

新型干法水泥生产工艺

马保国 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

新型干法水泥生产工艺/马保国主编. —北京: 化学工业出版社, 2006.10

ISBN 978-7-5025-9460-2

I. 新… II. 马… III. 水泥-生产工艺 IV. TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124283 号

新型干法水泥生产工艺

马保国 主编

责任编辑: 廖叶华

文字编辑: 丁建华

责任校对: 战河红

封面设计: 韩 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

购书咨询: (010)64518888

购书传真: (010)64519686

售后服务: (010)64518899

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 字数 590 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9460-2

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

水泥生产消耗大量不可再生资源 and 能源并对环境造成极大的破坏。2004 年我国水泥总产量达到 9.7 亿吨，每年的水泥生产耗电超过 800 亿千瓦时，煤耗占全国煤炭总产量的 10%，年消耗石灰石约 7.5 亿~9 亿吨，排放 CO₂ 近 7 亿吨、排放 SO₂ 和 NO_x 等有害气体数百万吨；另一方面，我国水泥产品的结构以 32.5 和 42.5 强度等级为主，水泥性能和混凝土的耐久性较差，混凝土工程结构常常建成 10 年或 20 年就开始大修甚至拆除重建、与其他先进国家的水平相差较大。同时，据不完全统计，我国煤炭、电力、化工等行业排出的各种废渣在 7 亿吨以上，粉煤灰、钢渣等都是量大、面广且利用率仍较低的大宗工业废渣。而大量废渣的堆积不仅占用良田，部分粉尘飘入大气中污染空气，其中某些重金属或少量放射性有毒物质可能经过雨水渗入地下污染水源等造成“二次”污染。因此，研究新型干法水泥生产工艺，实现水泥低环境负荷化和高性能化，已成为实现水泥工业可持续发展和循环经济发展的迫切任务。

本书大部分内容是编者所承担 863 计划项目（低环境负荷型水泥及胶凝材料关键制备技术：2002AA335050）的具体研究内容以及工业化生产实践。通过三年来的试验和工业应用，在水泥低环境负荷化方面形成了一系列具有自主知识产权的关键技术和技术装备。本书分为两篇，共 11 章，从新型干法水泥生产关键设备的发展趋势、水泥低环境负荷化和高性能化以及环境保护等方面探讨了新型干法水泥生产的一些理论和实践问题。由武汉理工大学马保国主编。参加编写的有：华新水泥股份有限公司李叶青，昆明理工大学李建锡。同时参与本书整理工作的有武汉理工大学博士研究生李相国、蹇守卫、穆松、潘伟、王文丰。全书由马保国统稿。

对为本书撰写专论和工程实例，使本书具有较好可操作性的专家、学者付出的辛勤劳动，表示诚挚的感谢。在研究编写本书过程中，华新水泥股份有限公司、中国建筑材料科学研究院、昆明理工大学、北京航空航天大学等单位在各方面给予了大力支持，谨致衷心谢意。

由于新型干法水泥生产工艺方面的问题涉及面广且复杂，随着我国水泥生产实践经验的不断积累和技术的不断进步，中国新型干法水泥生产进入了大型化和集约规模化快速发展时期，产业结构正在发生巨大变化和提升。为了适应新的发展形势和工程的要求，本书的内容将进一步得到完善和补充，希望同行予以支持和协作。

限于编写人员的水平与实践经验，书中难免有不妥之处，敬请广大读者指正，并希望通过交流切磋，共同推进新型干法水泥生产技术的进步。

作 者

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com 2006 年 6 月

目 录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 篇 新型干法水泥生产技术机理 | 1 |
| 第 1 章 悬浮预热系统的发展与工艺原理 | 3 |
| 1.1 预热器的发展 | 3 |
| 1.1.1 最早的旋风预热器专利 | 3 |
| 1.1.2 洪堡型旋风预热器 | 4 |
| 1.1.3 其他形式旋风预热器 | 5 |
| 1.1.4 逆流式立筒悬浮预热器 | 6 |
| 1.1.5 旋风悬浮预热器与逆流式立筒悬浮预热器比较 | 7 |
| 1.1.6 我国预热器开发及使用情况 | 7 |
| 1.2 预热器的工艺原理 | 8 |
| 1.2.1 悬浮预热器的功能与特点 | 8 |
| 1.2.2 旋风筒 | 9 |
| 1.2.3 换热管道结构和功能 | 16 |
| 1.2.4 影响旋风预热器换热因素分析 | 17 |
| 参考文献 | 20 |
| 第 2 章 分解炉 | 21 |
| 2.1 SF 系列分解炉 | 21 |
| 2.1.1 SF 分解炉 | 21 |
| 2.1.2 NSF 分解炉 | 23 |
| 2.1.3 C-SF 分解炉 | 23 |
| 2.1.4 我国 SF 分解炉发展情况 | 24 |
| 2.1.5 CDC 分解炉 | 24 |
| 2.2 日本川崎重工 KSV 分解炉系列 | 29 |
| 2.2.1 川崎重工 KSV 分解炉 | 29 |
| 2.2.2 N-KSV 分解炉 | 30 |
| 2.3 DD 分解炉 | 31 |
| 2.4 ILC 分解炉 | 34 |
| 2.4.1 分解炉的改造 | 34 |
| 2.4.2 改造后的分解炉性能评述 | 35 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3 窑内熟料结蛋原因分析及解决措施 | 35 |
| 2.5 RSP 分解炉系列 | 36 |
| 2.5.1 RSP 分解炉 | 36 |
| 2.5.2 RSP/F 分解炉 | 39 |
| 2.6 新型分解-预烧系统的研究与应用 | 41 |
| 2.6.1 高产、高稳定性预分解系统 | 41 |
| 2.6.2 劣质及无烟煤分解炉烧成装置 | 41 |
| 2.6.3 高原型煤种普适性水泥熟料循环煅烧系统（简称：循环预烧系统） | 44 |
| 参考文献 | 46 |

第 3 章 回转窑

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.1 回转窑的功能与发展 | 48 |
| 3.1.1 回转窑的功能 | 48 |
| 3.1.2 回转窑的发展过程 | 48 |
| 3.2 回转窑物料的煅烧进程 | 49 |
| 3.2.1 窑内物料填充率 | 49 |
| 3.2.2 窑的斜度 | 49 |
| 3.2.3 窑的转速 | 50 |
| 3.3 窑内物料负荷率、滞留时间与运动速度之间关系及计算方法 | 50 |
| 3.4 水泥回转窑安装验收规范 | 51 |
| 3.4.1 核对基础及基础划线 | 51 |
| 3.4.2 窑体轴线安装要求 | 52 |
| 3.4.3 传动装置安装要求 | 54 |
| 3.4.4 支承装置安装要求 | 54 |
| 3.4.5 砌砖前试运转时间 | 55 |
| 3.5 水泥回转窑用耐火材料 | 55 |
| 3.5.1 耐火材料的结构性能 | 56 |
| 3.5.2 水泥工业常用的耐火材料及发展 | 58 |
| 3.5.3 新型干法水泥窑对耐火材料的要求 | 61 |
| 3.5.4 新型干法水泥窑用耐火材料配套设计原则 | 63 |
| 3.5.5 窑衬升温要求及砌筑技术 | 64 |
| 3.6 水泥回转窑余热利用的途径 | 66 |
| 3.6.1 烟气余热的利用 | 66 |
| 3.6.2 熟料余热的利用 | 67 |
| 3.6.3 窑体散热损失的减少和散热的利用 | 67 |
| 3.6.4 工艺回收利用余热 | 67 |
| 3.7 水泥窑炉系统产量的理论分析 | 68 |
| 参考文献 | 72 |

第 4 章 冷却机

| | | |
|--------------------------------|---------------------|-----|
| 4.1 | 冷却机的分类与发展 | 73 |
| 4.1.1 | 熟料冷却机的分类与发展 | 73 |
| 4.1.2 | 冷却机的要求 | 74 |
| 4.1.3 | 冷却机的结构与工作原理 | 75 |
| 4.2 | 几种典型的冷却机的介绍及评价 | 87 |
| 4.2.1 | 富乐型水平推动算式冷却机冷却系统 | 88 |
| 4.2.2 | Claudius Peters 冷却机 | 90 |
| 4.2.3 | CP 冷却机的特点 | 91 |
| 4.2.4 | IKN 悬摆式冷却机 | 94 |
| 4.2.5 | NC 型高效推动算式冷却机 | 97 |
| | 参考文献 | 102 |
| 第 5 章 燃料燃烧器 | | 103 |
| 5.1 | 燃烧器的分类及其发展 | 103 |
| 5.1.1 | 燃烧器的分类 | 103 |
| 5.1.2 | 煤粉燃烧器的发展 | 104 |
| 5.2 | 燃烧器的工作原理 | 109 |
| 5.2.1 | 旋流燃烧器的旋流理论 | 109 |
| 5.2.2 | 速差射流煤粉燃烧器原理 | 111 |
| 5.2.3 | 煤粉燃烧器的稳燃技术 | 112 |
| 5.3 | 清洁燃烧与无烟煤燃烧技术 | 113 |
| 5.3.1 | 煤粉高效洁净燃烧技术及烟气净化技术现状 | 113 |
| 5.3.2 | 低污染燃烧技术 | 114 |
| 5.3.3 | 无烟煤燃烧技术 | 114 |
| | 参考文献 | 117 |
| 第 2 篇 新型干法水泥生产系统理论及工程研究 | | 119 |
| 第 6 章 低环境负荷型水泥熟料的制备技术 | | 121 |
| 6.1 | 原材料选择 | 121 |
| 6.1.1 | 石灰质原材料 | 121 |
| 6.1.2 | 黏土质原料 | 124 |
| 6.1.3 | 校正原料 | 126 |
| 6.1.4 | 晶种和矿化剂 | 127 |
| 6.1.5 | 微量元素 | 129 |
| 6.2 | 生料的易烧性 | 129 |
| 6.2.1 | 易烧性定义 | 129 |
| 6.2.2 | 影响生料易烧性的主要因素 | 130 |
| 6.3 | 熟料矿物组成和率值 | 130 |
| 6.3.1 | 熟料氧化物组成及作用 | 130 |

| | | |
|-------------------------------|--------------------------|-----|
| 6.3.2 | 熟料矿物组成 | 131 |
| 6.3.3 | 熟料率值 | 136 |
| 6.3.4 | 熟料矿物优化设计 | 139 |
| 6.4 | 低环境负荷水泥熟料体系设计理论基础 | 142 |
| 6.4.1 | 高活性钙理论 | 142 |
| 6.4.2 | 低燃值理论 | 143 |
| 6.4.3 | 矿化晶种理论 | 144 |
| 6.4.4 | 微量元素理论 | 144 |
| 6.4.5 | 低环境负荷水泥熟料配料体系 | 145 |
| 6.5 | 生料配比计算与配料专家系统 | 147 |
| 6.5.1 | 尝试误差法 | 148 |
| 6.5.2 | 微机算法 | 151 |
| 6.5.3 | 配料专家系统 | 152 |
| 6.6 | 低环境负荷型水泥熟料的制备与性能优化 | 162 |
| 6.6.1 | 活性钙工业废弃物制备熟料 | 162 |
| 6.6.2 | 低燃值煤矸石实验 | 167 |
| 6.6.3 | 晶种和矿化剂实验 | 170 |
| 6.6.4 | 微量元素实验 | 174 |
| | 参考文献 | 179 |
| 第7章 新型干法水泥系统结皮堵塞 | | 181 |
| 7.1 | 结皮的特征及其黏结力的研究 | 181 |
| 7.1.1 | 常见结皮区域分布特点 | 182 |
| 7.1.2 | 结皮料特性研究 | 182 |
| 7.1.3 | 结皮黏结力 | 185 |
| 7.2 | 硫碱盐挥发性及其循环规律 | 189 |
| 7.2.1 | 挥发组分循环的确定 | 189 |
| 7.2.2 | 还原气氛对挥发性的影响 | 194 |
| 7.3 | 影响结皮堵塞的因素及其防止措施 | 198 |
| 7.3.1 | 结皮堵塞对生产运行的影响 | 198 |
| 7.3.2 | 结皮形成因素及防治措施 | 198 |
| | 参考文献 | 202 |
| 第8章 预分解窑系统煤粉燃烧特性 | | 204 |
| 8.1 | 煤粉的分类与煤粉燃烧的影响因素 | 205 |
| 8.1.1 | 煤粉的分类 | 205 |
| 8.1.2 | 影响煤粉燃烧的主要因素 | 205 |
| 8.2 | 煤粉的燃烧特性研究 | 207 |
| 8.2.1 | 煤粉的热解特性 | 208 |
| 8.2.2 | 煤粉的着火特性和燃尽特性 | 209 |

| | | |
|----------------------------------|--|-----|
| 8.2.3 | 煤灰结渣特性研究 | 215 |
| 8.2.4 | 煤岩学研究 | 216 |
| 8.2.5 | 悬浮状态下煤粉的燃烧特性研究方法 | 217 |
| 8.3 | 煤粉在分解炉中的燃烧特性研究 | 218 |
| 8.3.1 | 分解炉中煤的着火特点 | 219 |
| 8.3.2 | 分解炉中煤的燃尽时间 | 222 |
| 8.3.3 | 分解炉内煤粉的燃烧动力学方程 | 223 |
| 8.3.4 | 分解炉内煤的燃烧过程的机理 | 225 |
| 8.3.5 | 分解炉内 CaCO_3 分解对煤粉燃烧的影响 | 226 |
| 8.4 | 预分解窑系统内煤粉燃烧过程 CFD 模拟 | 227 |
| 8.4.1 | 燃烧器-回转窑内煤粉燃烧模拟 | 227 |
| 8.4.2 | 分解炉内煤粉燃烧过程的数值模拟 | 240 |
| 8.5 | 水泥工业煤粉催化燃烧技术 | 243 |
| 8.5.1 | 催化剂在煤粉燃烧过程中的催化特性 | 244 |
| 8.5.2 | 煤粉催化燃烧技术研究进展 | 244 |
| 8.5.3 | 煤粉燃烧催化剂的作用机理 | 245 |
| 8.5.4 | 煤燃烧催化剂影响因素分析 | 246 |
| 8.5.5 | 煤燃烧催化剂研究的发展方向分析 | 247 |
| 8.6 | 水泥工业煤粉燃烧过程中 NO_x 的生成与控制技术 | 248 |
| 8.6.1 | NO_x 的形成机理 | 248 |
| 8.6.2 | NO_x 形成的影响因素及控制技术 | 249 |
| | 参考文献 | 253 |
| 第 9 章 低环境负荷型水泥的制备技术 | | 255 |
| 9.1 | 低环境负荷高性能水泥 | 255 |
| 9.1.1 | 低环境负荷高性能水泥的定义 | 255 |
| 9.1.2 | 低环境负荷高性能水泥的作用机理 | 255 |
| 9.1.3 | 生产低环境负荷高性能水泥的意义 | 256 |
| 9.2 | 低环境负荷高性能水泥组成设计 | 256 |
| 9.2.1 | 混合材料 | 256 |
| 9.2.2 | 组成设计 | 258 |
| 9.2.3 | 优化设计 | 273 |
| 9.3 | 低环境负荷高性能水泥各组分颗粒设计 | 287 |
| 9.3.1 | Horsfield 模型 | 287 |
| 9.3.2 | 粉体紧密堆积理论与胶凝材料合理级配 | 288 |
| 9.3.3 | 水泥颗粒级配与空隙率的关系 | 289 |
| 9.3.4 | 水泥基材料的颗粒分布 | 290 |
| 9.3.5 | 水泥颗粒级配对强度的影响 | 290 |
| 9.3.6 | 水泥基材料的微细化对水泥水化性能的影响 | 292 |
| 9.3.7 | 与水化程度相适应的最佳紧密堆积——水泥各组分颗粒设计的最新进展 | 293 |

| | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|-----|
| 9.4 | 低环境负荷高性能水泥的性能 | 304 |
| 9.4.1 | 水泥的物理力学性能 | 305 |
| 9.4.2 | 水泥的水化特性 | 313 |
| | 参考文献 | 326 |
| 第 10 章 生态环境评价 | | 329 |
| 10.1 | 典型水泥工艺流程介绍 | 330 |
| 10.1.1 | 立窑生产工艺流程 | 330 |
| 10.1.2 | 湿法生产工艺流程 | 331 |
| 10.1.3 | 新型干法生产工艺流程 | 332 |
| 10.2 | 典型水泥生产工艺的环境协调性评价 | 333 |
| 10.2.1 | LCA 的基本概念及方法 | 333 |
| 10.2.2 | 水泥生产工艺的环境评价 | 334 |
| 10.3 | 低环境负荷型水泥生产的环境评估理论体系 | 342 |
| 10.3.1 | 一次性资源的环境负荷评估 (石灰石减少量) | 342 |
| 10.3.2 | 一次性能源的环境负荷评估 | 345 |
| 10.3.3 | 污染物排放的生态环境评价 (二氧化碳减排量) | 348 |
| | 参考文献 | 351 |
| 第 11 章 水泥工业处理危险废弃物可行性研究 | | 353 |
| 11.1 | 危险工业废弃物的处理现状 | 354 |
| 11.1.1 | 堆放 | 354 |
| 11.1.2 | 填埋 | 355 |
| 11.1.3 | 焚烧 | 355 |
| 11.2 | 水泥回转窑处理危险工业废弃物现状 | 357 |
| 11.2.1 | 水泥回转窑处理废弃物的前提和优势 | 357 |
| 11.2.2 | 水泥回转窑可以处理的废弃物种类和处理方式 | 358 |
| 11.2.3 | 水泥回转窑处理废弃物的工艺过程 | 359 |
| 11.2.4 | 国内外利用水泥回转窑处理危险废弃物的现状 | 360 |
| 11.3 | 水泥回转窑处理废弃物时存在的问题 | 362 |
| 11.3.1 | 设备问题 | 362 |
| 11.3.2 | 氯的问题 | 362 |
| 11.3.3 | 二噁英的问题 | 362 |
| 11.3.4 | 废弃物中所含有的重金属元素在回转窑系统中的循环和收集问题 | 362 |
| 11.3.5 | 利用水泥回转窑处理废弃物的其他限制因素以及解决办法 | 363 |
| 11.4 | 水泥工业处理危险废弃物的环境影响评价 | 364 |
| 11.4.1 | 环境影响评价方法 | 364 |
| 11.4.2 | 水泥回转窑处理危险废弃物的环境影响评价 | 365 |
| | 参考文献 | 369 |

第1篇

新型干法水泥生产技术机理

1.1 预热器的的发展

新型干法水泥生产技术在 20 世纪 50 年代发展起来的新技术，到目前日本、德国等发达国家，以悬浮预热和预分解为核心的新型干法水泥熟料生产装备率占 95%。我国第 1 台悬浮预热及预分解窑于 1976 年投产。水泥干法生产有意义的发展是在窑尾预热器系统内，高度分散的生料在悬浮状态下进行气固热交换。其传热迅速，热效率高，单位容积较湿法窑产量大，热耗低。其原理有：旋风式、立筒式、涡式、轴流式、卧式等悬浮预热器。新型干法水泥生产技术发展的第一阶段为 20 世纪 50 年代初到 70 年代初，是悬浮预热技术诞生和发展阶段。第二阶段是 20 世纪 70 年代初至今，是预分解技术诞生和发展阶段。

1.1.1 最早的旋风预热器专利

最早申请生料悬浮预热器专利权的是丹麦的 M. 沃格尔·约根生 (M. Vogel. Jorgensen) 工程师在 1932 年 6 月 1 日向捷克斯洛伐克共和国布拉格的专利局提交“用细分散物料喂入回转窑的方法和装置”的专利申请书，于 1934 年 7 月 25 日获得专利证。

图 1-1 是该专利说明书上的示意图，说明四级旋风生料悬浮预热器的全部特征，这就是

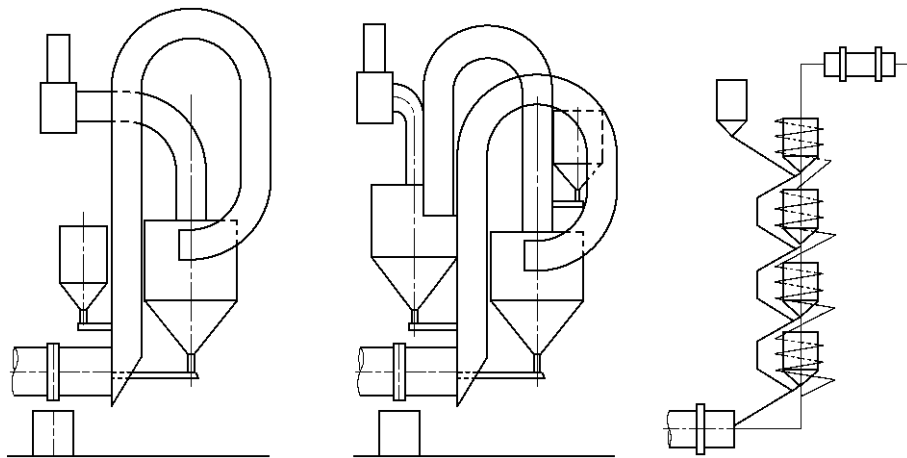


图 1-1 四级旋风预热器 (捷克专利说明书上的示意图)

现在新型干法生产最普遍采用的预热器。

1.1.2 洪堡型旋风预热器

上述专利概念，经历了 20 年，德国洪堡公司（Humboldt）的缪勒（F. Muller）改进的第 1 台洪堡型旋风预热器于 1951 年投入实际生产。洪堡型旋风预热器，是把生料的预热和部分分解由悬浮预热器来完成，代替回转窑部分回转筒体功能，达到缩短回转窑长度，同时使窑内以堆积滚翻状态进行气料热交换过程，转移到悬浮预热器内在悬浮状态下进行，使生料能够同窑内排出炽热气流充分混合，增大了气料接触面积，传热速度快，热交换效率高，达到提高窑系统生产效率，有利于降低熟料烧成热耗，见图 1-2。

洪堡型旋风预热器见图 1-3。生料由最上部一级旋风筒连接风管喂入，喂入量 1650g/kg 熟料。根据对四级旋风预热器的热工制度研究证明，80% 的热交换在连接风管中进行，只有 20% 的热交换在旋风筒中进行。

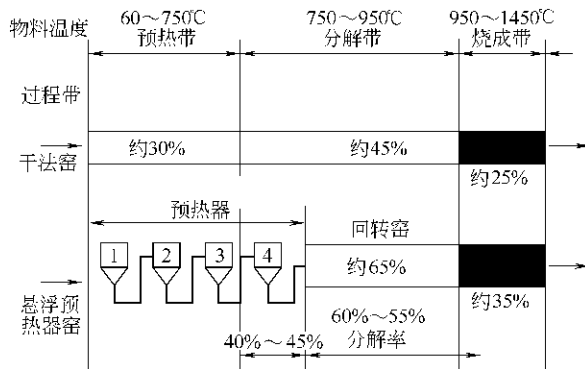


图 1-2 传统干法窑与悬浮预热器窑的比较

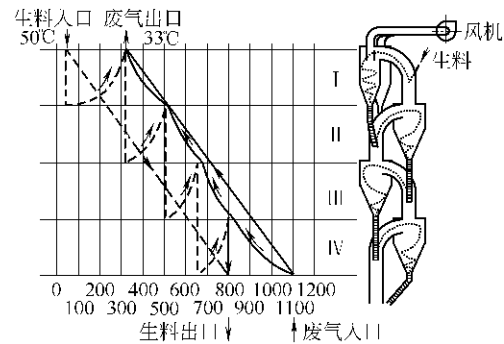


图 1-3 洪堡型旋风预热器

顶部 C₅ 级旋风筒及连接风管将含有 8.5% 水分的生料烘干，排出废气温度 330℃，废气中含生料量 80~115kg 熟料。

四级旋风预热器高度约 50m（从顶部喂料入口至回转窑进料口），气体和生料在连接风管中流速为 15~25m/s。生料在预热器中停留时间大约为 25s，生料停留时间为它在各级连接风管通过时间及在旋风筒内分离时间之和。在这段时间内，生料粉由 500℃ 预热至 800℃，而上升窑废气由 1100℃ 降至 330℃。

为了保证旋风预热器中下降生料与上升热气很好地进行热交换，要做到：

① 生料颗粒应尽可能均匀地分散到气流中，使每级连接风管中横断面的热传导状态最好，不希望生料颗粒聚集成股，否则会引起事故；

② 气流在上升连接管道中应产生湍流，才能使气体和生料间产生强烈的混合，这样才能产生理想的热交换状态；

③ 尽管在连接风管中气体与生料间热交换时间只要 0.1s 就足够，但为了更好地传热给生料，生料在预热器中应有足够的停留时间；

④ 各单位旋风筒连续地布置成高效逆流热交换系统，这种情况能产生最好的热交换；

⑤ 在整个预热器系统中，各个进口及出口处要尽量避免积灰，因为积灰会引起内部生料再循环而增加热损，同时积灰会严重降低单级旋风筒的分离效率，增加系统通风阻力。

洪堡型旋风预热器在1951年投入生产以后，在1959年美国福勒公司第一个购买了洪堡公司的制造专利，接着1960年日本石月岛重工、1961年法国菲弗公司、1963年印度ACC公司相继购买了该制造专利，甚至在专利权期满后仍然按该专利制造洪堡型旋风预热器。

1966年洪堡公司开发了大产量双系列旋风预热器系统（图1-4），该设计从窑进口起到第一级旋风筒，双系列的各单元级旋风筒都是完全独立的。这种设计思想也逐渐被其他水泥机械供货商接受。

1.1.3 其他形式旋风预热器

1.1.3.1 伯力鸠斯多波尔预热器

1959年伯力鸠斯公司才开始建造第一代多波尔旋风预热器，也设计成4级（图1-5，该公司习惯从下部开始排列旋风筒级别）。第二级是采用旋涡室，在旋涡室内使热气体和生料间产生逆流热交换。第一级和第三级都由平行布置的两个旋风筒组成，第四级根据生产能力大小可配置2个或4个旋风筒。发展这种双流式（顺流和逆顺热交换都有）预热器，由于它是双旋风筒的系统，对于很高产量的窑系统很适应，不需要采用几条平行工作预热器系列，又能达到更高分离效率。为了防止在双旋风筒系列中出现不对称的预热情况，将两股生料流入二级的旋涡室加强混合。这种多波尔预热器窑的生产能力可达7200t/d。日本三菱重工购买了多波尔预热器制造专利。

1.1.3.2 维达格型旋风预热器

维达格公司设计的预热器如图1-6所示，它同洪堡型预热器不同之处是热气流和生料流在一个级别单旋风筒与相邻级别双旋风筒中呈交错地通过。日本川崎公司购买了维达格型预热器专利。

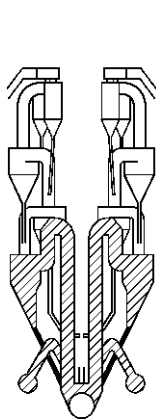


图 1-4 PYROCLON 双系列
旋风预热器

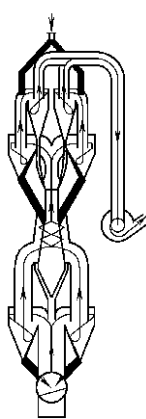


图 1-5 伯力鸠斯多
波尔预热器

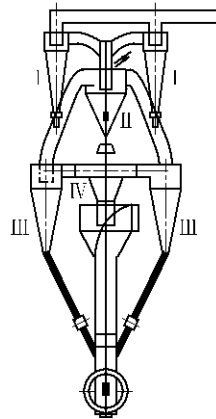


图 1-6 维达格型
旋风预热器

1.1.3.3 米亚格型旋风预热器

这种预热器（图 1-7）的特点是预热器最下一级是一个扩大的窑尾烟室，或称涡流室。在涡流室中一部分生料被上升的窑废气再一次带入第三级旋风筒。生料再循环延长了它在预热器的最热区域内的停留时间，强化了废气对生料传热。

设计者认为：第四级做成圆锥形立筒，与一般旋风筒比较，使最下一级进入窑的烟室横截面积由 0.5m^2 提高到 7m^2 。当生料含有较高的碱（ K_2O ， Na_2O ）或氯化物和硫化物情况下，会引起预热器系统中挥发分再循环，冷凝积聚在温度较低的烟室内结皮，造成堵塞引起运行故障。扩大烟室横断面可减少结皮堵塞事故，保持废气顺利通过烟室。

在 O&K 公司与米亚格公司合并后，由于 O&K 公司一般供应四至五级旋风预热器加旁路放风装置满足含碱量高的生料要求，故米亚格型旋风预热器也同样从市场上消失。

1.1.3.4 丹麦史密斯公司旋风预热器

虽然丹麦 M. 沃格尔·约根生早在 1932 年在捷克申请了旋风预热器专利。但是史密斯公司到 1967 年止，在世界各地建造的回转窑仍然采用湿法或干法长窑。直到 1969 年初史密斯公司在瑞典的斯魁德水泥厂建造的四级预热器才投产，该预热器具有传统旋风预热器的特征。

1.1.4 逆流式立筒悬浮预热器

前面谈到旋风预热器，对于每一级来说，生料和热气流在连接风管及旋风筒中的热交换是顺流式，即按分段顺流原理工作。或者有一级是采用逆流的涡流室工作。

在本节谈到的逆流式立筒悬浮预热器，则几乎各级都采用逆流热交换，最上一级为从热气流中分离生料采用双旋风筒与连接风管。

1.1.4.1 克虏伯-伯力鸠斯公司克波尔逆流悬浮预热器

该预热器如图 1-8 所示，其最上面 5 级是旋风筒与连接风管，它的下部 1~4 级是把立筒分成四个钵，每个钵下部缩口装有分散圆锥体，使下降生料均匀分散，同时两钵间缩口使热气流速度增高，将生料喷腾向上，使生料在钵中呈悬浮状态，增加生料在钵中停留时间，增进传热。

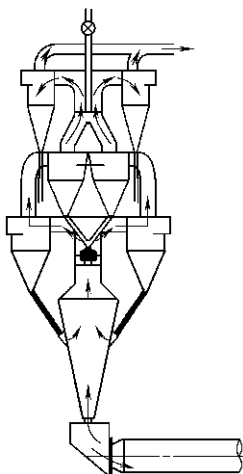


图 1-7 米亚格型旋风预热器

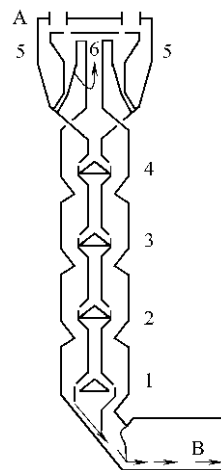


图 1-8 克波尔逆流悬浮预热器的纵剖面

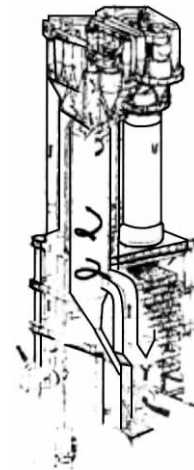


图 1-9 普列洛夫逆流悬浮预热器布置图

1.1.4.2 捷克普列洛夫逆流悬浮预热器

如图 1-9 所示，它由一个逆流热交换的立筒及两级旋风筒组成。最高一级旋风筒作收尘用，降低预热器系统排出废气中含尘率。较低一级旋风筒用于生料预热再循环，它们收下生料送到立筒顶部扩散圆锥体上，使生料沿着圆锥体圆周均匀分散下降。窑废气切向导入立筒中作螺旋形向上运动，与下降生料产生湍流进行热传导。本预热器无胀缩结合部，漏风量小，结构简单，气体阻力损失小。

1.1.5 旋风悬浮预热器与逆流式立筒悬浮预热器比较

如前所述，逆流式立筒悬浮预热器由于结构简单，气体阻力小，适合含碱、氯、硫高的生料，不容易堵塞，不用设旁路；不存在胀缩连接问题、漏风量少；立筒是自承重结构，因此土建投资费用较小。但逆流式立筒悬浮预热器具有决定性的热工缺点，生料只能以股状形式由一钵降至另一钵，气料的热交换很差。以致立筒分离生料效率远低于旋风筒，因此立筒预热器气料热交换效率远低于旋风预热器，故在国际市场上，立筒预热器逐渐消失。

1.1.6 我国预热器开发及使用情况

世界上悬浮预热器在 20 世纪 50 年代初和 70 年代初是蓬勃发展期，在这期间我国水泥工业受到当时苏联及丹麦史密斯公司的影响，走湿法长窑大型化的道路，在 20 世纪 60 年代以后直至 70 年代末，由于技术上闭关自守，仍然走湿法窑大型化的道路。

当然也投入很小一部分力量，研究设计旋风预热器窑和立筒预热器窑，而这小部分力量又以研究适合小型水泥厂立筒预热器窑为主，因此研究设计旋风预热器窑的力量微乎其微。

例如中国建筑材料科学研究院搞的太原旋风预热器窑，以及水泥工业设计研究院搞的山东试验厂，由于预热器规模小，特别易堵，加上投入力量小，生产一直不正常。

而当时建材部发展水泥工业的指导思想是发展小型水泥厂为主，全民办水泥工业。当时建设了数以千计机械立窑厂的同时，也建立了一些小型立筒预热器窑，由于它的熟料质量略高于机械立窑熟料，以及不易堵，因此小型立筒预热器窑得到一定发展。当时曾在青海水泥厂建了 1 台当时国内最大的 $4\text{m} \times 60\text{m}$ 立筒窑，由于生料在立筒中成股下降，气料热交换不好，使该窑产量仅为 25% 左右，其产量只是同规格旋风预热器窑产量的 1/2，且事故不断，所以后来再也没有建这种规格的立筒预热器窑。

1987 年江苏邢江水泥厂引进了日本水泥公司的五级旋风预热器，由于其技术经济指标先进，逐步取代了立筒预热器。

改革开放后，中国水泥工业焕发新春。此时世界水泥工业已经走过以旋风预热器窑干法生产水泥熟料为主要的时代，而且日本率先开创以预分解新型干法生产水泥熟料的时代。

因此，中国建材部决定同日本三家主要水泥机械制造商（石川岛、三菱、川崎）进行技术交流。首先决定冀东水泥厂引进石川岛的 SF 分解炉预热器窑 4000t/d 熟料生产线，然后宁国水泥厂引进了三菱的 MFC 分解炉预热器窑 4000t/d 熟料生产线等。

当然在这之前水泥工业设计研究院 1976 年在吉林四平市石岭水泥厂 $2.4\text{m} \times 40\text{m}$ 窑上进行窑外分解烧油中间试验，1979 年建材部对本溪 $\phi 3.7\text{m} \times 53\text{m}$ 窑烧煤窑外分解工业试验进行了技术鉴定。而水泥工业设计研究院在引进日本 4000t/d 窑外分解生产线的同时，承担了江西水泥厂 2000t/d RSP 分解炉新型干法生产线全套工艺及设备的设计、配套及调试工作，并取得成功。之后，国内各大水泥工业设计研究院在引进消化吸收的基础上相继成功开发出

自己的预热预分解系统。成都建筑材料工业设计研究院（CDI）开发的 CDC 预分解系统由 CNC 旋风预热器和 CDC 分解炉构成。CNC 旋风预热器属低阻型旋风预热器，其系统阻力损失控制在 4500Pa 以内，截面风速控制在 5m/s 左右，旋风筒蜗壳采用三心 270°特殊曲线，进口形式采用等角度变高度的切角型进口蜗壳，以顺应筒内气流及物料的运动需要，从而降低了阻力损失，提高了分离效率。该预热器在该院设计的工程中得到广泛的应用，并表现出良好的性能和优势。

1.2 预热器的工艺原理

1.2.1 悬浮预热器的功能与特点

悬浮预热器（SP）的主要功能在于充分利用回转窑及分解炉内排出的炽热气流中所具有的热焓加热生料，使之进行预热及部分碳酸盐分解，然后进入分解炉或回转窑内继续加热分解，完成熟料烧成任务。因此它必须具备使气固两相能充分分散均布、迅速换热、高效率分离等三个功能。只有具备这三个功能，并且尽力使之高效化，方可最大限度地提高换热效率，为全窑系统优质、高效、低耗和稳定生产创造条件。

各种悬浮预热器的不同特性，主要取决于它的结构及换热方式。构成各种悬浮预热器的热交换单元设备有旋风筒（包括连接管道）及立筒（蜗室）两种，所有悬浮预热器窑都是由这两种热交换单元设备中的一种单独或混合组成。悬浮预热器主要有旋风预热器及立筒预热器两种。现在立筒预热器已趋于淘汰。预分解窑采用旋风预热器作为预热单元装备。

由旋风筒及其连接管道组成的热交换单元设备，属于化学工业中流化床的一种，即稀相输送床。在每一级热交换单元中，生料颗粒总是从本级旋风筒及下一级旋风筒之间的连接管道的近下一级旋风筒出口处的上升管道区段中加入，并随即被撒料装置分散，首先被气流携带作加速运动，而后进入等速阶段。在加速段，随着生料粉颗粒被加速，气流与颗粒间相对速度不断减小，对流传热系数也不断减小；在等速段，由于气固相相对速度稳定，对流传热系数也基本保持恒定。但无论在加速段或等速段，随着热交换的进行，气流和粉粒间的温差不断减小。许多研究成果表明：在稀相输送加热管道中，由于它在加速段的起始区，由于气固两相具有对流系数大、换热面积大和温差大的特点，故换热效率很高。也就是说，在以旋风筒及其连接管道组成的热交换单元设备中，生料粉与高温气流的换热，主要发生在连接管道之中（而不是旋风筒之中），而在管道中进行的热交换又主要发生在生料颗粒的加速运动段的起始区。至于旋风筒本身在热交换单元中所起的作用，许多理论研究及实践证明，它的主要任务在于气固分离。

由立筒组成的热交换单元设备，也系化学工业中流化床的一种。在立筒预热器中，物料与气流主要进行逆流热交换。为了强化热交换，要求料粉高度分散，以增加传热面积。但从料粉与气流逆流运动的要求来看，料粉又必须聚集成较大的团块颗粒。否则，大部分小于 90 μm 的生料颗粒在 2~3m/s 的操作风下是无法沉降的（90 μm 颗粒的沉降速度仅 0.5m/s 左右）。因此在立筒中的每一个钵室内，料粉应该是既有分散的同流运动，也有逆流的宏观效果。立筒内的气固热交换及逆流输送功能，只有在结构设计合理、生产操作适当的条件下才能兼备。

由上可见：无论是以旋风筒为主或以立筒为主组成的悬浮预热器，都是由多级换热单元

组成的。多级换热的目的在于提高预热器的热效率。因为从热力学第一定律出发，即使在良好的换热条件下，气固换热总是有个限度，单级换热不利于热气流中热焓的有效利用；从热力学第二定律出发，换热温差愈大，固有焓损失愈大，焓效率愈低，只有在理想状态下等温换热才能没有焓损失。因此，开发一个新工艺、新过程，既要从提高换热效率及焓效率出发，力求采用具有更多换热单元的预热器系统，减少各级的换热温差；在实际工作中也必须考虑各种具体情况（如燃料及电价、基建投资等），确定预热器的级数，综合权衡，才能获得最佳的技术经济效益。

1.2.2 旋风筒

1.2.2.1 旋风筒的功能与机理

旋风预热器的功能在于物料在炽热气流中的分散、均布、气固换热和分离。其性能优劣主要表现在是否具有较高的换热效率、分离效率，较低的阻力和良好的密闭性能以减少内、外漏风等。旋风预热器系由旋风筒及上、下两级旋风筒间的连接管道所组成。旋风筒本体的组成部分有圆柱体、圆锥体、进口管道、出口管道、内筒及下料管等。连接管道（或称换热管道）上部与上级旋风筒进口管道、下部与下级旋风筒出口管道相连接；中间适当部位有上级旋风筒的下料管与之连接；在上级旋风筒下料管内的适当部位装设有锁风阀，作用在于既保持上级旋风筒分离出的生料能够畅通地通过进入换热管道，又能最大限度地防止下级旋风筒出来的热气流经下料管短路窜入上级旋风筒，造成已被分离的生料粉二次飞扬，降低上级旋风筒的分离效率；在上级旋风筒下料管最下部与换热管道的连接部位还设有撒料装置，目的在于使上级旋风筒下来的生料粉进入换热管道时，由于重力作用冲在撒料器上飞溅起来，使生料粉能够迅速分散、均布在下级旋风筒出来的热气流之中，提高换热效率。

追根溯源，作为旋风预热器的主要组成部分的旋风筒，是在普通的旋风收尘器的基础上借鉴发展过来的。两者的共同点在于保持低压损状态下能具有较高的气固分离效率。而不同点则在于，旋风收尘器不具备换热功能，而应具备尽可能高的气固分离功能；而对旋风预热器中的主要设备——旋风筒来讲，由于它是由多级换热单元所组成，物料系由多级预热单元逐级加热，因此只要保持其给定的气固分离效率和一定的换热作用即完成了应有的任务。所以它在旋风预热器系统中，视所在的不同预热器级别，具有不同的气固分离效率目标，而其本身结构亦有差异。

对于含尘气流在旋风筒中的受力情况及运动的基本公式已做过专题研究，故不赘述。此外，许多学者也通过理论分析和科学试验，力求寻找影响旋风筒阻力系数及分离效率的简化经验公式，如：计算阻力系数的 Shepherd 和 Lapple 计算式、Barth 计算式、Stairmand 计算式及计算分离效率的 Sproull 计算式、Leith 和 Lieht 计算式等。理论分析及科学实验均说明，影响旋风筒流体阻力及分离效率的因素主要有两个，一是旋风筒的几何结构，二是流体本身的物理性能。由于用于水泥工业悬浮预热装置的旋风筒，其所处理的含尘气流的物理性能大致确定，故现仅利用对其理论研究和科学试验的成果，对旋风筒结构设计及影响其性能的主要技术参数的选取进行讨论。

1.2.2.2 旋风筒的直径

旋风筒的结构，以圆柱体及圆锥的设计最为重要，由于它们的尺寸及其比例不同而构成不同类型的旋风筒。在旋风筒各部尺寸的设计中，又大多以圆柱筒体部分的直径 D 为基础，因此要首先确定它的尺寸。对其计算，一般有以下几种方法。