

中等专业学校试用教材

陶瓷工业热工设备及热工测量

张长海 主编

武汉工业大学出版社

中等专业学校试用教材

陶瓷工业热工设备及热工测量

张长海 主编

武汉工业大学出版社

内 容 简 介

本书为中等专业学校陶瓷专业教材。全书共分十章，其中热工设备部分(七章)，对倒焰窑、隧道窑、电热窑炉及干燥设备的原理、结构、设计计算、操作制度与故障处理以及筑炉材料特性，作了较细致而实用的阐述。热工测量部分(三章)结合陶瓷工业热能利用现状和节能目标，介绍了热平衡测试和计算，热工测量及控制仪表和陶瓷窑炉的节能新技术。

本书紧密结合陶瓷工业生产实际，文字通俗易懂，是一本实用的教材。
本书也可供从事该专业的工程技术人员、技术工人阅读参考。

中等专业学校试用教材 陶瓷工业热工设备及热工测量

张长海 主编
责任编辑 曹文聪

武汉工业大学出版社出版(武昌街道口)
新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经售
中南三〇九印刷厂印刷(湖北安陆九号信箱)

开本：787×1092毫米1/16 (照排胶印) 印张：21.5 字数：513.8千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷

印数：1—2000册

ISBN 7-5629-0056-6/TQ·0001

定价：4.25元

前 言

本书是根据国家建材局人才开发公司1984年在襄樊召开的中专陶瓷专业教材编审会议规定的计划编写的。读者在使用本书前已具有流体力学、燃料及燃烧技术、传热学等热工基础知识。

本书共分十章。第一章主要介绍陶瓷制品加热过程的特点及有关的物理化学变化过程。第二至第四章分别介绍了以燃料为热源、加热制品的间歇式窑炉和连续式窑炉。第五章为电热窑炉。第六章为筑炉及筑炉材料。第七章介绍干燥过程与干燥器。第八章为窑炉热工测量及仪表。第九至第十章为窑炉热平衡测试与节能。

鉴于陶瓷工业窑炉结构的多样性，为了发展学生的能力，使读者能举一反三，本书在介绍各种窑炉时，着力于分析窑内进行的热工过程，并联系过程分析窑炉的结构与特点。为使本教材既适应中等专业学校学生的特点，同时又可用作职工培训和陶瓷类高级技工学校教材，在讨论每种类型窑炉时均以一种典型为例，较详细地介绍其操作控制、日常维护及事故处理方法。并给出了一定数量的例题与习题。使用本教材时，可根据具体要求加以取舍。

理论联系实际，提高学生解决实际问题的能力是窑炉教学中的重要一环。因此，增强学生进行窑炉热工实验的动手能力是非常必要的。根据编者的教学实践，应当测定哪些参数，如何测定这些参数，包括测点位置的选择，测试方法和仪表选型，仪表的用法等，这些实际问题往往使初学者感到束手无策。因此，本教材在介绍热工测量及仪表时，重点放在窑炉热工参数的测试方法，仪表的工作原理及用法上，不仅介绍工业上常用的控制测量仪表，而且介绍了目前现场临时标定时常用的仪表。对自动调节部分，限于本书的篇幅，仅将典型调节系统作了概略介绍。

陶瓷也是耗能较高的产品，能源消耗一般在成本中占20~30%，因此节能工作是非常重要的，基于这一目的，本书介绍了陶瓷窑炉热平衡测算，能源管理和节能方法的基本知识。

本书由张长海主编，其中第一、二章由何华敏编写，其余各章由张长海编写。

本书由武汉工业大学舒斯裕主审，参加审稿的人员有：襄樊市建筑陶瓷厂钟长瑛，襄樊市建陶装饰材料厂李忠奎。

在本书编写过程中曾得到国家建材局人才开发司范令惠同志的具体指导，得到襄樊市建材总公司和建材技校的大力支持。华南工学院羊淑子、黄炳均，湖北省建材工业协会石荣华以及石湾建国瓷厂，襄樊市建筑陶瓷厂等为本书提供了许多有价值的参考资料，在此一并致谢。

由于编者水平有限，对书中的缺点错误，恳请广大师生和读者给予批评指正。

编者

一九八八、七、一

目 录

第一章 概论	1
第一节 陶瓷工业窑炉的特点与分类	1
第二节 中国古代陶瓷窑炉概述	2
第三节 陶瓷制品焙烧过程中的物理化学反应	5
第四节 陶瓷制品在加热与冷却过程中的应力分析	11
第二章 倒焰窑	13
第一节 概述	13
第二节 倒焰窑的结构	15
第三节 倒焰窑设计	23
第四节 倒焰窑的操作控制	32
第五节 倒焰窑烧成过程中故障的排除	25
第六节 近代间歇窑	36
第三章 隧道窑	39
第一节 概述	39
第二节 隧道窑的工作系统与热工制度	40
第三节 隧道窑窑体	46
第四节 隧道窑的三带	65
第五节 隧道窑的附属设备	76
第六节 隧道窑内气体的流动与传热	81
第七节 隧道窑的设计	105
第八节 隧道窑的烘烤与操作控制	125
第四章 其它类型的隧道窑	140
第一节 隔焰隧道窑	140
第二节 辊道窑(辊底窑)	144
第三节 推板窑	153
第四节 多通道式隧道窑	155
第五节 新型连续式窑	157
第五章 电热窑炉	161
第一节 电热元件的性能	161
第二节 电阻炉的热工计算	168
第三节 电阻炉的供电与功率调节	177
第四节 电阻炉的安装与使用	179
第六章 筑炉材料	184
第一节 耐火材料	184
第二节 隔热保温材料	190
第三节 一般建筑材料	194

第七章 干燥过程与设备	197
第一节 湿空气的特性参数	198
第二节 I-X图及其应用	201
第三节 干燥过程的物料平衡与热平衡	204
第四节 干燥过程计算	207
第五节 干燥机理	212
第六节 干燥设备	217
第七节 喷雾干燥器设计	230
第八章 窑炉热工测量及控制仪表	233
第一节 温度测量仪表概述	234
第二节 热电偶温度计	235
第三节 电阻温度计	246
第四节 辐射式温度计	249
第五节 压力与压差的测量	255
第六节 流速与流量的测量	260
第七节 热流量的测量	272
第八节 气体成分和湿度的测量	273
第九节 窑炉自动调节	277
第九章 窑炉热平衡测试	285
第一节 陶瓷隧道窑的热平衡测试	285
第二节 隧道窑的实测热平衡与热效率的计算方法	290
第三节 间歇式窑炉的热平衡测试	304
第十章 陶瓷窑炉的节能	310
第一节 基本概念	310
第二节 陶瓷窑炉的节能	313
第三节 陶瓷窑炉的余热利用方法	315
第四节 热管换热器的应用	318
附表	321
一. 工程单位制和国际单位制的换算	321
二. 烟气的物性参数(压力为101325Pa时)	323
三. 干空气的物性参数(压力为101325Pa)	323
四. 筑炉用耐火材料的性能	325

附图

一. 干燥过程的物料平衡与热平衡	204
二. 干燥过程计算	207
三. 干燥设备	217
四. 喷雾干燥器设计	230
五. 窑炉热工测量及控制仪表	233
六. 窑炉热平衡测试	285
七. 陶瓷窑炉的节能	310
八. 热管换热器的应用	318

第一章 概 论

第一节 陶瓷工业窑炉的特点与分类

窑炉是陶瓷工厂的主要热工设备，在陶瓷厂的基建费用中窑炉的投资占较大的比例。陶瓷制品生产的最后一道主要工序——烧成，都是在窑炉中进行的。因此，在陶瓷工厂俗有“原料是基础，烧成是关键”之说，可见窑炉非常重要。窑炉结构的合理与否、烧成操作水平的高低，都直接影响到产品质量和生产成本，关系到一个企业的生存。由此可见窑炉与陶瓷工业关系之密切和重要，可以说，陶瓷工业的历史有多长，窑炉的发展史就有多长。难怪至今有一些国家把陶瓷工业称作“窑业”，如日本把陶瓷杂志称为“窑业协会志”。

什么是窑炉呢？可以这样说：窑炉实质上是一种对制品进行热加工的设备，它把燃料的化学能转变成热能或直接把电能转变成热能，以满足制品焙烧时所需温度，从而按照人们的具体要求，完成一系列的物理化学变化，赋予制品各种宝贵的特性。

焙烧陶瓷制品的窑炉类型很多。同一种制品可以在不同类型的窑内烧成；同一种窑也可以焙烧出不同的制品。因此，在选择窑炉时，为了满足陶瓷制品的工艺要求，应充分了解窑炉类型及其优缺点，考察一些与已生产产品同类的有关陶瓷厂，然后结合本厂实际情况和必要的技术论证，方可定之。

判断一个窑炉好坏的标准，通常由以下几个方面来评价：

1. 必须满足被烧成制品的热工制度要求，能够焙烧出符合质量标准要求的陶瓷产品。
2. 烧窑操作要灵活、方便、适应性强，能够满足市场多变的要求。
3. 经济性要高。包括热效率要高，单位产品的综合能源消耗要少，炉龄要长（大修间隔时间长），基建投资费用要少等。
4. 容易实现机械化、自动化操作，劳动生产率高。
5. 劳动条件好，劳动强度小，环境污染小。

以上几点，其中能否满足所烧制品的热工制度要求，是衡量陶瓷窑炉性能好坏的重要技术指标。实际生产中，往往是力求使制品焙烧时窑内温差尽量减少，它是提高产品合格率的关键所在。但要做到这一点，是十分困难的。因为任何生产窑炉必有一定的容积空间，要作到整个窑室内上下、左右均衡的加热陶瓷制品，涉及到的问题很多，如窑炉结构、筑炉材料、燃料品种、烧成操作水平等诸方面。这是人们一直着力研究解决的重要课题。

目前，陶瓷工业生产中所使用的窑炉种类很多，分类方法也很多，见表1-1。

陶瓷窑炉的分类方法还有很多，有的还根据被烧制品来分类。人们为了称呼某一座窑炉，可以结合窑的具体用途和形状来命名，如连续式隧道窑，若用于素烧，就叫做“素烧隧道窑”；若用于釉烧，就叫做“釉烧隧道窑”。也有的同时结合所用燃料、被烧制品和窑的外形来称呼，如“油烧卫生瓷隧道窑”、“煤烧墙地砖隧道窑”等。

此外，各类窑炉，还可从不同角度来进行分类。以隧道窑为例，可按其窑室通道的多少

陶瓷窑炉的分类

表1-1

分类方法	名称	主要特点
按使用燃料分	柴窑	以木柴为燃料。
	煤窑	以煤为燃料。
	油窑	以重油、轻柴油等为燃料。
	煤气或天然气窑	以煤气(或天然气)为燃料。
	电窑	利用电能转变为热能。
按火焰流动方向分	升焰窑	火焰由下而上焙烧制品, 窑顶排烟。
	平焰窑	火焰流动方向近于水平。
	半倒焰窑	火焰由前方上升, 再倾斜流向后方下部、从烟囱排出。
	倒焰窑	火焰由上向下, 流入窑底、从烟囱排出。
按形状分	圆窑	外形为圆形。
	方窑	外形为方形。
	隧道窑	外形象一条隧道。
	阶级窑	窑内分许多间, 逐级倾斜向上。
	龙窑	外形象一条长龙, 斜伏在山坡上。
按焙烧过程的连续与否分	间歇窑	装、烧、冷、出等操作周而复始地进行, 生产是间歇、分批地进行的。
	半连续窑	窑分若干段, 装、烧、冷、出等操作在各段分别进行, 具有连续窑的性质; 但这些段都不是固定存在的, 而是先后减短和消失, 最后又重新开始, 具有间歇窑的性质。
	连续窑	窑分若干段, 装、烧、冷、出等操作在这些固定段同时进行, 且各段热工制度相对稳定不变, 生产是连续进行。
按用途分	干燥窑	成型后的坯体, 送入窑内干燥, 排除水分, 窑温较低。
	素烧窑	将未施釉的坯体送入窑内进行焙烧, 增加其强度, 便于进行上釉装饰。经素烧后的坯体, 可施釉后进行焙烧(即釉烧)。
	本烧窑	对干燥后并施釉的坯体直接送入窑内焙烧。
	烤花窑	焙烘贴花或彩绘的产品。

分为单通道隧道窑和多通道隧道窑; 还可按窑内火焰与制品是否接触, 又分为明焰式、隔焰式和半隔焰式隧道窑等等。

第二节 中国古代陶瓷窑炉概述

我国是最早开始生产陶瓷的国家, 也是创建窑炉最早的国家, 在世界上享有盛誉。

我国的陶瓷窑炉发展经历了一个漫长的历史过程。从西安半坡村窑炉遗址的发掘中, 证明远在五千年前, 我们勤劳智慧的祖先就能建造升焰式的竖穴窑、横穴窑, 用来焙烧原始陶器。又从广东增城、浙江绍兴、湖北江陵等地考古发掘的资料证明, 在二千五百年前的战国时期, 我们的祖先, 依山的斜坡建造了烧陶瓷的龙窑, 稍后又创建了阶级窑和景德镇窑。这些窑炉不但建造方便, 而且还能有效地利用地形条件, 使窑内火焰自然上升流动烧成陶瓷制品, 较好地利用燃料燃烧时所放出的热量。有的窑在人工操作时, 利用改变窑身断面和添加燃料的多少来控制火焰流动方向和速度, 使窑内保持较适宜的温度、压力和气氛, 从而烧出较高质

量的陶瓷产品。这也符合现代陶瓷窑炉热工理论的原理。由此可见，中国陶瓷闻名世界是与窑炉的发展分不开的。

我国古代陶瓷窑炉主要有：古窑、龙窑、阶级窑和景德镇窑。下面分别进行简单介绍：

一、古窑

古窑，在五千多年前我们的祖先就用来焙烧原始陶器。古窑有竖穴和横穴窑两种，其中最具代表性的是横穴窑。图1-1是西安半坡村遗址发掘出的横穴窑的复原示意图。

这种窑是升焰式窑，是我国古代劳动人民利用燃料燃烧时火焰向上这一自然路线修建的。它由燃烧室、火道、火眼及窑室等部分构成，窑的容积很小，直径只有0.8m左右，大的陶器只能烧一件，较小的陶器可烧四、五件。燃烧室的尺寸长约0.9m，宽约0.7m，高约0.8m。窑底四周有环形火道，中部另有一条倾斜火道，将窑底平面分为两部分，火道宽约0.1m，平均深约0.6m，火道与燃烧室相通。

窑室与火道垂直，接近圆型，烟气经火道由火眼进入窑室，而且接近火道处的火眼较小，远离火道处的火眼较大。这种差别，充分体现了我们的祖先已知道利用火眼的大小与分布来控制流过烟气的多寡，以减少窑内温差的原则。

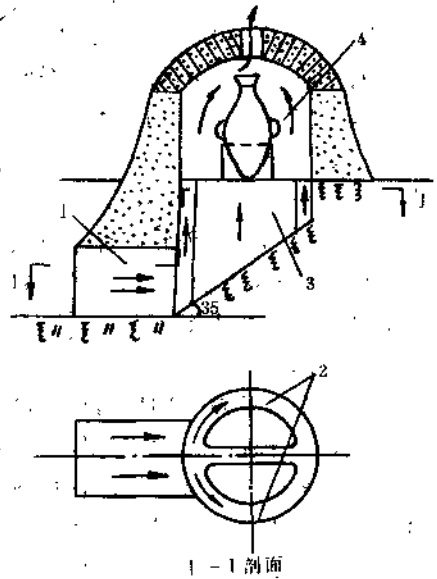


图1-1 古窑复原示意图

1—燃烧室；2—环状火道；3—中火道；4—窑室

二、龙窑

龙窑多依山坡倾斜砌筑，形状似龙，故称为龙窑。现在我国南方的江苏、浙江、广东、福建、江西、湖南等省，还有少量用来烧陶器的龙窑。

龙窑的结构比较简单，常在山坡上挖一条倾斜通道作为烧成室。倾斜通道的角度与地平线构成 $10\sim 20^\circ$ 的倾斜角。窑长一般为 $30\sim 80\text{m}$ ，内宽 $1.5\sim 2.5\text{m}$ ，内高约 $1.6\sim 2\text{m}$ ，容积约 $50\sim 400\text{m}^3$ 。窑顶上设有投燃料孔，窑墙的一侧，沿窑长开有 $2\sim 4$ 个高约 1.8m 的窑门。窑头设有供点火用的燃烧室，窑尾一般不设烟囱或设 1m 多高的烟囱。因为龙窑自然倾斜向上，本身就起着烟囱的作用。燃料有煤、茅柴和树枝等。

从龙窑的横断面来看，窑头容积最小，中部最大，尾部又较小；窑身的倾斜角度又是由下向上逐渐减小，窑头倾角约 20° ，中部约 15° ，后部约 11° 。从热工观点来说，这样的安排是十分有利的。烧窑开始时，需要的热量较多，而窑头横截面小，倾角又大，有利于热量集中和向上流动；中部截而最大，倾角稍小，使窑内火焰流速减缓，保证了传递热量给制品的时间，有利于制品烧成；窑尾截面又较小，使烟气流速增大，保持了一定的动压，有利于排烟。

龙窑在装好制品烧成时，其烧成带是逐渐向窑尾移动的。烧前段时产生的高温烟气在几何压头作用下，把后段制品预热，然后排出；等前段制品烧好后，又利用冷却时放出的热量，预热进入烧成带的空气。从而有效地利用了废烟气的热量和制品冷却时放出的热量，提高窑内温度，减少单位产品的燃耗，热利用率较高，这是龙窑的一大优点。其次还有结构简单，

建造方便，烧成时间较短，产量较高等优点。主要缺点是：装、出窑的劳动强度大，难于实现机械化和自动化，窑内温度与气氛波动较大等。

三、阶级窑

阶级窑是由龙窑逐步改进而来的，大约在明代首创于我国福建德化，故又称为德化窑。它象龙窑一样，也是依山坡倾斜建筑，不同的是各窑室均砌筑成阶梯形。

一座阶级窑一般由5~10间容积不等的烧成室串连而成。其倾斜角度一般为 $18^{\circ}\sim 22^{\circ}$ ，窑头的1~2间烧成室因距烟囱远，倾斜角度比窑尾几间大，有的达 25° 左右。窑全长为15~30m，各烧成室的总容积一般为 $200\sim 250\text{m}^3$ 。烧成室的内高一般为2~3.5m，内宽为3~4m，长3m左右。每室容积大小不同，一般是窑头窑尾小，中间大，如烧瓷器的阶级窑，小间约 20m^3 左右，大间为 $30\sim 40\text{m}^3$ 。每一室隔墙下面有通风孔(又称为囱脚眼)，每室前方靠墙处设有炉栅，后顶上开设有排气孔，同时每边各开一个窑门，供装出窑之用。窑的前端设有点火用的燃烧室，也有不设的(如烧煤阶级窑)，但须在第一间窑室的两边设燃烧室。由于阶级窑是倾斜砌筑，窑体就有排烟作用，因此，烧柴阶级窑只须在窑尾设3~4个小烟囱；烧煤阶级窑(产生于五十年代末期)要求抽力较大(尤其是窑头几间)，故从第二间窑室起，在每堵隔墙处的窑顶上都要加设2~3个小烟囱。

阶级窑的优点是结构比倒焰窑、隧道窑简单，耐火材料用量较少，不需要钢材加固。能利用上间的烟气预热下间以后的生坯和用产品冷却放出的热量预热下间助燃空气。一般在上间窑室焙烧止火时，下间窑室的温度可达 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，从第五间窑室开始，以后各间窑室的焙烧时间只需要4~5小时。因此，阶级窑的燃料消耗比倒焰窑少。由于窑内多呈正压，控制还原气氛较易，故制品烧成质量比龙窑好。其缺点是窑内上下、前后的温差较大，宜采用2~3种不同的坯釉配方制品，装入窑内焙烧。其次，工人劳动强度大，难以实现机械化和自动化操作。

四、镇窑(又称景德镇窑)

景德镇是我国的瓷都，在世界上久赋盛名。驰名中外的景德镇古代瓷器就是在镇窑中焙烧的。镇窑出现于一千多年前，是世界上最早用来焙烧瓷器的窑。

镇窑是一种大型单室窑，其外形近似半个平卧在地的鸭蛋，故又称为蛋形窑，其结构示意图1-2所示。窑的容积约 200m^3 ，窑身全长16~18m，窑室前端高而宽，后端矮而窄。在窑室前面有一个烧火口，即火坑2，燃料为松柴，火焰在窑内趋于水平方向流动来焙烧制品，废气经烟囱底5进入烟囱6，然后排出。窑底为实体，前端低于后端约40~50cm，其倾斜度约为 3° 左右；窑前端正

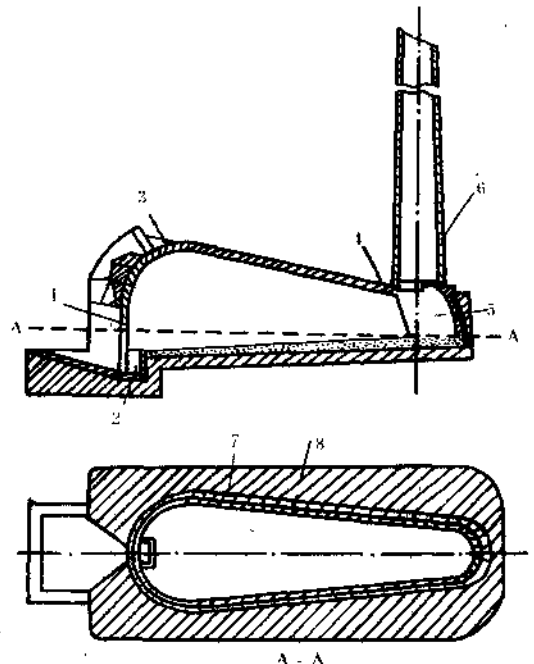


图1-2 景德镇窑结构示意图

- 1—窑门；2—火坑；3—发火孔；4—后看火孔
5—烟囱底；6—烟囱；7—间隙；8—护墙

中间设有窑门1，高约2.7~3.2m，宽约0.6~0.7m，供装、出窑用。长方形火坑2设在窑门内侧，宽约0.7~0.8m，深约1m，供烧窑时架设临时炉栅用。烟囱设在窑身最后端，高约16~18m，壁厚0.1~0.12m。

此外，镇窑的窑壁和窑顶也很薄，约0.20~0.24m。在窑壁与护墙之间留有0.2~0.3m的空隙(图中7)，由于间隙内的空气与外界不通，起到了隔热作用，既可减少向窑墙周围散失的热量，又可减少窑体的蓄热，故镇窑升温快，降温也快，可在16~24小时使窑温达到1280~1300℃。

镇窑的优点是结构简单，砌筑方便，造价低；窑体蓄热及散热损失较小；窑次周转较快(3天窑次)。缺点是操作管理复杂，没有具体稳定的烧成制度，纯凭经验操作；燃料资源困难，价格高昂；使用寿命短，每座窑一般只能烧80~90次；劳动条件差。

除上述古代窑炉外，还有一种窑，叫馒头窑，因其外形似馒头而得名。它是一种半倒焰窑，窑的容积一般为40~70m³，与镇窑一样，燃烧室和窑室也同在一个空间，每次装完窑后砌窑门时留一加煤口。窑后部设一烟囱，高约4~6m。以煤为燃料。解放前，此窑在我国华北地区还广为应用。

通过对我国古代陶瓷窑炉的学习，可以加深对现代陶瓷窑炉的认识。因为窑炉也是在生产实践过程中逐步发展变化的，如为了克服古代升焰窑水平温差大的弱点，逐步发展了现在的倒焰窑；现代快烧窑炉的设计思想又是汲取了镇窑窑体蓄热低的优点。通过这些实例，可以看到我国劳动人民的卓越贡献。

第三节 陶瓷制品焙烧过程中的物理化学反应

陶瓷制品的焙烧过程甚为复杂，无论采用何种工艺(一次或二次烧成)、何种窑炉烧成，在焙烧过程的各个阶段中均将发生一系列物理化学变化。表1-2列出了陶瓷坯体在焙烧过程

陶瓷坯体焙烧过程中的物理化学变化 表1-2

阶段名称	温度范围 (℃)	主要作用	
		物理变化	化学变化
低温阶段	室温~300	1. 排除机械水、吸附水； 2. 重量减轻，气孔率增大。	
氧化分解阶段	300~950	1. 重量急速减轻； 2. 气孔率进一步增大； 3. 硬度与机械强度增加； 4. 体积稍有变化。	1. 氧化反应：①碳素及有机物氧化；②硫化铁氧化。 2. 分解反应：①结晶水分解排除；②碳酸盐分解； ③硫酸盐分解；④氢氧化铁分解。 3. 晶型转变：①石英的晶形转变；②三氧化二铝的晶型转变。
高温阶段	950~烧成温度	1. 强度增加； 2. 气孔率降低到最小值； 3. 体积收缩，密度增大； 4. 色泽变白，光泽增强。	1. 继续氧化、分解； 2. 形成液相及固相熔融； 3. 形成新结晶相； 4. 形成低铁硅酸盐。
保温阶段	烧成温度下维持一定时间	坯体结构更为均匀致密。	1. 液相量增多； 2. 晶体成长(增多、长大)； 3. 晶体扩散，固、液相分布更为均匀。
冷却阶段	烧成温度~室温	1. 液相中结晶； 2. 液相的过冷； 3. 硬度和机械强度增大。	晶型转变。

中的物理化学变化的基本类型。认真研究和掌握这些变化是非常必要的。其重要意义如下：

1. 为制订合理的烧成制度，选择所需要的窑炉设备，提供可靠的依据。同时，为窑炉的设计与改进，提供必要的技术资料。

2. 研究在何种窑炉与条件下，陶瓷坯体可迅速地完成与表中类似的理化变化。从而，为快速烧成提供理论依据，有利于快烧技术的发展。

3. 能使烧窑工人做到“胸中有数”，以便更自觉、更有效地从事烧窑工作，并在此基础上不断改进窑炉操作技术。

4. 为烧成缺陷的分析提供理论根据，有利于减少和克服制品的烧成缺陷。同时，还可反馈于工艺生产中，以研制出最佳的坯、釉料配方，改进工艺条件，达到优质、高产、低消耗。

另外，需要说明的是，对低温焙烧的陶瓷坯体，表1-2中烧成温度将降低，表列的大部分反应通常是同时进行的，没有如表所示的明确层次。其次，对陶质坯体焙烧过程中出现液相的反应不是最重要的，而固体颗粒之间在热作用下的相互反应是形成制品的基本反应（即固相反应）。

下面按陶瓷制品在焙烧过程中各阶段及物化变化顺序，结合窑炉的烧成操作与控制，叙述如下：

一、低温阶段（室温~300℃）

低温阶段也称烘烤阶段。主要作用是排除陶瓷坯体中的残余水分，建陶产品的坯体入窑水分一般要求在2%以下。坯体只发生物理变化，如重量减轻、气孔率增加、体积有微小收缩、强度增加等物理现象，而不发生化学变化。

在此阶段如坯体中含残余水量大，烧窑操作要注意，升温均匀、平缓，不要过快过猛，升温速度一般以40~50℃/小时为宜。否则，窑内产生大量水蒸汽，一时排不出去，就会造成较大的水蒸汽分压，加之制品本身干燥不均匀而产生的应力，造成变形、开裂缺陷。其次，要加强窑内通风，使蒸发出来的水汽及时排除。若通风不良，易造成烟气被水汽所饱和，从而使一部分水分由烟气中析出并凝聚在较冷的坯体表面，造成制品胀大而开裂或“水迹”。此外，此阶段燃烧气体中的SO₂在有水存在的条件下与坯体中的钙盐作用，在坯体表面生成CaSO₄的析出物，CaSO₄分解温度高，易使制品产生气泡缺陷。

陶瓷制品在低温阶段烧成时，往往需要较长时间。快速烧成，则须严格控制坯体入窑水分，并希望水分愈低愈好，从而达到缩短烧成周期和节能之目的。对于陶瓷墙地砖类制品，坯体入窑水分控制在1%以下，快速升温，坯体不裂；如入窑水分<0.5%，入窑温度达150~200℃，坯体不裂，并且坯体中的残余水分能在几分钟内排除。其次，要合理调节窑炉烟道闸板，减少和杜绝窑外冷空气进入窑内等。

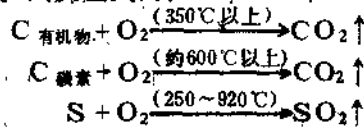
二、氧化分解阶段（300~950℃）

氧化分解阶段是焙烧陶瓷制品的关键阶段之一。陶瓷坯体中所含的有机物、碳酸盐、硫酸盐以及铁的化合物等，大都在此阶段内进行氧化与分解，并随窑内气氛和升温速率而异。此外，还有晶型转变、结构水排除和一些物理变化。

（一）氧化反应

1. 碳素及有机物的氧化

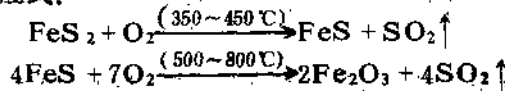
坯体中的碳素来源于坯釉原料，如我国北方的紫木节土、黑碱石、黑砂石和南方的黑泥等都含有大量有机物和碳素。压制成型时，为满足工艺上的需要，坯料中有时加入了有机添加剂或坯体表面沾有润滑油。还有烧成时烟气中未燃烧的碳粒沉积在坯体表面等。这些物质在加热升温时均发生氧化反应。其反应式为：



上述反应均宜在制品釉面熔融、气孔封闭前结束，否则就易产生烟熏、起泡等缺陷。

2. 铁的硫化物氧化

铁的硫化物氧化的反应式：

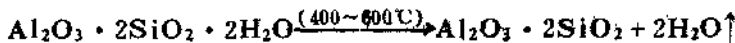


FeS_2 是一种十分有害的物质，在此阶段要把它氧化成氧化铁。否则，一旦釉面熔融、气孔封闭， FeS_2 再进行氧化，逸出的 SO_2 气体就可能使制品起泡；而生成的氧化铁又易使制品表面污染成黄、黑色。

(二) 分解反应

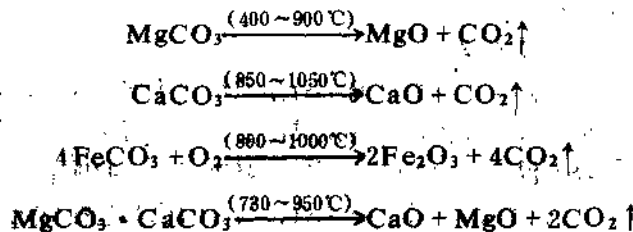
1. 结构水的分解、排除

坯料中各种粘土原料和其它含水矿物(如滑石、云母等)，在此阶段进行结构水(或称结晶水)的排除。结构水的分解、排除温度，取决于原料的矿物组成、结晶程度、制品厚度和升温速度等。例如：高岭石的脱水温度约在 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 之间；蒙脱石脱水温度为 $600\sim 750^\circ\text{C}$ ；伊利石脱水温度为 $400\sim 600^\circ\text{C}$ ；滑石在 600°C 以上脱水；瓷石在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 之间急剧脱水。高岭石的结构水排除反应式为：



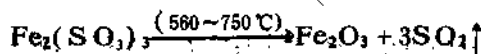
2. 碳酸盐的分解

陶瓷坯料中含有碳酸盐类物质，分解温度一般在 1000°C 左右才能结束，其主要反应为：

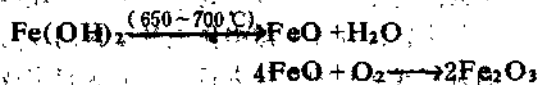


3. 硫酸盐的分解

其反应为：



此外， $Fe(OH)_2$ 的分解式为：



(三) 晶型转变

1. 二氧化硅的晶型转变

石英在陶瓷配方中用量较多，它在焙烧过程中会发生多种晶型转变，其体积有较大变化。在573℃，β-石英迅速地转变为α-石英，体积膨胀0.82%；在867℃，α-石英缓慢地转变为α-鳞石英，体积膨胀14.7%。

石英晶型转变造成的体积膨胀，一部分为本阶段的氧化和分解所引起的体积收缩所抵消。如果烧成操作得当，特别是保持窑内温度均匀，一般来说，石英晶型转变对制品不会带来多大的影响。着重强调一下是573℃时，要严格控制窑炉缓慢、均匀升温，虽此时其体积膨胀不大，但膨胀迅速，故陶瓷制品的开裂缺陷，易发生在573℃时的升、降温过程。因此，注意石英的晶型转变，对于合理控制烧成工艺，克服制品开裂等缺陷，是十分有益的。

2. 氧化铝的晶型转变

坯料中的粘土矿物脱水分解生成的无定形 Al_2O_3 ，在约950℃时转化为γ- Al_2O_3 ，γ- Al_2O_3 是一种反应能力很强的氧化物，在1000℃以上能与 SiO_2 反应，生成莫来石晶体，构成制品的骨架结构。

此阶段还伴随以下主要的物理变化：

随着制品内的结构水排除，碳酸盐等的分解以及有机物的氧化，坯体的重量急速减轻，气孔率进一步增大；根据配方组成中粘土、石英含量的多少，发生不同程度的体积变化；在后期由于有少量熔体起胶结颗粒的作用，使坯体强度增加。

在氧化分解阶段，要进行一系列重要的物理化学变化。这些变化进行得是否顺利、彻底，直接影响产品的质量。为使制品的物化反应达到预期效果，并顺利地进入高温阶段，减少缺陷，在烧成操作方面要注意如下三点：

(1) 保持良好的氧化气氛，一般控制 $O_2 = 4 \sim 5\%$ ， $CO_2 = 9 \sim 12\%$ ， $CO < 1\%$ ；加强良好的通风，使氧化、分解反应能顺利地进行。

(2) 合理地控制窑内的温度；并根据坯釉性能，保证充分的氧化分解时间。

(3) 采用各种有效措施，尽量减少窑内上、下和水平温差。在本阶段的末期，要适当进行保温，使上述反应进行完全。

三、高温阶段(950℃~烧成温度)

在此阶段中，由于各种陶瓷制品性质与其所用原料的不同，因此，对火焰气氛和烧成温度的要求也不相同。一般来说，瓷器产品的烧成温度较高；而建陶产品的烧成温度，既有与瓷器接近的，也有较低烧成温度的(1000℃左右)。烧成气氛，我国北方大都采用氧化焰烧成，而南方大都采用还原焰烧成。如采用还原焰烧成，高温阶段又包括氧化保温、强还原及中性焰三个阶段。

下面以还原焰烧成制品的过程叙述如下：

(一) 氧化保温阶段

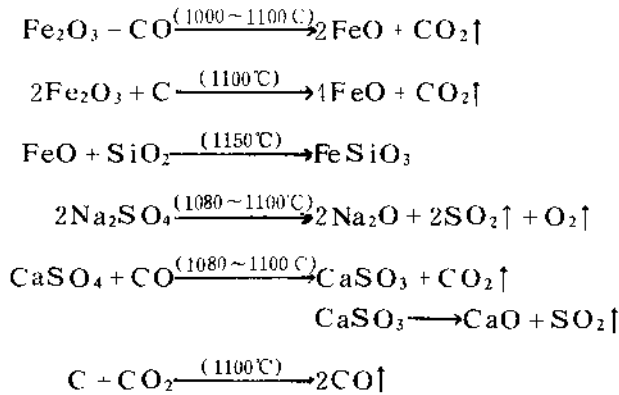
此阶段将上阶段未完成的氧化分解变化继续充分进行。由于在上一阶段水汽及其它气体产物的急剧排除，坯体表面围绕着一层气膜，妨碍着氧气向坯体内部渗透，从而增加了坯体气孔中碳素氧化的困难。如果在进入还原焰操作或釉层封闭以前，碳素还未烧尽，则这些碳素的氧化将推迟到烧成的末期或冷却的初期进行，易造成起泡或烟熏等缺陷。

此阶段坯体开始烧结，同时也产生收缩。保温时间的长短，取决于坯体的致密程度、厚度、烧成温度和窑炉结构等。

(二) 强还原阶段

此阶段的作用是使制品中所含的氧化铁(Fe_2O_3)还原成氧化亚铁(FeO)，在较低温度下氧化亚铁与二氧化硅起反应，生成淡蓝色易熔的玻璃态物质硅酸亚铁(FeSiO_3)，从而改善制品的色泽。其次，能使硫酸盐物质在较低温度下分解($1080\sim 1100^\circ\text{C}$)，易使分解出的二氧化硫气体在釉面玻化前逸出。而在氧化气氛中，硫酸盐的分解温度比较高，约 $1200\sim 1370^\circ\text{C}$ 。此外，若坯体由于氧化进行得不完全，在釉熔融后而引起的脱碳反应也在本阶段进行。

以上的反应式如下：

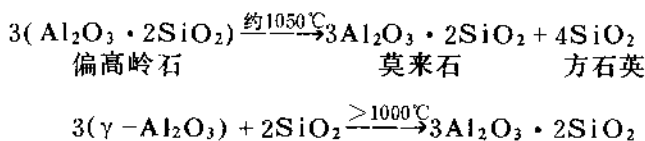


在此阶段，气氛一般控制在 $\text{O}_2 = 0.5\sim 1\%$ ， $\text{CO} = 2\sim 6\%$ ， $\text{CO}_2 = 15\sim 17\%$ 。同时，升温要缓慢，使坯体中氧化铁和硫酸盐还原分解出的气体，以及脱碳反应产生的气体顺利排除，减少和防止坯泡等缺陷的产生。

(三) 中性焰阶段

此阶段又称弱还原阶段。由于釉面已基本玻化，封闭了制品的表面；莫来石晶体不断从液相中析出并长大；液相填充孔隙和胶结未熔颗粒。从理论上说可以采取中性焰气氛，但为了防止制品中低价铁又重新氧化成高价铁，故常采用弱还原气氛，同时可减少和杜绝釉面吸收碳素。

在此阶段，由熔融长石与一些低共熔物构成制品中的玻璃相，“液相”产生。由于液相大量的产生，在其表面张力的作用下，不仅促使颗粒重新排列紧密，而且使颗粒之间胶结并填充孔隙。由于颗粒曲率半径不同和受压情况不同，促使颗粒中心距离缩小，坯体逐渐致密。同时，由高岭石排除结构水后的偏高岭石及由高岭石分解出来的游离 Al_2O_3 与 SiO_2 ，在高温下起反应，生成一次莫来石晶体。由长石熔体(玻璃相)中形成的针状莫来石称为二次莫来石晶体。莫来石晶相在制品中起“骨架”作用。这样，坯体就逐渐被“烧结”。莫来石形成的反应式如下：



中性焰阶段，气氛一般控制在 $O_2 = 0.5 \sim 3\%$ ， $CO_2 = 16 \sim 19\%$ ， $CO = 1 \sim 2\%$ 。

高温阶段发生的物理变化有：

1. 强度增加。由于玻璃相的出现和莫来石针状晶体的增多，使坯体强度增加。

2. 气孔率降低到最小值。由于烧成中玻璃相物质填充于坯体内的孔隙所造成。

3. 体积收缩，体积密度增大。由于玻璃相和晶相聚结成致密的结构，晶相的增多也增大了密度，玻璃相填充孔隙，造成体积的急剧收缩。

4. 色泽改变。坯体由淡黄色、青灰色而呈现白色，光泽度增加。

为使高温阶段的物化反应能顺利完成，烧成操作应注意升温速度，一般可控制在 $10 \sim 30^\circ\text{C}/\text{小时}$ 。如果急速升温，突然出现大量液相，使釉面过早封闭，产生冲泡、发黄等缺陷。其次，应尽量减少窑内上、下和水平温差。

四、保温阶段

本阶段的温度与高温阶段后期基本一致。目的是使窑内上、下和水平温度趋于一致，使坯体内部物理化学变化更趋完善。在等温加热的初期，莫来石晶体以及玻璃相的增加很快，以后速度减小，同时结晶质点扩散与液相的浓度力求达到平衡状态，使固相、液相分布均匀；使莫来石晶体、玻璃相与未溶解的石英颗粒数量及分布情况达到要求，形成优良的陶瓷产品。

保温阶段的烧成操作应注意以下三点：

1. 炉温要保持稳定，不偏高，也不偏低。如炉温偏高，制品会产生过烧和发黄；如炉温偏低，将失去保温作用，使制品的质量欠佳。

2. 保温炉的气氛应控制为中性或弱还原气氛。一般中性焰较难控制；弱还原气氛炉内 CO 控制在 1% 左右为宜。

3. 保温时间要适当。保温时间的长短，与坯、釉料配方、坯体的大小、厚薄、产品的质量要求、窑炉结构、燃料种类和烧成操作控制等因素密切相关。例如，窑内温差较大、坯体较厚、装车密度较大、推车和升温速度较快时，保温时间就要相应长一些。因此，还要结合本厂的具体情况来确定适宜的保温时间。一般来说，烧成温度为 $1150 \sim 1250^\circ\text{C}$ 的陶器制品，保温时间可控制在1小时以内；烧成温度为 $1280 \sim 1410^\circ\text{C}$ 的瓷器制品，保温时间约 $1 \sim 2$ 小时；陶瓷墙地砖制品的保温时间在2小时左右。

五、冷却阶段

本阶段是坯体由高温降至室温的凝固时期，其间玻璃相粘度增大，并由塑态转化为固态，硬度和强度增至最大；与此同时发生晶型转化，析晶和物理收缩。因此，冷却方式和冷却速度对陶瓷制品的性能影响很大。

陶瓷制品由高温降至 700°C 左右，应快速冷却。在这个温度区间，制品液相量较多，具有一定的塑性，快速冷却不会使制品产生变形、开裂等缺陷。相反，可以缩短烧成周期，防止制品的晶粒长大和釉而析晶，提高半透明度和光泽度；并可防止低价铁再氧化为高价铁，提高制品的白度。因此，隧道窑在这个降温区间一般都设有急冷气幕，将窑外的冷空气直接或间接鼓入窑内进行急冷。此段的冷却速度可控制在 $120^\circ\text{C}/\text{小时}$ 左右。

制品冷却到 $700 \sim 400^\circ\text{C}$ 时，在这个温度区间，应适当缓慢冷却，冷却速度可控制在 $80 \sim 90^\circ\text{C}/\text{小时}$ 。因为这时制品内的液相刚刚凝固，还比较脆弱，再加上 573°C 左右又有石英的晶型转化，体积收缩，如冷却过快，容易引起釉惊、开裂等缺陷。从 400°C 以后，随着制品强度的

增大，又可以快速冷却，冷却速度可控制在 $100\sim 120^{\circ}\text{C}$ /小时。当制品冷却到 $270\sim 200^{\circ}\text{C}$ 时，也应引起注意，在此温度区间，对于硅质原料用量多的制品也有体积收缩。

综上所述，陶瓷制品在焙烧过程中的物理化学变化是非常复杂的，影响因素很多。目前，国内外尽管在这方面做了大量的研究工作，取得了许多重要的成果，但还不能说陶瓷制品在焙烧过程中的物理化学变化已完全搞清楚，由于各地陶瓷原料互有差异以及生产工艺过程的复杂性，还有窑炉、燃料和烧成操作与控制等诸因素，因此，尚存在不少问题，有待进一步研究解决。

第四节 陶瓷制品在加热与冷却过程中的应力分析

陶瓷制品在窑内焙烧时，是逐步被加热的。在加热过程中，制品的表面以对流和辐射的方式获得热量，且制品表面及内部各处温度均随窑内温度和焙烧时间的不同而不断改变，这是一个不稳定的传热过程。当制品表面达到烧成温度时，由于制品内外温度不等，热量将继续向内部传递，以提高内部温度，缩小内外温差，并趋于一致。通常烧窑时要保温一定时间的原因就在于此。制品加热时的温度分布曲线见图1-3所示。在制品中存在这样一个等温面，

- 1—中性面；
- 2—经 t_1 时间后的温度曲线；
- 3—经 t_2 时间后的温度曲线。

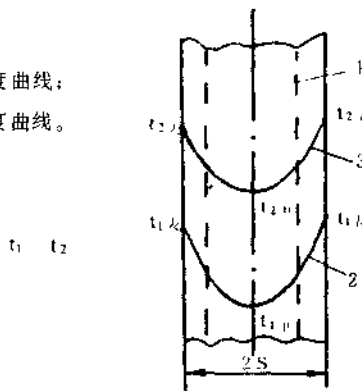


图1-3 双面加热时制品内的温度分布示意图

S为制品厚度的一半

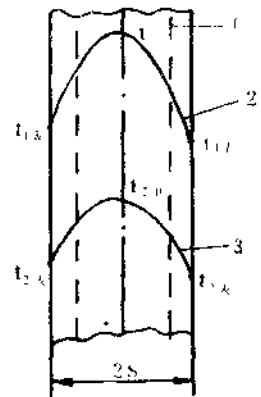


图1-4 双面冷却时制品内的温度分布示意图

S为制品厚度的一半

即此面上各点的温度均等于制品的平均温度，我们把此等温面称作中性面。制品的表面与中性面之间的部分具有较平均温度高的温度，由于任何物料都具有热胀冷缩的特性，因此，它力求膨胀，处于被压缩的状态。在制品的中性面与中心之间的部分具有较平均温度低的温度，其膨胀要小一些，因而处于被拉伸状态。这压缩和拉伸状态一直维持到制品发生烧结收缩时为止，因此，制品在加热升温过程中外层将受到压缩应力，而内层将受到拉伸应力。根据材料力学可知，由于压缩应力和拉伸应力的存在，将使制品受到一对剪应力，而且在与压缩方向成 45° 的截面上产生最大的剪应力，其数值等于压缩应力的 $1/2$ ，此剪应力如超过制品允许的剪应力极限时，就可能使制品破坏。

陶瓷制品在窑内被冷却时，采用强制冷却(用风机鼓入冷空气)和自然冷却方式，制品的