



粘土砖瓦工艺

干燥



中国建筑工业出版社

粘土砖瓦工艺

干 燥

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》、《焙烧》、《检验》等四个分册。

本书介绍粘土砖瓦坯干燥的基本原理，包括空气干燥性能、坯体水分及其在干燥过程中的移动、坯体干燥过程；叙述砖瓦坯的自然干燥和人工干燥，着重介绍干燥室结构类型及主要尺寸的确定、干燥室热源及通风设备、干燥制度的确定、实现快速干燥的条件和方法，干燥裂纹产生原因及其消除方法等。本书可供烧砖瓦厂工人、技术人员和管理干部，特别是干燥工阅读参考。

本书由陕西省砖瓦研究所编写，单维升、苏国淮、李思梅执笔，集体讨论；陕西省实验砖瓦厂和北京市墙体材料工业公司提出了审阅意见。

粘土砖瓦工艺 干 燥 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：6 插页 1 字数：131 千字

1977年2月第一版 1977年2月第一次印刷

印数：1—15,330册 定价：0.42元

统一书号：15040·3340

毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否
是决定一切的。

人们为着要在自然界里得到自由，
就要用自然科学来了解自然，
克服自然和改造自然，从自然里得
到自由。

目 录

第一章 干燥基本原理	1
第一节 空气的干燥性能	2
第二节 坯体水分	11
第三节 坯体内水分在干燥过程中的移动	16
第四节 坯体干燥过程	21
第二章 自然干燥	37
第一节 实心制品的干燥	41
第二节 空心制品的干燥	50
第三节 瓦坯的干燥	55
第四节 干燥缺陷产生的原因及消除方法	58
第三章 人工干燥室及其设备	64
第一节 干燥室类型及主要尺寸	61
第二节 干燥室热源	72
第三节 干燥室通风设备	79
第四节 干燥室的附属设备	112
第四章 人工干燥制度的选择	113
第一节 干燥制度的确定	118
第二节 湿空气 I-d 图	134
第五章 人工干燥的操作与生产控制	157
第一节 人工干燥开机、停机注意事项及设备 的检查和维修	158
第二节 实现快速干燥的条件和方法	159
第三节 干燥裂纹产生原因及消除方法	163
第四节 隧道干燥室热工测定方法	176

第一章 干燥基本原理

砖坯或瓦坯是由粘土（或页岩、煤矸石、粉煤灰）加入适量水分后，用机械或手工成型的。刚成型的砖坯或瓦坯（简称坯体）含有一定量的水分，强度一般都不高，必须除去大部分水分，且有一定的强度后，才能入窑焙烧。坯体除去水分的过程就叫做干燥。

在有热源时，坯体表面水分蒸发，并扩散到周围干燥介质，即空气或烟气中去，坯体内部水分则由于与表面水分所形成的湿度差而移至表面。表面蒸发的水蒸气，被流动着的干燥介质所带走，使干燥过程继续进行。所以说干燥过程既是一个传热过程，又是一个传递水分过程。

要使干燥过程连续不断地进行，坯体周围必须有干燥介质，坯体表面的水蒸气压强必须大于干燥介质的水蒸气分压强。当坯体表面的水蒸气压强等于坯体周围干燥介质的水蒸气分压强时，干燥过程也就停止了。此时，坯体的水分和它周围干燥介质的水蒸气处于动平衡状态。

在砖瓦工业中，常用的干燥方法有自然干燥和人工干燥两种。自然干燥的热源取自大气，因受外界气候变化的影响，不能做到常年生产，而且干燥时间也比较长；人工干燥的热源来自被加热过的空气或烟气，因受外界气候影响小，可以做到常年生产，而且干燥时间也比较短。至于电干燥、高频干燥、红外线干燥等，目前在砖瓦工业中尚未被采用。

在讨论干燥基本原理时，要叙述用于干燥过程中载热、

载湿的干燥介质——空气或烟气的干燥性能及坯体本身在干燥过程中的变化。至于空气和坯体之间的热交换过程，因在《焙烧》一书中已有叙述，这里就不讲了。

下面，首先从空气的干燥性能讲起。

第一节 空气的干燥性能

从干燥性能来看，空气同烟气没有明显的差别，因此空气的干燥性能也适用于烟气。

一、空气的干燥性能

空气的干燥性能决定空气的状态；而空气的状态又是用湿度、湿含量、热含量、露点温度、绝热饱和温度及湿球温度说明的。因此，我们来介绍一下这方面的知识。

1. 湿度

大气中的空气是干空气和水蒸气的混合气。表示空气湿度的方法有绝对湿度、饱和绝对湿度和相对湿度三种。

绝对湿度 每立方米湿空气中所含水蒸气的重量，称为空气的绝对湿度。根据气体分压定律（即道尔顿定律），混合气的总压力应为各组分气体分压力的和；每一组分气体的分压力就等于该气体独占混合气体原有体积时的压力。水蒸气的体积与湿空气的体积相等，所以湿空气的绝对湿度就等于该温度下水蒸气的重度。空气的绝对湿度用符号 $\gamma_{绝}$ 来表示，其单位为公斤/米³。

饱和绝对湿度 在定温、定压下，含有最高水蒸气而不能再吸收时的空气状态称为饱和状态。当空气达到饱和状态时的绝对湿度叫做饱和绝对湿度。空气的饱和绝对湿度用 $\gamma_{饱}$ 来表示，其单位为公斤/米³。常压下饱和绝对湿度随着

空气温度的升高而急剧增加的情况，可由表1-1中看出。

各温度下空气的饱和绝对湿度

表1-1

温度 (°C)	$\gamma_{\text{饱和}}$ (公斤/米 ³)	温度 (°C)	$\gamma_{\text{饱和}}$ (公斤/米 ³)
-15	0.00133	45	0.06542
-10	0.00214	50	0.08294
-5	0.00324	55	0.101228
0	0.00484	60	0.13009
5	0.00680	65	0.16105
10	0.00940	70	0.19795
15	0.01282	75	0.24165
20	0.01729	80	0.29299
25	0.02303	85	0.35323
30	0.03036	90	0.42807
35	0.03959	95	0.50111
40	0.05113	100	0.58825

相对湿度 空气的绝对湿度与同温度下的饱和绝对湿度的比值叫做空气的相对湿度。空气的相对湿度又称为湿度百分率，说明空气为水分所饱和的程度，用 ϕ 来表示。例如，70°C时一立方米空气含0.025公斤水，欲求其相对湿度，须先在表1-1中查出该温度时饱和绝对湿度，用此值来除所含的水分再乘上100就得到相对湿度：

即

$$\phi = \frac{\gamma_{\text{绝对}}}{\gamma_{\text{饱和}}} = \frac{0.025}{0.19795} \times 100 = 12.6\%$$

反过来，若20°C时空气的相对湿度等于50%，则此时的绝对湿度为：

$$\gamma_{\text{绝对}} = \phi \cdot \gamma_{\text{饱和}} = \frac{50 \times 0.01729}{100} = 0.008645 \text{ 公斤/米}^3$$

此外，空气的相对湿度，还可以用水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力的比值来表示：

$$\phi = \frac{\gamma_{\text{绝}}}{\gamma_{\text{饱和}}} = \frac{P_{\text{水蒸气}}}{P'_{\text{水蒸气}}} \quad (1-1)$$

式中 $P_{\text{水蒸气}}$ ——空气中水蒸气的分压力（公斤/米²）；

$P'_{\text{水蒸气}}$ ——空气在饱和状态时水蒸气的分压力（公斤/米²）。

湿空气的饱和水蒸气分压列于表1-2中。

湿空气中饱和水蒸气分压力（空气相对湿度100%） 表1-2

温度 (°C)	$P'_{\text{水蒸气}}$ (公斤/米 ²)	温度 (°C)	$P'_{\text{水蒸气}}$ (公斤/米 ²)	温度 (°C)	$P'_{\text{水蒸气}}$ (公斤/米 ²)
-20	10.5	25	322.98	70	3177
-15	16.85	30	432.67	75	3931
-10	26.5	35	573.4	80	4828
-5	40.91	40	752.18	85	5895
0	62.26	45	977.3	90	7148
5	88.96	50	1267.0	95	8620
10	125.2	55	1604.8	99.4	10128
15	173.68	60	2031	100	10333
20	288.4	65	2550		

2. 湿含量

在湿空气中每公斤干空气所带有水蒸气的重量，称为该空气的湿含量。湿含量用 d 表示，其单位为 公斤/公斤（干气）。

设有一定量的湿空气，其中干空气的重量为 $G_{\text{干气}}$ 公斤，水蒸气的重量为 $G_{\text{水蒸气}}$ 公斤，则该空气的湿含量可表示为：

$$d = \frac{G_{\text{水蒸气}}}{G_{\text{干气}}} \quad (1-2)$$

经推导，湿含量还可由下列公式表示：

$$d = 0.621 \frac{\phi P'_{\text{水蒸气}}}{P - \phi P'_{\text{水蒸气}}} \text{公斤/公斤 (干气)} \quad (1-3)$$

式中 P ——湿空气的总压力（在一般干燥中为大气压力）；

ϕ ——空气的相对湿度。

公式（1-3）称为湿含量方程。它反映了空气的湿含量同温度、压力、相对湿度等之间的关系。

3. 热含量

湿空气的热含量是干空气的热含量和水蒸气的热含量之和。它用 I 来表示，其单位为千卡/公斤（干气）。热含量的计算是取含有一公斤干空气的湿空气为重量基准， 0°C 为温度基准来计算的。

假定含有一公斤干空气的湿空气量为 $(1+d)$ 公斤。此湿空气的热含量应为一公斤干空气的热含量与 d 公斤的水蒸气的热含量之和。

每公斤干空气在 $t^\circ\text{C}$ 的热含量 $= 1 \times 0.24 \times t$

式中 0.24 ——为干空气的重量比热（千卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ ）；

t ——湿空气的温度（ $^\circ\text{C}$ ）。

d 公斤水蒸气在 $t^\circ\text{C}$ 时热含量 $= 595 \cdot d + d \times 0.46t = d(595 + 0.46t)$

式中 595 ——为每公斤 0°C 的水变为 0°C 的水蒸气所吸收的潜热（千卡/公斤）；

0.46 ——为水蒸气在干燥温度范围内的重量平均比热（千卡/公斤 $\cdot^\circ\text{C}$ ）；

所以湿空气的热含量

$$I = 0.24t + d(595 + 0.46t) \text{ 千卡/公斤(干气)} \quad (1-4)$$

公式(1-4)称为热含量方程。它反映了空气的热含量 I 与其他参变数湿含量和温度之间的关系。温度愈高，热含量愈大；如果温度一定，湿含量愈大，则热含量愈高。

4. 露点温度

在湿含量保持不变的情况下，湿空气冷却到饱和状态时的温度即为露点温度。它用 $t_{\text{露}}$ 来表示。露点方程用下式表示：

$$P'_{\text{水蒸气}} = \frac{Pd}{d + 0.621} \text{ 毫米汞柱(或公斤/米}^2\text{)} \quad (1-5)$$

因为从公式(1-5)求出来的 $P'_{\text{水蒸气}}$ ，乃是在露点状态的饱和水蒸气分压力，与此相对应的温度就是露点温度。通过露点方程还说明露点温度同总压力和湿含量之间的关系。总压力愈大，则露点温度愈高；湿含量愈大，则露点温度也愈高。

在干燥过程中，要特别注意防止露点的出现。例如在干燥室的进车端，如果进干燥室的坯体温度较低，很容易使流经坯体的湿气体冷却至露点温度，造成坯体凝水。轻微时会使坯体开裂、哑音，严重时甚至使坯体在干燥车上倒塌。

5. 绝热饱和温度和湿球温度

一定量的空气与大量的水或湿坯体接触时，在绝热的情况下，即假定空气的热只传给被蒸发的水，而不传给其他，即不传给坯体和未被蒸发的水，也不传给干燥室四周的壁面和干燥车。此时空气的温度下降，而且逐渐被水蒸气所饱

和。当空气冷却到饱和状态时的温度叫做绝热饱和温度。如果忽略被蒸发的水原有的含热量，则空气的热含量应为一常数。

当大量的不饱和空气同一定量的水或湿坯表面接触时，水或湿坯体表面的水分就要汽化，假如水面的初温大致与空气的温度相等，水蒸气从水面蒸发时，势必使水的温度降低，但空气的热量又会传到水中，最后当空气传到水中的热量恰好等于水面蒸发所需要的热量时，两者达到平衡，水的温度维持不变，水的这个温度即为湿球温度。若将水银温度计的水银球裹以湿纱布，置于湿空气中，其湿热交换机理与上述相同，此时水银温度计所指示的温度即为湿球温度。

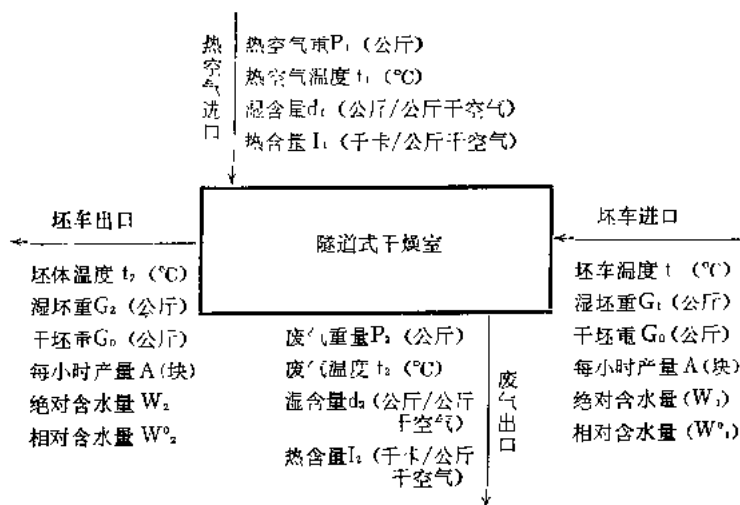
湿球温度并不代表空气的真正温度，而是说明空气的一种状态和性质的物理量，它只决定于湿空气的温度和湿度（或相对湿度）。当气温一定时，相对湿度愈小，水面水分愈易蒸发，水温下降愈大，即湿球温度愈低。湿球温度亦即湿坯体在该空气中的冷却限度。

绝热饱和温度和湿球温度在机理上不同，因此湿球温度与绝热饱和温度在物理意义上不能混淆，可是在水蒸气-空气系统中，当空气的温度不太高，相对湿度不太低时，这两个温度却极为接近。

总之，除热含量外，其余四个参数都是反映空气的潮湿情况，只是从不同角度来表示空气中所含水蒸气的绝对量。

二、干燥过程中物料平衡与热量平衡

物料平衡是解决物料在干燥过程中坯体水分蒸发量和干燥介质消耗量的问题；热平衡是解决热消耗量问题。下图表示干燥室各参数的关系：



1. 物料平衡计算

被干燥的坯体可认为是由绝干粘土及水分组成。在干燥过程中绝干粘土的重量是不变的，而其中的水量则减少。

(1) 每小时坯体蒸发的水量 (g时)

$$\begin{aligned}
 g_{\text{时}} &= \frac{G_1 W_1^0 - G_2 W_2^0}{100} \cdot A \\
 &= \frac{G_0 (W_1 - W_2)}{100} \cdot A \quad (1-6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{或 } g_{\text{时}} &= G_1 \frac{W_1^0 - W_2^0}{100 - W_2^0} \cdot A \\
 &= G_2 \cdot \frac{W_1^0 - W_2^0}{100 - W_1^0} \cdot A \quad (1-7)
 \end{aligned}$$

(2) 每蒸发一公斤水需要干空气量 (1)

$$l = \frac{1}{d_2 - d_1} \quad (1-8)$$

2. 热量平衡计算

坯体在干燥过程中要消耗一定的热量，其热量主要用来蒸发水分；同时坯体和干燥车在离开干燥室时要带走一部分热量；废气带走一部分热量，另外从干燥室墙壁和顶部还要散失一部分热量，从不严密处也要散失一部分热量。这些热量完全由热空气或热烟气提供。现将各部分热量计算如下：

(1) 每蒸发一公斤水分吸入热量 (千卡)

1) 热空气带入热量 $q_{\text{气}}$ ：

$$q_{\text{气}} = l \cdot I_1 \quad (1-9)$$

式中 l ——每蒸发一公斤水所需干空气的重量 (公斤)；

I_1 ——进入干燥室热空气的热含量 (千卡/公斤干空气)。

2) 坯体中可蒸发水分带来热量 $q_{\text{水}}$ ：

$$q_{\text{水}} = C_{\text{水}} \cdot t_{1\text{坯}} \quad (1-10)$$

式中 $C_{\text{水}}$ ——水的比热 ($C_{\text{水}} = 1$)；

$t_{1\text{坯}}$ ——坯体进干燥室前温度。

(2) 每蒸发一公斤水分支出热量 (千卡)

1) 坯体带走热量 $q_{\text{坯}}$ ：

$$q_{\text{坯}} = \frac{C_{\text{干}} \cdot G_{\text{干}} \cdot A}{g_{\text{时}}} (t_{2\text{坯}} - t_{1\text{坯}}) \quad (1-11)$$

式中 $g_{\text{时}}$ ——每小时蒸发水分重量 (公斤)；

$C_{\text{干}}$ ——干坯体的比热；

$$C_{\text{干}} = \frac{C_0(100 - W_2)}{100} + \frac{C_{\text{水}}W_2}{100} \quad (\text{千卡/公斤} \cdot \text{度})$$

C_0 ——绝干粘土比热 ($C_0 = 0.19$) ;

W_2 ——坯体出干燥室时相对水分 (%) ;

G_2 ——出干燥室坯体的重量 (公斤) ;

A ——每小时干燥产量 (块/小时) 。

2) 干燥车带走热量 $q_{\text{车}}$:

$$q_{\text{车}} = \frac{C_{\text{车}} \cdot G_{\text{车}}}{g_{\text{时}}} (t_{\text{出}}^{\text{车}} - t_{\text{入}}^{\text{车}}) \quad (1-12)$$

式中 $G_{\text{车}}$ ——每小时从干燥室出来的干燥车的总重 (公斤) ;

$C_{\text{车}}$ ——干燥车所用材料的比热 (千卡/公斤·度) ;

$t_{\text{出}}^{\text{车}}, t_{\text{入}}^{\text{车}}$ ——干燥车出口和进口的温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

$g_{\text{时}}$ ——每小时蒸发水分重量 (公斤) 。

3) 废气带走热量 $q_{\text{废}}$:

$$q_{\text{废}} = l \cdot I_2 \quad (1-13)$$

式中 l ——每蒸发一公斤水所需干空气重量 (公斤) ;

I_2 ——废气热含量 (千卡/公斤干空气) 。

4) 干燥室外表面散失的热量 $q_{\text{壁}}$ (包括干燥室侧墙和顶部散热) :

$$q_{\text{壁}} = \frac{FK \cdot \Delta t_{\text{均}}}{g_{\text{时}}} \quad (1-14)$$

式中 F ——散热面积 (米^2) ;

$\Delta t_{\text{均}}$ ——干燥室热空气平均温度和外界大气温度差

$$\Delta t_{\text{均}} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{\text{空气}} (^{\circ}\text{C})$$

K ——总传热系数 (千卡/米²·度·小时), K 值可按下列经验公式计算

$$K = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + 0.06}$$

式中 δ ——墙厚（米）；

λ ——墙体导热系数（千卡/米·度·小时）。

5) 干燥室底散失的热量：

$$q_{\text{底}} = \frac{K_{\text{底}} \cdot F_{\text{底}} (t_{\text{干燥室}} - t_{\text{空气}})}{8\text{时}}$$

式中 $K_{\text{底}}$ ——干燥室底的平均传热系数（千卡/米²·度·时）；

$F_{\text{底}}$ ——干燥室底的面积（米²）。

6) 干燥室不严密处散失热量 $q_{\text{不严}}$ ：由于计算困难，通常按干燥室每蒸发一公斤水总的热损失的10~20%计算。

这样，我们知道干燥室每蒸发一公斤水分所吸入和支出的热量，就可得到如下的热平衡方程式：

$$q_{\text{气}} + q_{\text{水}} = q_{\text{坯}} + q_{\text{车}} + q_{\text{废}} + q_{\text{壁}} + q_{\text{底}} + q_{\text{不严}} \quad (1-15)$$

第二节 坯 体 水 分

由于干燥过程的实质就是脱水，因此我们首先从坯体的水分谈起。

一、坯体的毛细现象

坯体的泥料是由固体颗粒组成，在颗粒之间的空隙（气孔）内充满水及空气。

塑性成型坯体的气孔，在干燥的前一阶段主要被水填充；在干燥的后一阶段则被空气及水蒸气所填充。

坯体固体颗粒之间的空隙（气孔）其断面很小，不管其断面的形状如何，均可视为毛细管。我们知道水对粘土是浸润液体，由于表面张力的作用，坯体内的水分将沿毛细管到达坯体的表面，由于水和粘土的浸润现象，水在毛细管内将呈凹弯月面状。

对于坯体来说，通常毛细管凹弯月面上的压力小于大气压力，所以用润湿液体成型的坯体将受各方面的体积压缩，从而促使坯体保持一定的外形。如果坯体的表面被超出毛细管的水所遮盖，即如果表面张力等于零，这时毛细管凹弯月面上的压力等于大气压力。在砖瓦坯干燥中，干燥介质中的水分在坯体表面凝结时就出现这种情况，这时坯体表面被水膜遮盖，凹弯月面消失，毛细管中的表面张力失去作用，坯体结合性变得极弱，坯体的形状时常损坏。

二、坯体水分的分类

坯体为多毛细孔物体。坯体中的水分根据结合方式的不同，大体可分为化学结合水、自由水和大气吸附水，后两者又叫做物理水。

1. 化学结合水

化学结合水是指包含在粘土矿物组成中的水分。例如粘土矿物中的 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的水化物部分就是化学结合水。此水在一般干燥温度下不可能从坯体排出，当把粘土加热到 $450 \sim 500^\circ\text{C}$ 时极大部分的化学结合水才能排出。坯体在烧成窑的预热带要排除全部化学水。脱去化学结合水，坯体尺寸并不缩小，只减少重量到最小，而气孔率却为最大。化学结合水排除时不产生应力，可以很快进行而不开裂。粘土在排出化学结合水以后，永远失去可塑性，变成非可塑状态。因此可把粘土脱去化学结合水（俗称烧粘土），当做瘦