

水泥工业设计

1

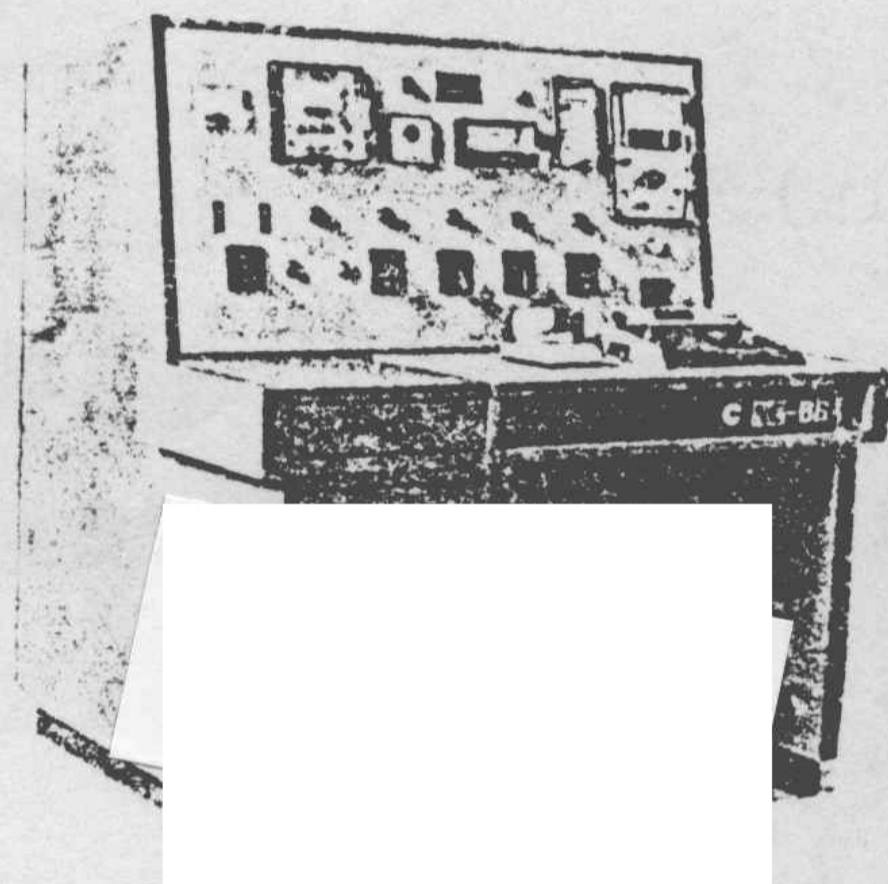
1987

南京水泥工业设计院

刊 2-1-8

预加水成球 NC-86A 微机自控系统
NC-86B

- 由南京水泥工业设计院研制、泰州电子仪器厂生产的NC-86A微机自控系统(见照片1)作为预加水成球成套装备的自控装置参加第35届布鲁塞尔尤里卡博览会,荣获银质奖。

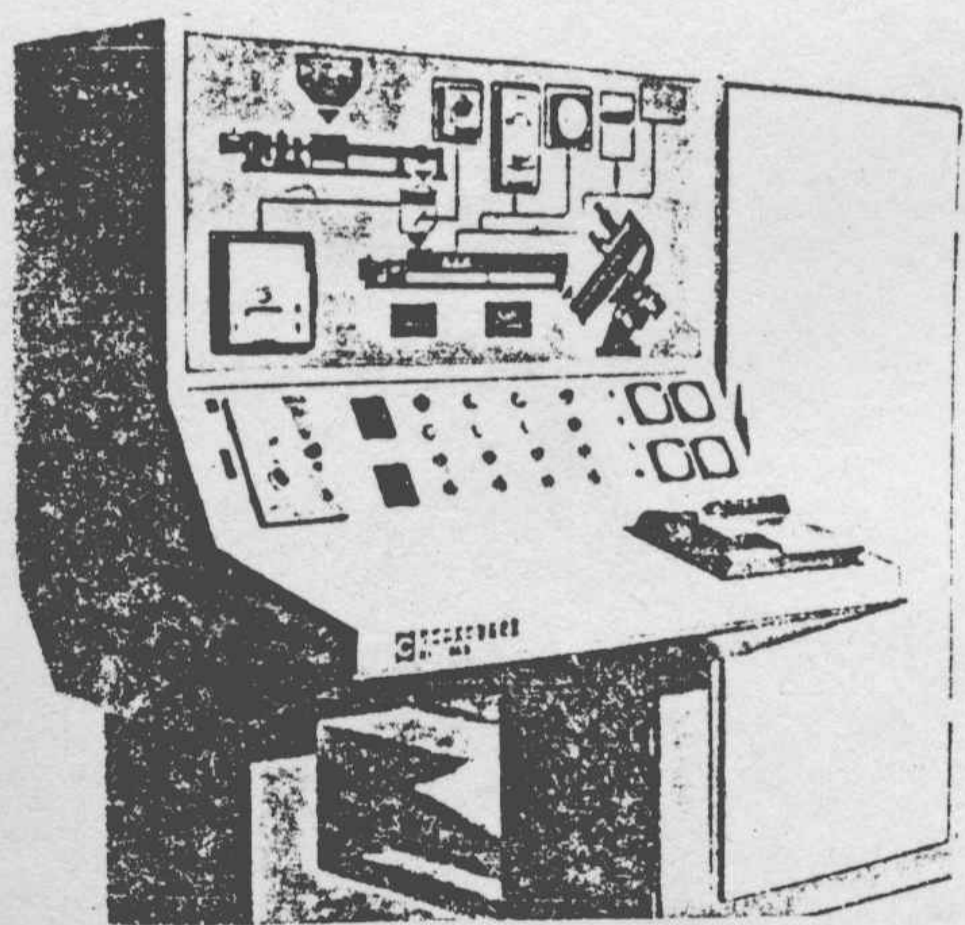


(照片1)

- 最近又推出新型产品NC-86B微机自控系统(见照片2)。NC-86B自控系统采用模拟盘显示,外形简洁明快。

- 两种型号都具有微机、仪表、手动三种控制方式,适应性极高,能确保密的连续生产。

- 整个微机控制系统具有显示、检测、报警、打印等功能,显示清晰、正确,操作方便。



(照片2)

- 控制性能好,使生产的料球质量优良,非常有利于提高工厂的经济效益。
- 泰州电子仪器厂承接 $\Phi 2.8$ 米、 $\Phi 3.2$ 米、 $\Phi 3.6$ 米、 $\Phi 4.2$ 米成套预加水成球装备和自控装置的订货,价格优惠。

泰州电子仪器厂为用户提供优

质的产品和优良服务,负责安装、调试、培训、维修及代办托运等业务。

地址: 江苏泰州市泰州电子仪器厂

电报挂号 1311 电话总机 3615

TQ172.47

目 录

错流移动床内气固换热的数值模拟	陈汉民 (1)
2000 t/h 新型干法水泥厂的原 料预均化	天津水泥工业设计研究院 余裕嘉 (12)
边缘传动磨机小齿轮位置角的确定	张六飞 (22)
预加水成球微机控制系统	赵顺民 (26)
水泥厂低压负荷电容补偿最佳方式的探讨	赵昌宁 (34)
* * * * *	
* 国外资料 *	
* * * * *	
水泥的颗粒分布	周希铀译 (48)

错流移动床内气固换热的数值模拟

陈汉民

一、引言

气固错流接触的移动式填充床换热装置在工业上有着广泛应用。对其换热过程的数值模拟无疑是深入了解过程内部变化规律，实现设计和操作优化的重要手段。

传统的机械移动填充床，物料的前进运动可看作活塞流。利用重力和气流作用力实现物料移动的斜面移动床是一项正在开发中的新技术。实践表明，其物料沿斜面的移动速度沿床深方向大致呈线性分布，物料的运动为剪切流。

D·R·MCGAW 曾为错流移动填充床换热提出了两种分布参数模型。在毕奥准数 $B_i < 1$ 时他建议可忽略固体内和传导过程的滞后效应，从而可应用早先由 Schumann 提出的分析解；当 $B_i > 1$ 时，他建议了一种对对流过程作有限差分处理的数值解法，但固体传导过程仍采用球体非稳态传热的分析解。

由于工业应用的移动填充床大多处理较粗颗粒， B_i 数在 10 的数量级，MCGAW 的分析解不适用，而他的数值解法又显得过于冗繁，更无法处理剪切流的问题，因此情况不能令人满意。

本文提出一种新的物理模型。其出发点是将填充床简化为具有相同孔隙率 ϵ 和比表面 s 以及由相同材料组成的平板——沟道模型，并假设平板内部传热只发生于板厚方向，将传导简化为一维过程，从而使换热过程的两个环节都可作差分处理。根据这一模型编制的计算程序及关于水泥熟料冷却过程的计算实例显示了它的数值处理方法及可

能取得的结果

二、数学处理

(一) 建立模型

首先考虑物料作活塞流的情形。在高度 H 、孔隙率 ε 、平均粒径 d 、初始温度 $T_{s,i}$ 的情况下，以恒速 u 沿 z 向移动的料层受到入口温度 $T_{g,i}$ 、速度 $v_{g,i}$ 的气流穿透，实现错流换热（图1—I）。欲求稳态气固温度在料层内的分布，问题可等价于求同一料层以固定床形式与气体换热时气固温度沿床高 z 和随时间 t 的分布（图1—II）。所得结果可借助 $z = ut$ 的关系转换。

为便于传导计算，将料层（图1—III）简化为平板——沟道模型（图1—IV）。并假设：

1. 模型与实物有相同 ε 、 d 和 H ，即：

$$\begin{cases} \frac{6}{d}(1-\varepsilon) = \frac{2}{B_1 + B_2} \dots\dots\dots(1) \\ \frac{B_1}{B_1 + B_2} = 1 - \varepsilon \dots\dots\dots(2) \end{cases}$$

由此得模型参数：

平板厚度 $B_1 = d / 3 \dots\dots\dots(3)$

沟道宽度 $B_2 = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} B_1 \dots\dots\dots(4)$

2. 平板内部在 x 向不发生传导。沟道与平板壁的对流换热按填充床情形考虑。因此，气固对流传热可按Denton提出的关联式计算，平板内部传导可按Smith的有限差分法解算。

考虑到对称性，问题归结为求图1—IV上A B C D区域内气固沿E F界面的传热。

(二) 传热方程及其差分处理

对气固对流传热可对流体微元 δ 列出能量平衡方程(图2)：

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{2\alpha}{C_g \rho_g V (B_1 + B_2)} (T_{s0} - T_g) \dots\dots\dots(5)$$

$$x = 0 \text{ 时, } T_g = T_{gi}$$

式中，流体微元温度 T_g 为 t 、 x 的函数，但 t 随 x 而变化，所以

$\frac{dT_g}{dx}$ 为 T_g 对 x 的全导数。

对平板内部传导可表述为：在任一床高 x 处：

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}$$

$$t = 0 \text{ 时, } T_s(x, y) = T_{si}$$

$$y = 0 \text{ 时, } \frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\alpha}{\lambda_g} (T_g - T_{s0})$$

$$y = B_1 / 2 \text{ 时, } \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

上述方程中， T_g 是时间 t 和床高 x 的函数， T_s 则是 t 、 x 和平板厚度方向坐标 y 的函数。为采用差分求解，将时间坐标 t 按步长 Δt 划分，在 x 、 y 坐标方向则是将床层和平板作M和2N等分，其

步长分别为 $\Delta x = H / M$, $\Delta y = B_1 / 2N$, 并按图 3 方式编号。

求解过程是从床底部开始。在已知物料温度分布和入口气体温度条件下求时间间隔 Δt 内每一薄层的出口气体温度和经 Δt 后相应薄层新的固体温度分布。重复这一过程可求得气固在 (t, x) 及 (t, x, y) 坐标系内的温度分布 $T_g(I\Delta x, J\Delta x)$ 和 $T_s(I\Delta x, J\Delta x, k\Delta y)$, 简写为 $T_g(I, J)$ 、 $T_s(I, J, K)$ 。

以时刻 $(I+1)\Delta t$ 、第 J 层的计算为例, 具体运算步骤如下:

1. 由时刻 $I\Delta t$ 板内各节点温度 $T_s(I, J, K)$ ($K=0 \rightarrow N$), 求时刻 $(I+1)\Delta t$ 节点 1 至 $N-1$ 的固体温度:

$$T_s(I+1, J, K) = [T_s(I, J, K-1) + (R-2) \cdot T_s(I, J, K) + T_s(I, J, K+1)] / R \dots\dots\dots(7)$$

式中: $R = \frac{\Delta y^2}{\alpha \Delta t}$ Δy —— 平板内节点距离 $\Delta y = \frac{B_1}{2N}$

为保证差分计算精度, R 应大于 2, 所以 Δt 应选择适当。

2. 由平板内节点 $N-1$, N 在 $I\Delta t$ 时的温度, 求 $(I+1)\Delta t$ 时的节点 N 处的温度 $T_s(I+1, J, N)$ 。对称性表明,

平板中心线处 $\frac{\partial T_s}{\partial y} = 0$, 即:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s(I+1, J, N) = T_s(I, J, N) \text{ 当 } T_s(I, J, N) = T_s(I, J, N-1) \\ \text{时,} \\ T_s(I+1, J, N) = T_s(I, J, N-1) \text{ 当} \end{array} \right.$$

$$T_s(I, J, N) = T_s(I, J, N-1) \text{ 时} \dots\dots\dots(8)$$

3. 由时间 $(I+1)\Delta t$ 的入口气体温度 $T_g(I+1, J)$ 和平板节点 1 处固体温度 $T_s(I+1, J, 1)$ 求壁面(节点 0)固体温度 $T_s(I+1, J, 0)$;

$$T_s(I+1, J, 0) = \left(\frac{\Delta y}{\lambda_s} T_g(I+1, J) + \frac{1}{\alpha} T_s(I+1, J, 1) \right) / \left(\frac{\Delta y}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha} \right) \dots\dots\dots(9)$$

4. 由时刻 $(I+1)\Delta t$ 时薄层 J 入口气体温度求薄层 J+1 入口气体温度:

$$T_g(I+1, J+1) = T_g(I+1, J) + \frac{2\alpha}{C_g(B_1+B_2)\rho_g} \cdot \frac{\Delta x}{V} (T_s(I+1, J, 0) - T_g(I+1, J)) \dots\dots(10)$$

必须说明, 由式(5)转换成该式时, 全导数 $\frac{dT_g}{dx}$ 意味着在差分计算

中节点应沿流线族 $x = \int_0^V \frac{V}{\varepsilon} d\varepsilon$ ($\varepsilon = I\Delta t$ 时, $x = 0$) 分布, 亦

即, 所得薄片 J+1 入口气体温度 $T_g(I+1, J+1)$ 与薄片 J 的入口气体温度 $T_g(I+1, J)$ 在时间上尚有一滞后 $\Delta t = \frac{\varepsilon \cdot \Delta x}{V}$,

如图 3 所示。鉴于多数情况下气流穿过床层的时间 $\int_0^H \frac{\varepsilon}{V} dx$ 与整个换热周期相比甚微, 计算中忽略了这一影响。

三、计算程序

为在 64K 微机上实施上述运算, 设计了图 4 所示表格, 并用一三维数组储存全部运算数据。表中第一行 $I=0$ 的全部数值和第一层

($J=1$) 的入口气体温度 $T_{g,i}$ 可按问题的初始和边界条件填入。不同层的时间节点 t 的间隔 Δt 对活塞流是一样的。

剪切流的情形:

剪切流时物料前进速度 u 沿床深分布 (图 5) 可表达为:

$$u = \left(\frac{x}{H} \cdot \frac{1-k}{k} + 1 \right) u_0 \dots \dots \dots (11)$$

各薄层的前移速度用其顶、底面平均值表示:

$$u(J) = \left(\frac{J-0.5}{M} \cdot \frac{1-k}{k} + 1 \right) u_0 \dots \dots \dots (12)$$

将移动床按图 6 方式划分时薄层 J 在每一床长间隔 Δz 的停留时间为:

$$\Delta t_j = \frac{\Delta z}{u(J)} = \frac{Mk}{Mk + (J-0.5)(1+k)} \cdot \Delta t_1 \dots \dots \dots (13)$$

鉴此, 只须在图 4 计算表格中将不同 J 值时的时间间隔按式 (13) 计算结果填入, 即可用与处理活塞流相同的递推方式处理剪切流, 求得在 x, z 坐标系内的气固温度分布。这时图 4 表格中第 $I+1$ 行即相应于床长 $z = I \cdot \Delta t \cdot u_0$ 处的床断面。在该断面处固体离床平均温度可按下式计算:

$$T_s(I) = \frac{\sum_{j=1}^M T_s(I, J) \cdot u(J)}{\sum_{j=1}^M u(J)} \dots \dots \dots (14)$$

式中 $\bar{T}_s(I, J)$ 为 J 薄层物料的平均温度, 由下式求得:

$$\bar{T}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{T_s(I, J, k) + T_s(I, J, k+1)}{2} \dots \dots \dots (15)$$

四、计算实例

下面以水泥熟料冷却过程为例说明上述算法的使用情况。计算中假设固体导温系数在传热过程中不变。对流传热系数 α 采用 Denton 的关联式:

$$N_{\alpha} = 0.80 R_e^{0.7} \cdot p_r^{0.33} \quad (500 < R_e < 50000) \dots\dots\dots (16)$$

其值与气体性质相关而随温度变化而变化。

空气性质随温度的变化关系可表达如下:

$$\mu = 0.1485 \times \frac{(273+t)^{1.5}}{390.6+t} \times 10^{-6} \quad (\text{kg} \cdot \text{Sec} / \text{m}^2) \dots\dots\dots (17)$$

$$C_g = 0.2351 + 0.5638 \times 10^{-4} T - 0.9493 \times 10^{-8} T^2 \quad (\text{KCal} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (18)$$

$$\lambda_g = \begin{cases} (21.60 + 0.05333T) \times 10^{-3} & \text{当 } T \leq 600^\circ\text{C} \text{ 时} \\ (28.47 + 0.04184T) \times 10^{-3} & \text{当 } 600^\circ\text{C} < T < 1300^\circ\text{C} \text{ 时} \end{cases} \quad (\text{KCal} / \text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (19)$$

(一) 假设条件

表1

平均粒径	床高	孔隙率	入口气 体温度	入口物料 温度	物料平均 停留时间	入口 风速	物料性质			物料流 动方式
							导热系数	密度	比热	
d mm	H mm	ϵ	T_{gi} °C	T_{si} °C	t min	V m/Sec	λ_s KCal/mh°Ckg/m³	ρ_s kg/m³	C_s KCal/kg°C	活塞流 $k=1$
60	400	0.4	20	1300	30	1.5	0.401	2800	0.22	颗粒流 $k=0.5$

(二) 差分运算参数

表2

时间间隔	高度区间数	平板区间数
Δt (Sec)	M	N
1.0	10	5

三 计算结果

1. 两种流动方式下出口气体温度和出口物料温度随平均停留时间的变化示于图7、8。

2. 两种流动方式下, 不同平均停留时间气、固温度随床高的分布示于图9、10, 离床气体温度、物料在断面上的平均温度以及卸出物料平均温度的比较示于表3。

表3

平均停留时间 (Sec)	离床气体温度 (°C)		卸出固体温度 (°C)		床断面固体温度 (°C)	
	k=1	k=0.5	k=1	k=0.5	k=1	k=0.5
120	616.0	610.2	1052.3	1043.7	1052.3	1027.0
240	486.3	476.0	855.4	843.9	855.4	820.0
360	388.1	375.7	702.0	689.7	702.0	663.5
480	310.5	297.8	581.8	570.1	581.8	544.4
600	249.1	237.1	487.7	477.2	487.7	459.5

五 讨论

(一) 平壁——沟道模型保留了错流移动填充床换热过程中两种主要换热方式(对流、传导)的基本制约关系, 看来计算结果能在一定程度上准确反映换热进程。与MCGAW采用的两种方法比, 该法适用范围广, 较为简洁, 计算量较小。

(二) 这种方法可方便地考虑物料流动方式由活塞流变为剪切流对换热带来的影响。

(三) 由于模型能在不同物料粒度、气流速度、床高和气、固初始

温度下模拟换热过程，因此可用于这类换热设备的放大设计和优化操作参数。

(四) 计算实例表明，在所选用的情况下，活塞流和剪切流二者在传热效果上相差甚微。

附：

符号说明：

a	导温系数	m^2/h
B_1	平板厚度	m
B_2	沟道宽度	m
C	比热	$Kcal/kg \cdot ^\circ C$
d	物料平均粒径	m
H	床高	m
L, J, K	时间、床高和壁厚三个座标方向上的区间编号	
k	表示物料流速随床深分布的系数	
M, N	床高和壁厚方向上划分的区间数	
R	差分运算中引入的变量 $R = \frac{\Delta y^2}{a \cdot \Delta t}$	
S	比表面积	l/m
T	温度	$^\circ C$
t	时间	Sec
u	物料前移速度	m/Sec
v	表观气流速度	m/Sec
x, y, z	床高、平板厚度和床长方向上的坐标	
α	对流传热系数	$KCal/m^2 h ^\circ C$
ρ	密度	kg/m^3

μ	粘 度	$\text{kg} \cdot \text{Sec} / \text{m}^2$
λ	导热系数	$\text{KCal} / \text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

角注:

g	气 体
s	固 体
i	入 口
o	床层底部

参考资料(略)



图 1 反应器结构示意图

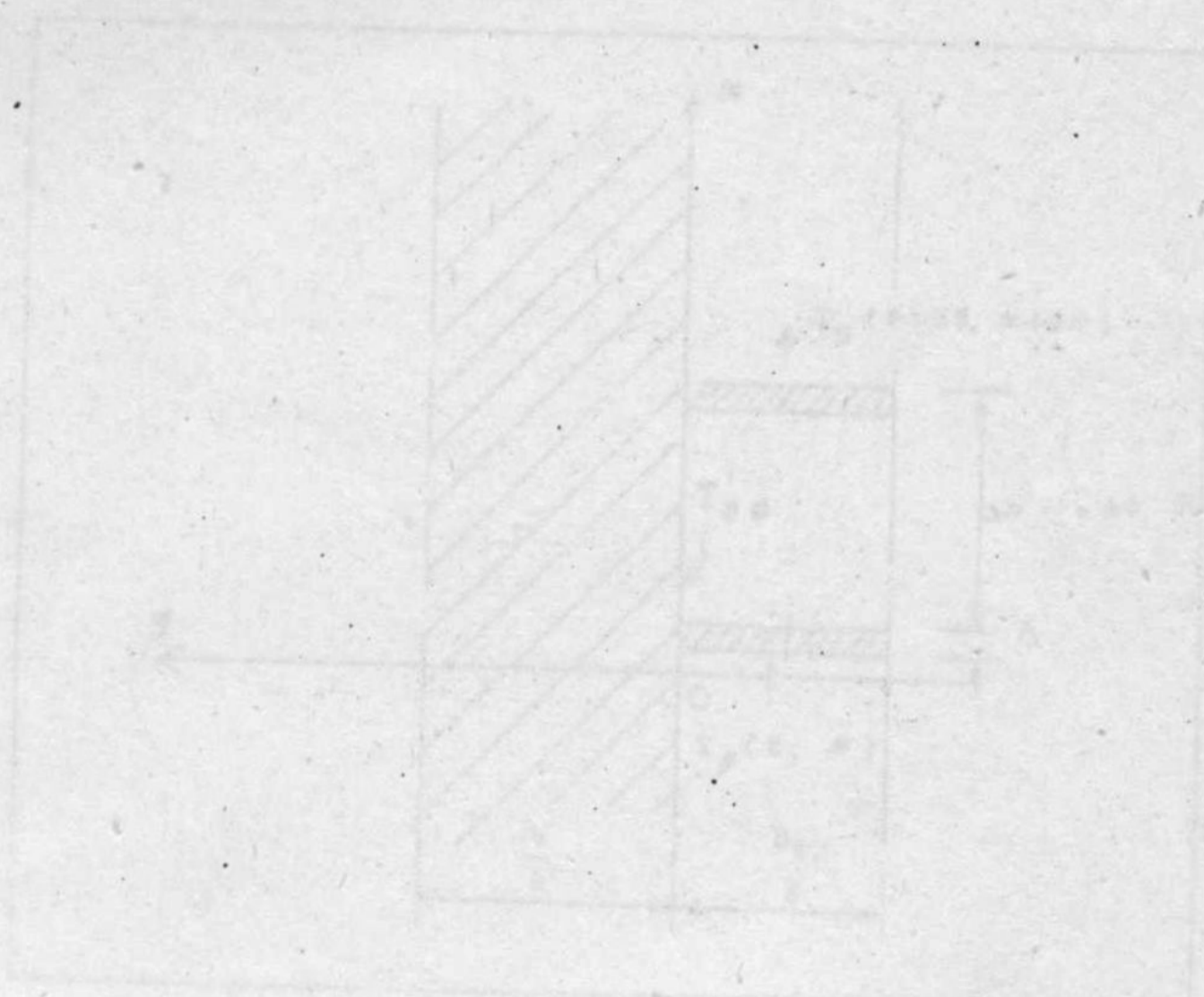


图 2 反应器结构示意图

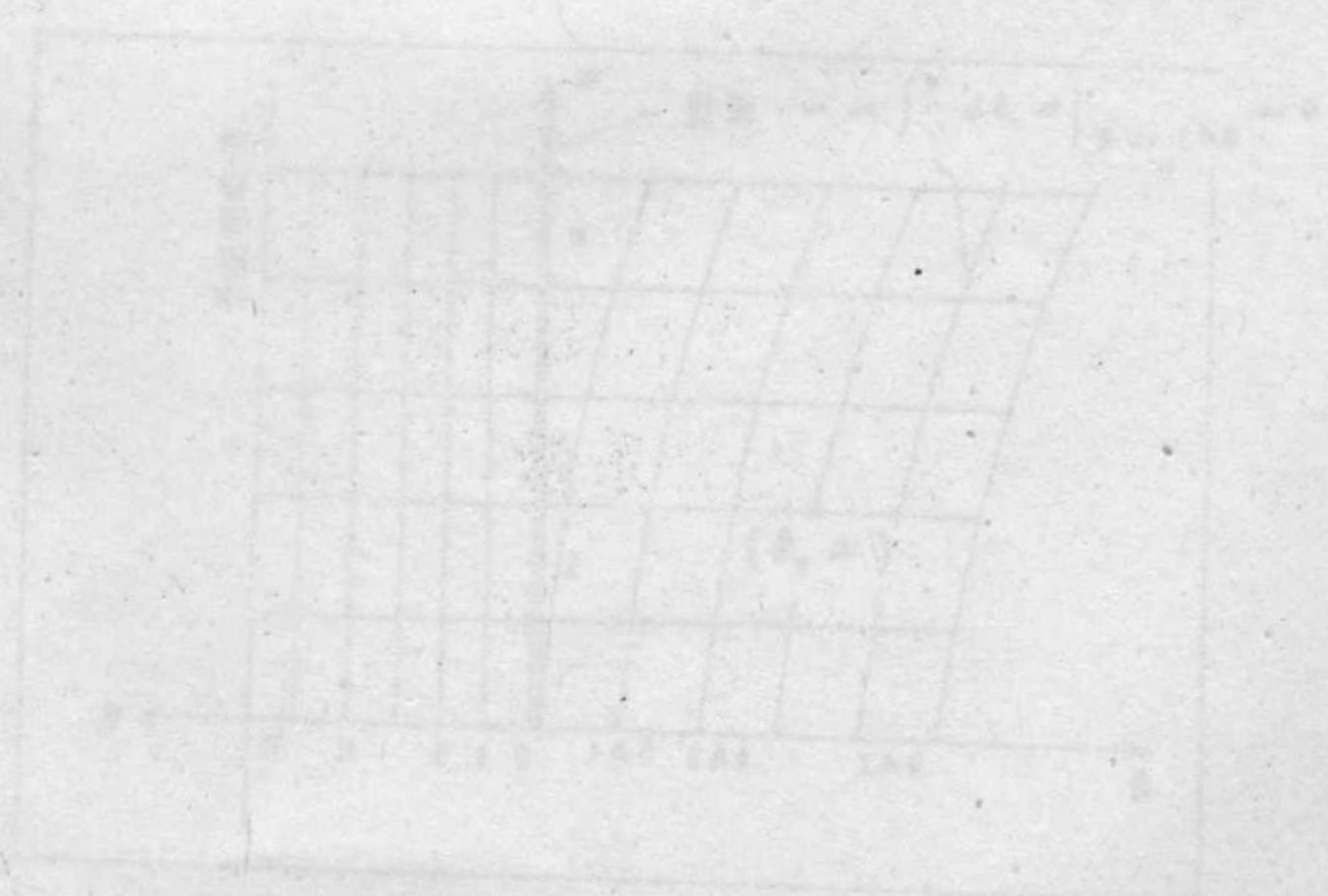


图 3 反应器结构示意图

2000t/h 新型干法水泥厂的原料预均化

天津水泥工业设计研究院 余裕嘉

水泥工业为高度均化工业。水泥工业生产方法的发展,在很大程度上取决于均化工艺。湿法以其料浆搅拌工艺能够获得成分均匀度比较高的入窑料浆,因而取代了旧式干法生产;现在新型干法的发展,也是由于原料均化技术取得了显著的进步,从工艺上能够满足入窑生料的化学成分波动控制在严格的范围内。因此,原料的预均化与生料的均化,对新型干法生产有其特殊的意义。按一般定义说,在水泥厂内,均化措施设在生料磨之前叫预均化 (prehomogenization),均化措施设在生料磨之后叫后均化 (post-homogenization)。本文只介绍预均化,而在预均化中,仅介绍出破碎机以后与进生料磨之前这一段原料预均化工艺。

结合 2000t/d 水泥厂设计,谈谈经常碰到的几个问题:

一、采用原料预均化堆场的条件

原料需不需要预均化,与原料需不需要采用预均化堆场,本来是两个概念。原料需要预均化,选用预均化堆场不过是进行原料预均化的措施之一,往往在大型水泥厂设计中,首先是石灰石需要预均化,就是需要设置预均化堆场的同义语了。因为大厂设置预均化堆场的目的,不全在于原料的预均化,而是考虑它作为储存设施,具有设备可靠性高,能适应生产工艺自动化要求等功能。从国外提供的技术资料中可以看出,各国对采用预均化堆场的条件是不一样的。如丹麦史密斯公司认为:当原料成分波动范围较大,超过入窑生料允许波动范围 1.0 倍以上者,应该设预均化堆场。日本川崎公司认为石灰石 CaCO_3

标准偏差值为 $\pm 5 \sim 10\%$ 时，需要进行预均化。西德伯力鸠斯公司则认为：工厂规模为 $1000 \sim 1200 \text{ t/d}$ 时，均化储存可采用吊车库； 2000 t/d 以上的水泥厂则可采用堆场。堆场与圆库储存都得花钱，不如设预均化堆场一举两得。国外还有一种采用计算变异系数 R 的办法，来决定是否设置预均化堆场。即：

$$R = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中：

S ——石灰石 CaCO_3 的标准偏差值。

\bar{X} ——石灰石 CaCO_3 的规定值。

若 $R < 5\%$ 不需要均化

$R = 5 \sim 10\%$ 两可

$R > 15\%$ 需要均化

我国目前尚无原料预均化的技术规定，但在 2000 t/d 设计实践中，存在着不成文的规定，即具备下列条件之一者，可以考虑设置石灰石预均化堆场：

1. 当进厂石灰石的 CaCO_3 标准偏差 $\geq \pm 3\%$ 时；
2. 当石灰石矿床有夹层可以利用时；
3. 当石灰石矿床中夹带大量粘土时；
4. 当要求粘土或其它粘土质原料需要与石灰石进行预混合时。

当然，上述规定还有不够完善之处，如石灰石矿床 CaCO_3 的高低不同，对允许标准偏差值应该有差别，和矿山开采的搭配方式也对允许 CaCO_3 标准偏差值的采用有影响等，并需要在设计时，结合生

料磨产品质量控制方式与生料库的均化效果综合考虑。

二、预均化堆场的选择

(一) 堆场型式的选择

就工艺性质来说，预均化堆场按参与均化的原料组份多少可区分为：

1. 单一组份的预均化堆场。每种原料都在单独的预均化堆场中进行均化与储存。

2. 多组份的预均化堆场，或称预混合堆场。将一些主要原料组份放在同一个预均化堆场中进行均化与储存，出预均化堆场的原料是可以校正的。

3. 综合性的预均化堆场，或称预配料堆场。将主要原料组份和次要原料组份放在一个预均化堆场中进行均化与储存，在预均化堆场中能以较小的差别，达到规定的整定值。

在2000t/d水泥厂设计中，常常碰到的是上述前两种型式的选择。石灰质原料与粘土质原料的成分波动都超过允许范围时，一般采用单独均化，或采用单一组份的预均化堆场。当要求粘土或其它粘土质原料与石灰石进行预混合，采用多组份的预均化堆场时，必须其中的一种原料成分波动不大，出预均化堆场的原料是可以校正的。

预混合堆场质量控制是在堆场前取样，由自动取样站来控制配比，还是由生料磨出磨生料成分通过荧光分析仪和计算机来反馈控制，要根据原料的具体情况来定。因为取样站投资较高，除非原料含氯很高，品位很低，用纯石灰石校正不过来时，才采用取样站。

(二) 圆堆场还是长堆场

无论是单一组份还是多组份的预均化堆场，均可选择长形堆场或