

中等专业学校轻工专业试用教材

# 陶瓷工业 热工过程及设备

陈景雨 主编

中国轻工业出版社

(京)新登字034号

### 内 容 简 介

本书系轻工业部组织编写的中等专业学校陶瓷专业教材。书中着重阐述陶瓷生产热工过程的基本理论即窑炉中的气体力学、燃料燃烧及燃烧设备、传热学和干燥等。热工设备中重点讲述窑车式隧道窑,对倒焰窑、电热窑炉及新型窑炉也作了介绍。同时,对陶瓷窑炉热工测量等基本知识也作了简要介绍。

本书适用于中等专业学校陶瓷专业,也可供陶瓷行业技术人员参考。

中等专业学校轻工专业试用教材

**陶瓷工业热工过程及设备**

陈景丽 主编

中国轻工业出版社出版  
(北京市东长安街6号)

北京顺义县印刷厂印装  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售

850×1168毫米1/32印张;17.125插页;1字数;437千字

1992年4月 第1版第1次印刷

印数:1-3000 定价:5.10 元

ISBN7-5019-1211-4/TS·0808

## 前 言

《陶瓷工业热工过程及设备》一书是根据轻工中专硅酸盐专业教学研究会1986年唐山会议制定的陶瓷专业教学计划、1987年沈阳会议和1988年景德镇会议制定的《陶瓷工业热工过程及设备》教材编写大纲编写的。新编教材内容本着“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的原则，着重阐述陶瓷生产热工过程的基本理论，即窑炉中的气体力学、燃料燃烧及燃烧设备、传热学和干燥等。热工设备中重点讲述窑车式隧道窑，对倒焰窑、电热窑炉及新型窑炉只作一般介绍。同时，对陶瓷窑炉热工测量等基本知识也作了简要的介绍。本书可作中等专业学校陶瓷专业教材，也可供陶瓷专业技术人员参考。

本书由河北轻工业学校陈景雨任主编。窑炉中的气体力学和燃料燃烧及燃烧设备部分由陈景雨编写；传热学和干燥及干燥设备部分由福建集美轻工业学校林雄腾编写；隧道窑和倒焰窑部分由江西景德镇陶瓷学校涂申年编写；绪论、电热窑炉和陶瓷窑炉热工测量部分由江苏宜兴轻工业学校张建新编写。轻工部教育司聘请南京化工学院硅工系洪履祥高级工程师任主审。

在编写过程中，编者还得到一些研究单位和生产单位提供的资料，特别是唐山陶瓷工业公司技术服务部的高士民同志、唐山马家沟耐火材料厂的史国林同志等，对本教材的充实与提高给予了极大的支持和帮助，特此表示感谢。

新编教材针对中专的培养目标，贯彻理论与实践相结合的原则，努力提高教材的思想性、科学性、启发性以及适合我国情况的先进性和教学的适用性。但由于编者水平所限，书中可能存在不少的缺点、错误，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

绪论	1
第一章 窑炉中的气体力学	5
第一节 基本概念	5
一、密度	5
二、气体的压缩性与膨胀性	6
三、气体的粘性	8
四、绝对压强与相对压强	10
五、稳定流动与不稳定流动	11
六、流量与流速	11
七、层流与湍流	12
第二节 气体连续性方程式	14
第三节 适用于窑炉系统的伯努利方程	15
一、伯努利方程	15
二、压头的相互转变	26
第四节 伯努利方程在窑炉系统中的应用	29
一、气体通过窑炉小孔的喷出与吸入	29
二、气体通过炉门的流出与吸入	31
三、分散垂直气流法则	33
第五节 气体的输送设备	35
一、烟囱	35
二、风机及选型	46
三、喷射器	50
第二章 燃料、燃烧及燃烧设备	58
第一节 燃料的种类及特性	56
一、燃料的分类	56

二、燃料的特性	57
三、燃料的选用原则	67
第二节 燃料组成的表示方法及其相互换算	68
一、固体和液体燃料的组成及换算	68
二、气体燃料的组成及换算	72
第三节 热值	73
一、高热值	73
二、低热值	74
三、高热值与低热值的关系	74
四、热值的测定	75
五、热值的计算	77
六、标准燃料	81
第四节 燃烧计算	82
一、燃烧计算的内容、目的和基本概念	82
二、空气量的计算	84
三、烟气量及烟气组成的计算	89
四、空气过剩系数 $\alpha$ 的计算	101
五、燃烧温度的计算	105
第五节 燃烧设备	110
一、固体燃料的燃烧过程及设备	110
二、液体燃料的燃烧过程及设备	120
三、气体燃料的燃烧过程及设备	134
四、煤的气化及气化设备	141
<b>第三章 传热学</b>	155
第一节 传热的基本概念	156
一、温度场	156
二、等温面与等温线	158
三、温度梯度	158
四、热流和传热量	159
五、热流的并联与串联	159
六、稳定传热与不稳定传热	160

第二节  传导传热	160
一、  导热的基本定律——傅立叶定律	160
二、  导热系数	161
三、  平壁的导热	164
四、  圆筒壁的导热	170
第三节  对流换热	177
一、  影响对流换热的因素	177
二、  对流换热和对流换热系数的计算	179
第四节  辐射换热	196
一、  基本概念	196
二、  热辐射的基本定律	199
三、  固体间的辐射换热	205
四、  气体辐射	223
五、  火焰辐射	235
第五节  综合传热	236
一、  一种气体通过平壁向另一种气体的传热	236
二、  一种气体通过圆筒壁向另一种气体的传热	242
三、  换热器的设计计算	245
<b>第四章  干燥原理及干燥设备</b>	252
第一节  湿空气的性质	253
一、  湿空气中水蒸气的含量	254
二、  湿空气的焓	258
三、  温度参数	259
第二节 $I-X$ 图及其应用	263
一、 $I-X$ 图中各线的作法和意义	263
二、 $I-X$ 图的应用	265
第三节  干燥过程的物料平衡及热平衡	267
一、  物料平衡	268
二、  热平衡	271
三、  干燥过程图解法	276
第四节  干燥机理	280

一、物料中水分的性质	280
二、干燥机理	281
<b>第五节 干燥器及其设计计算</b>	287
一、干燥器	287
二、干燥器的设计计算	293
<b>第五章 隧道窑</b>	300
<b>第一节 隧道窑的结构</b>	301
一、窑炉结构的确定原则与工作系统	301
二、窑体结构	303
三、预热带结构	321
四、烧成带结构	328
五、冷却带结构	331
六、其它结构	338
<b>第二节 隧道窑的工作原理</b>	346
一、窑内的气体流动	346
二、窑内传热	351
<b>第三节 隧道窑的操作控制</b>	355
一、合理的烧成制度	355
二、各带温度的控制	359
三、烧成带气氛的控制	362
四、各带压力的控制	364
五、常见的故障及其排除	365
六、窑体及附属设备的维护与保养	369
<b>第四节 砌窑材料</b>	371
一、耐火材料的主要性能	371
二、常用的耐火材料	372
三、常用的隔热材料(保温材料)	374
四、耐火混凝土	377
五、普通建筑材料	378
<b>第五节 隧道窑设计</b>	378
一、设计原则	378

二、设计资料的收集与整理	379
三、设计计算的基本方法与步骤	380
第六节 隧道窑的烘烤与调试	394
一、隧道窑的烘烤	394
二、隧道窑的调试	399
第七节 其它隧道窑	401
一、隔焰隧道窑与半隔焰隧道窑	401
二、非窑车式隧道窑	404
三、多通道隧道窑	411
<b>第六章 间歇窑</b>	<b>416</b>
第一节 倒焰窑的结构	416
一、窑体	418
二、燃烧系统	422
三、排烟系统	423
第二节 倒焰窑的工作原理与操作控制	432
一、倒焰窑的工作原理	432
二、倒焰窑的操作控制	435
第三节 倒焰窑的设计	438
一、窑容积及尺寸的设计计算	438
二、燃烧系统的设计	440
三、排烟系统的设计	442
第四节 近代间歇窑	445
一、梭式窑	446
二、钟罩窑	450
<b>第七章 电热器炉</b>	<b>453</b>
第一节 常用电热元件的特性	454
一、对电热元件的要求	454
二、常用电热元件的材料	455
第二节 陶瓷工业生产常用的电阻炉	466
一、间歇式操作电阻炉	466
二、半连续式操作电阻炉	468



三、连续式操作电阻炉·····	469
<b>第三节 电阻炉的设计计算与安装</b> ·····	471
一、电阻炉功率的计算·····	471
二、电热元件单位表面功率的选择·····	474
三、电热元件尺寸的计算·····	475
四、电阻炉的安装与使用·····	485
<b>第四节 电阻炉功率的调节</b> ·····	490
一、利用变压器来调节·····	490
二、改变电热元件的连接方法来调节·····	491
<b>第八章 陶瓷窑炉的热工测量</b> ·····	495
<b>第一节 热工测量的方法及其测点的选择</b> ·····	495
一、温度测量·····	495
二、压力测量·····	501
三、流速、流量的测量·····	503
四、烟气成分的分析·····	511
五、热流密度的测量·····	517
<b>第二节 测试数据的整理与计算</b> ·····	517
一、热工测量后应注意的几个问题·····	517
二、隧道窑的热平衡计算·····	518
三、测量结果的分析与讨论·····	533
<b>第三节 热工测定报告的编制</b> ·····	534
一、隧道窑情况简介·····	534
二、测定项目和测试数据·····	535
三、工作流程图和烧成制度曲线·····	535
四、热平衡计算·····	535
五、分析与建议·····	535

## 绪 论

陶瓷工业不仅与人们的日常生活和文化生活有着密切的关系，而且随着现代科学技术的不断发展，已经超越了日用、建筑及一般工业用途的范围，而应用于电子工业、原子能、火箭及宇宙科学等尖端技术之中。可以说，陶瓷工业在整个国民经济中占有很重要的地位。

陶瓷生产中的一个重要过程就是烧成。烧成是在窑炉中进行的。坯体在窑内要发生一系列的物理、化学变化。有时由于窑炉设备或操作控制上的不合理将会导致前功尽弃，造成人力、物力的重大浪费。故在陶瓷工厂中有“原料是基础，成形是条件，烧成是关键”之说。也有人把窑炉形象地比作陶瓷工厂的“心脏”，可见窑炉在陶瓷生产中的重要性。

陶瓷工业窑炉，就其发展过程来说，是由低级到高级；由产量、质量低，能耗大，劳动强度大，烧成温度低，不能控制气氛，发展到产量、质量高，能耗低，烧成温度高，能控制气氛，以及机械化和自动化。

我国是制造陶器最早的国家之一，也是发明瓷器最早的国家。从西安半坡遗址的发掘中，证明远在5000年前我国劳动人民就用勤劳的双手建造了烧制陶器的窑炉（竖穴窑和横穴窑）。这种窑是利用燃料燃烧的火焰自然向上的道理建成的，它属于一种升焰式窑。这些窑基本上是烧氧化气氛的，最高烧成温度可以达到1200℃。例如陕西张家坡出土的西周原始瓷，其烧成温度已达1200℃。在距今2500年前的战国时代，我国南方（如江苏、浙江、广东、福建、江西、湖南等地）就沿山的斜坡建造了倾斜式的龙窑；北方（如华北地区等）建造了半倒焰的馒头窑（也叫

磁州窑)。龙窑可以利用前段的热烟气来预热后段的坯件，前段烧成制品冷却时的热风可在后段的制品烧成时助燃。馒头窑窑内火焰流动方式不同于简单的直焰式窑，而呈部分倒焰和部分平焰相混合的流动方式。龙窑和馒头窑最高烧成温度可达1300℃，适宜于烧成日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、美术陶瓷、化工陶瓷及耐火材料制品，既可烧氧化气氛，也可烧还原气氛。例如山西侯马出土的原始瓷，含氧化亚铁0.22%，烧成温度为1230℃。南方一带也出土了大量战国和汉代原始瓷及青瓷，烧成温度达1300℃。自宋代（距今约1000年）起山东淄博、陕西耀州等地，部分馒头窑已用煤作燃料来焙烧瓷器。明代（距今约600年）在福建德化创建了阶级窑（也叫德化窑或串窑）。它与龙窑基本相同，也是以一定坡度倾斜建造，由若干窑室串联组成一条窑的整体。阶级窑可以利用前一间燃烧所产生的热烟气通过隔墙下的窗脚眼进入次间及以后几间预热坯体，并利用前间冷却时放出的余热来预热助燃空气。阶级窑不仅能烧成一般普瓷及陶器，也可以烧制细瓷，燃料可以是柴或煤。明末清初（距今约400年）在江西景德镇创建了景德镇窑（也叫蛋形窑）。景德镇窑窑内的火焰趋于水平方向流动，故有时也称为平焰窑。它采用了空气隔热层保温，而且有一个砌筑技术高超的高达16~18m的薄壁烟囱。这些窑当时对西欧一些国家产生了很大的影响。倒焰窑在我国的出现大约是在1919年以后，它是在半倒焰式的馒头窑的基础上发展起来的。由于它的一些优点至今一些生产规模较小的陶瓷厂或有些科研单位仍在使用的。隧道窑则是在龙窑的基础上发展起来的，机械化的隧道窑是1899年才由法国的福基罗（Faugeron）创建成功，用于焙烧陶器。其后德国用于焙烧瓷器，经过逐渐改进发展成为现代化的隧道窑。

从窑炉的发展历史来看，我国劳动人民在窑炉方面作出了很大的贡献。但在解放前，由于帝国主义的侵略，封建主义和官僚资本主义的反动统治，陶瓷工业发展缓慢，窑炉的发展停滞不前。

解放前，倒焰窑不多，隧道窑全国只有一座，还未正式生产。解放后，在党和政府的领导和重视下，我国陶瓷工业得到了迅速发展，新型窑炉也逐渐增多，一方面从国外引进了一些以发生炉煤气为燃料的隧道窑，另一方面我国自己也设计建造了大量的隧道窑。例如，1958年山东博山瓷厂自己动手建成了第一条用煤焙烧日用瓷的隧道窑（长60m）；1959年由西北建筑设计院设计，在咸阳陶瓷厂建成了第一条用发生炉煤气焙烧建筑卫生陶瓷的隧道窑；1965年85m长的日用陶器煤烧隧道窑在江苏宜兴均陶工艺厂建成投产；同年湖南建湘瓷厂建造了一条用重油焙烧日用瓷的隧道窑；1971年由西北建筑设计院设计，在唐山陶瓷厂建成了第一条用重油焙烧建筑卫生陶瓷的隔焰隧道窑。其后各陶瓷产区都相继建成了以不同燃料来焙烧陶瓷产品的隧道窑（有明焰式的、隔焰式和半隔焰式的）。一些新型隧道窑（如辊底式隧道窑、推板式隧道窑、多通道隧道窑等）也相继出现，并不断向快速烧成和自动化方向发展。这些年来，间歇式的倒焰窑也得到了进一步的改进。梭式窑、钟罩窑的出现，高速等温烧嘴的应用，给大型、异型产品（如大型电瓷产品）的烧成提供了较有利的条件。

目前窑炉发展和研究的中心问题是窑内截面温度和气氛的均匀性、操作自动化控制和窑炉的节能。各种窑炉的改进措施，将围绕着这些问题而展开。为此，我们必须学好窑炉中的气体力学、燃料燃烧和传热学等基础理论知识；学会运用这些基础理论进行窑炉设计和窑炉的操作控制。实践证明，基础理论对窑炉实践的指导意义是十分明显的。例如，不符合气体运动规律设计的窑炉，将会造成窑内温度分布不均匀以及烟气过早地离开窑内而造成热量的浪费。气体力学对窑炉烧成制度的控制也有十分重要的意义。又如，不了解燃料的燃烧过程和传热规律所设计的窑炉，就不能保证燃料的完全燃烧和热量的充分利用而造成热效率过低，甚至达不到工艺要求的烧成温度。再如，要减少窑墙、窑顶的散热损失，就必须运用传热学知识来寻求减少散热的途径。这些例子，

都说明了一个道理，那就是不懂科学，不掌握基础理论知识，对窑炉的使用、改进和发展都是不利的。

近几年来，从各种窑炉的发展情况来看，有一个共同的特点：那就是采取了强化有效传热、削弱有害传热的各种措施，使热能得到充分的利用；在窑炉结构上则考虑到更加合乎气体力学、传热学的基本原理，以提高窑内温度均匀性，缩短烧成周期。这都说明基础理论对窑炉发展所起的指导作用。因此，我们应该认真学好热工理论，把基础理论知识与窑炉的热工过程结合起来，做到理论联系实际，学会正确地分析窑炉生产中所出现的问题，不断总结经验，进而来指导生产实践，为进一步改造窑炉和设计窑炉打下良好的基础。

# 第一章 窑炉中的气体力学

在陶瓷工业中，大多数窑炉都是以燃料燃烧所产生的气态燃烧产物作为窑炉内的载热体，在其流动过程中把热量传给窑炉内的制品。因此，在窑炉内燃料的合理燃烧，有效地加热制品，余热的回收以及烟气的排出，都是与气体的流动情况密切相关的。

气体和液体一样，都具有流动性，它们同属于流体。研究流体平衡和运动规律的科学称为流体力学。流体力学基本定律在气体力学研究中仍然是适用的，但是气体（特别是热气体）和液体之间还存在着一定的差别，它们各自具有本身的特性。只有了解气体的特性，才能把流体力学的知识准确地应用于窑炉系统的气体力学研究中。

在学习中我们要加深对基本概念和基本原理的理解，掌握气体在窑炉系统中的流动特点，气体输送设备的工作原理以及烟囱的设计等。

## 第一节 基本概念

### 一、密度

单位体积气体的质量，称为气体的密度。设 $m$ 为气体的质量(kg)， $V$ 为气体的体积( $m^3$ )， $\rho$ 为气体的密度( $kg/m^3$ )，则：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (kg/m^3) \quad (1-1)$$

空气在标准状态(0℃及101325Pa)下的密度为1.293kg/m<sup>3</sup>。对于混合气体的密度，可按下式计算：

$$\rho_m = \frac{1}{100} (\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2)$$

式中

- $\rho_m$ ——混合气体的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合气体中各组分的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——混合气体中各组分的体积百分数 (%)。

## 二、气体的压缩性与膨胀性

气体的体积随气体所承受的压力和温度而改变。气体承受的压力增大时, 气体体积缩小的性质称为压缩性。气体温度升高时, 气体体积增大的性质称为膨胀性。

一定质量气体的体积受温度和压力的影响很大。其相互关系可用气体状态方程式表示

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} \quad (1-3)$$

式中  $V, V_0$ ——质量为  $m$  的气体在某一状态下和标准状态下的体积 ( $\text{m}^3$ );

$p, p_0$ ——气体在某状态下和标准状态下的绝对压强 (Pa);

$T, T_0$ ——气体在某状态下和标准状态下的热力学温度 (K)。

若公式中的  $V, V_0$  代表质量为  $1\text{kg}$  气体的体积, 即为气体的比容。用  $v, v_0$  表示, (1-3) 式又可写成

$$\frac{pv}{T} = \frac{p_0 v_0}{T_0} \quad (1-4)$$

式中  $v, v_0$ ——分别表示某状态下和标准状态下气体的比容 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

当气体温度不变时, 即  $T = \text{常数}$ , 则

$$pV = p_0 V_0$$

或

$$pv = p_0 v_0$$

$$\text{或} \quad \frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ 、 $\rho_0$ ——分别表示某状态下和标准状态下气体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

式 (1-5) 表明, 当温度不变时, 压强和体积成反比, 与密度成正比。即压强增加时, 体积缩小, 密度增大。由此看出, 气体具有压缩性。

气体虽具有压缩性, 但对于陶瓷工业窑炉来说, 由于气体流速不大, 窑内压力的变化甚微, 虽然整个窑内温差较大, 但对窑内某一小段来讲, 温度变化是不大的。因此, 可以近似地看作是不可压缩的气体。只有当系统前后压强变化为原来压强的 20% 以上时, 此气体才看作是可压缩的气体。

当气体压强不变时, 即  $p = \text{常数}$ , 则

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$$

$$\text{或} \quad \frac{v}{T} = \frac{v_0}{T_0}$$

$$\text{或} \quad \rho T = \rho_0 T_0 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明, 当压强不变时, 温度与体积成正比, 与密度成反比。即温度升高时, 体积增大, 密度减小。由此看出气体具有膨胀性。

当压强不变, 气体的工作温度为  $t$  (以  $^{\circ}\text{C}$  计) 时的体积  $V_t$ 、密度  $\rho_t$  及流速  $w_t$  与标准状态的气体体积  $V_0$ 、密度  $\rho_0$  及流速  $w_0$  的关系为

$$V_t = V_0 \frac{273+t}{273} = V_0(1+\beta t) \quad (\text{m}^3) \quad (1-7)$$

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273+t} = \rho_0 \frac{1}{1+\beta t} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)$$



$$w_t = w_0 \frac{273+t}{273} = w_0(1+\beta t) \quad (\text{m/s}) \quad (1-9)$$

式中  $\beta$ ——气体在0℃时的体积膨胀系数,其值为  $\frac{1}{273}$  (1/K)。

上述 (1-7)~(1-9) 各式只适用于理想气体即分子之间完全没有引力,而且分子本身不占有体积的一种假想气体。对于实际气体而言,这些公式是近似的。当在高温和常压下,这些式子对于实际气体具有很好的适应性。在一般陶瓷窑炉内,气体处于高温和微压(微正压或微负压)状态,因此,上述公式能应用于窑炉内热气体。

### 三、气体的粘性

气体内部质点或相邻的两层间因相对运动而产生内摩擦力以反抗相对运动的性质叫粘性。

气体内摩擦力是由气体分子间的吸引力和内部分子紊乱运动而引起的。气体分子的间距大,故分子间的吸引力较弱,并且在温度不变时,吸引力也不变。所以,气体粘性主要取决于气体内部分子的紊乱运动。紊乱运动会使速度不同的相邻气体层之间发生动量交换,速度慢的一层气体分子进入相邻的速度快的一层中去后,速度快的层就会受到速度慢的层的气体分子一种向后拉的作用力;当速度快的层气体分子进入相邻的速度慢的层中去后,又会给慢的层一个向前推的作用力,这种快慢层间的相互作用力,表现为阻碍两层气体作相对运动的阻力,这就是气体产生粘性的主要原因。

假设有相邻的两气体层,下层的速度为  $w$ ,上层的流速为  $w+dw$ ,两层间的接触面积为  $F$ ,垂直距离为  $dy$ ,如图 1-1 所示。

牛顿用实验证实了运动气体之间的内摩擦力的大小与两层气