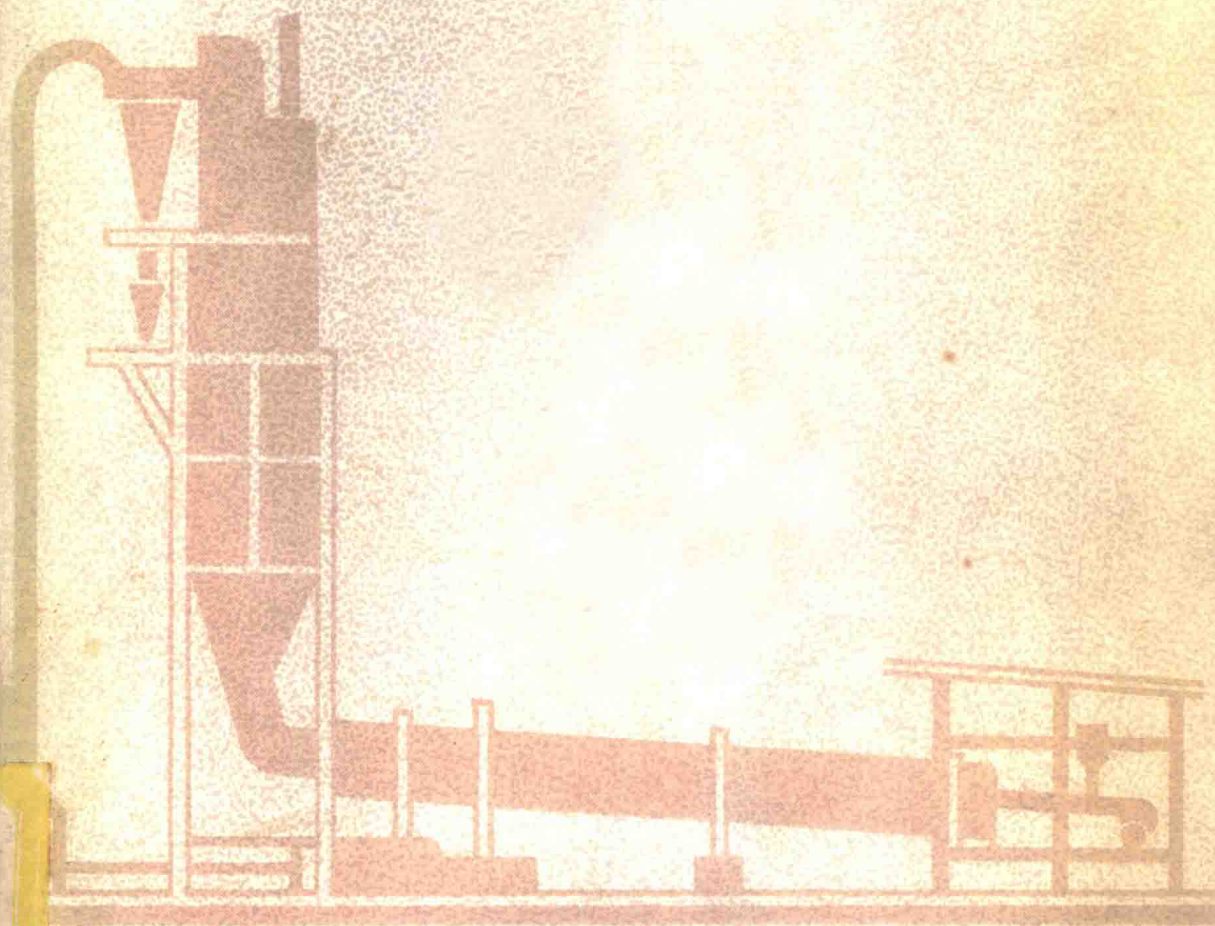


水泥工艺进展

沈曾荣 耿光斗 等译 朱祖培 校



中国建筑工业出版社

水 泥 工 艺 进 展

沈曾荣 耿光斗 等译

朱 祖 培 校

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

本书选译了德国(西德)水泥厂协会1971年和1977年两届国际水泥工艺技术会议的全部总报告,第二届会议的部分补充报告和《近百年来水泥工艺技术的进展》一文。全书分两部分,各有七个专题,内容包括:原料的采掘与装运;生料的制备、储存与均化;煅烧,与窑气有关的反应如挥发物质的循环及结皮、结圈等;熟料和水泥的粉磨与储存;工艺过程的自动控制;水泥厂的通用设施;生产工艺对水泥性能的影响;环境保护和能源的合理利用等。所辑报告基本上从各个方面反映了六十年代和七十年代国外水泥工艺技术的发展现状和进展情况。书后附有两届会议的全部论文索引,可供在有关杂志上查阅原文。

本书可供从事水泥工业生产、设计、研究的工程技术人员和有关教学人员参考。

* * *

责任编辑:程佛根

水泥工艺进展

沈曾荣 耿光斗 等译

朱祖培 校

*

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(北京阜外南礼上路)

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 22 字数: 532千字

1983年3月第一版 1983年3月第一次印刷

印数: 1—4,700册 定价: 2.90元

统一书号: 15040·4330

译 者 的 话

德国水泥厂协会（简称VDZ）成立于1877年，至今已有100多年的历史。长期以来，它致力于水泥制造和应用技术的发展。它利用所属的委员会和研究院，并与国内外有关机构、高等院校和材料试验研究所进行协作，广泛开展科研工作和技术活动，其成果通过出版物和报告会等方式加以宣传和推广。本书就是根据该协会于1971年和1977年先后两次在西德杜塞多尔夫城举行的国际水泥工艺技术会议出版的两本文集“Verfahrenstechnik der Herstellung von Zement”（1972年出版）和“Verfahrenstechnik der Zementherstellung”（1979年出版）选译编辑而成。

第一届国际水泥工艺技术会议于1971年9月28日至10月1日举行，来自34个国家的840名代表参加了会议。会上就水泥原料的开采、生料的制备和均化、水泥的煅烧方法、与窑气的反应、熟料和水泥的粉磨与储存、测定和配料装置、水泥工业自动化等七个专题进行了讨论，提出了7篇主要报告和90篇补充报告。

鉴于国际水泥界对这次会议的普遍赞赏，该协会在成立一百周年之际，于1977年9月27日又举行了历时三天的第二届国际水泥工艺技术会议，参加会议的代表达1200人，来自52个国家。这次会议着重于实践方面，讨论的宗旨是：交流和传播成熟的工业经验；迅速在实践中应用新的技术知识；更好地明确今后的任务和目标。会上提出了主要报告和补充报告共110篇，其七个专题的内容与上次会议有所不同，具体是：原料的开采和制备、粉碎过程、煅烧方法、水泥厂过程控制、水泥厂通用设备、环境保护和能源利用、生产技术对水泥性能的影响。

国外杂志报导中曾称这两次会议是“对水泥工艺的内容多方面的一次检阅”，是“世界水泥工业史上的一个里程碑”。这是否过誉，我们可以不去评论，但就其报告的内容来看，两次会议上的14篇主要报告基本上从各个方面反映了水泥工艺六十年代和七十年代的技术水平。

我们翻译编辑此书目的是向我国水泥工业界提供国外水泥工艺进展概况，故本书亦取名为《水泥工艺进展》。我们译出第一届会议七个专题的7篇主要报告作为本书的第一部分；选择了第二届会议七个专题的7篇主要报告和47篇补充报告，作为本书的第二部分。此外还翻译了第二届会议上发表的《近百年来水泥工艺技术的进展》一文。

在这里说明三点：

1. 《近百年来水泥工艺技术的进展》一文中“Deutschland”一词的翻译，凡是文中所述内容在时间上属第二次世界大战以后的，我们将其译为“西德”。至于象VDZ、VDI等，我们还沿用历史上的名称，都冠以“德国”。如VDZ，我们就译为“德国水泥厂协会”。

2. 文中凡属世界名人和我国出版的《世界地名译名手册》（商务印书馆，1976年）上已有现成译名的地名，其译文后均不再附原文名称。

3.书后附一索引，列出了这两次会议全部报告在西德“Zement-Kalk-Gips”杂志上登载的期号和页码，以备读者查阅。

参加本书翻译工作的有沈曾荣、耿光斗、焦建萍、黄守仁、庞以训、陆冰、秦芳芳、王慧智，朱祖培校阅全书（第二届会议译文的部分补充报告曾经黄守仁初校）并翻译了部分内容。由于本书翻译工作量较大，涉及的专业也较多，而我们水平有限，错误仍然难免，请读者批评指正。

1980年12月

目 录

译者的话

近百年来水泥工艺技术的进展 (西德)	1
--------------------------	---

第一部分 VDZ第一届会议 (1971年)

I. 水泥生产的原料开采 (西德)	12
[勘探; 爆破; 松碎; 装载设备; 可移动的破碎装置]	
II. 生料的制备和均化 (瑞士)	23
III. 水泥煅烧方法的现状 (奥地利)	36
[窑; 预热器; 冷却机; 燃烧系统]	
IV. 与密气有关的反应 (西德)	51
[挥发物质的循环过程; 结皮; 排除结圈]	
V. 熟料和水泥的粉磨与储存 (西德)	67
[水泥磨; 熟料储库和水泥圆库]	
VI. 测定和配料装置 (荷兰)	81
[测定; 分析; 取样设备]	
VII. 水泥工业的自动化 (西德)	87
[监视; 控制]	

第二部分 VDZ第二届会议 (1977年)

I. 原料的开采和制备 (西德)	95
[原料矿床; 勘探和开采规划; 采矿方法; 装车; 运输; 预破碎; 均化]	
(一) 石灰石开采中履带松碎机的性能、操作费用和使用寿命 (西德)	107
(二) 采用桥式耙的矩形和圆形混合堆场的均化效果 (西德)	110
(三) 连续操作的生料搅拌装置 (西德)	112
(四) 哈特格森水泥厂整个原料制备系统的均化效果 (瑞士)	116
II. 粉碎技术 (西德)	124
[破碎机; 生料和料浆的粉磨装置; 水泥磨; 粉磨系统]	
(一) 反击式破碎机在各种粉磨系统中对制备原料的适应性 (西德)	135
(二) 分散式烘干机用于原料预烘干的可能性 (西德)	138
(三) 空气选分机的分离性能及其对闭路粉磨结果的影响 (西德)	142
(四) 旋风式循环空气选分机的操作情况 (西德)	145
(五) 熟料和粒状高炉渣的易磨性 (西德)	147
(六) 变速水泥磨的适应性 (意大利)	152

(七) 大型立式磨的操作经验 (瑞士)	155
(八) 改进管磨机衬板使用寿命的方法 (奥地利)	158
(九) 球磨机粉磨时最佳钢球尺寸和水泥熟料易磨性的动力学研究 (日本)	161
III. 煅烧方法 (奥地利)	164
[窑系统; 预分解; 冷却机; 窑衬; 窑皮; 燃烧系统; 余热利用; 循环过程]	
(一) 用湿法制备原料干法生产水泥熟料的方法 (西德)	176
(二) 多筒冷却机的温度测量和传热条件的确定 (西德)	180
(三) 回转窑耐火砖的机械负荷和热负荷的研究 (西德)	183
(四) 将湿法厂改造为带烘干机和二级预热器窑的半湿法厂 (瑞士)	187
(五) 带旋风预热器和多筒冷却机的回转窑耐火衬里的铺砌 (西德)	188
(六) 用多孔板作为回转窑烧成带镁铬砖膨胀补偿的接缝材料 (西德)	192
(七) 在水泥回转窑严重磨损的地方使用非成型的耐火材料 (西德)	195
(八) 选择半湿法的标准 (瑞士)	197
(九) 水泥回转窑内火焰的燃烧和传热 (英国)	204
(十) 水泥回转窑烧成带耐火材料相互作用和破坏性能的研究 (苏联)	207
IV. 过程控制 (西德)	210
[测量和控制系统; 中央控制室; 水泥厂自动化的概念]	
(一) 用现代控制方法直接在料堆上配料 (西德)	219
(二) 球磨机产量控制的可能性 (西德)	222
(三) 粉磨设备的控制方法 (奥地利)	225
(四) 应用理论和经验模式控制水泥回转窑 (西德)	227
V. 通用设施 (瑞士)	231
[物料的运输和储存; 水泥和熟料的发运设施; 公用设施; 工厂布置]	
(一) 现代水泥厂的物料储库 (法国)	244
(二) 自动装袋和摆包技术的新发展 (西德)	249
(三) 中心距大和效率高的斗式提升机 (西德)	255
(四) 现代水泥库内残余物料的卸空 (西班牙)	257
(五) 运输和储存中的磨损问题 (西德)	260
(六) 带电子秤的包装机 (西德)	263
(七) 水泥厂设计的一些问题 (西德)	264
VI. 环境保护和能源利用 (西德)	268
[防止空气污染; 减少噪音和震动; 节约原料; 采石场复原; 能源的合理利用]	
(一) 悬浮预热器窑气体旁路的高碱—氯化物废气电收尘问题 (西德)	288
(二) 从经济和技术角度看水泥窑中选煤副产品的利用 (比利时)	290
(三) 水泥回转窑操作中用民用和工业废料部分地代替传统燃料的经验 (英国、西德)	293
(四) 一家瑞士水泥厂的噪音控制 (瑞士)	295
(五) 水泥厂用橡胶保护环境和防止磨损 (瑞典)	297
(六) 煅烧水泥熟料时铅和锌的反应 (西德)	299
(七) 在气体增温冷却中应用回转式喷雾器 (丹麦)	303

Ⅶ. 生产工艺对水泥性能的影响 (西德)	306
[熟料和矿渣生产过程以及水泥粉磨和储存对水泥凝固和硬化的影响]	
(一) 入窑生料中加氯化钙对预热器的碱平衡和熟料质量的影响 (西德)	315
(二) 以节约能量的生产工艺用高碱原料生产低碱水泥 (丹麦)	320
(三) 在预分解系统中用窑的旁路降低熟料的碱和硫的含量 (美国)	323
(四) 窑灰的处理 (英国)	328
(五) 避免水泥过早凝结的技术可能性 (瑞士)	331
(六) 生产快硬和高强水泥的方法 (苏联)	333
附录 VDZ 国际水泥工艺技术会议报告索引	336

近百年来水泥工艺技术的进展^①

H·西莱姆、H-G·埃勒勃洛克 (H G.Ellerbrok) 和G·丰格 (西德)

长期以来,水泥生产设备及生产方法的发展是单凭经验的积累。在十九世纪五十年代和六十年代建筑第一批德国水泥厂的时候,并没有现成的装置可仿效。采用的方法和设备大部分来源于石灰窑、砖瓦厂和磨坊。今天从水泥“熟料”这个名词还会使人们联想起这些起源。

当1880年前后一些机器制造厂开始为生产水泥制造专用的机械时,市场上很快出现了许多新型的、部分来自国外的磨机、窑和辅助设备,从而使提高水泥质量、改进生产能力和降低生产成本有了希望。在第一次世界大战以前,由于在设备和生产方法上新的设想多种多样,水泥生产工艺一直处于不断变化的状态。当时的德国波特兰水泥厂协会第一任主席H·J·米尤勒(H.J.Müller)在1920年的大会上回顾性的综述报告中曾提到:“几乎没有哪一种工业象德国水泥工业那样频繁地改建和频繁地新建”。

这样,在德国水泥工业的集体活动中,一开始就以实际工艺资料 and 经验的交流作为主要内容,就不足为奇了。因为正是对这些资料进行不断的讨论才能宣传技术上的进步,并制订出发展的目标。应该记住:正是由于缺乏可靠的指标,因而很难客观地评价一台新机器和设备。例如,单机的能耗,一直到进入本世纪后,用电动机单独拖动逐步代替了带有传动轴和传动带的蒸汽机拖动时,才有可能精确测定。有关物料数据的知识,对于分析和系统地改进某些操作步骤是必要的,但是长期以来是很不完备的。例如对于熟料煅烧的理论热耗,到二十年代末还没有一个非常明确的概念。

早在1865年建立的德国砖瓦、粘土制品、石灰和水泥生产厂协会就已经把“完善其产品生产”作为它的公开宣布的目标之一。1877年从这个团体中分出来的德国波特兰水泥厂协会继续探索着这一共同关心的目标。例如,在会员大会上始终把有关新的煅烧、破碎和粉磨设备的经验报告作为议事日程上的固定议程。从1906年起,甚至把年会的第三天完全用于讨论水泥生产设备。A·托麦(A.Tomöi)在1892年会员大会上的下述讲话反映了人们即使在彼此激烈竞争的时代仍共同努力增长有用知识的意向:

“我们固然时常乐意听到工程师和设备制造者谈论新的设备和革新情况,有关这方面的资料总是受人欢迎的,但这不应该妨碍我们彼此交流新设备投产和操作时所获得的经验。

个别人从遇到的困难中取得的教训可以使其它人受益。个人的经验只有在成为共同的知识时才能对我们的工业充分发挥其作用。我们协会确实是达到这一目的的恰当场所……”。

① 原文题目是“水泥工艺发展在德国水泥工业会议报告中的反映”。——译注

事实上，有记载的会议的论文集确能证明：个别工厂的操作者甚至把有时要付出大量费用和克服巨大困难才取得的十分宝贵的经验也在大会上很坦率地加以报导。

在第一次世界大战后当工艺发展日趋稳定的时候，愈来愈清楚地表明对各种不同生产设备的性能和效率迫切需要有更好的评价指标。结果，在1926年协会建立了窑委员会和机械委员会。对这个委员会提出的任务是：通过在实际操作中对设备进行系统的测试确定可靠的比较值和评价指标。窑委员会的报告很快促使会员大会内已经非常活跃的经验交流进一步具体化和深刻化。相反，机械委员会的工作开始时没有取得很大的成绩。

1948年德国水泥厂协会重建以后，各种技术委员会的成立，使集体活动开始进一步专业化。

由于有关委员会和工作小组对紧迫的个别问题讨论得愈来愈多，报告会和专题讨论会愈来愈集中于通过对具体工艺领域提出综合性报告的方式来促进新知识和新经验的实际应用。通过情报交流而实现技术革新的目的，在1971年国际水泥工艺技术会议上得到充分和广泛的表达。对水泥生产技术的现状和发展的第一次总回顾所获得的全世界的反映，促使德国水泥厂协会在1977年正值协会成立一百年之际再次举行这样的讨论会。从这两次会议的主题可知，根据经验获得的知识并对其作系统的介绍，对水泥工艺的发展自然起重要的作用，虽然这些进步现在是以广泛的工程科学为基础的。

真正的生产工艺的发展最终只决定于经济因素，一方面是生产成本，另一方面是市场需要。对于环境保护则有不同的考虑：从内部核算来说，它同生产手段一样是构成成本的一项因素，但是，从外部来看，这项需求不是由市场提出来的，而是由人们免受污染损害的需要而提出的。因此，水泥工业在这一领域的集体活动从一开始起就不仅仅是建立能减少污染的一些最有效而又经济的措施，而且始终是拿出数据和专门鉴定来供社会代表们讨论。德国水泥工业早在1936年就建立了防尘委员会，并通过它们的工作来防止大气污染。近年来环境保护问题的重要性和范围不断增加。这一点也从1977年德国水泥厂协会举办的国际水泥工艺技术会议的议程中反映出来，特别是会议自己把环境保护和节约能源列为主要课题之一，这更说明这一内容的意义。

下面主要根据德国波特兰水泥厂协会和德国水泥厂协会会议论文集中报导的论文、通讯和讨论概要介绍粉碎工艺、煅烧工艺和环境保护技术的发展情况。

1. 原料和水泥的破碎和粉磨

在水泥生产的早期人们就已经认识到：原料和水泥都必须尽可能磨细。因此，和煅烧工艺一样，不断改进破碎机和磨机从一开始就是水泥工艺中最重要的技术问题之一。

在早期水泥厂中，关于原料的制备一部分采用湿法，一部分是干法。对于软质的白垩和粘土采用了以后称之为稀浆法的湿法，料浆的含水量为80%物料的粉碎是通过称之为洗泥机的料浆池的耙洗作用使细粒物料悬浮于水中。

另一方面，如果原料之一为硬质石灰石并且粘土经过预烘干的话，那么，原料就需要经过破碎和进行干法粉磨（只是在本世纪初才有可能对硬质原料进行湿磨）。当时所说的半湿法是指硬质组分（多半是石灰石）用干法处理，而软质组分则用湿法。

粉磨熟料的设备与干法制备原料所用的设备相同。用1858年发明的颚式破碎机作一次

破碎。这种破碎机即使在今天仍按相同的原理在制造。用螺旋式破碎机作二次破碎。利用强有力的螺旋叶与四周格条的剪切作用将物料破碎。但是，由于硬物料对设备的磨损很大，而很湿的物料又容易产生堵塞，这种设备很快就被淘汰。

早先用于中碎和细碎的唯一设备是几世纪来所熟知的。粗磨采用辊式轮碾机而细磨则用水平轮碾机。

后一类磨机主要是由一个台座和两个直径0.8~1.5米彼此重叠的磨石所构成。较老的结构型式称作上碾盘，也即上面的磨石转动；在1885年左右制成的一种叫“下碾盘”，也即下面的磨石通过中间轴进行转动。需要粉磨的物料通过上磨石中间的喂料孔喂入，并在两块磨石之间的缝隙处通过剪力和压力的作用被磨细。这种磨石由好几块石块拼成，并且在粉磨表面上有5~6毫米深的槽。当磨石磨损后，必须将它卸下，重新刻槽纹。这就需要大量的维修工作，且不说由于停车而造成磨机生产的中断。因此，磨石的磨损和运转费用成为当时操作人员之间内容异常丰富的讨论题。

以今天的标准来衡量，这些早期的破碎粉磨设备的生产能力和可达到的产品细度确实是有限的。例如，一副磨盘每小时约处理1吨石灰石，其细度为0.09毫米筛的筛余20%，单位电耗是每吨10~15千瓦·时。如果粉磨水泥熟料，产量约每小时半吨，其细度为0.09毫米筛的筛余12%，单位电耗是每吨30千瓦·时。为了达到要求的粉磨能力，就需要许多这样的磨机，例如在一个厂的磨房内要分列两排安装16台这种磨机。

随着水泥需要量的不断增长，加上用户坚持要求将水泥磨得愈细愈好，这种老式磨机日益不能满足要求。另外一个不希望有的副作用是，由于磨石之间摩擦而产生的热量使水泥温度很高因而不能将它直接装到当时采用的木桶内，必须首先装在铁桶内加以冷却。

由于这一原因，十九世纪八十年代开始对改进破碎和粉磨方法作了大量的努力。人们试图把经过颚式破碎机预破碎的熟料在四套串连的辊式破碎机中磨到最终的细度。虽然这样一来可使单位电耗下降一半，但是在这样的系统中所得到的产量却是很低的。

另外，象水平式或立式的离心辊磨机和立式锤磨机一类的冲击式磨机也不能令人满意，主要是磨损太利害。

在使用各种不同的粉磨设备进行试验时，研究者提出了这样的问题：破碎机理的性质是否会影响所生产的水泥的强度。于是试验了各种水泥试样的强度。有些试样是用铁锤在铁砧上捶碎的，有些则是在研钵内研碎的。并把它们筛到同样的细度（同样的筛余量）。两种试样所获得的强度实际相等，从而得出结论：水泥强度仅与细度有关，而与颗粒形状无关。

为了达到当时要求的0.2毫米筛上20%筛余的标准细度，水泥必须过筛。最早是用回转的圆筒筛或六角筛。但是，用这类筛不能达到很高的产量，而且磨损很快。以后使用倾斜安置的振动筛，但也不能达到足够的产量。因此，1880年左右W·米歇利斯第一次进行了一项有趣的试验，即用气流分级和过滤相结合的方法以便完全摆脱筛分装置。为此，他用了一台套盘磨。在转子的背面装有风叶。这些风叶产生的气流将物料携带到一个大的降尘室内，降尘室的壁由布构成。当空气通过布逸出时，物料沉降在袋上。采用这种方法虽然确实是获得了细的水泥，但是套盘磨的单位电耗太大，磨损情况尤为严重。

较为成功的设想是把粉磨机组和回转筛联合起来，使得留在筛内的物料能立即返回磨内进一步粉磨。根据这种设想，在1876年出现了连续操作的带筛球磨机。它主要由一个水

平的装有钢球的粉磨圆筒所组成，圆筒周围是筛网。磨机内装有带篦缝的凸型衬板，通过篦缝不仅能使磨细的物料落到筛面上，而且还能使留在筛上的物料再次返回磨内。但是这种磨机也存在着困难，因为筛的磨损严重而且产量低。以后，这种磨机常被用来作为干磨或湿磨的粗磨机，后面再用一台细磨的管磨机。

在水泥工业中，大约同一时期得到应用的另一种磨机是辊式磨。十九世纪八十年代水泥工业用作原料粗碎的轮碾机实际也是一种基于同一原理的非常古老的辊式磨机。以后，大约在1890年，出现了新型的辊式磨，例如，劳雷特（Roulette）离心环球磨，用直径约为200毫米的钢球在环形磨道内旋转，这种设备每小时能粉磨经辊式破碎机预破碎的石灰石约2吨左右，其细度是0.2毫米筛的筛余为1~2%和0.09毫米筛的筛余为15~20%，单位电耗大致是每吨9千瓦·时。结构上与此相类似的是弹簧球磨机（福勒式磨机），它今天仍然被用作煤磨。由美国引进的环辊式磨，格里芬（Griffin）磨，受到普遍欢迎，它在生料粉磨方面保持了几十年。

另外，用于生料粉磨的还有立式环辊磨。有三根固定安装的磨辊在转动的垂直磨盘上回转；属于这种类型的有肯特（Kent）磨和麦克赛康（Maxecon）磨，是大家熟知的。

在上述气力选粉的尝试失败以后，1889年出现了机械空气选分机（分级机），它在风力选分方面取得了突破。这种选分机首先与石碾盘或立式环辊磨结合使用。例如，从1893年会员大会上的一份讨论报告中可知：在一个厂里，安装选分机后使磨生料的石碾盘的生产能力提高三倍。后来，将选分机和上面提到的球磨机一起操作，从而取消了经常发生故障的筛。

研究的另一方面是在产量足够的情况下达到较高的粉磨细度，结果于1892年出现了管磨机。基本想法是将粗磨后的物料喂入细磨并使其经历一段足够长的粉磨过程，从而使所有颗粒一次通过后即能磨至规定的粒度以下，不需要进一步分级。第一批管磨机是单仓磨，直径为1.2米，长5~6米，它每小时生产约3吨水泥，其细度是0.09毫米筛的筛余为15%，单位电耗是每吨20千瓦·时。

以后一个时期，将带有粗筛的筛球磨装在这种管磨的前面。这一原理的进一步发展导致将粗磨和细磨合并在一个筒体内，由此出现了复式磨（多仓磨）。起初，在多仓磨的第一仓还装有筛子，后来发现这实际是不需要的。重要的是当物料在通过磨机的旅程中逐步变细时需要采用逐步减小的研磨体。从这种认识出发，合乎逻辑地出现了两仓、三仓或四仓磨，其中装有愈来愈小的钢球。

另一个发展方向是用短而大直径的无筛球磨机作粗磨机，而用长而小直径的管磨机作为细磨。但是，由于规格笨重和建筑费用高，这种系统从来没有象多仓磨那样得到推广。1904年出现了第三种方案，就是管磨机加空气选粉机。这在生料粉磨方面很快得到推广，而在德国数十年后才用于水泥粉磨。

原料的湿磨与干磨平行地发展。早在1871年就已采用湿轮碾来细磨稀料浆。也用湿碾盘来进行湿磨。在二十世纪初，出现了带筛分装置的湿法球磨机，它能处理含水分40%左右的稠料浆。象干法粉磨一样，这种磨机也用作管磨机前面的粗磨机，最早有时也用在湿碾盘的前面。

1920年以后，在大多数水泥厂里，无论是原料粉磨还是水泥粉磨，各种不同结构的管磨机代替了其他类型的磨机。作为带有提升机的闭路磨的又一重大进步是风扫磨。这种磨

机又很快发展成为烘干兼粉磨的系统。期待生产细度更高的水泥的愿望引起了一系列新发明的出现，如特殊结构的磨机隔仓板、特殊的筛粉装置、特殊形式的磨机衬板或研磨体，这些以及其它发明相继带来了预期的效果。正如1923年C.米他克(C. Mittag)在一篇关于管磨机操作方式的报告中说的，“所有这些发明中最值得注意的是围绕着管磨机的神秘之谜”。米他克在这个报告中介绍的粉磨曲线图至今仍然是评价管磨机操作情况的重要辅助方法之一。

管磨机系统在第二次世界大战后的一段时期内得到了一系列的改进。由于美国经验的鼓励，设计人员致力于发展与选分机闭路操作的水泥磨系统。在最初对这种系统的产品细颗粒较少可能对水泥质量有害感到某些担忧以后，人们逐渐认识到这种系统在进一步磨到较高细度时会得到的好处。因此，自五十年代中期以来，把水泥磨建成或改造成闭路粉磨系统的日益增多。

同样，从五十年代中期起，在细磨仓内采用分级衬板也使粉磨效率获得显著提高。这种衬板促使研磨体尺寸适应物料在磨内不断磨细的进程。这一领域内新的研究成果是发明了一种很小的圆柱形研磨体，即所谓微钢段。据称它的采用可望在细磨时节约电耗。

自1960年起使用的助磨剂在粉磨高强度水泥时带来了值得注意的效果。如今几乎所有高强度水泥都采用助磨剂，特别是德国的450和550号水泥。

在磨机机械方面，由于对磨损过程作了系统研究以及优质工程材料的发展，使衬板和磨体的磨损费用急剧降低。

最近十年里，在管磨机方面，因规格日益加大而使设计者面临许多问题。一方面是一些机械工程的问题，如大型磨机筒体的运输和安装，功率大于6兆瓦的传动齿轮的设计或磨头的结构等；另一方面是工艺问题，如大量的热如何从磨内排出。这些问题中的大部分正在同时寻求解决。

在水泥生产过程的生料方面，从五十年代末期旋风预热窑采用后，强烈地推动着烘干兼粉磨系统的进一步发展。为了把大量温度较低的废气充分用来烘干水分较高的物料，出现了管磨机与外部供热的预烘干室、二次破碎机、选分机、快速烘干机或反击式破碎烘干机相结合的各种不同的组合。带有平磨盘、凹磨盘或磨碗的各种型式辊式磨再次成功地得到发展。因为它不仅结构简单和电耗不高，而且烘干性能较好。结构型式最老的平磨盘辊式磨是以立筒环辊磨和离心悬挂辊式磨的特点综合而成的。作为在工业实践中成功地试用的结果，最近辊式磨用于水泥粉磨又一次成为可行的建议。

2. 煅 烧 方 法

于1855年前后建立的第一批德国水泥窑是间歇操作的立窑，最初按窑的型式称为瓶窑，先是烧木柴，后来是烧焦炭。将煅烧物料和燃料交替按层装入窑内，并在炉篦处点火。焦炭的燃烧和熟料的烧结使窑内物料体积缩小，因而在窑的顶部形成空间可以进一步装料。窑内的火焰不断上升，直到明亮的火焰从烟囱出来为止。最后让窑内燃料烧尽并使窑冷却。烧成的熟料多数烧结成块并粘附在窑衬上，需用棒条捣碎后从窑的下部取出。这种窑的产量每周可烧成熟料10~20桶（每桶以170公斤计算，即1.7~3.4吨）。

喂入窑内的原料压制成坯，开始由人工成型，以后是用机械压坯。采用湿法生产时，

直接从料浆中制成坯。料浆在大的料浆池内沉淀和干燥，直到它充分固化为止。采用干法生产时，将正确配好的生料用水调成糊状后制成坯，然后将它存放在大的棚子内干燥。在有些水泥厂里，将这种坯放在干燥室内，由工厂自己的小型炼焦炉产生的废热进行烘干。由于窑的操作是间歇的，因而这种窑的热量损失以及时间和人工的消耗都非常大。燃料用量时常超过熟料重量的30%。

1864年，使用郝夫曼轮窑煅烧熟料，跨出了由间歇操作变为连续操作的第一步。这种窑主要由三部分组成，即煅烧隧道、烟道和烟囱。煅烧隧道是环形的。隧道的顶部呈拱形，并且可以用隔墙将隧道分隔成许多室，每个室有一个向外开的门用以装料和出料。操作期间，除了两个或三个窑装料或出料以外，其他都用砖砌好，保持密闭。火焰在轮窑的煅烧隧道内逐室通过并且用闸门来控制通风。燃料是小块焦炭和煤的混合物，通过煅烧隧道拱顶上的点火口送入。燃料用量大约是熟料重量的21%，比间歇操作的立窑减少很多。煅烧时间决定于窑内通风量情况，每一室大约需18~20小时。一座大型轮窑的年产量为12~15万桶（约20000~25000吨）水泥。但是这种窑需要大量人力来装料和出料，尤其是在出料时，繁重的体力劳动必须在很热的条件下完成。因此，轮窑在水泥工业中从未获得大规模推广。直到1877年德国波特兰水泥厂协会成立时，大部分熟料还是在间歇操作的立窑内煅烧的。

十九世纪八十年代，由于降低成本和改善质量的强大压力，导致采用各种连续操作的立窑的尝试。一般认为1883年狄茨世（Dietzsch）发明的多层窑是第一台连续操作的立窑。在这种窑上，煅烧室（下层）与预热室（上层）被一个水平的炉膛分隔开。因此，煅烧室内烧结的熟料不受上部料坯的压力，从而减少了熟料成块并粘结在窑壁上使窑堵塞的危险。物料由喂料孔喂入预热室，并在那里由煅烧室排出的气体烘干和预热。预热物料下降到水平炉膛内，然后按照窑底部由冷却带卸出熟料的量用长铲把灼热的料坯从炉膛铲到烧煤的煅烧室内。可以通过煅烧室壁上的孔用捣棒将烧结的物料从耐火壁上捣落，从而使窑保持正常运行。冷却室比煅烧室扩大许多，这就使下降的热熟料与壁避免接触并易于冷却。这种窑大多数是成对建设的，它的日产量为120~200桶（20~35吨）；燃料消耗量相当于熟料重量的15~18%，熟料的质量是满意的。但是，并不是所有原料都能经受住这种强烈的处理。它们在由预热室经炉膛至煅烧室的途中碎裂成小块并妨碍了为良好操作所要求的通风。

狄茨世窑的另一个严重缺点是：多层窑的操作条件是危险的，因而对窑的操作人员提出了严格的要求。当打开窑门从炉膛内推动物料时，由于煤的长火焰窜出而经常发生严重烧伤事故。由于这个原因，虽然狄茨世多层窑在热经济上较为有利，但它无法与这期间进一步改进的其它立窑相比。

在立窑发展上人们着重研究解决如何改进设计和改进操作以防止部分熔融物料在窑壁上粘结的问题。于是在1888年郝恩施尔特（Hauenschild）设计的窑上，对窑壁进行充分冷却以防止粘结，但它存在着燃料消耗增加的缺点。稍后，许纳德发明了另一种立窑，它与其它连续立窑的主要区别是窑衬的里面用经过破碎的或者是完整的生料坯砌成一层保护层。它不会象中心的物料那样处于严重烧结状态，中心部分的物料烧结成大块，由于其重量约有30吨，因而经常重新把趋向于粘附在窑衬上的熟料扯下来。这种窑一般用于压的生料坯作为喂料。但是，窑的操作在很大程度上与原料性能和操作人员的熟练程度有关。为

了减少这些因素的影响，采用粒度为10毫米以下的焦炭屑代替一直采用的焦炭块，并将焦炭屑混入生料中制坯。由于燃料压入生料中，窑衬所受的严厉操作条件减轻很多。另外，焦炭屑比大块焦炭便宜得多。这种熟料非常疏松，很容易粉磨。

但是，直到1910年前后，由于采用了带锥形罩的撒料盘作喂料装置以及用回转篦子作排料装置，才使窑的操作自动化程度大大提高，也大大减轻了操作时的人工劳动，并使成本显著降低。此外，燃料的供应，特别是鼓风装置的改进，提高了窑的生产能力。在机械鼓风的窑上，从篦下鼓风的压力达到100~300毫米水柱^①。窑上的所有门和孔都必须密闭，篦子本身也设有自动锁风系统。用此方法使生产能力由40~50吨/天提高至100吨/天，立窑操作的可靠性大大提高，并使运转更为经济。

对于上述所有窑系统来说，用于烧结的物料都必须压制成坯，以便使燃烧空气能顺利通过窑内物料并保持良好通风。1897年德国第一次用回转窑进行煅烧试验。这种窑已在美国用于水泥生产并可喂粉状物料，以后也可以喂料浆。两年以后，第一台德国回转窑开始生产熟料。由于粉尘量太大，生料用4~5%的水润湿以减少粉尘。第一批回转窑的规格是2×30米，它们与美国烧油的窑不同，是用煤粉作燃料。为了使熟料冷却，将热的熟料从窑卸料端落入安装在下面的冷却立筒或回转式冷却筒内。冷却筒的规格为1.6×20米。在冷却筒内预热的空气在压力下入窑作为煤粉燃烧用的空气。由于回转窑的操作方便而又可靠，需要人工较少，且熟料质量均匀和良好，因此人们很快认识到它优于立窑。另外，采用回转窑生产时可以采用不能很好制坯的原料，如硬质页岩或砂质粘土。但是比立窑的设备投资和电耗都较高，且需较大的建筑场地。它的燃料消耗量大致是熟料重量的30%，也即约2500~2900千卡/公斤，比起立窑更是高得多。此外，由于早期窑的筒体椭圆率太大和支撑太小，装置不够坚固，在运转上产生许多问题。

但是，在1905年至1910年期间，新建厂大部分采用回转窑，当然这并不是说立窑已被淘汰。在以后的几年里，回转窑的设计者集中精力于降低热耗和电耗，相反地对于立窑的设计者来说，则致力于保持稳定而均衡的操作，以便提高熟料质量。

在立窑上，改进生料和燃料的喂料条件以改进燃烧证明是可能的。在湿法窑上，为了降低热耗，将回转窑筒体加长，通过在窑内安装扬料板和链条以改善热交换。对于干法来说，是利用600~700℃的废气在烘干筒内烘干原料。虽然由于扩大了窑的烧结或分解带的直径而使窑的生产能力有所提高，但是也提高了设备的投资，因此以后放弃了这种做法。为了尽可能降低窑的建筑高度以降低投资，在某些情况下取消了窑下面的冷却立筒或回转式冷却机，代替它的是直接延长窑的筒体（直径相同或较小），或者把冷却筒分成许多个较小的冷却筒安置在窑筒体的周围，即所谓多筒式（卫星式）冷却机。

由于用于生料粉喂料时出现粉尘的收集和利用问题，因此，在1910年以后采用经过湿磨的原料浆喂料取得愈来愈重要的地位。由于制备料浆可以使生料磨得更细，更均匀，而且还省去了原料烘干和吸尘设备及其操作费用，长期以来认为湿法生产优于干法生产。用料浆喂料时，废气温度只有100~200℃，因而废气可不必再继续利用。

但是，在1920年前后，自动化立窑和回转窑之间的竞争还难见分晓。虽然在战争年代煤很缺，不得不节约用煤，但是对废气的利用在德国发展得并不快。直到以后几年，在德

① 应为1000~3000毫米水柱。——译注

国，由于用余热锅炉来利用废气热量，使干法回转窑的总热耗下降至当时的立窑热耗，即1000~1200千卡/公斤熟料，而当时湿法窑的热耗是1800~2000千卡/公斤熟料。当时所有旨在大量降低窑壁辐射和对流热损失的研究均无结果。但是到二十年代初，由于设计者成功地把冷却筒入料口比较密闭地连接在通向窑头的垂直通道上，使漏风大大减少，进一步节约了燃料。

1928年前后最普遍采用的三种窑系统是自动化立窑、带内部热交换装置的湿法长窑和用筒式烘干机或余热锅炉利用废气的干法窑。在窑设计上另一个重要的进展是1928年篦子预热器的发明。生料先在成球筒内加入约12%的水以制成生料球，喂到预热器上（最初的预热器内部未隔开）。由于篦子预热器利用了废气的热量，使总热耗降到1000千卡/公斤熟料左右。此外，它的设备投资较低。但是，由于世界经济危机，篦子预热器在经济上表现出的巨大优点直到1935年才为水泥工业所利用。

在两次世界大战之间，由于高压鼓风机的采用和熟料卸料闸门的改进，立窑的生产能力提高一倍以上。有些厂于1930年窑产量就已达到120~170吨/天，有的甚至达到220吨/天。这些成果只是由于在测量和控制仪表方面同时取得巨大进展后才有可能。

第二次世界大战使水泥工业的技术发展几乎停顿了十年。战后，一些国家的新技术进入西德市场，如生料成球盘和篦子冷却机（当时被称之为空气骤冷机）。1951年在西德实际操作中第一次试用一种生料不经加水而用窑废气预热的方法。这种“空气悬浮系统”最初是由于料球强度不够因而在篦子预热器上易于破裂才特具吸引力。为了使生料和气体之间的热交换尽可能强烈，发明了各种类型的设备，如旋风筒、旋流室和上升管等热交换器，有时将它们联合在一起或布置成许多级。1958年由悬浮预热窑生产的熟料占7%，而立波尔窑的产量达41%，仍占主导地位。立窑的熟料产量占26%，湿法窑占17%，带余热锅炉或所谓“蒸发器”的干法短窑占9%。

为了满足急剧增长的水泥需要量，同时使水泥生产进一步合理化，从1960年起建设的新厂主要采用生产能力愈来愈大的悬浮预热窑（采用旋风预热器）。这一发展的结果使立窑和湿法回转窑越来越失去其意义。虽然立窑的热耗已下降到750千卡/公斤熟料，产量几乎提高到300吨/天。1972年立窑的熟料产量仅占4%，与此相反，悬浮预热窑的熟料产量达到53%。立波尔窑的占32%，湿法窑的占7%，余下的属于干法长窑和短窑。新一代水泥窑的标准规格为3000吨/天，欧洲最大的一台悬浮预热窑于1973年在西德南部一家水泥厂投产，它的尺寸是6.0×95米，产量为4000吨/天。同年世界最大的立波尔窑在西德北部一家水泥厂开始生产，熟料产量为3300吨/天。该窑原料用湿法制备，压滤机脱水。

由于窑的规格日益增大，给设计者带来一系列问题。尤其是窑衬的工作条件日益严厉，大大缩短了窑衬的寿命，窑的利用率也相应缩短。但是，预分解技术的发展对克服这方面的困难作出了贡献。1966年西德一家水泥厂首次在一台旋风预热窑的预热器内安装了为促进预分解的二次燃烧装置。自此以后在带预分解的大型窑上改善了窑皮状况，使窑的运转更为稳定，窑衬寿命也得到延长，从而窑的产量也有所提高。

现代旋风预热窑的热耗为750千卡/公斤熟料。除其他因素外，它也受熟料冷却机效率的影响，也即受进入窑内作燃烧空气的冷却机排出空气热焓的影响。早期回转窑装的是单筒冷却机，到1970年大多数回转窑带有能较好地利用熟料废热的篦式冷却机。为了适应高生产能力的需要，出现了把冷却机的篦子分成几部分的联合冷却机。篦式冷却机的一个缺

点是排出过剩气体，并且在排入大气以前必须加以净化。为了保护环境，近年来致力于改用不排废气的冷却系统。因此在新窑上重新使用多筒冷却机的不断增加。虽然这种冷却机在回转窑的早期就已为人所熟知，但是，多筒冷却机规格的突然增大（每一冷却筒的规格几乎与早期回转窑一样大），开始时在机械和工艺方面带来了许多困难。但是，对这种大型多筒冷却机在制造和操作上也取得了相当丰富的经验，因而它在新厂内比任何其他类型的冷却机更多采用。

3. 环境保护技术

生产水泥时发生的空气污染、噪音和震动不仅影响厂内的工作人员，而且还影响到附近居民。因此，早在1871年国家工商业劳动保护条例中就已规定，水泥厂的建设和生产必须经过有关当局批准。

当初，最早采用收尘措施的主要原因是粉尘危害和粉磨、包装水泥时产品损失。1882年埃特门格（Erdmenger）叙述了水泥磨房的通风设施和水泥装桶时的无粉尘包装设施。它由集尘罩、风管、一个作为集尘室的大容量集风管和一台风机所组成。

在1895年颁布的国家工商业劳动保护条例第16条的技术指示中对破碎机械的要求是：抽风机抽出的含尘空气必须在收尘器内净化，只有经过除尘后才允许排出。在第一次世界大战后这些指示也同样用于窑的方面。

在1908年的协会执行委员会的全体会议上第一次讨论了粉尘问题，成员厂要求协会执行委员会与其它工业协会建立联系，以便改变工商业劳动保护条例的个别规定。在同一个会议上详细地介绍了当时除沉尘室和旋风筒以外已经用于磨机和烘干筒除尘的布袋收尘器的效率。

由于生产设备的扩大，回转窑的增多以及工厂附近居民区的增加，在第一次世界大战以后对于粉尘的埋怨开始多起来了。为了弄清楚水泥厂粉尘对植物生长的影响，埃威尔特（Ewert）教授在协会的支持下于1916~1920年对水泥厂周围的植物生长和土壤情况进行了研究。他认为“水泥粉尘”并无害处，因为它能使酸性土壤碱化和阻止某些微生物危害植物生命。

尽管这种说法对水泥工业有利，新水泥厂的批准因附近居民的抗议和主管当局施加的条件而变得日益困难，就当时的除尘技术水平而言，这些条件往往是无法满足的。虽然对于窑废气采用电吸尘器收尘的实例不断增加，但是这种收尘器在废气比较干燥和温度超过250°C的情况下就失效，因为当时还不知道废气情况、粉尘比电阻与收尘器收尘效率之间的相互关系。居民的埋怨和主管部门的要求使对粉尘进行测定成为必要，于是高等院校研究所受地方当局和工厂的委托，对窑和工厂周围进行粉尘测定。当然，1920年前后所用的测试方法还是很不完美的，只能用来作对比。直到三十年代初发明了合适的方法和仪器后，才提供了可靠的数据（最初也是由窑委员会进行的）。

自从埃威尔特教授进行研究以来，协会及其试验室在环境保护领域内的活动限于收集有关排尘和粉尘污染的资料并根据要求提供给任何成员工厂。但是，1936年粉尘委员会采取了一个包含积极措施的广泛计划。这个委员会由水泥厂的几个代表和协会的一个工程师组成。它负责研究各种水泥机械排气的含尘量，评价除尘设备的性能，并且为水泥厂选择