

WUTP

现代陶瓷教科丛书

Ceramic Industrial Kilns

# 陶瓷工业窑炉

胡国林 周露亮 陈功备 编著

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

现代陶瓷教科丛书

Ceramic Industrial Kilns  
陶瓷工业窑炉

胡国林 周露亮 陈功备 编著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

**图书在版编目(CIP)数据**

陶瓷工业窑炉/胡国林,周露亮,陈功备编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.8  
ISBN 978-7-5629-3283-3

I. ①陶…

II. ①胡… ②周… ③陈…

III. ①陶瓷工业-工业炉窑

IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 159994 号

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

E-mail:wutpyyk@163.com

印刷者:荆州市鸿盛印务有限公司

经销者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:11.25

插 页:3

字 数:263 千字

版 次:2010 年 8 月第 1 版

印 次:2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87397097 87383695

# 前 言

陶瓷工业窑炉是陶瓷工业生产中最重要工艺设备之一,对陶瓷产品的产量、质量以及成本起着关键性的作用。改革开放以来,通过引进与消化吸收国外的先进装备与技术,我国的陶瓷工业窑炉在燃料、筑炉材料、窑体结构上都有了飞速的发展。然而,大学课堂里采用的仍是华南理工大学刘振群教授在 20 世纪 80 年代主编的《陶瓷工业热工设备》一书。为了反映我国近二十年来陶瓷工业窑炉的技术进步,我们在刘振群教授编写的《陶瓷工业热工设备》、宋嵩教授编写的《现代陶瓷窑炉》以及胡国林编写的《建陶工业辊道窑》的基础上,查阅了近二十年来有关陶瓷窑炉的资料,着手编写了本书。

本书着重介绍了目前陶瓷工业应用最广泛的明焰式窑车隧道窑、辊道窑、梭式窑,同时对传统的陶瓷窑炉及电热窑炉也作了一些保留,以尽量使读者对陶瓷工业窑炉有一个较全面的了解;并希望读者通过学习本课程后,具备使用、改进和设计现代陶瓷工业窑炉的能力。

本书由景德镇陶瓷学院胡国林主编,并执笔编写了第 1、3、6 章及附录,第 2 章由周露亮执笔,第 4、5 章由陈功备执笔,胡国林策划了本书的编写大纲并统稿。

编写时,尽管我们在主观上力求内容尽可能新,但由于作者水平有限,书中难免存在缺点与错误,诚恳欢迎各界同行与读者提出批评指正,以便日后修改完善。

编著者

2009 年 11 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 陶瓷工业窑炉的发展历程 .....	(1)
1.2 陶瓷工业窑炉的分类与命名 .....	(2)
1.3 陶瓷制品烧成过程分析 .....	(3)
1.3.1 陶瓷的烧成过程 .....	(3)
1.3.2 合理的烧成制度 .....	(3)
<b>2 隧道窑</b> .....	(5)
2.1 概述 .....	(5)
2.2 隧道窑分带和工作系统 .....	(6)
2.3 隧道窑窑体 .....	(8)
2.3.1 窑体主要尺寸 .....	(8)
2.3.2 窑墙 .....	(8)
2.3.3 窑顶 .....	(12)
2.3.4 隧道窑窑体其他结构 .....	(16)
2.4 预热带结构分析 .....	(17)
2.4.1 封闭气幕 .....	(17)
2.4.2 排烟系统 .....	(19)
2.4.3 搅动气幕 .....	(22)
2.5 烧成带结构分析 .....	(23)
2.5.1 烧嘴和燃烧室的布置 .....	(23)
2.5.2 隧道窑的燃烧设备 .....	(24)
2.5.3 助燃风送风装置 .....	(25)
2.5.4 燃料供应系统 .....	(27)
2.5.5 气氛幕 .....	(28)
2.6 冷却带结构分析 .....	(28)
2.6.1 急冷段结构 .....	(28)
2.6.2 缓冷段的冷却结构 .....	(29)
2.6.3 窑尾快冷段结构 .....	(30)
2.6.4 平衡烟囱 .....	(30)
2.7 运载输送系统 .....	(31)
2.7.1 窑车 .....	(31)
2.7.2 推车机 .....	(32)
2.7.3 轨道 .....	(33)
2.7.4 拖车 .....	(34)

2.8	钢架结构	(35)
2.9	隧道窑基础	(37)
3	辊道窑	(40)
3.1	概述	(40)
3.1.1	辊道窑的发展简史	(40)
3.1.2	辊道窑的特点	(40)
3.2	辊道窑的分带及工作系统	(41)
3.3	辊道窑窑体	(42)
3.3.1	窑体主要尺寸	(42)
3.3.2	窑墙	(43)
3.3.3	窑顶	(45)
3.3.4	其他结构	(49)
3.4	预热带结构分析	(51)
3.4.1	排烟结构	(51)
3.4.2	辊上喷风装置	(53)
3.4.3	辊下加热装置	(54)
3.5	烧成带结构分析	(54)
3.5.1	烧嘴的布置	(55)
3.5.2	管路布置	(55)
3.5.3	烧嘴的选用与安装	(57)
3.6	冷却带结构分析	(59)
3.6.1	急冷段结构	(59)
3.6.2	缓冷段结构	(59)
3.6.3	窑尾快冷段结构	(60)
3.7	辊道窑的传动系统	(61)
3.7.1	辊子	(62)
3.7.2	辊子的联接形式	(66)
3.7.3	辊子的支承	(67)
3.7.4	辊孔的密封	(69)
3.7.5	辊距	(69)
3.7.6	传动方案的分析与比较	(70)
3.8	辊道窑的钢架结构	(77)
3.8.1	角钢、槽钢构成的钢架结构	(77)
3.8.2	方形钢管构成的钢架结构	(77)
3.9	日用瓷辊道窑	(79)
3.9.1	高温日用瓷辊道窑的特点	(79)
3.9.2	窑体结构与砌筑材料	(79)
3.9.3	窑具的选择	(81)
3.9.4	工作系统布置	(81)

3.9.5	日用瓷辊道窑实例	(82)
<b>4</b>	<b>间歇窑</b>	(86)
4.1	概述	(86)
4.2	倒焰窑	(86)
4.2.1	倒焰窑的工作流程与窑体结构	(86)
4.2.2	倒焰窑的燃烧设备	(88)
4.2.3	倒焰窑的排烟通风系统	(89)
4.3	梭式窑	(90)
4.3.1	窑室	(90)
4.3.2	窑车	(94)
4.3.3	燃烧系统	(95)
4.3.4	排烟系统	(100)
4.3.5	典型现代陶瓷梭式窑简介	(103)
4.4	罩式窑	(106)
4.4.1	结构特点	(106)
4.4.2	美国 Bickley 公司燃气 20m <sup>3</sup> 罩式窑介绍	(108)
<b>5</b>	<b>电热窑炉</b>	(110)
5.1	概述	(110)
5.1.1	电热窑炉与火焰窑炉的比较	(110)
5.1.2	电热窑炉的分类	(111)
5.2	电热元件的性能	(112)
5.2.1	电热窑炉对电热体性能的要求	(112)
5.2.2	常用电热体材料的性能	(113)
5.3	电阻炉的热工计算	(117)
5.3.1	热平衡法确定电炉功率	(117)
5.3.2	经验法确定电炉功率	(117)
5.3.3	电热体单位表面功率的确定	(118)
5.3.4	电热体尺寸的计算	(119)
5.4	电阻炉的安装与使用	(124)
5.4.1	电阻炉的安装	(124)
5.4.2	电阻炉的使用	(128)
5.5	电热陶瓷间歇窑	(131)
5.5.1	箱式电炉	(131)
5.5.2	电热梭式窑	(132)
5.5.3	电热罩式窑	(134)
5.6	连续性电热窑炉	(138)
5.6.1	11m 电热隧道窑	(138)
5.6.2	8m 电热隧道窑	(139)
5.6.3	SD 系列单隧道电热推板窑	(139)

<b>6 陶瓷工业窑的设计</b> .....	(140)
6.1 确定基本方案 .....	(140)
6.1.1 原始资料的收集 .....	(140)
6.1.2 窑型的确定 .....	(140)
6.2 窑体主要尺寸计算 .....	(141)
6.3 工作系统确定 .....	(143)
6.4 窑体材料及厚度的确定 .....	(145)
6.5 燃料燃烧计算 .....	(147)
6.6 燃料消耗量计算 .....	(149)
6.6.1 连续窑预热带和烧成带的热平衡计算 .....	(149)
6.6.2 间歇窑的热平衡计算 .....	(155)
6.7 冷却风量的计算 .....	(158)
6.8 排烟道与通风管道计算,阻力计算及风机选型.....	(162)
6.8.1 阻力计算基本公式 .....	(162)
6.8.2 排烟与通风系统的通道尺寸计算 .....	(164)
6.8.3 风机选型 .....	(166)
6.9 工程材料概算 .....	(167)
<b>参考文献</b> .....	(171)



# 1 绪 论

## 1.1 陶瓷工业窑炉的发展历程

窑炉是陶瓷生产中最重要烧成设备。我国陶瓷行业自古就有“生在成型，死在烧成”、“三分做，七分烧”及“陶瓷是火里求财”等行业谚语。我国陶瓷历史悠久，又是最早发明与使用瓷器的国家，所以也是创建窑炉最早的国家。从上溯万年前的野烧和西安半坡遗址发掘的远在五千年前就建造的穴窑；到距今两千五百年前的战国时代，南方就开始创建了依山而筑的龙窑，北方创建了半倒焰的馒头窑；至宋代，在山东、陕西等地，部分馒头窑已用煤作燃料；明代，在福建德化创建了阶级窑；明末清初，江西景德镇创建了景德镇窑。当时我国陶瓷窑炉与陶瓷生产技术远远领先于世界各国，生产的精美陶瓷也远销世界各地，享誉全球。

陶瓷窑炉发展历史大体上可划分为以下三个阶段：

### (1) 古代陶瓷窑炉(公元 1850 年以前)

古代陶瓷窑炉是在手工作坊式的生产经济下出现的，其中最具有代表性的窑型是我国的景德镇窑和龙窑。景德镇窑壁薄，外形近似半个平卧在地的鸭蛋，故又称蛋形窑；其底部微倾，斜向上直通烟囱，这正符合热烟气向上自然流动的规律，加上它独特的形状有利于减小窑内温差；此型窑在还原焰下烧制出的“薄如纸、白如玉、声如磬”的精美瓷器，使景德镇获得了享誉世界的“瓷都”称号。龙窑多依山而建，形状像卧龙，故称为龙窑；依山而建的窑底形成  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  的倾斜角，也是适应了热气流自然向上的规律，而且加火孔在每个窑室的窑顶，自下部窑室点火投入木柴，依次逐步向上面的窑室投入木柴，热烟气逐一流经上部窑室，最后通向烟囱，极大地提高了热利用率，但窑内温差大。

### (2) 近代陶瓷窑炉(公元 1850—1950 年)

近代陶瓷窑炉是在英国工业革命开始以后，欧美近代工业发展中形成的。其中代表性的窑型有倒焰窑与隧道窑。

倒焰窑是由半倒焰式馒头窑进化而来，20 世纪初日本陶瓷界将我国创建的馒头窑改进为倒焰窑。倒焰窑是因火焰流动情况命名的，火焰从燃烧室上升至窑顶，受到窑顶的阻挡，同时窑底部有吸火孔，由通向烟囱之烟道的吸力使火焰向下倒行，经匣钵柱的间隙进入吸火孔，经烟道由烟囱排出。由于焙烧制品时热气流自上向下流动，符合气体分流法则，有利于消除窑内水平温差，加上燃烧可以用煤或重油，在旧式陶瓷窑中是比较合理的，但与隧道窑比较，热耗要高得多，故现已基本被淘汰了。

隧道窑是由龙窑与轮窑进化而来，机械化的隧道窑是 1889 年由法国人福基罗(Faugeron)创建成功。隧道窑由窑车作制品的输送工具，火焰自烧成带水平流向窑头预热坯体后再经烟道流经烟囱排出，生产效率高，热利用率也高，属近代最先进的窑型，一直沿用至今。

### (3) 现代陶瓷窑炉(公元 1950 年至今)

现代陶瓷窑炉是在第二次世界大战以后，现代工业发展的基础上产生的。其中代表性的

窑型有梭式窑、现代隧道窑及辊道窑,本书重点介绍这三种窑型。

近 60 年来,陶瓷窑炉的发展发生了质的飞跃,达到了陶瓷窑炉技术的新的最高峰。现代陶瓷窑炉技术的飞速发展,一是靠能源工业的进步,我国陶瓷工业窑炉经历了柴烧、煤烧、烧重油到用煤气及轻柴油等清洁燃料的发展过程;二是靠耐火材料工业的进步,五十余年来涌现了以陶瓷纤维和高温轻质耐火材料为代表的各种新型材料作陶瓷工业窑炉的筑炉材料,大大降低了窑体散热损失,减轻减薄了窑体;三是以高速烧嘴为代表的燃烧技术的进步,保证了窑内温度场的均匀,显著提高了产品质量,实现了快速烧成;四是以计算机技术为代表的窑炉自动控制技术的不断进步,使以 CPU 为核心的许多智能控制仪表及计算机被应用于陶瓷工业窑炉的温度、压力与气氛的控制,减少了人工因素的干扰,确保了烧成制度的稳定。

## 1.2 陶瓷工业窑炉的分类与命名

陶瓷工业窑炉的分类方法很多,可以按使用燃料来分,如煤烧窑、油烧窑、气烧窑等;也可按具体用途来分,如干燥窑、素烧窑、釉烧窑、烤花窑等;还可按形状与运载工具来分,如圆窑、方窑、隧道窑、辊道窑等。从总的概念上来说,一般按生产操作形式将陶瓷工业窑炉分为连续式窑炉与间歇式窑炉两大类。

连续式陶瓷工业窑的形状像一条长的隧道,最初运载制品的工具为窑车,随着技术的发展又出现了运载工具为推板、步进梁、辊道等。广义来讲,这些不同运载工具的隧道式窑都应称之为隧道窑,但新发展起来的推板式、步进式、辊道式隧道窑都已有自己的名称,如推板窑、步进窑、辊道窑等。因此,本书按约定俗成的原则,将以窑车为运载工具的连续式陶瓷工业窑命名为隧道窑,其他连续式窑则以运载工具来命名。此外在一些特定场合,为了区分使用燃料或用途的不同,可以在这些命名前冠以燃料或用途的特征。

由于间歇式陶瓷工业窑生产操作方式是间歇式的,升温与降温同在一窑室里进行,使其窑体散热损失大、余热利用率低、生产效率低,所以传统的间歇式窑(倒焰窑)已逐渐从陶瓷生产领域里淘汰出局。但是,由于近几十年来新型筑炉材料的出现及其他科学技术的进步,现代间歇式陶瓷工业窑的热利用率不断提高,热效率已接近隧道窑水平,加之其灵活的生产方式等优越性,以梭式窑为代表的现代间歇式陶瓷工业窑在陶瓷生产中得到了广泛应用与蓬勃发展。现代间歇式陶瓷工业窑按窑体活动形式主要分为梭式窑与罩式窑两种。梭式窑主要由固定的长方形窑室与活动的窑车作窑底组成,窑车出入窑室的运动如织布机上的梭子,故称为梭式窑。有的资料将一个窑门出入的窑型称为抽屉窑,而将窑室对开两个门、窑车可轮换从两门进出的窑型才称为梭式窑。由于国内外的此类窑多为一个窑门(对窑的密封性有利且便于砌筑),为统一名称起见,还是将它们统一命名为梭式窑。罩式窑由可以上下移动的罩形窑室与窑底组成,其窑底可以做成固定在地面,也可以是可移动的窑车。罩式窑的移动窑室可以是方形或长方形,也可以是圆形;由于其形状似钟,又有资料称这种圆形窑室的罩式窑为钟罩窑。同样,为了名称的一致,还是将它们统一命名为罩式窑。

## 1.3 陶瓷制品烧成过程分析

### 1.3.1 陶瓷的烧成过程

陶瓷制品的烧成过程甚为复杂,无论采用何种窑炉完成其烧成过程,在烧成过程的各个阶段中均将发生一系列物理化学变化过程,最后出窑成陶瓷产品。要实现陶瓷这些物理化学变化的圆满完成,在窑炉中当然还存在燃料燃烧过程、气体流动过程和传热过程。这里仅对陶瓷制品在烧成过程中的物理化学变化,按不同的温度阶段作一简单叙述。

第一阶段:室温~200℃左右。

此阶段为蒸发阶段,主要是排除机械水和吸附水,坯体不发生化学变化,只发生坯体体积收缩、气孔率增加等物理变化。

第二阶段:200℃~出现液相的温度(约950℃左右)。

此阶段为氧化分解阶段,坯体的主要化学变化是结构水的排除,坯体中所含有机物、碳酸盐、硫酸盐等化合物的分解和氧化,以及晶形转变。

第三阶段:950℃~最高烧成温度以及在该温度下的保温。

此阶段为烧结阶段。由于各种陶瓷制品性质及其所用原料不同,最高烧成温度也不同。主要发生的变化是坯体中的长石类熔剂熔融出现液相,由于液相的产生,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,促使颗粒间中心距离缩小,坯体逐渐致密。同时,游离 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 会在液相中再结晶,形成一种针状的莫来石新晶体,它还能在液相中不断成长,并与部分未被液相溶解的石英及其他成分共同组成坯体的骨架,而玻璃态的液相就填充在这骨架之中,使制品形成较严密的整体。此时,气孔率降低,坯体产生收缩,强度随之增加,从而达到瓷化。

第四阶段:最高烧成温度~液相凝固温度(约700℃左右)。

此阶段仍有液相参加的某些变化的延续,但主要是液相粘度增大,并伴有析晶产生。由于液相的存在使产品仍有塑性,此阶段可以急冷,故又称急冷阶段。

第五阶段:液相凝固温度~出窑温度。

此阶段为产品的继续冷却阶段,产品由塑性状态转化为刚性状态,硬度和强度增至最大。产品冷至573℃,还会发生石英的晶形转变、析晶和物理收缩。

### 1.3.2 合理的烧成制度

合理的烧成制度是实现烧成过程优质、高产、低消耗的关键。烧成制度包括温度制度、气氛制度和压力制度,其中温度制度无疑是烧成制度中最重要的。温度制度是窑内制品温度随时间(对间歇式窑)或位置(对连续式窑)变化的规定,一般将温度制度绘成直角坐标系上的曲线来表示,以横坐标表示时间或位置,以纵坐标表示制品温度,此曲线便称为烧成曲线。合理的温度制度包括以下三个方面:

(1)适宜的最高烧成温度及高火保温时间

最高烧成温度主要取决于产品配方,可由同类产品工厂实际中收集数据或根据开发性实验得到的数据来确定。在适宜的烧成温度下还要有一定的保温时间,通过保温可以使制品内

外温度趋于一致,使其内外充分烧结、釉面成熟平整。

### (2)各阶段合理的升(降)温速率

升(降)温速率主要取决于制品的大小与厚薄、坯体成分、烧成条件(包括烧成设备与烧成方式)等。主要从三个方面考虑:一是要考虑制品在烧成过程中各阶段所进行的物理化学变化所需要的时间,例如含有机质多的坯料在氧化反应阶段升温就应慢点。二是要考虑传热过程中制品存在导热热阻,制品表面与中心总会有温差,也就会在制品内部产生热应力,一旦超出一定界限就会使制品产生变形或开裂。显然,制品的厚薄影响很大,例如卫生洁具就远比建筑瓷砖升降温的速率慢得多。三是要考虑制品在烧成过程中一些晶形转变使制品体积发生的较大变化,例如在 $573^{\circ}\text{C}$ 左右有石英的晶形转变,会使石英体积变化 $0.82\%$ 。由于升温阶段制品仍呈细颗粒状,孔隙率较大,体积变化有伸缩余地,故一般不会造成晶形转变而引起的开裂。但在降温阶段由于制品已冷却为刚性体,因而在这一温度区域里就必须减缓降温速率,即要缓冷。

### (3)窑内断面温度均匀性好

窑炉各带或各烧成阶段截面温度均匀性好(即窑截面的上下、水平温差小),是保证烧成出来的陶瓷产品质量好的重要因素,也直接影响到陶瓷生产企业的经济效益。窑内断面温度均匀性主要取决于窑炉结构的合理性和生产操作控制的科学性,因此,从设计窑炉、建造窑炉到生产操作都必须高度重视。

确定合理的温度制度除了理论分析(包括计算机模拟)外,由于产品种类和配方千变万化,更多地还要以实验数据为依据,并最终在生产实际中加以调整确定。

气氛制度是窑内制品周围气体性质随时间(或位置)变化的规定。气体性质是以其中游离 $\text{O}_2$ 或还原性气体的含量(体积百分比)而定。强氧化气氛含游离 $\text{O}_2$ 为 $8\%\sim 10\%$ ,一般氧化气氛含游离 $\text{O}_2$ 为 $4\%\sim 5\%$ ,中性气氛含游离 $\text{O}_2$ 为 $1\%\sim 1.5\%$ ,还原性气氛含游离 $\text{O}_2$ 小于 $1\%$ ,含 $(\text{CO}+\text{H}_2)$ 为 $2\%\sim 5\%$ 。气氛制度的确定依据主要为两点:一是陶瓷产品种类,例如建筑陶瓷一般是在全氧化气氛下烧成,而日用瓷大多在升温后期(约 $1050^{\circ}\text{C}$ 以后)需要在还原气氛下成瓷。二是根据制品在烧成过程物理化学变化的需要。一般来说,在氧化阶段( $200\sim 950^{\circ}\text{C}$ 左右)窑内要保证较强的氧化气氛;而对日用瓷还要注意,在 $1050^{\circ}\text{C}$ 左右时由氧化气氛向还原气氛的转换。因此,气氛制度与温度制度是互相关联的,保证气氛制度的关键是要做到温度与气氛的对口。

压力制度是窑内气体压力随时间(或位置)变化的规定。一般窑炉多在常压下操作,压力变化幅度很小(通常为大气压 $\pm 0.1\%$ 的范围内),这种压力范围对制品的物理化学变化影响甚微。但合理的压力制度是实现合理的温度制度和气氛制度的保证,例如,当需要保持还原气氛时,应在微正压下操作,否则会吸入外界空气而变成氧化气氛。在实际操作中,控制压力制度的重点是稳定零压面,零压面是负压与正压的交界面,零压面的位置稳定在合理位置,全窑的压力制度也就基本上稳定了。对连续式窑炉而言,一般在预热带与烧成带交界处有一个零压面,在冷却带的急冷段与缓冷段间也存在一个零压面,其中预热带与烧成带交界处的零压面最为重要。对间歇式窑炉来说,零压面位置主要与排烟出口位置有关,窑底排烟的间歇式窑炉在升温阶段一般将零压面稳定在窑底附近;而窑顶排烟的间歇式窑炉则将零压面稳定在制品上方附近。当然,由于间歇式窑炉的操作特点,其零压面的位置还应随不同的烧成阶段有一定的变化,其目的仍是保证合理的温度制度与气氛制度的实现。

## 2 隧 道 窑

### 2.1 概 述

本章介绍的隧道窑仅指以窑车作为坯体运载工具的一种连续式窑炉,由窑墙、窑顶构成的窑车通道与铁路隧道相似,内有轨道,装有坯体的窑车在轨道上运行完成烧成过程,故名隧道窑。

隧道窑最早出现在 19 世纪 50 年代的欧洲,但是直到 19 世纪末 Faugeron 建造的隧道窑才成功地用于烧制陶器。20 世纪至今,隧道窑经过一百多年的不断发展改进,现今已普遍用作日用陶瓷、卫生陶瓷、电瓷等陶瓷工业生产的主要烧成设备。除陶瓷工业外,其他工业如耐火材料、磨料磨具、砖瓦等也广泛使用隧道窑。

新中国成立前,全国只有一座隧道窑,而且还未正式进行生产。新中国成立后陶瓷工业有了很大的发展,新式窑炉也逐渐增多,一方面从国外引进了一些以发生炉煤气为燃料的隧道窑,另一方面我国也自己设计建造了大量隧道窑。例如:1958 年山东博山瓷厂自己动手建成了第一座用煤烧日用瓷的隧道窑;1959 年由西北建筑设计院设计,在咸阳陶瓷厂建成了第一座用发生炉煤气焙烧建筑卫生瓷的隧道窑;1965 年湖南建湘瓷厂建造了第一座用重油焙烧日用瓷的隧道窑;1971 年由西北建筑院设计,在唐山陶瓷厂建成了第一座用重油焙烧建筑卫生瓷的隔焰隧道窑。隧道窑的产量大、机械化程度较高,从而自 20 世纪 60 年代开始在我国陶瓷工业领域得到了迅速的推广和应用。当时隧道窑主要以煤为燃料,随着我国石油工业的发展,逐步发展用重油作燃料。由于燃料种类的限制,烧成工艺落后,难以解决窑内温度均匀性问题,使得烧成周期长,产量难以提高,隧道窑的产品热效率低(约为 4%~7%),每 kg 瓷热耗在 41800kJ 以上。

20 世纪 80 年代后,我国各产瓷区陆续从国外引进了不少焙烧日用瓷、建筑卫生瓷、电瓷,以洁净的煤气或轻柴油为燃料,用微型计算机控制的轻型结构窑——车式隧道窑。经过翻版制造、消化吸收,我国隧道窑设计与建造也迈上了一个新台阶,主要表现为以下特点:一是燃料清洁化,使用清洁燃料(主要是气体燃料),可以采用明焰裸烧,火焰烟气直接加热制品,提高了传热效率;二是采用小流量、多烧嘴的燃烧系统,大大改善了窑内断面温度的均匀性;三是窑体、窑车与窑具的轻质化,选用新型轻质隔热耐火材料,加强了窑体的保温,也大大减少了窑车与窑具的吸热;四是测控系统计算机自控化,减少了人为干扰,保证了产品质量,同时也大大减轻了操作人员的劳动强度。由于以上明显的优点,现代隧道窑的产品热效率有了大幅度提高(约为 10%~15%),每 kg 瓷热耗降低到 12000~20000kJ,是传统隧道窑的一半左右,新一代隧道窑真正做到了优质、高产、低消耗。

尽管近二十年来,我国陶瓷工业隧道窑在技术与节能等方面取得了很大进步,但总体上来说,与世界先进国家比仍存在一定的差距,从能耗来说仍然要高出 50% 以上,节能还有很大的潜力。当前国家大力推行节能减排,对陶瓷隧道窑的发展提出了新的更高的要求。因此,当今陶瓷隧道窑的发展趋势应该向环保节能型窑炉方向发展,需要陶瓷热工技术人员不断通过科技创新,不断消化吸收先进国家的技术,并借鉴国内冶金等行业成功的先进技术,设计与建造

出具有世界先进水平的污染少、能耗低的环保节能型隧道窑。

陶瓷工业隧道窑按不同特征可分有很多种类,例如根据烧成温度的不同可分为低温隧道窑( $<1100^{\circ}\text{C}$ )、中温隧道窑( $1100\sim 1500^{\circ}\text{C}$ )、高温隧道窑( $>1500^{\circ}\text{C}$ )等;按烧成产品种类的不同可分为日用陶瓷隧道窑、卫生陶瓷隧道窑、耐火制品隧道窑等。一般来说,隧道窑主要是按供热热源的不同来分类,将隧道窑分为燃煤隧道窑、燃油隧道窑、燃气隧道窑及电热隧道窑。因为在陶瓷工业中,燃料隧道窑应用广泛,因此本章仅讲述燃料隧道窑。在燃料隧道窑中,又以火焰及烟气是否直接进入隧道空间而分为明焰隧道窑、隔焰隧道窑或半隔焰隧道窑。由于现代隧道窑越来越多地采用洁净燃料,目前所建燃料隧道窑几乎都是明焰隧道窑。明焰隧道窑也是本章介绍的重点。在没有特别说明时,本书所讲到的隧道窑都是明焰隧道窑。

## 2.2 隧道窑分带和工作系统

隧道窑作为一种连续式窑炉,不论结构简单或复杂,都可以根据制品在窑内经历的温度变化过程而沿窑长划分为三带:预热带,烧成带,冷却带。对于隧道窑三带的具体划分,依据各有不同,有以温度分,有以窑炉外形分,有以窑炉结构分。最为科学合理的划分方法是按温度(安置在窑顶的热电偶测出的温度)分,窑头至 $900^{\circ}\text{C}$ 左右为预热带, $900^{\circ}\text{C}$ 至最高烧成温度为烧成带,最高烧成温度至窑尾为冷却带。按窑炉外形分,窑体较宽的中间段为烧成带,前后各为预热带和冷却带。按窑炉结构分,设置有烧嘴的部位为烧成带,然而现代隧道窑在 $900^{\circ}\text{C}$ 以前也多设有下排烧嘴,但要注意的是其目的是调节窑内下部温度,以减小上下温差,因此 $900^{\circ}\text{C}$ 以前设有调温烧嘴的地段仍可称为预热带。有的引进窑将设有烧嘴的前部统称为燃烧带(Firing zone)。

陶瓷工业隧道窑三带的比例会因产品、烧成工艺、窑炉结构与工作系统的不同而有很大差别,三带的比例范围一般为:预热带 $35\%\sim 45\%$ ,烧成带 $20\%\sim 35\%$ ,冷却带 $30\%\sim 40\%$ 。

隧道窑的工作过程是:干燥至含一定水分的坯体入窑,首先经过预热带,受来自烧成带燃烧产物(烟气)的预热,同时燃烧产物自预热带的排烟口排出。然后制品进入烧成带,燃料燃烧的火焰及生成的产物加热坯体,使其达到一定的温度而烧成。烧成的产品最后进入冷却带,将热量传给入窑的冷空气,产品本身冷却后出窑,从而形成一个烧成周期。

隧道窑要实现制品的烧成过程,应有一定的结构与工作系统。隧道窑的结构与工作系统可分为五部分,即窑体、燃烧系统、排烟系统、冷却通风系统、输送系统。

**窑体:**包括窑墙、窑顶。窑墙和窑顶组成隧道,窑墙、窑顶和活动的窑车台面围成码烧坯体的空间,在这里燃料燃烧的产物将热传给坯体,坯体进行物化反应,使其焙烧成制品。

**燃烧系统:**由烧嘴(燃烧室)与燃料及助燃风供应系统组成,其作用是实现燃料燃烧,产生高温烟气,维持窑内一定的温度、气氛制度。

**排烟系统:**由排烟口、排烟道(排烟管)、排烟机或烟囱组成,其作用是使烧成带的高温烟气流向预热带,排除烟气,维持预热带一定的温度和压力制度。

**冷却通风系统:**由风机及其通风管道组成,其作用是供给冷却空气,抽出热空气,维持冷却带一定的温度、压力制度,实现制品的冷却。

**输送系统:**包括窑车、推车机、拖车、轨道等,其作用是运载制品从窑头进入隧道窑,依次经预热带、烧成带、冷却带,使制品完成整个烧成过程。

隧道窑的结构与工作系统既可以简单也可以复杂。早期自然抽风的燃煤隧道窑具有最简单的工作系统,没有鼓风机和抽风机,只依靠烟囱把冷空气自燃烧室的炉栅下吸入作为一次空气用,燃烧室里煤燃烧后产生的高温烟气被吸入烧成带,再流至预热带,经排烟口、烟道由烟囱排出窑外。同时利用烟囱把冷空气从窑尾吸进冷却带,将产品冷却,空气本身得到预热,然后也进入烧成带作为二次空气进行助燃。燃煤隧道窑由于污染大、能耗高、效益差,属于淘汰窑炉,目前已很少用了。

现代隧道窑要实现优质、高产、低能耗的目标,其结构与工作系统就复杂得多,图 2.1 所示为普通明焰隧道窑的工作系统图。工作系统图表明隧道窑燃料为油或煤气,燃料由烧嘴喷入烧成带窑内燃烧,烧成带呈微正压,预热带为负压,烟气在预热带被排烟机抽走。预热带有窑头封闭气幕、搅拌气幕,使预热带窑内上下温差减小。冷却带工作系统较为完善,有急冷送风、窑尾送风和抽热风设备,急冷风又有阻挡烧成带烟气倒流的作用,急冷风和窑尾鼓入的冷风都由抽热风机抽走,达到平衡时,控制冷却带的冷风进入烧成带,容易保持烧成带的烧成温度和气氛。预热带负压不大,漏进窑内的冷空气较少,温度较均匀,为优质、高产、低耗创造了条件。烧还原气氛的隧道窑,在烧成带的氧化炉和还原炉之间还有氧化气氛幕。

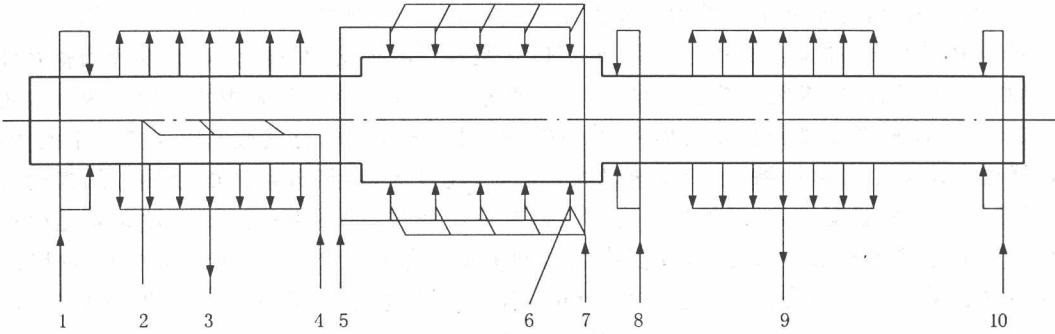


图 2.1 普通明焰隧道窑工作系统图

- 1—封闭气幕送风;2—搅拌气幕;3—排烟;4—搅拌气幕送风;5—煤气;6—烧嘴;
- 7—助燃风;8—急冷送风;9—热风送干燥处;10—窑尾急冷送风

图 2.2 为某 80m 天然气日用瓷隧道窑工作系统示意图,与普通明焰窑的主要区别:一是预热带排烟段缩小,采用较为集中的排烟方式,提高了烟气的热利用率;二是在预热带中后段上部装有喷风管,下部设置烧嘴,代替了传统的搅拌气幕和循环气幕,有效地克服了预热带上下温差,且能灵活地调节预热带的升温制度。

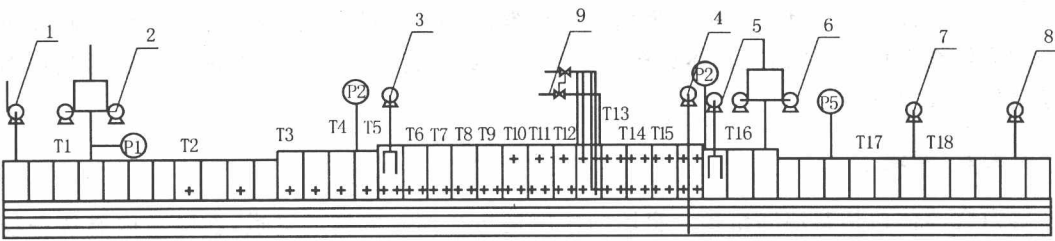


图 2.2 80m 天然气日用瓷隧道窑工作系统示意图

- 1—窑头气幕;2—排烟风机;3—氧化气幕;4—车下风机;5—急冷风机;6—余热风机;7—缓冷风机;
- 8—窑尾抽风机;9—燃烧系统组件(只画一组其余相同)

## 2.3 隧道窑窑体

### 2.3.1 窑体主要尺寸

隧道窑的窑体主要尺寸是指窑的内高、内宽、窑长和各带长度。

隧道窑内高是指隧道内可装制品部分的空间高度,通常指从窑车面至窑顶(或拱顶)的高度。将轨面至窑顶的高度称为窑的全高,有时还将装载制品的高度(如棚板面至最上层制品顶面)称为有效内高。

隧道窑内宽是指窑内两侧墙间的距离,包括制品有效装载宽度与制品和两边窑墙的间距。

隧道窑内高和内宽的确定,应考虑窑内垂直断面和水平断面温度的均匀性、制品尺寸规格以及装车操作等因素。隧道窑的内高尺寸大,易造成热气流分层,从而引起较大的上下温差;太宽则烧嘴火焰不易到达隧道中心,造成窑两侧与中心的温度不均匀。隧道窑太矮太窄则有效装载截面小,若要保持窑炉一定的产量势必增加窑长。目前一般隧道窑的内高在 1.5m 以下,内宽为 1~2m,通常隧道窑的内宽要大于内高,内宽与内高之比在 1.0~1.5 范围内。

对隧道窑而言,加宽比加高有利,窑型宽体化是现代隧道窑的发展方向。现代陶瓷企业趋于大规模生产,因此要求窑炉单窑产量大,而窑产量与窑长和有效截面积成正比。为减少占地面积、减少窑体材料用量和窑体散热面积,宜控制窑长、增加窑的有效截面以保持一定的产量。现代隧道窑多采用高速烧嘴,由于高速烧嘴火焰长、速度大,可形成窑截面上强烈的横向气流循环,窑炉的水平温度均匀,而使加大窑炉的内宽有了条件,因此现代陶瓷窑炉尤其是生产卫生洁具的隧道窑大多采用内宽大、高度小的宽断面窑体结构。例如,河北某陶瓷厂 HTK-2.8 型隧道窑就采用这一结构,窑内宽为 3040mm,有效装载宽度为 2800mm,窑的有效装载高度为 930mm,窑的宽高比达到 3.27。快速烧成的隧道窑的内高较小,顶烧隧道窑的宽度则较此更大些。

确定了隧道窑的内高、内宽,就可根据产量与烧成周期来确定隧道窑长度。窑长些,温度变化缓慢,容易实现预定的烧成制度。但隧道窑过长,则窑内气体流程阻力加大,为克服窑内阻力,相应的鼓风、抽风压强也要大,使窑处于较大的正压和负压下操作状态。若隧道窑内正压过大,热气体容易逸出窑外,既增加了热量损失,又恶化了外部环境和操作条件。若隧道窑内的负压过大,容易吸入窑外冷空气,破坏窑内温度和气氛制度。一般隧道窑长度在 70~100m 左右,最长的约 150m,而快速烧成的隧道窑则较短。

隧道窑窑体主要尺寸的确定应根据产品种类、产量、燃料、烧嘴、窑炉结构、烧成制度等多方面因素综合考虑,具体情况具体分析。表 2.1 为我国近二十多年来引进和自建的几种陶瓷隧道窑的主要尺寸。

### 2.3.2 窑墙

隧道窑窑体包括窑墙和窑顶。窑墙的作用是与窑顶一起构成隧道,在隧道内燃烧产物与坯体进行热交换,窑墙一般还要支撑窑顶,要承受一定的重量,隧道窑窑墙有的部位还可能开设孔洞,设置风道结构,因此,窑墙应具有耐高温隔热的性能,同时还应有一定的强度,特别是高温强度。



表 2.1 典型陶瓷隧道窑的主要尺寸

序号	制造企业	产品	窑长 (m)	内宽 (m)	有效内高 (m)	三带长比例 (预+烧):冷
1	德国 Riedhammer	卫生瓷	95	2.1	0.75	1 : 0.69
2	德国 Riedhammer	日用瓷	82	1.18/1.21	1.15	1 : 0.95
3	瑞士 Niro	卫生瓷	80	2.65	0.90	1 : 0.64
4	英国 Briceseco	卫生瓷	77	2.70	0.75	1 : 0.83
5	日本东陶	卫生瓷	100	1.40	0.75	1 : 0.74
6	美国 Bickley	电瓷	75	3.42	2.12	1 : 0.60
7	安徽含山陶瓷厂	日用瓷	80	2.20	0.80	1 : 0.33
8	中亚窑炉	卫生瓷	110	3.60	0.99	1 : 0.66
9	景德镇海泰窑炉	日用瓷	51	1.02	—	1 : 0.60
10	佛山中窑窑业	园林瓷	60	2.16	1.0	1 : 0.39
11	佛山中窑窑业	砂轮	86	1.50	0.84	1 : 1.05
12	河南省某陶瓷厂	铝钒土	137	2.55	1.22	1 : 0.39

隧道窑窑墙一般由耐高温的内衬层、隔热的中间层和起支撑作用的外层组成。对于一般陶瓷工业隧道窑,内衬层材料多为粘土砖、高铝砖、莫来石砖等,中间层的隔热材料有各种轻质砖和陶瓷纤维,外层多用钢板。窑墙砌体要求尺寸准确,以保证砌体的密封性能。

随着新型耐火材料的开发与应用,现代隧道窑大多采用能耐高温、具有高强度而隔热性能好的新型轻质耐火材料来砌筑窑墙,使窑体薄而轻,占用场地小,散热少。典型现代隧道窑窑墙内衬一般用高铝空心球或优质高温莫来石质砖(115~230mm),中间层用轻质保温砖(115mm),外层用陶瓷棉(100~150mm)加钢板围护结构代替了老式隧道窑的建筑红砖外围砌体,因此,现代隧道窑的窑墙大为减薄,一般在 350~600mm 内,仅为传统隧道窑的一半。表 2.2 列举了我国当前几种隧道窑的窑体砌筑材料及厚度数据,供参考。

隧道窑窑墙各段各层材料种类和厚度是根据该段的温度来决定的,同时需注意以下几点:

(1)为了砌筑的方便和外形的整齐,窑墙厚度变化不要太多。

(2)窑墙各层材料的厚度应为砖长或砖宽的整数倍,而窑墙的高度则应为砖厚的整数倍,使砌筑时尽量不砍砖,否则浪费材料,降低耐火砖的使用寿命,砌筑不便,且砖封不严密,易造成漏气。

(3)砌筑时还要考虑灰缝(砖缝)的厚度,灰缝越小,窑墙使用寿命越长。

例如,郑州某厂隧道窑高温段窑墙内衬耐火砖灰缝 1mm,十多年窑墙一直没有大修。因此,在技术可能的情况下,灰缝越小越好。一般耐火砖及轻质砖的灰缝应控制在 2mm 以内(尤其是高温段),最多不应超过 3mm。计算窑墙的厚度和高度时应考虑灰缝的厚度尺寸。

窑墙的砌筑多为实体砌筑,也有一些窑墙为中空结构,比如隔焰或半隔焰隧道窑在窑墙内留有一定间隙作为火道,有些隧道窑在冷却阶段采用间壁冷却的方式而将窑墙做成中空结构等。