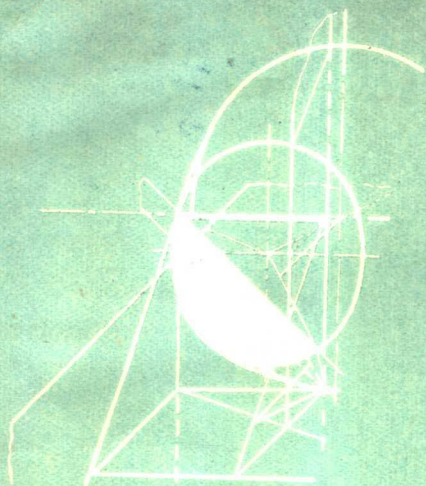




Е. И. 郝道劳夫著

迴转窑中物料的运动

建筑工程出版社

迴转窑中物料的运动

赵维彭译

江苏工业学院图书馆
藏书章

建筑工程出版社出版

• 1960 •

內容提要 这本小冊子是一篇專題論文，敘述迴轉窯內物料運動規律的理論成就和實驗研究結果。這些規律是在迴轉窯的設計和操作中必須應用的。

这本小冊子适用于下列技術人員：水泥、石灰、石膏、耐火材料、化工、冶金等部門及其它使用迴轉窯的工業部門中的生產人員、設計人員、結構師及研究人員等。

原本說明

書 名 ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

著 者 Е. И. Ходоров

出版者 Промстройиздат

出版地點及年份 Москва—1957

迴轉窯中物料的运动

趙維彭 譯

1960年1月第1版

1960年1月第1次印刷

1,555册

787×1092 $1/32$ · 58千字 · 印張 $2\frac{1}{2}$ 插頁 1 · 定價(10) 0.36元

建築工程出版社印刷廠印刷

· 新華書店發行

· 書號：1765

建築工程出版社出版（北京市西郊百萬莊）

（北京市書刊出版業營業許可証出字第052號）

序

迴轉窯是用來生產水泥、石灰、耐火材料、有色金屬與黑色金屬以及一系列化工產品的。在這種窯內，物料的运动过程影响有关热工制度的一些很重要的指标，如：1) 物料的填充系数——它决定着物料从燃烧气体及襯料中取得热量的表面大小；2) 物料在窯內的停留時間；3) 料層內物料顆粒的升起時間及其在料層表面上的降落時間（它們影响着料層中溫度的均勻性）；4) 物料的消耗量。

今天，不論在設計新窯或改建舊窯的過程中，不考慮物料的运动規律是不可想象的。在迴轉窯運轉的情況下，物料的运动也有着很重要的作用。作業制度不穩定會引起窯內物料的物理常數發生變化，同時也是實際中所觀察到的物料运动速度不均勻，從而窯內物料的充滿情況也不均勻（破壞窯的正常運轉）的原因之一。

本文敘述了迴轉窯內物料运动規律的理論成就和實驗研究結果。

作者對在完成這項研究工作中給予大力幫助的H. H. 克留列娃工程師表示深切的謝意。

目 录

序

一、理論部分.....	(1)
1. 迴轉窖中物料运动的历程	(1)
2. 物料顆粒沿料层表面降落一次中的移动距离	(4)
3. 物料在窖断面中的平均运动速度	(12)
4. 物料順窖中心綫方向运动的平均速度	(19)
二、在模型中的試驗	(21)
1. 試驗設備与試驗方法	(21)
2. 試驗結果	(27)
1) 中空式窖模型的試驗結果	(27)
2) 有內部裝置的窖模型的試驗結果	(32)
三、工业試驗	(39)
四、計算方法	(41)
五、所得关系式与以前的研究結果的比較	(70)
結論	(75)
参考書籍	(76)

一、理論部分

1. 迴轉窯中物料运动的历程

物料仅仅占据了迴轉窯的一部分。在徐徐迴轉的窯中，通常公認的物料运动过程可概括如下（見圖 1）：物料顆粒在摩擦力

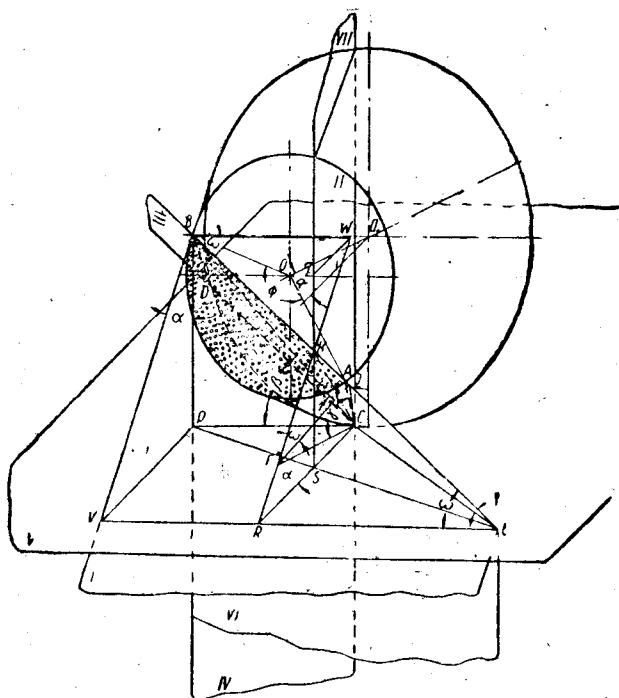


圖 1 物料在迴轉窯內运动的图解

的作用下，与窑壁一起象一个整体一样慢慢升起，一直达到料层表面为止，而后则沿此近似平面的料层表面滑落下来。这里假定物料沿窑壁以及在料层内部是没有滑动的。物料的落下轨道是位于一个垂直平面上，这个平面和物料表面与水平面两平面的交线互相垂直。所有其它物料颗粒的降落轨道都象是一个同心圆弧，都位于与窑的中心线相垂直的平面上。

因为窑的迴转速度很慢，所以使物料压向料层表面的离心力可以忽略不计，并且可认为物料颗粒仅有重力 G 的作用（见图 2）。此重力可分解为两个分力；一个是和料层表面平行，另一个是和它垂直。而这个垂直的分力就产生了与它成比例的摩擦力。

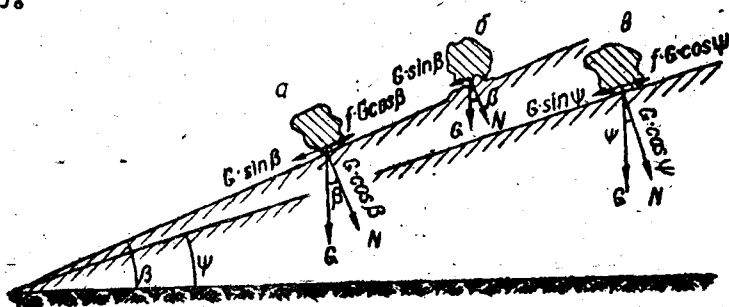


图 2 迴转窑内料层表面上物料颗粒受力的图解

物料颗粒沿料层表面滚动或滑动的摩擦系数 f 可从下面的等式中求出（见图 2 中的 b）：

$$G \cdot \sin \psi = f \cdot G \cdot \cos \psi; \quad (1)$$

$$f = \operatorname{tg} \psi. \quad (2)$$

ψ 角是物料颗粒能继续保持在料层表面上的最大角度，这个角度叫做物料的静力学静止角。当将窑突然停住时，物料表面的角度就是这个角度。在运转的窑中，料层表面与水平面之间的夹

角 β 称作动力学静止角，大于静力学静止角，即：

$$\beta > \psi_0 \quad (3)$$

由于物料颗粒的尺寸和形状不同，故料层表面是粗糙不平的。因此有些物料颗粒在达到料层表面时就会停滞在这些突起部分上。欲使这些物料颗粒沿料层表面落下，则它们需要首先翻越过这些突起部分。这时只要物料颗粒的重力分量转移到支点的降落一侧，则就会翻滚下来。假如物料颗粒是一个规则的具有 l 边的多面体，则翻越的条件如下（见图 2 中的 6）：

$$\beta > \frac{\pi}{l} \quad (4)$$

这里， β 角可以根据 ψ 角求出，或根据 $\frac{\pi}{l}$ 求出，不过数值较大而已。

使物料颗粒落下的分力（见图 2 中的 a）等于：

$$\begin{aligned} G \cdot \sin \beta - f \cdot G \cdot \cos \beta &= G(\sin \beta - \operatorname{tg} \psi \cdot \cos \beta) = \\ &= mg(\sin \beta - \operatorname{tg} \psi \cdot \cos \beta) = mb_0 \end{aligned} \quad (5)$$

物料的体积消耗量以及沿窑断面的平均运动速度（取决于 ψ 角、 β 角及大密结构），将决定迴轉窑中料层的高度。当窑内各点的运动条件固定时，物料即以均匀的料层向前移动。物料运动条件的任何变动，都将使料层高度逐渐变化，从而使均匀的料层变成为不均匀的。假若运动条件的变化不是连续的，而且距离窑的出料口还很远，那么不均匀的料层还会变成为均匀的。

在煅烧过程中，由于物理-化学变化对物料颗粒的形状、尺寸以及比重的影响， ψ 角和 β 角沿窑长的不同点上是有变动的。同时必须指出：有气体自物料中逸出，就会增加料层的孔隙率而减少 ψ 和 β 的角度；若颗粒表面上有液相存在，就会增加二者的角度。

实际上，迴轉窯各帶中物料的体积消耗量以及 ψ 和 β 角的数值都应取为常数。这时，物料的喂入及卸出情况以及窑直径的变化和窑内装置，都能使料层不均匀。

窑内装置（如链条、格子式热交换器、翻料叶板、擋料圈及控料螺纹板等等）都会改变物料的运动速度。如果这些窑内装置比较长，那么对物料运动速度的影响就可以看成是另一种不同窑直径的情况，在这直径不同的段落前后，其料层是不均匀的。

任一种窑内装置的影响程度，都要根据经验决定之。装在进料端和出料端断面上的狭的膜片状擋料圈，假若高于料层的厚度，就会影响物料的运动速度。

2. 物料颗粒沿料层表面降落一次中的移动距离

各个颗粒沿料层表面落下的条件是不同的。想对所有这些条件都加以考虑是不可能的。但是在解决一系列问题时，仅考虑那些能够代表窑内全部物料运动情况的平均数字也就可以了。

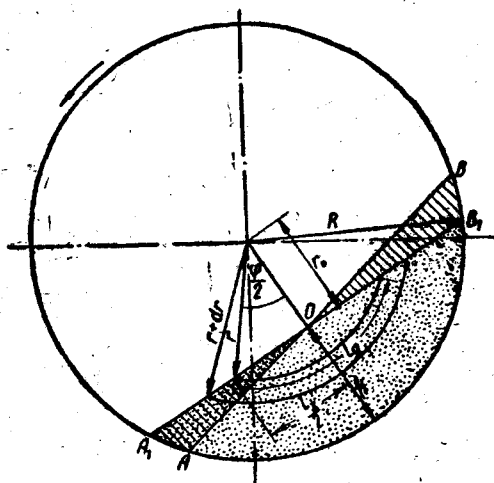


图 3 迴轉窯內料层的断面图

的（见图 3），所以一种颗粒从 O 点到终点的距离增加，就会使

每一个颗粒从始点到 O 点，然后再从 O 点到终点所走过的距离实际上是各不相同的，但由于在二相似扇形 B_1OB 和 A_1OA 中移动的物料是相等

另一种物料在这段的距离缩短。因此，可以认为所有颗粒的始点与终点的位置对 O 点都是对称的。

图 1 所示为个别物料颗粒在料层不均匀的斜迴轉窑尾端的运动图解。这是一种最普通的情形。

一个物料颗粒从垂直于窑中心线的料层断面 I 上的 A 点开始运动后，经过一个圆弧 AB 而在 B 点重新露出料层表面，并在重力的作用下沿料层表面落下。这样，物料颗粒就移动到下一个断面 II 中与 A 点相重合的一点 C 上，而断面 II 与断面 I 的距离为 FC ，且仍垂直于窑的中心线。

物料颗粒在料层表面上的运动轨迹 BC 乃是料层平面 III 与垂直平面 IV 的一条交线；而垂直平面 IV 既通过 B 点，又垂直于水平面 V 与料层面 III 的交线 CE 。在垂直平面 IV 中，料层表面 III 与水平面 V 相交成 β 角， β 角代表物料的性质。从而，在所研究的一般情况下，料层表面 III 相对于水平面 V 的位置就可根据窑相对于水平面的倾斜角 α 、物料的动力学静止角 β 和料层表面相对于窑中心线的斜角 γ 予以确定。根据不均匀层是否是下降的或是上升的（根据物料的运动方向），可以规定 γ 角是正的或者是负的。

料层内的物料颗粒也以同样的方式沿着与窑半径不同的各同心弧向前运动。

通过直线 BE 和 FC 作两个垂直平面 VI 和 VII，然后利用解一系列三角形关系的方法来求 FC ；在标注这些三角形时，各直角均用中型字体。

从平面 III 内的三角形 BCE 中得：

$$\frac{BC}{BE} = \sin \rho_0 \quad (6)$$

从平面 III 内的三角形 BIC 中得：

$$\frac{BI}{BC} = \sin \rho \quad (7)$$

及 $(BC)^2 = (BI)^2 + (CI)^2. \quad (8)$

三角形 IFC 所在平面与 AB 及 CD 二直线垂直与窑中心线平行，故从 $\triangle IFC$ 中得：

$$CI = \frac{FC}{\cos \gamma} \quad (9)$$

及 $IF = FC \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (10)$

三角形 KIF 位于平面 I 中，且 KFI 角等于 ω 角（有垂直边的角度），从中可得：

$$IF = KF \cdot \cos \omega \quad (11)$$

及 $KI = KF \cdot \sin \omega. \quad (12)$

从等式 (6) 及 (7) 中可得： $\frac{BC}{BE} = \frac{BI}{BC}$ ；并且将等式 (8) 和 (9) 代入，则：

$$\begin{aligned} BE &= \frac{(BC)^2}{BI} = \frac{(BI)^2 + (CI)^2}{BI} = \frac{(BI)^2 + \frac{(FC)^2}{\cos^2 \gamma}}{BI} = \\ &= \frac{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2}{BI \cdot \cos^2 \gamma}. \end{aligned} \quad (13)$$

从等式 (10) 和 (11) 得到：

$$FC \cdot \operatorname{tg} \gamma = KF \cdot \cos \omega$$

$$KF = \frac{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\cos \omega}. \quad (14)$$

从平面 I 的三角形 BWK 中可得：

$$KW = BK \cdot \sin \alpha. \quad (15)$$

从平面 II 的三角形 RFC 中可得：

$$FR = FC \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

从平面 I 的三角形 BEV ， KER 及矩形 $BWRV$ 中可得：

$$\frac{BE}{BE-BK} = \frac{KW+KF+FR}{KF+FR} = \frac{KW}{KF+FR} + 1. \quad (17)$$

将(13)、(14)、(15)及(16)各式代入(17)式中，得：

$$\frac{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2}{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2 - BK \cdot BI \cdot \cos^2 \gamma} - 1 = \frac{BK \cdot \sin \omega}{\frac{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\cos \omega} + FC \cdot \operatorname{tg} \alpha};$$

$$\frac{BK \cdot BI \cdot \cos^2 \gamma}{BI \cdot \cos^2 \gamma (BI - BK) + (FC)^2} = \frac{BK \cdot \cos \omega \cdot \sin \omega}{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma + FC \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega};$$

$$\frac{BI \cdot \cos^2 \gamma}{BI \cdot \cos^2 \gamma \cdot KI + (FC)^2} = \frac{\sin \omega \cdot \cos \omega}{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma + FC \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega}.$$

根据等式(12)：

$$\frac{BI \cdot \cos^2 \gamma}{BI \cdot \cos^2 \gamma \cdot \frac{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \sin \omega}{\cos \omega} + (FC)^2} = \frac{\sin \omega \cdot \cos \omega}{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma + FC \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega};$$

$$\frac{BI \cdot \cos^2 \gamma}{FC \cdot BI \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \omega + (FC)^2} = \frac{\sin \omega \cdot \cos \omega}{FC \cdot \operatorname{tg} \gamma + FC \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega};$$

$$FC \cdot BI \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega \cdot \cos^2 \gamma + FC \cdot BI \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma =$$

$$= FC \cdot BI \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \sin^2 \omega + (FC)^2 \cdot \sin \omega \cdot \cos \omega;$$

$$FC[FC \cdot \sin \omega \cdot \cos \omega + (BI \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \sin^2 \omega - BI \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma - BI \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega \cdot \cos^2 \gamma)] = 0;$$

$$FC = BI \frac{\cos \gamma}{\sin \omega \cdot \cos \omega} (\sin \gamma + \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega \cdot \cos \gamma - \sin \gamma \cdot \sin^2 \omega);$$

$$FC = BI \frac{\cos \gamma}{\sin \omega \cdot \cos \omega} (\sin \gamma \cdot \cos^2 \omega + \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \omega \cdot \cos \gamma);$$

$$FC = BI \frac{\cos^2 \gamma}{\sin \omega} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \omega). \quad (18)$$

等式(18)中包括料层表面相对于与窖中心綫相垂直的平面的傾斜角 ω 。此角与 β 角不同,不是物料的物理常数。当窖的斜度不太大,而料层也均匀的情况下, ω 角与 β 角近似;但若料层不均匀,料层表面相对于窖中心綫的斜角 γ 愈大,則 ω 角 β 角也就相差愈大。

我們可繼續推导,以便直接通过物料的靜止角 β 表达 FC 。

从平面Ⅳ的三角形 BPC 中:

$$BP/BC = \sin \beta. \quad (19)$$

从平面Ⅰ的三角形 BVE 中:

$$BV/BE = \sin \omega. \quad (20)$$

三角形 BPV 是在与窖中心綫相平行的垂直平面內,且角度 VBP 等于窖的斜度 α (有垂直边的角);則从此三角形 BPV 中可得:

$$BP/BV = \cos \alpha. \quad (21)$$

以等式(6)去乘等式(19),則:

$$BP/BE = \sin \rho \cdot \sin \beta. \quad (22)$$

以等式(20)去乘等式(21),則:

$$BP/BE = \sin \omega \cdot \cos \alpha. \quad (23)$$

从等式(22)及(23)中可得:

$$\sin \omega \cdot \cos \alpha = \sin \beta \cdot \sin \rho. \quad (24)$$

将等式(7)代入等式(24)中,并将(8)与(9)二等式代入,則得:

$$\begin{aligned} \sin \omega \cdot \cos \alpha &= \sin \beta \frac{BI}{BC} = \sin \beta \frac{BI}{\sqrt{(BI)^2 + (CI)^2}} = \\ &= \sin \beta \frac{BI}{\sqrt{(BI)^2 + \frac{(FC)^2}{\cos^2 \gamma}}} = \sin \beta \cdot \cos \gamma \frac{BI}{\sqrt{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2}}, \end{aligned}$$

从而:

$$\sin \omega = \frac{\sin \beta \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha} \cdot \frac{BI}{\sqrt{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2}}; \quad (25)$$

$$\cos \omega = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta \cdot \cos^2 \gamma (BI)^2}{\cos^2 \alpha (BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + \cos^2 \alpha (FC)^2}}. \quad (26)$$

从等式(18)、(25)和(26)中:

$$FC = \frac{\cos \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + (FC)^2}}{\sin \beta} \times \\ \times \left(\operatorname{tg} \gamma \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta (BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma}{\cos^2 \alpha (BI)^2 \cdot \cos^2 \gamma + \cos^2 \alpha (FC)^2}} + \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (27)$$

以 x 代 FC , L_x 代 BI , 则得下列等式:

$$x \cdot \sin \beta - \sin \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{L_x^2 \cdot \cos^2 \gamma + x^2} = \\ = \sin \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{L_x^2 \cdot \cos^2 \gamma + x^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta \cdot \cos^2 \gamma \cdot L_x^2}{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma \cdot L_x^2 + \cos^2 \alpha \cdot x^2}},$$

从而可求出 x 。

将等式的两边平方, 则得:

$$2x \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma \sqrt{L_x^2 \cdot \cos^2 \gamma + x^2} = \\ = x^2 (\sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha) + \\ + L_x^2 \cdot \cos^2 \gamma (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \sin^2 \beta - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha).$$

将等式再平方后, 则得:

$$x^4 [\sin^4 \beta - 2 \sin^2 \beta (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha) + (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \\ - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha)^2] + 2x^2 \cdot L_x^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot [\sin^4 \beta \cdot \sin^2 \gamma + (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \\ - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha)^2 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos^4 \gamma - \sin^2 \beta \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \gamma \cdot (\sin^2 \gamma + \\ + 1)] + L_x^4 \cdot \cos^4 \gamma \cdot [\sin^4 \beta \cdot \sin^4 \gamma + (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha)^2 + \\ + 2 \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \gamma (\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha)] = 0. \quad (28)$$

从而:

$$x = L_x a, \quad (29)$$

式中: x ——物料顆粒沿料层表面順窖的中心綫方向一次降落中所走的距离, 米;

L_x ——在料层表面的平面內在走过的距离中的平均弦長, 米;

a —— α 、 β 及 γ 角的无因次函数, 如:

$$a = \cos \gamma \sqrt{\frac{\sin^2 \beta [\cos^2 \gamma (\sin^2 \beta + 2 \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta) - A + \sin^2 \gamma B]}{\sin^2 \beta (\sin^2 \beta - 2A) + B^2}} - 1, \quad (30)$$

式中:

$$A = \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha;$$
$$B = \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha.$$

所推导出之等式 (29), 可計算物料顆粒沿料层表面順窖的中心綫降落一次所走的距离, 而物料在料层內是沿着与窖半徑 R 相等的圓弧升起的。同样, 物料沿任意半徑 r (見图 3) 之圓弧所走的距离也可表示如下:

$$x = l_x a. \quad (31)$$

为簡化計算起見, 在图 4 (a 和 6) 中給出 a 与 α 、 β 及 γ 之間的关系曲綫。

分析 a 在 0 到 $+\infty$ 之間的数值变化才有实际意义。当 $a = 0$ 时, 物料的运动速度为 0, 这时相对应的条件是升起的不均匀的料层具有最低极限的 γ 角 (最大的負值)。当 $\gamma = 0$ 时, $a = a_p$ (均匀料层的数值)。在窖的出口处, 降落的非均匀料层的 γ 角是有最大的可能值 (正值), 因为在此处料层的高度趋向于零, 故 a 趋向于 $+\infty$ 。在这里, 料层不是在断面上成 β 角, 而是順着窖的中心綫, 如图 5 中所見, γ 角必須等于 $\beta - \alpha$ 。图 4 a 和 6) 証实了这一点, 并指出完全有根据認為所采用的图解及基于此

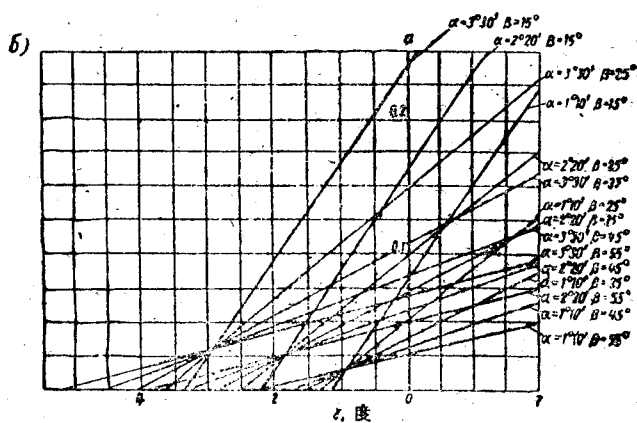
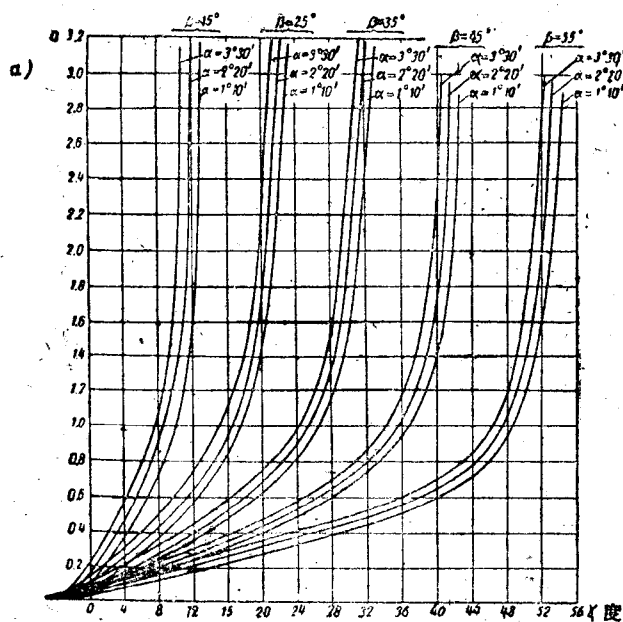


图 4 (a, b), 与 α 、 β 及 γ 之间的关系曲线

图而推导出之方程式 (31) 是能够正确地反映出物料在迴轉窑中的运动历程。

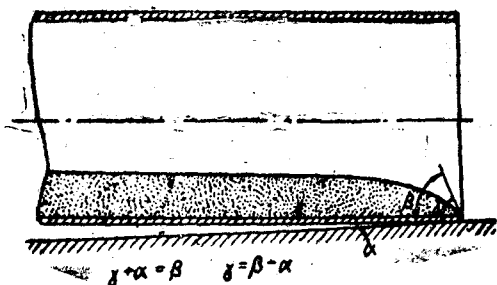


图 5 物料在迴轉窑中的縱断面

3. 物料在窑断面中的平均运动速度

当物料在迴轉窑內运动时，物料顆粒成周期性地或埋在料层

里面与窑一起向上运动，或到料层表面上而降落下来。但只有在物料顆粒降落的过程中，它才能沿着窑中心綫方向前进。在物料升起的过程中，它在这个方向上是没有位移的。所以说，全部物料实际上是通过降落料层的断面在向前运动。也可以假定地将全部物料沿窑的中心綫方向的运动看作是經過整个料层断面进行的，或仅是經過升起料层断面进行

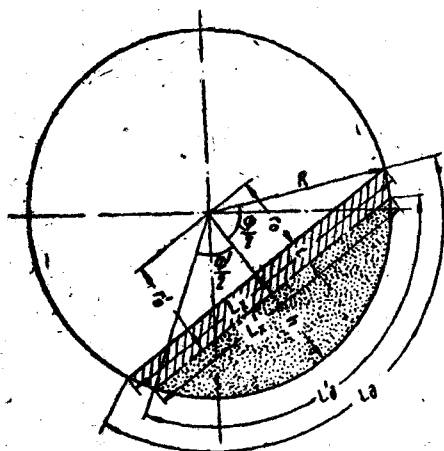


图 6 迴轉窑內物料层的升起和降落示意图

的。相对应的物料运动速度之間的关系如下式所示(图 6)：