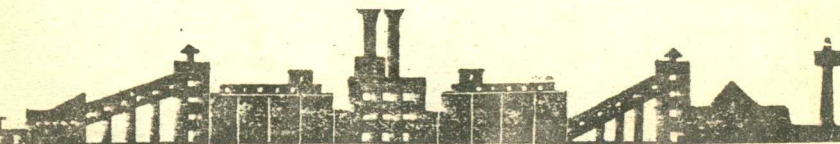


水泥机械化立窑

安全生产技术



目 录

第一章 概 述.....	(1)
第一节 机立窑水泥生产工艺过程.....	(2)
一、原料开采及生料制备.....	(2)
二、熟料烧成.....	(3)
三、水泥制成.....	(4)
第二节 硅酸盐水泥熟料的组成对煅烧的影响	(5)
一、熟料的矿物组成对煅烧的影响.....	(5)
二、熟料的化学成份对煅烧的影响.....	(8)
三、熟料的率值对煅烧的影响.....	(10)
第三节 对原料、燃料和生料的品质要求.....	(12)
一、原料品质.....	(12)
二、燃料品质.....	(14)
三、生料的控制.....	(15)
第四节 配煤、成球与安全煅烧的关系.....	(16)
一、配煤与安全煅烧的关系.....	(16)
二、成球与安全煅烧的关系.....	(18)
第五节 从机立窑熟料的岩相结构和外观判断质 量.....	(20)
一、熟料的岩相结构.....	(20)
二、熟料的外观.....	(24)
思考题.....	(24)

第二章 机立窑烧制水泥熟料的原理	(25)
第一节 机立窑中熟料的烧制原理	(25)
一、熟料烧制过程的物理化学变化.....	(26)
二、熟料的理论热耗.....	(33)
三、立窑煅烧过程.....	(34)
第二节 复合矿化剂的使用及其与安全生产的关系	(38)
一、复合矿化剂的种类及其矿化机理.....	(38)
二、采用复合矿化剂时煅烧过程的特点.....	(42)
三、复合矿化剂与安全生产.....	(44)
第三节 物料与气体在立窑内的运动原理	(46)
一、物料在立窑内的运动.....	(46)
二、立窑内气体的流动.....	(49)
第四节 立窑内燃料燃烧及传热基础知识	(57)
一、燃料燃烧的基本概念.....	(57)
二、燃料在机立窑内的燃烧过程.....	(58)
三、传热的基本概念及立窑内的传热.....	(60)
四、提高立窑热效率的途径.....	(63)
思考题	(71)
第三章 机立窑的煅烧	(73)
第一节 机立窑的结构	(73)
一、窑体结构.....	(73)
二、隔热材料与耐火材料 :	(78)
三、加料装置.....	(86)
四、卸料装置.....	(88)
五、鼓风装置.....	(91)

六、卸料密封装置.....	(96)
七、烟囱.....	(67)
第二节 机立窑的成球设备.....	(98)
一、常用成球设备.....	(98)
二、成球盘对料球工艺参数的影响.....	(99)
三、预加水成球工艺.....	(101)
第三节 机立窑的煅烧方法.....	(108)
一、白生料法.....	(108)
二、黑生料法.....	(109)
三、差热煅烧法.....	(112)
四、包壳料球法.....	(115)
五、煤料分别粉磨法.....	(116)
第四节 机立窑的正常煅烧操作.....	(117)
一、机立窑煅烧操作方法.....	(118)
二、烘窑.....	(120)
三、点火.....	(121)
四、正常煅烧操作.....	(124)
五、停窑.....	(136)
六、开窑.....	(137)
第五节 机立窑闭门操作.....	(139)
一、机立窑闭门操作工艺.....	(139)
二、闭门操作自动控制.....	(143)
三、闭门操作与机立窑安全生产.....	(145)
思考题.....	(148)
第四章 机立窑煅烧的不正常窑况.....	(146)
第一节 熄火.....	(149)

一、龛火的原因	(149)
二、龛火的预兆	(150)
三、龛火的处理方法	(151)
第二节 偏火	(152)
一、偏火的原因	(153)
二、偏火的判断方法	(155)
三、偏火的处理方法	(156)
第三节 中间火深	(166)
一、中间火深的原因	(167)
二、中间火深的处理方法	(169)
第四节 垮边、掉洞、抽心	(173)
一、垮边、掉洞、抽心的原因	(174)
二、垮边、掉洞、抽心的处理	(175)
第五节 炼边、结圈、结大块、炼窑	(176)
一、炼边、结圈、结大块、炼窑的原因	(177)
二、炼边、结圈、结大块、炼窑的预防及处理	(178)
第六节 架窑	(179)
一、架窑的原因	(180)
二、架窑的处理	(183)
三、架窑的预防	(184)
思考题	(186)
第五章 机立窑喷火事故	(187)
第一节 喷火及其分类	(187)
一、风洞喷火	(187)
二、塌窑喷火	(188)

三、一氧化碳爆炸喷火.....	(189)
第二节 风洞喷火、塌窑喷火的原因及预防	
.....	(190)
一、风洞喷火的原因及预防.....	(190)
二、塌窑喷火的原因及预防.....	(191)
第三节 机立窑的一氧化碳爆炸喷火.....	(193)
一、机立窑产生CO爆炸的条件.....	(193)
二、机立窑内CO爆炸前的症状.....	(196)
三、机立窑内产生CO爆炸的原因.....	(198)
四、机立窑CO爆炸喷火的预防.....	(199)
第四节 机立窑典型喷火事故实例分析.....	(201)
思考题.....	(212)
第六章 机立窑安全技术措施和安全管理.....	(213)
第一节 机立窑安全技术措施.....	(213)
一、加强工艺过程的控制,创造良好的煅烧条	
件.....	(213)
二、改进窑型及技术装备,消除事故的先天性	
隐患.....	(214)
三、严格按正常煅烧的操作规范操作,是消除	
事故的关键.....	(215)
四、及时发现不正常窑况,彻底处理和消除不	
正常窑况.....	(215)
五、从设计窑房着手,完善窑操作平台的安全	
设施.....	(217)
六、加强操作现场的应急保安和操作人员的劳	
动保护.....	(217)

七、努力创造条件，实现闭门操作.....	(218)
第二节 机立窑安全管理.....	(218)
一、建立健全机立窑安全生产管理体制.....	(219)
二、喷火伤亡事故的调查及处理.....	(227)

第一章 概 述

水泥生产自一八二四年问世以来，至今已有160多年的历史了。水泥熟料的煅烧设备，最初只是用间歇式操作的立窑烧成水泥熟料，限于当时的技术水平，这种生产方法持续了约半个世纪。到一八八五年，第一台回转窑在英国首先投入了生产；一九一〇年立窑实现了机械化连续生产；五十年代初悬浮预热器窑应用；七十年代初窑外分解技术开始应用。立窑由于其投资少，建设速度快、省钢材，占地面积小、热耗低、能充分利用劣质煤、充分利用地方资源等优点，在我国得到了迅速的发展。一九八六年全国立窑生产水泥占水泥生产总产量的百分之七十左右；在质量上，很多机立窑厂熟料标号已达到525号以上，能够稳定地生产425号水泥；在设备上，通过技术改造，已经出现了微机控制、闭门操作的机械化立窑。但是由于我国大多数立窑厂还存在着一些薄弱环节，例如原燃料无均化设施、配料没有精确的计量和控制、生料没有均化措施、配煤系统不能使料煤配比准确和均匀、成球工艺较落后、管理技术水平较低、煅烧操作不统一等，致使喷火伤亡事故时有发生。尤其是近几年来，地方水泥发展迅速，立窑恶性喷火事故不断发生，因此，进一步提高机立窑厂工人技术素质，加强立窑的安全管理，保证立窑操作安全，更好地发挥立窑的经济效益，具有十分重要

的现实意义。

每一节 机立窑水泥生产工艺过程

一、原料开采及生料制备

生产水泥的原料主要有三种：（1）石灰质原料：其主要成分是碳酸钙(CaCO_3)，它是水泥熟料中氧化钙(CaO)的主要来源，常用的有石灰石、大理石、泥灰岩、白垩、贝壳和蚌壳等天然原料，以及某些工业废渣，如电石渣、糖滤泥等。石灰质原料是制造水泥的主要原料，在配料中一般占80~86%。一般要通过地质勘探，探明矿山石灰石成分的分布及储量，然后经凿岩、爆破和电铲(或人工)装车，运往工厂。（2）粘土质原料：常用的有粘土、黄土，此外可利用某些工业废渣代替。其主要成分是二氧化硅(SiO_2)、三氧化二铝(Al_2O_3)及少量三氧化二铁(Fe_2O_3)，也是制造水泥的主要原料之一。配料中一般占11~17%。立窑用粘土原料除要求其化学成分满足要求以外，还必须有较好的塑性以及热稳定性，以保证料球质量。（3）辅助原料：制造水泥除石灰质和粘土质原料外，还需要有一些辅助原料，主要是校正原料、矿化剂等。当生料中氧化硅含量不足时，可以采用硅质校正原料，如硅藻土、硅藻石、砂岩等。当生料中氧化铝含量不足时，可以采用铝质校正原料，如炉渣，粉煤灰、煤矸石、矾土等。当生料中氧化铁不足时，可以用铁质校正原料，如铁矿粉、硫铁渣等。为了促进熟料煅烧过程，提高熟料产质量，降低消耗，可以在生料中加入少量矿化剂，如萤石、石膏、铜矿渣等。

水泥生料是由石灰质原料、粘土质原料及少量校正原料按比例配合，粉磨到一定细度，制成适当成分的物料。立窑生料制备的主要环节是原料预均化、配料、粉磨、生料均化、煤料配合等工序。生料制备要求生料成分合理，稳定，细度符合煅烧要求，配煤准确。

原料的预均化是原料在粉磨前的储存过程中，预先对原料成分进行均化的过程。对成分波动大的原燃料进行预均化，这是保证原料配比正确，出磨生料成分均匀和符合质量要求的重要措施之一。机立窑厂应该创造条件，采用预均化措施或建设预均化堆场。我国有些工厂对粘土、煤和其它原料，严格按品位分层平铺堆高，使用时采用多点竖直切取使用，使各种原燃料成分波动减小，达到了配料要求。为了使配料准确，在生料磨头采用了电子皮带秤等计量喂料设备，采用微机自动控制生料磨喂料，出磨生料采用机械倒库、混合室均化库、多库搭配出库等方式，稳定入窑生料成分，从而保证了立窑的优质稳产和安全生产。

配煤是立窑生产特有的工艺环节，配煤兼有配热与配料的双重意义；入窑前煤和生料的配合是否准确、均匀，是直接影响立窑安全煅烧及熟料质量的一个要害所在。

二、熟料烧成

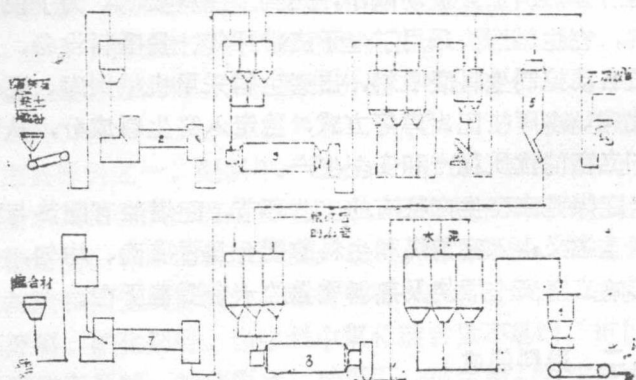
生料经过成球机制成料球后用输送设备送入机械化立窑内，经撒料溜子，均匀撒在窑面上。燃料燃烧所需的空气由窑下鼓入。在卸料机械的作用下，经过高温物理化学反应生成的熟料由窑下卸出，由于熟料是水泥厂的一个重要半成品，它的质量好坏，直接影响到出厂水泥的质量，同时也影

响到产量、消耗、成本等其它经济指标。因此水泥窑常常被称为水泥厂的“心脏”尤其是窑内底火层的平衡稳定,是熟料烧成的关键。于是,熟料烧成就成为全厂生产与安全的关键。

三、水泥制成

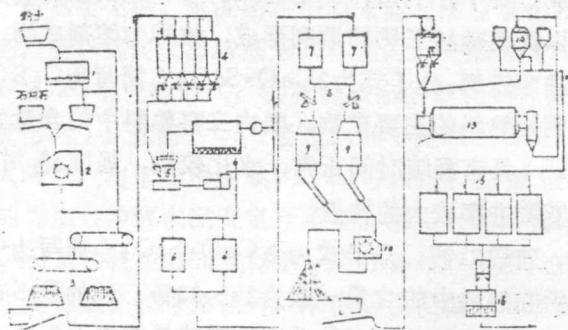
出窑熟料经过贮存一定时间后,与石膏、混合材料按一定配比用喂料机送入水泥磨粉磨,并达到一应细度的产品即为水泥。出磨经过输送设备送入水泥库内,经过物理检验,确认28天耐压、抗折强度等物性指标符合国家标准,方可包装或散装出厂。

以上是机立窑水泥生产的一般工艺过程,下面介绍两种立窑生产流程。(如图1—1、图1—2所示)。



- 1、破碎机、2、烘干机、3、生料磨、4、成球机、5、机立窑、
6、破碎机、7、烘干机、8、水泥磨、9、包装机

图1—1 机立窑生产硅酸盐水泥流程图I



1、烘干机 2、破碎机, 3、预均化堆场, 4、中间贮仓, 5、生料磨, 6、均化仓, 7、生料仓、8、成球盘、9、立窑, 10、破碎机, 11、熟料仓, 12、中间仓, 13、水泥磨, 14、分级机; 15、水泥仓; 16包装机

图 1—2 机立窑生产硅酸盐水泥流程图正

第二节 硅酸盐水泥熟料的组成

对煅烧的影响

一、熟料的矿物组成对煅烧的影响

凡是以适当成分的生料烧至部分熔融, 所得以硅酸钙为主要成分的产物称之为硅酸盐水泥熟料(简称熟料)。熟料中主要有硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等四种矿物。还有少量的游离氧化钙、方镁石和玻璃体等。

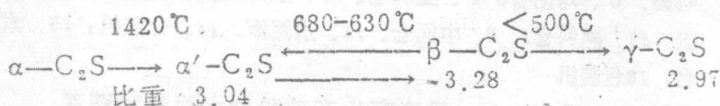
通常熟料中的硅酸三钙和硅酸二钙含量占75%左右, 称为硅酸盐矿物, 铝酸三钙和铁铝酸四钙占22%左右。在水泥

熟料煅烧过程中，后两种矿物在 $1250^{\circ}\text{C} \sim 1280^{\circ}\text{C}$ 时会熔融成液相，以促使硅酸三钙的顺利形成，故称为熔剂矿物。

1、硅酸三钙：分子式为 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （简写为 C_3S ）。

硅酸三钙是熟料的主要矿物，国内立窑熟料中的含量为38~55%。 C_3S 具有凝结时间正常，水化较快，强度绝对值较高，强度增进率较大的特点。

2、硅酸二钙：分子式为 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （简写为 C_2S ），硅酸二钙在熟料中的含量一般为20~33%。纯的 C_2S 有四种晶型，温度及冷却速度对 C_2S 的晶型转化有很大影响，在高温下 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 缓慢冷却时，发生如下晶型转变：



式1—1

水泥熟料烧至 1450°C 左右， C_2S 主要是 α 型和 α' 型，温度稍低时，即转变为 β 型，当冷却不当或其它原因， β 型转变为 γ 型时体积增加约10%，这是造成熟料粉化的原因。且 γ 型 C_2S 晶体无水硬性。 C_2S 具有水化较慢，早期强度较低，后期强度增长较快的特点。

3、铝酸三钙：分子式 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ （简写为 C_3A ）。立窑熟料中 C_3A 的含量一般为6~10%。 C_3A 具有水化快、放热多、早期强度高、后期强度增进率小的特点。

4、铁铝酸四钙：分子式为 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ （简写为 C_4AF ）。 C_4AF 的水化速度在早期介于 C_3A 和 C_3S 之间，而后期增进率类似 C_2S 。

5、游离氧化钙：水泥熟料中尚未能与酸性氧化物化合的氧化钙，是以游离状态结晶形式存在的。一般写为f—CaO。熟料中f—CaO有三种形式：①死烧状态的氧化钙（又称一次游离氧化钙）。这部分CaO经过1450℃高温下焙烧，化学活性大大降低，与水作用生成Ca(OH)₂的速度很慢。f—CaO量的增加会导致水泥安定性不良。②二次游离氧化钙。这部分CaO是熟料在1250℃以下C₃S分解时产生的，这种f—CaO由于是高温分解时得到的，水化活性较低，对水泥安定性有不良影响。同时，由于C₃S的分解，造成C₃S含量减少，使水泥强度受影响。③欠烧游离氧化钙。它是由于立窑烧成温度不够，由碳酸钙分解得到的氧化钙，未经高温烧成，而进入冷却带。这种氧化钙通常存在于欠烧的黄心熟料和黄粉料之中，这种f—CaO对水泥安定性影响不大，但熟料欠烧料过多，会导致熟料强度降低。

无论哪种f—CaO存在于水泥熟料中，对熟料质量都有影响，故立窑水泥企业质量管理规程规定：机立窑水泥熟料中f—CaO含量不超过2.8%，烧失量小于1%。

6、方镁石：石灰石在高温下分解出的MgO与酸性氧化物的化学亲和力小，一般不与其它氧化物反应生成熟料矿物。因此，水泥熟料中的MgO可以存在于各矿物相中，也可以形成大小不同的游离状态的方镁石结晶。这种高温煅烧后呈死烧状态的方镁石，其水化活性比f—CaO更差，对水泥的安定性影响更大。所以，国家标准规定：硅酸盐水泥熟料中氧化镁含量不超过5%，如水泥经压蒸安定性试验合格，则水泥熟料中的MgO含量允许放宽到6%。

熟料矿物中的硅酸盐矿物含量增加，则熔剂性矿物含量

就会降低，这样的物料表现为难烧，不易烧结，底火难以保持稳定。反之如果硅酸盐矿物减少，则熔剂性矿物就会增多，这样的物料易结大块，给煅烧带来困难。

硅酸盐矿物中 C_3S 含量增加， C_2S 含量就会下降，这时物料也较难烧。如 C_3S 降低，则 C_2S 含量增加，这时物料易烧，但熟料易粉化、强度低。

熔剂性矿物中 C_3A 高，则液相粘度较大，可以形成较密实的底火层，物料烧结范围较宽；反之， C_4AF 高，则液相粘度小，底火层较脆弱，物料烧结范围较窄。

掺复合矿化剂的熟料矿物组成有 C_3S 、 C_2S 、 C_4AF 、 $C_{11}A_7CaF_2$ 和 $C_4A_3\overline{S}$ 。其中 $C_{11}A_7CaF_2$ 和 $C_4A_3\overline{S}$ 是早强快硬矿物。

二、熟料的化学成分对煅烧的影响

为了获得符合要求的熟料矿物组成，必须将生料中氧化钙(CaO)、二氧化硅(SiO_2)、三氧化二铝(Al_2O_3)、三氧化二铁(Fe_2O_3)的百分含量控制在一定的范围内。一般熟料化学成份中四种主要氧化物的百分含量如下(%)：

CaO 62—67； Al_2O_3 4—7；

SiO_2 20—24； Fe_2O_3 2—6

除了以上四种主要氧化物外，硅酸盐水泥熟料还含有少量其它氧化物，如氧化镁(MgO)、硫酐(SO_3)、碱(Na_2O 、 K_2O)、氧化钛(TiO_2)、五氧化二磷(P_2O_5)等。下面简述各种氧化物在熟料中的作用及其对煅烧的影响。

1、氧化钙(CaO)：它是熟料中最重要的化学成分，它与熟料中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 反应生成 C_3S 、 C_3A

C_4AF 。一般来说，增加熟料中氧化钙的含量能增加硅酸三钙的含量，但当煅烧温度不够时，则会产生大量游离氧化钙，引起水泥使用时安定性不良，氧化钙含量高的生料，一般是难烧的。

2、二氧化硅 (SiO_2)：二氧化硅也是熟料中主要成分之一。它与氧化钙在高温下能化合为硅酸二钙和硅酸三钙。当熟料中氧化钙含量一定时， SiO_2 含量越多，生成 C_2S 含量就越多， C_3S 含量相应减少。如果 SiO_2 高时，相应降低 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量，则熔剂矿物($C_3A + C_4AF$)减少，将不利于 C_3S 的形成，造成熟料煅烧困难。如果 SiO_2 低时，相应提高 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量，则熔剂矿物增加，硅酸盐矿物相应减少，会降低水泥强度。同时熔剂矿物过多，在窑内易结大块。

3、三氧化二铝 (Al_2O_3)：在煅烧过程中 Al_2O_3 与 CaO 、 Fe_2O_3 作用生成 C_3A 和 C_4AF ，并熔融为液相，促使 C_3S 形成。当熟料中 Al_2O_3 多时， C_3A 生成量增多，熟料早强提高，凝结硬化快，且液相粘度大（与三氧化二铁相比），在机立窑煅烧中如果液相粘度过高，容易结大块。

4、三氧化二铁 (Fe_2O_3)

Fe_2O_3 在煅烧中与 CaO 、 Al_2O_3 生成 C_4AF ，并熔融成液相，且液相粘度小。 Fe_2O_3 过多时，熟料烧结温度范围变窄，尤其在立窑还原气氛严重时， Fe_2O_3 被还原成 FeO ，物料过早出现低熔点液相，易结大块，甚至结料柱。

5、其它氧化物。其它氧化物的带入，可以使熟料最低共熔温度降低，增加液相量，对 C_3S 形成有利，但过多则会引起窑内结大块，使煅烧气氛恶化。除此之外，氧化镁过

多，则使水泥安定性不良。碱质、硫酐、二氧化钛、五氧化二磷对熟料的质量害多于利，因此对其它氧化物应严格控制。

三、熟料的率值对煅烧的影响

熟料的率值是表示熟料化学组成或矿物相对含量的系数。它们与熟料质量及生料易烧性有较大的关系，是生产控制中的重要指标。

1. 硅酸率：表示水泥熟料中二氧化硅与三氧化二铝及三氧化二铁之和重量百分数的比值。通常用字母 n 或SM表示。

$$n = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad 1-2$$

根据硅酸率的大小，可以表示熟料中生成硅酸盐矿物与熔剂矿物的相对含量。在煅烧过程中，硅酸率过高时，说明熔剂矿物减少，烧成温度就要提高，硅酸率过低时，说明熔剂矿物过高，硅酸盐矿物减少，降低熟料强度，在立窑中容易产生结大块、炼窑等。

硅酸盐水泥熟料的硅酸率一般在1.7—2.7的范围内。

2、铝氧率：它是水泥熟料中三氧化二铝与三氧化二铁重量百分数的比值，它也叫铝率或铁率。常用字母 P 或IM表示。

$$P = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad 1-3$$

铝氧率是控制铝酸盐矿物与铁铝盐矿物相对含量的比例系数。当 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的总和一定时，提高 P ，说明 C_3A 增高、 C_4AF 降低，水泥趋于快凝早强，煅烧熟料时，液相粘度增加，不利于 C_2S 进一步与氧化钙化合形成硅酸三钙。反之，当 P 降低时，说明 C_3A 降低、 C_4AF 提高，水泥