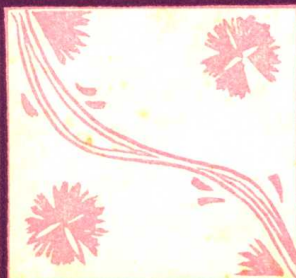


陶瓷原料与 制品的干燥



〔苏〕A·Φ·契津斯基著

俞炳林
刘翮天

译

中国建筑工业出版社

4.04
76

陶瓷原料与制品的干燥

A. Φ. 契津斯基 著

俞炳林 刘翻天 译

中国建筑工业出版社

本书概括地叙述了陶瓷原料和制品干燥的理论基础，陶瓷制品的干燥工艺，产生开裂的原因及其特征，克服开裂的方法，粘土的干燥敏感性的检测方法和最合适的干燥制度。本书还对新的高效率的干燥设备和自动快速干燥作业线进行了介绍，并对若干典型的干燥设备进行了举例计算。

А. Ф. Чижский

СУШКА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

издательство литературы по строительству—1971

* * *

陶瓷原料与制品的干燥

俞炳林 刘翮天 译

*

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(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米1/32 印张：5¹/₂ 字数：124 千字

1980年8月第一版 1980年8月第一次印刷

印数：1—4,410册 定价：0.46元

统一书号：15040·3752

译 者 的 话

干燥是陶瓷生产中的重要工艺过程之一。提高干燥效率，缩短干燥周期和干燥过程的自动化对整个陶瓷生产的现代化具有重要意义。

本书的重点内容之一是介绍苏联有关科研机关近些年来在干燥动力学方面的某些研究成果，这些成果对于我们研究可塑成型制品的干燥过程具有一定的参考价值。

在所介绍的干燥器中，高蒸发强度的喷雾干燥器、“沸腾层”干燥器和带转子混合器的脉冲（热风间断地吹刷制品）干燥器在国内陶瓷行业中尚未采用；在隧道干燥器和室式干燥器中采用的某些结构确有可取之处；而某些干燥缺陷分析及其克服办法对工厂实践也有参考意义。

原版中的一些错误在翻译时已予校正，不过难免还有遗漏。由于译者外语和专业水平不高，译文中的谬误也一定不少，恳望读者批评指正。

本书序言、一至三章由俞炳林翻译，四至六章由刘翮天翻译，全文由俞炳林整理。译稿承俞善庆同志校阅，在此表示感谢。

译 者

1978.12

序 言

建筑材料工业部门的基本任务之一，就是要依靠提高劳动生产率、挖掘设备潜力，实现生产工艺流程的综合机械化和自动化，以及设计新型的、高效率的联动机组来提高制品的质量和产量。

虽然苏联许多陶瓷企业，在强化干燥过程、研制和采用快速干燥方面取得了显著的成果，但是仍有许多工厂制品的干燥操作仍是整个生产过程中突出的落后环节。表现为干燥废品多，干燥周期长，笨重的体力劳动和繁复的装卸操作等等。为了加速干燥过程，必须继续完善干燥工艺，实现原料干燥特性的连续检测，改造现有的和设计新型的有效干燥方法，研制高效的自动干燥设备。

为此，在本书写作时特别着重可塑法成型的陶瓷制品的干燥工艺、产生开裂的原因及其特征、克服开裂的方法、粘土的干燥敏感性的检测方法和拟定最合适的干燥制度。本书也引用了各种陶瓷制品和原料所用的干燥制度的试验和生产资料，介绍了新的高效率的干燥设备和自动快速压坯—干燥作业线。还对若干典型的干燥设备进行了举例计算。必须指出，目前尚无足够可靠的工程计算方法，也无法确定某些干燥过程的制度参数，特别是干燥可塑法成型的陶瓷制品尤其如此。本书引用的计算方法是近似的，需要进一步完善。

本书概括了苏联科学研究部门以及苏联科研人员在陶瓷干燥领域内的研究成果。

目 录

序 言

第一章 陶瓷原料与制品干燥的理论基础	1
1. 水分与物料的结合形式	3
2. 物料的湿度和湿含量	5
3. 干燥过程	7
4. 潮湿物料与介质的热质交换	12
5. 水分在物体内部的迁移	15
第二章 陶瓷制品的干燥工艺	21
1. 收缩应力与干燥变形	21
2. 干燥开裂的产生条件	31
3. 干燥速度	40
4. 制品的临界湿度	46
5. 制品的最终湿度	48
6. 制品的干燥周期	49
7. 粘土的干燥敏感性	51
8. 陶瓷制品最适宜干燥制度的建立方法	67
第三章 干燥方法	79
第四章 陶瓷工业干燥器	86
1. 干燥器的分类	86
2. 对干燥器的要求	86
3. 干燥介质在干燥器中的再循环	87
4. 砂子和粘土的干燥器	89
5. 用于干燥建筑陶瓷与耐火材料的干燥器	102
6. 卫生瓷与细陶瓷干燥器	115

7.用转子混合器的间断干燥法	126
8.高频干燥器	128
9.干燥器热工制度的检测及自动控制	129
10.干燥器主要尺寸的确定	133
第五章 按 $I-d$ 图进行干燥器的热工计算	140
1.用热空气干燥	140
2.用烟气干燥	145
第六章 干燥器计算实例	152
1.干燥砖坯的逆流式隧道干燥器的计算	152
2.“沸腾层”干燥器的计算	162

第一章 陶瓷原料与制品干燥的 理 论 基 础

依靠蒸发而使物料脱水的过程称为干燥。如果向物体供热，使物体表面的水蒸汽分压大于其周围介质中的水蒸汽分压，干燥过程就得以进行。可以用不同的方法向物体供热：热空气或燃烧产物的对流传热；物体热表面的辐射传热；交流电通过潮湿物体的放热；物体与热表面直接接触的传热及其他一些方法，此外，热量还可以从放置于高频电场中的物体（电介质）中产生。

原料和制品的干燥是陶瓷工业中重要的工艺操作之一，就原材料（砂子、粘土和燃料）来说，对于其后的加工过程：粉碎、过筛和混合等，干燥是必不可少的；而就成型的制品来说，为了得到一定的机械强度和降低的湿度，使它可以装窑进行烧成或是直接送去快速烧成时不致于开裂，也必须进行干燥。

对于每一种原材料和制品，都要建立一定的干燥制度，即允许的干燥强度，原料加热的最高温度，干燥介质参数（温度、相对湿度和速度）及其在不同干燥阶段的变化。例如干燥砂子和粘土时，干燥速度可以无限的提高，但粘土的加热温度却不可超过 400°C ，否则就会脱去结晶水而失去粘性。砂子不用担心过热，因其多晶转换在较高的温度下才发生；燃料不可热过 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以上，因为超过这一温度其易燃产物即开始挥发。

用可塑法成型的粘土制品，其干燥操作是十分重要的。无论是安全干燥速度还是加热温度，都有严格的要求。这与制品中水分不均匀分布和强制收缩引起的收缩应力有关。

这就是说，湿物料的干燥过程不仅是与热交换、水和物料的结合形态有关的热工过程，而且还是包括原料在干燥过程中变化的工艺过程。只有全面地考察干燥的理论问题和工艺学问题，才可能准确地拟定适宜的干燥制度，以保证制品在极短的时间内干透并有很高的质量。

在陶瓷原料与制品干燥领域的理论和实践方面取得很大成就的学者和研究人员有：П.С. 柯萨维奇、Н. Н. 达勃罗赫多夫、А. В. 雷科夫、М. Ю. 鲁利耶、П. Д. 列别捷夫、К. А. 诺赫拉江、В. Н. 济明、И. М. 费多罗夫、И. И. 巴列耶夫、А. Д. 柴宾、Я. М. 半尼阿维奇、Г. К. 卡维里曼、П. В. 沙柯罗夫、Б. Н. 卡克、З. А. 诺索娃、М. И. 罗戈维依、А. Ф. 契日斯基、М. С. 别拉波里斯基等人。以及其他国学者Б. 里尤依斯、Т. К. 什尔乌特、Г. Г. 马赛依、弗歇尔等。А. В. 雷科夫和他的学生们在其著作中对干燥理论的发展有特殊的贡献。

现在，苏联陶瓷工业中的干燥技术正朝下述方向发展：建造连续干燥设备、采用新的有效的综合干燥方法，在一台设备内同时完成干燥和烧成；对于大尺寸可塑成型制品，研究和采用脉冲干燥方法；拟定适用于各种类型制品的最佳快速干燥制度；干燥设备的机械化和综合自动化，合理地利用二次热能等。

现代高效率自动化连续干燥设备的采用，必须研制连续（快速和不间断地）检测原料（粘土坯料）干燥特性的手段，这就为克服因开裂而造成废品的可能性创造了条件，同

时可以确定所要遵循的干燥制度。

利用现有工厂中的设备并进行改造，建立快速干燥制度以保证进一步强化干燥。在这方面，苏联国立建筑陶瓷研究院和其他研究机构，以及工业企业中都进行了许多工作。

1. 水分与物料的结合形式

具有毛细管孔隙（砂子）或是毛细管胶体状（粘土）的潮湿陶瓷物料的干燥过程与水与物料的结合形式有很大的关系。

按照 П. А. 列宾捷尔（Ребиндер）院士提出的水和物料结合能强度的原则分类，所有的结合形式可分为三大类：化学结合、物理-化学结合、物理-机械结合。

化学结合水包括在粘土矿物的分子组成中与物料结合得最牢固。化学结合水一般要在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时才会从粘土矿物中大量排除。在干燥过程中这种水并不会失去，所以在干燥工艺中可不考虑。

干燥仅排除物理-化学结合水和物理-机械结合水。前一种水是属于吸附作用和渗透作用结合的水。

吸附水也就是构成水膜的水分，其特征是结合强度中等。与物料颗粒形成单分子吸附层的水膜结合得最牢固，它处于很大压力下，而且密度大于1。吸附水本身就象是弹性物体，膜很薄（约0.1微米），具有楔入作用^[1]，后续吸附层与物料结合力较差，并逐渐呈现出游离水的性质。干物料在吸收吸附结合水时呈放热效应，据此现象可以测定不同物质的吸附水的数量。

可作为渗透结合特征的基本上是高聚合物，吸收水分（肿胀）时不放热。液体经过封闭细胞的半透壁渗入。

结构结合（包括形成凝胶的水）、毛细管结合（包括靠毛细管力作用）和湿润结合（如果物体表面是能被水湿润的）都属于物理-机械结合，其水含量不固定。水和物料的这种结合比上述的要松驰。

可将毛细管吸湿分为微孔（半径小于 10^{-5} 厘米）吸湿和粗孔（半径大于 10^{-5} 厘米）。吸湿划分微孔和粗孔的意思是：粗孔弯月面上的水蒸汽压力实际上与自由液面的饱和蒸汽压相等，而在微孔弯月面上的蒸汽压小于自由液面的饱和蒸汽压，并随微孔半径的减小而降低。微细毛细管的这种特性，在一定条件下导致周围介质中的水蒸汽在毛细管里凝聚。此外，粗毛细管和细毛细管的区别还在于气态物质转移的机理不一样^[1]。

有许多方法可以用来确定水和物料结合的形式。如吸水的含量可以用湿润绝干物料的热差法（А·В·图曼斯基法）测定^[2]。И.В. 克林倍尔（Книппер）提出了确定结合水的新方法^[2]，其原理是建立在对于结合水其损耗系数 K_0 （损耗角正切乘以介电系数）与电流频率无关这一基础上的。对于自由水，在电流频率变化时 K_0 急剧变化。渗透结合水的数量可以按电位电导系数对物体湿含量的变化图或是温度梯度系数 δ 随湿含量提高而变化的关系确定。对于渗透结合水， δ 接近于零。按相邻物体系统的吸附和解吸等温线可以确定吸附结合水和毛细管吸湿水的界限^[2]。物料中水的存在形式还可以用其他的方法来确定。

必须指出，大多数测定方法并不能得出严密的数值，准确测出物料中不同形态的水的数量，而仅是指出具有这种或那种结合形式。

根据物料中水的赋存形式的不同，所有潮湿的物料可以

分为这几种：具有毛细管孔隙的、胶体状的和毛细管—胶体状的。

当水在物料中基本上处于毛细管力结合的时候，那么该物料就称为毛细管孔隙型物料，如砂子和某些建筑材料。这种材料脱水时体积发生变化；当水和物料的结合形式是以渗透和结构结合占优势时，这类物料就称为胶体。在吸湿时其体积会显著增大（肿胀），在脱水时收缩。如果物体中渗透结合水和毛细管作用都相当强时，那就称为毛细管胶体，属于这种类型的有粘土、某些陶瓷坯料、泥炭和木材等，这些物体在吸湿和干燥时，都伴随着发生体积变化。

大多数物料在失去不同形式的水，即在干燥的不同阶段，都会出现体积收缩。例如在干燥的初始阶段，粘土中失去自由水（主要存在于粗毛细管中的）时，体积收缩。故自由水往往被称为收缩水，因为在失去自由水后收缩也就结束了。粘土物料体积的缩小大致与失去的自由水（或收缩水）的体积相当。如前所述，这种水与物料结合最松弛并最先被排除。

2. 物料的湿度和湿含量

如果含有 W 公斤水的湿料为 G 公斤，绝干料为 G_0 公斤，那么：

$$G = G_0 + W \text{ 公斤}$$

所谓绝干物料 G_0 应该指在 $t = 105 \sim 108^\circ\text{C}$ 的温度下干燥至恒重时的物料重量。

在干燥技术中，物料的湿度有两个定义：

湿基湿度，即相对湿度，按公式：

$$\omega_0 = \frac{W}{G} \times 100\% \quad (1)$$

或者称物料总量中的湿含量为:

$$U_0 = \frac{W}{G} \text{ 公斤/公斤} \quad (2)$$

干基湿度, 即绝对湿度, 按公式:

$$\omega = \frac{W}{G_0} \times 100\% \quad (3)$$

或者称做相对于干物料的湿含量为:

$$U = \frac{W}{G_0} \text{ 公斤/公斤} \quad (4)$$

使用较多的是绝对湿度。由 ω_0 求 ω 或反之, 有下面关系式:

$$\omega = \frac{100\omega_0}{100 - \omega_0} \% \quad \text{和} \quad \omega_0 = \frac{100\omega}{100 + \omega} \% \quad (5)$$

当利用上面的标记和通过如下的符号表示: 进入干燥器中的物料为 G_1 公斤/小时, 干后物料为 G_2 公斤/小时, 蒸发水为 W 公斤/小时, 物料起始和终止的相对湿度为 ω_{01} 和 $\omega_{02}\%$, 开始和终止的物料绝对湿度为 ω_1 和 $\omega_2\%$, 绝干物料为 G_0 公斤/小时, 则可写出干燥的物料平衡方程式为:

绝干物料重:

$$G_0 = \frac{G_1 \times 100}{(100 + \omega_1)} = \frac{G_1 (100 - \omega_{01})}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (6)$$

或是

$$G_0 = \frac{G_2^* \times 100}{(100 + \omega_2)} = \frac{G_2 (100 - \omega_{02})}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (7)$$

干燥器中蒸发水的数量可以由相对湿度求得:

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \left(\frac{\omega_{01} - \omega_{02}}{100 - \omega_{02}} \right) = G_2 \left(\frac{\omega_{01} - \omega_{02}}{100 - \omega_{01}} \right)$$

* 此处应为 G_2 , 原书误为 G_1 。——译注

$$= \frac{G_0 100 (\omega_{01} - \omega_{02})}{(100 - \omega_{02})(100 - \omega_{01})} \text{ 公斤/小时} \quad (8)$$

或者由绝对湿度求得:

$$\begin{aligned} W &= G_1 - G_2 = G_1 \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{100 + \omega_1} \right) = G_2 \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{100 + \omega_2} \right) \\ &= G_0 \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{100} \right) \text{ 公斤/小时} \end{aligned} \quad (9)$$

进入干燥器的湿物料为:

$$G_1 = \frac{G_0 \times 100}{(100 - \omega_{01})} = \frac{G_0 (100 + \omega_1)}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (10)$$

干后的物料重为:

$$G_2 = \frac{G_0 \times 100}{(100 - \omega_{02})} = \frac{G_0 (100 + \omega_2)}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (11)$$

湿料中的含水量为:

$$W_1 = \frac{G_1 \omega_{01}}{100} = \frac{G_0 \omega_1}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (12)$$

而干后物料中的水量为:

$$W_2 = \frac{G_2 \omega_{02}}{100} = \frac{G_0 \omega_2}{100} \text{ 公斤/小时} \quad (13)$$

3. 干燥过程

湿陶瓷制品的干燥过程,基本上是由水与物料的结合形式和环境介质与物料表面的相互作用,即干燥制度所决定的。

干燥工艺中最重要的参数是物料的最终湿含量,它可以由物料与周围空气的平衡条件来确定。湿料与周围空气(烟气)的湿热平衡取决于空气的湿度与温度,以及达到平衡的方法,它可以用湿料的吸附与解吸等温线来表征。在平衡条件下,物料的温度等于周围空气的温度,而其液体蒸汽压等

于空气（或周围烟气）中的蒸汽压。

物料的平衡湿度值由物料本身的特性和环境参数决定。由图1的拉特宁粘土的吸附等温线就可以知道（据A·A·苏米林资料）^[3]。显然，随着空气的相对湿度 φ 的上升和温度下降，物料的平衡湿度值也相应增高。

粘土的吸附与解吸等温线一致性较好，而且一般仅只有在两个极点—— $\varphi = 0\%$ 和 $\varphi = 100\%$ 时才接近和重合。根据胶体物理性质和矿物组成的不同，还可能在滞后曲线的其他点上观察到重合现象。这个问题在Ф·Д·奥伏恰连科（Овчаренко）的论文中有较深入而详细的论述。

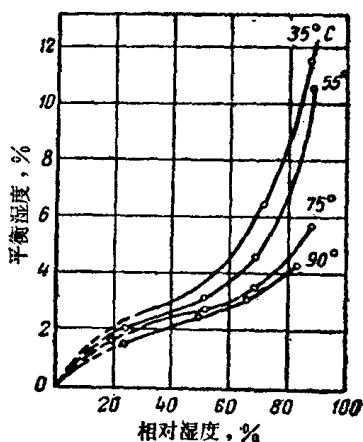


图1 拉特宁粘土的吸附等温线

取决于环境介质参数的物料平衡湿度值所确定的吸附与解吸等温线，对干燥工艺学有很大的意义，因为可以由此确定原料的最终湿含量，还可以用来确定相同的环境参数条件下粘土的干燥敏感性。

吸附液体的主要形式是吸附作用水和微细毛细管水。在一定的温度下，处于与完全被水蒸汽饱和（ $\varphi = 100\%$ ）的介质平衡状态的物体可获得最大的吸湿量。

据此，可以分出物料的吸湿状态区域和潮湿状态区域。如果物料的湿含量超过最大吸湿量，也就是物料与水直接接触继续吸湿，就称为物料的潮湿状态区域。此时，物料表面上的水蒸汽分压与同一温度下自由液体的饱和蒸汽压相等，

与物料的湿含量无关。

如果物料的湿含量低于其最大吸湿量，那就认为是物料的吸湿状态区域。此时，物料中液体的蒸汽压小于自由液体表面的饱和蒸汽压，并且是其温度与湿含量的函数。

已知物料的湿含量和温度，按物料的等湿线（吸湿与解吸等温线），即可确定满足平衡状态的周围空气的参数，而根据 I-d 图和空气绝热饱和线 $\delta = \text{常数}$ 还可确定物料上面的液体蒸汽分压的定量值。这就是说，在干燥时失去的水分，按数量来说就是物料的起始湿度与平衡湿度之差。

让我们来考察薄饼状粘土板的干燥过程。如果温度、湿度和干燥介质（空气或烟气）流速保持一定，而干燥介质的相对湿度 $\varphi < 100\%$ ，显然，这时水从物料表面的蒸发过程决定于其向外的扩散速率，仅与周围介质参数有关。在干燥过程中，物料重量、温度和湿度以及干燥速度均发生变化，整个过程可以分为几个阶段（图 2）。

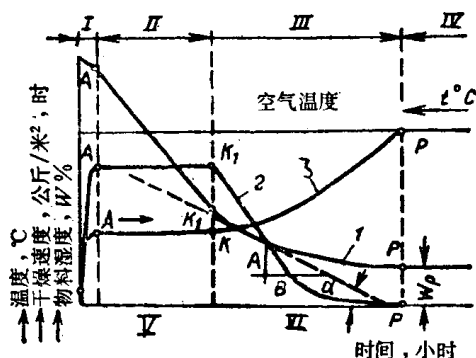


图 2 在干燥过程中湿度

1—干燥速度；2—材料温度 3 的变化曲线

干燥阶段：I、加热；II、等速干燥；III、降速干燥；IV、平衡状态；
V、潮湿状态；VI、吸湿状态

物料湿度随时间的变化关系 $\omega=f(z)$ 用干燥曲线(1)来表示,曲线(2)表示干燥速度,即物料在单位时间内的湿度变化,这可以用干燥曲线的任意点上作切线的水平倾角 α 的正切值来确定:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{A}{B}$$

曲线(3)表示物料温度随时间的变化。

加热阶段 此阶段物料将置于逐渐升温的空间并被加热,实际上不发生水分蒸发。如果制品很厚和干燥制度很急,制品中心与表面之间就要出现温度差,如制品很薄和干燥缓慢,温度差就较小(为了简化,图上未表示出)。在本阶段结束时表面温度恒定,物体接受的热量与用于蒸发水分的热量相等(图上的A点),此后即进入等速干燥阶段。

等速干燥阶段 此阶段的特征是干燥速度不变(在曲线2的AK₁段)。此时,干燥速度在数值上相当等于敞开液面的水分蒸发速度。在这阶段自由水从物体表面蒸发,同时制品深处的水分不断渗向表面,使表面湿润。物体表面的温度 t_{κ} 近似相等于湿球温度计温度 t_n ,并保持不变(曲线3的AK₁段)。物体表面上的蒸汽压等于表面温度 t_{κ} 时的饱和水蒸汽分压,且与物料湿度无关。这是粘土制品干燥的极重要而危险的阶段,因为在此期间制品要收缩,而且由于收缩不均匀会导致收缩应力而出现变形。

当平均湿含量降低至临界值 $\omega_{\kappa p}$ (在图2的K₁点)时,等速干燥阶段结束。此时制品表面上湿度与最大吸附湿度 ω_2 相等。临界湿度 $\omega_{\kappa p}$ 是指整个制品的平均湿度,它与干燥制度、制品的厚度和导湿系数有关。在达到临界湿度时,制品表面层终止收缩,继续干燥时仅仅是增加制品的气孔率。从