

水泥窑外分解技术

余立毅 刘述祖

中国建筑工业出版社



水泥窑外分解技术

余立毅 刘述祖

一九八三年七月八日

中国建筑工业出版社

应用悬浮预热、分解原理的水泥窑外分解技术，是七十年代诞生的新的工艺技术。本书概述了窑外分解窑（预分解窑）的工作原理、分类及其优越性；综合分析了悬浮预热器、分解炉、回转窑的工艺、热工特性；对各主要类型预分解窑的特点、结构、工艺参数及其优缺点作了简介；还叙述了预分解窑的操作原理、工艺设计及用窑外分解技术改造老厂等内容。

本书可供水泥专业的科研、设计、生产和管理人员参考，也可作为水泥专业高等和中等学校的教学参考用书。

水泥窑外分解技术

余立毅 刘述祖

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：10 字数：223千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

印数：1—4,900册 定价：1.05元

统一书号：15040·4458

前 言

现代水泥工业新技术——窑外分解工艺，在六十年代处于研究阶段，当在七十年代初期出现时，它所创造的高效能吸引着人们的注视，也趋使我们从理论上分析综合国内外窑外分解的技术资料，探讨窑外分解技术的实质问题，写了这本书。本书的编写遵循以下原则：

第一，对于窑外分解技术的理论问题，力求联系科学实验和生产实际，从化学动力学、流体力学、热工学等基本原理的有关观点，作出理论性的阐述和探讨。将窑外分解技术置于水泥窑发展的过程中来分析烧成工艺技术发展的规律性。

第二，对于有争论的技术问题，客观地引用有代表性的论点，同时也通过分析表达我们的观点。

第三，对已有的各种不同的预热器窑和正在发展的各种窑外分解系统，分析其异同，比较其长短。并且从全窑流程与分解炉的工艺特点相结合的观点出发，对各种预分解窑进行分类和作系统的介绍。

第四，着重介绍了烧煤分解炉和煤矸石利用问题，探讨了煤粉在分解炉内燃烧的理论问题。还讨论了在老厂技术改造中，应用窑外分解技术等问题。

本书的全部内容和论点都是我们共同研讨和商定的，但在编写上有所侧重。第二、六、九章主要由余立毅编写，第三、七、八章主要由刘述祖编写，其余各章为共同编写。

本书曾请钮一民、王进甲同志审阅，他们提出了许多宝贵意见。乔龄山同志为本书提供过许多国外技术资料。谨致深切的谢意。

由于窑外分解技术仍处于发展中，其理论方面的研究，国内外均处于初期阶段。我们编写时间又较短促，缺点和错误自属难免，殷切地期望大家给予批评指正。

余立毅 刘述祖

1982年2月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 窑外分解工艺的技术原理	1
第二节 分解炉的构造及预分解窑的生产流程	5
一、分解炉的构造	5
二、预分解窑的生产流程	6
第三节 预分解窑的分类	8
一、按分解炉内气流及物料运动特征分类	8
二、按入炉空气及窑气流程分类	11
三、预分解窑的组合分类	17
第四节 预分解窑的优点和存在的问题	19
一、预分解窑的优点	19
二、预分解窑存在的问题	23
第二章 悬浮预热器	25
第一节 概述	25
一、悬浮预热器简史	25
二、悬浮预热器的作用和原理	26
第二节 各种悬浮预热器简介	27
一、四级旋风预热器	27
二、立筒预热器	28
三、旋风-立筒型预热器	32
四、数个不同规格的旋风筒组成的预热器	35
第三节 悬浮预热器的传热速率、升温系数及热效率	35
一、传热速率	35
二、升温系数	38

三、预热器的热效率	39
四、旋风预热器与立筒预热器的分析	41
第四节 悬浮预热与窑外分解技术	45
第三章 分解炉的工艺特性	47
第一节 生料中碳酸盐分解反应的特性	47
一、碳酸钙分解反应的特点	47
二、碳酸钙的分解机理	47
三、碳酸钙分解温度与 CO_2 分压的关系	48
四、分解炉中分解温度与 CO_2 分压的关系	50
第二节 碳酸钙颗粒的分解过程	53
一、分解过程的分析	53
二、影响分解炉内分解过程的主要因素	55
第三节 分解炉中料粉粒径与分解时间、分解温度的关系	60
一、生料的颗粒分布	60
二、特征粒径 D' 的料粉分解所需时间的计算	62
三、分解炉中料粉颗粒的分解时间	64
第四节 料粉颗粒群的分解时间	68
一、生料粒级质量变化与筛余变化的关系	68
二、物料整个颗粒群的平均分解率的推导	69
三、料粉平均分解率与分解时间系数的关系	71
第四章 分解炉的热工特性	75
第一节 分解炉内燃料的燃烧	75
一、分解炉内的燃烧特点	75
二、分解炉内的温度分布	77
三、分解炉内的燃烧速度	78
四、分解炉的容积热负荷与生产强度	80
第二节 分解炉内的传热	82
一、分解炉内的传热特性	82
二、悬浮态传热高效率的关键	84

第三节	分解炉内气体的运动	86
一、	对气体运动的要求	86
二、	分解炉内气体运动速度的分布	87
三、	气流在分解炉内的运动阻力	88
第四节	分解炉中的旋风效应与喷腾效应	92
一、	旋风效应	92
二、	喷腾效应	93
三、	旋风或喷腾效应对料粉分解的影响	95
四、	旋风或喷腾效应对燃料燃烧的影响	97
五、	旋风或喷腾效应对颗粒均匀性及浓度均匀性的影响	98
六、	影响旋风、喷腾效应的因素	99
第五节	料、煤粉的悬浮及含尘浓度	101
一、	料、煤粉均匀悬浮的意义	101
二、	料粉颗粒的沉降速度与悬浮速度	101
三、	分解炉、预热器中料粉悬浮的改进措施	106
四、	适宜含尘浓度的确定	108
第六节	分解炉的热工制度与操作要点	114
一、	分解炉的热工制度	114
二、	分解炉的操作要点	115
第五章	预分解窑的性能	116
第一节	回转窑内的工艺带及工艺反应	116
一、	工艺带的划分	116
二、	物料在窑内的工艺反应	117
第二节	窑内物料受热反应的热效应	119
第三节	预分解窑的热工性能	122
一、	预分解窑内的燃料燃烧及长高温带	122
二、	预分解窑的热负荷	124
三、	预分解窑内的物料运动	126
四、	预分解窑内的传热	128

五、预分解窑的发热能力及产量指标	131
第四节 预分解窑的操作特点	134
第六章 各类预分解窑简介	138
第一节 旋流式分解炉窑	138
一、旋流式分解炉窑的流程、结构及工艺参数	138
二、对旋流式分解炉窑的分析	141
三、旋流式分解炉窑的类别与发展	142
第二节 喷腾式分解炉窑	146
一、喷腾式分解炉窑的流程、结构及工艺参数	146
二、对喷腾式分解炉窑的分析	147
三、双系列预热器喷腾式分解炉窑系统	148
四、喷腾式DD型分解炉窑	149
第三节 旋流-喷腾式分解炉窑	151
一、RSP型分解炉窑	151
二、对RSP型分解炉窑的分析	155
三、旋流-喷腾式分解炉窑的类别	157
第四节 悬浮式分解炉窑	163
第五节 沸腾式分解炉窑	164
第六节 立筒预热器窑外分解系统	170
一、ZAB型立筒预热器窑外分解系统	170
二、昆山立筒预热-分解装置	171
第七章 预分解窑的操作	175
第一节 预分解窑的点火方法	175
一、旋流式分解炉与回转窑的点火方法	175
二、旋流-喷腾(RSP)式分解炉与窑的点火方法	176
三、旋流-喷腾(KSV)式分解炉与窑的点火方法	177
第二节 预分解窑的正常操作	177
一、操作要求	177
二、回转窑的正常操作	178

三、分解炉的正常操作	179
第三节 系统温度的调节与控制	182
一、预分解窑系统温度控制的一般范围	182
二、温度高低对生产的影响	182
三、分解炉的温度调节与控制	186
第四节 燃料需要量的控制	189
一、入炉燃料量的控制	189
二、分解炉燃料需要量的计算	191
三、窑、炉燃料消耗量的比例	191
四、燃料需要量与分解温度及过剩空气系数间的关系	192
五、燃料需要量与预热分解的热效率及 空气过剩系数间的关系	195
第五节 通风及喂料量的调节与控制	196
一、通风量对分解炉工作的影响	196
二、影响通风的因素	197
三、窑、炉二系统的通风平衡与干扰	197
四、喂料量的控制	199
五、分解炉内风、煤、料的定比配合	200
第六节 系统的结皮与堵塞	201
一、原、燃料中碱、氯、硫对结皮的影响	202
二、温度变化对结皮的影响	206
三、防止结皮、堵塞的措施	208
四、预分解窑的旁路系统	209
第七节 物料分解率及其测定方法	213
一、物料中碳酸钙的分解率	213
二、物料中CO ₂ 含量的测定方法	214
三、容积增量法测定CO ₂ 含量	217
第八章 预分解窑的工艺设计	218
第一节 预分解窑设计的特点与要求	218

一、回转窑	218
二、分解炉	218
三、预热器	219
四、回转窑、分解炉、预热器间的配合	219
第二节 回转窑的工艺设计计算	220
一、回转窑规格的计算	220
二、回转窑的转速及功率	227
三、风机的计算与选型	228
四、冷却机的选型	234
第三节 分解炉的计算	236
一、分解炉规格的计算	236
二、分解炉附属设备的设计	242
第四节 悬浮预热器的选型	243
一、旋风预热器的操作参数	244
二、旋风预热器的工作风量	245
三、旋风筒规格的确定	248
四、旋风筒的选型及尺寸	249
五、立筒式悬浮预热器	257
六、预热器、分解炉设计注意事项	257
第五节 工艺设计计算示例	259
一、概况	259
二、工艺计算依据	260
三、单位烟气量的计算	262
四、系统各部烟气量的计算	263
五、设备选型设计	267
六、热平衡表及分析比较	274
七、工艺布置	275
第六节 设计参数与参考系列	277
第九章 窑外分解技术与老厂改造和低质燃料利用	282
第一节 概述	282

一、老厂技术改造的意义和趋势	282
二、用窑外分解技术改造旧窑的方法	284
第二节 用窑外分解技术对湿法厂进行技术改造的实例	285
一、采用窑外分解技术改建的干法生产线的流程和主要设备	286
二、旧湿法窑的利用	289
第三节 用窑外分解技术对于干法长窑进行技术改造的实例	290
第四节 悬浮预热器窑的技术改造	292
第五节 其他窑型的技术改造	293
一、立波尔窑的技术改造	293
二、余热锅炉窑的技术改造	294
三、部分立窑厂的技术改造	295
第六节 低质燃料的利用	296
一、低质燃料概况和利用低质燃料的意义	296
二、分解炉利用低质燃料的条件	298
三、分解炉利用低质煤的一般措施	301
四、分解炉利用低质煤的方式	302
第七节 分解炉利用低质燃料的经验	303
一、烧油页岩的窑外分解系统	303
二、MFC型分解炉利用煤矸石的经验	306

第一章 绪 论

第一节 窑外分解工艺的技术原理

窑外分解煅烧技术通常是指在悬浮预热器与回转窑之间增设一个分解炉，或利用窑尾垂直烟室、管道，在其中加入30~60%的燃料，使燃料的燃烧放热过程与生料的吸热分解过程同时在悬浮态或流化态下极其迅速地进行，生料在入回转窑前基本上完成了碳酸盐的分解过程。

由于将碳酸盐的分解反应从低效率的回转窑内移到窑外高效率的分解炉中进行，因而使窑系统的煅烧效率大幅度提高。这种窑外分解煅烧系统简称预分解窑或分解炉窑(NSP)。它的出现可从以下几点来说明。

1. 熟料形成的工艺特点

由水泥熟料形成过程可知，在干法回转窑中，熟料的煅烧过程，一般可分为预热、分解和烧成三个主要过程。这三个过程具有不同的特点，预热与分解过程，温度不需很高，一般在900°C以下，但需要热量很多，尤其是分解过程更突出。这是因为一般生料中碳酸盐含量高，约占生料的75~80%，而碳酸盐分解又是强吸热可逆反应，分解1公斤 CaCO_3 吸热达396千卡/公斤，生成1公斤熟料所需之生料的分解耗热约430~490千卡/公斤熟料，约占熟料总热耗的50~60%。而烧成过程则需要较高的温度(1300~1450°C)和一定的反应时间，但需要的热量不多。三过程所需的温度和热量的比

例如图1-1。

2. 回转窑对工艺要求的适应性

用普通回转窑生产水泥熟料，预热、分解、烧成均在回转窑内进行。实践证明，回转窑作为烧成设备，尚能满足要求，它能提供烧成所需的断面物料温度分布均匀的温度场，

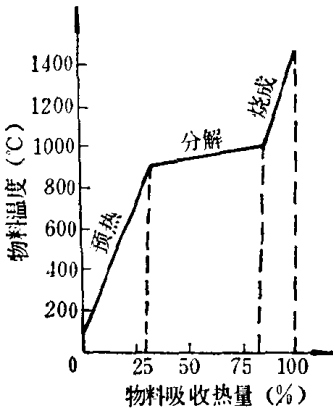


图 1-1 熟料形成所需温度—热量图解

并保证物料在高温下有足够的停留时间。但作为传热、传质设备则不理想，对需要热量较大的预热、分解过程不大适应。这主要是因为窑内物料堆积在窑的底部，气流从料层表面流过，气流与物料的接触传热面积小，传热速率慢。又因为分解带料粉处于层状堆积状态，料层内部分解出的 CO_2 向气流扩散的面积小、阻力大、速度慢，并且料层内部颗粒被

CO_2 气膜包裹， CO_2 分压大，分解温度要求高，这就增大了碳酸盐分解的困难，降低了分解速率。

由上看来，普通回转窑内的热工布局，对熟料形成工艺来说，在高温带基本能适应，而在分解、预热的中、低温带则适应性差，因而生产效率及热效率都不高。

3. 回转窑热工布局的改进

为了使回转窑的热工布局能较好地适应熟料形成工艺的要求，在三十年代出现了立波尔窑，热气流穿过篦式加热机上的料层，从而加大了气固相间传热面积，加强了传热能力。五十年代出现的悬浮预热器窑则将料粉悬浮于热气流中

预热、部分分解，使传热面积更大、传热能力更强，入窑物料的分解率可达40%。由于这两种窑预热能力的增强和进行了部分预分解，使窑的产量大幅度增加，熟料热耗大幅度下降，窑的技术经济指标显著提高。

4. 窑外分解技术的产生

由于立波尔窑和悬浮预热窑的碳酸盐分解过程主要仍在传热、传质速率低的回转窑中进行，因而限制了窑指标的进一步提高。

能不能更大地提高悬浮预热器或加热机的分解率呢？计算表明，由于 CaCO_3 分解耗热量大，出窑烟气一般在 1000°C 左右，所含热量不够，分解率只在40%以下，难以进一步提高。如果通过提高出窑烟气温度来满足热量的需要，则出窑烟气温度需要提高到 $1600\sim 1700^\circ\text{C}$ ，这么高的烟气温度不仅会使燃烧带热负荷过大，还会使窑及预热器系统无法安全运转，因而是不可可能的。

为提高分解过程的速率，在悬浮预热器与回转窑之间增加一个新的热源——分解炉，使燃料燃烧、放热过程与生料分解、吸热过程同时在悬浮态下紧密配合地、极其迅速地进行，使生料的分解率达到 $85\sim 95\%$ 。这样将熟料煅烧的三个主要工艺过程，分别在三个机组内进行，使煅烧系统的热工布局进一步适应工艺的需要，从而大大提高了生产效率及热效率。

几种回转窑工艺、热工布局的比较如图1-2所示。

物料分解反应从回转窑的堆积态移到分解炉内悬浮态中进行，不仅传热速度加快，而且分解后的 CO_2 从料粉表面扩散到气流的传质速率加快，从而加快了整个分解过程。

图1-3是北京市建筑材料工业学校讲师 田桂芳、吕雪兰

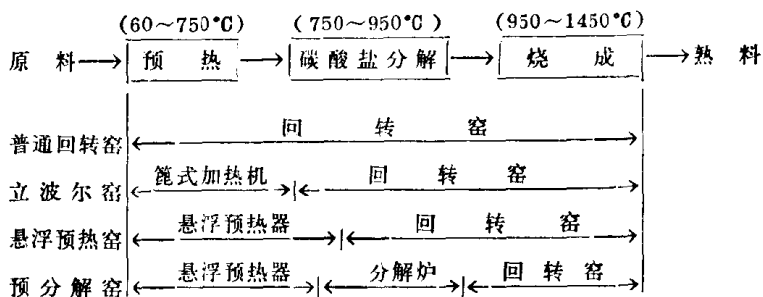


图 1-2 几种回转窑工艺热工布局的比较

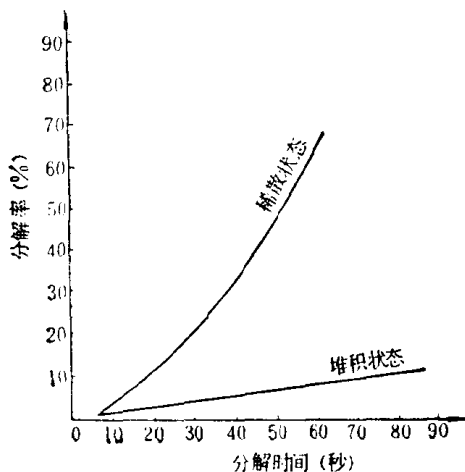


图 1-3 料粉堆积与稀散状态分解率的比较

所做料粉堆积程度对分解率的影响的试验曲线。图中堆积状态线及稀散状态线是分别取生料样 1.0 克和 0.01 克分别堆积和稀铺于铂坩锅底部，在同一条件下（850°C）经历不同的时间所得的分解率。由图可见，稀散状态的分解速度比堆积态快得多。而悬浮态的分解速度，将比稀散态更快。

在窑外分解窑系统中，将约占一半的燃料从温度较高的窑内，移到窑后温度较低的环境去烧，使系统热气流的焓值

$\frac{Q}{T}$ 增大，气固相间温差减小，会不会降低热的有效利用，

分解炉内的迅速燃烧会不会引起系统超温而致结皮、堵塞呢，实践证明，这两个问题可以得到良好解决。关键在于悬浮态或流化态的操作条件。因为移到分解炉去燃烧而放出的这一部分热量，主要是供 CaCO_3 分解用的，这一部分热量在窑内时，系统的温度虽高、热气流的熵值较低，然而因单位容积内传热的面积小，传热的速率慢，气流中的热量来不及传给物料，使热的有效利用率降低。而在分解炉中，系统热气流的熵值较高，温度较低，但是 CaCO_3 分解所需的热量及温度基本未变，只是由于悬浮态传热，气固相间具有巨大的传热、传质面积，传热速率非常快，才降低了气温，缩小了气固相间的温差，所以系统的热效率不但不会降低，而且还得到提高。

又由于燃烧放热及分解吸热同时在分解炉内悬浮态下进行，燃烧放出的热量迅速传给物料，为分解反应所吸收，燃烧温度被分解平衡温度所抑制。所以只要控制正常，炉温能控制在 1000°C 以下，不会引起系统严重结皮或堵塞。

总之，在生料的碳酸盐分解阶段，增加一个热源，在悬浮状态下，边燃烧、边传热、边分解，以相当小的分解炉的容积，代替了很大的窑内分解带及部分燃烧带，可大大加速碳酸盐的分解。

第二节 分解炉的构造及预分解窑的生产流程

一、分解炉的构造

分解炉的构造，因种类不同而异。图1-4为旋流式分解