

新型干法烧成水泥熟料设备

设计、制造、安装与使用

熊会思 编著



中国建材工业出版社

新型干法烧成水泥熟料设备

设计、制造、安装与使用

熊会思 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新型干法烧成水泥熟料设备：设计、制造、安装与使用/熊会思编著. —北京：中国建材工业出版社，
2003.11

ISBN 7-80159-464-9

I. 新... II. 熊... III. 水泥—熟料烧结—干法—
化工设备 IV. TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 101128 号

新型干法烧成水泥熟料设备

设计、制造、安装与使用

熊会思 编著

出版发行：**中国建材工业出版社**

地 址：北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编：100044

经 销：全国各地新华书店

印 刷：北京鑫正大印刷有限公司

开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：27

字 数：691 千字

版 次：2004 年 2 月第 1 版

印 次：2004 年 2 月第 1 次

印 数：1 ~ 3000 册

书 号：ISBN 7-80159-464-9/TU·228

定 价：48.00 元

本书如出现印装质量问题，由我社发行部负责调换。联系电话：(010) 68345931

前 言

当前我国水泥工业结构调整的要求是“淘汰小水泥，大力发展新型干法窑外分解大水泥，关小上大，压改结合”。这一正确部署推动了我国新型干法窑外分解水泥的快速发展。

为适应我国新型干法窑外分解水泥的高速发展，作者编著了本书，供水泥设计院、所，水泥机械厂，水泥厂，安装机械等部门的工程技术人员参考，亦可作为水泥机械专业大、中专学生学习的参考书。

本书叙述了我国水泥回转窑的发展情况，总结了发展过程中的经验教训，并叙述了我们在设计、制造回转窑方面取得的成绩。总结了回转窑在设计、制造、安装与使用方面的经验和吸收国外著名公司制造、安装及使用的技术要求，为制订我国回转窑行业标准提供了依据。

本书详细介绍了旋风预热器分解炉的发展情况，分别介绍了三种分解炉特点，特别是由烧油到烧煤到烧劣质煤分解炉的发展情况，并详细介绍旋风预热器旋风筒的高分离效率与低压损的研究设计，并且介绍旋风预热器的旋风筒、风管、卸料管、翻板阀的结构及强度设计计算，同时阐述了分解炉、三次风管、热风管道膨胀节设计、制造、安装和使用要求。根据在设计、制造、安装预热器分解炉方面积累的经验及消化吸收国外引进技术成果，为制订我国相关建材行业标准提供了依据。

最后，本书阐述了我国单筒冷却机和新型多筒冷却机的设计和制造过程，特别详细叙述了适合新型干法窑外分解的篦式冷却机的设计过程，详细阐述了我国自行开发的第一代篦式冷却机情况，介绍了引进第二代篦式冷却机制造专利内容，以及我国自行开发第三代篦式冷却机情况。本书还介绍了21世纪国外新一代篦式冷却机的工作原理及其结构特点。根据开发单筒冷却机和篦式冷却机取得的经验，以及对引进篦式冷却机软、硬件方面消化吸收的成果，为制订我国在篦式冷却机设计、制造、安装与使用方面的建材行业标准提供了依据。

应该指出，我国改革开放20多年来在党和政府的领导下，通过我国广大水泥工业职工及工程技术人员共同努力，我国新型干法窑外分解技术得到不断提高，我国甲级设计院可以设计生产规模由700t/d、1000t/d、2000t/d、4000t/d直至5000t/d的新型干法厂，设备国产化率达到93%以上，一条新型干法生产水泥线建设周期为12~15个月。这些都标志着我国新型干法生产水泥装备设计、制造、安装与使用技术已经达到国际先进水平。也正因为这样，我们才能收集到足够的资料写成这本书，同时希望本书对从事新型干法窑外分解生产水泥的工作者有所帮助。

由于作者本人技术水平和经历有限，书中难免有欠缺和不妥善之处，欢迎批评指教。

编 者

2003年5月18日

目 录

绪 言	(1)
1 水泥回转窑设计	(6)
1.1 前 言	(6)
1.2 设计回转窑的原始数据	(6)
1.2.1 雇主对回转窑的要求	(6)
1.2.2 回转窑规格	(6)
1.2.3 回转窑筒体设计负荷	(11)
1.3 回转窑筒体设计	(22)
1.3.1 窑筒体支承点配置	(22)
1.3.2 窑筒体结构设计	(26)
1.3.3 窑筒体强度计算及材料选择	(31)
1.3.4 新型干法窑发展方向	(37)
1.4 回转窑支承装置	(38)
1.4.1 托轮支承装置	(38)
1.4.2 挡轮装置	(48)
1.5 回转窑传动装置	(52)
1.5.1 窑传动装置额定功率的确定	(52)
1.5.2 齿圈和小齿轮副设计	(64)
1.5.3 减速装置	(67)
1.5.4 新型回转窑传动装置	(70)
1.6 窑尾窑头密封装置	(72)
1.6.1 窑尾密封装置	(72)
1.6.2 窑头密封装置	(74)
1.7 回转窑煤粉燃烧器	(75)
1.7.1 燃料及燃烧	(75)
1.7.2 燃烧器	(85)
1.8 回转窑技术性能	(101)
1.9 回转窑制造标准	(107)
1.10 回转窑安装验收规范	(122)
1.10.1 核对基础及基础划线	(122)
1.10.2 窑体轴线安装要求	(123)

1.10.3	传动装置安装要求	(124)
1.10.4	支承装置安装要求	(125)
1.10.5	砌砖前试运转时间	(126)
1.10.6	砌耐火砖的要求	(127)
1.11	回转窑使用和维护	(129)
1.11.1	回转窑正常运转的维护	(129)
1.11.2	停窑及检查	(132)
1.11.3	润滑及冷却	(133)
1.11.4	回转窑检修	(135)
2	悬浮预热器和预分解设备	(136)
2.1	生料悬浮预热器	(136)
2.1.1	最早旋风预热器专利	(136)
2.1.2	洪堡旋风预热器	(136)
2.1.3	其他型式旋风预热器	(139)
2.1.4	逆流式立筒悬浮预热器	(140)
2.1.5	旋风悬浮预热器与逆流式立筒悬浮式预热器比较	(141)
2.1.6	我国预热器开发及使用情况	(141)
2.2	分解炉装置	(142)
2.2.1	分解炉型式及其特点	(145)
2.2.2	筒式分解炉	(145)
2.2.3	流化床式分解炉	(171)
2.2.4	烟道式分解炉	(178)
2.2.5	关于分解炉的结论	(185)
2.3	旋风预热器及预分解设备设计	(185)
2.3.1	旋风预热器设备设计	(185)
2.3.2	预分解设备设计	(216)
2.4	旋风预热器分解炉热风管道附属设备	(228)
2.5	旋风预热器分解炉技术性能	(229)
2.6	旋风预热器分解炉设备制造标准	(233)
2.7	旋风预热器分解炉设备安装要求	(236)
2.8	旋风预热器使用和维护	(237)
3	水泥熟料冷却机	(242)
3.1	前 言	(242)
3.2	冷却机工作原理和要求	(242)
3.3	单筒冷却机设计	(243)
3.3.1	设计单筒冷却机的原始数据	(245)
3.3.2	单筒冷却机筒体设计	(249)

3.3.3	单筒冷却机支承装置	(251)
3.3.4	单筒冷却机传动装置	(251)
3.3.5	单筒冷却机进口密封装置	(252)
3.4	新型多筒冷却机	(253)
3.4.1	新型多筒冷却机工作原理及其结构	(254)
3.4.2	多筒冷却机设计计算	(257)
3.4.3	带多筒冷却机回转窑传动设计	(262)
3.4.4	带多筒冷却机回转窑设计实例	(262)
3.4.5	多筒冷却机水冷却系统	(264)
3.4.6	多筒冷却机环境保护	(265)
3.5	往复推动篦式冷却机	(266)
3.5.1	往复式篦式冷却机工作原理及其结构	(266)
3.5.2	往复推动篦式冷却机设计计算	(291)
3.5.3	第三代往复推动篦式冷却机技术性能	(301)
3.5.4	开发我国第三代往复推动篦式冷却机	(306)
3.5.5	SF 横棒式冷却机	(306)
3.5.6	Polytrack 篦冷机	(315)
3.5.7	压块式摆动支撑的篦冷机	(316)
3.6	各种型式熟料冷却机的选择	(317)
3.6.1	现场情况影响	(318)
3.6.2	投资费用	(321)
3.6.3	运转费用	(321)
3.6.4	运转特性	(324)
3.7	篦式冷却机制造标准	(325)
3.7.1	篦式冷却机基本参数确定	(326)
3.7.2	主要零部件技术要求	(328)
3.8	篦式冷却机安装要求	(333)
3.9	篦式冷却机使用和维修	(334)
3.9.1	试运转前检查	(334)
3.9.2	无负荷试运转	(336)
3.9.3	负荷运转	(338)
3.9.4	维 修	(341)
附 录	(345)
附录 1	JC 333—91 (代替 JC 333—83) 水泥工业用回转窑	(345)
附录 2	JC/T 832—1998 水泥工业用回转窑产品质量分等	(353)
附录 3	JC 465—92 水泥工业用预热器分解炉系统装备技术条件	(361)
附录 4	JC/T 669—1997 水泥工业用旋流式立筒预热器	(366)
附录 5	JC 464—92 水泥工业用空气炮清堵器	(371)

附录 6	JC/T 842—1999 水泥工业用单筒冷却机·····	(376)
附录 7	JC 336—91 (代替 JC 336—83) 水泥工业用推动篦式冷却机 ·····	(385)
附录 8	JCJ 03—90 水泥机械设备安装工程施工及验收规范 (摘要) ·····	(390)
参考文献	·····	(419)
	水泥回转窑·····	(419)
	悬浮预热器与预分解设备·····	(420)
	水泥熟料冷却机·····	(422)

绪 言

自 1889 年我国在河北省唐山建立启新洋灰公司至 1949 年解放前的 60 年中，水泥工业发展相当缓慢，当时水泥总生产能力仅为 314.6 万吨，最高水泥年产量仅为 229 万吨。

1949 年全国解放后，我国水泥工业迅速发展（见图 1），至 1990 年水泥产量达到 20 791 万吨，1996 年达 47 000 万吨。

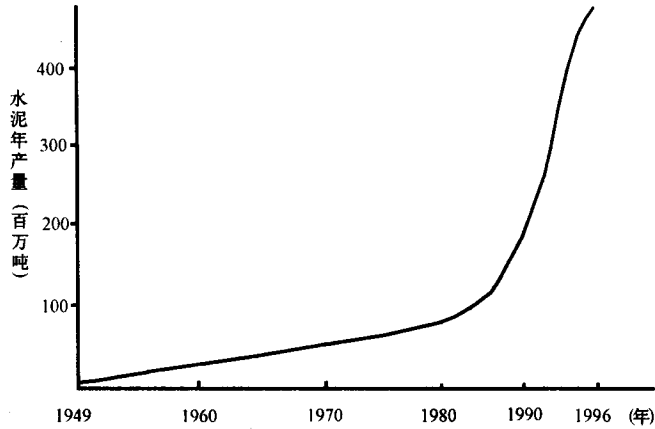


图 1 中国水泥年产量

解放前我国水泥工业很落后，所有水泥装备都是从丹麦、美国、德国等制造商购买。

解放后，我国组建了自己的水泥工业设计队伍——北京水泥工业设计院（天津、南京、成都水泥设计研究院前身），在 20 世纪 50 年代首先开发 180t/d 湿法水泥生产线，设计制造出 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 窑及相应配套水泥装备，20 世纪 60 年代初开发了各种型式 240t/d 机械立窑（包括辊式、盘式、塔式、摆辊式及抽板式机械立窑）。这些立窑装配着我国遍地开花的立窑水泥厂，至今占我国水泥产量的 3/4，使我国水泥产量跃居世界第一。

20 世纪 60 年代，我国还开发了 $\phi 3.5\text{m} \times 145\text{m}$ 湿法窑，并设计了 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 立波尔窑以及配套水泥装备，满足了我国水泥工业“三五”装备的要求。

20 世纪 70 年代初，我们设计了 1 650t/d 的 $\phi 5\text{m}/5.5\text{m} \times 185\text{m}$ 湿法回转窑。为设计大型回转窑做了许多研究和测试工作。

1975 年以后，我国水泥工业的发展方向是开发新型干法生产线，TJ 院的主攻方向是 2 000t/d 带分解炉旋风预热器生产线。1978 年以后，随着我国改革开放，加快了新型干法生产线的开发速度，到 1986 年末，我国自己设计、制造、配套、施工的第一条 2 000t/d 新型干法水泥生产线在 JX 水泥厂投产。这条生产线共使用了国内首次开发设计的 92 项主机设备和辅助设备，国产设备占全厂设备总量的 86%，基本实现了国产化。这标志着我国新型干法工艺装备从依靠国外成套购进，进入了自主发展阶段，为我国大型新型干法成套技术装备奠

定了基础，是中国水泥装备发展史上第二个里程碑。

与此同时，我国向国外著名水泥机械制造商购进 20 项新型高效节能设备生产许可证，通过消化，转化成国产水泥设备，这些设备装配了我国 2 000t/d 新型干法工艺线，使之具有 20 世纪 80 年代的先进技术水平。我们利用这些先进技术水平，不但装配了 20 多套生产线，还有多套生产线出口到国外。

在 20 世纪 90 年代初，为使我国水泥生产装备大型化、现代化，赶上国际先进水平，我们自行设计了 4 000t/d 新型干法生产线烧成系统的预热器、窑、冷却机，同时设计配套低温余热发电系统，并装配在冀东水泥厂二线的 4 000t/d 工艺线上。

1. 我国回转窑开发过程

我国水泥机械设计制造水平，是由我国水泥工业发展要求来决定的。而代表我国水泥机械发展的水泥回转窑大型化和新型干法化过程也和我国水泥工业发展水平密切相关。

如前所述，建国后我国水泥工业才获得发展，1970~1975 年是第一个里程碑，1976~1990 年是第二个里程碑，1990 年后是干法大型化阶段。由图 2 的我国回转窑大型化趋势折线可见，在上述三个年代正好是折点。下面论述我国回转窑制造技术发展各阶段情况。

1950 年，我国在沈阳成立重工业设计院，组建了第一支水泥工业设计队伍，刚开始我们进行修复东北地区的一些水泥厂，在修复过程中我们学会了水泥工厂设计，其中一部分人学会了回转窑设计，后来迁到北京成立北京水泥工业设计院，到 20 世纪 50 年代末，我们独立自主地设计出 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 湿法长窑，并设计了配套的其他水泥装备。该回转窑带多筒冷却机，首先在我国上海 WS 水泥厂一次投产成功，接着援助柬埔寨建设水泥厂，得到柬方好评。

通过设计和制造 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 窑，我们学会了如何进行设计回转窑各部分机构及零部件，也掌握了如何计算各部件强度，学会了合理选择材料和热处理方式，通过与制造厂实际制造条件密切结合，提出了最恰当的制造技术要求。当时我国没有自己的标准减速机可供选用，只好自行设计。没有现成的可调速直流电动机供选择，我们只好向电机厂提出回转窑传动电动机的要求，由电机厂专供回转窑用电动机。当时没有专门水泥机械制造厂，只好同上海中华造船厂合作，制造出我国第一台 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 回转窑。

通过设计和制造 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 窑，我们学会了设计制造回转窑，积累了一定经验，同时也使我国水泥机械制造业开始起步。

通过设计和制造 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 回转窑，我们学会了设计制造回转窑，积累了一定经验，同时也使我国水泥机械制造业开始起步。

2. 我国湿法窑大型化阶段

在 20 世纪 60 年代初，我们开始设计 600t/d 湿法长窑 $\phi 3.5\text{m} \times 145\text{m}$ 窑。我们将当时世界上比较先进的回转窑方面技术用于该窑上，例如在回转窑筒体设计方面，采用了焊接筒体代替了铆接的筒体；逐步认识到加大轮带刚度和轮带下筒体厚度，达到减小回转窑筒体横向变形以增加耐火砖的稳定性，提高耐火砖寿命；突破了以前设计窑筒体支承间跨度 $\leq 20\text{m}$ 的限

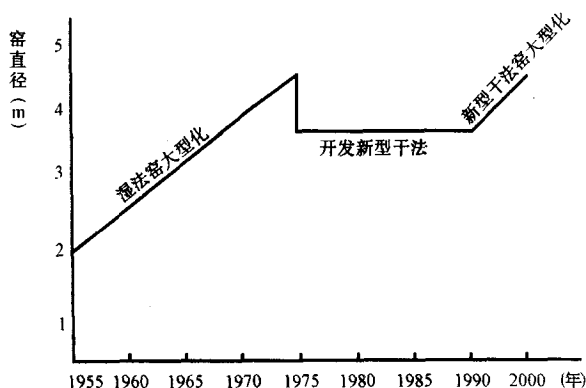


图 2 中国回转窑大型化趋势

制，筒体两档支承间跨度大大增加，精心分配筒体支承间跨距，达到筒体跨间及支点弯曲力矩和支点反力相等，使窑支承数减至最少，整台窑只设6档支承，使该窑重量大大降低。由于支点反力相等，这样6档托轮支承相同，大大减少了备品备件数量；另外采用当时新出现的液压挡轮技术，这样可以平行窑中心线摆放托轮，使轮带与托轮表面能平行接触，可降低轮带与托轮表面间实际接触应力，大大降低轮带和托轮表面磨损量，从而可以提高轮带和托轮的寿命。在传动装置方面，由于当时可供选用标准减速机传动功率较小，采用了双传动；在大齿圈和小齿轮副设计方面我们采用小模数多齿数方案，这样可提高传动平稳性和增大了大齿圈小齿轮副速比，降低了减速机速比，达到减小减速机规格的目的，采用切向弹簧板把大齿圈固定在筒体上，这样可缓冲大齿圈传动中的冲击力，不会影响该处筒体内耐火砖寿命，也减少了筒体热胀冷缩对齿圈的影响；在传动直流电动机方面，把老式电动发电机组供电改为可控硅整流器供电，这样做既节省了能量又提高了供电可靠性。在窑卸料端采用风冷套及专用风机吹风冷却窑口护板，可提高窑口护板的使用寿命。另外对窑头窑尾密封不断进行改进，提高了密封效果。总之使 $\phi 3.5\text{m} \times 145\text{m}$ 窑不断完善。

与此同时，我们设计了 $\phi 4\text{m} \times 54\text{m}$ 和 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 立波尔窑和配套水泥装备，用于装配900~1000t/d半干法生产水泥工艺线。在我国“三五”期间，共制造了20多套600t/d湿法生产线和10多套900~1000t/d半干法生产线，基本满足了我国“三五”水泥装备要求，不用再从国外买进水泥装备；在制作这些装备过程中，我国开始建设水泥机械制造厂，并在不断制造水泥装备的过程中提高了制造能力。

20世纪70年代初，在开发湿法回转窑大型化方面，我们也设计了 $\phi 5\text{m}/5.5\text{m} \times 185\text{m}$ 大型湿法窑。为了摸清大窑筒体变形的实际数据，我们研制了回转窑筒体变形仪，对国内各种规格窑筒体进行了大量测量工作。

根据测得的大量数据，得出筒体横向变形的椭圆度跟窑筒体钢板厚度与窑筒体直径比值成正比，只要控制 δ/D 大于一定值，就能保证窑筒体横断面有足够刚度，可以避免窑内耐火砖过早损坏。另外通过测量，得出轮带下筒体椭圆度最大、远离支承处越远，筒体椭圆度越小。故设计窑筒体时，轮带下筒体钢板取最厚，过渡段钢板厚度次之，跨间钢板厚度最薄。总之在设计窑筒体横断面时，要保证其横断面刚度尽可能大即“横刚”的观点。

在筒体纵向支承配置方面，我们尽量加大跨度，可以降低支承沉陷产生附加应力，减少窑筒体支承数可降低窑的总重量从而降低造价。我们当时设计 $\phi 5\text{m}/5.5\text{m} \times 185\text{m}$ 窑只采用了6个支承，与当时世界上同样长度湿法长窑相比，其支承数量是最少的，这就是“纵柔”的想法。

1975年11月，我们设计出 $\phi 5\text{m}/5.5\text{m} \times 185\text{m}$ 窑的全套图纸后，因日本出现分解炉旋风预热器窑，世界各国纷纷由湿法转向新型干法，结果大型湿法长窑被长期搁置下来。

3. 开发2000t/d新型干法烧成系统

1975年以后，我国水泥工业发展方向是新型干法生产线，TJ院主攻方向是设计2000t/d新型干法水泥生产线，其主机是 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 窑。因此对过去设计的 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 立波尔窑，根据预分解窑的要求，作了下列改造工作：预分解窑烧成带长，窑皮负荷增加，采用实心轮带代替过去空心轮带，提高轮带刚度；同时采用可更换的垫板严格控制轮带与垫板间隙，达到减少筒体变形，提高耐火砖寿命；因预分解窑的窑头、窑尾温度都很高，故窑筒体两端采用耐热铸钢ZGCr26Ni12制作窑口护板，并设冷风套鼓风冷却，同时对窑头、窑尾的密封装置作了大量改进工作；另外把预分解窑转速提高到4r/min，为防止轮带和托轮磨损过快，一方

面采用合金铸钢铸造轮带和托轮，另外采用液压挡轮，改善了轮带和托轮接触状况，减少了托轮看护工作。由于窑转速加快，传动功率要相应加大，当我国颁布了硬齿面大功率减速机标准后，就把窑传动由双传动改为单传动。

在第一套 2000t/d 新型干法水泥生产线的烧成系统设计时，我们将主要精力放到开发带分解炉旋风预热器、厚料层推动篦式冷却机上。开发预热器时，我们采用了旋流燃烧器、旋流分解室、混合室组成的 TC—RSP 分解炉，烧煤较可靠。预热器的设计，我们通过热模型试验找出旋风筒本身结构尺寸比例及其各断面恰当风速，解决了各级旋风筒规格设计问题，在结构上解决了旋风筒顶盖用工字钢挂砖的问题；旋风筒内部暴露在高温气体下的金属，根据不同温度采用不同镍铬耐热钢；为补偿系统设备间热膨胀产生热位移，设计底座浮放在梁上可水平方向伸缩；而对各料管、混合室上下口、旋风分解窑下部垂直方向的热膨胀，采用了波纹膨胀节补偿，各风管与旋风筒顶盖之间热膨胀，采用预提拉旋风筒薄钢板顶盖预变形来弥补；为解决物料进风管均匀散布物料设有可调整撒料板以及进入旋流分解室处设有撒料棒；为平衡来自窑尾和三次风管的两路通风量，在窑尾喂料室进入混合室处设有对称可调缩口调节器；为防止物料堵塞，在下部各级旋风筒锥体部分设有压缩空气清扫装置，定期吹扫，在易结堵堵塞处设有捅灰门；在各级下料管下部设有重锤式翻板阀，要求它开闭灵活，密闭性好。

开发厚料层推动篦式冷却机，为提高推动篦式冷却机单位面积冷却能力，把篦床上熟料层厚度由 250mm 提高到 500mm 以上，这样篦下室鼓入风的风压要求 500mm 水柱以上。故要加强篦下室密闭性，在结构上将过去纵向布置篦板支承梁改为横向布置，使篦下室隔板焊在固定篦板支承梁下，大大加强了篦下室间密封。另外，输送篦板漏料的拉链输送机也要用翻板阀与篦下室隔离开，增加了篦下室密闭性。为使窑卸出的 1350℃ 高温熟料急剧降温，把第一篦下室做得尽可能小，一般取前三排篦板作第一室，鼓以高压空气急冷，使熟料温度急剧降下来，会对整台篦冷机冷却效果起决定性作用，通过以后各室合理配置恰当风量、风压的风机，保证熟料可冷至环境温度 + 65℃。

篦冷机熟料排出口设有锤式破碎机，一方面把大块未冷透熟料打碎后抛回篦床上重新冷却，另一方面保证破碎后熟料粒度 $\leq 25\text{mm}$ ，可以直接入磨粉碎。

后来我国在引进国外 20 项水泥机械先进技术时，购买了日本神户制钢的 DD 炉旋风预热器和美国福勒公司的推动篦式冷却机制造专利。但我们当时所做的工作对选择最先进的制造技术和后来消化吸收都起了重要作用。

4. 开发 4000t/d 大型新型干法烧成系统

20 世纪 80 年代末，我国已建成 20 多套 2000t/d 新型干法水泥生产线，通过引进消化国外 20 项先进技术来改进我们自行开发的装备，使我国 2000t/d 新型干法水泥生产线渐趋成熟，双阳水泥厂的建成并达标达产就是成熟的标志。

20 世纪 90 年代初，我们适时开发 4000t/d 大型新型干法烧成系统。

通过对国外 4000t/d 带分解炉预热器窑的分析，经过慎重工艺设计计算，决定窑的规格为 $\phi 4.7\text{m} \times 75\text{m}$ 。为此，我们编制了电子计算机计算窑筒体强度计算程序，以及利用有限元计算轮带应力和变形，使我们设计的 $\phi 4.7\text{m} \times 75\text{m}$ 窑更可靠。另外，我们吸取了国外同规格窑在我国国内使用的经验教训，用于指导 $\phi 4.7\text{m} \times 75\text{m}$ 窑的设计，例如通过某厂筒体出现裂纹，使我们对于窑筒体温度和钢板许用应力有了深刻认识，加强了对烧成带筒体设置辐射高

温计进行监控的认识，确立了窑筒体温度不能超过 410℃报警温度。同时对新型干法窑烧成带很长的问题，确定了使轮带支承点尽可能远离烧成带高温点的设计观点，也就是将烧成带跨度尽可能加大。

回转窑大型化后，要特殊考虑零部件制造和运输。例如轮带下 75mm 厚筒体，一般水泥机械厂要加热后卷制，而大型重型机器厂可冷卷或用水压机压制。而轮带净重达 53t，则要求重型厂要有 80t 平炉才能进行浇铸。

在传动装置方面，我们通过调查已有 4 000t/d 窑的运转情况，搞清楚了主电动机额定功率与工作运转功率关系以及窑起动力矩关系。

在冷却机方面，当时以 IKN 为首，首先开发出高阻力篦板的第三代篦式冷却机。一、二、三代篦式冷却机主要技术性能见表 1。

一、二、三代篦式冷却机主要技术性能

表 1

技术性能	单位	一代	二代	三代
进口篦板		急冷篦板	减小第一室	固定阶梯篦板
高温区篦板		推动板 + 托板	推动篦板	缝隙篦板 (IKN) Ω 篦板
篦床上熟料层厚度	mm	250	500	800
单位篦床面积载荷	t / (m ² ·d)	18	35	45 ~ 50
冷却效率	%	60	70	75

由于第三代篦板（缝隙、 Ω 形）的阻力很高，有利于熟料层均匀透过冷空气，故熟料冷却效率很高。由于篦板阻力很大，再加上熟料阻力，这样空气室通风方式无法胜任，而改用空气梁通风。

通过我们自行开发，第三代篦式冷却机在我国已获得广泛应用。

5. 我国水泥烧成系统发展方向

目前我国水泥年产量达到 4 亿多吨，但立窑产量占 3/4，从产量来说，基本满足了我国需要。但从劳动生产率、水泥质量、节省能耗与环境保护等方面来说大大落后于先进国家。因此我国建材主管部门适时地提出了水泥工业要大改小，水泥机械装备要大型化、节能化和环保化的战略部署。

最近 TJ 院设计制造出 5 000t/d 新型干法烧成系统：回转窑规格 $\phi 4.8\text{m} \times 72\text{m}$ ；分解炉为双喷腾式 (TDF 炉)，规格 $\phi 7.4\text{m} \times 16\text{m}$ ；第三代篦式冷却机，有效篦板面积为 191.3m²，填补了国内 5 000t/d 大型新型干法烧成生产线的空白。

另外，本书在冷却机的章节中，介绍了 21 世纪国外新三代篦式冷却机技术。该技术由丹麦史密斯公司及德国伯力鸠斯公司开发，它是将传统篦式冷却机篦板功能，既推送熟料又通过空气冷却熟料层分开。开发出新三代篦式冷却机技术，即是采用固定的无泄漏篦板冷却熟料层，另外用横棒机构推送熟料，这样可以大大提高冷却机冷却效率，减少冷却风量。同时由横棒机构推送熟料，大大提高篦板和横棒零件寿命。由于篦板无泄漏，可以取消冷却机下输送漏下细料的输送机。由于它具有比第二代篦冷机明显的优点，新三代篦式冷却机将是冷却机发展的方向。

1 水泥回转窑设计

1.1 前言

解放以后我国水泥工业才得到较快发展，改革开放后更得到飞速发展，目前我国水泥产量位居世界第一。水泥设备制造业也得到飞速发展，其中回转窑是水泥厂的“心脏”，是最重要的关键设备，解放前我们只能向国外购买，解放后我们开始自行设计制造，到目前为止，能设计制造满足任何规模水泥工厂需要的水泥回转窑。

在20世纪50年代末，我们设计了 $\phi 2.5\text{m} \times 78\text{m}$ 窑，满足了180t/d湿法水泥熟料生产线要求；在20世纪60年代，我们设计制造了 $\phi 3.5\text{m} \times 145\text{m}$ 湿法长窑和 $\phi 4\text{m} \times 54\text{m}$ 、 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 半干法窑；20世纪70年代，我们开发了1650t/d的 $\phi 5\text{m}/5.5 \times 185\text{m}$ 湿法长窑；20世纪80年代，我们开发了2000t/d的 $\phi 4\text{m} \times 60\text{m}$ 带分解炉的旋风预热器窑；到20世纪90年代我们开发了4000t/d的 $\phi 4.7\text{m} \times 75\text{m}$ 带分解炉的旋风预热器窑。在这40多年中，我们在回转窑的设计方面积累了不少经验，也得到不少教训，本书试图总结这方面的经验教训。

1.2 设计回转窑的原始数据

设计回转窑的原始数据，首先要根据窑的额定产量及工艺技术性能要求，确定窑的规格，接着确定计算窑的所有部件的耐火砖、窑皮和物料负荷重量。

1.2.1 雇主对回转窑的要求

窑的额定产量 G (t/d) (1.2.1)

窑最大连续产量 $G_{\max} = 1.1 \times G$ (t/d)

窑最小连续产量 $G_{\min} = 0.95 \times G$ (t/d)

窑的工艺技术性能包括采用何种型式窑。我国目前广泛采用的是带分解炉旋风预热器窑、余热发电干法中空回转窑和湿法长窑及其窑内附属的热交换装置窑。

工艺技术要求还有生料的料耗以及燃料的消耗等。

1.2.2 回转窑规格

1. 可以按下列公式确定回转窑的耐火砖内径

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{G}{K}} \quad (1.2.2)$$

式中 D_i ——窑耐火砖内径，m；

G ——窑额定产量，t/d；

K ——与窑型有关的系数。

与回转窑型式有关系数 K

表 1.2.1

回转窑型式	K
余热发电干法中空窑	13~18
湿法长窑	17~23
旋风预热器窑 (SP 窑)	25~30
带分解炉旋风预热器窑 (NSP 窑)	50~60

2. 确定回转窑筒体内径

一般回转窑的规格主要参数是窑直径 D ，是指窑筒体内径。可按下式计算

$$D = D_i + 2\delta_{\text{耐火砖}} \quad (1.2.3)$$

式中 D ——窑筒体内径，根据我国建材行业标准 JC 333—91 水泥工业用回转窑标准，其第 1 系列为 $\phi 2.5\text{m}$ 、 $\phi 3\text{m}$ 、 $\phi 3.5\text{m}$ 、 $\phi 4\text{m}$ 、 $\phi 4.5\text{m}$ 等，以 0.5m 为间隔，第 2 系列是以 0.2m 为间隔，m；

D_i ——窑耐火砖内径，m；

$\delta_{\text{耐火砖}}$ ——窑最小耐火砖厚度，与窑筒体内径有关，mm，应符合表 1.2.2 要求。

水泥回转窑耐火砖厚度

表 1.2.2

窑筒体内径	耐火砖厚度
< 3.5m	> 180mm
$\geq 3.5\text{m}$ 、< 4m	$\geq 200\text{mm}$
$\geq 4\text{m}$	$\geq 220\text{mm}$

在熟料煅烧过程中，使回转窑内存在高温，必须用砌筑耐火材料，达到保护窑钢板筒体。如果不砌筑保护层，筒体在几小时内就瓦解。耐火衬常用非金属材料，它可抵抗高温。窑内耐火衬常用特殊成分的砖，它的规格见图 1.2.1。

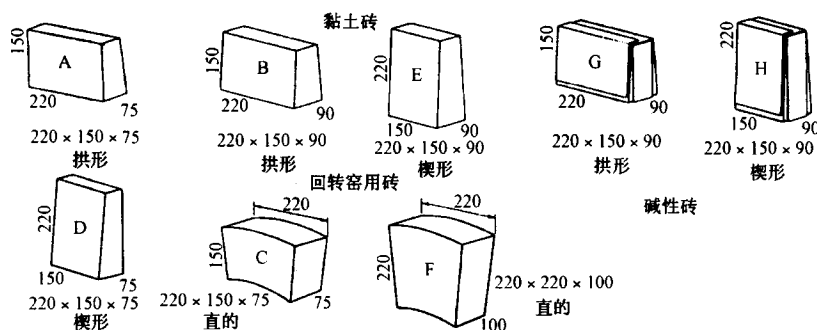


图 1.2.1 回转窑用各种规格形状的耐火衬砖 (mm)

回转窑大多数操作者，把耐火砖事故设定为回转窑运转周期。当耐火砖衬任何一处完全脱落使窑筒体变红，或者一块面积的窑筒体变得过热，这就表明回转窑内部耐火衬已损坏。

像上述情况是很危险的，因为一旦耐火衬保护层脱落，钢板筒体很容易弯曲，造成整个窑筒体需要更换。在大多数情况下，当筒体一开始出现红斑时，立即停窑更换窑衬是可以避免上述危险的。因此上述红窑状态的补救过程是很重要的。

遗憾的是，往常需要更换窑衬，特别是烧成带窑衬常换，这对窑运转费用和生产作业计划影响巨大。例如直径 $\phi 4.8\text{m}$ 、长 15m 的整个烧成带更换耐火砖费用超过 25 万元。这个价格仅为耐火砖本身价格，不包括砌筑的费用，而生产损失费用和把窑恢复到操作温度所需要额外燃料费用更无法估计。

回转窑烧成带耐火衬寿命在 50 天到 1 年或更长时间内变化。换句话说，1 台窑耐火衬寿命可能是另 1 台窑耐火衬寿命的 10 倍。耐火砖寿命有这样巨大差别的原因：一方面直接与耐火衬的材料、形状以及砌筑质量有关；另一方面，窑的操作情况、生料成分、窑设备的机械刚度都会对耐火衬寿命产生很大影响。

表 1.2.2 中水泥回转窑耐火砖厚度随窑筒体内径增大而增大，目的是保持砖拱楔接牢固度，保持砖衬稳定性，使窑衬不会因为窑直径增大而稳定性降低。

3. 确定回转窑筒体长度

现代回转窑多采用直筒型窑，因为其结构比较简单，部件和衬砖的规格较少，便于制造和维护。

由图 1.2.2 可见，水泥回转窑可分为干燥、预热、分解、放热反应、烧成和冷却带。各带具有一定长度，不同窑型要求窑内物料温度和反应不一样，其包括带数也不一样。湿法窑有干燥带，干法窑没有干燥带而从预热带开始。

在分解带物料温度上升得很慢，当 CO_2 一旦排出和开始形成液态化合物时，温度就迅速升高，这时物料就进入烧成带，然后很快温度就降低，这时物料通过烧成带进入冷却带。

窑内热气体热辐射到物料，仅仅发生暴露于气体的料层表面，因此物料层的温度是中心最低和表面最高。

在干燥预热带，该处耐火砖衬表面更光滑和物料仍多少还是固体状态，物料很少发生滚动，而是沿着之字形途径滑向窑的低端。该物料层首先沿窑壁提升，当它提升到一定高度后它滑落并向前，在各方面扩散而没有滚动。然而，具有球粒物料（像湿法窑或半干法窑生产过程）的窑中的滚翻运动是巨大的。

当物料进入窑烧成带的时候，开始处于粘结情况，继而变成稳定搅拌状态，借助粗糙和

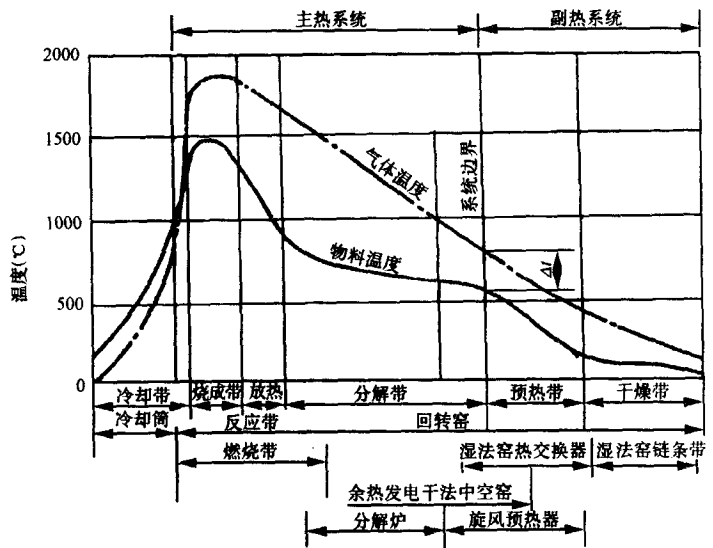


图 1.2.2 回转窑内物料温度和气体温度以及各带划分的大致情况

不光滑的窑皮，使它产生沿窑的侧壁向上运动，然后滚落下来。由于滚动作用，表层经常被卷入到物料内部，这样热的颗粒通过传导把热传递给冷的颗粒。同时新的颗粒开始被暴露，受到热气体辐射和继续重复上述过程。热气体辐射热同时传给粘着于窑壁的窑皮，它传入物料层部分热量通过传导传递给物料。图 1.2.3 表明，当窑皮由物料层中刚出来时，其温度是最低的以及它刚进入同物料接触时其温度最高。当窑转速较慢和窑内横断面载荷更小时，上述两点温度差将较大，最大温差可达 220℃。

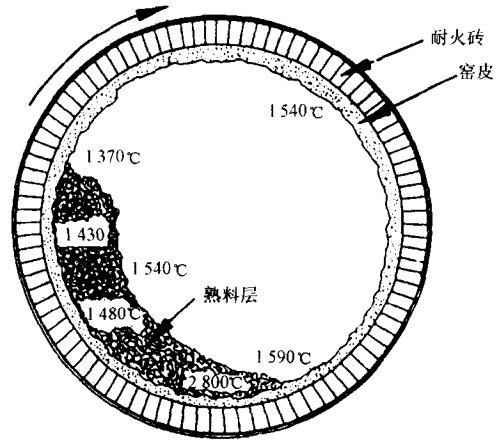


图 1.2.3 烧成带熟料层及窑皮温度变化

另外，情况相同时，上述讨论窑壁作用和窑回转速度之间存在着很重要关系。对于热交换来说，高的窑转速比低转速更有利，因为高转速使窑壁和物料之间温度差很小。窑操作员必须仔细加以考虑，以决定在什么时候是否要增加窑转速。

各种回转窑热效率变化是相当大的，它与窑系统型式和生产方法有关。回转窑基本是一种效率低的热交换装置，其很大一部分进入窑内的热被废弃。一般来说，干法窑生产比湿法窑具有更高的热效率，因为干法窑不需要附加的热量去蒸发料浆中的水分，当然也有例外。我们知道湿法窑生产每千克熟料需要 6 070J，有时干法窑每千克熟料需要超过 7 535J。现在使用预热分解窑每千克熟料需要 3 014J。实际上一些窑有这样大的差异的原因，是与湿法生产、干法生产有关，特别是与新型干法分解炉窑的热效率高有关。

表 1.2.3 表示出窑中热的分配，可见仅有 30% 多的热用于煅烧熟料。筒体辐射热占有干法窑和湿法窑两者热耗的 1/4 左右，如果包括废气热耗在内总热耗占有干法窑的 50%，以及包括湿法窑蒸发水分则热耗超过 50%。因此为提高热效率就要缩短窑长和利用废气热量。

回转窑需要热量

表 1.2.3

	热量的百分比 (%)	
	干 法	湿 法
蒸发水分	9	37
辐射热耗	25	18
废气热耗	25	8
卸出熟料 (冷却) 热耗	3	3
碳酸盐分解和过热的热耗	3	2
小 计	65	68
煅烧熟料的理论热	35	32
	100	100

在悬浮预热器窑 (SP 窑) 中，热的废气可用来对进入窑之前的物料预热和局部使之分解。而预热分解炉窑则使进入窑之前物料的分解率达到 90% 以上。这样能够做到大大缩短