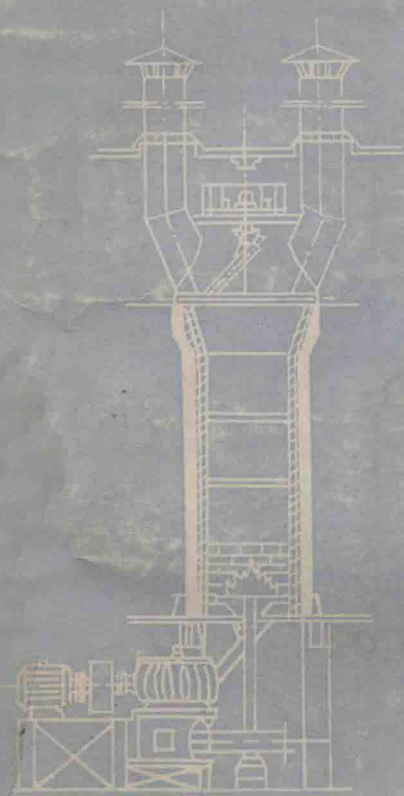


立窑水泥技术

上册



浙江省水泥协会编印

前 言

我国水泥工业迅速发展，水泥企业深化改革，“双增双节”运动正在深入展开，小水泥厂迫切需要进一步提高技术水平、管理水平和企业的经济效益。为了适应这一新形势发展的需要，更好地为水泥行业服务，我协会组织有较高理论水平和实践经验的教授、工程师编写《立窑水泥技术》一书。他们参阅和收集了大量国内外立窑水泥技术资料以及技术革新和科研成果，并参考了国内其他行业适用于立窑生产的技术资料，如冶金行业的成球技术等。因此，本书内容丰富，理论与实践结合紧密，不仅适用于小水泥企业，亦可作技术培训的教材，对于大中型水泥厂、大专院校和科研单位也有参考价值。

《立窑水泥技术》分上、中、下三册。

上册主要内容为水泥原料与燃料、配料与配煤、生料均化、生料成球及煅烧原理与方法等，共六章；

中册主要内容为立窑结构、立窑操作、立窑工艺设计基本知识、工艺计算及热平衡、水泥生产的质量控制及提高立窑生产水平的技术途径等；

下册主要内容为原料破碎与烘干、生料制备、水泥粉磨，以及国家有关小水泥的文件、生产统计资料等。

参加本书编写的人员是：

编写：王大年、徐先宇、霍恩光、曹永珩同志。主编：
浙江省建材工业总公司工程师王大年同志。

责任编辑：《浙江水泥》总编曹永珩同志。

技术校对：《浙江水泥》编委孟镇菲同志。

技术设计：《浙江水泥》编辑部袁啸谷同志。

在本书编写过程中，受到水泥协会理事会的重视与支持，得到有关单位和个人的很多支持和帮助，特致谢意。由于我们水平所限，时间短促，书中缺点和错误在所难免，恳切希望读者提出批评指正。

1987年12月

《立窑水泥技术》

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 立窑水泥发展简史	(1)
第二节 立窑水泥的地位和作用	(3)
第三节 立窑水泥的类型和特点	(5)
第四节 立窑烧成的工艺流程	(8)
第二章 原料和燃料	(10)
第一节 石灰质原料	(12)
一、天然石灰质原料	(13)
二、人工石灰质原料	(24)
第二节 粘土质原料	(26)
一、粘土	(28)
二、黄土	(30)
三、页岩	(30)
四、煤矸石	(31)
五、玄武岩	(33)
六、粉煤灰	(33)
七、矿渣	(35)
第三节 校正原料	(35)
一、铁质校正原料	(35)

二、硅质校正原料	(38)
三、铝质校正原料	(39)
第四节 矿化剂	(41)
第五节 燃料	(46)
一、无烟煤	(46)
二、焦炭屑	(49)
三、石煤	(49)
四、煤矸石	(52)
五、烟煤和褐煤	(52)
六、燃料发热量的计算	(54)
第三章 配料及配煤	(64)
第一节 硅酸盐水泥熟料的组成	(64)
一、熟料的矿物组成	(65)
(一) 硅酸三钙	(66)
(二) 硅酸二钙	(70)
(三) 中间相	(74)
(四) 测定矿物组成方法比较	(79)
二、硅酸盐水泥熟料各矿物的水硬性及其相互关系	(82)
三、水泥熟料的化学成分	(84)
第二节 硅酸盐水泥熟料的组成与率值	(86)
第三节 配料的目的和原则	(87)
第四节 配料计算	(99)
一、尝试拼凑法	(103)
二、递减试凑法	(114)
三、代数法	(122)
四、简易公式法	(128)

五、微型电子计算机计算·····	(136)
第五节 配料工艺·····	(141)
一、配料工艺流程·····	(141)
二、各种配料工艺比较·····	(143)
第六节 配煤工艺·····	(148)
一、配煤工艺流程·····	(149)
二、几种典型的配煤工艺·····	(151)
三、煤流量的抽查·····	(161)
第七节 配料及配煤设备·····	(162)
一、圆盘喂料机·····	(163)
二、电磁振动喂料机·····	(166)
三、螺旋喂料机·····	(171)
四、叶轮喂料机·····	(172)
五、标尺式电子斗秤·····	(173)
六、简易电子斗秤·····	(175)
七、简易电子皮带秤·····	(179)
八、悬臂式电子皮带秤·····	(182)
✓ 第四章 生料均化·····	(186)
第一节 均化的意义·····	(186)
一、生料均化程度对易烧性的影响·····	(186)
二、生料均化程度对熟料质量的影响·····	(187)
三、良好均化,可保持立窑生产稳定·····	(188)
四、有效均化对节能有利·····	(189)
第二节 均化效果的评价和分析·····	(190)
一、均匀性数学表示方法·····	(192)
二、均化效果的评价和分析·····	(202)
第三节 机械混合均化工艺·····	(208)

一、多库搭配均化	(208)
二、机械倒库	(212)
三、上层小库均化法	(215)
四、机械均化的生产工艺控制	(215)
第四节 间歇式空气搅拌库	(218)
一、库底结构形式	(218)
二、技术参数的确定	(223)
三、生产工艺控制	(228)
第五节 连续式生料均化库	(235)
一、流程	(236)
二、主要技术参数	(237)
三、混合室均化库的结构	(238)
四、主要操作参数和效果	(243)
五、国内部分混合室库设计参数	(245)
第五章 成球	(246)
第一节 成球机理	(247)
第二节 成球盘内物料的运动	(255)
第三节 成球质量的要求与测定	(259)
一、料球的颗粒组成	(259)
二、料球水分	(262)
三、湿料球强度	(263)
四、料球磨损率	(263)
五、料球的高温爆破率	(263)
六、料球内部空隙率	(263)
七、球间孔隙率	(264)
八、料球收缩率	(265)
第四节 影响成球质量的因素	(266)

一、原料的颗粒特性·····	(266)
二、生料粉的温度及细度·····	(268)
三、生料喂料量和加水量的配合·····	(268)
四、喂料管及喷水管在盘内的位置·····	(268)
五、掺入外加剂·····	(270)
六、其他·····	(271)
第五节 成球设备·····	(272)
一、成球盘·····	(272)
二、成球筒·····	(275)
三、阶梯式成球盘·····	(276)
第六节 成球操作·····	(278)
一、摸索出适合本厂情况的喷水口位置·····	(278)
二、成球系统的开、停机顺序·····	(279)
三、成球盘的正常操作·····	(279)
四、成球盘的斜度调正·····	(280)
五、控制生料粉的细度和温度·····	(280)
第七节 覆盖法成球·····	(280)
一、喂料管·····	(281)
二、刮刀位置·····	(282)
三、喷水位置·····	(283)
第六章 煨烧原理及方法·····	(285)
第一节 生料煨烧过程中的物理化学变化·····	(285)
一、干燥与脱水·····	(286)
二、碳酸盐分解·····	(288)
三、固相反应·····	(296)
四、液相和熟料的烧结·····	(308)
五、熟料的冷却·····	(318)

六、熟料形成的热化学·····	(323)
第二节 立窑的煅烧过程及特点·····	(326)
一、燃料在立窑中的燃烧·····	(326)
二、立窑中的传热传质·····	(331)
三、立窑内物料煅烧过程·····	(340)
(一) 料球的干燥 ·····	(340)
1. 单个料球的干燥 ·····	(340)
2. 料层内料球干燥 ·····	(342)
(二) 料球的煅烧过程 ·····	(343)
1. 单个料球煅烧过程 ·····	(343)
2. 立窑内物料煅烧过程及各带划分 ·····	(346)
第三节 立窑的煅烧方法·····	(349)
一、白生料法·····	(350)
二、黑生料法·····	(351)
三、包壳料球法·····	(352)
四、半黑生料法·····	(355)
五、差热煅烧法·····	(355)

第一章 概 述

第一节 立窑水泥的发展简史

远在古代，人们就开始使用粘土(有时还掺入稻草、壳皮等植物纤维)来抹砌简易建筑物。但未经煅烧的粘土不耐水且强度很低，所以这种建筑物不耐久。

随着火的发现，大约在公元前2000~3000年，埃及、希腊、罗马以及我国就开始利用经过煅烧的石膏胶泥来砌筑，而我国著名的万里长城则是用石灰胶凝材料砌筑而成。这个时期可称为石膏——石灰的胶凝材料时期。

随着生产的发展，城市建筑和道路建筑都要求有较高强度并能防止被水浸析和冲毁的胶凝材料。在公元初，罗马人就开始用掺火山灰(硅铝化合物)而具有水硬性的石灰砂浆来兴建建筑物。人们发现，这种砂浆可在水中硬化，具有较高的强度和较好的抗水性。这个时期可称为石灰——火山灰时期。

随着资本主义的兴起，对胶凝材料提出了更高的要求。从而于1756年和1796年先后制成了水硬性石灰和罗马水泥。在此基础上，又进而用含适量(20~25%左右)粘土和石灰石(天然水泥岩)经煅烧磨细，制得天然水泥。

由于自然界不可能到处都找到天然水泥岩，因此就要求用人工配料的方法来制造水泥。

十九世纪初期(1810~1825年)，已经将石灰石或白垩和

粘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），再进行粉磨制成水硬性胶凝材料。因为这种水硬性胶凝材料，具有与英国波特兰城建筑岩石相似的颜色，故称之为波特兰水泥（Portland cement，我国称为硅酸盐水泥）。这种水泥含有硅酸钙，能在水中硬化，并能长期抗水，其首批大规模使用的例子是1825~1843年兴建的泰晤士河隧道。这就是水硬性胶凝材料的初创时期。

世界上，早在十九世纪初就开始用立窑煅烧水泥熟料了。最初，是将生料做块晒干和燃料一起由窑的上部加入，而空气是靠自然吸风，从窑的底部进入窑内。一窑生料全部烧成熟料后，才由窑内卸出。每烧一窑，要一个星期左右。这种窑叫做间歇式立窑，当体积为 $40\sim 50\text{m}^3$ 时，平均每昼夜产量为10 t左右，而燃料消耗为熟料的30%左右。

随着熟料烧成技术的发展，以后又出现了连续作业的立窑（结构与现在的立窑相仿）。先是采用一层煤一层料的煅烧方法。因此，质量不好，有生有熟。后来，改成将碎煤直接和生料混拌成球，入窑煅烧。这样，煅烧比较均匀，产量约提高一倍，燃料消耗约减少一倍。

由于靠自然吸风，阻力较大，入窑的空气量和速度较小，使产、质量不高，以后，又出现了机械鼓风的立窑。这样，使窑的产量几乎又提高了一倍。

第一台机械立窑卸料装置出现在1910年，即盘式卸料篦子，后来又增加卸料及密封装置——三道闸门，自动化立窑就这样出现了。在第一次世界大战中曾被广泛地应用过，后来又出现了各种不同形式的卸料篦子，各种自动化立窑之间的区别，主要就是卸料篦子的不同。

我国于1876年在河北省唐山市建立了第一座立窑，成立

了启新洋灰公司。

解放前，我国的普通立窑水泥厂有：山东的致敬水泥厂（即济南水泥厂的前身）、贵州的贵阳水泥厂，云南的昆明水泥厂，四川乐山的嘉华水泥厂和甘肃的窑街水泥厂等。直到1940年才在山西省的口泉镇建立了我国第一台盘式机械化立窑，成立了口泉水泥厂，年产水泥3万吨。

1958年前，全国立窑水泥厂总数不过6~7个，水泥的品种不多，质量也不高，只能生产325号以下的水泥，水泥的总产量只有10万吨。当时立窑水泥厂的管理比较落后，成本高，劳动生产率低，立窑生产的水泥，在我国水泥工业中，占的比例很小。1958年和1972年前后，特别是十二届三中全会以后，各地办起了大批立窑水泥厂。1986年，我国水泥总产量已达1.6156亿吨，居世界首位，立窑水泥成为重要支柱。

随着立窑水泥的迅速发展，立窑结构不断改进，煅烧技术不断提高，立窑的生产水平也日益提高。目前，普通立窑熟料的单位截面积产量约在 $600\sim 1000\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ，机械化立窑熟料的单位截面积产量约在 $1300\sim 2100\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ；普通立窑熟料的热耗一般约为 $3768\sim 5024\text{kJ}/\text{kg}$ 熟料（ $900\sim 1200\text{kcal}/\text{kg}$ 熟料），机械化立窑的熟料热耗一般约为 $3349\sim 4187\text{kJ}/\text{kg}$ 熟料（ $800\sim 1000\text{kcal}/\text{kg}$ 熟料），先进企业已达到 $3077\text{kJ}/\text{kg}$ 熟料（ $735\text{kcal}/\text{kg}$ 熟料）；机械化立窑熟料质量可以稳定在525号以上，并稳定生产425号以上的水泥。先进的机械化立窑熟料质量可以稳定在625号以上，并能稳定生产525号的水泥。

第二节 立窑水泥的地位和作用

水泥是极其重要的建筑材料和工程材料，它和钢材、木

材是基本建设的三大材料。随着国民经济的发展，水泥获得了越来越广泛的应用，它的地位也日益重要。水泥不但可以用于民用、工业、农业、水利、交通、军事等工程，还可用于制成轨枕、坑木、水泥管、水泥船以及预应力和自应力钢筋混凝土等以节省大量的钢材和木材。

目前，我国立窑水泥企业已有6400余个，生产的水泥产量已达全国水泥总产量的70%以上。某些立窑水泥企业还能生产一些特种水泥。

1985年全国县以上机立窑企业的熟料平均标号为515号，熟料平均标准煤耗为166.98kg/t，水泥综合电耗为97.07kw·h/t，上缴税利6.94亿元，平均每吨水泥创税利11.35元。立窑水泥由于投资省，建设周期短，能耗低，小而分散，运输距离短，便于利用各地的小矿和废渣资源，受到各地的重视，适合我国的国情，它是我国特定经济条件下的必然产物。其发展速度，远远超过大中型回转窑企业。立窑水泥，为保证国家建设和人民生活的需要，为回笼货币、积累资金、加速我国“四化”建设，作出了重要贡献。因此，党中央、国务院领导同志对地方水泥工业的发展一直十分关注，多次作过重要指示，对在加速骨干水泥企业建设的同时，积极发展地方水泥工业的正确方向，给予了充分的肯定，认为这是一条适合我国国情、具有我国自己特色的水泥工业发展道路。立窑水泥企业职工在地方各级主管部门的领导下，在各科研、设计、院校的支持和配合下，积极探索，勇于实践，做了大量扎扎实实的工作，也是促使立窑水泥工业得到迅速发展的另一重要因素。近几年来，成功地获得了一批具有一定水平的技术成果，如复合矿化剂、窑体保温、料封卸料、预湿成球、微机过程控制配料、机立窑的结构改革以及

机立窑的闭门操作，等等。这些新技术，效果好，适应性强、能够很快在众多的立窑水泥企业中推广应用，对加速立窑水泥工业技术进步，起到了积极的作用，是老厂技术改造和提高生产技术水平的重要途径。

但是，也应当看到立窑水泥企业也存在一些问题，如产品质量不稳定，高标号水泥比例不如回转窑厂高，工艺不完善，机械化、自动化水平低，粉尘较大，劳动条件差，劳动生产率低，等等。这些问题，除了立窑本身存在的内部因素以外，多数是由于外部的，人为的客观因素所致。也有少数很好的立窑企业，不仅能有计划稳定地生产525号水泥，还能生产早强型525号水泥，熟料的热耗仅为3140kj/kg熟料(750kcal/kg熟料)，水泥综合电耗仅为80kw·h/t以下，每吨水泥创税利达40~50元/t，车间内粉尘浓度和废气排放粉尘浓度基本达到国家标准。这说明，不是做不到，而是未下功夫做到。“非不能也，而未为也。”

展望未来，在相当长的历史时期内，我国的立窑水泥仍将是水泥工业中的一支重要支柱，将继续受到人们的重视，获得不断的技术进步和发展。

1980年联合国工业发展组织和我国政府在北京召开了水泥区域间技术讨论会。会后，让中国为第三世界发展中国家提供立窑技术、立窑设备和培训技术人员。这说明我国立窑生产水泥在世界上声誉较高，可见立窑生产水泥不仅是我国经济建设的需要，而且第三世界一些国家也需要。

第三节 立窑的类型和特点

目前，我国水泥立窑有两种类型：普通立窑和机械化立窑。

普通立窑是人工加料和人工卸料或者是机械加料和人工卸料；机械化立窑是机械加料和机械卸料。机械化立窑是连续操作的，它的产量、质量、热耗及劳动生产率等都比普通立窑高。

机械化立窑按卸料篦子的形式不同，分为塔式、盘式、塔盘式、辊式、往复式以及其它简易形式；按传动装置的类型可分为机械传动和液压传动两种；按卸料篦子的运转方向又可分为单向回转和往复回转两种。

立窑熟料的生产，按煅烧方法可分为：白生料法、黑生料法、半黑生料法、差热煅烧法、中料全黑差热煅烧法以及包壳料球煅烧法。

立窑生产水泥与回转窑相比有以下特点：

1. 建厂投资少，速度快。

由于立窑水泥厂设备较简单，设备和设备安装等费用都少，其投资比同规模的回转窑少得多，水泥厂的各种窑型投资对比如下：

窑 型	单位产品相对投资(%)
干法回转窑	100
机械立窑	30~40
普通立窑	20~30

建设一个年产10万吨的立窑水泥厂，在设备供应、设备安装和土建都很及时，生产准备也较充分的情况下，可以做到一年半左右建成投产。大型干法水泥厂至少要三年以上才能建成投产。

2. 省钢材，占地面积小。

立窑筒体短，其高度仅为同规模回转窑窑长的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ ，而且立窑不需要另设冷却机。立窑生产用煤一部份与原料一

起共同入磨，或制成煤粒在生料成球时加入，不需另设煤的粉磨。这些都可节省大量钢材。

立窑是竖立的，因此窑房向高空发展，占地少。而回转窑是卧置的，而且其长度长，占地多。当小时产量在10吨左右，立窑的立筒外径为 $\phi 3.5$ 米，而小型干法中空回转窑其直径为3米左右，长度都在60米左右，再加上回转窑用煤的烘干与粉磨等都需要占地方，因此，同规模的立窑生产线比回转窑生产线占地少得多。

3. 热耗低，能充分利用劣质煤。

用立窑生产水泥时，生料和煤混在一起制成球加入窑内煅烧。在燃烧带中煤燃烧产生的热量可直接传给生料：在预热带和冷却带中气流穿过料球之间的空隙，使其传热面积增大，因此在立窑内传热效率高。立窑筒体表面散热也较小。因此立窑总热耗低，热效率高。国外先进立窑的熟料单位热耗只有 2893kJ/kg 熟料(691kcal/kg 熟料)，我国较先进的机械立窑热耗也能达到 3077kJ/kg 熟料(735kcal/kg 熟料)左右。

立窑还能利用热值低，灰份大的劣质煤。由于劣质煤与原料共同入磨，全部灰份成为熟料的组份，而且其灰份均匀分布在熟料内，从而防止了灰份不均匀对熟料质量的影响。近年来，还利用煤矸石、石煤或油页岩等作为立窑的燃料来煅烧熟料，取得了一定效果。这就为低热值燃料的充分利用，节约优质燃料和合理使用能源作出了贡献。

4. 充分利用地方资源。

立窑水泥厂可以充分利用地方的零星资源，就地生产，就地销售，减少水泥的运输距离，从而使水泥工业布局较为合理。立窑水泥厂建于交通不便的边远地区，尤为有利。

七十年代以后，在一些工业较发达的国家，立窑迅速被淘汰，而在我国却得到迅速发展，这主要是由于立窑本身具有上述优点，适应了我国国土大，经济基础差，交通运输不发达的国情。因此，在相当长的一段时期内，我国的立窑不仅不会被淘汰，而且还要进一步巩固和提高。

第四节 立窑生产工艺流程

立窑烧成工艺一般是自出磨生料搭配均化开始，经配煤、制球、鼓风、加料操作、卸料等工序，直至熟料卸出后经破碎入熟料储库为止。

当采用全黑生料煅烧方法时，入窑生料经搭配均化后，直接成球入窑煅烧，其生产工艺流程如图 1—1 所示。

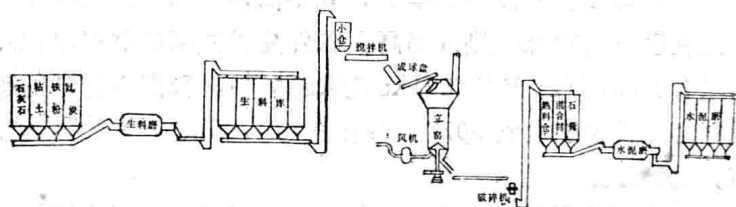


图 1—1 全黑生料煅烧法立窑生产工艺流程示意图

当采用半黑生料或白生料煅烧方法时，经搭配均化后的生料需首先经配煤工序，将部分煤量(半黑生料)或全部煤量(白生料法)按配比要求配入生料中，在输送过程中再进一步进行均化，然后入窑煅烧，其生产工艺流程如图 1—2 所示。

当采用差热煅烧方法时，其生产工艺流程与半黑生料法和白生料法基本相同。当中料为全黑生料时，只需一套配煤设备，配入边部料所需煤量即可；如采用白生料法，最好采