

陶瓷的烧成

[捷] 奥德日哈 迪希

刘 楨 译

刘秉诚 校

中国建筑工业出版社

本书是一本关于陶瓷热加工的专著。书中引述了坯料在热加工中的变化过程和一般的热过程；论述了陶瓷热加工的最佳制度及其确定方法和偏离最佳制度的后果；叙述了本烧窑、预烧窑、彩烧窑及特种窑等各种烧成窑炉的工艺和构造；介绍了窑炉起动、烧成调节和运转参数检测等的方法。

本书主要供陶瓷行业的热工技术人员、窑炉运转工人以及从事陶瓷工厂设计的技术人员参考。书中的通用部分可供机械与冶金行业中从事机械与建筑设计的人员参考。因此本书可用作陶瓷、建筑和机械工业专科学校的辅助教材。

OLDŘICH TICHÝ
Palení keramiky
NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ
LITERATURY
PRAHA 1983

* * *

陶 瓷 的 烧 成
〔捷〕 奥德日哈 迪希
刘 慎 译
刘秉铎 校

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

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：13¹/₂ 字数：311千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数：1—2,820 册 定价：9.10元

ISBN7—112—00809—3/TU·571

(5887)

前 言

陶瓷的烧成可以说是陶瓷生产中一个最关键的生产工序。对于非专业人员来说，除应知道“陶瓷”和“陶瓷制品”等这样一些基本概念外，还必须掌握“焙烧”、“烧成”和“热加工”等有关概念。陶瓷生产中各道工序的结果都取决于烧成这道作业的成败，因此执行热加工的窑炉设备就成为实现工艺意图和决定产品质量的关键因素，是每个陶瓷厂的最重要的生产设备。

从史前用柴草烧的在土墩中挖成的窑或用土堆筑成的窑，直至现代的陶瓷烧成技术，经历了一个漫长而复杂的发展过程。史前人类活动大部分领域中的许多往事早已湮没无闻了，然而，人们今天尚能在陶瓷作坊里见到与史前基本上一样或者几乎没有什么区别的古式烧炼技术以及类似史前窑炉的古式窑炉。这是因为陶瓷制造不仅是一种旨在满足人类物质需要的生产活动，而且是人类的一种艺术活动。实际上，陶瓷是一个重要的艺术门类，艺术家要借助众所周知的方法其中也包括历史上的方法来表现自己的思想。我们可以把文化艺术看作是社会历史的生动写照，因此在文化艺术界里保留下来了从古到今的历代设施。

窑炉的类型和体系繁多，各种常用能源都可用作窑炉的加热，这就对窑炉工作者处理各种问题的能力以及专业的熟练程度提出了很高的要求。热加工前后各道作业的效果，通过烧成而提高了价值，或相反而有所降低，同时还要尽量地

降低热耗。公元廿世纪末的今天，世界面临矿物燃料即将耗尽的形势，各种矿物燃料的可以使用的期限已有预告。但有些研究者以至研究部门的预报过于笼统。若考虑到能源消耗不断增涨的趋势，则可利用的石油储备约在2000至2050年耗尽；天然气、沥青页岩、沥青砂以及其它可燃泥岩均将在2100年前后耗尽。把煤炭作为能源一起算上，大概可以使用到2200至2300年。2000年这个临界期不久将届临，迄今在工程技术上尚未充分掌握地热、太阳能以及核聚变* 的利用；此外，还由于裂变原料储量有限且很不安全，因此人类社会今后的发展，将可能以严重的能源匮乏为标志。当今，所有能源用户都在努力地降低能源消耗，以期使传统能源的使用期能一直延长到掌握利用其它天然能源时为止。陶瓷生产是一个重要的能源消耗部门，在社会总能量消耗中约占12%，因此妥善处理陶瓷热加工问题，节约能源，乃是当前的重要课题。

* 为轻原子核相遇时聚合为较重的原子核（氢核）并放出巨大能量的过程。

目 录

前言

第一章 基本概念与符号	1
第一节 基本概念的定义	1
第二节 基本符号与单位	4
第二章 坯料在热加工中的变化过程	7
第三章 最佳热工制度	18
第一节 定义	18
第二节 最佳制度的确定方法	20
第三节 偏离最佳制度的现象与热加工造成的缺陷	37
第四章 热过程	49
第一节 热的获取	49
一、燃烧	50
二、利用电能作热源	77
三、利用太阳能作热源	86
第二节 热传递	87
一、传导传热	89
(一) 稳定传导传热	89
通过简单平壁的导热	90
通过复杂平壁的导热	90
通过简单圆筒壁的导热	97
通过复杂圆筒壁的导热	98
通过简单球形壁的导热	101
通过复杂球形壁的导热	102
(二) 不稳定传导传热	104
二、对流传热	123
无限空间内或半空间内的自然对流	127
水平管内的受迫对流	129

弯管内的受迫对流	131
垂直于圆管的受迫对流	132
垂直于管束的自然对流	133
绕有限平面的受迫对流	134
格子式料垛内流动时的传热	135
三、辐射传热	142
(一) 热表面辐射	143
(二) 气体的辐射	151
四、综合传热	157
(一) 对流与辐射综合传热	157
(二) 对流与传导综合传热	159
(三) 不稳定综合传热	163
第三节 热过程的强化	163
第五章 窑炉的类型	167
第一节 窑炉的分类	168
第二节 各种窑炉的概况	170
一、间歇窑	171
二、移动火焰式窑炉	187
三、装料移动式窑炉	193
(一) 隧道窑	193
(二) 转盘窑	204
(三) 竖窑	205
(四) 回转窑	205
第六章 窑炉的构造	207
第一节 砖体材料、耐火构造与窑具	207
第二节 钢结构	242
第三节 烧嘴与燃烧系统	254
第四节 通风设备	272
一、概述	272
二、设备	283
第五节 发生炉	332

第六节 窑车的运输设备	338
一、隧道窑窑车的运输设备	338
二、车式箱形窑和钟罩窑的窑车运输设备	344
第七节 窑炉的电气装备和测量与调节装置	344
一、电气装备	344
二、测量与调节回路	347
(一) 温度的测量与调节	347
(二) 压力的测量与调节	351
(三) 气体的化学成分分析	353
(四) 测量与调节回路	355
第八节 余热利用设备	358
第七章 计算	364
第一节 间歇窑的计算	364
一、生产能力计算	365
(一) 给定生产能力计算窑容	365
(二) 给定窑容计算窑炉生产能力	366
二、稳定状态下通过砖体的传热计算	366
三、砖体内不稳定温度场的计算	367
四、完全热平衡	367
(一) 加热阶段的热平衡	367
(二) 冷却阶段的热平衡	379
五、通风管路的尺寸计算	380
第二节 料垛移动式窑炉(隧道窑)的计算	381
一、生产能力计算	381
(一) 给定尺寸的窑炉生产能力计算	381
(二) 给定生产能力的窑炉尺寸计算	382
二、通过砖体的传热计算及砖体材料选择	384
三、窑车砖衬内不稳定温度场的计算	384
四、完全热平衡	384
五、通风管路的尺寸计算	385
第三节 电阻窑的计算	385
第四节 传入地基的热量计算	385

第八章 各种陶瓷制品热加工用窑炉	387
第一节 砖瓦制品的焙烧	387
第二节 耐火制品与磨料的烧结	389
第三节 陶器热加工用窑炉	390
第四节 瓷器半成品热加工用窑炉	391
一、预烧窑	393
二、本烧(烧成)窑	393
三、彩烧(熔烧)窑	397
四、硬质瓷的一次烧成窑	399
五、软质瓷的烧成窑	399
第五节 墙面砖与地面砖热加工用窑炉	400
一、墙面砖与地面砖码成柱垛焙烧用窑炉	400
二、釉面砖与釉地砖热加工用传统窑炉	401
三、多通道小截面隧道窑	402
四、特种窑	403
第六节 工程材料热加工用窑炉	404
第七节 氧化物陶瓷热加工用窑炉	405
第九章 窑炉的运转与维护	408
第一节 窑炉的技术状况检验	403
第二节 运转参数的检测	409
一、温度检测	410
二、压力检测	413
三、流量检测	414
四、气体的化学成分分析	419
第三节 纠正措施	420
一、间歇窑的运转缺陷及其排除	420
二、隧道窑的主要运转缺陷及其排除	422
三、窑炉的维护	428
第四节 起动窑炉运转	429
第十章 窑炉的选型原则	431
参考文献	432

第一章 基本概念与符号

第一节 基本概念的定义

在展开技术性叙述之前，有必要先明确一下几个基本概念的定义。

最常用的术语是“焙烧”或“烧成”。广义地说，陶瓷专业包括砖瓦、炆器、耐火材料、玻璃、陶器、瓷器、磨料、卫生陶瓷、技术材料、墙面砖和铺地砖等。上述各类别之下又可以继续划分支类，例如瓷器又可分为软质瓷、硬质瓷、骨灰瓷和北欧瓷；或者分为日用瓷、雕塑瓷、电工瓷和实验室用瓷等。尽管它们的热加工类型各不相同，但都有一个“烧成”概念。根据本书的叙述需要，我们对陶瓷热加工的有关概念作了如下的定义划分，如表1。

热加工概念的划分

表 1

热 加 工						
在 陶 瓷 专 业 内						陶瓷专业外
成形剂的排除		获得所要求的性质				不再划分
干 燥	排 除	煨 烧	预 烧	本 烧	烧 成	
					熔 烧	

热加工 实质上是一个热对工件作用的加工过程。例如钢的退火、淬火和回火，包装薄膜的收缩，面包的烘烤，砖

瓦的焙烧，氮化物的合成以及玻璃的熔融等。

陶瓷专业内的热加工 包括热对原料作用，使之适于后续加工；加热陶瓷半成品，以排除成形添加剂或获得所要求的性质。这就包括了原料的干燥和煅烧，成形坯件的干燥，从可塑坯体中排除结合剂，后续加工前的预烧，烧成和彩烧等。

成形添加剂的排除 是对半成品的热加工，旨在排除陶瓷坯料中为了成形而添加的或本身固有的全部挥发物和可燃物。例如可塑泥料成形的坯件干燥，氧化物坯料中石脑油精或石蜡的排除，酚醛清漆的烧除和聚苯乙烯轻化剂的解聚。

使物料达到要求的热加工 是指使物料获得后续加工所要求的性质或者达到最终成品性质的热加工。例如粉碎前的煅烧，上釉前的预烧（素烧），机械化加工前的预烧以及砖瓦和陶管的烧成。

干燥 是指通过加热和干燥介质的作用以排除水分，即排除陶瓷坯料中的物理结合水。

有机物的排除 是指通过加热和运载介质排除陶瓷坯料中的有机添加物。通过加热使有机物挥发或升华，由运载介质——通常是空气带走。有机添加物排除的另一种方法是将它有控制地烧掉。于是在后一种情况下，空气既是燃烧用的氧源，又以燃烧产物的形式充当运载介质。

煅烧 是指对尚未成形的陶瓷原料的一种热加工，旨在排除结晶水，使碳酸盐和其它化合物受热分解。在煅烧过程中，一般无新的化合物形成。例如用于配制冲压成形坯料的高岭土可能要预先煅烧；用于调节泥料可塑性的部分粘土也要煅烧，作为塑性调节添加剂。

预烧 是使陶瓷半成品获得适合于后续加工所要求性质的热加工，紧接其后的就是最终烧成。薄壁日用瓷之所以要进行预烧（即素烧），是为了使其能适于浸没在釉浆中上釉；压制成形的氧化物陶瓷要预烧，是为使其在最高温度烧成（本烧）前获得机械加工所需要的强度；面砖要进行预烧，在于使其上釉后适于装入开槽的匣钵内，也同样是使其上釉时不致变形。

烧成 是陶瓷半成品的热加工，在于使坯胎获得最终的成品性质。在这一热加工过程中，坯胎中的物化反应按要求最终完成，在此后的加工中将不再有反应发生，或者即使有反应发生也是微不足道的。例如陶质排水管、砖瓦和陶器等的一次性焙烧属于烧成；日用瓷、釉面砖和火花塞绝缘子的本烧也属于烧成。

本烧 是指预烧过的制品的烧成。

熔烧 是指烧成后的陶瓷制品的热加工，使制品表面上涂饰的其它材料得以牢固地烧结在制品上。它包括釉上彩的彩烧，焊接用中间层的熔烧和高温金属镀层。

笼统地说，预烧、本烧和烧成都可以说是熔烧，甚至熔烧也可以说是熔烧。

执行熔烧的窑炉一方面属于工艺设备，另一方面又属于热力系统。从工艺上来说，窑炉是执行陶瓷原料煅烧、陶瓷半成品预烧、本烧或烧成以及表面处理熔烧的设备。这就包括了挖在土坳里的穴窑、烧木炭的土窑以及用作熔烧的各种原始构筑物。从窑炉作为热力系统来说，窑炉是一个热源、载热质与热加工件相互进行热力作用的开路系统。窑炉所以是一个开路系统，是因为从热力学上讲它不是与其它空间隔绝的，总是与周围环境发生热交换。

前已述及，妥善地处理好陶瓷的焙烧问题，是降低热耗的一条重要途径，因而也是陶瓷工作者对延长传统能源利用寿命的一大贡献。处理好了这个问题，还会带来直接的经济效益——优质产品。只有通过优质的热加工，产品才能获得所要求的性质，达到增值的目的，生产的废品量也就很少。

由于各种陶瓷进行热加工的方式和要求各不相同，这方面的认识和经验难以总结，又由于现有的窑炉及其附属设备类型繁多，因此在窑炉操作人员、运转管理人员和检测人员之间，以及在窑炉的建筑设计人员和机械设计人员之间，都难以交流信息。编写本书的目的，在于促进有关陶瓷热加工方面的知识 with 经验的交流和总结。

第二节 基本符号与单位

- α 导温系数 (m^2s^{-1})
- c 比热 ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
- $\hat{c}$ 常压下比热 ($\text{Jm}_0^{-3}\text{K}^{-1}$)
- D, d 直径 (m)，螺纹直径 (mm)
- d_h 水力直径 (m)
- g 重力加速度 (ms^{-2})
- h 高度 (m)
- I 电流 (A)
- l 长度 (m)
- m, M 质量 (kg)，摩尔质量
- $\dot{M}$ 质量流量 (kg s^{-1} , kg h^{-1})
- n 燃烧比
- O 润周 (m)

- p 压力 (Pa)
 p_i 分压 (Pa), 组分压力 (Pa)
 q 热流密度 (Wm^{-2})
 q_n 热值亦称发热量 (kJkg^{-1}), (kJm_n^{-3})
 q_v 燃烧热 (kJkg^{-1}), (kJm_v^{-3})
 $\dot{Q}$ 热流 (W)
 Q 热量 (J)
 $\dot{Q}_0, Q_0$ 热功率, 功率 (W)
 R 欧姆电阻 Ω , 半径 (m)
 R_m 通用的气体常数 ($8314\text{kJkmol}^{-1}\text{k}^{-1}$)
 r 比气体常数, 半径 (m)
 s 层厚 (m), 螺距 (mm)
 s 面积 (m^2)
 T 热力学温度 (K)
 t 温度 (K, $^{\circ}\text{C}$)
 U 电压 (V)
 $V, \dot{V}$ 体积 (m^3), 体积流量 (m^3s^{-1} , m^3h^{-1})
 v 速度 (ms^{-1})
 x 摩尔分数, 座标 x 方向上的长度 (m)
 x_v 容积浓度, 容积分率
 z 螺纹数, 座标 Z 方向上的长度 (m)
 α 传热系数 ($\text{Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$)
 γ 体膨胀温度系数 (k^{-1}), 表面电负荷 (Wcm^{-2})
 Δ 差量
 e , 相对吸收系数, 黑度, 校正系数
 η 效率
 λ 摩擦系数

λ 导热系数 ($\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$)

ν 运动粘度, 粘度 (m^2s^{-1})

ζ 损失系数

ρ 密度 (比重), 容重 (kgm^{-3}), 电阻率 (Ωm^{-1})

σ 绝对黑体的辐射系数 $\sigma = 5.67 \text{W}^{-2}\text{k}^{-4}$

τ 时间, 时间间隔 (s, h)

φ 辐射系数, 平面角 (rad)

φ' 辐射流密度 (Wm^{-2})

Ω 立体角 (Sr)

$$\text{Gr} = \frac{\gamma d^3 g \Delta t}{\nu^2}$$
 格拉晓夫 (Grashof) 准数 (动量迁移*)

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d}{\lambda}$$
 努塞尔 (Nusselt) 准数 (热量传递*)

$$\text{Pe} = \frac{vd}{a}$$
 贝克来 (Peclet) 准数 (热力相似*)

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$$
 普朗特 (Prandtl) 准数 (无量纲物性常数*)

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$$
 雷诺 (Reynolds) 准数 (流动工况*)

* 译者注

第二章 坯料在热加工中的变化过程

对坯料在热加工中的物理化学反应过程，本章不作详细的阐述，仅对那些必须掌握的变化过程作扼要的介绍。

坯料的组成不同，其受热行为亦各不相同。坯料的组成大体上分为单组分的和多组分的两大类。

一般地说，单组分坯料是通过单纯的烧结获得所要求的性质；而多组分坯料的各个组分在热加工中可能要进行诸多的相互反应，以获得所要求的性质。

有关体系的化学与相平衡基本知识，可查阅相图、热力稳定状态图，或由各单元生成这些物质的自由焓与温度关系图[1,2,3]。

但必须注意，陶瓷热加工的实际过程在绝大多数情况下达不到平衡状态。因此，其中的各组成相的化学历程和发展情况，不仅取决于体系的起始组成、温度和压力；而且在显著的程度，还取决于起始的显微结构和动态因素。

陶瓷热加工中的一个最重要的过程是烧结。烧结就是细颗粒组成的固体物料体系，在高温作用下结合成为一个整体的过程，一般也是使系统的孔隙度降低的过程。因此这个过程的推动力就是力求减小体系的表面积，使起始很大的表面能降低。烧结或是在无液相情况下进行的（这是单组分坯料烧结的典型情况），或是在有熔体的情况下进行的（这是多组分坯料烧结的典型情况）。

无熔体参与的坯料烧结是这样一种过程，即物质的粒子

从附近部位迁移至相互接触位置。粒子的迁移可以通过多种方式进行，其中最有意义的几种烧结机制是：通过粘性流动的迁移、通过空位体积扩散和原子表面扩散的迁移以及蒸发和浓缩的迁移。在特殊情况下，还有在外加压力下进行烧结的，这时物质的迁移机制主要是通过塑性流动（高温冲压成形）。

有液相参与下的烧结，推动力是浸润固体粒子的熔体表面张力。

整个烧结过程大体上分为两个阶段：第一阶段，以颗粒集团中的原始连通孔隙转变成封闭孔隙为终结；第二阶段为孔隙的不断缩小。最有实际意义的是那些影响烧结速度的因素，这主要是物质的决定烧结机制作用的物理性能；其次是物质的粒度，粒度越细表面积越大，烧结的推动力也就越大。烧结速度还显著地取决于温度，亦即取决于随温度升高而增大的原子或离子的活动性能。晶格内的缺陷浓度也随温度的升高而增大，从而便于体积扩散。此外，添加剂、同气氛的反应、晶格的不规则以及晶型转变等，都对烧结速度起作用。

孔隙封闭以后，气体从封闭孔隙内迁移出去就成为烧结的主要过程。烧结的第二阶段如果是在真空中或在小尺寸分子的气体中进行，则烧结进行得非常快，直至到达零孔隙度。

只要在烧结过程中还伴随有化学反应，就会影响烧结过程的进程，出现各种各样的变化。常见的情况是某些组分的分解而产生气相。如果在孔隙封闭后的烧结第二阶段中产生气相，就会减慢致密化过程，甚至相反，加快这个过程。

多相系统的烧结情况很复杂，在烧结过程中某些相在熔

体中溶解，而另一些相又从熔体中析出，熔体的成分即随之而改变。大多数传统的硅酸盐陶瓷坯料就是属于这种范畴。关于烧结的定量描述可参阅专业文献[1,77]。卢舍克[77]将陶瓷坯体在烧成过程中的物理化学变化分为下列几个阶段：

1. 干燥

2.

a) 热膨胀；

b) 可逆的晶型转变。

3. 反应：

a) 氧化和还原；

b) 合成；

c) 分解；

d) 不可逆的晶型转变；

e) 形成固溶体。

4. 烧结：

a) 有熔体参与；

b) 无熔体参与；

c) 反应烧结；

d) 再结晶。

5. 在熔体中溶解与从熔体中析晶。

绝大多数的传统陶瓷都是以粘土为原料，因而粘土就成为生坯的本质。坯料中除粘土外，还有石英、长石、碱金属的和重金属的硫酸盐、碳酸盐、有机物、 Al_2O_3 - SiO_2 系矿物、黄铁矿、铁的化合物、硅碳化物、各种晶型的单质碳、 ZrO_2 - SiO_2 系矿物及其它物质，当然还含有水分和气孔。

这种坯料在温度 250°C 以内，失去毛细管作用的结合水。实际上由于毛细管的凝聚作用，这种物理结合水的一部分常