

建筑陶瓷隧道窑设计

陕西省第一建筑设计院编

中国建筑工业出版社

建筑陶瓷隧道窑设计

陕西省第一建筑设计院编

中国建筑工业出版社

本书总结了建筑陶瓷厂隧道窑设计的经验。对焙烧建筑陶瓷的明焰和隔焰隧道窑从设计到施工都作了比较系统的介绍。内容包括窑体结构的确定、燃烧装置、窑上管道的设计、附属设备的选型、热工测量及自动调节等，并收集了有关设计计算所需的资料 and 设备的规格、性能，可供从事隧道窑设计的人员参考。

本书主要编写人员有姚玉桂、舒斯裕、黄良高、卢柏生、雷建球、郝明远、刘菊根、倪大增、张世福、詹泽富、潘兆霖等，审稿人为张钦楠、彭玉成等。

本书附录中编入了一些常用数据和参考资料。

建筑陶瓷隧道窑设计

陕西省第一建筑设计院编

*

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

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：35 5/8 插页10 字数：866千字

1979年2月第一版 1979年2月第一次印刷

印数：1—6,550册 定价：3.30元

统一书号：15040·3423

目 录

前言	1	二、燃料燃烧所需空气量 和燃烧产物量的计算	82
概论	2	三、燃烧温度的计算	90
第一章 隧道窑总体设计	4	四、与燃烧有关的其他计算和表格	91
第一节 概述	4	五、燃料燃烧计算举例	100
一、隧道窑的结构形式 及其工作原理	4	第三章 隧道窑燃料消耗量和冷却空气量 的计算	110
二、隧道窑总体设计的几点要求	5	第一节 隧道窑燃料消耗量计算	110
三、隧道窑总体设计内容	9	一、按燃料消耗指标 计算燃料消耗量	110
第二节 隧道窑主要尺寸的确定	9	二、由预热带和烧成带热平衡 计算燃料消耗量	111
一、窑内断面（内宽与内高） 尺寸的确定	9	三、举例	127
二、窑长的确定	12	第二节 冷却带冷却空气量 和抽送干燥热空气量计算	137
三、窑的各带长度 及其比例的确定	12	一、冷却带所需冷却空气量 的计算	137
四、窑的主要尺寸的确定举例	14	二、抽送干燥的热空气量计算	138
第三节 隧道窑工作系统的确定	16	第三节 隧道窑散热量计算	138
一、确定隧道窑工作系统 时的注意事项	16	第四章 燃烧装置	139
二、隧道窑工作系统的确定	17	第一节 燃烧室	139
三、窑车下风冷系统	26	一、烧煤燃烧室	139
第四节 隧道窑各带结构的确定	26	二、烧煤气燃烧室	143
一、预热带结构的确定	27	三、烧重油燃烧室	147
二、烧成带结构的确定	35	四、燃烧室内衬耐火材料的选择	147
三、冷却带结构的确定	40	第二节 煤气烧嘴	149
四、窑车下检查坑道	50	一、低压涡流式烧嘴	149
五、窑车下的冷却结构	50	二、高速等温煤气烧嘴	157
六、其他结构	52	第三节 重油喷嘴	158
第二章 燃料及燃料燃烧计算	54	一、对重油喷嘴的要求	158
第一节 燃料及其特性	54	二、低压油喷嘴	158
一、燃料成分的代表方法和换算	54	三、低压油喷嘴计算	171
二、燃料的一般特性	55	四、低压油喷嘴用喷嘴砖	172
三、固体燃料	59	第五章 窑上管道的设计	174
四、液体燃料	63	第一节 管道的布置	174
五、气体燃料	68	一、空气、煤气管道布置原则	174
第二节 燃料燃烧计算	82	二、煤气放散管及安全装置	175
一、常用燃料的燃烧所需空气量、燃烧 产物量以及燃烧温度关系表	82		

三、重油管道布置原则	181	二、离心锅炉引风机和	
第二节 管道直径的选择	183	电动机的选用	263
一、空气、煤气管道直径的计算	183	三、电动机功率计算	264
二、重油、蒸气和雾化空气		四、通风机性能参数的关系式	265
管道直径的选择	185	第二节 三角皮带传动计算及	
第三节 管道材料的选用	187	基础槽孔的确定	266
一、空气管道	187	一、三角皮带传动计算及	
二、煤气管道	188	基础槽孔的确定	266
第四节 管道阀门及其选用	189	二、电动机滑轨	269
一、常用几种阀门的使用性能	189	三、电动机底脚垫板尺寸	270
二、阀门产品型号说明	189	第三节 常用的离心通风机、引风机、电	
三、常用的几种阀门的有关尺寸	193	动机及其混凝土基础的实例	271
四、阀门的选用	194	一、隧道窑常用的离心风机	271
第五节 管道支架	196	二、隧道窑常用的电动机	302
第六节 重油系统主要设备	196	三、离心通风机和锅炉引风机	
一、油罐	198	外形及安装尺寸	305
二、油泵	202	四、电动机安装及外形尺寸	317
三、重油过滤器	212	五、几种风机及电机混凝土	
四、重油加热器	213	基础实例	323
第七节 管道试压和保温	224	六、通风机的并、串联	338
一、管道试压	224	第八章 热工测量和自动调节	339
二、管道的保温	225	第一节 热工测量	339
第六章 烟道、烟囱的设计		一、窑内测量点的确定	339
及喷射泵的计算	230	二、窑外测量点的确定	341
第一节 烟道设计	230	三、热工测量仪表的选用	342
一、砖烟道的断面尺寸	230	四、隧道窑热工测量系统实例	349
二、烟道断面的计算	231	第二节 自动调节	349
三、烟道内烟气流动过程中		一、隧道窑综合自动	
的阻力损失计算	232	调节系统的确定	350
四、烟道结构设计注意事项	243	二、自动调节仪表的选用	354
第二节 烟囱计算	245	三、隧道窑热工测量及	
一、烟囱直径计算	246	自动调节系统实例	360
二、烟囱高度计算	247	第九章 隧道窑附属构件的设计	364
第三节 喷射泵(或称喷射装置)		第一节 隧道窑骨架	364
计算	252	一、骨架结构形式	364
一、喷射泵的作用原理	252	二、骨架计算	366
二、喷射泵计算时使用的符号	253	三、钢材断面模数表	377
三、喷射泵的计算方法	253	第二节 轨道安装	379
第七章 风机和电动机的选用	259	一、窑内轨道安装	379
第一节 通风机、引风机及		二、窑内钢轨规格	382
电动机的选用	259	三、轨道接头形式	384
一、离心通风机和电动机的选用	259	四、轨道膨胀缝	385

第三节 砂封槽	385	一、窑顶材料及厚度	451
一、砂封槽和砂封板以及砂子高度 之间的关系尺寸	385	二、内拱的半径、拱高的计算 及拱角的选择	451
二、砂封槽的结构形式	385	三、拱脚	453
第四节 加砂管和漏砂管	388	四、窑顶的砌筑	455
一、加砂管	388	五、每环拱砌筑砖数	456
二、漏砂管	389	第三节 膨胀缝的留设	456
第五节 检查门	390	一、膨胀缝的宽度和间距	456
第十章 耐火材料、耐火泥浆 和保温材料	391	二、膨胀缝的形式	463
第一节 耐火砖	392	第四节 窑车衬砖	464
一、耐火砖的主要性能及其用途	392	一、窑车衬砖材料及厚度	464
二、耐火砖的理化指标及尺寸 允许偏差和外形要求	399	二、窑车衬砖的结构形式 和砌筑	465
三、耐火砖的形状及尺寸	403	第十二章 附属设备	467
第二节 耐火混凝土	414	第一节 窑车	467
一、普通耐火混凝土	414	一、窑车的车架	467
二、轻质耐火混凝土	423	二、窑车的车轮组	468
第三节 耐火泥浆	426	三、窑车的轴承	470
一、窑上砌砖所使用的泥浆	426	四、窑车的密封	471
二、耐火泥浆的理化指标及配比	426	五、窑车轴承的润滑	472
三、砌耐火混凝土预制块使用的 耐火泥浆	430	第二节 推车机	472
第四节 保温材料	430	一、油压推车机主要设计参数 的计算	473
一、轻质粘土制品	431	二、油压推车机目前国内的 几种定型产品	474
二、轻质高铝制品	432	第三节 托车	479
三、轻质硅制品	433	第四节 出车机	483
四、硅藻土制品	433	第五节 回车机	484
五、蛭石制品	435	第六节 窑门	486
六、矿渣制品	437	第七节 升降台	486
七、玻璃棉制品	437	第十三章 隧道窑基础设计	488
八、石棉制品	438	第一节 隧道窑基础设计 需要的资料	488
九、膨胀珍珠岩及其制品	439	第二节 隧道窑基础的类型及用料	488
第十一章 窑墙、窑顶和窑车 衬砖的设计	443	一、隧道窑基础的类型	488
第一节 窑墙	443	二、隧道窑基础的用料	488
一、窑墙材料及厚度	443	第三节 窑基础设计中应注意 的一些问题	491
二、窑墙的结构及砌筑	445	第十四章 工程投资概算	493
三、窑墙和窑车衬砖之间的 曲折封闭	448	第一节 备料概量指标	493
四、窑墙高度和长度尺寸	448	一、窑体建筑工程	493
第二节 窑顶	451	二、管道工程	496

三、金属结构	498	第二节 烘窑的方法	525
四、计算备料概量的实例	498	一、烧煤明焰隧道窑的烘烤	525
五、五条隧道窑的备料量比较	510	二、烧煤气明焰隧道窑的烘烤	527
第二节 投资概算指标	511	三、烧油隔焰隧道窑的烘烤	528
一、窑体建筑工程	511	第三节 烘窑试生产中注意事项	
二、管道工程	512	及热工制度的调整	536
三、金属结构	512	一、烘窑试生产中注意事项	536
四、一般机械和通风设备	512	二、热工制度的调整	537
五、热工测量和自动调节仪表	513	附 录	
第十五章 隧道窑施工	514	一、常用单位及换算关系	539
第一节 施工程序	514	二、常用计量单位的换算	541
第二节 施工技术要求	514	三、常用的计算数据	545
一、冬季施工要求	514	四、主要几何图形的面积	
二、基础施工要求	514	和体积计算公式	548
三、烟道施工要求	515	五、全国主要城市气象资料	550
四、窑门框架施工要求	515	六、大气压(气压计压力毫米水银柱)	
五、窑内轨道施工要求	515	和海拔高度的关系	552
六、窑墙的施工要求	515	七、气体的主要物理参数	552
七、窑两侧的立柱及拱脚梁的		八、各种不同材料的重度、导热系数、	
施工要求	516	热容量	554
八、窑拱的施工要求	516	九、钢铁材料的物理参数	555
九、隔焰板和间接冷却壁的砌筑	517	十、不同厚度粘土砖直墙的外表面温度	
十、窑内冷却管的安装	517	和散热量计算图	557
十一、窑车衬砖的砌筑	517	十一、窑墙外表面与空气	
十二、窑砌体所用泥浆、砂浆		(静止空气)的传热系数	558
和砖缝的要求	518	十二、不同燃料燃烧时的	
十三、其余一般工程安装	520	火焰黑度	558
第三节 施工检查和验收程序	520	十三、各种材料的黑度	
第四节 施工中应注意的问题	521	和辐射率的平均值	558
第十六章 隧道窑的烘烤		十四、某些物体的黑度	559
及热工调整	523	十五、耐火锥号与温度对照表	559
第一节 烘窑前的全面检验		十六、磨料成分和粒度标准	560
和准备工作	523	十七、陶瓷隧道窑技术性能表	561
一、烘窑前的全面检验	523	十八、陶瓷隧道窑工作系统图	561
二、烘窑前的准备工作	524	十九、陶瓷隧道窑结构构造图	562
		参考资料	562

前 言

为了提高隧道窑的设计水平，我们学习并总结了国内建筑陶瓷企业在隧道窑方面的实践经验，编写了本书。在编写时，尽量汇集国内生产实践中的先进经验，适当参考国外有用的技术，力求做到观点正确，数据可靠，图表使用方便，文字通俗易懂，以便读者在设计 and 改造窑炉时参考。本书主要是供建筑陶瓷厂的技术人员，设计部门专业技术人员参考。

本书编写中得到了全国很多陶瓷厂、大专院校及科研部门的热情支持和帮助。广东化工学院的刘振群同志，天津大学宋崑同志，北京工业大学的武立云、叶惠芝同志，北京陶瓷厂战仁伟同志帮助编写和审阅了部分章节。唐山建筑陶瓷厂、唐山陶瓷厂、沈阳陶瓷厂、景德镇陶瓷厂、北京市陶瓷厂、陕西省咸阳陶瓷厂、石湾建筑陶瓷厂、广东化工学院、北京工业大学、南京化工学院、湖北建工学院、湖南大学、天津大学、建筑材料研究院、陕西省陶瓷非金属矿研究所等单位派出了有经验的老工人、技术人员和教师集中进行了三结合审稿。在编写过程中，我们还访问调查了国内一些日用陶瓷、砂轮和电瓷等行业的工厂及设计、科研部门，学习了他们的先进经验，在本书一些章节中参考或利用了兄弟部门编写的有关手册及技术资料。在此一并表示诚挚的感谢。

本书共分十六章，对焙烧建筑陶瓷的明焰和隔焰隧道窑，从设计到施工、烤窑都作了比较系统的介绍，对隧道窑基础、附属设备也作了一般介绍；并尽可能的汇集了有关设计、计算所需的参考资料，使之满足隧道窑施工图设计的要求。

书中所涉及的规范、规定、指标等，如与国家正式颁布的有关文件有出入时，应以正式颁布的为准。书中所列的公式、图表在应用时应按实际生产情况进行验证核实。

由于我们技术水平有限，深入调查研究和系统总结工作做得不够，本书肯定存在很多缺点和错误，恳切希望读者批评指正，以便今后做进一步的修改。

陕西省第一建筑设计院
一九七七年三月

概 论

在陶瓷生产中，烧成是关键的一环。产品质量的好坏，最后决定于烧成工序。而烧成的质量又与窑炉的选型和设计有密切的关系。

隧道窑是陶瓷工业中的先进窑型。和其他窑型相比，它具有产量大、产品质量好、燃料节约、劳动生产率高和劳动条件有所改善等一系列优点。在国外，隧道窑在陶瓷工业中的正式使用约有六十年的历史。我国解放前，全国只有一、两座隧道窑。其他都是陈旧落后的倒焰窑、半倒焰窑和直焰窑等。解放后，随着陶瓷工业的发展，隧道窑的数量日益增加，新的窑型也不断涌现。如唐山陶瓷厂的烧油隔焰隧道窑，唐山建筑陶瓷厂、北京陶瓷厂和广州建筑陶瓷厂的半隔焰隧道窑，景德镇陶瓷厂、温州地砖厂、面砖厂的多通道窑、沈阳陶瓷厂的釉面砖釉烧辊道窑，鹤壁瓷件厂焙烧面砖推板窑等。

设计隧道窑应符合下列要求：

1. 产品质量要好。隧道窑的结构系统、热工测量及调节系统等的设计应能满足制品烧成制度（温度、压力、气氛）的要求，不仅要保证产品合格率高，而且应使尽量地提高一级品率。

2. 烧成周期要短。设计要尽可能的为快速烧成创造条件，使产品实际烧成速度接近于其理论烧成速度，这就要求窑内各段上下左右温度均匀，并能灵活地实现各种调节。

3. 生产产量要大。设计中要合理地确定窑的断面尺寸（长、内宽、内高），并采用相应的技术措施，使产品既能在窑内快速烧成，又能合理装载，满足产量大的要求。

4. 一次投资要省。要发扬一厘钱精神，在保证质量的前提下，因地制宜，就地取材，选择经济、高效的砌体材料和结构，以节省投资。

5. 生产成本（特别是燃料消耗）要低。设计中既要考虑到一次基建投资的节约，更要考虑到长期生产成本的降低，综合考虑各种因素来确定设计方案。例如：在燃料的选择上，就要从产品质量要求，当地供应可能等方面做比较；在窑体的设计上，既要考虑节约材料及造价，又要减少热损耗，充分利用余热、废热等。

6. 操作条件要好。设计中要充分考虑到工人操作的安全和方便。要根据生产的规模和品种，从实际出发恰当地确定机械化、自动化的程度，并要采取必要的防火、防爆等技术措施。

7. 要有一定的灵活性。陶瓷工厂中的产品品种、规格常常变化，新产品不断涌现，配方也不断改进，所以设计中要适当地考虑到烧成制度、装载方法等变化的可能性。

以上这些要求是相互联系的，有时几项要求之间也会存在一些矛盾，这就要求设计者必须坚持唯物辩证法，深入调查研究，抓住主要矛盾，才有可能做到多、快、好、省。

毛主席教导我们：“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”在建筑陶瓷隧道窑的设计和建造方面，我们虽然已经取得了一些初步的成绩，但是与社会主义建设的要求来比，还有很大的差距，还有很多工作要做。我们建筑陶瓷行业的

职工，必须在毛主席革命路线指引下继续前进，设计和建造更多、更新、更好的隧道窑，为赶超世界先进水平而努力。具体地说，应当从以下几个方面努力：

1. 进一步实现快速烧成。要研究使卫生瓷、面砖、地砖、锦砖等制品能够在几个小时，以至几十分钟内烧成，并尽量利用地方低级原料来快速烧成高级、高质的产品。为此，要设计能适应快速烧成的窑炉。

2. 更充分地利用各种热能资源。各地设计隧道窑时要做到因地制宜地选择燃料品种，并且要充分利用热能，降低燃料消耗。因此，要研究在陶瓷隧道窑中使用固体、液体、气体各种燃料的合理燃烧方法以及余热、废热的充分利用的途径。

3. 研究和发展各种燃烧装置。要结合建筑陶瓷隧道窑的特点和要求，改进液体和气体燃料烧嘴，发展各种高速等温烧嘴；还要研究适用于建筑陶瓷隧道窑上的固体燃料（煤、煤粉）的机械化燃烧装置。

4. 研究、改进和发展各种耐火材料。建筑陶瓷隧道窑上对耐火材料有多种要求。例如：在燃烧室内要有耐高温的材料；在隔焰窑内要有导热性好、又能耐氧化的隔焰材料；在窑的外围结构上要有蓄热能力低，而隔热性能好的保温材料；在窑车或推板式窑中要用在快速烧成中能在多次急冷急热条件下能承重的炉材等。为此，要结合我国特点，大力改进硅砖、高铝砖、碳化硅等制品的质量，同时发展新的材料，如莫来堇青石、陶瓷纤维轻质耐高温材料等，进一步降低窑炉造价，改进窑炉性能，提高窑炉寿命，适应快速优质烧成的需要。

5. 研究节约金属材料的途径。建筑陶瓷隧道窑中耗钢量比较大，特别是窑车一项更是如此。因此，要研究发展各种不用窑车的小断面隧道窑，如辊道式窑、推板式窑等，使地方小型陶瓷工业能更快地得到发展。

6. 研究加速窑炉施工的途径。陶瓷隧道窑历来都是比较笨重，施工砌砖工程量，要求严，难以快速投产。因此，要研究各种预制装配式隧道窑的加工、制造和装配的方法。

7. 提高机械化和自动化程度。要研究机械化、自动化的码、卸窑车以及进出车的方法，进一步减轻笨重的体力劳动。同时，要进一步大力改进和完善隧道窑烧成制度的自动调节系统，达到提高产量、质量，降低燃料消耗、改善劳动条件等目的。在我国电子计算机迅速发展的大好形势下，我们要研究电子计算机在窑炉上的应用，要从实际经验出发研究和推导各种类型窑炉的数学模型，并建立起窑炉热工最优控制方法的理论和实践。

我国建筑陶瓷行业的广大职工在华国锋主席为首的党中央英明领导下，高举毛主席的伟大旗帜，抓纲治国，深入开展工业学大庆的群众运动，走自己工业发展的道路，同时学习国外先进技术，就一定能为在本世纪内实现农业、工业、国防和科学技术的现代化，为把我国建成强大的社会主义国家作出自己的贡献。

第一章 隧道窑总体设计

第一节 概 述

隧道窑结构形式很多，按形状分为单通道的直线形、圆环形和U字形，多通道的平面并列或垂直并列式等，但是单通道、直形、窑车式隧道窑是一种最基本的结构形式。目前焙烧建筑陶瓷主要采用这种类型的明焰或隔焰隧道窑。本章主要介绍这两种窑的设计。

一、隧道窑的结构形式及其工作原理

见图 1-1。

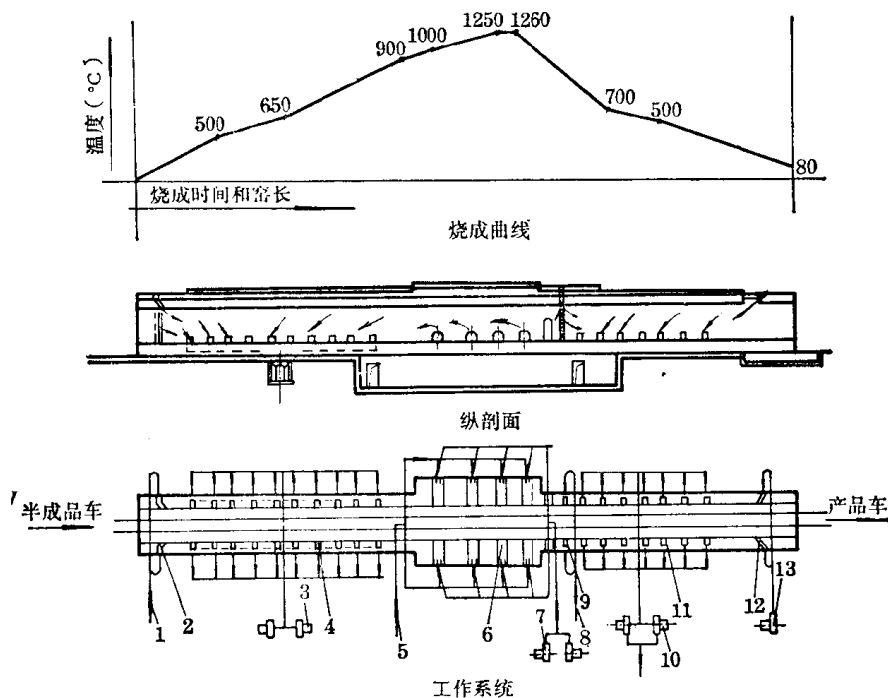


图1-1 隧道窑结构形式及工作系统图

1—封闭气幕送风；2—封闭气幕孔；3—排烟机；4—排烟孔；5—燃料；6—燃烧室；
7—助燃风机；8—急冷气幕送风；9—急冷气幕孔；10—热风机；11—热风抽出孔；12—
冷风送入孔；13—冷风机

隧道窑是一种对制品进行热加工的连续工作的设备。它分为预热带、烧成带、冷却带三部分，根据规定的温度曲线，对制品先进行加热，然后冷却。

在明焰隧道窑中，制品前进方向与窑内气流方向相反。制品在预热带利用来自烧成带的烟气进行预热，然后经烧成带达到一定的温度而烧成，之后进入冷却带，借急冷段和窑尾送入的冷空气进行冷却。与此同时，制品或制品和匣钵将本身的热量传给窑内或间接冷

却壁内的冷空气。此空气部分抽出供助燃，部分抽出供干燥用，也可以全部抽出供干燥或其它用途。若采用余热锅炉或水汽锅作间接急冷，产生的蒸汽可用于加热重油、生活用水等。

燃料和助燃空气经由烧成带两侧烧嘴、燃烧室混合燃烧，直接加热和焙烧制品后，由预热带两侧的排烟孔，经烟道及排烟机或烟囱排出。

在隔焰隧道窑中，燃烧火焰不和制品直接接触，而是在隔焰道内通过隔焰板辐射热来加热、焙烧制品。隔焰道内的烟气，由烧成带两侧隔焰道进入预热带两侧隔焰道内的排烟孔排出。

制品进入冷却带，先是经间接冷却，后借窑尾送入的冷空气进行直接冷却或全部为间接冷却。与此同时，制品将本身的热量传给间接和直接冷却的空气。此空气同样可抽去供干燥或助燃等用。

二、隧道窑总体设计的几点要求

隧道窑的总体设计所以重要，它不但关系到这条窑投产后能否达到优质、高产、低消耗，而且关系到建造的速度、一次投资的多少、建成后好不好操作、劳动强度的大小、寿命的长短等问题。因此，设计时，一定要遵循概论中所叙述的设计原则和要求，同时还必须做到：

(一) 应满足制品烧成工艺（或叫烧成制度）的要求

隧道窑的工作系统和窑的各带结构是根据制品的烧成制度（温度制度和气氛制度）来确定的。另外，压力制度是温度和气氛制度的保证，故工作系统的确定就包括了压力制度的确定。而制品的烧成制度又和制品焙烧过程的物化反应密切相关。随着焙烧制品品种的不同，窑内进行的物化反应过程也不同。下面我们以粘土质建筑陶瓷制品为例，说明制订烧成制度时，应当考虑的因素。

粘土质建筑陶瓷制品从 $20\sim 200^{\circ}\text{C}$ 排除残余水分，若制品入窑水分在 1% 以下，坯体薄，装得又稀，可以迅速升温而不致开裂。例如卫生瓷入隔焰隧道窑温度，一进窑就是 300°C ，很快排除残余水分也不开裂。所以要达到快速烧成，必须充分干燥制品，残余水分应低于 1% 。

温度在 $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时是排除结构水阶段。粘土矿物中的结构水，分解的温度和速度随升温速度而变化。如高岭土升温速度每提高 100°C ，其分解速度就可快一倍。象釉面砖入辊道窑温度，一进窑就是 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，有时甚至达 700°C ，脱水速度相应可提高 $3\sim 4$ 倍和 $6\sim 7$ 倍。因此，只需几分钟时间就可达到完全脱水，制品也不开裂。

为什么有些厂的窑，在上两阶段升温速度不能快，主要是制品没有很好干燥，入窑水分高和窑内温度不均匀的缘故。

573°C 是石英晶型转化温度 (β 石英转化为 α 石英)，此时，体积膨胀。过去认为这是个危险阶段，其实这个反应的进行是很快的。生产中有时出现因石英晶型转化而使产品开裂的现象，此情况的出现主要还是窑内温度不均匀所造成的。窑内温度均匀同样可以快速升温，尤其是对焙烧单件薄壁制品更是如此。象上面谈到的釉面砖进辊道窑温度达 700°C 也未见开裂，就是因单片入窑，加热温度均匀的关系。但对厚壁、形状复杂的制品或在制品装得较密时，仍应注意避免升温过快和加热温度不均匀而引起制品开裂。

600~1050°C是氧化阶段，在这个阶段中要使有机物中的碳氧化；硫化铁烧掉，使之变成氧化铁；碳酸盐分解。这些都要在釉玻化前完成，把生成的气体排除掉。否则到釉子玻化时，如果还在进行这些反应，气体排不出去，就会使产品起泡。所以在此阶段必须要有足够的时间和充足的氧气，使上述杂质得到充分的氧化和分解。因此把这一阶段叫做氧化阶段。

这阶段的升温速度，取决于原料纯度和坯体厚度。当原料较纯、坯体较薄时，气体易于排出，升温可以快。反之，升温则不宜过快。

1050~1200°C是上述氧化分解所产生的物化反应进行得更充分，易熔性物质熔融并迅速增加而开始玻化的阶段。

在这个阶段中，卫生瓷、面砖等制品是烧氧化焰。但对有一些制品则用还原焰烧成，目的是使坯体内所含的氧化铁（ Fe_2O_3 ）还原成氧化亚铁（ FeO ）。同时还因有氧化亚铁存在，可以适当降低烧结温度，扩大烧结范围，并使产品颜色白里泛青，增加美观。如若还原气氛不足，则产品往往呈现黄色。

此阶段的升温速度，决定于窑内温度的均匀性、装载密度以及坯体的收缩程度。当窑内温度均匀、高温反应也均匀、坯体收缩小的情况下，升温可以快；反之，则不宜过快。

1200°C以上到最高烧成温度，坯体物化反应进行得更完全、釉面进一步玻化、制品进行烧结。为了保证制品烧好，需要有一定的最终保温时间，其长短决定于窑内温度的均匀性、坯体厚度和大小、以及制品所要求达到的玻化程度等。在本阶段内，有些制品要求烧还原焰，卫生瓷等制品则要求烧弱氧化焰。

自最高烧成温度到700°C左右，产品处于塑性状态，可以急冷。这样非但氧化亚铁（ FeO ）来不及与空气进行氧化，可避免制品发黄，而且还使制品不易析晶，提高了产品的白度和光泽度。

700~500°C为石英晶型转化阶段，冷却速度应当适当减慢，特别是复杂形状和厚壁制品更要注意，以免产品炸裂。

500~80°C，产品出窑前，可以直接吹风快冷。但对于含有方石英的制品要注意其晶型转化温度220~270°C时的冷却速度，不宜过快。

根据制品烧成过程中的物化反应，只要加热和冷却均匀，制品可以在很短的时间内烧成。如在35米辊道窑上，一次焙烧的釉面砖仅90分钟即可烧成，卫生瓷在40米明焰隧道窑上装匣钵烧成，或在96米隔焰隧道窑上，烧成时间分别为15.8~19小时和18.2小时（这样的烧成时间还是比较长的，按理说在数小时内即可烧成）。但是有些隧道窑由于结构不理想，窑断面高、大，制品装得过密，窑内传热速度慢，温度分布不均匀，大大延长了烧成时间，比应有的快速烧成的时间延长了几倍以至几十倍。这就要求我们注意改进现有隧道窑，达到快速烧成的目的。

根据粘土质建筑陶瓷制品的物化反应过程，一般的烧成曲线如图1-2所示。

目前一般建筑陶瓷制品的烧成制度，大多是参照已有的生产厂焙烧同类制品的烧成制度来制订的。援外工程或一些新产品的烧成制度，则根据所采用的原料进行半工业加工试验来制订。

（二）应使窑温均匀和加速传热

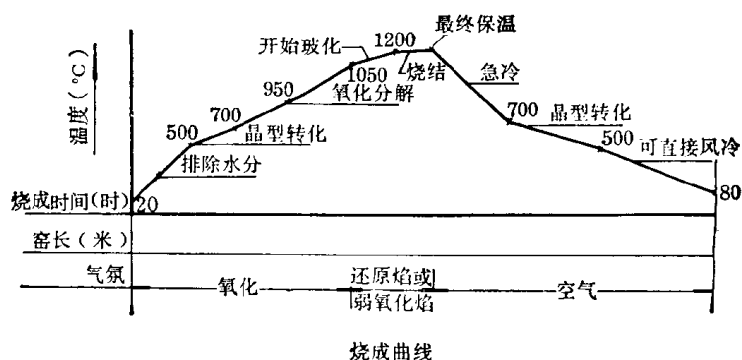


图1-2 烧成曲线

在焙烧制品时，应尽量使窑温均匀，并加速传热，以缩短烧成时间，提高产品的产量、质量和降低燃料消耗。

根据建筑陶瓷制品的物化性能，从理论上讲，一般在数小时内即可烧成。但目前在窑内的烧成时间大部分在15~20小时以上，主要是现有的隧道窑传热慢，窑内温度分布不均，特别是预热带温度分布不均，上下温差有时可达300~400°C，这样窑上部制品已能够推到烧成带去了，可是窑下部的制品还处于低温阶段，没有得到充分预热，物化反应没有进行完全，如推到烧成带去就会造成废品，所以不得不延长烧成时间，这就降低了窑的产量，增加了燃料消耗。所以如何使隧道窑加快传热和减少窑内温差（即使窑内温度分布均匀），特别是减少预热带的温差是隧道窑快速烧成的关键，也是隧道窑改进的方向。

关于减少预热带温差的措施，将在第四节里叙述。

加快窑内传热由传热公式： $Q = (\alpha_{对} + \alpha_{辐}) \cdot \Delta t \cdot F$ （千卡/小时）可以看到，影响传热的因素有三个：对流和辐射传热系数（ $\alpha_{对}$ 和 $\alpha_{辐}$ ），窑内火焰或隔焰道壁表面温度与制品的温度差（ Δt ），以及传热面积（ F ）。不论增大那个，都可增加每小时传给制品的热量，加快烧成。具体地说：

1. 明焰隧道窑预热带主要靠烟气对流传热（ $Q_{对}$ ）给制品。要提高 $Q_{对}$ ，可以提高烟气温度、扩大烟气和制品之间的温度差，但是提高烟气温度有一定的限制，特别是窑内温度分布不均的窑，更不能靠提高烟气温度来加速传热，因烟气温度过高，容易导致制品局部温度过高而造成废品。所以在装车时可尽量扩大烟气和制品（或匣钵）的接触面，并提高对流传热系数（ $\alpha_{对}$ ）来加快传热。

$\alpha_{对}$ （ $\alpha_{对} = \frac{3w_{烟}^{0.8}}{d^{0.25}}$ ）几乎与气体流速成正比。因此，要提高 $\alpha_{对}$ 就要提高窑内烟气的流速，而且流速大，窑内温度也均匀，即可加快烧成。然而在目前的一些明焰隧道窑内，烟气流速太慢，仅1~2米/秒。故有些窑在这带采用气体再循环，如设搅拌气幕等措施，以增加气体流速，提高对流传热。虽然不够理想，但有一定效果。据介绍，国外隧道窑在这带采用了高速等温烧嘴，喷出气体的速度可达数百米/秒，成百倍地增加了对流传热速度，大大加速窑内对流传热。同时对预热带温度均匀还极为有利。高速等温烧嘴喷出的焰气进入窑内之前，加入大量的二次空气，使喷入窑内气体的温度适应于该处所需的温度，并能带动窑内气体横向旋转，对均匀窑内温度比用搅拌气幕更为有效。

2. 隧道窑烧成带主要靠火焰或隔焰道壁辐射传热 ($Q_{\text{辐}}$) 给制品。如何提高 $Q_{\text{辐}}$ ：

(1) 应采用固体辐射传热。因固体辐射传热系数可达 4 千卡/米²·°K⁴·时左右，而气体辐射传热系数则较小（除采取一些措施外）。所以由气体辐射改为固体辐射，可以大大强化传热过程，为快速烧成创造了条件。因此，断面小的隔焰隧道窑传热快，窑内温差小，较大的缩短了烧成时间，节约了燃料。半隔焰隧道窑有一部分燃烧产物靠近车面喷入窑内，或者由烧成带端进入窑内。既有隔焰窑烧成带固体辐射传热高，还提高了预热带对流传热的优点。但对怕火焰冲刷和污染的制品，仍只能采用隔焰隧道窑烧成。

(2) 将明焰隧道窑烧成带内断面扩大比预热带、冷却带宽、高。这样，一方面增加了气体辐射层的厚度，提高了辐射能力，同时窑内火焰饱满，烧成带压力小，好操作。

(3) 装车时，适当稀码，制品或匣钵间的空隙大些，也可提高气体辐射层厚度，从而提高辐射能力，加速传热。

3. 合理选用烧嘴。目前一些明焰窑上用的烧嘴，喷出气流速度低，靠近喷火口的地方温度高，窑中间温度低，难于快速烧成。要使燃烧速度快、窑内温度又均匀。据国外介绍，采用高速等温烧嘴，由于它喷出气流速度高（达数百米/秒），火焰一经喷出立即达到窑中心，火焰温降甚小，并可带动窑内气流再循环，窑内温度既均匀又大大加快了传热，从各方面对制品进行均匀快速的加热和焙烧，为快速烧成提供了条件。

4. 制品尽量不装在匣钵内烧，既加速了传热，又降低了成本。因为装在匣钵内烧，匣钵吸收的热量要比制品多几倍，同时低温阶段烟气以对流方式把热传给匣钵，此时，匣钵温度低，辐射能力小，匣钵内气体对流不大，所以匣钵传给制品的热量不多。高温阶段，匣钵接受火焰的辐射热以后，才能把热辐射给制品，但由于制品和火焰之间有匣钵隔离，制品不能从火焰直接获得辐射热，升温缓慢，故制品装在匣钵内不能快速加热和冷却。如制品不装匣钵（明装），制品直接面向火焰，容易升温，既缩短了烧成时间，增加了产量，又节约了燃料，省去了匣钵材料，降低了成本。所以快速烧成，制品应尽量不装在匣钵内烧，若有些制品不能明装，可采用隔焰或半隔焰隧道窑来进行烧成。

(三) 应选用合适的筑炉材料

窑砌体蓄热、散热很大，故在筑窑材料的选用上，应尽量选用导热系数小、热容小、并具有一定强度的轻质、高温耐火材料或高温耐火材料和保温性能好的保温材料。这些材料可使砌体轻、吸热少、散热少，既节约燃料，窑内温度调节又灵活。特别是烧成带砌体，如选用的材料热容大，容易造成温度滞后现象；若采用热容小的材料，可以减少这种温度滞后性，温度调节灵活，尤其对自动调节温度的隧道窑更为重要。

窑车衬砖蓄热、散热量也很大，不适于快速烧成。应尽量采用蓄热少的轻型窑车，或者采用推板、辊道和其它输送方式。

(四) 应充分利用窑的余热，进一步提高窑的热效率，降低燃料消耗

衡量窑的热经济有两个指标，一是窑的热利用系数；二是可以利用的余热。目前隧道窑热经济都比较差。虽然隧道窑冷却制品的余热一般都进行了利用，但还不够充分。窑墙、窑顶和车下的散热还比较多，有的窑出车温度还较高，有的窑直接从冷却带窜入烧成带的热空气过多，还有的漏损也较大。以致隧道窑焙烧建筑陶瓷制品的有效热（即用于蒸发水分、化学反应和将制品加热到最高温度所需的热量除以燃料的化学热）仅 8~15%，抽出供助燃和干燥或余热锅炉利用的热量为 10~25%（指抽出利用热量除以燃料的化学热）。

其余都损失掉了。其中损失最多的是废气带走的热占26~43%，窑墙、窑顶散失热为16~26%，出窑制品和窑车带走的热7~15%，同时漏损和窑车底散热也不少。因此如何进一步利用余热、减少热损失是提高窑的热经济，节约燃料的一个重要途径。

隧道窑余热，目前主要利用了装载制品或匣钵冷却放出的热量，抽送去助燃、干燥、气幕或加热锅炉，利用蒸汽加热重油和解决生活用热水等。有的窑还利用了车下抽出的热空气作气幕和经换热器送去干燥用。隔焰隧道窑还利用了排出废气热来预热空气供干燥用。根据各地的经验：还可利用烧成带、冷却带拱顶和窑墙的散热用作干燥、用作助燃空气、油管的加热与保温。按照宜兴丁山地区的经验，若隧道窑余热得到充分利用，可将隧道窑的有效热提高一倍以上，可节约不少的燃料。

(五) 要节约材料，便于施工，方便操作，改善劳动条件。

(六) 窑的结构要牢固，并加强密封，延长窑的寿命。

根据以上这些要求，进行多方面的比较，就可以做出经济合理、技术先进，符合多、快、好、省的设计。

三、隧道窑总体设计内容

主要包括窑的主要尺寸、窑的工作系统、窑的各带（预热、烧成和冷却带）结构，以及窑下检查坑道、窑车下的冷却结构等项。关于窑的基础、窑墙、窑拱的结构、燃烧装置、烟道、烟囱的计算、耐火材料的选择、管道的设计、附属构件、附属设备和风机选型等，将在其他章节介绍。

第二节 隧道窑主要尺寸的确定

隧道窑窑型选定后，根据设计任务要求的产品品种、规格和产量，即可确定窑的主要尺寸——窑的内断面（内宽、内高）和窑长（窑的外形尺寸包括窑墙和窑顶厚度的设计详见第十一章）。

隧道窑主要尺寸的确定不仅关系到占地面积、造价（一次投资），还关系到产量、质量、热利用（即燃料消耗）和操作控制等问题，故必须全面权衡确定，以符合多、快、好、省的原则。

一、窑内断面（内宽与内高）尺寸的确定

窑内断面尺寸主要决定于制品品种、规格（外形尺寸）和装载的方法。制品的装载宽度和高度，再加上装载制品料垛两侧和顶上的空隙（约100毫米左右）就是窑的内宽和内高。但在确定制品装载方法和窑的内宽和内高尺寸时，要考虑到窑内温度和气氛分布的均匀性，传热好坏，阻力大小，以及装车的稳定性和变不变形等因素。如装载制品的间隙较稀，而且合理，窑内温度、气氛分布就较均匀，窑内断面尺寸比装得密的窑就要大些。同时还要注意到燃料燃烧的方法，如燃料在窑道内燃烧的，则比在窑两侧燃烧室内燃烧的窑道要宽，明焰窑比隔焰窑的窑道宽。如采用高速烧嘴时，比采用有焰烧嘴的窑内断面又要大些。

但从现有建筑陶瓷隧道窑的实际生产情况来看：窑内上下温差一般都比较大，尤其是预热带上下温差大，一般约在150~250°C，有的甚至高达300~400°C；烧成带的温差在

5~30°C左右，也有比这高的；冷却带在60~70°C，比预热带温差小；窑内水平温差则较小，一般在5~20°C左右。所以设计时：

(一) 窑内宽

在不影响水平温差的前提下，应适当增宽，降低窑内高，有利于减小窑内上下温差。一般地说，加宽窑道比加长和加高窑道更有利于提高窑的有效利用率，而且宽而短的窑造价也低。我国现有焙烧卫生瓷窑内宽0.6~1.7米；焙烧面砖窑内宽0.3~1.7米；焙烧锦砖窑内宽1.2~1.7米。

(二) 窑内高 (指装载面到拱顶高)

除特殊需要和采取有特殊措施来减少窑内上下温差的窑外，一般不宜过高，以免造成上下温差大。一般说，窑的内高应小于内宽。对采用固体、液体和气体燃料加热的隧道窑，其断面趋向扁平的形式。这样，温度容易均匀，并好控制。

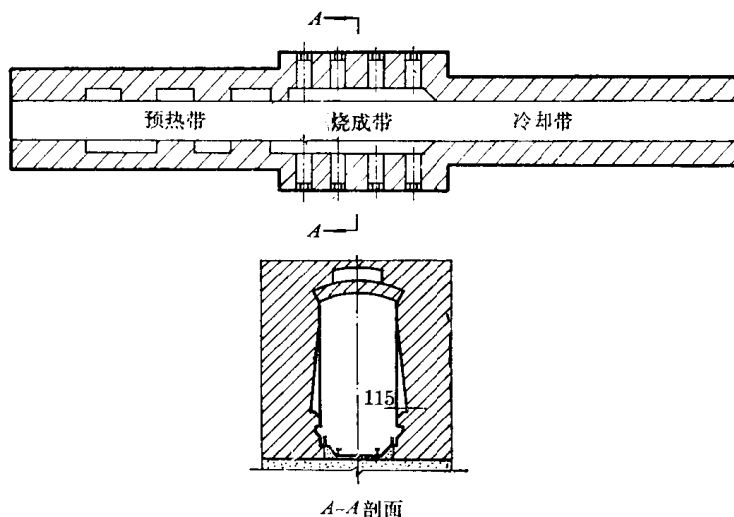


图1-3 窑内烧成带断面不等宽

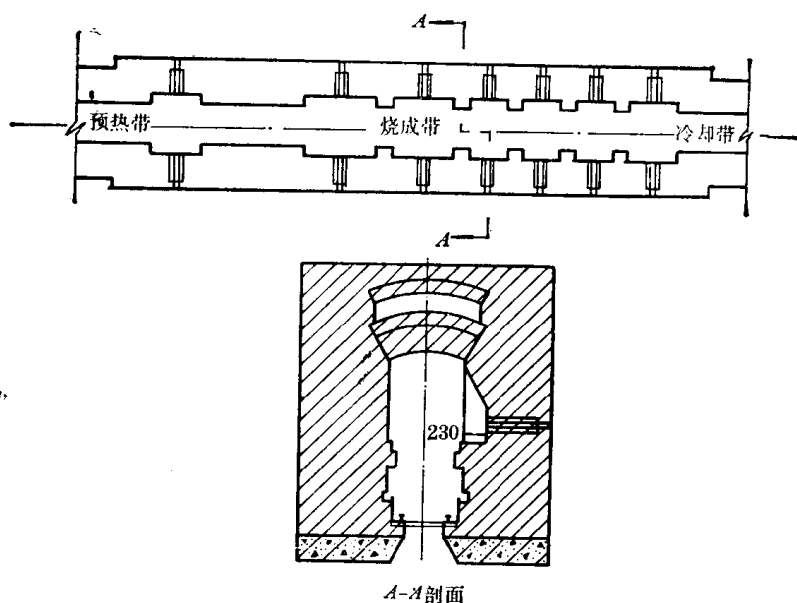


图1-4 窑内烧成带断面不等宽