

全国就业训练陶瓷专业统编教材

陶瓷窑炉与烧成

(试 用)

劳动部培训司组织编写

中国劳动出版社

本书是根据劳动部培训司审订的《就业训练陶瓷窑炉与烧成教学大纲》进行编写的、供就业训练陶瓷专业使用的统编教材，与《陶瓷原料基础》、《陶瓷机械设备》、《日用陶瓷坯釉配制与成型》、《日用陶瓷造型与装饰》、《工业和建筑陶瓷制造》及机械类《电工基础知识》配套使用，学制为一年。

本书内容主要包括：气体力学基本知识，燃料与燃烧、传热学的基本概念，隧道窑的结构及烧成操作，倒焰窑、龙窑和阶梯窑的结构及烧成操作，常用电热元件性能及电热窑炉的结构及烧成操作，热工测量与自动调节的基本知识以及窑具的种类及制造工艺和产品的烧成缺陷分析。

本教材也可供职业学校、在职培训及自学使用。

本教材在编写过程中得到湖南省劳动厅就业培训处、醴陵市劳动局及湖南省陶瓷研究所的大力支持，特此表示感谢！

本书由邓文贵、郭颜倩、陈园园编写，邓文贵主编，梁树林、刘海泉审阅，梁树林主审。

前 言

根据“先培训、后就业”的原则，全面开展就业训练工作，是贯彻“在国家统筹规划和指导下，实行劳动部门介绍就业、自愿组织起来就业和自谋职业相结合”的就业方针和提高职工素质的一项重要措施。为了解决就业训练所需要的教材，使就业训练工作逐步走向规范化，自1986年以来，我司会同中国劳动出版社委托部分省、市劳动人事部门（劳动服务公司），分别组织编写了两批适合初中毕业以上文化程度的青年使用的就业训练教材。

第一批组织编写的就业训练教材有：烹饪、食品糕点、宾馆服务、商业营业、理发、公共交通客运、土木建筑、服装、钟表眼镜修理、无线电修理、家用电器修理、机械加工、纺织、针织、丝织、幼儿保教、财会等十七个专业及职业道德、就业指导、法律常识三门公用的教材。第二批组织编写了造纸、玻璃制造、汽车修理、化纤、胶鞋制造、轧钢、广告装璜等七个专业的教材，并补充编写了八大菜系的实习菜谱。这次又组织编写了电工、化工、陶瓷、制冷技术、印刷、林业等六个专业的教材。上述三十个专业和三门公用的教材，培训其他人员亦可使用。

为了加强学员的动手能力和处理实际问题的能力，方面课教材突出了操作技能的传授，力求把经过培训的人员培养成为有良好职业道德、遵纪守法、有一定专业知识和生产技能的劳动者。

就业训练工作是一项新的工作，参加编写这些教材的有关同志克服了重重困难，完成了编写任务，对于他们的辛勤劳动，表示由衷的感谢。由于编写时间仓促和缺乏经验，这套教材尚有许多不足之处，请各地有关同志在使用过程中，注意听取、汇集各方面的反映与意见，并及时告诉我们，以便再版时补充、修订。

劳动部培训司

1991年7月

目 录

概 述.....	1
第一章 热工基础理论.....	7
§ 1—1 气体力学简介.....	7
§ 1—2 燃料及燃烧.....	16
§ 1—3 窑炉上的热传递.....	48
习 题.....	55
第二章 连续式窑炉.....	56
§ 2—1 隧道窑的种类.....	56
§ 2—2 隧道窑的结构.....	69
§ 2—3 隧道窑的装烧.....	95
习 题.....	113
第三章 间歇窑及半连续式窑.....	114
§ 3—1 间歇窑的种类.....	115
§ 3—2 倒焰窑的结构.....	120
§ 3—3 倒焰窑的装烧.....	127
§ 3—4 半连续式窑.....	141
习 题.....	147
第四章 电阻炉及其它电热窑炉.....	148
§ 4—1 电热元件及其性能.....	149
§ 4—2 电热窑炉的种类及其结构.....	152
§ 4—3 电热窑炉的使用.....	155
习 题.....	159
第五章 窑炉热工测量和自动调节.....	160

§ 5—1 热工测量.....	180
§ 5—2 窑炉的自动调节.....	171
习 题.....	174
第六章 窑具及成品缺陷.....	175
§ 6—1 窑 具.....	175
§ 6—2 成品缺陷.....	183
习 题.....	193

概 述

陶瓷产品种类繁多，由于形状或使用要求不同而生产工艺各异，但有一个共同的特点，都必须在特定的窑炉中进行煅烧，使坯体发生一系列的物理、化学变化，最后形成产品。如果窑炉设计不合理或烧窑操作不当，必然会影响产品的产量和质量，或增加燃料和窑具的消耗，严重时会发生倒窑等事故，产生废品。因此，通常把窑炉形象地称作陶瓷厂的心脏，以此来说明它的重要性。

窑炉的发展经历了一个漫长的过程。在窑炉未出现之前经过了一段“平地堆烧”的时期，距今约有7000~8000年。这种不是窑的“窑”，其烧成温度约700~800°C。

最早的窑称穴窑，是我们祖先在距今约5000年的仰韶文化时期创造发明的，有竖穴窑和横穴窑两种。因用于焙烧原始陶器，也称陶窑。通常，穴窑是在山坡上挖掘而成的，烧成温度在900~1000°C之间。到商、周以后，窑床由不固定到固定，烟的排出也由窑膛的上面转移到窑膛的后面，但还只能烧制少量的器物。因它像一个馒头，故称为馒头窑，窑的烧成温度达1200°C以上，原始瓷器即在那个时期出现。

到了东汉时期（公元61年前后），南方青瓷的出现，标志着从陶器到瓷器，从陶窑到瓷窑的飞跃。它说明在窑炉技术上已能初步控制气氛，在窑炉结构上也渐趋完备。

到宋代，由于我国北方盛产烟煤，先后有陕西铜川窑、安徽白土窑、河南鹤壁窑开始用煤作燃料，这比欧洲在18世纪才开始用煤要早1000多年。由于燃煤的火焰较薪柴短，所

以窑室的尺寸受到限制，到后来馒头窑继续在我国北方发展，逐渐改进为倒焰式煤窑。

我国南方森林茂盛。在窑炉发展过程中很长一段时期都以烧木柴为主。木柴的火焰较长，可使窑室容积增大。经过长期摸索，在山坡上砌筑长形龙窑，使在窑头烧的火焰顺着山势由下向上升至窑尾出去。由于这种窑依山倾斜砌筑，本身就起了烟囱的作用，这也是一种因地制宜的创造。在我国江苏、浙江、福建、广东、江西、湖南等省就从古老的馒头窑逐渐发展成为龙窑。其结构见图0—1。

龙窑的窑身很长，高约1.6~2.0米，宽约1.5~2.5米，长度达几十米，甚至上百米，宛如一条巨龙躺卧在山坡上而得名。这种窑在我国已有2000年以上的历史，至今各地烧制粗陶器的土窑属于此类。

我国景德镇所用的蛋形窑，也是利用烧柴的特点，从馒头窑吸取龙窑的优点发展而来的又一种特殊形式的窑。它的形状非常象半个鸡蛋覆在地上而称之“蛋”形窑。大头叫窑头，是烧火的地方，只有一个烧火口。小头叫窑尾，在窑尾有一个烟囱。窑室前大后小。前部窑顶约高6米左右，宽5米，长约17米；后部窑顶高约3米，宽约2米；烟囱也为蛋形，下部直径约2.3米，顶口径约1.3米，高度约等于窑室的长度。耐火墙与外墙之间有10厘米左右空隙，为受热膨胀及空气绝热之用。这种窑创始于唐武德年间，至今已有1300多年的历史。名闻中外的景德镇瓷器——白里泛青以及著名的青花瓷与铜红釉等色釉瓷都是在这种窑内用还原焰烧成的。

阶梯窑是我国南方以柴作燃料，依山倾斜砌筑的另一种形式的窑。因其约在明代首创于我国福建德化，故又称为德化窑。阶梯窑由龙窑发展而来，它由4至10间分开的窑室组

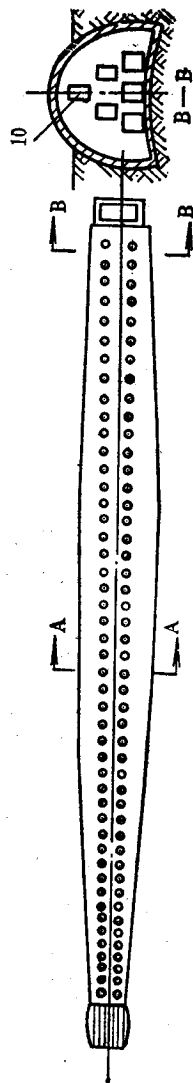
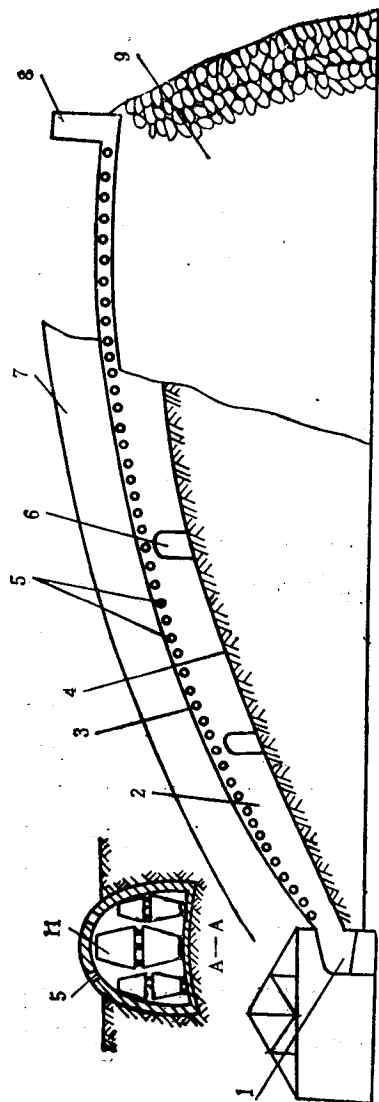


图0-1 龙窑结构示意图

1—顶热燃烧室 2—窑室 3—窑底 4—窑顶 5—投柴孔 6—窑门 7—窑窗 8—窑窗 9—山坡 10—排烟孔 11—制品

成(7~8间居多)，各窑室大小不等。全长约为15~30米之间。每间窑室都设有燃烧室，又有通火孔相互通连。每个窑室设有窑门，供装、出窑用。窑尾设有烟囱(3~4个)，其窑体本身也起着烟囱的作用。

阶梯窑虽由龙窑发展而来，但某些方面不及龙窑。窑内的温差较大，一般是前上部温度高，整个下部温度较低，阶梯窑的燃料消耗比倒焰窑少，这是由于阶梯窑的余热利用比倒焰窑好。烧成时烧头一间，烟气通过通火孔流入第二间、第三间……至窑尾烟囱排出。将烟气的余热传给了后几间的制品。这样一间间地烧下去，易于控制还原气氛，故烧出的产品质量比龙窑好。

自用煤作燃料后，阶梯窑结构又发生了一场变革。烧煤时就得另外设置烧煤的燃烧室，并从第二间开始在每间隔墙前的窑顶上加设一个烟囱。

阶梯窑至今在福建、广东、湖南等地还在使用。

17世纪以来，随着我国制瓷技术的外传，我国古窑相继在日本、西欧出现。西方工业革命的兴起，窑炉技术日益得到改进，我国的古窑就显得相形见绌了。

到了1858年，开始出现隧道窑。世界上第一条隧道窑是丹麦弗伦斯堡的制砖技师汉斯·约特设计建造的。隧道窑的出现和推广使用给陶瓷生产技术带来了飞跃。它把原来的间隙式生产变为连续性生产，大大提高了生产效率，充分利用了燃料。如图0—2所示，隧道窑一般分为三带，成型后的形坯，经过预热带预热排除水分，然后进入高温烧成带烧成，再经冷却带冷却后推出产品。

窑炉发展到今天，隧道窑已成为陶瓷厂的主要生产设备。我国已有大小隧道窑2000多条。但隧道窑的建造质量与

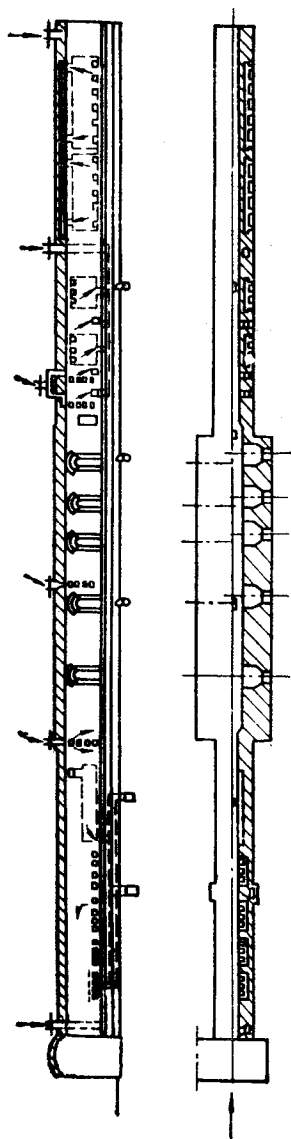


图0—2 隧道密结构示意图

材质和国外一些先进国家比较，差距仍然较大，特别是耐火材料、燃烧器和控制仪表方面，相差更远。加上我国一些基础工业部门发展缓慢，使得国内窑炉发展受到限制。

今天，窑炉已向自动控制方向发展。国外如西德、意大利、日本、美国等对窑炉已实现电脑控制。窑炉的温度、压力、气氛基本满足生产工艺的要求。各项热工指标（如产量、单耗、热效率、炉龄等）也不断得到提高。今后随着科学技术的发展，新材料的不断出现，更加完美的热工窑炉一定能够很快出现。

第一章 热工基础理论

无论是设计窑炉还是操作窑炉都是以气体力学、燃烧学、传热学三大基础理论作为理论依据。气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的一门科学。传热学是研究热能传递规律的科学。

§1-1 气体力学简介

一、气体力学基本概念

1. 气体的物理属性

(1) 压缩性与膨胀性 众所周知，液体具有不可压缩性，且受热时体积膨胀极小。在重力作用下，当容器的体积大于液体自身体积时，液体不能充满整个容器而只能形成一个自由面（液面）。与液体比较，气体则具有很强的压缩性与膨胀性。气体没有一定的表面，没有一定的形状，故能充满整个容器，受热时，体积膨胀，压力显著增大。

大部分物体都有热胀冷缩性，但是固体和液体就没有气体那么明显。这是由于它们内部结构紧密和分子间排斥力不同所致。压强和温度的改变对气体的密度影响很大。在温度不太低、压强不太大时，压强、温度和气体密度三者间的关系服从理想气体状态方程。即：

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-1)$$

式中 P ——气体的绝对压强 (牛/米²) ;
 V ——气体体积 (米³) ;
 M ——气体质量 (千克) ;
 μ ——气体摩尔质量 (千克/摩尔) ;
 T ——气体绝对温度 (K) ;
 R ——普通气压常数, $R = 8.3144$ 焦耳·摩尔/K。

当气体质量一定, 温度不变时,

$$PV = C \quad (1-2)$$

或
$$\frac{P}{\rho} = C'$$

式中, ρ 为气体密度, C 、 C' 为不相等的常数。

公式1-2表明, 在等温情况下, 压强与体积成反比, 与密度成正比。而在压强增加时, 体积缩小, 密度增大。由此看出, 气体具有压缩性, 但气体不能无限地压缩, 达到极限密度时 (此时压强称极限压强), 密度便无法增大了。

气体虽有压缩性, 但在任何情况下都可表现出来。例如, 在气流速度不大 (比音速小得多), 压强和温度变化很小时, 气体的体积变化很小, 则可近似地认为气体是不可压缩的, 这种能够忽略其压缩性的气体称为不可压缩的气体。陶瓷窑炉内的气体流速都很低, 一般只有2~3标米/秒^①, 窑内各部位之间最大压强差只有20~500帕, 窑内每一段的温度变化很小 (虽然整个系统的温差较大), 所以, 陶瓷窑

注: ① 标米/秒表示气体在标准状态下的流速。

内的气体可看作不可压缩的气体。密度不是常数的气体，称为可压缩气体，一般将系统前后压强变化为原来气体压强的20%以上的气体称作为可压缩气体。

(2) 粘性 气体内部质点或流层间因相对运动而产生内部摩擦力以反抗运动的性质叫粘性。内部摩擦力由气体分子间的吸引力和内部分子的紊乱运动引起。这种紊乱运动会使速度不同的相邻气体层之间发生质量和动量的交换。气体分子间距大，分子间吸引力较弱，在温度不变时，吸引力也不变。所以，气体的粘性主要取决于气体内部分子的紊乱运动。

在流体力学中一般用 μ 来表示与流体性质有关的比例系数，单位为牛·秒/米²。

由于 μ 反映了粘性的动力学特性，所以称 μ 为动力粘度或简称粘度。粘度是衡量气体粘性大小的物理量，其单位还可使用泊(P)表示。

$$1\text{泊} = 10^{-1}\text{牛}\cdot\text{秒}/\text{米}^2$$

(3) 浮力 一块木块放于水中能浮在水面而不沉入水底。是因为木块受到了一个比其本身重力大的浮力。同样，热烟气在空气中也受到空气对它的浮力作用。

例如，在 ρ_a 为1.2千克/米³的大气中有两个同样大小的流体柱（高10米、截面积1米²），一个是水，

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000\text{千克}/\text{米}^3$$

一个是热烟气，

$$\rho = 0.6\text{千克}/\text{米}^3$$

根据阿基米德定律流体柱受到的浮力为

$$\text{浮力 } F = V \cdot \rho_a \cdot g$$

$$= 10 \times 1 \times 1.2 \times 9.8$$

$$= 117.6 \text{ 牛}$$

$$\text{水柱重力 } W_1 = 10 \times 1 \times 1000 \times 9.8$$

$$= 98000 \text{ 牛}$$

$$\text{烟气柱重力 } W_2 = 10 \times 1 \times 0.6 \times 9.8$$

$$= 58.8 \text{ 牛}$$

从上面计算结果看出，水柱受到的重力比水柱所受浮力大832倍。所以浮力影响可忽略不计，水柱只是受重力作用，总是由高处向低处流动。而热烟气所受浮力却比烟气柱重力大1倍。所以热烟气在没有外界机械能加入的情况下，全靠净浮力的作用自行向上流动。

2. 气体流动的基本原理

任何一个物体运动都有它自己本身固有的规律，气体流动也不例外。下面介绍几个气体流动的基本原理及其表达式。

(1) 质量守恒原理 这里指的是流动气体的质量守恒，在气体力学中，质量守恒原理称为连续性原理。反映这个原理的数学表达式叫做连续性方程式。

$$\omega_1 F_1 \rho_1 = \omega_2 F_2 \rho_2 \quad (1-3)$$

若气体为不可压缩气体，则有：

$$\omega_1 F_1 = \omega_2 F_2 = \text{常数} \quad (1-4)$$

式中 ω_1 ——通过流管截面1的流速，

ω_2 ——通过流管截面2的流速，

F_1 ——流管截面1的面积（垂直于管轴），

F_2 ——流管截面2的面积（垂直于管轴），

ρ_1 ——流管截面1处的密度，

ρ_2 ——流管截面2处的密度。

公式1—3和公式1—4成立的条件是流管内的气体是稳定

流动状态。

(2) 能量守恒原理 物质可以具备多种形式的能量，如机械能、内能、电能、核能等。不同形式的能量可以相互转换，但能量既不能产生，也不能消灭，这就是能量的转换和守恒原理，是自然界的普遍规律。

在气体流动系统里，气体的能量主要表现为机械能和内能。如果系统中没有加热或冷却，气体没有粘性，就不会因内摩擦而发热，使部分机械能转化为热能。内能是指物质内部的总能量，包括物质内部分子运动的能量，分子间的位能、分子内的能量、原子核内的能量等。内能是物质的属性。物质在一定的状态下，其内能是一定的。温度和比容改变，状态改变，内能也随之改变，对于不可压缩的气体，其密度或比容不变，系统的内能就保持不变。这样进行能量衡算时，内能可以不考虑，只要进行机械能的衡算，能量衡算式叫做伯努利方程式。

在陶瓷窑炉系统中冷热气体共存（窑内热烟气、窑外冷空气）。由于窑炉内热气体有粘性，故流动时会产生能量损失，一般用 Σh_e 表示。

图1—1是表示管内或窑炉系统的热烟气从截面1—1流至截面2—2，平均密度为 ρ 。外界空气假定是静止的，平均密度为 ρ_a 。则冷、热气体共存时的伯努利方程式为：

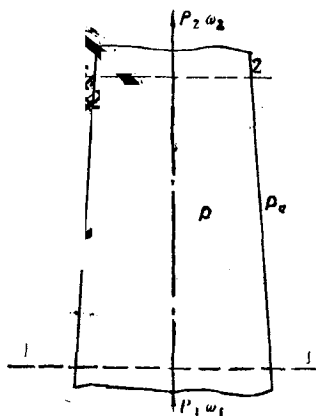


图1—1 冷热气体共存时热烟气的流动