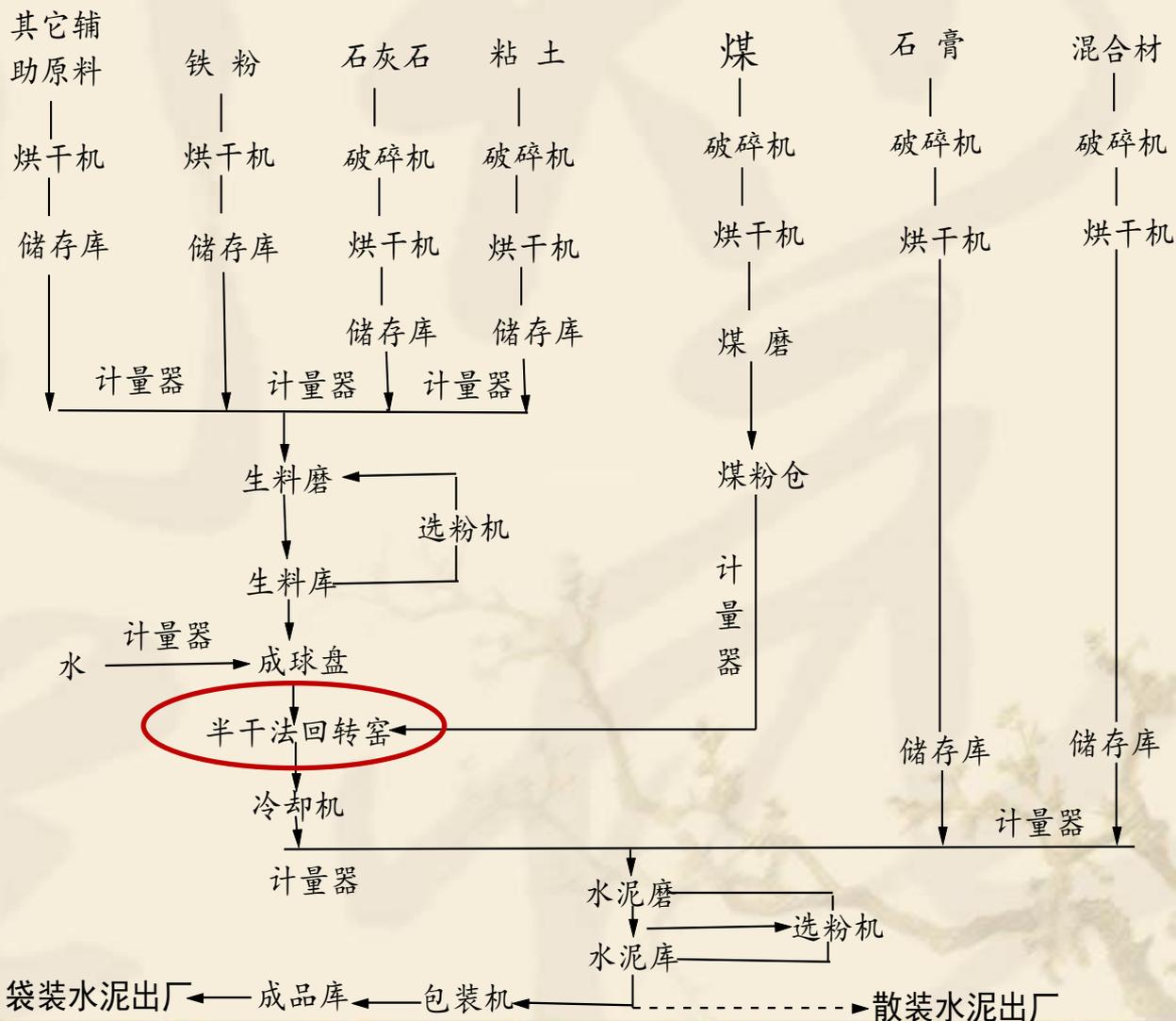


第七章 水泥工业窑

第一节 概述



一、分类

1. 按水泥煅烧熟料窑的结构分类：

- (1) 立窑，普通立窑和机械立窑；
- (2) 回转窑，湿法、干法和半干法回转窑。

2. 按水泥生料的制备方法分类：

- (1) 湿法：原料加水粉磨成生料浆（含水**33—40%**）后喂入湿法回转窑煅烧成熟料（将生料脱水制成生料快入窑煅烧，称为半湿法）；
- (2) 干法：原料烘干、粉磨，喂入干法窑内煅烧成熟料（或生料粉加入适量水分，喂入窑中称为半干法）。

水泥工业窑炉的发展

发展简史

- ❖ 间歇式土窑（后发展成土立窑）
- ❖ 1877年：回转窑
- ❖ 1905年：湿法回转窑
- ❖ 1910年：机械化立窑
- ❖ 1928年：立波尔窑
- ❖ 1950年：悬浮预热器窑
- ❖ 1971年：预分解窑。

二. 生产方法的特点

1. 立窑

- (1) 基本建设投资小、投入生产快；
 - (2) 立窑内填充系数高，单位体积产量高；
 - (3) 就地取材，充分利用当地资源，一些工业废渣可作原燃料；
 - (4) 传热效率高，散热损失小，约占总热耗3%（回转窑15%）
- 它的缺点在于生产规模小，劳动生产率低、强度大；单机产量低，质量（熟料）低。

2. 回转窑

热耗较高，生料易于均化，成分均匀，熟料质量较高，并且输送方便，粉尘少。

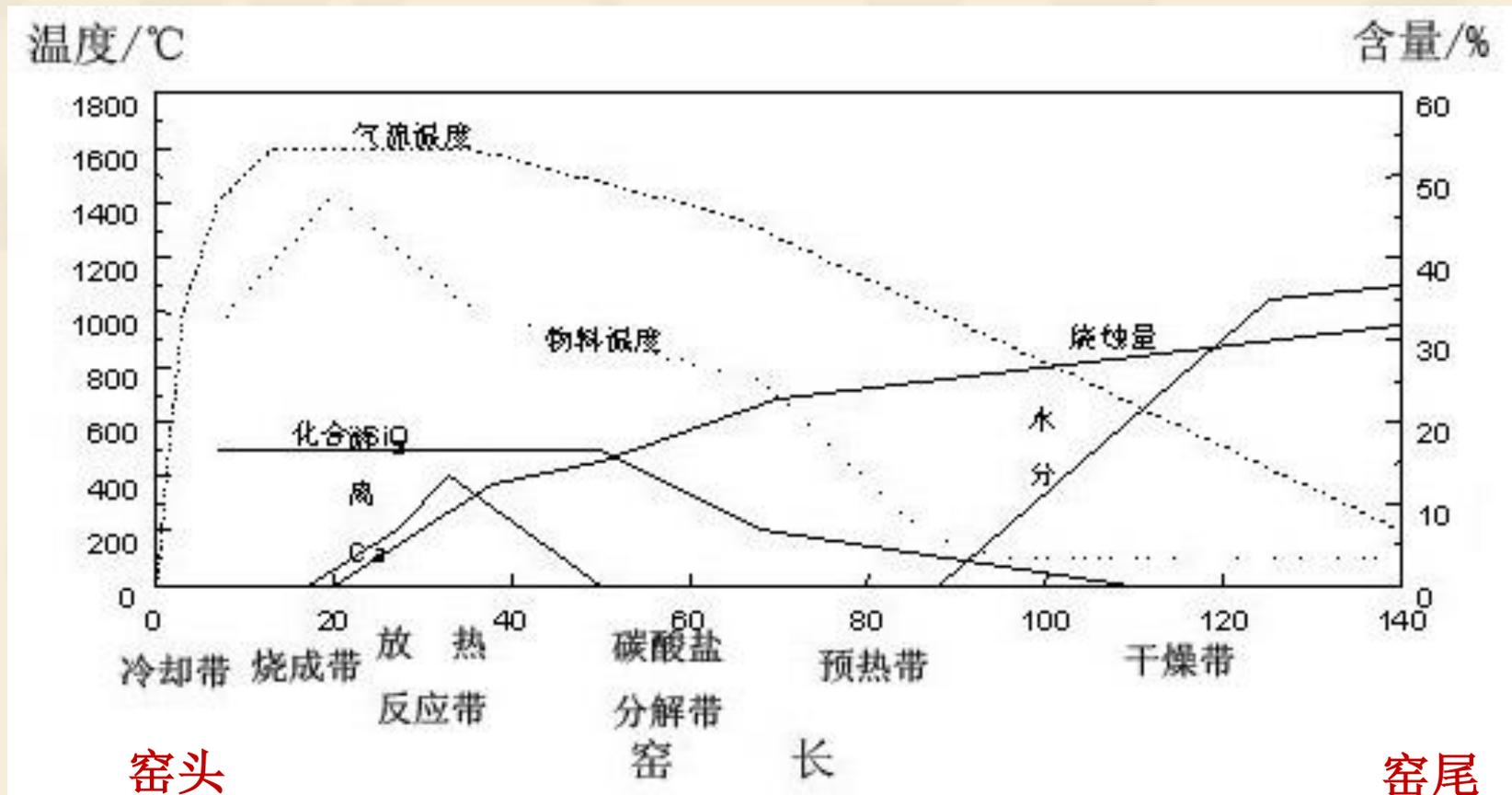
我国确定南方以湿法生产为主，北方以干法为主。目前作为新型技术，悬浮预热器和窑外分解是我国主要发展的窑型。

第二节 回转窑

一、回转窑的工作原理

物料回转窑内煅烧的过程是生料从窑的冷端喂入，由于窑有一定的倾斜度，且不断回转，因此使生料连续向热端移动。燃料自热端喷入，在空气助燃下燃烧放热并产生高温烟气，热气在风机的驱动下，自热端向冷端流动，而物料和烟气在逆向运动的过程中进行热量交换，使生料烧成熟料。因此，研究回转窑的工作原理，主要是研究物料在窑内的运动，窑内气体的流动，燃料燃烧和物料与气体间传热的现象和规律。

燃料与空气由窑头喷入，和二次空气一起进行燃烧，火焰温度高达1650~1700℃。燃烧烟气在向窑尾运动过程中，将热量传递物料，温度逐渐降低，最后由窑尾排出。料浆由窑尾喂入，温度逐渐升高，并进行一系列反应，烧成熟料由窑头卸出，进入冷却机。湿法回转窑分为如下六个带：



(一) 回转窑内物料的运动

1、物料在窑内的运动过程

生料从窑的冷端喂入，在**向热端运动**的过程中煅烧成熟料。

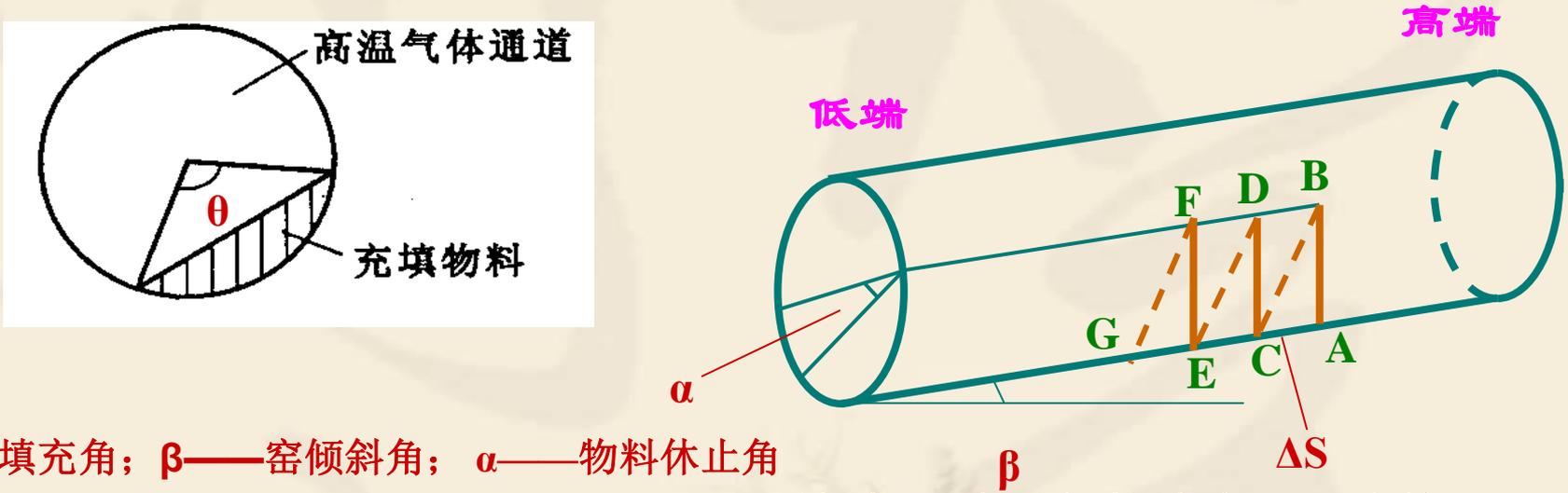
物料在窑内的运动情况**直接影响到物料层温度的均匀性**；

物料的运动速度影响到物料在窑内的停留时间（即物料的受热时间）和**物料在窑内的填充系数**（即物料的受热面积）；因此也影响到物料和热气体之间的传热。

窑内的物料仅占据窑容积的一部分，物料颗粒在窑内的运动过程是比较复杂的。

为了使回转达到高产，必须了解窑内物料的运动情况。

假设物料颗粒在窑壁上及料层内部没有滑动现象，当窑回转时，物料颗粒靠着摩擦力被窑带起，带到一定高度，即物料层表面与水平面形成的角度等于物料的自然休止角时，则物料颗粒在重力的作用下，沿着料层表面滑落下来。



θ ——填充角； β ——窑倾斜角； α ——物料休止角

回转窑内物料充填与运动简图

因为窑体以3~6%的倾斜度安装，所以物料颗粒不会落到原来的位置，而是向窑的低端移动了一定距离，落在一个新的点，在该新的点又重新被带到一定高度再落到靠低端的另一点，如此不断前进。

实际上物料在回转窑内运动时，物料颗粒的运动是有周期性变化的，物料颗粒或埋在料层里与窑一起向上运动，或到料层表面上降落下来，但是只有在物料颗粒降落的过程中，才能沿着窑长方向移动。

2、影响窑内物料运动的因素

窑内物料运动速度与其物理性质、窑径和窑内热交换装置等有关。

- ◆ 物料的粒度愈小，运动速度愈小，如粉料的运动速度低于料球运动速度。
- ◆ 干燥带的运动速度与链条的悬挂方式、悬挂密度有关。
- ◆ 预热带的物料运动速度与窑内热交换装置有关。
- ◆ 分解带，由于碳酸盐分解放出的二氧化碳气体使物料呈流态化，因此物料运动速度最快，在分解带，碳酸盐分解需要吸收大量的热，但是物料流速又快，所以窑的分解带比较长。
- ◆ 窑内料层厚度不同，物料被带起的高度也不同，料层厚，带起高，在窑回转一周时，物料被带起的次数少，即翻动的次数少，受热的均匀性就差；但料层过薄，窑的产量降低，因此必须选择合适的料层厚度，通常窑内物料的填充系数为6~15%。当窑内物料流量稳定时，移动速度快的地带，其填充系数小。

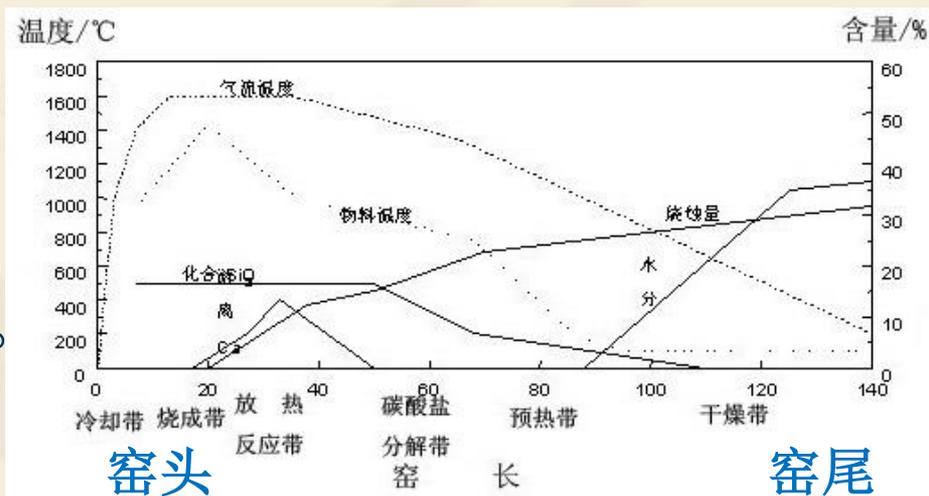
在实际生产上，为了稳定窑的热工制度，必须稳定窑速，若因煅烧不良而降低窑速时，需相应地减少喂料量，以保持窑内物料的填充系数不变。因此，一般回转窑的传动电机和喂料机的电机是同步的，以便于控制。

(二) 回转窑内气体的流动

1、回转窑内气体的流动过程

为了使回转窑内燃料燃烧完全，必须不断地从窑头送入大量的助燃空气，而燃料燃烧后产生的烟气和生料分解出来的气体，在向窑的冷端流动的过程中，将热量传给与之相对运动的物料以后，从窑尾排出。

窑内气体在沿长度方向流动的过程中，气体的温度、流量和组成都在变化，因此流速和阻力是不同的。通常用窑尾负压表示窑的流体阻力，在窑操作正常时，窑尾负压应在不大的范围内波动。在生产中当排风机抽风能力相同时，根据窑尾负压可以判断窑的工作情况。



2、窑内气流速度的大小对窑内传热的影响

- 影响换热系数：因而影响传热速率、窑的产量和热耗；
- 影响窑内飞灰生成量：即影响料耗。

当流速过大时，传热系数增大，但气体与物料的接触时间减少，总传热量有时反而会减少，表现为废气温度升高、热耗增大、飞灰增多、物料消耗加大，不经济。

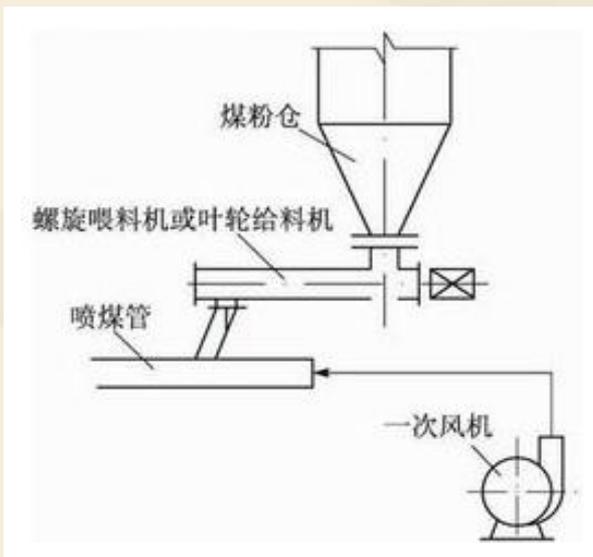
窑内气流速度，各带不同，一般以窑尾风速来表达，如直径为3米的湿法窑，以5（米/秒）左右为宜。干法窑的窑尾风速相应大一些，一般约10（米/秒）左右。

窑尾风速增大，回转窑的飞灰量增多，一般，窑内的飞灰量与窑尾风速的 $2.5\sim 4$ 次方成正比。

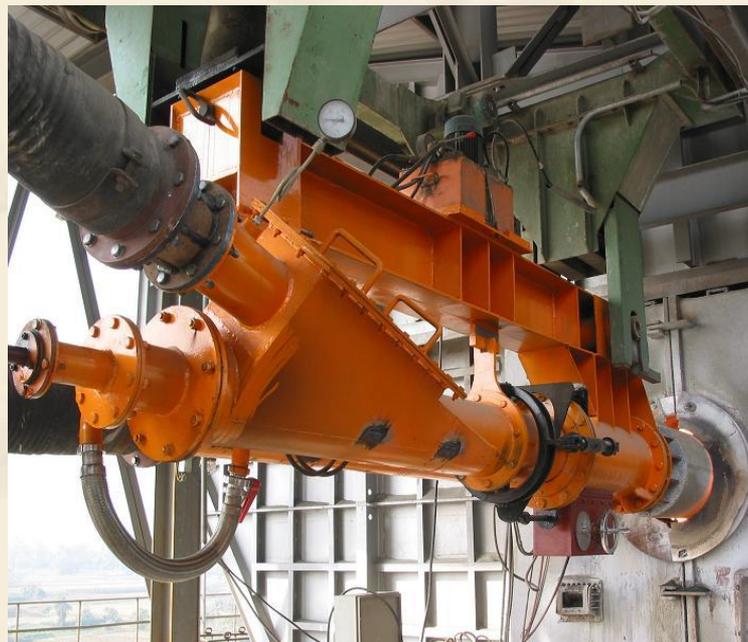
(三) 回转窑内燃料的燃烧

在回转窑的烧成带，物料进行的主要物理化学反应是 C_2S 吸收 $f-CaO$ 生成 C_3S ，这是微吸热反应。为了使生成 C_3S 的反应完全，必须使物料在 $1400-1450^{\circ}C$ 的高温下停留一定的时间。

回转窑喂煤系统



燃烧器



1、燃料在回转窑内燃烧应满足的要求

为了使生成 C_3S 的反应完全，使生料烧成熟料并获得较高的产量，燃料在转窑内的燃烧必须满足一定的要求：

- 燃料燃烧的火焰温度要达到 $1600\sim 1800^{\circ}\text{C}$ ；
（保持高温）
- 火焰要有适当的长度；（保持物料高温时间）
- 处于适当的位置。（适合 C_3S 的形成的反应）

2、回转窑对入窑煤粉和助燃空气的要求

(1) 对入窑煤粉的质量要求

- ◆ 低热值： $Q_{DW}^g \geq 20600 \text{kJ} / \text{kg}$
- ◆ 挥发份： $v^g = 18-30\%$
- ◆ 灰分： $A^g < 25 \sim 30\%$
- ◆ 水分： $W^y < 1-2\%$
- ◆ 细度： $< 15\%$ (0.08mm方孔筛筛余)

这些要求都是为了保证烧成带温度和热力强度以及火焰的稳定性而提出的，当采取有效措施（如提高助燃空气温度等）改善燃烧条件时，对煤质的要求也可适当放宽。

(2) 对入窑助燃空气的要求

煤粉自喷煤管以较高气速（40~80m/s）送入窑内。

通过喷煤管输送煤粉的空气，称为**一次风**。从安全角度考虑，**一次风不预热**。因此其用量不宜过多，因窑型和燃烧器的不同，其量约占总燃烧空气量的10~30%，大量的**二次风由冷却机提供**，故已被预热到600~1000℃，它既能回收熟料中的热量，又可促进燃烧反应完全并提高实际燃烧温度。

为了确保窑内燃料燃烧完全和燃烧安全，一、二次风用量的总和应略高于理论空气需要量，控制过剩空气系数为1.05~1.10为宜。

3、回转窑内的燃烧带与烧成带

火焰覆盖的区域，称为**燃烧带**。

火焰中部区域温度高，达 $1600\sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，此时熟料被加热到 $1300\sim 1450^{\circ}\text{C}$ ，其中有相当量（约 $25\sim 30\%$ ）的组分熔融成液相，粘附在窑内耐火材料的表面上形成一定厚度的粘稠状物料，即俗称的**主窑皮**。

窑内这一区域称为**烧成带**。

通常烧成带的长度用主窑皮的长度来判定。

由此可见，烧成带是燃烧带中高温部分。

平整的窑皮、合适的厚度和长度，是窑内煅烧制度正常稳定的标志。窑皮的形成还可以保护窑内耐火衬料，延长回转窑的运转周期。

(四) 回转窑内的传热机制

仅从热力学和传热学出发讨论。

回转窑内的传热源是燃料燃烧后的高温烟气，受热体是生料和窑内壁。是典型的气—固传热，传给生料的热量供煅烧过程中干燥、预热、分解和煅烧，用以完成全部要求。

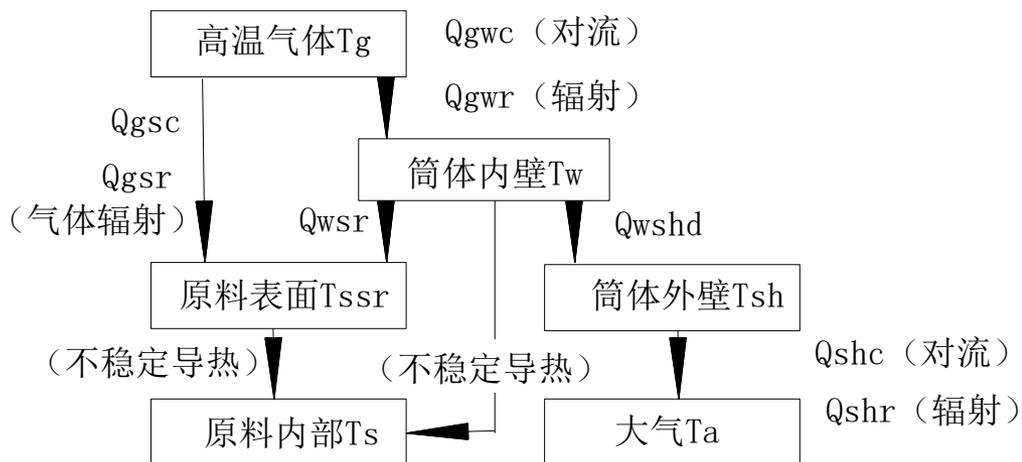
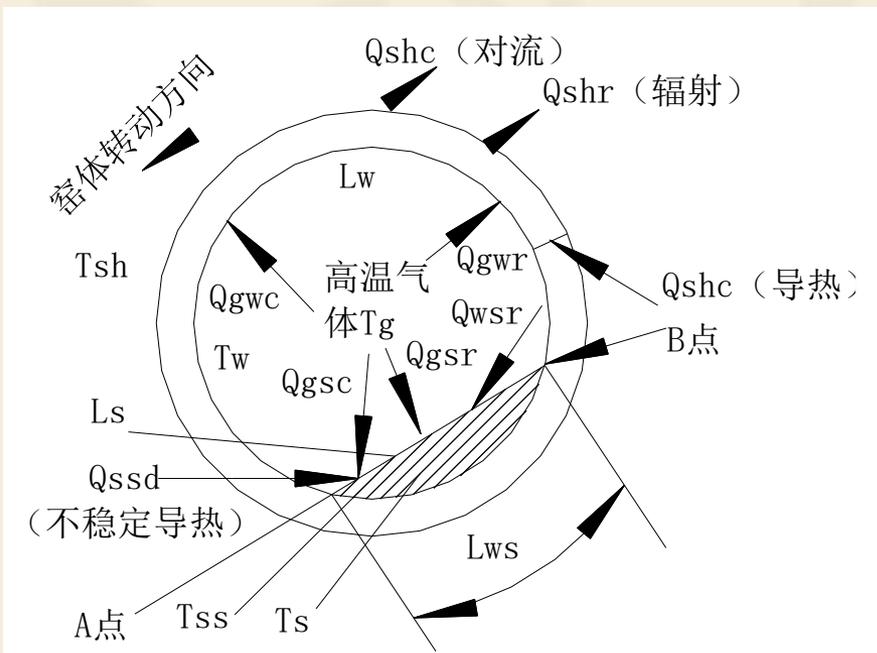
(1) 窑内传热的综合分析 with 传热方式

高温气体中具有辐射传热能力的组成，主要是 CO_2 和 H_2O (汽)，但由于烟气中夹带着粉体物料，因此增大了气体的**辐射率**。同时因为窑内流动气体和湍流作用，产生了有效的**对流**传热。

堆积生料之间以及窑回转时物料周期性地与受热升温的窑体内壁相接触而有辐射与**传导**传热共存。

窑内气—固与固—固之间同时存在辐射、对流、传导三种传热方式。其间关系错综复杂。再加上回转窑系统中，预热器和冷却机都与窑首尾相衔，在一定程度上对窑内气固温度分布也会产生一定影响。以及回转窑作为输送设备，物料运动规律，粉尘飞扬循环等也对传热有影响，从而更增加计算难度和复杂性。

经简化后，取回转窑内某一断面1m长的范围内，综合传热机制关系如图所示：



窑内传热机制分析—传热流流图

回转窑两个很大的缺点和不足

- ❖ 一：作为热交换装置，窑内炽热气流与物料之间主要是“堆积态”换热，换热效率低，从而影响其应有的生产效率的充分发挥和能源消耗的降低；
- ❖ 二：熟料煅烧过程所需要的燃料全部从窑热端供给，燃料在窑内煅烧带的高温、富氧条件下燃烧， NO_x 等有害成分大量形成，造成大气污染。

分解炉的基本原理

- ❖ 在分解炉内同时喂入经预热后的生料，一定量的燃料以及适量的热气体，生料在炉内呈悬浮或沸腾状态，在 900°C 以下，燃料进行无焰燃烧，同时高速完成传热和碳酸钙分解过程。

- ❖ 分解炉内可以使用固体、液体或气体燃料，我国主要是用煤粉，加入分解炉的燃料约占全部燃料的55~65%。
- ❖ 燃料（如煤料）的燃烧时间和碳酸钙分解所需要的时间约为2~4s，这时生料中的碳酸钙的分解率可达到80~90%，生料的预热后的温度约为800~850℃。
- ❖ 由于物料之间在炉内流场中产生相对运动，从而达到高度分散、均匀混合和分布、迅速换热，达到提高燃烧效率、换热效率和入窑物料碳酸盐分解率的目的。
- ❖ 悬浮预热、窑外分解技术，从根本上改变了物料的预热、分解过程的传热状态，将窑内物料堆积状态的预热和分解过程，分别移到悬浮预热器和分解炉内进行。