

WUJI CAILIAO  
GONGYI JIAOCHENG

刘辉敏 主编

石冬梅 赵营刚 副主编

# 无机材料 工艺教程



化学工业出版社

刘辉敏 主编

石冬梅 赵营刚 副主编

# 无机材料 工艺教程



化学工业出版社

· 北京 ·

无机材料与建筑材料是经济建设不可缺少的物质基础,是国民经济发展的支柱。随着我国大批新的水泥、陶瓷和玻璃生产线的投入使用,各种新工艺、新技术和新装备不断涌现。本书综合了近年来水泥、陶瓷和玻璃行业的最新应用技术成果,分别介绍了水泥、陶瓷和玻璃的基本概念、分类、组成、原料及配料、生产过程与设备、性能和应用等方面的基本知识。

本书具有以下特点:内容全面、涉及面广、系统性强、易学易懂,密切联系生产实际和最新技术发展水平,着重介绍新工艺、新技术和新产品,便于相关人员自学。本书可供广大建材企业管理人员、技术人员和操作人员阅读和参考,也可以作为企业职工培训、继续教育的教学参考书,还可以作为建材类高等院校相关专业师生的教学参考书或教材。

主编 刘辉敏 副主编 关飞

# 无机材料工艺教程



图书在版编目(CIP)数据

无机材料工艺教程/刘辉敏主编. —北京:化学工业出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-122-24350-8

I. ①无… II. ①刘… III. ①无机材料-工艺-教材  
IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 135712 号

责任编辑:朱 彤  
责任校对:吴 静

文字编辑:冯国庆  
装帧设计:关 飞

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 装:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$  字数392千字 2015年9月北京第1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

# 前言

建筑材料是经济建设不可缺少的物质基础，建材工业是国民经济发展的支柱。近年来，我国建材工业得到迅猛发展，各种主要产品的产量多年来一直居于世界首位。随着我国工业化和城镇化进程的加快，建筑材料的消耗将继续保持较高水平，建材工业也将进入新的发展时期。为使建材工业实现“由大变强、靠新出强”的目标，就需要一大批素质较高并具有较宽知识面和较强适应能力的专业人才。因此，除了建筑材料专业人员之外，对于从事建筑材料生产的机械、电气、计算机、化学分析、管理和经贸等方面的相关人员，也应该对水泥、陶瓷和玻璃等最普通建筑材料的基础知识有所掌握和了解。

同时，随着我国大批新的水泥、陶瓷和玻璃生产线的投入使用，各种新工艺、新技术和新装备也不断涌现出来。虽然相关内容在专业性书籍中做了较为详尽的介绍，但对于在相关行业工作的广大非材料类人员来说，适合他们阅读的综合性和图书却没有及时跟上上述这些最新变化。鉴于此，编者综合了近年来水泥、陶瓷和玻璃行业的最新应用技术成果，以及编者多年的教学和实践经验编写了本书。全书共分三篇，分别介绍了水泥、陶瓷和玻璃的基本概念、分类、组成、原料及配料、生产过程与设备、性能和应用等方面的基本知识。本书具有以下特点：①内容全面、涉及面广、系统性强；②图表丰富、语言精练、条理清楚、信息量大、易学易懂；③密切联系当前工厂生产实际和技术发展水平，着重介绍新工艺、新技术和新产品；④通俗实用，便于相关人员自学。本书可供广大建材企业管理人员、技术人员和操作人员阅读和参考，也可以作为企业职工培训、继续教育的教学参考书，还可以作为建材类高等院校相关专业师生的教学参考书或教材。

本书由刘辉敏担任主编，石冬梅和赵营刚担任副主编。编写具体分工是：刘辉敏，第1章～第3章；茹晓红，第4章；赵营刚，第5章～第8章；刘明，第9章；石冬梅，第10章～第13章；吴武伟，第14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，在此表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2015年6月

# 目 录

## 第一篇 水泥工艺学 / 1

### 第 1 章 水泥生产概述 ..... 2

- 1.1 胶凝材料的定义和分类 ..... 2
- 1.2 水泥的定义和分类 ..... 2
- 1.3 胶凝材料 and 水泥发展简史 ..... 2
- 1.4 水泥的应用 ..... 3
- 1.5 水泥工业的发展 ..... 4
- 1.6 水泥生产工艺流程 ..... 5

### 第 2 章 水泥工艺原理 ..... 7

- 2.1 通用硅酸盐水泥的标准 ..... 7
  - 2.1.1 定义 ..... 7
  - 2.1.2 组分与材料 ..... 7
  - 2.1.3 强度等级 ..... 8
  - 2.1.4 技术要求 ..... 8
  - 2.1.5 判定规则 ..... 10
- 2.2 硅酸盐水泥熟料的组成 ..... 10
  - 2.2.1 熟料的矿物组成 ..... 10
  - 2.2.2 熟料的率值 ..... 14
  - 2.2.3 熟料矿物组成的计算 ..... 16
- 2.3 硅酸盐水泥原燃料及配料 ..... 18
  - 2.3.1 原料 ..... 18
  - 2.3.2 燃料 ..... 20
  - 2.3.3 生料易烧性 ..... 20
  - 2.3.4 熟料组成设计 ..... 21
  - 2.3.5 配料计算 ..... 22
- 2.4 硅酸盐水泥熟料煅烧原理 ..... 24
  - 2.4.1 生料在煅烧过程中的物理化学变化 ..... 25
  - 2.4.2 熟料形成的热化学 ..... 30
  - 2.4.3 矿化剂和微量元素对熟料煅烧和质量的影响 ..... 30
- 2.5 硅酸盐水泥的水化与硬化 ..... 32
  - 2.5.1 熟料矿物的水化 ..... 32
  - 2.5.2 硅酸盐水泥的水化 ..... 35

- 2.5.3 水泥的凝结硬化过程 ..... 37
- 2.5.4 硬化水泥浆体的组成与结构 ..... 38
- 2.6 硅酸盐水泥的性能 ..... 40
  - 2.6.1 凝结时间 ..... 41
  - 2.6.2 强度 ..... 43
  - 2.6.3 体积变化 ..... 44
  - 2.6.4 水化热 ..... 46
  - 2.6.5 粉磨细度 ..... 47
  - 2.6.6 其他性能 ..... 47
- 2.7 硅酸盐水泥的耐久性 ..... 48
  - 2.7.1 抗渗性 ..... 48
  - 2.7.2 抗冻性 ..... 49
  - 2.7.3 环境介质的侵蚀 ..... 50
  - 2.7.4 碱-集料反应 ..... 52
  - 2.7.5 耐久性的改善途径 ..... 54
- 2.8 掺混合材硅酸盐水泥 ..... 56
  - 2.8.1 混合材 ..... 56
  - 2.8.2 掺混合材硅酸盐水泥的生产 ..... 60
  - 2.8.3 掺混合材硅酸盐水泥的水化与硬化 ..... 61
  - 2.8.4 掺混合材硅酸盐水泥的性能与应用 ..... 61

### 第 3 章 水泥生产过程与设备 ..... 65

- 3.1 原料的开采与运输 ..... 65
  - 3.1.1 原料的开采 ..... 65
  - 3.1.2 矿石的装运 ..... 65
- 3.2 原燃料的破碎 ..... 66
  - 3.2.1 破碎工艺 ..... 66
  - 3.2.2 破碎机 ..... 66
- 3.3 原燃料预均化 ..... 67
  - 3.3.1 预均化原理和意义 ..... 67
  - 3.3.2 预均化堆场型式 ..... 67
  - 3.3.3 堆取料方式 ..... 68
  - 3.3.4 堆取料设备 ..... 69

|                         |    |                           |    |
|-------------------------|----|---------------------------|----|
| 3.4 原燃料的粉磨 .....        | 69 | 3.6.9 纯低温余热发电技术 .....     | 84 |
| 3.4.1 粉磨流程 .....        | 69 | 3.6.10 水泥窑协同处置可燃废弃物 ..... | 85 |
| 3.4.2 原燃料球磨系统 .....     | 70 | 3.6.11 水泥窑氮氧化物的减排 .....   | 87 |
| 3.4.3 原燃料立磨系统 .....     | 72 | 3.7 水泥的制成 .....           | 87 |
| 3.4.4 生料辊压机终粉磨系统 .....  | 74 | 3.7.1 水泥预粉磨系统 .....       | 87 |
| 3.5 生料的均化 .....         | 76 | 3.7.2 水泥终粉磨系统 .....       | 90 |
| 3.5.1 均化原理 .....        | 76 | 3.8 水泥的包装与储运 .....        | 91 |
| 3.5.2 均化库 .....         | 76 | 3.8.1 水泥储存与均化 .....       | 91 |
| 3.6 熟料的煅烧 .....         | 77 | 3.8.2 水泥包装与散装 .....       | 91 |
| 3.6.1 预分解窑煅烧过程 .....    | 77 | 3.8.3 水泥质检与发运 .....       | 92 |
| 3.6.2 旋风预热器 .....       | 78 |                           |    |
| 3.6.3 分解炉 .....         | 79 |                           |    |
| 3.6.4 回转窑 .....         | 80 |                           |    |
| 3.6.5 冷却机 .....         | 81 |                           |    |
| 3.6.6 煤粉燃烧器 .....       | 82 |                           |    |
| 3.6.7 烧成系统废气的降温处理 ..... | 83 |                           |    |
| 3.6.8 熟料的储存 .....       | 84 |                           |    |

## 第4章 水泥生产质量管理 ..... 93

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 4.1 原燃料的质量管理 .....       | 93 |
| 4.2 半成品的质量管理 .....       | 97 |
| 4.3 出厂水泥和水泥熟料的质量管理 ..... | 98 |
| 4.4 生产控制图表 .....         | 99 |

## 第二篇 陶瓷工艺学 / 101

### 第5章 陶瓷生产概述 ..... 102

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 5.1 陶瓷的概念与分类 .....     | 102 |
| 5.1.1 陶瓷的概念 .....      | 102 |
| 5.1.2 陶瓷的分类 .....      | 102 |
| 5.2 我国陶瓷技术发展概况 .....   | 103 |
| 5.3 陶瓷在现代化建设中的作用 ..... | 104 |
| 5.4 陶瓷生产工艺流程 .....     | 104 |

### 第6章 坯料及制备 ..... 106

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 6.1 坯用原料 .....          | 106 |
| 6.1.1 黏土类原料 .....       | 106 |
| 6.1.2 石英类原料 .....       | 111 |
| 6.1.3 长石类原料 .....       | 112 |
| 6.1.4 其他矿物原料 .....      | 113 |
| 6.2 坯料配料 .....          | 114 |
| 6.2.1 配料的依据 .....       | 114 |
| 6.2.2 坯料表示方法 .....      | 115 |
| 6.2.3 坯料配方计算 .....      | 116 |
| 6.3 坯料制备 .....          | 122 |
| 6.3.1 陶瓷坯料种类和质量要求 ..... | 122 |
| 6.3.2 可塑料的制备 .....      | 123 |
| 6.3.3 注浆料的制备 .....      | 126 |
| 6.3.4 压制粉料的制备 .....     | 128 |
| 6.4 成型 .....            | 128 |
| 6.4.1 可塑成型 .....        | 128 |
| 6.4.2 注浆成型 .....        | 132 |
| 6.4.3 压制成型 .....        | 135 |

### 第7章 釉及釉料制备 ..... 139

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 7.1 釉的作用与分类 .....       | 139 |
| 7.1.1 釉的作用 .....        | 139 |
| 7.1.2 釉的分类 .....        | 139 |
| 7.2 釉用原料 .....          | 140 |
| 7.3 釉层的形成 .....         | 141 |
| 7.3.1 釉料在加热过程中的变化 ..... | 141 |
| 7.3.2 釉层冷却时的变化 .....    | 142 |
| 7.3.3 坯釉中间层的形成 .....    | 142 |
| 7.4 釉的特点与性质 .....       | 142 |
| 7.4.1 釉的特点 .....        | 142 |
| 7.4.2 釉层的性质 .....       | 143 |
| 7.5 釉料制备与施釉 .....       | 145 |
| 7.5.1 釉料配料 .....        | 145 |
| 7.5.2 釉料制备 .....        | 147 |
| 7.5.3 施釉 .....          | 148 |
| 7.5.4 陶瓷的装饰 .....       | 149 |

### 第8章 干燥与烧成 ..... 152

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 8.1 干燥 .....                  | 152 |
| 8.1.1 干燥原理 .....              | 152 |
| 8.1.2 干燥方法 .....              | 154 |
| 8.1.3 干燥制度 .....              | 157 |
| 8.2 烧成 .....                  | 158 |
| 8.2.1 一次烧成与二次烧成 .....         | 158 |
| 8.2.2 陶瓷坯体在烧成过程中的物理化学变化 ..... | 158 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 8.2.3 烧成设备 .....     | 160 |
| 8.2.4 烧成制度 .....     | 163 |
| 第9章 陶瓷的显微结构与性质 ..... | 166 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 9.1 陶瓷的显微结构 ..... | 166 |
| 9.2 陶瓷的性质 .....   | 167 |

### 第三篇 玻璃工艺学 / 169

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第10章 玻璃生产概述 ..... | 170 |
|-------------------|-----|

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 10.1 玻璃的定义 .....       | 170 |
| 10.2 玻璃的分类 .....       | 170 |
| 10.3 玻璃发展历史 .....      | 171 |
| 10.4 玻璃的应用 .....       | 171 |
| 10.5 平板玻璃概况 .....      | 172 |
| 10.6 我国平板玻璃工业的发展 ..... | 172 |
| 10.7 浮法玻璃生产工艺流程 .....  | 173 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第11章 玻璃的结构与形成 ..... | 175 |
|---------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 11.1 玻璃态 .....       | 175 |
| 11.2 玻璃的结构 .....     | 176 |
| 11.2.1 晶子学说 .....    | 176 |
| 11.2.2 无规则网络学说 ..... | 176 |
| 11.3 玻璃的形成 .....     | 177 |
| 11.3.1 形成玻璃的条件 ..... | 177 |
| 11.3.2 形成玻璃的物质 ..... | 177 |
| 11.3.3 形成玻璃的方法 ..... | 179 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第12章 玻璃的性质 ..... | 180 |
|------------------|-----|

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 12.1 玻璃的黏度与表面张力 .....       | 180 |
| 12.1.1 玻璃的黏度 .....          | 180 |
| 12.1.2 玻璃的表面张力 .....        | 183 |
| 12.2 玻璃的力学性质 .....          | 184 |
| 12.2.1 玻璃的机械强度 .....        | 184 |
| 12.2.2 玻璃的弹性 .....          | 185 |
| 12.2.3 玻璃的硬度与脆性 .....       | 186 |
| 12.3 玻璃的密度 .....            | 186 |
| 12.3.1 密度的定义及工艺意义 .....     | 186 |
| 12.3.2 影响玻璃密度因素 .....       | 186 |
| 12.4 玻璃的热学性质 .....          | 187 |
| 12.4.1 热膨胀系数 .....          | 187 |
| 12.4.2 比热容 .....            | 188 |
| 12.4.3 导热性 .....            | 188 |
| 12.4.4 热稳定性 .....           | 189 |
| 12.5 玻璃的光学性质 .....          | 189 |
| 12.5.1 玻璃的折射率 .....         | 189 |
| 12.5.2 玻璃的光学常数 .....        | 190 |
| 12.5.3 玻璃的反射、散射、吸收和透过 ..... | 191 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 12.6 玻璃的着色与脱色 .....       | 191 |
| 12.6.1 玻璃的着色 .....        | 192 |
| 12.6.2 玻璃的脱色 .....        | 193 |
| 12.7 玻璃的化学稳定性 .....       | 193 |
| 12.7.1 玻璃的侵蚀机理 .....      | 194 |
| 12.7.2 影响玻璃化学稳定性的因素 ..... | 195 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第13章 玻璃生产工艺 ..... | 197 |
|-------------------|-----|

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 13.1 原料 .....            | 197 |
| 13.1.1 主要原料 .....        | 197 |
| 13.1.2 辅助原料 .....        | 199 |
| 13.2 原料的选用与处理 .....      | 201 |
| 13.2.1 原料的选用 .....       | 201 |
| 13.2.2 原料的处理 .....       | 201 |
| 13.3 配合料制备与料方计算 .....    | 202 |
| 13.3.1 配合料的质量要求 .....    | 202 |
| 13.3.2 玻璃组成设计 .....      | 203 |
| 13.3.3 料方计算 .....        | 203 |
| 13.3.4 原料的称量与混合 .....    | 205 |
| 13.4 玻璃的熔制 .....         | 205 |
| 13.4.1 玻璃的熔制过程 .....     | 205 |
| 13.4.2 影响玻璃熔制过程的因素 ..... | 208 |
| 13.4.3 玻璃熔窑 .....        | 209 |
| 13.5 玻璃的成型 .....         | 210 |
| 13.5.1 玻璃成型过程 .....      | 210 |
| 13.5.2 玻璃制品成型方法 .....    | 210 |
| 13.6 玻璃的退火与淬火 .....      | 211 |
| 13.6.1 玻璃的应力 .....       | 211 |
| 13.6.2 玻璃的退火 .....       | 212 |
| 13.6.3 玻璃的淬火 .....       | 213 |
| 13.7 玻璃的加工 .....         | 215 |
| 13.7.1 玻璃的热加工 .....      | 215 |
| 13.7.2 玻璃的冷加工 .....      | 215 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第14章 浮法玻璃及其深加工 ..... | 216 |
|----------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 14.1 浮法玻璃 .....      | 216 |
| 14.1.1 浮法玻璃的原料 ..... | 216 |
| 14.1.2 浮法玻璃的熔制 ..... | 217 |
| 14.1.3 浮法玻璃的成型 ..... | 220 |
| 14.1.4 浮法玻璃的退火 ..... | 222 |
| 14.1.5 浮法玻璃的切装 ..... | 222 |



# 水泥工艺学

## 第一篇

# 水泥工艺学

第1章 水泥生产概述 / 2

第2章 水泥工艺原理 / 7

第3章 水泥生产过程与设备 / 65

第4章 水泥生产质量管理 / 93

## 第 1 章

# 水泥生产概述

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，能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。沥青和各种树脂属于有机胶凝材料。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。水硬性胶凝材料掺水后，既能在空气中硬化，也能在水中硬化，通常称为水泥。非水硬性胶凝材料只能在空气中硬化，故又称为气硬性胶凝材料，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，也能在水中继续硬化，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,人类开始用火煅烧石灰、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。在此基础上,发展到用天然水泥岩(黏土含量 20%~25% 的石灰石)经煅烧和磨细制得天然水泥。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。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 水泥的应用

水泥是基本建设中最重要建筑材料。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;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。现在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,才出现高层、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,窑的形式和结构也都有了新的发展。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。

在生产企业、设计、科研和装备企业等单位的通力合作下,1996 年,海螺宁国水泥厂突破日产 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,我国水泥产量为 24.76 亿吨,新型干法水泥占总产量的 90% 以上。新型干法水泥的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。近几年,我国水泥总产量约占世界水泥总产量的 60%,经过几代人的努力,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,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、高强度等级、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。

# 1.6 水泥生产工艺流程

虽然水泥的种类很多，但通用硅酸盐水泥的生产和使用大约占世界水泥总产量的 95% 以上。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预分解窑。水泥的生产过程可概括为“两磨一烧”，即生料制备、熟料煅烧和水泥制成。如图 1-1 所示为预分解窑水泥生产线的工艺流程图，其过程如下。

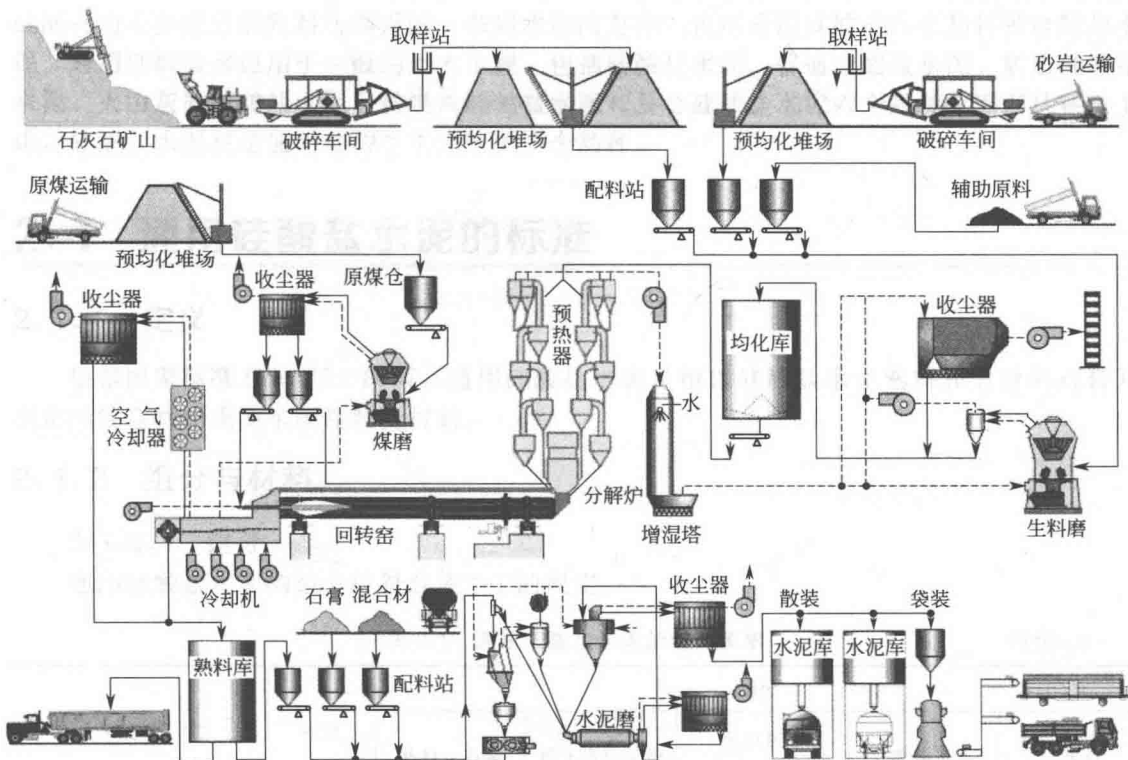


图 1-1 预分解窑水泥生产线的工艺流程图

(1) 生料制备 来自矿山的石灰石由自卸卡车运至工厂，经破碎后由皮带输送机送入石灰石预均化堆场；硅铝质原料和其他辅助原料经破碎后由皮带输送机送入辅助原料预均化堆场。预均化后的各种原料被分别送至配料站各自的储库，经配料计量后，喂入原料磨进行烘干和粉磨。烘干磨所用热气体由悬浮预热器排出的废气供给。出磨生料经收尘器收集后被送至生料均化库进行储存和均化。

(2) 熟料煅烧 均化后的生料从库底卸出，经计量后被送至窑尾悬浮预热器；预热后的生料再进入分解炉，使其中的碳酸盐发生分解；预热和分解后的物料进入回转窑，在高温下煅烧成熟料；最后，出窑熟料经冷却后被送至熟料库。回转窑和分解炉所用煤粉来自煤磨，

其制备过程与生料类似。

(3) 水泥制成 熟料、混合材和破碎后的石膏经计量后，送至水泥粉磨系统进行粉磨。粉磨后的水泥在水泥库中存放一段时间后，一部分经包装机包装为袋装水泥，经火车或汽车运输出厂；另一部分由散装专用车散装出厂。

不同规模和厂家预分解窑水泥生产线的工艺流程与其类似，所不同的主要是生产过程中的某些工序和设备。

图 1-1-1 为某水泥厂预分解窑水泥生产线的工艺流程图。该图详细描述了从原料（石灰石、粘土等）的破碎、配料、预分解、熟料烧成、冷却、混合材的加入、最终粉磨、包装或散装的完整过程。图中包含多个设备单元，如破碎机、磨机、预热器、回转窑、冷却机、包装机等，并通过箭头指示了物料和气体的流向。图例部分列出了图中各符号所代表的设备名称。

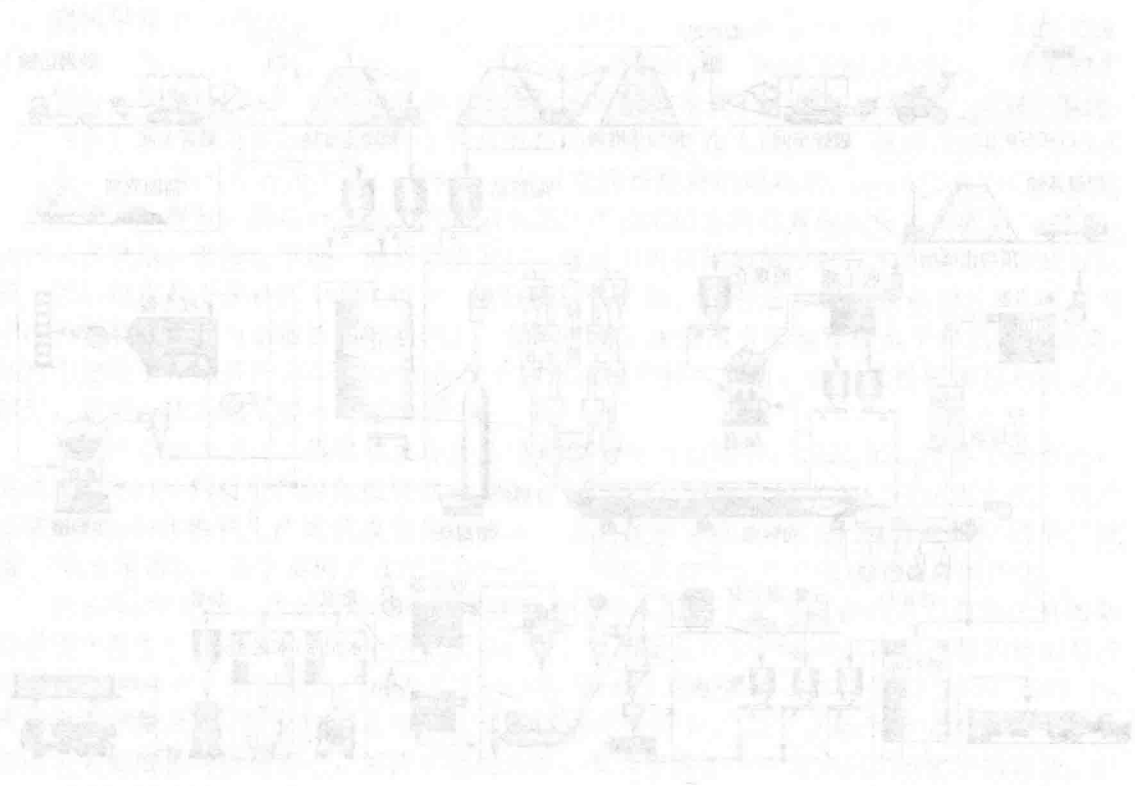


图 1-1-1 为某水泥厂预分解窑水泥生产线的工艺流程图。该图详细描述了从原料（石灰石、粘土等）的破碎、配料、预分解、熟料烧成、冷却、混合材的加入、最终粉磨、包装或散装的完整过程。图中包含多个设备单元，如破碎机、磨机、预热器、回转窑、冷却机、包装机等，并通过箭头指示了物料和气体的流向。图例部分列出了图中各符号所代表的设备名称。

## 第 2 章

# 水泥工艺原理

水泥的种类繁多,但目前应用较为广泛的是硅酸盐水泥。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。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。

## 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                | 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 | >5 且 ≤20 <sup>①</sup>  |                        |                        | —   |
| 矿渣硅酸盐水泥   | P·S·A | ≥50 且 <80 | >20 且 ≤50 <sup>②</sup> | —                      | —                      | —   |
|           | P·S·B | ≥30 且 <50 | >50 且 ≤70 <sup>②</sup> | —                      | —                      | —   |
| 火山灰质硅酸盐水泥 | P·P   | ≥60 且 <80 | —                      | >20 且 ≤40 <sup>③</sup> | —                      | —   |
| 粉煤灰硅酸盐水泥  | P·F   | ≥60 且 <80 | —                      | —                      | >20 且 ≤40 <sup>④</sup> | —   |

| 品种      | 代号  | 组分        |                        |         |            |
|---------|-----|-----------|------------------------|---------|------------|
|         |     | 熟料+石膏     | 粒化高炉矿渣                 | 火山灰质混合材 | 粉煤灰<br>石灰石 |
| 复合硅酸盐水泥 | P·C | ≥50 且 <80 | >20 且 ≤50 <sup>⑤</sup> |         |            |

① 本组分材料为符合本标准的活性混合材，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，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或符合本标准的非活性混合材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。

④ 本组分材料为符合 GB/T 1596 的活性混合材。

⑤ 本组分材料为由两种以上符合本标准的活性混合材或/和符合本标准的非活性混合材组成，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 由主要含  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的原料，按适当比例磨成细粉，烧至部分熔融，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。使用前应经过试验证明对水泥性能无害。

(3) 活性混合材 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。

(4) 非活性混合材 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；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应符合表 2-2 规定。

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<br>(质量分数) | 烧失量<br>(质量分数) | 三氧化硫<br>(质量分数) | 氧化镁<br>(质量分数)     | 氯离子<br>(质量分数)      |
|-----------|-------|---------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|
| 硅酸盐水泥     | P·I   | ≤0.75         | ≤3.0          | ≤3.5           | ≤5.0 <sup>①</sup> |                    |
|           | P·II  | ≤1.5          | ≤3.5          |                |                   |                    |
| 普通硅酸盐水泥   | P·O   | —             | ≤5.0          | ≤4.0           | ≤6.0 <sup>②</sup> | ≤0.06 <sup>③</sup> |
| 矿渣硅酸盐水泥   | P·S·A | —             | —             |                | —                 |                    |
|           | P·S·B | —             | —             |                |                   |                    |
| 火山灰质硅酸盐水泥 | P·P   | —             | —             | ≤3.5           | ≤6.0 <sup>②</sup> |                    |
| 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)

水泥中碱含量以  $w(\text{Na}_2\text{O}) + 0.658w(\text{K}_2\text{O})$  计算值表示。若使用活性集料,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 |      |
|------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
|                                    |       | 3 天   | 28 天  | 3 天  | 28 天 |
| 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、<br>火山灰质硅酸盐水泥、<br>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 |      |