熟料,外掺石膏,再经磨细而成的水硬性胶凝材料。我国的双快(快凝、快硬)和国外的超速硬水泥属于此类水泥。

#### (1) 性能

凝结速度快,初凝一般仅几分钟,而且初凝和终凝时间很短,终凝不超过 0.5 h(在用于抢修工程时,根据使用和气候条件,可加缓凝剂以调节凝结时间)。

#### (2) 适用范围

用于紧急抢修工程、低温施工工程,制造业用的砂型水泥。

#### 1.2.3.4 快硬铁铝酸盐水泥

快硬铁铝酸盐水泥(Rapid Hardening Iron Aluminate Cement),是指以适当成分的生料,经煅烧所得以铁相、无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料,加入适量石灰石和石膏,经磨细而制成的早期强度高、水硬性胶凝材料。

#### (1) 性能

凝结硬化快,早期强度高,具有高强、高抗冻性能,良好的抗海水和抗硫酸盐侵蚀性能,对钢筋不产生锈蚀。

#### (2) 适用范围

适用于冬季施工工程、抢修和抢建工程;配置喷射混凝土及生产预制构件等。

#### 1.2.3.5 快硬硅酸盐水泥

快硬硅酸盐水泥(Rapid Hardening Portland Cement),是指以硅酸盐水泥熟料和适量石膏为原料,经磨细而制成的以 3 d 抗压强度表示等级的水硬性胶凝材料。快硬硅酸盐水泥简称快硬水泥。

#### (1) 性能

快硬水泥凝结时间正常,而且终凝和初凝之间的时间间隔很短,早期强度发展很快,后期强度持续增长,与使用普通水泥相比,可加快施工进度。

## (2) 适用范围

快硬水泥可用来配置早强、高标号混凝土,适用于紧急抢修工程、军事工程、低温施工工程和高标号混凝土预制件等,但水化放热比较集中,不宜用于大体积混凝土工程。

### 1.2.3.6 中热硅酸盐水泥

中热硅酸盐水泥(Moderate Heat Portland Cement),是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料和适量石膏为原料,经磨细而制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料(代号P·MH)。

#### (1) 性能

具有水化热较低,3 d和7 d的水化热分别比相应的硅酸盐水泥低15%~20%,而抗硫酸盐侵蚀性能则有明显提高,耐磨性和抗冻性良好。

#### (2) 适用范围

适用于大坝溢流面的面层和水位变动区等要求较高的耐磨性和抗冻性工程。

### 1.2.3.7 低热矿渣硅酸盐水泥

低热矿渣硅酸盐水泥(Low Thermal Slag Portland Cement),是指由适当成分的硅酸盐水泥熟料加入矿渣、适量石膏,经磨细而制成的具有低水化热的水硬性胶凝材料。按其含量(质量分数,%)计,低热矿渣水泥中矿渣的掺入量为20%~60%,允许用不超过混合材料总量50%的磷渣或粉煤灰代替部分矿渣。低热矿渣硅酸盐水泥,简称低热矿渣水泥(代号P·LH)。

#### (1) 性能

具有水化热低、抗硫酸盐性能良好、干缩率小等性能。

#### (2) 适用范围

主要用于对水化热有严格要求,而对抗冲击、抗冻性及耐磨性要求不高的场合,例如,大坝或大体积混凝土的内部及水工工程。

### 1.2.3.8 抗硫酸盐硅酸盐水泥

抗硫酸盐硅酸盐水泥(Sulfate Resistance Portland Cement),按其抗硫酸盐侵蚀程度分为两类:中抗硫酸盐硅酸盐水泥和高抗硫酸盐硅酸盐水泥。中抗硫酸盐硅酸盐水泥是指以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏,经磨细而制成的具有抵抗中等浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料,被简称为中抗硫水泥(代号P·MSR)。高抗硫酸盐硅酸盐水泥是指以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏,经磨细而制成的具有抵抗较高浓度硫酸根离子侵蚀的水硬性胶凝材料,被简称为高抗硫水泥(代号P·HSR)。

#### (1) 性能

抗硫酸盐侵蚀性能好,水化热低,耐磨性能好,胀缩、抗渗、抗冻等性能与硅酸盐水泥相似。

#### (2) 适用范围

主要用于受硫酸盐侵蚀的海港、水利、地下、隧道、涵洞、道路和桥梁基础等工程,也可以替代硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥用于工业与民用建筑工程。

### 1.2.3.9 硫铝酸钙改性硅酸盐水泥

硫铝酸钙改性硅酸盐水泥(Modified Silicate Calcium Sulphoaluminate Cement),属于硅酸盐水泥系列的一个新品种,在传统的硅酸盐水泥熟料中,引入以少量的无水硫铝酸钙的水泥熟料与矿渣(含量 $>20\%$ 且 $\leq 50\%$ )[或粉煤灰(含量 $>20\%$ 且 $\leq 35\%$ ),或矿渣粉煤灰(含量 $>20\%$ 且 $\leq 50\%$ ,但其中粉煤灰 $\leq 35\%$ )]复合,以适量的石膏为原料,经磨细而制成的具有早强微膨胀性的水硬性胶凝材料(代号S·M·P)。

#### (1) 性能

水硬化快、早强和微膨胀,减小了传统硅酸盐水泥干缩率,提高了抗冻、抗渗和耐磨性能。

## (2) 适用范围

用于防渗、堵漏、水工工程。

### 1.2.3.10 膨胀水泥和自应力水泥

膨胀水泥是指以硅酸盐水泥熟料、高铝水泥熟料、硫铝酸盐水泥熟料,加入适量石膏和其他有关天然或粒化高炉矿渣、粉煤灰、石膏等材料,按适当比例磨细而制成的具有膨胀性的水硬性胶凝材料。一般来讲,在没有受到任何限制的条件下,所产生的膨胀称作“自由膨胀”,对此并不产生自应力。当受到单向、双向或三向限制时,则称为“限制膨胀”,这时会有自应力产生,而且限制越大,自应力值越高。

在我国,按其膨胀值和使用目的不同,分别被称为膨胀水泥(Expansive Cement,膨胀值较小,用于补偿水泥混凝土收缩的水泥)和自应力水泥(Self-stressing Cement,膨胀值较大,用于产生预应力的水泥),主要有以下几个品种:

① 以硅酸盐熟料为主:硅酸盐膨胀水泥和自应力水泥(硅酸盐水泥熟料或水泥加铝酸盐水泥和石膏)、明矾石膨胀水泥和自应力水泥(硅酸盐水泥熟料或水泥加煅烧或未煅烧的明矾石和石膏)、K型膨胀水泥(硅酸盐水泥熟料或水泥加膨胀剂)、S型膨胀水泥(含铝较高的硅酸盐水泥熟料加二水石膏)。

② 以硫酸盐熟料为主:硫铝酸盐早期微膨胀水泥、自应力硫铝酸盐水泥(由硫铝酸盐水泥熟料加二水石膏经磨细而制成)。

#### (1) 性能

具有抗裂性、抗腐蚀性、自愈性能;膨胀稳定,强度高。

#### (2) 适用范围

主要用作防水层、浇灌机械底座、建筑物接缝和修补工程,还可用来加固结构、制作预应力混凝土构件(如水管和输气管道等)。

### 1.2.3.11 白色水泥和彩色水泥

白色硅酸盐水泥(White Portland Cement),是指由适当成分的生料烧至部分熔融,所得以硅酸钙为主要成分,氧化铁含量少的硅酸盐水泥熟料,加入适量的优质纤维石膏(同时也允许加入不超过水泥质量5%的石灰石或窑灰作为外加剂),经磨细而制成的水硬性胶凝材料。白色硅酸盐水泥简称白色水泥。硅酸盐水泥熟料的颜色,主要是由氧化铁引起的, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的含量不同,熟料的颜色也不同,含量越少,熟料的颜色越白。

彩色硅酸盐水泥(Coloured Portland Cement),是指在硅酸盐水泥生料中掺入着色剂去煅烧水泥熟料,或在白色水泥熟料中均匀掺入着色剂入磨粉磨,或将着色剂直接掺入水泥中并均匀混合,所得到的具有某种颜色的硅酸盐水泥。彩色硅酸盐水泥简称彩色水泥。

#### (1) 性能

凝结硬化较快、早期强度高、后期强度稳步增长,强度等级比硅酸盐水泥低;抗碳化能力(二氧化碳与水泥石中的氢氧化钙作用,生成碳酸钙和水,它是二氧化碳由表及里向混凝土内部逐渐扩散的过程)强、表面不起砂,白色水泥特有白度指标。

#### (2) 适用范围

用于建筑物的装饰,例如,楼板、阶梯、外墙等饰面,也可用于雕塑工艺制品。

除此之外,还有生态水泥(Eco-cement,利用各种工业废渣、废料、生活垃圾作为原料和燃料,经过一定的生产工艺所制成的无公害、与环境和谐型的水泥的总称)、土聚水泥(Geopolymeric Cement,来源于法国,采用高岭土作原料进行低温煅烧,生成处于介稳状态的无机矿物,加碱性激发剂及促硬剂



而形成水硬性胶凝材料)、防辐射水泥熟料(Radiation Protection Cement Clinker,对 X 射线、 $\gamma$  射线等起较好的屏蔽作用的水泥,有钡水泥、锶水泥、含硼水泥)等。

无论是哪一类水泥,都能在加入适量的水后拌和成塑性浆体,它是既能将砂、石等适量材料胶合在一起,又能在空气和水中硬化的粉状水硬性胶凝材料,我们把这一类水硬性胶凝材料统称为水泥。

### 1.3 水泥产业具有的特点

水泥产业属于原材料工业,具有以下特点:

#### (1) 市场的区域性

水泥产品属于体重、量大、低质类产品,产品销售受到销售半径(与运输方式有关)的限制,不宜远距离输送。

#### (2) 产品的同质性

水泥产品是国家标准化产品,在品种、等级相同的情况下,用户选择产品时,价格取向明显。控制不好,可能会出现“杀价竞争”的局面。

#### (3) 水泥消费需求与经济发展的密切相关性

水泥产品的需求量取决于建设发展速度和产销饱和度;同时,各区域经济发展程度和水泥消费水平相差也很大,这影响着水泥产业的布局。

#### (4) 对资源的依赖性

水泥产业对资源的依赖性非常大,一般生产 1 t 水泥熟料需要 1.5~1.6 t 原料、0.15~0.20 t 原煤;生产 1 t 水泥需要消耗 80~110 kW·h 电能。尤其建设大型项目时,必须要有可靠的资源保证。

#### (5) 水泥保存期有限

水泥的活性高,易受潮。水泥在吸潮和碳化后将导致其性能下降,保存期较短。在不受潮或水淋条件下,硅酸盐水泥的存放期一般为 3 个月以内,铝酸盐水泥和快硬水泥的储存期更短。

#### (6) 具有处理废渣的能力

水泥的主要成分是氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、三氧化二铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和三氧化二铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),而很多工业(钢铁、化工、火力发电、炼铝、制糖等)所排出的大量的废渣以及煤炭开采中筛选出的煤矸石中,也具有水泥中含有的相同的化学成分及活性或部分活性,因此可以利用这些工业废渣替代生产水泥的部分自然资源原料,也可以将其作为混合材料与水泥熟料掺合在一起磨制水泥,以减少污染,提高经济效益。

### 1.4 我国水泥工业发展概况

我国的水泥工业起步较晚,其发展经历大致如下:

1886 年,英国商人在澳门青州岛建立的“英泥青州厂”是我国第一个由外国人兴办的水泥厂,但于 1936 年关闭。

1889 年国人创办“唐山细绵土厂”,这是我国第一个由国人开办的采用立窑生产的水泥厂,1906 年改组为“启新洋灰股份有限公司”(即现今“冀东水泥集团唐山启新水泥有限公司”),并引进丹麦史密斯(F. L. Smidth)公司的干法中空窑(回转窑),形成具有现代意义的中国水泥工业。

新中国成立前,全国只有 38 家水泥厂(包括中国台湾地区),其设备均由国外进口。由于大部分厂受到战乱破坏,水泥产量只有 66 万 t,是生产能力的 20.97%,而且只能生产普通水泥、矿渣水泥和少量白水泥。