

王启标等 编著

轮窑快速烧砖的理论与实践

建筑工程出版社

輪窯快速燒磚的理論和實踐

王啟標等 編著

、 建 筑 工 程 出 版 社 出 版

• 1959 •

輪窑快速燒磚的理論与实践

王启标等 編著

1959年12月第1版 1959年12月第1次印刷 1,560册

850×1168 $1/32$ • 166千字 • 印張 63/8 • 定价 (9) 0.77元

建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华書店发行 • 書号: 1783

建筑工程出版社出版 (北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

前 言

解放前，我国輪窯燒磚，產量低，每立方米容積月產量僅1000塊左右；煤耗高，每萬塊磚的煤耗量高達1.2~1.5噸以上，技術很落后。解放后，特別是1958年大躍進以來，在黨的領導下，吸取了蘇聯的先進經驗，使我國磚瓦焙燒技術得到了顯著提高。高產和低煤耗的新紀錄一個接一個地出現，輪窯每立方米容積月產量一般為2500塊，最高已達3500塊以上。每萬塊磚的耗煤量一般為0.8噸左右，最低已降至0.6噸以下，很多輪窯的生產指標已達到了世界先進水平。

我國磚瓦生產技術，吸取了蘇聯稀碼快燒先進經驗，打破了以往密碼慢燒的陳規，使我國制磚工業走上了新的道路。在此基礎上，我國各地制磚工作者又結合我國具體條件，不斷地改進碼窯形式，在稀碼的原則下，初步摸索到與設備條件、氣候條件相適應的碼窯密度，以減少氣體流動阻力加強窯內通風，並盡量改善燃料在坯垛斷面上分散的均勻程度，同時，還廣泛地推行了“小量勤添”的操作法，以適應強力通風和燃燒條件的變化；創造了加強坯子預熱的烘小灶、燒大灶等方法，以保證磚坯迅速燒成等經驗，這就不僅提高了輪窯生產率，而且大大降低了煤耗。

為了總結以上快速燒磚經驗，我局曾派王啟標同志到江蘇省利農磚瓦廠研究試點，在該廠領導和職工的支持和協助下，編成了“輪窯快速燒磚的理論和實踐”這本書。因系初次嘗試難免錯誤。我們不奢望同時也不可能通過它來闡明和解決輪窯焙燒技術的許多複雜的理論問題；我們僅僅希望通過這本書介紹輪窯作業的一般原理和實現快速燒磚的基本條件及其採取的一些措施，供我國制磚工作者參考，以方便於促進生產和更廣泛地開展羣眾性的科學研究工作，把我國制磚工業從實踐逐步提高到更高的理論水

平，生产更多、更好的磚来满足国家建設日益发展的需要。

本書由王启标、朱瑚两同志負責編写，利农磚瓦厂燒火班全体同志以及孙月高、赵璋等同志提供很多有益的資料。

本書不妥和錯誤之处，希讀者多多批評指正。

建筑工程部非金属矿及地方建筑材料工业管理局

1959年11月

目 录

前 言

第一章 輪審工作的理論基础 (1)

第一节 輪審內的气体运动 (2)

一、气体为什么会发生运动 (2)

二、气体运动的阻力 (3)

三、烟囱——使气体发生运动的装置 (21)

四、气体在輪審內流动的分析 (24)

第二节 燃料的燃燒 (29)

一、燃料燃燒的化学反应 (29)

二、完全燃燒和不完全燃燒 (30)

三、燃料完全燃燒所需要的空气量和烟气生成量 (30)

四、燃料完全燃燒的基本条件 (34)

五、燃料在輪審內燃燒的特点 (36)

第三节 傳热 (39)

一、傳导傳热 (40)

二、对流傳热 (41)

三、輻射傳热 (43)

第二章 影响輪審生产率的因素 (51)

第三章 实现快速燒磚的措施 (57)

第一节 輪審結構特点的分析 (58)

一、輪審的結構 (58)

二、輪審結構的分析 (59)

三、輪審的操作特点 (64)

第二节 加强通风 (64)

一、发挥烟囱的抽力作用 (65)

二、减少阻力 (83)

三、使用排风机增大審的通风能力 (85)

第三节 碼審 (87)

一、碼窖在焙燒制度中的重要性	(87)
二、鑑別碼窖形式的几个重要指标	(90)
三、确定碼窖制度的基本原则及碼窖形式的選擇	(93)
第四节 加强燃料的燃燒过程	(120)
一、燃料处理	(121)
二、小量勤添	(122)
三、分段投入不同的燃料	(126)
四、在坯球中散布燃料	(127)
五、在磚坯中掺入可燃物	(129)
六、适当提高燒成溫度	(130)
第五节 加强磚坯在輪窑內的干燥和預热过程	(130)
第四章 輪窑測定結果的分析	(146)
第一节 試驗密的工作制度和操作特点	(146)
第二节 輪窑內坯子干燥和預热过程的分析	(153)
第三节 輪窑內通风条件的分析	(162)
第四节 三种焙燒制度的热平衡分析	(169)
第五章 輪窑技术測定	(178)
第一节 窑內溫度的測量	(179)
第二节 窑內压力的測量	(182)
第三节 烟气成分的測定	(186)
第四节 坯子脫水速度的測定	(194)
第五节 坯子溫度及坯子水分的測定	(195)
第六节 出窑磚溫度的測定	(193)
参考書籍	(198)

第一章 輪窑工作的理論基础

磚的焙燒，是一個複雜的物理—化學過程。它是受熱作用的過程。

用輪窑燒磚，磚是按一定形式碼放在窑道內，并向火眼投入燃料進行焙燒的。燃料燃燒所產生的熱量不斷地傳給磚坯，而把磚坯燒成磚。燃料燃燒及其熱量傳送給磚坯，都需借助於氣體，因此，氣體在燒磚過程中起着重要作用。氣體的作用是这样：首先，從外界進入窑內的氣體（空氣）提供燃料燃燒所需的氧氣，以幫助燃燒；其次，氣體又以其自身作為熱交換的媒介，使磚坯焙燒獲得充分的熱作用。氣體的媒介作用是這樣的：當氣體（空氣）一入窑內，碰到已燒好的磚（這時磚的溫度比空氣的溫度高），磚將熱量傳給空氣（愈往窑里去，磚的溫度愈高，則傳給空氣的熱量愈多，空氣的溫度也因之愈高），空氣在窑內這一段起着冷卻磚和自身吸熱的作用，而使自身獲得很高的溫度。接着，高溫的空氣進入窑的焙燒帶（向火眼投煤的窑段），同投入的燃料相接觸而發生激烈的燃燒，氣體又吸收燃料放出的熱量而變成熾熱的火焰（空氣與煙氣混合物），用以燒結磚坯。火焰穿過焙燒帶之後，又與溫度較自身為低的磚坯相遇，而把熱量傳給磚坯，並降低自己的溫度（愈往前進，煙氣散失的熱量愈多，溫度就愈低），至最後，攜同坯子所蒸發的水蒸汽一道經由總烟道、烟囱排出窑外。氣體（煙氣）在窑內這一段起着自身放熱作用和加熱、燒結磚坯的作用。

由此可知，磚的焙燒是和氣體運動、燃料燃燒、傳熱等過程密切相關的。熱氣體在輪窑的窑道斷面上均勻地分布和流動，能使斷面上的溫度趨於均衡；氣體在窑內的運動速度和流量愈大，

則热交換效率愈高，單位時間內可能燃燒的燃料量也愈多，因而燃燒条件和傳热条件就愈为有利。所有这一切都影响到燃燒进度的快慢，以及生产率的高低和耗煤量的多少。因此，在研究輪審快速燒磚之前，首先要对气体运动，燃料燃燒以及傳热等过程有个概括的了解。

第一节 輪審內的气体运动

一、气体为什么会发生运动

大家都知道，气体不同于固体、液体，它对热的敏感性很大，温度有稍許增降，就会引起气体体积的变化，即温度增高，則气体体积脹大；反之，則体积縮小。所以气体具有热脹冷縮的特性。当气体在受热或冷却的同时，随着气体体积的变化，它的單位体积重量（又称重度）也发生变化：当受热时，气体的重度变小；当冷却时，气体的重度变大。

气体体积随温度变化的关系可用公式（1）表示：

$$V_t = V_0 \frac{273 + t}{273} \quad (1)$$

式中： V_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的气体体积，米³；

V_0 —— 0°C 时气体的体积，米³；

273——绝对温度， $^{\circ}\text{K}$ ，摄氏 0°C 等于绝对温度 273°K ；

t ——气体的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

气体重度随温度变化的关系可用公式（2）表示：

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{273}{273 + t} \quad (2)$$

式中： γ_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时气体的重度，公斤/米³；

γ_0 ——温度为 0°C 时气体的重度，公斤/米³；

t ——气体的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

我們也知道，气体和液体一样，是很容易流动的，只要受到

一点点外力的作用就会引起形状上的任意变化和发生运动。

由于气体有热胀冷缩，热时变轻，冷时变重和容易流动的特性，所以当气体的某一部份受热以后，由于体积膨胀而变轻，就有往上升的趋势，而在其周围的冷气体则较重，就发生下沉而欲填补上升热空气所留下的空间的趋势，这就是气体发生运动的根本原因。现将气体在窖内发生运动的情况举例说明如图1所示：

AB和CD是高度相等的两个烟囱，在D处用木柴生火，CD段内的气体因受热而变轻，而AB却充满了冷而重的空气，形成一边重一边轻，两下不平衡。于是，CD段内的热空气因轻而上升，而AB段内的冷空气则因重而下降，从B处向D处流动。这样就使气体发生运动。

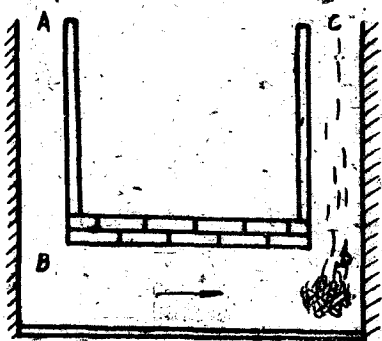


图1 热气体在窖内流动的情况

气体的运动由于作用力的性质不同而分为两

种：如上述因气体本身重度差而引起的气体运动叫做自然运动；因受外力作用而引起的气体运动叫做强制运动。

二、气体运动的阻力

气体运动时，由于它本身的分子互相碰撞而产生内摩擦阻力；特别是当通道面积改变或运动方向变更时，分子碰撞的机会愈多，内摩擦阻力就愈大。当气体与固体碰撞或接触时则产生外摩擦阻力；特别是当与粗糙的表面摩擦时，外摩擦阻力就愈大。气体在运动途中需要克服一切阻力才能维持运动状态，气体为克服阻力所消耗的能量叫做阻力压头损失。

在气体力学中，通常用压力或压头来表示气体的能量。

压力是用公斤/厘米²、大气压等单位来表示。

压头是用液柱高度(毫米)来表示。

1 大气压 = 760 毫米水银柱 = $1033 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10330 \text{ 毫米水柱}$ 。

为了计算方便起见, 往往用压头(即毫米水柱高度)表示气体的能量。

气体的压头一共有四种: 即几何压头, 静压头, 动压头和阻力损失压头。

(1) 几何压头:

所谓几何压头就是处在冷空气包围之中的热气体所具有向上浮起的浮力。这一浮力的大小可以应用阿基米德原理来计算。这一原理是: 任何物体浸在水中, 都将失去其全部或部分重量, 其失重数值等于它所排开的水的重量。也就是说, 物体的下沉力等于物体本身的重量减去所排开的水的重量。对于热气体来说, 它是要向上浮的, 它的浮力就等于它上升时所排开的冷空气重量减去热气体本身的重量。现举例说明如下:

设有一容器, 高为 H 公尺, 截面积为 1 平方公尺, 下面开口, 其中充满了温度为 t °C 之热气体, 其重度为 γ_t ; 四周是 0°C 的冷空气, 其重度为 γ_0 。

则: 热气体排开的冷空气重量 = $H \times 1 \times \gamma_0$

热气体本身的重量 = $H \times 1 \times \gamma_t$

所以热气体在单位面积上的浮力(几何压头)等于:

$$h_{\text{几}} = H(\gamma_0 - \gamma_t) \text{ 公斤/平方公尺或毫米水柱} \quad (3)$$

应该注意, 所谓几何压头是指在某一水平面下某一点对该平面来说的, 如图 2 所示: 图中容器内充满重度为 γ_0 的空气, 则在 $A \sim A$ 平面上的 A 点来说, 对 $C \sim C$ 平面所具的压头是 $H(\gamma_0 - \gamma_t)$, 而在 $B \sim B$ 平面上的 B 点来说, 对 $C \sim C$ 平面所具有的几何压头是 $H_1(\gamma_0 - \gamma_t)$ 。显然, 对 $C \sim C$ 平面来说, B 点的几何压头比 A 点减少了, 关于这一点在下面再讨论。

另外, 还有一点应该注意的, 几何压头只能通过计算方法来求得而不能用仪器来测量。

(2) 静压头:

窑内的气体压力与窑外大气压力之差叫做静压头。在自然流动中,静压头是由几何压头转变而来的,也就是气体受下面热气柱的上升压力;在强制流动中,静压头是由通风机产生的。静压头是使气体发生运动的能力指标。静压头可以用压力计来测定,见图3, U形压力计中装有带颜色的水,一端与大气相通,另一端与管道垂直相接。从压力计测出的高度 h , 就是静压头。

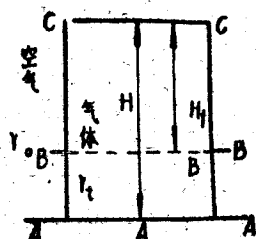


图2 气体的几何压头

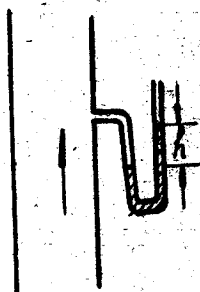


图3 气体的静压头

窑内气体压力大于大气压力时,则静压头为正值(正压);当窑内外压力相等时,静压为0;当窑内气体压力小于大气压力时,则静压头为负值(负压),也就是我们通常所说的抽力。

前面说过在自然运动中,静压头是由几何压头转变而来的,关于这一转变过程可用下面的图解来分析说明:如图4,在底下开口的容器内盛满重度为 γ 的热气体,周围是冷空气(重度为 γ_0),这时在容器内不同高度的A、B、C三点上各具有什么压头呢?先看点A,它在容器的底部与大气相通,这时它的压力等于大气压力,我们在这里用压力计量不出有静压头,也就是说A点的静压头为零($P_{静} = 0$)。但是它对C点的水平面来

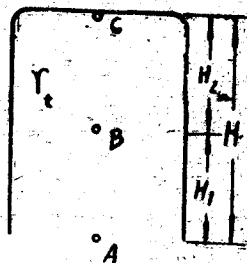


图4 几何压头转变为静压头的图解

說則具有上升的浮力（几何压头），它的大小为：

$$P_A^{\text{浮}} = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

所以在 A 点上的总压头为：

$$P_A^{\text{总}} = P_A^{\text{静}} + P_A^{\text{浮}} = 0 + H(\gamma_0 - \gamma_t) = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

再看点 B，B 点位于容器的中部，它受着下面 AB 热气柱的上升压力，所以从 B 点的平面上用压力计可以量出有静压头，它的大小为： $P_B^{\text{静}} = H_1(\gamma_0 - \gamma_t)$ ；同时 B 点对 C 点來說它又具有上升的浮力，它的大小为： $P_B^{\text{浮}} = H_2(\gamma_0 - \gamma_t)$ 。因此，B 点上的总压头为：

$$\begin{aligned} P_B^{\text{总}} &= P_B^{\text{静}} + P_B^{\text{浮}} = H_1(\gamma_0 - \gamma_t) + H_2(\gamma_0 - \gamma_t) \\ &= (H_1 + H_2)(\gamma_0 - \gamma_t) = H(\gamma_0 - \gamma_t) \end{aligned}$$

C 点位于容器的最高部位，它对于本身所处的水平面來說，几何压头为零，即 $P_C^{\text{浮}} = 0$ ；但它受到下面整个热气柱（AC）的上升压力，它具有的静压头为： $P_C^{\text{静}} = H(\gamma_0 - \gamma_t)$ 。因此，C 点上的总压头为：

$$P_C^{\text{总}} = P_C^{\text{浮}} + P_C^{\text{静}} = H(\gamma_0 - \gamma_t) + 0 = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

从分析以上三点的压头变化中，我們得出很重要的結論：

A. 尽管 A、B、C 三点在容器內所处的位置不同，但它們所具有的总压头是相等的，即：

$$P_A^{\text{总}} = P_B^{\text{总}} = P_C^{\text{总}} = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

B. 虽然它們的总压头相等，但是由于所处的位置不同而所具有的几何压头和静压头的大小是不同的。对于一定的水平面來說，它所处的位置愈低，所具有的几何压头愈大，而静压头則愈小；随着位置的愈向上，則几何压头愈减小，而静压头則愈增大。

C. 由于热气体有上升的趋势，故几何压头可轉变为静压

头，但热气体没有下降的趋势，所以静压头不能转变为几何压头。

(3) 动压头:

这是由于气体运动时产生的压力，静止的气体是没有动压头的。气体的运动速度和它的重度愈大，则产生的动压头也就愈大。动压头是表示气体的动能，它可用下式来计算:

$$P_{\text{动}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{\gamma v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: m ——气体的质量, 等于 $\frac{\gamma v}{g}$;

v ——气体的运动速度, 米/秒;

γ ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时气体的重度, 公斤/立方米;

g ——重力加速度, 等于 9.81 公尺/秒²。

气体的动压头可以用示差压力计(毕特管)来测量(见图5)。在A点处测得的是静压与动压的总和, 在B点处测得的是静压, 所以A、B两点的压力差(U形压力计表示的液面差 h)就等于动压值。

气体的动压是由静压转变而来的, 同时动压又可转变为静压, 它们的互换关系可用图6来说明。

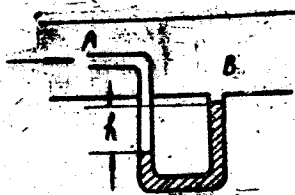


图5 气体的动压

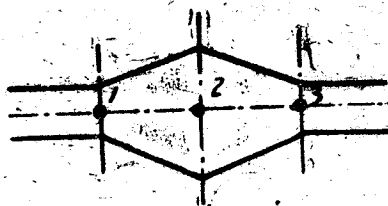


图6 静压和动压的互换

设有体积为 V 的气体在图6中的管道内流动。1、2、3点处的管道断面积各为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 其中 $F_1 = F_3$, $F_2 > F_1$ 和 F_3 。通过各个断面的流速分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 。当体积 V 不变时, 我们得到:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = F_3 v_3 = V$$

因为 $F_2 > F_1 = F_3$

所以 $v_2 < v_1 = v_3$

假设气体通过管道时没有摩擦压头损失；又由于 1、2 和 3 三点在同一水平面上，因此它们对任何一个水平面来说，所具有的几何压头都是相同的，即 $P_1^L = P_2^L = P_3^L$ ；1、2 和 3 三点的静压分别为 $P_1^{\text{静}}$ 、 $P_2^{\text{静}}$ 和 $P_3^{\text{静}}$ ；它们的动压头是：

$$P_1^{\text{动}} = \frac{\gamma v_1^2}{2g}, \quad P_2^{\text{动}} = \frac{\gamma v_2^2}{2g} \text{ 和 } P_3^{\text{动}} = \frac{\gamma v_3^2}{2g}$$

因为 1、2 和 3 三点的总压头是相等的，所以：

$$P_1^L + P_1^{\text{静}} + \frac{\gamma v_1^2}{2g} = P_2^L + P_2^{\text{静}} + \frac{\gamma v_2^2}{2g} = P_3^L + P_3^{\text{静}} + \frac{\gamma v_3^2}{2g}$$

因 $P_1^L = P_2^L = P_3^L$

故 $P_1^{\text{静}} + \frac{\gamma v_1^2}{2g} = P_2^{\text{静}} + \frac{\gamma v_2^2}{2g} = P_3^{\text{静}} + \frac{\gamma v_3^2}{2g}$

因为 $v_2 < v_1 = v_3$ 即 $\frac{\gamma v_2^2}{2g} < \frac{\gamma v_1^2}{2g} = \frac{\gamma v_3^2}{2g}$

所以 $P_2^{\text{静}} > P_1^{\text{静}} = P_3^{\text{静}}$

可以看出：气体从点 1 流向点 2 时，动压减小，而静压增加；再由点 2 流向点 3 时，动压又逐渐增加，而静压减小。因此，可以得出结论：气体在流动过程中，它的动压和静压是互相转换的。

(4) 阻力损失压头：

这是指气体运动消耗在各种阻力上的压头损失，压头损失是气体动能的消耗，所以压头损失的数值是用动压头的倍数来计算，其单位则用毫米水柱来表示。

气体在运动途中所遇到的阻力按其形式可分为两种：由于气体与其接触物体的表面摩擦而产生的阻力叫做摩擦阻力；由于气体运动方向的改变，或通过不同断面时，其气体流股发生收缩或

擴張，以及气体同物体碰撞而形成渦流……等等所产生的阻力叫做局部阻力。

用以克服摩擦阻力而消耗的压头可用下式計算：

$$h_{\text{摩}} = \mu \frac{L}{d} \times \frac{\gamma_t v_t^2}{2g} \quad (5)$$

式中： μ ——摩擦阻力系数，它的大小取决于接触物表面的粗糙程度，就磚砌筑物的表面來說，其摩擦阻力系数通常为0.05；

L ——管道的長度，米；

v_t ——温度为 t °C 时气体的运动速度，米/秒；

γ_t ——气体在 t °C 时的重度，公斤/立方米；

g ——重力加速度，等于9.81米/秒²；

d ——当量直徑，米； $d = \frac{4 \times \text{通道断面积}}{\text{通道周边長}}$ 。

用以克服局部阻力而消耗的压头可用下式來計算：

$$h_{\text{局}} = k \frac{\gamma_t v_t^2}{2g} \quad (6)$$

式中： γ_t ——气体在 t °C 时的重度，公斤/立方米；

v_t ——温度为 t °C 时气体的运动速度，米/秒；

g ——重力加速度，等于9.81米/秒²；

k ——局部阻力系数，通常通过实验求得。

綜合以上所述，气体运动的几种压头的互相关系可以概括如下：几何压头只能轉变为静压头，是不可逆的；静压头与动压头则可以互相轉变；而只有动压头变成压头损失。四者間的互換关系可用图7来表示。其次，气体在窖內作稳定流动时，任何一窖段內的气体均保持其四种压头的总和不变，而只有压头的轉换，即：

$$P_{\text{几}} + P_{\text{静}} + P_{\text{动}} + P_{\text{損}} = P_{\text{总}} = \text{常数} \quad (7)$$

式中任一压头有所增長，則必定有另

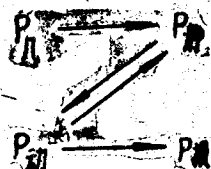


图7
压头的互相关系

一压头在减少，而总压头 P_{Σ} 总不变。

在輪窑燒磚过程中，气体在运动途中遇到的阻力有：气体在窑道内运动时与窑壁摩擦而产生的摩擦阻力；气体一进入窑内就与磚坯碰撞，从很多連續的或不連續的孔洞中通过，与磚面摩擦并形成渦流，給以气体很大的阻力，坯垛碼得愈密、坯垛愈長，則阻力愈大；气体經過弯窑时因运动方向改变而发生局部阻力；气体从很大的窑道断面进入狹窄的哈风洞并通过风閘进入总烟道，最后流經烟囱排出窑外，在这一段路程中，气体流股因发生縮小、扩张和轉弯而形成局部阻力，同时，又与通道壁摩擦而产生摩擦阻力等等。在所有这些阻力中，一部分阻力如与窑壁的摩擦阻力，以及气体通过弯窑、哈风洞、风閘、烟道等所形成的局部阻力均取决于輪窑的结构，就固定结构的窑來說，若气体在單位時間內的流量为一定时，則其对气体的阻力是不变的，阻力的大小是不能通过人为的努力来改变的；另一部分阻力則与操作有关，是可以人为地加以改变的，例如因坯垛碼放不当就会增大气体的阻力，这一部分阻力是可以通过調整碼窑密度和改进碼窑形式来減小的。在快速燒磚的討論中，因为窑体结构对气体阻力的关系不大（應該說这一部分阻力对燒磚的进度是有影响的，但本書不涉及到窑爐的结构問題），所以不作詳細的討論。这里仅討論影响快速燒磚最大的坯垛阻力問題。

碼窑是焙燒前的一道重要工序。碼窑形式的好坏直接影响磚的焙燒进度，所以研究快速燒磚必須研究碼窑形式。輪窑燒磚，通常是將生坯按一定的形式和要求，順次地碼放在窑的断面上而使之成多孔洞的連續坯垛，空气从这些坯垛孔洞通入窑內以供給燃料燃燒所需的氧。空气通过坯垛大大小小的孔洞时：一方面与坯子表面摩擦；另一方面又和坯子碰撞，因而发生气流的扩张和收縮。所有这一切都要消耗气体的动能，阻力愈大則消耗的动能愈多。在这一情况下就要加大气体通过坯垛的力量，就是說要加大窑的抽力才能使窑內气体保持一定的运动速度。当烟囱的有效抽力为一定时，若坯垛对气体的流动阻力愈大，則进入窑內的空气