

第二版

The Second Edition

水泥生产技术

基础

SHUINI SHENGCHAN
JISHU JICHU

刘辉敏 主编



化学工业出版社

第二版

The Second Edition

水泥生产技术

基础

SHUINI SHENGCHAN
JISHU JICHU

刘辉敏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以新型干法水泥生产工艺为主线,主要介绍了通用硅酸盐水泥的生产工艺、熟料组成、原料及配料计算、原燃料的加工、熟料的煅烧过程及设备、水泥的制成、水泥的水化和硬化、水泥的性能、水泥质量管理、特种水泥以及水泥物理性能的检测等内容。与第一版相比,本书第二版按照国家最新发布的标准、规范进行了全面修订,同时补充、完善了预分解窑用耐火材料、水泥窑协同处置可燃废弃物和水泥窑氮氧化物节能、减排更多内容。

全书力求理论联系生产实际,立足我国水泥工业,反映国内外水泥工业的最新发展动向和最新技术成果。本书可供广大水泥企业管理人员、技术人员和操作人员阅读和参考,还可作为企业职工培训、继续教育的教学参考书,也可以作为无机非金属材料相关专业高校师生的教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

水泥生产技术基础/刘辉敏主编.—2版.—北京:化学工业出版社,2015.11
ISBN 978-7-122-25197-8

I. ①水… II. ①刘… III. ①水泥-生产工艺
IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第222568号

责任编辑:朱彤
责任校对:王静

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数380千字 2016年1月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定价:55.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书自出版以来，承蒙广大读者朋友的厚爱，编者对此表示衷心感谢！在此期间，我国水泥生产技术取得了新的进步与发展。为了适应水泥工业的技术进步和工程实践的最新要求，作者在第一版的基础上对相关内容重新进行了修订、补充和完善，重点有以下两个方面。

(1) 根据最新发布的标准、规范和产业政策，对相关内容进行了必要修改和补充，并对一些数据进行了修改。

(2) 补充和完善了预分解窑用耐火材料、水泥窑协同处置可燃废弃物和水泥窑氮氧化物节能、减排等方面的更多内容。

本书第二版依然力求理论联系生产实际，立足于我国水泥工业技术现状及发展趋势，力求突出应用性，尽可能地体现我国水泥工业现阶段的新工艺、新技术、新经验，反映水泥工艺技术的先进性、科学性、实用性，以期对水泥生产技术有一定的指导作用，希望读者对现代水泥的生产工艺有更新、更全面的了解。

本书由刘辉敏主编。编写分工如下：刘辉敏，第1章～第9章；茹晓红，第10章、第11章；张新爱，第12章～第15章。在编写过程中，参考了一些相关文献资料并结合作者教学和实践总结撰写而成，在此对编书过程中提供帮助和支持的有关人士谨致谢意！

由于编者时间和水平有限，书中疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2015年6月

第一版前言

近年来,我国水泥生产技术飞速发展,大批新的生产线投入使用,全国水泥产量占世界水泥产量的一半以上。为了提高我国水泥的质量,缩小与发达国家的差距,我国先后对多种水泥标准进行了修订,对水泥主要组分的标准也进行了修订。随着水泥工业的发展,我国对用于水泥工业的原料和燃料提出与过去不同的要求,相应也修改了水泥企业质量管理规程,还对水泥物理性能检测方法做了较多改动。水泥工业近几年的变化还在于工艺装备水平的提高,以及原料矿山计算机控制网络开采、原料预均化、生料均化、挤压粉磨、新型耐火材料和 IT 技术在水泥生产中的应用等。以上内容有些虽然在一些书籍中进行一定介绍,但作为水泥技术人才培养的参考书籍却没有及时跟上这些变化。有鉴于此,本书的编写具有重要和及时的意义。

本书以新型干法水泥生产工艺为主线,主要介绍了通用硅酸盐水泥的生产工艺、熟料组成、原料及配料计算、原燃料的加工、熟料的煅烧过程及设备、水泥的制成、水泥的水化和硬化、水泥的性能、水泥质量管理、特种水泥以及水泥物理性能的检测等。

在编写过程中,编者力求理论联系生产实际,强调实用;立足于我国水泥工业的特点,反映国内外水泥工业的最新发展动向,体现水泥工业的技术进步;及时引用最新颁布的国家标准;在删繁就简、有利于自学方面也做了很多努力。本书可供广大水泥企业管理人员、技术人员和操作人员阅读和参考,也可作为企业职工培训、继续教育的教学参考书,还可作为无机非金属材料相关专业师生的教学参考书或教材。

本书由刘辉敏主编。编写分工如下:刘辉敏,第 1 章~第 11 章;张新爱,第 12 章~第 15 章。在编写过程中,得到了作者所在单位领导的大力支持和帮助,在此表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	4.1.3 铁质原料	24
1.1 胶凝材料的定义和分类	1	4.1.4 原料的质量要求	24
1.2 水泥的定义和分类	1	4.2 燃料	24
1.3 胶凝材料和水泥发展简史	1	4.3 生料易烧性	24
1.4 水泥在国民经济中的作用	2	4.4 熟料组成设计	25
1.5 水泥工业的发展	2	4.5 配料计算	26
思考题	4	4.5.1 配料依据	26
第 2 章 通用硅酸盐水泥的生产	5	4.5.2 配料计算方法	27
2.1 通用硅酸盐水泥的标准	5	思考题	31
2.1.1 定义	5	第 5 章 原燃料的采运与加工	32
2.1.2 组分与材料	5	5.1 原料的采运	32
2.1.3 强度等级	6	5.1.1 原料的开采	32
2.1.4 技术要求	6	5.1.2 矿石的装运	32
2.1.5 试验方法	8	5.2 原燃料的破碎	33
2.1.6 判定规则	8	5.2.1 粉碎的基本概念	33
2.2 通用硅酸盐水泥生产工艺	8	5.2.2 锤式破碎机	34
2.2.1 生产过程	8	5.2.3 反击式破碎机	35
2.2.2 生产方法	8	5.2.4 单段锤式破碎机	36
2.2.3 预分解窑生产工艺概述	9	5.2.5 双辊式破碎机	38
思考题	10	5.2.6 破碎工艺流程	39
第 3 章 硅酸盐水泥熟料的组成	11	5.3 原燃料预均化	39
3.1 熟料的矿物组成	11	5.3.1 预均化基本原理及意义	39
3.1.1 硅酸三钙	12	5.3.2 均化效果的评价方法	40
3.1.2 硅酸二钙	13	5.3.3 预均化堆场	40
3.1.3 中间相	14	5.4 原燃料的粉磨	43
3.1.4 游离氧化钙和方镁石	15	5.4.1 物料粉磨性能	43
3.2 熟料的率值	16	5.4.2 原燃料粉磨细度	44
3.2.1 水硬率	16	5.4.3 球磨机	45
3.2.2 硅率和铝率	17	5.4.4 原燃料球磨系统	51
3.2.3 石灰饱和系数	17	5.4.5 原燃料立磨系统	54
3.3 熟料矿物组成的计算	19	5.4.6 生料辊压机终粉磨	59
3.3.1 石灰饱和系数法	19	5.4.7 不同生料粉磨系统比较	61
3.3.2 鲍格法	20	5.5 生料均化	62
3.3.3 熟料组成与率值的换算	20	5.5.1 概述	62
思考题	21	5.5.2 多料流式均化库	62
第 4 章 硅酸盐水泥原燃料及配料	22	思考题	64
4.1 原料	22	第 6 章 硅酸盐水泥熟料煅烧原理	65
4.1.1 钙质原料	22	6.1 生料在煅烧过程中的物理化学变化	65
4.1.2 硅铝质原料	23	6.1.1 干燥与脱水	65

6.1.2 碳酸盐分解	65	7.6.3 多风道煤粉燃烧器	116
6.1.3 固相反应	68	7.7 烧成系统废气的降温处理	120
6.1.4 液相和熟料的烧结	69	7.7.1 增湿塔	120
6.1.5 熟料的冷却	71	7.7.2 管道增湿技术	121
6.2 熟料形成的热化学	72	7.7.3 空气冷却器	121
6.3 矿化剂和微量元素对熟料煅烧及质量的影响	73	7.8 熟料的储存	121
6.3.1 矿化剂对熟料煅烧及质量的影响	73	7.9 预分解窑用耐火材料	122
6.3.2 微量元素对熟料煅烧及质量的影响	75	7.9.1 预分解窑耐火衬料的损毁	122
思考题	76	7.9.2 预分解窑对耐火材料的要求	122
第7章 预分解窑煅烧技术	77	7.9.3 预分解窑系统耐火材料的配置	122
7.1 预分解窑煅烧过程	77	7.10 纯低温余热发电技术	123
7.1.1 预分解窑生产流程及工作原理	77	7.10.1 热力系统方案	123
7.1.2 预分解窑的热工布局	78	7.10.2 低温余热发电系统工艺简介	124
7.2 旋风预热器	78	7.11 水泥窑协同处置可燃废弃物	125
7.2.1 旋风预热器的构造	78	7.11.1 水泥窑协同处置生活垃圾	125
7.2.2 旋风预热器的工作原理	79	7.11.2 水泥窑协同处置城市污泥	125
7.2.3 旋风预热器工作参数	79	7.12 水泥窑氮氧化物的减排	126
7.2.4 影响旋风预热器热效率的因素	80	思考题	127
7.2.5 各级旋风预热器性能的配合	81	第8章 硅酸盐水泥的制成	128
7.2.6 旋风预热器的结构参数	82	8.1 水泥粉磨工艺	128
7.2.7 国产新型旋风筒	82	8.1.1 水泥预粉磨系统	128
7.3 分解炉	84	8.1.2 水泥终粉磨系统	130
7.3.1 分解炉的结构和原理	84	8.2 水泥的包装与储运	132
7.3.2 分解炉的工作参数	85	8.2.1 水泥储存与均化	133
7.3.3 分解炉的分类	85	8.2.2 水泥包装与散装	133
7.3.4 分解炉的工艺性能	86	8.2.3 水泥质检与发运	134
7.3.5 分解炉的热工特性	87	思考题	134
7.3.6 分解炉内的气体运动	89	第9章 硅酸盐水泥的水化与硬化	135
7.3.7 生料和煤粉的悬浮及含尘浓度	90	9.1 熟料矿物的水化	135
7.3.8 国产新型分解炉	91	9.1.1 硅酸三钙	135
7.4 回转窑	94	9.1.2 硅酸二钙	136
7.4.1 回转窑的结构	94	9.1.3 铝酸三钙	137
7.4.2 回转窑工作原理	99	9.1.4 铁相固溶体	138
7.4.3 预分解窑系统回转窑的特点	106	9.2 硅酸盐水泥的水化	139
7.5 冷却机	108	9.2.1 水化过程	139
7.5.1 冷却机的作用	108	9.2.2 水化速率	140
7.5.2 冷却机性能评价指标	108	9.3 水泥的凝结硬化过程	142
7.5.3 冷却机的种类及其发展	109	9.4 硬化水泥浆体的组成和结构	143
7.5.4 推动算式冷却机	109	9.4.1 水化产物的结构及形态	143
7.6 煤粉燃烧器	115	9.4.2 孔及其结构特征	146
7.6.1 煤粉燃烧器的要求	115	9.4.3 水及其存在形式	147
7.6.2 煤粉燃烧器工作原理	115	思考题	147
		第10章 硅酸盐水泥的性能	149
		10.1 凝结时间	149
		10.1.1 凝结速率	149

10.1.2 石膏的作用及掺量的确定	150	硬化	179
10.1.3 假凝现象	152	12.3.1 矿渣硅酸盐水泥的水化与 硬化	179
10.1.4 调凝外加剂	152	12.3.2 火山灰质硅酸盐水泥的水化与 硬化	180
10.2 硅酸盐水泥的强度	153	12.3.3 粉煤灰硅酸盐水泥的水化与 硬化	180
10.2.1 浆体组成与强度的关系	153	12.4 其他通用硅酸盐水泥的性能和 应用	180
10.2.2 熟料矿物组成的作用	154	12.4.1 普通硅酸盐水泥	181
10.2.3 水灰比和水化程度对强度的 影响	155	12.4.2 矿渣硅酸盐水泥	181
10.2.4 温度和压力效应	155	12.4.3 火山灰质硅酸盐水泥	182
10.2.5 水泥细度的影响	156	12.4.4 粉煤灰硅酸盐水泥	182
10.3 体积变化	156	12.4.5 复合硅酸盐水泥	183
10.3.1 体积安定性	156	思考题	183
10.3.2 化学减缩	157	第 13 章 水泥生产质量管理	184
10.3.3 湿胀干缩	157	13.1 原燃材料的质量管理	184
10.3.4 碳化收缩	159	13.2 半成品的质量管理	184
10.4 水化热	159	13.3 出厂水泥和水泥熟料的质量管理	190
10.5 粉磨细度	160	13.4 生产控制图表	191
10.6 其他性能	161	思考题	194
10.6.1 密度	161	第 14 章 特种水泥	195
10.6.2 需水性	161	14.1 特种水泥的分类	195
10.6.3 泌水性和保水性	161	14.2 铝酸盐水泥	196
思考题	162	14.2.1 化学成分和矿物组成	196
第 11 章 硅酸盐水泥的耐久性	163	14.2.2 铝酸盐水泥的原料	197
11.1 抗渗性	163	14.2.3 配料计算	197
11.2 抗冻性	165	14.2.4 铝酸盐水泥的生产	199
11.3 环境介质的侵蚀性	166	14.2.5 铝酸盐水泥的水化和硬化	199
11.3.1 淡水侵蚀	166	14.2.6 铝酸盐水泥的性能与用途	200
11.3.2 酸和酸性水侵蚀	166	14.3 硫铝酸盐水泥	201
11.3.3 盐类侵蚀	167	14.3.1 硫铝酸盐水泥熟料的矿物 组成	201
11.3.4 强碱侵蚀	168	14.3.2 硫铝酸盐水泥的组成材料	202
11.4 碱-集料反应	168	14.3.3 硫铝酸盐水泥的技术要求	203
11.5 耐久性的改善途径	169	14.3.4 硫铝酸盐水泥的生产	204
11.5.1 提高密实性和改善孔结构	170	14.3.5 硫铝酸盐水泥的水化	204
11.5.2 改变熟料矿物组成	170	14.3.6 硫铝酸盐水泥的用途	204
11.5.3 掺加混合材料	171	14.4 白色水泥和彩色水泥	204
11.5.4 表面处理或涂覆	171	14.4.1 白色硅酸盐水泥	205
思考题	172	14.4.2 彩色水泥	206
第 12 章 其他通用硅酸盐水泥	173	14.5 中热水泥和低热水泥	206
12.1 混合材料	173	14.6 抗硫酸盐硅酸盐水泥	208
12.1.1 混合材料的种类与作用	173	14.7 油井水泥	209
12.1.2 粒化高炉矿渣	173	14.8 道路硅酸盐水泥	212
12.1.3 火山灰质混合材料	176		
12.1.4 粉煤灰	178		
12.2 其他通用硅酸盐水泥的生产	179		
12.3 其他通用硅酸盐水泥的水化与			

思考题	213	安定性检验	220
第 15 章 水泥物理性能检验	214	15.4.1 方法原理	220
15.1 水泥细度检验	214	15.4.2 试验仪器	220
15.1.1 方法原理	214	15.4.3 试验条件	222
15.1.2 仪器设备	214	15.4.4 测定方法	222
15.1.3 操作程序	215	15.5 水泥胶砂强度检验	225
15.1.4 结果计算及处理	215	15.5.1 方法概要	225
15.2 水泥密度的测定	216	15.5.2 实验室和设备	225
15.2.1 方法原理	216	15.5.3 测定步骤	227
15.2.2 试验仪器及条件	216	15.5.4 试验结果的确定	229
15.2.3 测定步骤	216	15.6 水泥胶砂流动度测定	229
15.2.4 结果计算	216	15.6.1 原理	229
15.3 水泥比表面积测定	217	15.6.2 试验仪器	229
15.3.1 方法原理	217	15.6.3 试验条件及材料	230
15.3.2 试验仪器及条件	217	15.6.4 试验方法	230
15.3.3 操作步骤	218	15.6.5 结果与计算	231
15.3.4 结果计算与处理	220	参考文献	232
15.4 水泥标准稠度用水量、凝结时间、			

第 1 章 绪 论

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。水泥作为重要的胶凝材料，其地位尚无一种其他材料可以替代。在未来相当长的时期内，水泥仍将是主要的建筑材料。

1.1 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，可分为有机和无机两大类。沥青和各种树脂属有机胶凝材料。无机胶凝材料按硬化条件，又可分为水硬性和非水硬性两类。水硬性胶凝材料拌水后既能在空气中又能在水中硬化，通常称为水泥。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，如石灰和石膏等。

1.2 水泥的定义和分类

凡细磨成粉末状，加入适量水后可成为塑性浆体，既能在空气中硬化，又能在水中继续硬化，并能将砂石等材料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、专用水泥和特性水泥三大类。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、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。专用水泥则指有专门用途的水泥，如油井水泥、砌筑水泥、道路水泥等。特性水泥是指某种性能比较突出的水泥，如抗硫酸盐硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥等。也可按其组成为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥等。目前，水泥品种已达 100 余种。

1.3 胶凝材料 and 水泥发展简史

远古古代，人们就开始使用黏土（有时掺入稻草、壳皮等植物纤维）来抹砌简易建筑物，但未经煅烧的黏土不耐水且强度较低。

在公元前 3000~2000 年，人们开始用火煅烧石灰、石膏，并将其制成砂浆用作胶凝材料。古代埃及的金字塔和我国的万里长城都是用石灰、石膏作为胶凝材料砌筑而成的。

随着生产的发展，逐渐要求强度较高并能防止被水侵蚀和冲毁的胶凝材料。到公元初，古希腊人和古罗马人就开始用掺有火山灰的石灰砂浆来兴建建筑物。这类具有水硬性的胶凝材料在古罗马的“庞贝”城以及罗马圣庙、法国南部里姆斯附近的加德桥等著名古建筑上都有应用。在我国古代建筑中所大量应用的“三合土”，实际上也是一种石灰-火山灰材料。随后又进一步发现，将碎砖、废陶等磨细后，与石灰混合可制成具有水硬性的胶凝材料，从而使火山灰质材料由天然的发展到人工制造。

到 18 世纪后半期, 1756 年出现了水硬性石灰, 1796 年出现了罗马水泥, 都是将含有适量黏土的黏土质石灰石经过燃烧而得; 并在此基础上, 发展到用天然水泥岩 (黏土含量 20%~25% 的石灰石) 煅烧、磨细而制得的天然水泥。然后, 逐渐发现可以用石灰石和定量的黏土共同磨细混匀, 经过煅烧制成由人工配料的水硬性石灰, 这实际上可看成是近代硅酸盐水泥制造的雏形。

19 世纪初 (1810~1825 年) 已出现用人工配料, 将石灰石与黏土的细粉按一定比例配合, 在类似石灰窑的炉内, 经高温烧结成块 (熟料), 再进行粉磨制成的水硬性胶凝材料。因为这种胶凝材料同英国伦敦附近波特兰岛出产的石灰石相近, 故称为波特兰水泥 (Portland Cement)。1824 年, 英国人阿斯普丁 (J. Aspdin) 首先取得了该项产品的专利。此后, 欧洲各地不断对水泥进行改进, 1856 年德国建起了水泥厂, 并普及到了美国。1870 年以后, 水泥作为一种新型工业在世界许多国家和地区得以发展和应用, 对工程建设起了很大作用。

由于工业的不断发展, 以及军事工程和特殊工程的需要, 又先后制成了各种不同用途的水泥, 如快硬水泥、铝酸盐水泥、膨胀水泥、抗硫酸盐水泥、低热水泥、油井水泥、硫铝酸盐水泥等。

由上可见, 胶凝材料的发展经历是: 天然胶凝材料→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的需要。

1.4 水泥在国民经济中的作用

水泥是基本建设中最重要建筑材料之一。随着现代化工业的发展, 它在国民经济中的地位日益提高, 应用也日益广泛。水泥与砂、石等集料制成的混凝土是一种低能耗、低成本的建筑材料; 与普通钢铁相比, 水泥制品不会生锈, 也没有木材易于腐朽的缺点, 更不会有塑料年久老化问题; 新拌水泥混凝土有很好的可塑性, 可制成各种形状的混凝土构件; 水泥混凝土材料强度高、耐久性好、适应性强。目前水泥已广泛应用于工业建筑、民用建筑、水工建筑、道路建筑、农田水利建设和军事工程等方面。由水泥制成的各种水泥制品, 如轨枕、水泥船和纤维水泥制品等广泛应用于工业、交通等部门, 在代钢、代木方面, 也越来越显示出技术和经济上的优越性。

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, 才有高层、超高层、大跨度以及各种特殊功能的建筑物。新的产业革命, 又为水泥行业提出了扩大水泥品种和扩大应用范围的新课题。开发占地球表面 71% 的海洋是人类进步的标志, 而海洋工程的建造, 如海洋平台、海洋工厂, 其主要建筑材料就是水泥。水泥工业的发展对保证国家建设计划的顺利进行起着十分重要的作用。

1.5 水泥工业的发展

水泥生产自 1824 年诞生以来, 其生产技术历经多次变革。作为水泥熟料的煅烧设备, 开始是间歇作业的土立窑, 1885 年出现了回转窑。以后在回转窑规格不断扩大的同时, 窑的型式和结构也都有新的发展。1930 年德国伯力鸠斯公司研制了立波尔窑, 用于半干法生

产;1950年德国洪堡公司研制成功悬浮预热窑;1971年日本石川岛公司和秩父水泥公司研制成功预分解窑。自预分解技术出现后,受到世界各国的重视,并且很快出现了许多各具特点的预分解技术。与此同时,生料制备、水泥粉磨等各种水泥生产技术装备,也与其配套,同步发展。现代电子技术及科学管理方法在水泥工业生产中也得到了广泛应用。以悬浮预热和窑外分解技术为核心的新型干法水泥生产,采用了现代最新的水泥生产工艺和装备,把水泥工业生产推向一个新的阶段。

我国早在1889年就在河北唐山建立了启新洋灰公司正式生产水泥,以后又相继建立了大连、上海、中国、广州等水泥厂。20世纪50年代中期,我国开始试制湿法回转窑和半干法立波尔窑成套设备,迈出我国水泥生产技术发展的重要一步。从20世纪50~60年代,我国依靠自己的科研设计力量进行了预热器窑的实验,并在太原水泥厂建成四级旋风预热器回转窑;1969年又在杭州水泥厂建成第一台带立筒预热器的回转窑。1976年在石岭建成第一台烧油预分解窑,其运行的成功对我国水泥生产技术的发展有着深远意义。从1978年起,我国又在冀东、淮海、宁国、柳州等水泥厂,通过引进国外的预分解技术和成套、半成套设备,先后建成若干套日产2000t和4000t的熟料生产线。在引进和消化吸收国外16项新型干法关键装备设计与制造技术的基础上,我国水泥工业技术水平和管理水平得到迅速提高,并自主建设了一批日产700~2000t新型干法水泥生产线。然而,由于受投资体制和资金的制约,新型干法水泥未得到迅速发展。

在生产、设计、科研和装备等单位的通力合作下,1996~1997年,海螺宁国水泥厂和山水山东水泥厂相继突破日产2000t熟料生产线低投资建设难关;2003年,海螺铜陵水泥厂和池州水泥厂先后突破日产5000t熟料生产线低投资建设难关,这为新型干法水泥在全国普遍推广铺平了道路。2000年前后,基本实现了日产2500~5000t熟料新型干法生产线成套装备国产化。

从2003年开始,在国民经济高速发展和市场需求拉动下,全国各地掀起前所未有的新型干法水泥生产线建设高潮,全国水泥总产量、新型干法水泥产量及其占总产量的比例都迅猛增长。2002年我国水泥产量为7.25亿吨,新型干法水泥约占总产量的15%;2014年我国水泥产量猛增到24.76亿吨,新型干法水泥占总产量的90%以上。新型干法生产大发展确保了大幅增长的市场需求,加快了结构调整,基本实现了生产方式向先进水平的转变。目前,国内自行设计的生产线最大规模已达日产熟料12000t,走在了世界水泥工业的前列。经过几代人努力,一个强大的中国现代水泥工业在21世纪初已经诞生。

水泥工业属资源型产业,有害气体排放量较大。节能减排、保护环境是水泥工业生存和发展的必然选择。因此,在水泥工业发展新阶段,应以节约资源和环境友好为目标,开发新技术、采取新措施,深化调整结构,实现水泥生产方式向更高层次的转变。目前,我国水泥工业的发展主要表现在如下几个方面:①开发高效低氮预热预分解及先进烧成技术;②开发高效节能料床粉磨技术;③提升水泥窑废弃物安全无害化处置功能和替代燃料技术;④提升原料、燃料均化配置技术;⑤开发窑体氮氧化物消化和提升窑尾脱硝的技术;⑥数字化智能型控制与管理技术;⑦新型低碳高标号、多品种水泥熟料生产技术;⑧高性能、高效率滤膜袋收尘技术;⑨推广水泥窑纯低温余热发电技术;⑩延伸水泥企业产业链;⑪实现企业兼并重组,引领众多企业走上可持续发展道路。在此基础上,逐步实现水泥的“清洁生产”,并且大幅度节约能源,提高生产效率、产品质量和劳动生产率,使水泥生产向着集约化、高质量的现代化工业方向发展。

思考题

1. 简述胶凝材料的定义与分类。
2. 简述水泥的定义与分类。
3. 胶凝材料的发展经历是什么？

第 2 章 通用硅酸盐水泥的生产

从广义上讲，硅酸盐水泥是以硅酸钙为主要成分的熟料所制得的一系列水泥的总称，包括通用硅酸盐水泥和特种硅酸盐水泥。在国外，硅酸盐水泥常统称为波特兰水泥。通用硅酸盐水泥用于一般的土木工程，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、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥六个品种。因而从狭义上讲，硅酸盐水泥只是通用硅酸盐水泥中的一个品种。本章主要介绍通用硅酸盐水泥的技术标准和生产方法。

2.1 通用硅酸盐水泥的标准

2.1.1 定义

根据国家标准 GB 175—2007，通用硅酸盐水泥是指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。

2.1.2 组分与材料

2.1.2.1 组分

通用硅酸盐水泥的组分要求应符合表 2-1 的规定。

表 2-1 通用硅酸盐水泥的组分要求 单位：%

品种	代号	组分				
		熟料+石膏	粒化高炉矿渣	火山灰质混合材料	粉煤灰	石灰石
硅酸盐水泥	P·I	100	—	—	—	—
	P·II	≥95	≤5	—	—	—
		≥95	—	—	—	≤5
普通硅酸盐水泥	P·O	≥80 且 <95	>20 且 ≤20 ^①			—
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	≥50 且 <95	>20 且 ≤50 ^②	—	—	—
	P·S·B	≥30 且 <50	>50 且 ≤70 ^②	—	—	—
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	≥60 且 <80	—	>20 且 ≤40 ^③	—	—
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	≥60 且 <80	—	—	>20 且 ≤40 ^④	—
复合硅酸盐水泥	P·C	≥50 且 <80	>20 且 ≤50 ^⑤			—

① 本组分材料为符合本标准的活性混合材料，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合本标准的非活性混合材料或不超过水泥质量 5% 且符合本标准的窑灰代替。

② 本组分材料为符合 GB/T 203 或 GB/T 18046 的活性混合材料，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合本标准的活性混合材料或符合本标准的非活性混合材料或符合本标准的窑灰中的任一种材料代替。

③ 本组分材料为符合 GB/T 2847 的活性混合材料。

④ 本组分材料为符合 GB/T 1596 的活性混合材料。

⑤ 本组分材料由两种以上符合本标准的活性混合材料或/和符合本标准的非活性混合材料组成，其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合本标准的窑灰代替。掺矿渣时混合材料掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。

2.1.2.2 材料

(1) 硅酸盐水泥熟料 是指主要含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的原料，按适当比例磨成细粉，烧至部分熔融所得以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。其中硅酸钙矿物含量不小于 66%，氧化钙和氧化硅质量比不小于 2.0。

(2) 石膏

① 天然石膏 应符合 GB/T 5483 中规定的 G 类或 M 类二级（含）以上的石膏或混合石膏。

② 工业副产石膏 以硫酸钙为主要成分的工业副产物。采用前应经过试验证明对水泥性能无害。

(3) 活性混合材料 符合 GB/T 203、GB/T 18046、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料。

(4) 非活性混合材料 活性指标分别低于 GB/T 203、GB/T 18046、GB/T 1596、GB/T 2847 标准要求的粒化高炉矿渣、粒化高炉矿渣粉、粉煤灰、火山灰质混合材料；石灰石和砂岩，其中石灰石中的三氧化二铝含量应不大于 2.5%。

(5) 窑灰 符合 JC/T 742 的规定。

(6) 助磨剂 水泥粉磨时允许加入助磨剂，其加入量应不大于水泥质量的 0.5%，助磨剂应符合 JC/T 667 的规定。

2.1.3 强度等级

① 硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 六个等级。

② 普通硅酸盐水泥的强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R 四个等级。

③ 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥的强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 六个等级。

④ 复合硅酸盐水泥的强度等级分为 32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 五个等级。

2.1.4 技术要求

2.1.4.1 化学指标

通用硅酸盐水泥化学指标要求见表 2-2。

表 2-2 通用硅酸盐水泥化学指标要求

单位：%

品种	代号	不溶物 (质量分数)	烧失量 (质量分数)	三氧化硫 (质量分数)	氧化镁 (质量分数)	氯离子 (质量分数)
硅酸盐水泥	P·I	≤0.75	≤3.0	≤3.5	≤5.0 ^①	≤0.06 ^③
	P·II	≤1.50	≤3.5			
普通硅酸盐水泥	P·O	—	≤5.0 ^③			
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	—	—	≤4.0	≤6.0 ^②	
	P·S·B	—	—		—	
火山灰质硅酸盐水泥	P·P	—	—	≤3.5	≤6.0 ^②	
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	—	—			
复合硅酸盐水泥	P·C	—	—			

① 如果水泥压蒸试验合格，则水泥中氧化镁的含量（质量分数）允许放宽至 6.0%。
② 如果水泥中氧化镁的含量（质量分数）大于 6.0%时，需进行水泥压蒸安定性试验并合格。
③ 当有更低要求时，该指标由买卖双方协商确定。

2.1.4.2 碱含量（选择性指标）

水泥中碱含量按 $w(\text{Na}_2\text{O}) + 0.658w(\text{K}_2\text{O})$ 计算值表示。若使用活性骨料，用户要求提供低碱水泥时，水泥中的碱含量应不大于 0.60%或由买卖双方协商确定。

2.1.4.3 物理指标

(1) 凝结时间

① 硅酸盐水泥初凝不小于 45min，终凝不大于 390min。

② 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初凝不小于 45min，终凝不大于 600min。

(2) 安定性 沸煮法合格。

(3) 强度 不同品种、不同强度等级的通用硅酸盐水泥，其各龄期的强度要求应符合表 2-3 的规定。

表 2-3 通用硅酸盐水泥各龄期的强度要求 单位：MPa

品种	强度等级	抗压强度		抗折强度	
		3d	28d	3d	28d
硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
	62.5	≥28.0	≥62.5	≥5.0	≥8.0
	62.5R	≥32.0		≥5.5	
普通硅酸盐水泥	42.5	≥17.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥22.0		≥4.0	
	52.5	≥23.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥27.0		≥5.0	
矿渣硅酸盐水泥 火山灰质硅酸盐水泥 粉煤灰硅酸盐水泥	32.5	≥10.0	≥32.5	≥2.5	≥5.5
	32.5R	≥15.0		≥3.5	
	42.5	≥15.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥19.0		≥4.0	
	52.5	≥21.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥23.0		≥4.5	
复合硅酸盐水泥	32.5R	≥15.0	≥32.5	≥3.5	≥5.5
	42.5	≥15.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5
	42.5R	≥19.0		≥4.0	
	52.5	≥21.0	≥52.5	≥4.0	≥7.0
	52.5R	≥23.0		≥4.5	

(4) 细度（选择性指标） 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥以比表面积表示，不小于 300m²/kg；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以筛余表示，80μm 方孔筛筛余不大于 10% 或 45μm 方孔筛筛余不大于 30%。

2.1.5 试验方法

(1) 组分 由生产者选择最适宜的方法或按 GB/T 12960 标准进行。在正常生产情况下,生产者应至少每月对水泥组分进行校核,年平均值应符合通用水泥标准的规定,单一结果最大偏差为 $\pm 2\%$ 。

为了保证组分测定结果的准确性,生产者应采用适当的生产程序和适宜的验证方法对所选试验方法的可靠性进行验证,并将验证的方法形成企业标准。

(2) 不溶物、烧失量、氧化镁、三氧化硫和碱含量 按 GB/T 176《水泥化学分析方法》进行。

(3) 氯离子 按 GB/T 176《水泥原料中氯的化学分析方法》进行。

(4) 凝结时间和安定性 按 GB/T 1346《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验》方法进行。

(5) 强度 按 GB/T 17671《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》进行。但掺火山灰混合材料的普通硅酸盐水泥、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在进行胶砂强度检验时,其用水量按 0.50 水灰比和胶砂流动度不小于 180mm 来确定。当流动度小于 180mm 时,必须以 0.01 的整倍数递增的方法将水灰比调整至胶砂流动度不小于 180mm。

胶砂流动度试验按 GB/T 2419《水泥胶砂流动度测定》方法进行,其中胶砂制备按 GB/T 17671 进行。

(6) 比表面积 按 GB/T 8074《水泥比表面积测定方法(勃氏法)》进行。

(7) 细度 按 GB/T 1345《水泥细度检验方法(筛析法)》进行。

2.1.6 判定规则

化学要求、物理要求中任何一项不符合标准技术要求时,判为不合格品;水泥包装标志中水泥名称、强度等级、生产者名称和出厂编号不全时,判为包装不合格。只有各项技术指标检验合格或者水泥强度等级按规定龄期确认合格后方可出厂,每批水泥出厂时应附有质量保证书。

2.2 通用硅酸盐水泥生产工艺

2.2.1 生产过程

通用硅酸盐水泥的生产过程可分为三个阶段:钙质原料、硅铝质原料与铁质原料经破碎后,按一定比例配合、磨细,并配合为成分合适、质量均匀的生料,称为生料的制备;生料在水泥窑内煅烧至部分熔融,得到以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料,称为熟料燃烧;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,称为水泥制成。这三个阶段可概括为“两磨一烧”。

2.2.2 生产方法

通用硅酸盐水泥的生产方法主要根据生料制备方法和熟料煅烧窑型来划分,但通常以熟料煅烧窑型为主。综合考虑熟料煅烧窑型和生料制备方法,通用硅酸盐水泥的主要生产方法见表 2-4。目前,通用硅酸盐水泥的生产主要采用带悬浮预热器和分解炉的干法回转窑-预分解窑,因而本书主要对该方法加以介绍。