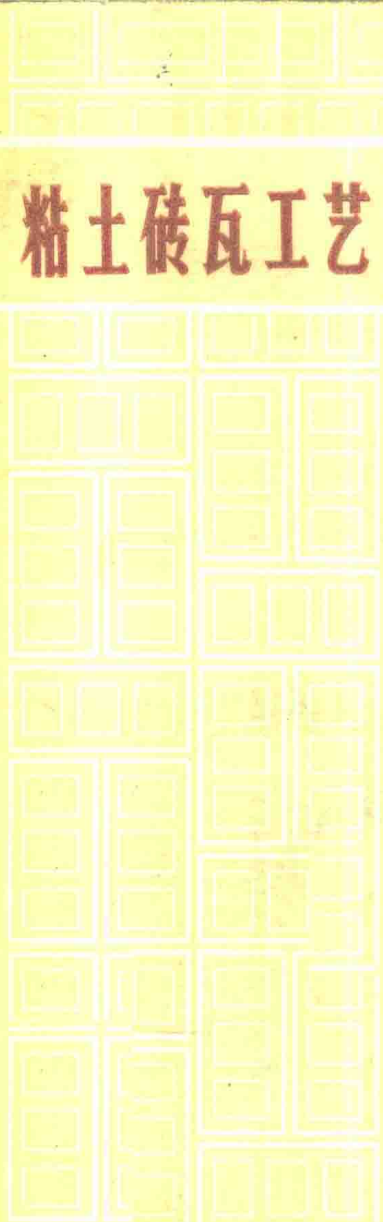




粘土砖瓦工艺

焙 烧

中国建筑工业出版社

粘 土 砖 瓦 工 艺

焙 烧

陕 西 省 砖 瓦 研 究 所

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

本书为《粘土砖瓦工艺》的一个分册，这一套书还包括《原料》、《成型》、《干燥》、《检验》等四个分册。

本书介绍粘土砖瓦焙烧的热工知识（包括气体的运动、燃料的燃烧和传热），叙述轮窑和隧道窑的结构、原理、附属设备和工艺指标，砖瓦坯的码放原理和方法，轮窑和隧道窑的点火、操作和熄火，以及反常焙烧操作的矫正和砖瓦缺陷的消除。本书可供粘土砖瓦厂职工，特别是焙烧工阅读，也可供其它烧结砖瓦厂有关人员参考。

本书由陕西省砖瓦研究所编写，殷念祖、余创成、金以镁执笔，集体讨论；陕西省实验砖瓦厂、北京市墙体材料工业公司和北京市建筑材料科学研究所审阅。

粘土砖瓦工艺 焙 烧 陕西省砖瓦研究所

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本，787×1092毫米 1/32 印张，5 5/16 字数，115千字

1975年8月第一版 1975年8月第一次印刷

印数：1—17,530册 定价，0.35元

统一书号：15040·3235

毛主席语录

独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国。

要把一个落后的农业的中国改变成为一个先进的工业化的中国，我们面前的工作是很艰苦的，我们的经验是很不够的。因此，必须善于学习。

目 录

第一章 焙烧热工知识	1
第一节 窑内气体的运动	1
一、气体发生运动的原因	1
二、气体在窑内的运动	5
三、坯垛中孔道对气流的阻力	8
四、排烟设备的作用	15
第二节 燃料的燃烧	17
一、基本概念	17
二、烧砖用的燃料	22
三、影响碳燃烧的因素	27
第三节 传热	32
第二章 砖瓦工业窑	35
第一节 概述	35
第二节 轮窑	36
一、轮窑结构和焙烧原理	36
二、轮窑余热利用	40
三、轮窑工艺计算	43
第三节 隧道窑	45
一、隧道窑结构和焙烧原理	46
二、隧道窑机械装备	59
第四节 窑的工作指标	70
第三章 码窑	73
第一节 概述	73
一、码窑对窑内通风量的影响	73

二、合理码窑保证窑焙烧道断面气流分配比例·····	74
三、码窑对窑内燃料量分布的影响·····	75
第二节 码窑的一般原理·····	75
一、坯垛的几个重要指标·····	75
二、合理码窑的鉴别·····	80
第三节 砖的一般码法·····	83
一、码窑密度·····	83
二、码窑形式·····	88
三、几个厂的坯垛举例·····	99
第四节 瓦在轮窑中的码放·····	110
第四章 焙烧·····	112
第一节 砖瓦在轮窑中的焙烧·····	112
一、点火·····	112
二、外燃砖的焙烧操作·····	114
三、内燃砖的焙烧操作·····	126
四、熄火·····	133
第二节 砖瓦在隧道窑中的焙烧·····	134
一、投产前的准备·····	134
二、窑车上的码坯和点火·····	136
三、焙烧制度的控制·····	137
四、熄火·····	146
第三节 反常焙烧操作的矫正和砖瓦缺陷的消除·····	146
一、反常焙烧操作的矫正·····	146
二、砖瓦缺陷的消除·····	149
第四节 砖瓦焙烧过程的变化·····	151
一、粘土的加热过程·····	152
二、砖瓦的形成·····	153
三、焙烧对砖瓦物理力学性能的影响·····	155
四、砖瓦的颜色、黑心、起霜及起泡·····	160

第一章 焙烧热工知识

砖瓦的焙烧，是一个复杂的物理化学过程。

砖瓦的焙烧，即是将砖瓦坯按一定形式码放在窑内，依靠燃料燃烧产生的热把砖瓦坯烧成砖瓦的过程。燃料燃烧及其将热传给砖瓦坯，都需要借助气体，因此，气体在焙烧过程中起着重要的作用。我们在研究砖瓦的焙烧之前，首先应对气体的运动，燃料的燃烧，传热过程等，有一初略的了解。

第一节 窑内气体的运动

气体在窑内流动的速度、流动的方向、压力和温度分布，都影响坯体焙烧的热交换过程及燃料的燃烧过程。因此，必须对气体在窑内的流动情况进行分析研究。

一、气体发生运动的原因

气体的体积对热很敏感，当温度稍有变化时，就会引起体积的变化。温度升高，体积膨胀；温度降低，体积缩小。随着体积的变化，气体的重度（即单位体积气体的重量）也变化。温度愈高，重度愈小；温度愈低，重度愈大。在一定压力下，气体的体积与绝对温度成正比，气体的重度与绝对温度成反比。气体的体积和气体的重度随温度的变化可用公式（1-1）、（1-2）表示：

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

$$\gamma_t = \gamma_0 \left(\frac{273}{273+t} \right) \quad (1-2)$$

式中 V_t 、 γ_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时，气体的体积（米³）及重度（公斤/米³）；

V_0 、 γ_0 ——温度为 0°C 时，气体的体积（米³）及重度（公斤/米³）；

t ——气体的温度（ $^\circ\text{C}$ ）；

$\frac{1}{273}$ ——气体体积膨胀的温度系数。

气体是很容易流动的，当气体受到外力作用时，就会发生运动。因为气体有热胀冷缩及容易流动的特性，所以当一部分气体受热以后，体积膨胀而变轻，就有一个上升的趋势，而周围比它重的较冷的气体就有下沉补充上升热空气留下的空间的趋势。这就是气体受热发生运动的原因。这种运动叫做自然运动。气体在应用烟囱排烟的轮窑中的运动即属自然运动。另外，由于外力作用可使气体发生运动，这种运动叫做强制运动。气体在应用排烟机和窑尾送风机的隧道窑中的运动即属强制运动。

为了便于分析气体在窑内的运动，先简要介绍一下气体运动能量。气体运动的能量，通常用压头来表示，压头的单位是液柱高度（如毫米水柱）。

气体的压头共有四种：几何压头、静压头、动压头和阻力损失压头。

1. 几何压头 当某处气体的重度和周围气体的重度不同时，该处气体就受一个上升（重度小于周围气体的重度时）或下降（重度大于周围气体的重度时）的力。此时该气体就具有几何压头。

由于气体重度不同而引起的上升或下降的力的大小，可以用阿基米德定律来计算。阿基米德定律是，浸在水中的任何物体都将失去其部分或全部重量，失重的数值等于它排开水的重量。热气体比周围气体轻，所以它具有上升的力；冷气体比周围气体重，所以它具有下沉的力，力的大小就等于它排开周围气体的重量减去它本身的重量。

例如：有一容器高为 H 米，截面为1平方米，下面开口，里面盛有 $t^{\circ}\text{C}$ 的热气体，其重度为 γ_t ，周围是 0°C 的冷空气，其重度为 γ_0 。(图1-1)，则热气体排开冷空气的重量为：

$$H \times 1 \times \gamma_0$$

热气体本身的重量为：

$$H \times 1 \times \gamma_t$$

所以在 $A-A$ 截面上的热气体对 $B-B$ 截面具有的几何压头为

$$P_{\text{几}} = H(\gamma_0 - \gamma_t) \text{ (毫米水柱)} \quad (1-3)$$

应该注意，几何压头是指某一水平面下某点对该平面来说的。如图1-1所示 $C-C$ 截面上热气体对 $B-B$ 截面的几何压头为：

$$P_{\text{几}} = H_1(\gamma_0 - \gamma_t)$$

几何压头是用计算方法求得。

2. 静压头 窑内气体压力与窑外大气压力之差叫做静压头。

静压头是使气体发生运动能力大小的指标。

当窑内气体压力大于大气压力时叫做正压。焙烧带的后部返火即说明窑内气体内正压。当窑内气体压力小于大气压

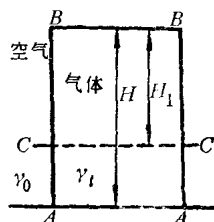


图 1-1 气体的几何压头

力时叫做负压，即我们通常说的抽力。当窑内外压力相等时，静压为零。

静压头是没有方向的。

在自然流动中，静压头是由几何压头转变来的，在强制流动中，静压头是由通风机产生的。

静压头可以用仪器来测定（图 1-2）。U 形压力计一端与管道相通，一端与大气相通，压力计的读数 h 就是静压头。

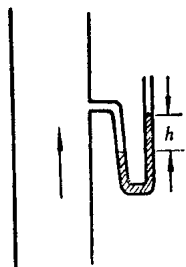


图 1-2 气体的静压头的测定

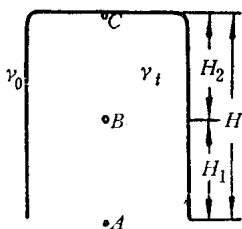


图 1-3 气体的静压头

例如，底下开口的容器内盛满重度为 γ_t 的热气体，周围是冷空气，重度为 γ_0 （图 1-3）。其中 A、B、C 三点的静压头为：

A 点：因为容器与大气相通，所以 A 点的静压为零。

B 点：受 AB 气柱上升的压力，所以 B 点的静压头为

$$P_{\text{静}B} = H_1(\gamma_0 - \gamma_t) \text{ (毫米水柱)} \quad (1-4)$$

C 点：位于容器的最高处，受 AC 气柱上升的压力，所以 C 点的静压头为

$$P_{\text{静}C} = H(\gamma_0 - \gamma_t) \text{ (毫米水柱)} \quad (1-5)$$

3. 动压头 由于气体运动而具有的压力叫做动压头。静止的气体是没有动压头的。气体运动的速度及重度愈大，则

具有的动压头也越大。动压头是气体动能大小的度量。

$$P_{\text{动}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{\gamma_t v^2}{2g} \quad (\text{毫米水柱}) \quad (1-6)$$

式中 m ——气体的质量(等于 $\frac{\gamma_t}{g}$);

v ——气体的运动速度(米/秒);

γ_t ——温度 $t^\circ\text{C}$ 时气体的重度(公斤/米³);

g ——重力加速度(9.81米/秒²)。

气体动压的方向是气体运动的方向。动压没有负值。

气体的动压可用毕托管(示差压力计)来测得(图1-4)。

A 点测得的是全压(动压与静压之和), B 点测得的是静压。 A 点与 B 点的压力差 h 即为动压。

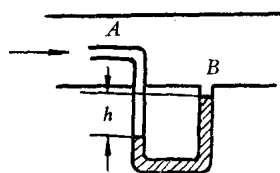


图 1-4 气体动压的测定

动压与静压是可以相互转换的。

4. 阻力损失压头 这是指气体运动消耗在各种阻力上损失的压头。压头损失消耗气体的动能, 所以压头损失以动压头的倍数来表示。

二、气体在窑内的运动

气体在窑内的运动是比较复杂的。在烟囱(或通风机)和干燥室抽取余热的送风机的作用下, 进入窑内的冷空气首先与烧好的砖垛接触而被加热, 在焙烧带参加燃烧反应, 最后又与坯垛接触而被冷却, 其温度不断变化, 同时又被窑内的坯垛所阻挡。所以在窑内各带气体的运动方向是不一致的。

气体在水平窑道里的流动是由外力引起的。主要是依靠烟囱(或通风机), 干燥室抽取余热的送风机也有一定的作

用。外力的作用主要是使气体具有一定的流向及流速，另外要克服窑道中坯垛的阻力及气体受热后产生的上升力。

冷空气进入窑内，气体的温度不断升高，气体具有的上升力也增加。

例如：15°C的气体进入窑内，在冷却带末端气体温度为80°C，窑顶部气体具有的上升力即静压为（设窑高3米）：

$$P_{\text{静}} = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

$$\gamma_0 = 1.293 \times \frac{273}{273 + 15} = 1.223 (\text{公斤/立方米})$$

$$\gamma_t = 1.293 \times \frac{273}{273 + 80} = 1.000 (\text{公斤/立方米})$$

$$\text{则 } P_{\text{静}} = 3 \times (1.223 - 1) = 0.669 (\text{毫米水柱})$$

当气体进入焙烧带时，它的平均温度为950°C，窑顶气体具有的上升力为

$$P_{\text{静}} = H(\gamma_0 - \gamma_t)$$

$$\gamma_0 = 1.293 \times \frac{273}{273 + 15} = 1.223 (\text{公斤/立方米})$$

$$\gamma_A = 1.293 \times \frac{273}{273 + 950} = 0.4 (\text{公斤/立方米})$$

$$P_{\text{静}} = 3(1.223 - 0.4) = 2.45 (\text{毫米水柱})$$

由此可见，温度越高、窑越高，窑顶具有的静压也越大，也就是气体具有的上升力越大。窑内气体上升力情况见图1-5。窑内气体是水平方向运动的，因此这个上升力是窑内气体运动的阻力。

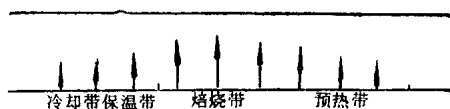


图 1-5 窑内各带上升力情况

气体通过窑道时，与坯垛碰撞产生阻力。对一定码法的坯垛来说，通过的距离越长，阻力越大。不同码法的坯垛，具有不同的阻力。

烟囱（或通风机）是通过哈风口对气体发生作用的。哈风口一般在窑的外墙或里墙的最下面，因此哈风口的抽力是使气体向下倾斜运动的。当哈风闸的高度一定时，抽力越靠近哈风口越大，气体向下倾斜运动的角度就越大。哈风闸提得越高，抽力越大，气体向下倾斜运动的角度也越大，同时通过该哈风的气体流量也增加（图1-6）。

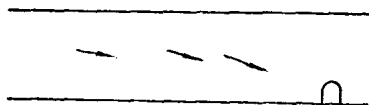


图 1-6 哈风对窑内气体作用力示意图

当抽取余热的送风机工作时，由于余热管道铺设在窑券顶部，所以它对气体的抽力是向上的（图1-7）。一般余热闸在焙烧带后部提起。如果使用烟闸抽取烟热时，则它的作用与哈风闸对气体的作用相似。一般抽取烟热仅用门前闸及第二闸。

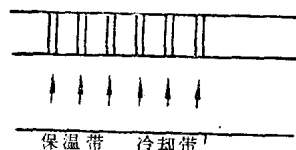


图 1-7 抽余热对窑内气体作用力示意图

综上所述，气体在窑道内运动时，在保温带、冷却带离提起的哈风闸越远，哈风闸的影响越小；气体温度较低，其上升力也较小，但由于抽取余热送风机的作用，使气体的运动方向是向上的，部分空气被风机由余热道抽往干燥室，部分空气流往焙烧带。在焙烧带，由于温度高，热气体的上升力较大，又因距哈风闸较近，所以哈风闸的影响也较大，使气体向下倾斜运动，表现为焙烧带后部返火，前部不返火。

在预热带，温度较低，热气体上升力不大，而距哈风闸较近，故气体向下倾斜运动。各带气体运动情况见图1-8。

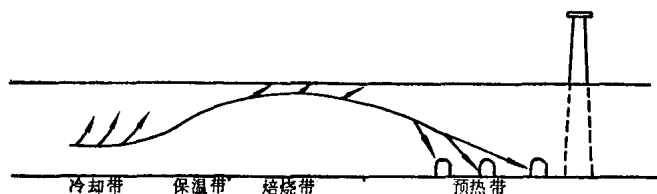


图 1-8 窑内各带气体运动情况

三、坯垛中孔道对气流的阻力

气体在窑内遇到的阻力基本上可分为两种：由于气体与接触物表面摩擦及气体内摩擦而产生的阻力叫摩擦阻力，例如烟气在直烟道内流动所受到的阻力。由于气体运动方向或速度发生变化所产生的阻力叫做局部阻力。产生局部阻力的原因是在气流中形成消耗能量的涡流。例如烟道转弯、气体流经轮窑的弯窑、气体通过哈风闸发生流通断面的变化、气体在窑道内与坯垛碰撞等产生的阻力。

砖瓦在轮窑和隧道窑中焙烧时，都需要码成一定式样的坯垛。因为砖瓦的焙烧工艺是在坯垛中完成的，所以坯垛的热工性能（如空气动力阻力、密度、有效断面空隙率等等）对砖瓦焙烧影响极大。而坯垛又是由各式各样的孔道组成的，为了进一步研究坯垛空气动力阻力（见第三章）的需要，让我们先来观察一下坯垛中孔道的阻力。

实验证明，气体通过各种孔道时，可用下式同时求出其摩擦阻力与局部阻力之和：

$$\Delta H = av^2 l \quad (\text{毫米水柱}) \quad (1-7)$$

式中 ΔH ——该孔道的阻力损失（毫米水柱）；

a ——孔道的阻力系数，即气体通过孔道的速度为
1 米/秒时，每 1 米孔道长度的压头损失；

l ——孔道的长度（米）；

v ——气体通过孔道的速度（米/秒）。

下面分别介绍关于气体通过各类型孔道的阻力系数。

（1）周壁无格孔的直形孔道：根据实验证明，在 0°C 时，气体通过无格孔的直形孔道的阻力系数 a_0 与孔道的当量直径 d ①（以毫米为单位）有如下关系：

$$a_0 = \frac{1}{0.025 \times d^{1.5}} \quad (1-8)$$

根据式（1-8）计算出 a_0 与 d 的关系如表1-1所列。

（2）具有格子状围绕表面的孔道：在轮窑和隧道窑中，砖坯垛的大多数孔道是具格子状周壁的。格子状周壁孔道的阻力特点如下：

1）格子型孔道周壁与实周壁相比，一方面由于前者摩擦面积的减少而减小摩擦阻力；另一方面，由于在格子空间中产生涡流而增加局部阻力。格子越稀，涡流越大。

2）格子状孔道阻力的增长，基本上不取决于这些孔道的当量直径，仅取决于格子的密度。格子越稀，阻力增长越大。图1-9示出一面有稀格子和一面有密格子的孔道。图1-10示出二面有格子的孔道。图1-11示出三面有格子的孔道（照片中间的大孔道）。图1-12示出四面有格子的孔道（照片中间的孔道）。

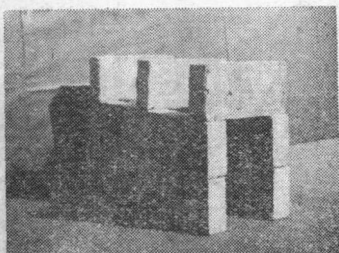
3）当孔道是由空心砖形成格子状周壁时，空气动力阻力系数大大增长。这是因为在制品间涡流与通过孔洞的空气相碰撞（图1-13）。

① $d = \frac{4F}{U}$ ， F 是孔道断面积， U 是孔道湿周。

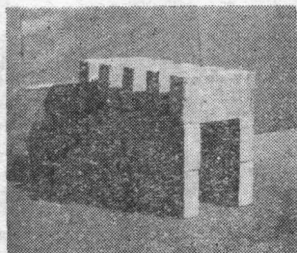
按式 $\alpha_0 = \frac{1}{0.025d^{1.5}}$ 计算的 α_0 与 d 的数值, d 的单位为毫米

表 1-1

d	α_0	d	α_0	d	α_0	d	α_0
12	0.963	37	0.178	80	0.0559	185	0.0159
13	0.853	38	0.171	82	0.0539	190	0.0153
14	0.764	39	0.164	85	0.0510	195	0.0147
15	0.688	40	0.158	87	0.0493	200	0.0141
16	0.625	41	0.152	90	0.0469	210	0.0132
17	0.571	42	0.147	92	0.0453	220	0.0123
18	0.524	43	0.141	95	0.0432	230	0.0115
19	0.483	44	0.137	97	0.0419	240	0.0108
20	0.450	45	0.133	100	0.0400	250	0.0101
21	0.416	46	0.128	105	0.0370	260	0.00954
22	0.388	47	0.124	110	0.0347	270	0.00902
23	0.362	48	0.120	115	0.0325	280	0.00854
24	0.339	49	0.117	120	0.0304	290	0.00810
25	0.320	50	0.113	125	0.0278	300	0.00770
26	0.302	52	0.107	130	0.0270	320	0.00690
27	0.285	55	0.0980	135	0.0255	340	0.00638
28	0.270	57	0.0929	140	0.0241	360	0.00586
29	0.256	60	0.0861	145	0.0229	380	0.00540
30	0.243	62	0.0819	150	0.0217	400	0.00500
31	0.231	65	0.0763	155	0.0207	420	0.00465
32	0.224	67	0.0727	160	0.0198	440	0.00433
33	0.211	70	0.0683	165	0.0189	460	0.00406
34	0.202	72	0.0655	170	0.0181	480	0.00380
35	0.193	75	0.0616	175	0.0173	500	0.00359
36	0.185	77	0.0592	180	0.0166		

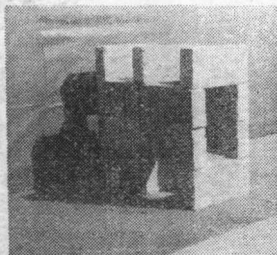


a. 稀格子

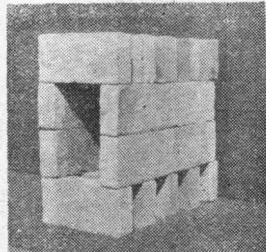


b. 密格子

图 1-9 一面有格子的孔道

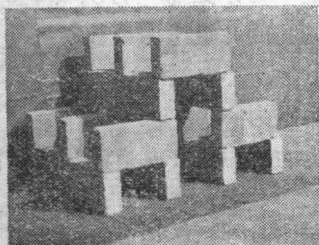


a. 稀格子

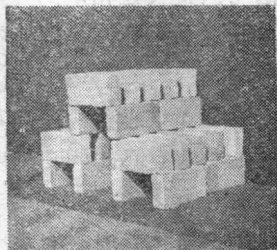


b. 密格子

图 1-10 二面有格子的孔道



a. 稀格子



b. 密格子

图 1-11 三面有格子的孔道