

普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

*Cement Technology*

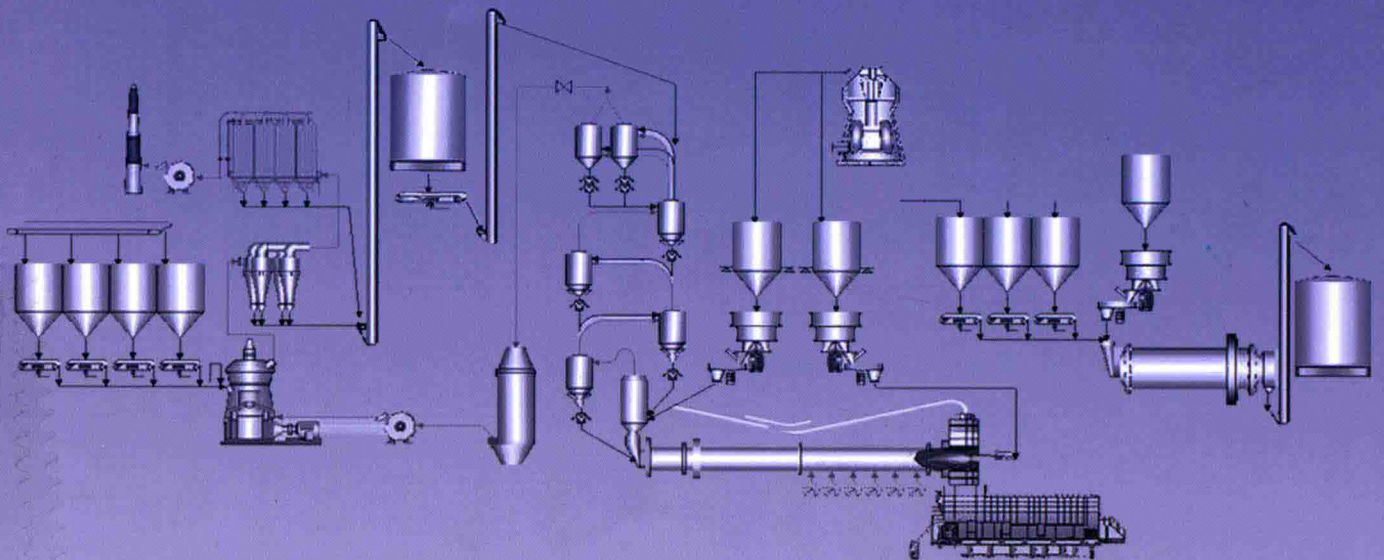
# 水泥工艺学

(第2版)

主编 林宗寿

主审 季尚行 张 雄 管宗甫

刘晓存 王加军



普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

# Cement Technology

# 水泥工艺学

(第2版)

主 编 林宗寿  
主 审 季尚行 张 雄 管宗甫  
刘 晓 存 王加军



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了硅酸盐水泥的生产方法、矿物组成、原料配料、熟料烧成、生产工艺过程及主要设备、水泥水化硬化的基本理论,对水泥品种和水泥混凝土也做了较详细的叙述。本书采用最新颁布的国家标准,体现了近年来在水泥工艺、水泥水化研究、水泥品种开发等方面的新成果。

本书可作为高等学校无机非金属材料工程专业或材料科学与工程无机非金属材料方向的本科教学用书,也可供从事水泥行业生产、科研和设计等方面的有关工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水泥工艺学/林宗寿主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2017.4  
ISBN 978-7-5629-5310-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 198208 号

项目负责人:田道全

责任校对:张明华

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/16

印 张:18.75

字 数:600 千字

版 次:2017 年 4 月第 2 版

印 次:2017 年 4 月第 1 次印刷 总共第 3 次印刷

印 数:6001—10000 册

定 价:38.00 元

责任编辑:田道全

封面设计:翰之林

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 ·

# 前 言

从千姿百态的居民住宅到高耸入云的摩天大楼,从纵横交错的公路铁道到星罗棋布的机场港口,从拦海斩河的雄伟大坝到飞渡天险的各式彩桥,从旱涝保收的农田水利工程到铜墙铁壁的国防工程,从金碧辉煌的地下宫殿到外层空间的人类活动站,都离不开一种被称为“灰色金子”的材料——水泥。水泥是国民经济建设的重要基础原材料,随着我国工业化、城市化进程的推进,水泥工业对经济增长的支撑作用日益明显。水泥素有“建筑工业的粮食”之称,现代建筑离不开水泥。水泥是国民经济的“晴雨表”,是经济发展的“先行官”。没有水泥,就没有人类的现代文明。

本书在参考了众多版本的《水泥工艺学》及《水泥工艺原理》教材的基础上,结合编者 30 多年来的教学、科研及从事水泥生产和水泥技术服务的实际经验编写而成。本版《水泥工艺学》保留了第 1 版《水泥工艺学》的基本内容和章节结构,对部分内容和产品标准进行了更新,特别是对第 6 章“水泥生产过程与设备”进行大量的删减和补充,大胆地淘汰了部分老旧工艺和设备,补充了近年来水泥工艺的最新成果,反映了水泥化学及工艺过程的最新进展。全书内容力求删繁就简、深入浅出,并在有利于自学方面做了很多的努力。

全书以硅酸盐水泥的组成、原料、煅烧和工艺过程与设备基本原理作为工艺方面的重点;有关水泥水硬化、性能和耐久性则主要为进一步掌握工艺要求、改善性能、研制新品种水泥提供必要的基础;对矿渣水泥、火山灰质水泥、粉煤灰水泥等通用水泥着重于介绍工艺、水化和性能方面的特点;至于其他特种水泥按其特性进行分类,并选取具有代表性的典型品种,为生产、应用和开发研究介绍方法、提供思路。

本书可作为高等学校无机非金属材料工程或材料科学与工程专业无机非金属材料方向的教学用书,也可供从事水泥生产、科研、设计等方面的有关工程技术人员阅读参考。

全书由武汉理工大学林宗寿教授编写,由中材国际工程股份有限公司(原南京水泥工业设计研究院)季尚行教授级高级工程师、同济大学张雄教授、郑州大学管宗甫教授、济南大学刘晓存教授、华新水泥股份有限公司王加军工程师主审。编者对主审人的精心审阅表示衷心的感谢。同时,对提供了参考资料的同济大学沈威教授,江西省建材工业学校李坚利老师,天津水泥工业设计研究院于兴敏院长,武汉理工大学叶菁教授、万惠文教授、唐山学院彭宝利老师,以及水泥界同仁丁奇生、王亚丽、崔素萍等致以诚挚的谢意。对武汉理工大学出版社田道全副编审为提高本教材的质量付出的艰辛劳动表示敬意。

限于编者的水平和条件,书中难免有疏漏、不当甚至是错误之处,恳请广大师生和读者提出宝贵意见,以便订正。

林宗寿

2017 年 3 月于武汉

# 目 录

1 绪论 .....	(1)
1.1 水泥的定义、分类及命名 .....	(1)
1.2 水泥的起源与发明 .....	(1)
1.2.1 胶凝材料的发展及演变 .....	(1)
1.2.2 水泥的发明 .....	(2)
1.3 水泥工业的发展概况 .....	(3)
1.3.1 世界水泥工业的发展概况 .....	(3)
1.3.2 中国水泥工业的发展概况 .....	(5)
1.4 水泥在国民经济中的地位和作用 .....	(6)
1.5 水泥生产工艺流程 .....	(6)
2 硅酸盐水泥熟料的组成 .....	(9)
2.1 熟料化学成分及矿物组成 .....	(9)
2.1.1 化学成分 .....	(9)
2.1.2 矿物组成 .....	(9)
2.2 熟料的率值 .....	(12)
2.2.1 石灰饱和系数 .....	(12)
2.2.2 硅率 .....	(14)
2.2.3 铝率 .....	(15)
2.3 熟料矿物组成计算与换算 .....	(15)
2.3.1 石灰饱和系数法 .....	(15)
2.3.2 鲍格法 .....	(16)
2.3.3 熟料真实矿物组成与计算矿物组成的差异 .....	(19)
习题 .....	(19)
3 硅酸盐水泥的原料及生料配料 .....	(20)
3.1 水泥原料 .....	(20)
3.1.1 钙质原料 .....	(20)
3.1.2 硅铝质原料 .....	(21)
3.1.3 校正原料 .....	(22)
3.1.4 原料中各元素的要求 .....	(23)
3.1.5 燃料 .....	(25)
3.2 水泥生料的易烧性 .....	(29)

3.3 熟料组成设计	(31)
3.3.1 水泥品种和强度等级	(31)
3.3.2 原料品质	(31)
3.3.3 燃料品质	(31)
3.3.4 生料细度和均匀性	(32)
3.3.5 窑型与规格	(32)
3.4 生料配比计算	(33)
3.4.1 基本概念	(33)
3.4.2 配料计算	(33)
习题	(35)
<b>4 硅酸盐水泥熟料的煅烧</b>	<b>(36)</b>
4.1 干燥与脱水	(36)
4.1.1 干燥	(36)
4.1.2 黏土矿物脱水	(36)
4.2 碳酸盐分解	(37)
4.2.1 碳酸盐分解反应的特点	(37)
4.2.2 碳酸钙的分解过程	(37)
4.2.3 影响碳酸钙分解反应的因素	(37)
4.3 固相反应	(38)
4.3.1 反应过程	(38)
4.3.2 影响固相反应的主要因素	(38)
4.4 熟料的烧成	(39)
4.4.1 最低共熔温度	(39)
4.4.2 液相量	(39)
4.4.3 液相黏度	(40)
4.4.4 液相的表面张力	(40)
4.4.5 氧化钙溶解于熟料液相的速率	(40)
4.4.6 反应物存在的状态	(40)
4.5 熟料的冷却	(40)
4.6 其他组分的作用	(41)
4.6.1 氟化钙	(41)
4.6.2 硫化物	(41)
4.6.3 萤石、石膏复合矿化剂	(42)
4.6.4 碱	(42)
4.6.5 氧化镁	(43)
4.6.6 氧化磷	(43)
4.6.7 氧化钛	(43)
4.7 熟料热耗	(43)
4.7.1 熟料的理论热耗	(43)
4.7.2 影响熟料热耗的因素	(44)
习题	(45)

5	硅酸盐水泥的制成与标准	(46)
5.1	水泥混合材料	(46)
5.1.1	粒化高炉矿渣	(46)
5.1.2	火山灰质混合材料	(48)
5.1.3	粉煤灰	(49)
5.1.4	其他混合材料	(50)
5.2	通用硅酸盐水泥定义、分类及技术要求	(52)
5.2.1	通用硅酸盐水泥的定义与分类	(52)
5.2.2	通用硅酸盐水泥的组分材料	(53)
5.2.3	通用硅酸盐水泥的主要性能	(53)
5.2.4	通用硅酸盐水泥的强度等级	(55)
5.2.5	通用硅酸盐水泥的技术要求	(55)
5.3	石灰石硅酸盐水泥的组成与标准	(56)
	习题	(57)
6	水泥生产工艺过程与设备	(58)
6.1	原料的开采与运输	(58)
6.2	破碎	(60)
6.2.1	易碎性与易磨性	(60)
6.2.2	破碎比	(60)
6.2.3	锤式破碎机	(60)
6.2.4	反击式破碎机	(62)
6.2.5	EV型反击-锤式破碎机	(64)
6.3	烘干	(64)
6.4	粉磨	(66)
6.4.1	粉磨工艺流程	(66)
6.4.2	粉磨机械	(70)
6.4.3	影响磨机产量的因素	(80)
6.5	均化	(82)
6.5.1	原料和燃料的预均化堆场	(82)
6.5.2	生料的均化	(83)
6.6	煅烧	(86)
6.6.1	水泥熟料煅烧设备的分类	(86)
6.6.2	悬浮预热器	(88)
6.6.3	分解炉	(92)
6.6.4	回转窑	(106)
6.6.5	熟料冷却机	(109)
6.6.6	燃烧器	(109)
6.6.7	增湿塔	(114)
6.6.8	余热发电	(115)
6.6.9	水泥窑协同处置城市生活垃圾	(118)

6.6.10	水泥窑协同处置城市污泥	(122)
6.6.11	水泥窑氮氧化物的减排	(127)
6.7	水泥储存与装运	(130)
6.7.1	储存及均化	(131)
6.7.2	出厂发运	(132)
6.8	输送	(134)
6.8.1	空气输送斜槽	(134)
6.8.2	带式输送机	(135)
6.8.3	螺旋输送机	(136)
6.8.4	斗式提升机	(137)
6.8.5	埋刮板输送机	(138)
6.8.6	振动输送机	(138)
6.9	水泥厂的除尘	(140)
6.9.1	袋式除尘器	(140)
6.9.2	电除尘器	(143)
6.9.3	电袋复合式除尘器	(144)
	习题	(145)
7	硅酸盐水泥的水化与硬化	(147)
7.1	熟料矿物的水化	(147)
7.1.1	硅酸三钙	(147)
7.1.2	硅酸二钙	(150)
7.1.3	铝酸三钙	(150)
7.1.4	铁相固溶体	(152)
7.2	硅酸盐水泥的水化	(153)
7.3	掺混合材料硅酸盐水泥的水化硬化	(156)
7.3.1	矿渣水泥的水化硬化	(157)
7.3.2	火山灰水泥的水化硬化	(157)
7.3.3	粉煤灰水泥的水化硬化	(158)
7.3.4	石灰石硅酸盐水泥的水化硬化	(158)
7.4	水化速率	(158)
7.4.1	熟料矿物的水化速率	(159)
7.4.2	细度和水灰比的影响	(161)
7.4.3	温度与水化速率的关系	(161)
7.5	硬化水泥浆体	(161)
7.5.1	浆体结构的形成和发展	(162)
7.5.2	C-S-H凝胶	(164)
7.5.3	氢氧化钙	(167)
7.5.4	钙矾石	(168)
7.5.5	单硫型水化硫铝酸钙及其固溶体	(170)
7.5.6	孔及其结构特征	(170)
7.5.7	水及其存在形式	(173)



习题	(175)
<b>8 硅酸盐水泥的性能</b>	(176)
8.1 密度与体积密度	(176)
8.2 细度	(176)
8.3 需水量(稠度、流动度)	(179)
8.4 凝结时间	(179)
8.4.1 凝结速度	(180)
8.4.2 石膏的作用及其适宜掺量的确定	(180)
8.4.3 假凝现象	(182)
8.4.4 其他调凝外加剂	(183)
8.5 强度	(184)
8.5.1 熟料矿物组成的影响	(184)
8.5.2 水泥细度的影响	(185)
8.5.3 施工条件的影响	(185)
8.6 体积变化	(187)
8.6.1 化学减缩	(187)
8.6.2 湿胀干缩	(188)
8.6.3 碳化收缩	(189)
8.7 保水性与泌水性	(189)
8.8 水化热	(190)
8.9 耐热性	(191)
8.10 抗渗性	(191)
8.11 抗冻性	(193)
8.12 抗蚀性	(194)
8.12.1 淡水侵蚀	(194)
8.12.2 酸和酸性水侵蚀	(194)
8.12.3 硫酸盐侵蚀	(195)
8.12.4 含碱溶液侵蚀	(196)
8.12.5 碱-集料反应	(196)
8.12.6 预防侵蚀的措施	(197)
习题	(200)
<b>9 特种水泥</b>	(201)
9.1 铝酸盐及耐高温水泥	(201)
9.1.1 铝酸盐水泥	(201)
9.1.2 磷酸和磷酸盐耐火浇注料	(203)
9.1.3 水玻璃耐火浇注料	(204)
9.2 快硬高强水泥	(204)
9.2.1 快硬硅酸盐水泥	(205)
9.2.2 快硬硫铝酸盐水泥	(205)
9.2.3 快硬铁铝酸盐水泥	(208)

9.2.4	快硬氟铝酸盐水泥 .....	(209)
9.2.5	快硬高强铝酸盐水泥 .....	(210)
9.2.6	特快硬调凝铝酸盐水泥 .....	(212)
9.2.7	特种高强水泥 .....	(212)
9.3	抗硫酸盐、中低热及道路水泥 .....	(213)
9.3.1	抗硫酸盐水泥 .....	(213)
9.3.2	中低热硅酸盐水泥、低热矿渣水泥 .....	(215)
9.3.3	低热微膨胀水泥 .....	(216)
9.3.4	低热钢渣硅酸盐水泥 .....	(217)
9.3.5	道路硅酸盐水泥 .....	(218)
9.3.6	钢渣道路水泥 .....	(219)
9.4	膨胀和自应力水泥 .....	(220)
9.4.1	制造膨胀水泥的基本原理 .....	(221)
9.4.2	膨胀水泥的种类 .....	(222)
9.4.3	生产工艺及性能 .....	(223)
9.5	油井水泥 .....	(226)
9.6	装饰水泥 .....	(228)
9.6.1	白色硅酸盐水泥 .....	(228)
9.6.2	彩色水泥 .....	(232)
9.7	砌筑水泥 .....	(232)
9.7.1	砌筑水泥的国家标准 .....	(233)
9.7.2	钢渣砌筑水泥的行业标准 .....	(233)
9.8	防辐射水泥 .....	(234)
9.8.1	钡水泥 .....	(234)
9.8.2	含硼水泥 .....	(235)
9.8.3	铋水泥 .....	(235)
9.8.4	导电导磁水泥 .....	(235)
9.8.5	无磁水泥 .....	(236)
9.9	耐酸水泥 .....	(236)
9.9.1	水玻璃耐酸水泥 .....	(236)
9.9.2	硫黄耐酸水泥 .....	(237)
9.9.3	聚合物耐酸水泥 .....	(238)
9.10	低碱度硫铝酸盐水泥 .....	(238)
9.11	氯氧镁水泥 .....	(239)
	习题 .....	(240)
<b>10</b>	<b>混凝土 .....</b>	<b>(241)</b>
10.1	混凝土的组成材料 .....	(241)
10.1.1	水泥 .....	(241)
10.1.2	细骨料 .....	(242)
10.1.3	粗骨料 .....	(245)
10.1.4	混凝土拌和用水和养护用水 .....	(248)

10.1.5 混凝土外加剂·····	(248)
10.1.6 矿物掺和料·····	(253)
10.2 混凝土的主要技术性质·····	(257)
10.2.1 混凝土拌和物的和易性·····	(257)
10.2.2 混凝土的强度·····	(259)
10.2.3 混凝土的变形性能·····	(263)
10.2.4 混凝土的耐久性·····	(264)
10.3 普通混凝土配合比设计·····	(266)
10.3.1 初步配合比计算·····	(266)
10.3.2 试配与调整·····	(273)
10.3.3 普通混凝土配合比设计的实例·····	(274)
10.4 其他品种混凝土·····	(278)
10.4.1 轻集料混凝土·····	(278)
10.4.2 多孔混凝土·····	(279)
10.4.3 水玻璃耐酸混凝土·····	(280)
10.4.4 纤维增强混凝土·····	(280)
10.4.5 聚合物混凝土·····	(281)
习题·····	(281)
附录·····	(284)
参考文献·····	(285)

# 1 绪论

## 1.1 水泥的定义、分类及命名

加入适量水后可形成塑性浆体,既能在空气中硬化又能在水中硬化,并能将砂、石等材料牢固地胶结在一起的细粉状水硬性胶凝材料,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。通用水泥为土木工程一般用途的水泥,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、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。专用水泥指有专门用途的水泥,如油井水泥、砌筑水泥、道路水泥等。特性水泥则是某种性能比较突出的一类水泥,如快硬硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥、自应力铝酸盐水泥等。

按所含的主要水硬性矿物不同,水泥又可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、石膏矿渣水泥、石灰火山灰水泥等。目前水泥品种已达 100 多种。

## 1.2 水泥的起源与发明

水泥的发明是人类在长期生产实践中不断积累的结果,是在古代建筑胶凝材料的基础上发展起来的,经历了一个漫长的历史过程。

### 1.2.1 胶凝材料的发展及演变

所谓胶凝材料,即胶结料。它是指在物理、化学作用下,能从浆体变成坚固石状体,并能胶结其他物料而具有一定机械强度的物质。胶凝材料可分为有机和无机胶凝材料两大类,沥青和各种树脂属于有机胶凝材料;无机胶凝材料按硬化条件又分为水硬性胶凝材料和非水硬性胶凝材料两种。非水硬性胶凝材料拌水后只能在空气中硬化而不能在水中硬化,如石灰、石膏等;而水硬性胶凝材料拌水后既能在空气中硬化又能在水中硬化。

胶凝材料的发展史,可追溯到人类史前时期。它先后经历了天然产出的黏土、石膏-石灰、石灰-火山灰及人工配料制得水硬性胶凝材料等多个阶段。古埃及人采用尼罗河的泥浆砌筑未经煅烧的土砖。为增加强度和减少收缩,在泥浆中还掺入砂子和草。大约在公元前 3000—前 2000 年间,古埃及人开始采用煅烧石膏作建筑胶凝材料,埃及金字塔的建造中使用了煅烧石膏。

古希腊人与古埃及人不同,建筑中所用胶凝材料是将石灰石经煅烧后制得的石灰。公元前 146 年,古罗马帝国吞并古希腊,同时继承了古希腊人生产和使用石灰的传统。古罗马人使用石灰的方法是先将石灰加水消解,与砂子混合成砂浆,然后用此砂浆砌筑建筑物。采用石灰砂浆建成的古罗马建筑,有些非常坚固,甚至保留到现在。

古罗马人对石灰使用工艺进行过改进,在石灰中不仅掺砂子,还掺磨细的火山灰,在没有火山灰的地区,则掺入与火山灰具有同样效果的磨细碎砖。这种砂浆在强度和耐水性方面较“石灰-砂子”的二组分砂浆都有很大改善,用其砌筑的普通建筑和水中的建筑都较耐久。有人将“石灰-火山灰-砂子”三组分砂浆称为“罗马砂浆”。

中国建筑胶凝材料的发展有着自己特有的一个很长的历史过程。早在公元前 5000—前 3000 年的新石器时代的仰韶文化时期,就有人用“白灰面”涂抹山洞、地穴的地面和四壁,使其变得光滑和坚硬。“白灰面”因呈白色粉末状而得名,它由天然姜石磨细而成。姜石是一种含二氧化硅较高的石灰石块,常夹杂在黄土中,是黄土中的钙质结核。“白灰面”是至今被发现的中国古代最早的建筑胶凝材料。

公元前 16 世纪的商代,地穴建筑迅速向木结构建筑发展,此时除继续用“白灰面”抹地以外,开始采用黄泥浆砌筑土坯墙。在公元前 403—前 221 年的战国时期,开始用草拌黄泥浆筑墙,还用它在土墙上衬砌墙面砖。在中国建筑史上,“白灰面”很早就被淘汰,而黄泥浆和草拌黄泥浆作为胶凝材料则一直沿用到近代社会。

公元前 7 世纪的周朝出现了石灰,周朝的石灰是用大蛤的外壳烧制而成。蛤壳的主要成分是碳酸钙,将它煅烧到  $\text{CO}_2$  全部逸出即成石灰。在周朝就已发现它具有良好的吸湿防潮性能和胶凝性能,在中国历史上流传了很长时间。

在公元 5 世纪的中国南北朝时期,出现一种名叫“三合土”的建筑材料,它由石灰、黏土和细砂所组成。到明代,有石灰、陶粉和碎石组成的“三合土”。在清代,除石灰、黏土和细砂组成的“三合土”外,还有石灰、炉渣与砂子组成的“三合土”。以现代人的眼光看,“三合土”也就是以石灰与黄土或其他火山灰质材料作胶凝材料,以细砂、碎石或炉渣作填料的混凝土。“三合土”与古罗马的三组分砂浆,即“罗马砂浆”有许多类似之处。“三合土”经夯实后不仅具有较高的强度,还有较好的防水性,在清代还将它用于夯筑水坝。

中国古代建筑胶凝材料发展中一个鲜明的特点是采用石灰掺有机物的胶凝材料,如“石灰-糯米”“石灰-桐油”“石灰-血料”“石灰-白芨”“石灰-糯米-明矾”等。另外,在使用“三合土”时,掺入糯米和血料等有机物。

中国古代建筑胶凝材料发展的进程,是从“白灰面”和黄泥浆起步,发展到石灰和“三合土”,进而发展到石灰掺有机物的胶凝材料。中国古代建筑胶凝材料有过自己辉煌的历史,在与西方古代建筑胶凝材料基本同步发展的过程中,由于广泛采用石灰与有机物相结合的胶凝材料而显得略高一筹。

### 1.2.2 水泥的发明

现代水泥的发明有一个渐进的过程,并不是一蹴而就的。18 世纪中叶,英国航海业已较发达,但船只触礁和撞滩等海难事故频繁发生。为避免海难事故,采用灯塔进行导航。当时英国建造灯塔的材料有两种:木材和“罗马砂浆”。然而,木材易燃,遇海水易腐烂;“罗马砂浆”虽然有一定耐水性能,但是经不住海水的侵蚀和冲刷。由于材料在海水中不耐久,所以灯塔经常损坏,船只无法安全航行,迅速发展的航运业遇到重大障碍。为解决航运安全问题,寻找抗海水侵蚀的材料和建造耐久的灯塔成为 18 世纪 50 年代英国经济发展中的当务之急。对此,英国国会不惜重金,礼聘人才。被尊称为英国土木之父的工程师史密顿(Smeaton J)应聘承担建设灯塔的任务。

1756 年,史密顿在建造灯塔的过程中,研究了“石灰-火山灰-砂子”三组分砂浆中不同石灰石对砂浆性能的影响,发现含有黏土的石灰石经煅烧和细磨处理后,加水制成的砂浆能慢慢硬化,在海水中的强度较“罗马砂浆”高得多,能耐海水的冲刷。史密顿使用新发现的砂浆建造了举世闻名的普利茅斯(Plymouth)港的漩岩(Eddystone)大灯塔。

用含黏土、石灰石制成的石灰称为水硬性石灰。史密顿的这一发现是水泥发明过程中知识积累的一大飞跃,不仅对英国航海业做出了贡献,也对“波特兰水泥”的发明起到了重要作用。然而,史密顿研究成功的水硬性石灰,并未获得广泛应用,当时大量使用的仍是由石灰、火山灰和砂子组成的“罗马砂浆”。

1796年,英国人派克(Parker J)将称为 Sepa Tria 的黏土质石灰岩,磨细后制成料球,在高于烧石灰的温度下煅烧,然后磨细制成水泥。派克称这种水泥为“罗马水泥”(Roman Cement),并取得了该水泥的专利权。“罗马水泥”凝结较快,可用于与水接触的工程,在英国曾得到广泛应用,一直沿用到被“波特兰水泥”所取代。

差不多在“罗马水泥”产生的同时期,法国人采用布洛格(Boulogne)地区的化学成分接近现代水泥成分的泥灰岩,也制造出了水泥。这种与现代水泥化学成分接近的天然泥灰岩称为水泥灰岩,用此灰岩制成的水泥则称为天然水泥。美国人用罗森代尔(Rosendale)和路易斯维尔(Louisville)地区的水泥灰岩也制成了天然水泥。在19世纪80年代及以后的很长一段时间里,天然水泥在美国得到广泛应用,在建筑业中曾占据很重要的地位。

英国人福斯特(Foster J)是一位致力于水泥的研究者。他将白垩和黏土按2:1的质量比混合后加水湿磨成泥浆,送入料槽进行沉淀,置沉淀物于大气中干燥,然后放入石灰窑中煅烧,温度以CO<sub>2</sub>完全挥发为准,烧成的产品呈浅黄色,冷却后细磨成水泥。福斯特称该水泥为“英国水泥”(British Cement),于1822年10月22日获得英国第4679号专利。

“英国水泥”由于煅烧温度较低,其质量明显不及“罗马水泥”,所以售价较低,销量不大。这种水泥虽然未能被大量推广,但其制造方法已是近代水泥制造的雏形,是水泥知识积累中的又一次重大飞跃。

1824年10月21日,英国利兹城(Leeds)的泥水匠阿斯普丁(Aspdin J)获得英国第5022号的“波特兰水泥”(硅酸盐水泥)专利证书,从而一举成为流芳百世的水泥发明人。他的专利证书上叙述的“波特兰水泥”制造方法是:“把石灰石捣成细粉,配合一定量黏土,掺水后以人工或机械搅拌均匀成泥浆。置泥浆于盘上,加热干燥。将干料打击成块,然后装入石灰窑煅烧,烧至石灰石内碳酸气全部逸出。再将煅烧后的烧块冷却和打碎磨细,制成水泥。使用水泥时加入少量水分,拌和成适当稠度的砂浆,可应用于各种不同的工作场合”。该水泥水硬化后的颜色类似英国波特兰地区建筑用石料的颜色,所以被称为“波特兰水泥”。

阿斯普丁专利证书上所叙述的“波特兰水泥”制造方法,与福斯特的“英国水泥”并无根本差别,煅烧温度都是以物料中碳酸气完全挥发为准。根据水泥生产一般常识,在该温度条件下制成的“波特兰水泥”,其质量不可能优于“英国水泥”。然而在市场上“波特兰水泥”的竞争力强于“英国水泥”。1838年重建泰晤士河隧道工程时,“波特兰水泥”价格比“英国水泥”要高很多,但业主还是选用了“波特兰水泥”。很明显,阿斯普丁出于保密原因在专利证书上并未把“波特兰水泥”生产技术都写出来,他实际掌握的水泥生产知识比专利证书上的要多。阿斯普丁在工厂生产中一定采用过较高的煅烧温度,否则水泥硬化后不会具有波特兰地区石料那样的颜色,其产品也不可能有那样高的竞争力。

不过,根据专利证书所载内容和有关资料,阿斯普丁未能掌握“波特兰水泥”确切的烧成温度和正确的原料配比,因此,他的工厂生产出的产品质量很不稳定,甚至造成有些建筑物因水泥质量问题而倒塌。

在英国,与阿斯普丁同一时代的另一位水泥研究天才是强生(Johnson I C)。他是英国天鹅谷怀特公司的经理,专门制造“罗马水泥”和“英国水泥”。1845年,强生在实验中一次偶然的机会发现,煅烧到含有一定数量玻璃体的水泥烧块,经磨细后具有非常好的水硬性。另外还发现,在烧成物中含有石灰会使水泥硬化后开裂。根据这些意外的发现,强生确定了水泥制造的两个基本条件:第一是烧窑的温度必须高到足以使烧块含一定量玻璃体并呈黑绿色;第二是原料比例必须正确且固定,烧成物内部不能含过量石灰,水泥硬化后不能开裂。这些条件确保了“波特兰水泥”的质量,解决了阿斯普丁无法解决的质量不稳定问题。从此,现代水泥生产的基本参数确定下来。

## 1.3 水泥工业的发展概况

### 1.3.1 世界水泥工业的发展概况

自1824年水泥诞生并实际应用以来,水泥工业历经多次变革,工艺和设备不断改进,品种不断增

多,产量、管理水平和质量不断提高。人类最早是利用间歇式土窑(后发展成土立窑)煅烧水泥熟料,首批水泥大规模使用的实例是1825—1843年修建的泰晤士河隧道工程。1877年回转窑烧制水泥熟料获得专利权,继而出现了单筒冷却机、立式磨以及单仓钢球磨等,从而有效地提高了水泥产量和质量。1905年湿法回转窑出现;1910年土立窑得到了改进,实现了立窑机械化连续生产;1928年德国的立列波(Lellep)博士和伯利休斯(Polysius)公司在对立窑、回转窑的综合分析研究后创造了带回转炉算子的回转窑,为了纪念发明者与创造公司,取名为“立波尔窑”。1950年悬浮预热器窑的发明与应用使熟料热耗大幅度降低,与此同时,熟料的冷却设备也有了很快的发展,其他的水泥制造设备也不断更新换代。20世纪60年代初,日本将德国的悬浮预热器窑技术引进后,于1971年开发了水泥窑外分解技术,从而揭开了现代水泥工业的新篇章,并且很快地在世界范围内出现了各具特点的预分解窑,形成了新型干法水泥生产技术。随着原料预均化、生料均化、高功能破碎与粉磨、环境保护技术和X射线荧光分析等在线检测方法的配套发展、逐步完善,加上电子计算机和自动化控制仪表等技术的广泛应用,新型干法水泥生产的熟料质量明显提高,能耗明显下降,生产规模不断扩大。水泥生产技术正在全面淘汰湿法、老式干法和立窑等生产工艺,向新型干法水泥生产技术发展,并具有如下特征:

#### (1) 生产线能力的大型化

新型干法水泥生产技术为提高水泥设备的单机能力和功能创造了可能性,而追求高效率、高性能、低成本促进了水泥生产装备大型化的进程。国外发达国家水泥生产线建设规模在20世纪70年代为1000~3000 t/d,80年代为3000~4000 t/d,90年代达到4000~10000 t/d,目前5000 t/d以上生产线已成主流,最大的生产线已达12000 t/d。国内水泥生产线建设规模从20世纪90年代以来也有很大发展,先后有多条2000~4000 t/d生产线投入运行。21世纪初随着采用国内技术、国产设备建设的5000 t/d生产线投产,国产大规模生产线建设进入高潮,目前已建成一大批5000~12000 t/d生产线,成为国内主流规模生产线。

随着单机生产线能力的大型化,年产数百万吨乃至千万吨的水泥厂开始形成,大型水泥集团的生产能力也达到年产数千万吨到1亿吨以上。

#### (2) 生产与管理信息化

水泥生产和管理主要的成绩是运用信息技术,开发各种工艺过程的专家系统和数字神经网络系统,实现远程诊断和操作,保证水泥生产稳定和良好的质量。另外,进行科学管理和商务活动是近年来国外水泥工业在信息化、自动化、网络化、智能化领域中所进行的另一方面主要工作,因此,现代水泥生产企业的生产与管理达到了前所未有的水平。

#### (3) 生产工艺节能化

现代辊式磨、辊压机和辊筒磨三种新型挤压粉磨装置显示了巨大的节能潜力,显示了比传统的磨机实现概率破碎的粉磨技术更大的优越性。在生料粉磨中采用带磨外循环的辊式磨已成为首选方案,在水泥粉磨工艺中采用料间挤压粉磨设备逐步取代直到完全取代球磨机已经成为一种趋势,而与之配套的各种高效节能的新型选粉机使生产效率提高,系统电耗进一步降低。纯低温余热发电和改进型分解炉、新型多通道燃烧器及第四代算式冷却机实现了高效冷却和高效热回收,熟料热耗进一步降低。

#### (4) 水泥生产环境协调化

自20世纪70年代开始,国外一些水泥公司已研究和推进废弃物替代自然资源的工作。随着科学技术的发展和人们环保意识的增强,可持续发展的越来越得到重视。20世纪90年代中期在日本出现了Eco-Cement水泥厂,在水泥原料的配比中,城市垃圾焚烧灰和下水道污泥所占比率已接近50%。日本有一半水泥厂处理各种废弃物,2002年,日本全国水泥厂的平均废弃物利用量每吨水泥在355 kg以上。欧洲的水泥公司每年要处理100多万t有害废弃物。许多水泥厂还把可燃性废弃物作为替代燃料,用于水泥回转窑的煅烧。例如,瑞士HOLCIM水泥公司使用可燃废弃物代替燃料已达80%以上,美国大部分水泥厂利用可燃废弃物煅烧水泥,一般公司替代率也在10%~20%之

间。此外,随之出现了用于处置废弃物的破碎机、分选机、燃烧器、专用燃烧炉、环境状态检测装置和仪器、防止二次污染技术,以及生态水泥混凝土性能的研究与开发热潮。

### 1.3.2 中国水泥工业的发展概况

中国最早的水泥厂是外资企业在澳门开办的青洲英坭厂,建于1886年。唐山细绵土厂是中国最早的民族水泥企业,创建于1889年,比澳门的青洲英坭厂晚了3年,是中国人开办的第一个水泥厂。之后,又相继建成了大连、上海、中国、广州等水泥厂,并根据英文Cement的音译将这些工厂的产品称为“细棉土”、“土敏土”、“水门汀”及“洋灰”等。最早使用“水泥”这一名称的是位于湖北省大冶县(今大冶市)黄石港明家嘴的湖北水泥厂,就是现在的华新水泥股份有限公司的前身,它于1909年5月2日建成投产,日产水泥180~200 t。

1889—1937年的近50年间,我国水泥工业发展极其缓慢,最高水泥年产量仅114.4万t。这是我国水泥工业的萌芽及早期发展阶段。

抗日战争时期,先后建设了哈尔滨、本溪、小屯、抚顺、锦西、牡丹江、工源、琉璃河、重庆、辰溪、嘉华、昆明、贵阳、泰和等水泥厂,新中国成立前夕投产了华新、江南水泥厂。这些厂大多数是外国人一手操办的,设备来自国外,没有完整的建设水泥工业的机制,因连年战乱,许多水泥厂难以持续生产,水泥工业处于衰落期。1949年全国解放时,水泥年产量仅66万t,占当时总生产能力的16.3%。全国水泥工业处于奄奄一息的境地。

1949年新中国成立后,我国水泥工业进入大发展阶段。20世纪50年代中期,我国就开始试制湿法回转窑和半干法立波尔窑生产线成套设备,迈出了我国水泥生产技术发展的重要一步。从20世纪50年代到60年代,我国依靠自己的科研设计力量进行预热器窑的试验,先后新建、扩建了32个重点大中型的湿法或半干法立波尔窑生产企业,同期小型立窑水泥企业蓬勃发展。在20世纪70~80年代,我国自行开发的日产700 t、1000 t、1200 t、2000 t熟料的预分解窑生产线分别在新疆、江苏邳县(今邳州市)、上海川沙、辽宁本溪和江西水泥厂投产;从1978年起,相继从国外引进了一批2000~4000 t/d熟料的预分解窑生产线成套设备,建成了冀东、宁国、柳州、云浮等大型水泥厂,不仅改善了水泥生产结构,而且为我国工厂设计、管理与设备改造等方面提供了很好的借鉴,迅速提高了我国新型干法水泥生产的技术水平。与此同时,我国的水泥品种已由建国初期的3~4个发展到现在的近80个,其中特种水泥就有70多个,经常生产的品种有30个左右。水泥科技工作者结合中国经济建设各方面的需要,在水泥及其制品的研究开发中取得了许多独具特色的重要成果。在煅烧、粉磨、熟料形成、水泥新矿物系列、水泥水硬化、混合材料、外加剂、节能技术等有关的基础理论以及测试方法的研究和应用方面,也取得了较好的成绩。

值得注意的是,我国小型立窑企业在经过20世纪50年代末和70年代两个发展高潮,进入20世纪80年代后,因投资省、建设快、适应中国的特定条件而蓬勃发展起来,使中国水泥工业走上了一条独特的发展道路,其最大特色就是当时水泥产量的80%是由立窑为主的小型水泥厂生产,并且水泥生产厂家多达8600余家。

进入21世纪后,随着对立窑等落后产能采取“限制、淘汰、改造、提高”的方针,实施“由大变强”、“靠新出强”的战略,我国水泥工业步入了一个新的发展时期。2009年7月27日,世界最大的河南天瑞水泥12000 t/d新型干法熟料生产线成功点火,标志着我国水泥工业的设计、装备制造、安装和生产管理水平全面进入世界先进行列。到2015年底截止,我国新型干法水泥生产线累计1764条,设计熟料产能达18.1亿t,实际年熟料产能达到20亿t。单线产能正向大型化发展,全国落后水泥产能正加速淘汰。我国水泥工业技术与装备已形成系列化、大型化并向生态化迈进。中国企业在世界水泥装备和工程承包市场创立了国际知名品牌,占有近一半的市场份额,在国际市场竞争中充分展现了优势。从1985年起我国水泥产量一直稳居世界第一,2015年我国水泥总产量已达23.48亿t,已占世界水泥总产量的60%以上。



## 1.4 水泥在国民经济中的地位和作用

水泥是重要的建筑和工程材料。无论是在砂浆中或是在混凝土中,水泥都只是质量含量较少的一部分,但它有胶结作用,能将砂、石胶结在一起,形成人造石,且能在空气中和水中硬化,长期保持很高的强度,因而它广泛应用于工业建筑、民用建筑、交通、水利、农林、国防、海港、城乡建筑和宇航工业、核工业以及其他新型工业的建设等领域。它应用面广,使用量大,是国家建设和人民生活中不可缺少的重要材料。

水泥代替钢材、木材等的趋势有增无减。生产水泥虽然消耗较多能源,但水泥与砂、石等集料制成的混凝土则是一种低能耗型建筑材料。每吨混凝土消耗的能量仅为红砖的 $1/6$ ,钢材的 $1/20$ ,铝材的 $1/170$ 。与普通钢铁相比,水泥制品不会生锈,也没有木材这类材料易于腐朽的缺点,更不会有塑料年久老化的问题,其耐久性好,维修工作量小,在代钢、代木方面,越来越显示出技术、经济上的优越性。

水泥使各种特殊功能的建(构)筑物的出现成为现实。水泥与钢筋、砂、石等材料制成的钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土的性能远远优于钢筋或混凝土各自的性能,它坚固耐久、适应性强。它们的应用,使高层建筑、超高层建筑、大跨度桥梁及建(构)筑物、巨型水坝以及美丽多姿的公路、立交桥等具有特殊功能的建(构)筑物的出现成为可能,它对人们的日常生活和人类的文明产生了积极的影响。

水泥的应用已遍及工业和民用的各个方面并发挥了重要的作用,水泥工业是国民经济中不可忽视的一个产业。随着现代科学技术的发展,其他领域的新技术也必然会渗透到水泥工业中来,传统的水泥工业势必随着科学技术的迅猛发展而产生工艺变革和品种演变,应用领域也必将有新的开拓,故水泥在国民经济中将起到更为重要的作用。

## 1.5 水泥生产工艺流程

水泥的生产工艺流程,按生料制备方法的不同可分为干法与湿法两大类。原料经烘干、粉碎制成生料粉,然后喂入窑内煅烧成熟料的方法称为干法;将生料粉加入适量的水制成生料球,再喂入立窑或立波尔窑内煅烧成熟料的方法称为半干法,亦可归入干法。将原料加水粉磨成生料浆,再喂入回转窑内煅烧成熟料的方法称为湿法。近30多年来,国内外广泛采用,并已成为主流生产方式的是以窑外分解技术为核心,把现代科学技术和工业生产成就,如原料预均化、生料气力均化,新型烘干粉磨,各种新型耐热、耐磨、耐火材料,自动控制技术及各种节能技术广泛应用于水泥干法生产的全过程,使水泥生产具有高效、优质、低耗、符合环境要求和大型化、自动化的特征的现代水泥生产方法称为新型干法水泥生产。

20世纪50年代出现的悬浮预热窑,在20世纪60年代取得了较大发展,大大降低了熟料热耗。20世纪70年代出现的窑外分解技术,使熟料产量成倍提高,热耗也有较大幅度的下降。同时,生料的均化和原料预均化技术的发展,烘干兼粉磨设备的不断改进,使熟料质量进一步提高。冷却机热风用于窑外分解炉,窑废气用于原料及煤粉的烘干,以及成功地利用窑尾废气和窑头冷却机余热进行发电,使余热得到了比较充分的利用。近十年来,随着新型干法生产工艺的进一步优化,环境负荷的进一步降低,以及各种替代原燃料及废弃物的降解、利用,水泥工业正在以新型干法生产为支柱,向生态环境材料型产业转型。图1.1所示为水泥窑外分解干法生产的工艺流程。