

# 现代陶瓷窑炉

宋 嵩<sup>zhuan</sup> 主编

武汉工业大学出版社

## 前 言

陶瓷窑炉在陶瓷工业生产中占有重要地位,是陶瓷工业生产中的关键性工艺设备。现代陶瓷工业生产中的陶瓷窑炉已与古代的和近代的陶瓷窑炉有了很大的区别。由于科学技术的飞速进步,现代陶瓷窑炉在燃料、筑窑材料、窑体结构、燃烧系统、测控系统及附属设备上都有鲜明的特点。现代陶瓷窑炉的热工性能远远优于旧式陶瓷窑炉,有了质的飞跃。

我国改革开放以来,引进了国外一些现代陶瓷窑炉,有力地促进了我国陶瓷工业的技术进步。目前,我国在消化吸收引进的现代陶瓷窑炉的基础上,已生产和正在研制国产的现代陶瓷窑炉,力争尽快赶上世界先进水平。

在这种形势下,为了有助于陶瓷窑炉热工技术水平的提高,需要有全面介绍现代陶瓷窑炉的书籍,本书就是为此目的而编著的。

本书以现代建筑卫生陶瓷窑炉为主。现代陶瓷窑炉包括:隧道窑、辊道窑及间歇窑(梭式窑、罩式窑、升降窑等)。本书将介绍这些类型窑炉。新型推板窑本来也应划归现代陶瓷窑炉,但近年来这种窑型已逐渐让位给辊道窑,因此本书不再作介绍。

本书由武汉工业大学出版社曹文聪、田道全、黄春策划组织,由天津大学材料科学与工程系宋崧主编。各章分工如下:第1、2、5章由宋崧编著;第3、7章由北京工业大学五系武立云和刘立群编著;第4章由北京中伦陶瓷总公司王雁冰编著;第6章由唐山第六瓷厂韩正余编著;第8章由北京中伦陶瓷总公司高平良、武汉工业大学自动化系陈理君、广州华南师范大学电子研究所徐锡盛及宋崧编著。

由于作者水平有限,本书缺点、错误在所难免,欢迎各界同行提出宝贵意见,以便日后补充、修改。

宋 崧

1996. 3

# 目 录

1 绪论 .....	(1)
1.1 陶瓷工业概述 .....	(1)
1.2 陶瓷窑炉发展历史简述 .....	(1)
1.3 陶瓷的烧成过程及烧成制度 .....	(3)
1.3.1 陶瓷的烧成过程 .....	(3)
1.3.2 陶瓷的烧成制度 .....	(4)
1.3.3 陶瓷的快速烧成与低温烧成 .....	(4)
1.4 评价陶瓷窑炉的标准 .....	(7)
1.5 国内外陶瓷窑炉技术发展水平的比较 .....	(9)
2 现代陶瓷窑炉的燃料 .....	(10)
2.1 陶瓷窑炉使用燃料的发展过程 .....	(10)
2.2 燃料与陶瓷窑炉现代化的关系 .....	(10)
2.3 现代陶瓷窑炉燃料的选择 .....	(12)
2.3.1 柴油及煤油 .....	(12)
2.3.2 天然气及液化石油气 .....	(13)
2.3.3 油制气 .....	(18)
2.3.4 煤制气 .....	(20)
2.4 我国燃料资源状况 .....	(27)
2.5 我国陶瓷窑炉现代化的燃料问题 .....	(28)
2.6 我国现代陶瓷窑炉燃料的经济分析 .....	(31)
3 现代陶瓷窑炉的燃烧系统 .....	(33)
3.1 概述 .....	(33)
3.2 气体燃料和液体燃料燃烧的基本原理及燃烧装置 .....	(34)
3.2.1 有焰燃烧 .....	(34)
3.2.2 无焰燃烧 .....	(35)
3.3 气体燃料和液体燃料高速烧嘴的构造和工作原理 .....	(38)
3.3.1 美国 Bickley 公司 ISO-JET 调温高速烧嘴 .....	(39)
3.3.2 德国 Riedhammer 公司高速烧嘴 .....	(41)
3.3.3 意大利 Mori 公司辊道窑高速烧嘴 .....	(41)
3.3.4 日本东陶公司高速烧嘴 .....	(42)
3.3.5 英国 Nu-Way 公司高速烧嘴 .....	(43)
3.3.6 瑞士 Niro 公司高速烧嘴 .....	(43)
3.3.7 美国 North American 公司高速烧嘴 .....	(44)
3.3.8 北京工业大学预混型高速烧嘴 .....	(44)
3.4 烧嘴的调节 .....	(46)
3.5 烧嘴的附属装置 .....	(51)

3.5.1	烧嘴砖 .....	(51)
3.5.2	高压电点火装置 .....	(52)
3.5.3	火焰监测器 .....	(52)
3.6	烧嘴助燃空气的预热 .....	(52)
3.6.1	燃烧余热的利用 .....	(53)
3.6.2	燃烧余热利用的投资效果 .....	(53)
3.6.3	燃烧余热回收装置 .....	(54)
3.7	现代陶瓷窑炉高速烧嘴的材料 .....	(61)
3.8	现代陶瓷窑炉燃烧系统的安全防爆 .....	(62)
3.8.1	窑炉爆炸的基本原因及其预防 .....	(62)
3.8.2	火焰监测装置 .....	(63)
3.8.3	窑炉的安全防爆 .....	(64)
3.9	现代陶瓷窑炉燃烧系统的环保要求 .....	(65)
3.9.1	大气污染对人类的危害 .....	(65)
3.9.2	对大气污染的控制 .....	(65)
4	现代陶瓷窑炉的耐火材料 .....	(68)
4.1	现代陶瓷窑炉耐火材料的特点 .....	(68)
4.2	现代陶瓷窑炉耐火材料的性能要求及主要品种 .....	(68)
4.2.1	性能要求 .....	(68)
4.2.2	主要品种 .....	(69)
4.3	现代陶瓷窑炉耐火材料结构 .....	(77)
4.3.1	窑墙耐火材料结构 .....	(77)
4.3.2	窑顶耐火材料结构 .....	(78)
4.3.3	窑车耐火材料结构 .....	(79)
4.3.4	窑具及辊子 .....	(80)
4.4	国内外陶瓷窑炉耐火材料的技术水平 .....	(81)
4.4.1	我国陶瓷窑炉耐火材料现状 .....	(81)
4.4.2	我国陶瓷窑炉耐火材料与国际先进水平的差距 .....	(82)
4.4.3	现代陶瓷窑炉耐火材料的发展趋势 .....	(84)
5	现代陶瓷隧道窑 .....	(86)
5.1	概述 .....	(86)
5.2	主要尺寸及各带比例 .....	(87)
5.3	工作系统 .....	(88)
5.4	窑体结构 .....	(89)
5.5	窑车及窑具 .....	(92)
5.5.1	窑车 .....	(92)
5.5.2	窑具 .....	(93)
5.6	附属设备 .....	(93)
5.7	窑温均匀性与烧成曲线的可调性 .....	(94)
5.7.1	窑温均匀性 .....	(94)
5.7.2	烧成曲线的可调性 .....	(100)
5.8	现代陶瓷隧道窑的生产能力 .....	(105)

5.9	现代陶瓷隧道窑的节能效果 .....	(106)
5.10	典型引进现代陶瓷隧道窑简介 .....	(110)
5.10.1	德国 Riedhammer 公司卫生陶瓷隧道窑 .....	(110)
5.10.2	日本东陶公司卫生陶瓷隧道窑 .....	(111)
5.10.3	澳大利亚 General 窑炉公司卫生陶瓷隧道窑 .....	(113)
5.10.4	瑞士 Niro 公司卫生陶瓷隧道窑 .....	(115)
5.10.5	美国 Swindell Dressler 公司卫生陶瓷隧道窑 .....	(116)
5.10.6	英国 Bricesco 卫生陶瓷隧道窑 .....	(119)
5.10.7	德国 Riedhammer 公司日用瓷素烧隧道窑 .....	(120)
5.10.8	德国 Riedhammer 公司日用瓷釉烧隧道窑 .....	(121)
5.10.9	美国 Bickley 公司电瓷隧道窑 .....	(122)
5.11	关于我国陶瓷隧道窑现代化问题的讨论 .....	(124)
6	现代陶瓷辊道窑 .....	(126)
6.1	概述 .....	(126)
6.2	工作系统 .....	(126)
6.3	窑体结构 .....	(128)
6.3.1	窑体结构 .....	(128)
6.3.2	辊道窑的通道断面 .....	(129)
6.3.3	窑长 .....	(130)
6.3.4	三带长度比例及结构 .....	(132)
6.3.5	窑体附属结构 .....	(132)
6.4	传动系统 .....	(133)
6.4.1	辊子及其安装 .....	(133)
6.4.2	传动方式 .....	(135)
6.5	辊道窑的安全保护 .....	(136)
6.5.1	燃气的安全保障系统 .....	(136)
6.5.2	辊道窑运行的安全保护 .....	(137)
6.6	辊道窑的快速烧成 .....	(138)
6.7	辊道窑的节能效果 .....	(139)
6.8	典型现代辊道窑简介 .....	(140)
6.8.1	意大利 Poppi 公司单层辊道窑 .....	(140)
6.8.2	意大利 Welko 公司单层辊道窑 .....	(141)
6.8.3	意大利 Siti 公司双层辊道窑 .....	(142)
6.8.4	意大利 Mori 公司卫生陶瓷辊道窑 .....	(143)
6.8.5	其他陶瓷辊道窑 .....	(143)
6.9	存在问题及发展方向 .....	(145)
7	现代陶瓷间歇窑 .....	(147)
7.1	概述 .....	(147)
7.2	梭式窑 .....	(147)
7.2.1	结构特点 .....	(148)
7.2.2	排烟系统 .....	(150)
7.2.3	燃烧系统 .....	(151)

7.2.4	烟气余热利用	(153)
7.2.5	典型现代陶瓷梭式窑简介	(155)
7.3	罩式窑及升降窑	(160)
7.3.1	结构特点	(160)
7.3.2	典型介绍	(162)
7.4	电热陶瓷间歇窑	(164)
7.4.1	电热梭式窑	(164)
7.4.2	电热罩式窑	(167)
7.4.3	电热保护气氛窑	(170)
8	现代陶瓷窑炉测控系统	(172)
8.1	概述	(172)
8.2	现代陶瓷隧道窑的测控系统	(174)
8.2.1	一种引进的卫生陶瓷隧道窑的测控系统	(174)
8.2.2	一种国内设计的新型卫生陶瓷隧道窑的测控系统	(177)
8.2.3	现代陶瓷隧道窑典型控制系统的比较	(188)
8.3	现代陶瓷辊道窑的测控系统	(189)
8.3.1	一种引进的面砖单层辊道窑的测控系统	(189)
8.3.2	一种国产辊道窑的测控系统	(195)
8.3.3	辊道窑测控系统的比较	(199)
8.4	现代陶瓷间歇窑的测控系统	(201)
8.4.1	现代油烧陶瓷梭式窑的测控系统	(201)
8.4.2	现代气烧陶瓷梭式窑的测控系统	(203)
8.5	现代陶瓷窑炉测控系统中的干扰及抗干扰措施	(204)
8.5.1	供电系统干扰及抗干扰措施	(204)
8.5.2	过程通道干扰及抗干扰措施	(206)
8.5.3	空间干扰及抗干扰措施	(206)
8.5.4	硬件与软件抗干扰设计	(206)
8.6	现代陶瓷窑炉测控系统的展望	(207)
8.6.1	分布式控制系统(DCS)在陶瓷窑炉控制上的应用	(207)
8.6.2	小型DCS的典型结构	(208)
8.6.3	小型DCS的特点	(209)
8.6.4	计算机集成管理控制系统(CIMS)技术的发展	(209)
8.6.5	小型CIMS技术的应用	(210)
	参考文献	(212)

# 1 绪 论

## 1.1 陶瓷工业概述

国际上广义的“陶瓷”(ceramics)是包括所有的无机非金属材料。国内则多习惯使用狭义的“陶瓷”名词,即只包括:陶器、瓷器、炆器等传统陶瓷及新型陶瓷。陶瓷品种繁多,各种陶瓷工业也往往隶属于不同部门,一般按用途特征区分为:日用陶瓷工业、建筑卫生陶瓷工业、电瓷工业以及电子陶瓷工业等。

我国是最早发明瓷器的国家,约发明于东汉时期,比欧洲早千余年。现今我国出土的最早陶器距今已有万年,比国外发现的最早陶器还早约 500 年。目前,我国日用陶瓷产量居世界之首,景德镇、醴陵、唐山、淄博、邯郸、佛山、宜兴等城市是我国日用陶瓷的主要产地。现我国日用陶瓷工厂约有 2000 余家,年产量近 30 亿件,出口约 2~3 亿美元。

第二次世界大战以后,许多国家经济得到很快发展。建筑业需要大量建筑卫生陶瓷,因此建筑卫生陶瓷工业发展迅速。现今世界陶瓷墙地砖产量已近 20 亿  $\text{m}^2$ /年,卫生陶瓷大约达到 2.2 亿件/年的产量。我国改革开放以来,建筑卫生陶瓷工业得到蓬勃发展。近年来建筑陶瓷每年以 20%~30% 的递增率增长,卫生陶瓷也以 20% 以上的递增率增长。1994 年我国建筑陶瓷年产量已达 5 亿  $\text{m}^2$ ,卫生陶瓷年产量超过 3500 万件。据不完全统计,我国目前建筑陶瓷厂有 1000 多家,卫生陶瓷厂约 180 家。

我国电瓷工业和电子陶瓷工业规模较小,但产品品种及数量都已能满足我国电力工业及电子工业的需要,并可出口。而且这两个工业的设备条件较好,技术力量雄厚。

## 1.2 陶瓷窑炉发展历史简述

陶瓷的出现离不开窑炉。陶器烧成温度约 800~1000 $^{\circ}\text{C}$ ,瓷器的烧成温度约 1200~1300 $^{\circ}\text{C}$ 。瓷器出现远远晚于陶器,其中一个重要原因就是窑炉技术水平低,窑炉温度不能达到瓷器烧成要求的温度。我国古代窑炉技术已达到了很高的水平。例如,驰名世界的景德镇古瓷都是在景德镇窑中烧成的。这种窑是一种横焰式间歇窑,以松柴为燃料,温度可达 1300 $^{\circ}\text{C}$ ,可快速烧成,与同时代窑炉相比,属于结构先进的快烧窑。又如,依山建筑的龙窑是一种半连续式火焰移动的窑,是近代轮窑的前身,其特点是:窑温高可烧瓷器,热能利用好,单位热耗接近于旧式隧道窑。

陶瓷窑炉发展历史大体上可划分为三个阶段:

(1)古代陶瓷窑炉(1850 年以前)

是在手工作坊式的生产经济下出现的。其中最具代表性的窑型是我国的景德镇窑和龙窑。

(2)近代陶瓷窑炉(1850~1950 年)

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:轮窑、倒焰窑及隧道窑。

### (3)现代陶瓷窑炉(1950年至今)

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。这40余年陶瓷窑炉的发展是一个质的飞跃,达到了陶瓷窑炉技术的一个新的高峰。

第二次世界大战以后,随着世界经济的巨大发展,有三个方面的进步促使了陶瓷窑炉技术迅速改观。

#### (1)能源工业的进步

世界许多工业摆脱了直接烧煤,过渡到烧重油,以至轻油、发生炉煤气、焦炉煤气,直到天然气、液化石油气等。实质上,就是工业能源从非清洁燃料转变为清洁燃料。陶瓷工业也就在工业能源的这种进步中得益,陶瓷窑炉从烧非清洁燃料(煤、重油)转变为烧清洁燃料(轻油、清洁燃气)。

#### (2)耐火材料工业的进步

对于陶瓷窑炉来说,最有直接影响的新出现的耐火材料是:各种耐火纤维及其制品、高级合成原料轻质砖、高级合成原料窑具以及重结晶SiC质制品、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 结合SiC质制品等。这些新材料使得现代陶瓷窑炉窑体及窑车全轻质化,并使窑具轻型化得以实现。

#### (3)陶瓷工业烧成技术的进步

最值得提出的是60年代出现的高速烧嘴和明焰裸烧方式,使陶瓷窑炉中的制品得以十分均匀地快速升温,显著地提高了产品品质,实现了快速烧成。

在1950年以后的40多年中,特别是近15~20年,陶瓷窑炉现代化的进程,已从非清洁燃料转变为清洁燃料。明焰裸烧宽体隧道窑逐步代替了隔焰隧道窑;梭式窑、钟罩窑和升降窑的出现并逐渐占领了间歇式窑的领域,取代了倒焰窑;70年代末出现了辊道窑。各种类型的现代陶瓷窑炉采用高速烧嘴,采用全轻质化装配式窑体,使得窑体质量大为减小,从而不需要承重能力高的基础和地基,并使得窑体蓄热减至旧式结构窑体的几分之一以下,以致使连续式窑也变得灵活起来,可以在周末假日停窑。窑具方面,轻型化的棚架结构代替匣钵和旧式笨重棚架结构,使窑具与制品质量比从6~8下降到1以下。窑体窑车轻质化和窑具轻型化对节约能源起了重要的作用,也为快速烧成创造了条件。在自动控制方面实现多种功能的计算机控制。

归纳起来,现代陶瓷窑炉具备了如下特征:

- (1)使用清洁燃料(主要是清洁燃气),少数使用电热;
- (2)明焰裸烧方式;
- (3)快速烧成;
- (4)内宽大,高度小;
- (5)使用高速烧嘴;
- (6)窑体、窑车轻质化;
- (7)窑具轻型化;
- (8)模块装配式窑体结构;
- (9)计算机控制。



## 1.3 陶瓷的烧成过程及烧成制度

### 1.3.1 陶瓷的烧成过程

烧成过程实质上是若干过程的综合,一般来说,它包括下列五个过程:

- (1) 物料的物理化学变化过程;
- (2) 物料的运动过程;
- (3) 气体流动过程;
- (4) 燃料燃烧过程;
- (5) 传热过程。

后四个过程是窑炉为了实现要求的坯体的物理化学变化而建立外在条件(温度、气氛)的需要。

广义来说,烧成有:熔制(液态)、煨烧(散料)以及烧制(成型制品)。狭义来说,烧成就是指成型制品的烧制。

陶瓷品种多种多样,其烧成过程中的物理化学变化及产品的化学矿物组成也各不相同。但从共性来看,陶瓷制品在烧成过程中的物理化学变化大致可划分为如下几个阶段:

- (1) 常温至 200℃ 左右  
残余物化结合水的排除。
- (2) 200℃ 至出现液相的温度  
化学结合水的排除;有机物氧化;碳酸盐分解;晶型转化等。
- (3) 出现液相的温度至烧成温度以及在该温度下的保温  
液相产生;固相逐渐溶解于液相中;有液相参加的新结晶物质的形成;气氛与坯体物质的反应;重结晶;坯体烧结,发生收缩致密化;釉料熔融玻化。
- (4) 烧成温度至液相凝固温度  
有液相参加的某些变化的延续;液相粘度增大;析晶。
- (5) 液相凝固温度至常温  
液相过冷凝固;晶型转化。

在液相出现之前或液相凝固之后,坯体处于弹性状态;一定量液相出现或尚有一定量液相未凝固,坯体则处于塑性状态。

坯体在弹性状态时,如果加热或冷却过快,造成坯体内外温差过大,内外膨胀不一致,由此引起的热应力达到了极限值;或因坯体内外晶型转化不一致而产生的应力达到了极限值(最常见的是石英在 573℃ 的晶型转化),就会使坯体开裂而变成废品。在残余物化结合水排除阶段,因坯体水分一般都在临界水分以下,不会产生干燥收缩。但如水分较多,升温过快,水分蒸发过急,则会使坯体炸裂。

坯体在塑性状态时,上述应力受到液相缓冲可能减小或消失。但当存在较大重力负荷,或因坯体烧成收缩不一致时,坯体就会变形而成废品。坯体温度愈高,其中液相粘度愈低,就愈容易变形。

由于烧成温度不够高或过高,保温时间不足或过长,会导致产品生烧或过烧。生烧表现为坯体烧结不够,坯体内物理化学变化不充分;过烧则表现为坯体烧结过分,或发生不希望出现的变化(如起泡),并常伴随有变形。

### 1.3.2 陶瓷的烧成制度

为了保证陶瓷产品的品质而不产生废品,提出以下三点基本工艺要求:

(1)各阶段应有一定的升温或降温速率,不得超过,以免坯体内外温差过大而形成破坏应力。同时还应考虑到该阶段中所进行的物理化学变化所需要的时间。

(2)在适宜的烧成温度下应有一定的保温时间,以使坯体内外温度趋于一致,保证坯体内外充分烧结和釉面成熟平整。

(3)在某些阶段应保持一定的气氛,以保证坯体中某些物理化学过程进行。例如,有机物氧化阶段应当保持氧化气氛;在烧成某些日用陶瓷、电瓷时,当坯体内有机物氧化完毕后,应保持还原气氛,以使坯体中所含氧化高铁还原成氧化低铁,并使硫酸盐分解。

由以上基本工艺要求可知,陶瓷在烧成过程中必须规定一定的温度和气氛的变化,即必须按一定的烧成制度进行烧成。烧成制度是根据工艺要求并考虑到热工技术经济等方面因素而制定的操作规程。烧成制度包括:温度制度、气氛制度和压力制度。

温度制度是窑炉内制品温度随时间(或位置)变化的规定。如在直角坐标上,以横坐标表示烧成时间或位置,以纵坐标表示制品温度。将温度制度在此坐标系上绘成曲线称为烧成曲线。严格来讲,这里所指的温度应为制品表面温度。在实际生产中,往往以测得的窑温来代替这个温度。

气氛制度是窑炉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氧或还原成分的含量(体积%)而定。强氧化气氛,含游离 $O_2$ 8%~10%;一般氧化气氛,含游离 $O_2$ 4%~5%;中性气氛,含游离 $O_2$ 1%~1.5%;还原性气氛,含游离 $O_2$ <1%(含 $CO_2$ %~7%)。

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,这种压力范围对制品的物理化学变化影响甚微。规定压力制度的主要目的是为了保证温度制度和气氛制度的实现。例如,当需要保持还原气氛时,应在微正压下操作,否则由于吸入外界空气而变成氧化气氛。

### 1.3.3 陶瓷的快速烧成与低温烧成

快速烧成是现代陶瓷窑炉的一大特点。现代陶瓷窑炉中将旧式窑炉几十小时的总烧成时间缩短为十几小时、几小时,甚至不到1h。快速烧成的结果,单窑生产能力大幅度地增加,单位热耗显著减少,而产品品质由于科学地、合理地缩短总烧成时间,并未受到影响,反而因现代陶瓷窑炉性能优异,产品品质大为提高。

表1-1中列出了当今一些典型陶瓷品种总烧成时间的缩短情况。从表中可见,不同品种陶瓷的总烧成时间大都缩短很多。总烧成时间之所以能够缩短这么多,有两个方面的原因:一是陶瓷制品本身的物理化学变化及其配方的研究表明,总烧成时间是可以大幅度缩短而不会影响产品的品质;二是现代陶瓷窑炉的优异性能使得陶瓷制品有可能在其中进行快速烧成。

表 1-1 陶瓷总烧成时间的缩短(h)

窑炉类型	卫生陶瓷	釉面砖 素烧	釉面砖 釉烧	地砖	日用瓷 素烧	炆器	电瓷	电子陶瓷
旧式窑炉	20~72	40~60	20~30	50~70	24~40	30~50	66~78	50~60
现代窑炉	7~14	0.5~1.0	0.75~1.1	0.75~1.0	1~3	2~8	48~60	4~6

对于陶瓷制品,是否可以从理论上计算所需最短总烧成时间,也就是说,是否可以计算允许的最大升温速率、最短的保温时间以及允许的最大冷却速率。由于陶瓷制品烧成过程的复杂

性:复杂的物理化学变化,弹性状态与塑性状态的相互转化,力学及热物性的变化,以致很难准确地计算出理论烧成曲线。但是,如果从材料力学及传热学的角度考虑,推导出陶瓷制品在烧成过程中弹性状态时允许的最大表面升温或降温速率与有关因素之间的定量关系,则是可能的,而且这种定量关系对生产实践还具有理论指导意义。

根据材料力学原理,在弹性状态时物体热应力的计算公式如表 1-2 中所列。表中所列公式是用来计算不同形状物体的最大热应力。公式中上面的符号是属于加热膨胀的,而下面的符号则属于冷却收缩的。正号表示张应力,而负号表示压应力。

表 1-2 不同形状物体的热应力计算公式

物体形状	表面应力(MPa)		中心应力(MPa)	
	公式	公式序号	公式	公式序号
平板	$\sigma_y = \sigma_x = \pm \frac{2}{3} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-1)	$\sigma_y = \sigma_x = \pm \frac{1}{3} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-4)
实心圆柱体	$\sigma_x = \pm \frac{1}{2} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-2)	$\sigma_x = \pm \frac{1}{2} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-5)
实心球体	$\sigma = \pm \frac{2}{5} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-3)	$\sigma = \pm \frac{2}{5} \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta t$	(1-6)

表中  $\Delta t$ ——物体表面与中心的温差(°C);  
 $\alpha$ ——热膨胀系数(°C<sup>-1</sup>);  
 $E$ ——弹性模量(MPa);  
 $\mu$ ——泊松系数。

从表 1-2 可知,热应力与物体的热膨胀系数和表面与中心温差成正比。应当注意,陶瓷制品这种脆性材料的抗张强度远比其耐压强度要低得多。

烧成过程中,制品的加热或冷却为非稳态导热。通常我们可以近似地分段地将这种加热或冷却归属于第一类边界条件的等速升温或降温。

对于双面对称表面等速升温的无限大平板而言,在加热到达正规期<sup>①</sup>后,断面温度分布成为一固定的抛物线形,表面与中心的温差  $\Delta t$  达到最大值并保持不变。此时的表面温度梯度:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-7)$$

因而表面的热流密度:

$$q_s = \lambda \frac{dt}{dx} = \frac{2\lambda\Delta t}{\delta} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-8)$$

此热量用来加热物体:

$$q_s = \frac{dt_{av}}{d\tau} \delta \rho c \quad (1-9)$$

式中  $x$ ——厚度方向的距离(m);  
 $\lambda$ ——物体的导热系数[W/(m·°C)];  
 $t_{av}$ ——物体的平均温度(°C);  
 $\tau$ ——时间(s);

<sup>①</sup> 在表面等速升温或降温时,起初物体表面与中心的温差逐渐增大,此时期称为惰性期;然后此温差不再改变,此时期称为正规期。

$\delta$ ——物体的加热厚度<sup>①</sup> (m);  
 $\rho$ ——物体的体积密度(kg/m<sup>3</sup>);  
 $c$ ——物体的比热[J/(kg·°C)]。

将式(1-8)与式(1-9)联系起来:

$$\frac{dt_{av}}{d\tau} \rho c = \frac{2\lambda\Delta t}{\delta^2}$$

或

$$\theta = \frac{dt_s}{d\tau} = \frac{dt_{av}}{d\tau} = \frac{2\lambda\Delta t}{\rho c \delta^2}$$

即

$$\theta = \frac{2a\Delta t}{\delta^2} \quad (1-10)$$

式中  $\theta$ ——物体的表面升温速率(°C/s);

$t_s$ ——物体表面温度(°C);

$a$ ——物体的导温系数,  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  (m<sup>2</sup>/s)。

由表 1-2 可知,不论在物体的表面或中心,也不论是加热或冷却,热应力总是与  $\Delta t$  成正比。因此,材料热应力达到极限值时也必然有一个  $\Delta t_{pr}$ ,即  $\Delta t$  的最大允许值。超过此值,材料即被破坏。因此,式(1-10)可写成:

$$\theta_{pr} = \frac{2a\Delta t_{pr}}{\delta^2} \quad (1-11)$$

式中  $\theta_{pr}$ ——允许的最大升温或降温速率(°C/s)。

将上式写成普遍式:

$$\theta_{pr} = \frac{a\Delta t_{pr}}{K\delta^2} \quad (1-12)$$

式中  $K$ ——物体的形状系数,对于无限大平板,  $K=0.5$ ;对于立方体,  $K=0.2$ ;对于圆柱体,  $K=0.2\sim 0.25$ ;对于球体,  $K=0.167$ 。

由上述公式可见,在烧成过程中陶瓷制品在弹性状态时允许的最大升温或降温速率是与加热厚度的平方成反比,也与其导温系数、 $\Delta t_{pr}$ 及形状系数有关。例如,152mm×152mm×5mm 釉面砖烧,叠装时加热厚度为 152/2=76mm<sup>②</sup>,而单片双面加热的加热厚度则为 5/2=2.5mm。二者允许的最大升温或降温速率之比为其加热厚度的平方之反比,即(76/2.5)<sup>2</sup>=924。所以单片双面加热及冷却时可以很快升温及降温而不致破损。

由于陶瓷制品烧成过程中物理化学变化的复杂性和物性变化的复杂性,利用式(1-12)进行  $\theta_{pr}$  的计算是难以准确的。一般可用实验方法求得  $\theta_{pr}$ 。

在保温阶段,为了使陶瓷制品表面与中心温度趋于均匀以求保证产品品质,可从非稳态导热均温过程公式得知所需保温时间的影响因素:

$$E = \frac{t_s - t_c}{t_s - t_{0c}} = f( Fo ) \quad (1-13)$$

式中  $E$ ——温度均匀度,对于一般陶瓷制品,要求  $E \leq 0.03 \sim 0.05$ ;

$t_s$ ——制品表面温度(°C);

$t_c$ ——制品中心温度(°C);

① 加热厚度  $\delta$  为加热时由表面导入的热量所达到的最大深度。对于双面加热平板,  $\delta$ =厚度的一半;对于圆柱体,  $\delta$ =柱体半径;对于球体,  $\delta$ =球半径;对于矩形柱体,  $\delta$ =厚度较小的一半。

② 为了简化,都以产品尺寸计算。

$t_{0c}$ ——开始保温时制品中心温度(°C);

$Fo$ ——傅立叶准数,  $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ , 其与  $E$  的关系见图 1-1。

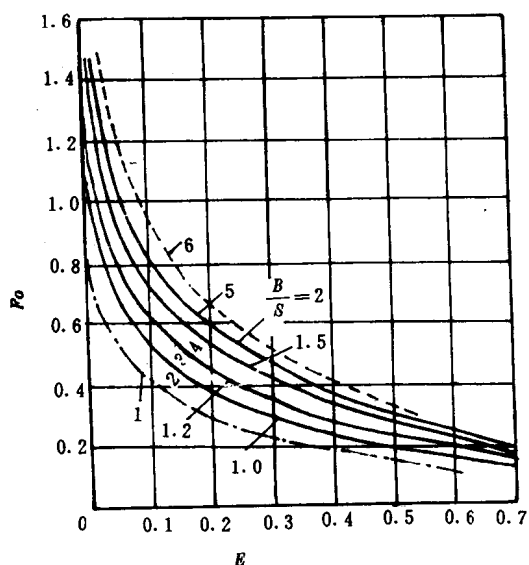


图 1-1  $Fo$  与  $E$  的关系曲线

1—圆柱体; 2、3、4、5—方柱体; 6—平板;  $B$  及  $S$  为柱体的断面边长

由式(1-13)可见,为了达到一定的温度均匀度,所需保温时间  $\tau$  也是与加热厚度的平方成比例。

应当指出,在陶瓷制品釉烧时,保温时间不仅取决于要求的温度均匀度,而且也取决于釉面成熟平展所需时间。

现代陶瓷窑炉烧成制度的改进包含两个重要方面:一是快速烧成;二是在陶瓷坯体和釉料配方研究的基础上降低烧成温度。降低烧成温度可以显著节约热耗,延长窑炉寿命,有效降低产品成本。例如,卫生陶瓷的烧成温度从过去的 1250~1280°C 降低到 1170~1190°C;日用陶瓷的烧成温度从 1350°C 降低到 1200°C。

## 1.4 评价陶瓷窑炉的标准

评价陶瓷窑炉的技术是否先进,性能是否优良,经济上是否合宜,应主要从以下八个方面来判断。

### (1) 烧成品质

一座窑炉最重要的是能保证产品的烧成品质。特别是当前国际及国内市场要求提高产品品质和档次的形势下,能够烧出高品质产品是窑炉的首要性能,也是最大经济效益所在,不应单纯从单位能耗来判断窑炉的优劣。

影响产品品质的因素很多,因此,不能只由烧成产品品质来判断窑炉烧成性能的优劣。但我们主要地可以从窑炉各带或各烧成阶段截面温度均匀性,以及烧成曲线的可调性来评价其烧成性能。

### (2) 单窑生产能力

现代工业发展趋势是大规模生产,一般来说,规模愈大,效益愈好。因此,单窑生产能力也就要求愈来愈大。否则窑炉座数过多,不仅生产线复杂,而且占地面积大,厂房大,劳动力多,投资大。

### (3)生产灵活性

现代市场经常变化,对不同品种的产品需求常有改变。企业在安排生产时,窑炉应能适应烧制不同品种产品,而且转变生产应很容易和迅速,特别是对于生产批量较小而品种较多的企业。

此外,许多国家已是每周休息2天。公休日如窑炉不停产,则生产管理复杂,还需轮休。因此,提出了对窑炉的新要求,即周末停窑,下周一点火在短时间内即可投产,这不仅简化了生产管理,而且停窑还便于检修。

现今不仅对间歇式窑炉要求,而且对连续式窑炉也要求有较好的生产灵活性。

### (4)单位能耗

详细来说,单位能耗包括单位热耗及单位动力电耗。前者在产品成本中占有重要地位,所以一般都只评价单位热耗,也即每千克出窑产品耗热,也可以是每千克合格产品耗热。但后者是一个综合指标,包含了其他生产因素。对于窑炉来说,以前者作为耗热指标较为适宜。有人以每千克出窑产品及窑具的耗热作为评价指标,这是不合理的,这对评价窑炉节能性能带来了不真实的结果。

可以以热效率评价窑炉热能利用的好坏,但终究不如用单位热耗来得直观和便于计算。

降低单位热耗,对于现代陶瓷窑炉是重要的。这主要是因为现代陶瓷窑炉多使用高价的清洁燃料,降低单位热耗对降低产品成本有重要作用。

### (5)自动化水平

陶瓷窑炉的自动化包括两个方面:窑车或其他运载工具的自动运行以及窑炉热工参数的自动控制。

现代陶瓷窑炉为了保证温度制度和气氛制度能够精确而稳定地实现,都装备有自动控制系统。但自动控制系统有多种:有的只用计算机显示、打印,采用位式控制系统;有的采用计算机显示、打印和存储数据,采用模拟调节器的PID控制系统;有的采用计算机显示、打印、存储和控制的复杂算法的数字控制系统;还有以模糊集理论为基础的计算机模糊控制系统。因此,不能简单地笼统提出是否有计算机,要视其控制原理及水平。当然也不是要求现代陶瓷窑炉的自动控制系统愈复杂愈好,也不是水平愈高愈好。而是要看实际控制效果能否满足产品烧成工艺要求,以及其性能价格比。总的来说,计算机是必要的,因为现代工业控制计算机已达到了很高的水平,而且价格愈来愈便宜。计算机可以显示、打印、存储和控制,硬件软件相结合,功能十分强大,进一步还可以建立多级集散控制系统,并与企业生产管理系统结合起来。

### (6)使用寿命

现代陶瓷窑炉必须要有较长的使用寿命,较长的大修周期。根据我国规定,引进窑炉折旧年限为15年。现代陶瓷窑炉多为装配式结构,停窑、烘窑很迅速。因此,窑炉检修远比旧式窑炉来得容易和方便,重要的是要备件齐全。为了生产稳定和高效,现代陶瓷窑炉应当有较长的检修周期。

### (7)单位生产能力投资额

这是一个经济指标,应当看到,单窑生产能力愈大,单位生产能力投资额就愈小。

### (8)环保水平

窑炉是一种对环境有较大影响的设备。评价窑炉的环保水平在于： $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、烟尘等的排放量，以及对车间增温和噪音的大小。

## 1.5 国内外陶瓷窑炉技术发展水平的比较

当前我国陶瓷工业与世界先进水平相比，普遍存在的最突出问题是产品品质问题，或者说是产品的档次问题。我国出口陶瓷大多只能达到国际中、低档水平。原因是多方面的，其中窑炉技术落后是一个重要原因。我国古代陶瓷窑炉技术在当时世界上遥遥领先，有着辉煌的历史。但到近代，由于封建制度的腐朽和帝国主义的侵略，我国陶瓷工业停滞不前，甚至衰败。窑炉技术基本上依然停留在古代窑炉的技术水平上。解放后，生产力得到很大发展，陶瓷工业很快恢复和发展。但是，进展跟不上国际经济和技术的跃进。直到改革开放以来，才清楚而深刻地看到当今我国陶瓷工业在国际上的落后状态。其中，我国陶瓷窑炉技术总体水平与现代国际水平相比的差距主要有如下几个方面：

(1) 陶瓷窑炉燃料绝大多数为非清洁燃料。以直接烧煤为主，条件较好的烧重油。使用清洁燃料的陶瓷窑炉很少。

(2) 烧成方式多为明焰装烧，条件较好的为隔焰裸烧。先进的明焰裸烧方式则很少。

(3) 高速烧嘴应用很少。

(4) 窑体和窑车衬料以重质耐火材料为主，仅夹层中使用少量轻质耐火砖。耐火纤维较少使用。窑具与制品质量比高，窑具使用寿命短。窑车金属车架多是铸铁的，十分笨重。

(5) 窑温不均匀，气氛不均匀，烧成产品品质差，一致性差。

(6) 单窑生产能力低，无法适应大规模生产。

(7) 单位热耗很高，热效率很低。

(8) 大多数窑炉无自动控制，更无自动操作。

(9) 窑体结构很少模块装配式，大都是现场砌筑。

(10) 烘窑、停窑十分缓慢，因此，生产中连续式窑炉尽量不停窑；间歇式窑炉周转缓慢，生产灵活性差。

(11) 对环境污染严重。

关于上述这些方面的详细论述，见以下各章。

## 2 现代陶瓷窑炉的燃料

### 2.1 陶瓷窑炉使用燃料的发展过程

回顾陶瓷窑炉的发展历史,其使用的燃料由木柴或柴草,进步到煤,然后是重油。现代陶瓷窑炉大都使用气体燃料,少数使用轻油(柴油、煤油),也有用电热的。总的来说,是从固体燃料发展到液体燃料,然后是气体燃料,这种变化无疑是和能源工业的发展密切相关。但也应该看到,陶瓷窑炉本身技术的发展也促成这种变化。这种变化实质上是从使用非清洁燃料转变为使用清洁燃料,这种变化是现代陶瓷窑炉的需要。也正因为使用了清洁燃料,陶瓷窑炉才有了一个质的飞跃,成为性能远远优于旧式陶瓷窑炉的现代陶瓷窑炉。

国外发达国家陶瓷窑炉于70年代已逐渐转为烧清洁燃料。如英国1979年陶瓷工厂使用天然气占68.8%,液化石油气占20.5%,合计已达89.3%。独联体国家及美国天然气资源丰富,陶瓷窑炉主要烧天然气。欧洲一些国家使用独联体国家供应的天然气,如意大利、德国等。日本则以液化石油气为主。南非基本上烧煤制气。

我国陶瓷工业在50年代绝大多数窑炉是直接烧煤。60年代初期,我国大庆油田的开发,促使陶瓷工厂开始使用重油燃料。此后,由于我国石油新资源不断发现,石油产量迅速增加,许多陶瓷工厂纷纷转向烧重油。至于气体燃料在我国陶瓷工业中所占比例一直很小。到80年代,由于改革开放,经济发展,引进了国外先进陶瓷窑炉,这些窑炉大都使用清洁燃气。此时国内重油燃料供应已出现紧张,国家要求低温窑炉停止使用重油燃料。陶瓷窑炉属于压缩供油指标的对象。在这种形势下,我国陶瓷工厂开始转向使用清洁燃气。到90年代已有一批陶瓷工厂的窑炉使用发生炉冷煤气、焦炉煤气、水煤气、天然气和液化石油气。

### 2.2 燃料与陶瓷窑炉现代化的关系

燃料的品种对于陶瓷窑炉技术发展有决定性的影响,也就是说,如果不使用清洁燃料,陶瓷窑炉就不可能现代化,先进技术也无法应用于陶瓷窑炉上。为了具体说明这个问题,分别对比使用不同燃料的几种陶瓷工业窑炉。

表2-1列出不同燃料典型建筑陶瓷窑炉性能对比。表2-2列出不同燃料典型卫生陶瓷窑炉性能对比。

从表2-1和表2-2可见,陶瓷窑炉有三种基本烧成方式:明焰装烧、隔焰裸烧及明焰裸烧。窑炉烧成方式决定于燃料品种。早期窑炉直接烧煤,由于煤是非清洁燃料,烧成时陶瓷制品必须与火焰隔离,否则会使制品受到污染。对于明焰窑炉就不得不将制品装入匣钵烧成,这就是明焰装烧方式。使用重油燃料时,由于重油也是非清洁燃料,也只能用明焰装烧方式。然而匣钵装烧方式有许多严重缺点:耗费大量匣钵,使产品成本上升;匣钵本身在窑炉中处于非稳态传热,不但易损,而且耗能;匣钵占据窑内有效空间,并使装卸费力。随着窑炉技术的提高,出现了隔焰窑炉,即火焰在火道中,借助隔焰板(马弗板)将热传给制品。对于连续式窑炉来说,隔焰



板处于稳态传热,此时制品不与火焰直接接触,就可以不用匣钵装烧,这就是隔焰裸烧方式。隔焰裸烧方式是适合于非清洁燃料的较为先进的烧成方式。但是,不论是明焰装烧方式,还是隔焰裸烧方式,都存在一个共同的缺点,即火焰不能直接接触制品,不能直接传热给制品,需要通过匣钵壁或隔焰板将热间接传给制品,这就大大增加了热阻,减缓了传热速率,这不仅限制窑炉生产能力的提高,而且耗能多。

表 2-1 不同燃料典型建筑陶瓷窑炉性能对比

窑型	燃料	窑炉尺寸(m) (长×宽×高)	产品	总烧成时间 (h)	产量 (t/年)	容积生产强度 [kg/(m <sup>3</sup> ·h)]	单位热耗 (MJ/kg 产品)
明焰装烧隧道窑	煤	46.6×1.14×1.17	一次烧成 墙地砖	50	1330	2.70	31.4
半隔焰裸烧隧道窑	重油	82.4×1.1×0.96	釉面砖 素烧	50	4330	6.28	10.07
明焰裸烧隧道窑	发生炉 冷煤气	61×1.3×1.05	釉面砖 素烧	37.5	5460	8.28	6.26
隔焰裸烧辊道窑	煤	36×0.665×0.3	墙地砖 素烧	0.75	2100	36.9	8.97
半隔焰裸烧辊道窑	重油	52.4×1.5×0.3	一次烧成 墙地砖	0.92	7740	41.4	4.20
明焰裸烧辊道窑	焦炉煤气	70.5×1.5×0.3	一次烧成 墙地砖	0.72	10400	62.09	1.96

表 2-2 不同燃料典型卫生陶瓷窑炉性能对比

窑型	燃料	窑炉尺寸(m) (长×宽×高)	产品	总烧成时间 (h)	产量 (t/年)	容积生产强度 [kg/(m <sup>3</sup> ·h)]	单位热耗 (MJ/kg 产品)
明焰装烧隧道窑	煤	108×1.7×1.92	卫生瓷	60	2090	0.778	49.46
隔焰裸烧隧道窑	重油	94.5×1.3×0.96	卫生瓷	21	2640	2.958	19.80
明焰裸烧隧道窑	发生炉 冷煤气	82×2.64×0.9	卫生瓷	14.57	7000	4.540	6.07

20 世纪后半叶能源工业的巨大发展,促使陶瓷工业燃料结构转变,即从使用非清洁燃料转变为使用清洁燃料,特别是使用清洁燃气,使得陶瓷窑炉性能有了质的飞跃。

由于使用清洁燃料,陶瓷窑炉就可以采用最先进的明焰裸烧方式。明焰裸烧方式不用匣钵,也不用隔焰板,火焰烟气直接加热制品,大大提高了产品品质及产量,节约了能源。清洁燃料的应用也创造了窑炉使用高新技术的条件。

表 2-1 中同样是建筑陶瓷隧道窑,使用发生炉冷煤气的明焰裸烧隧道窑的容积生产强度要高得多,单位热耗大为降低。表 2-1 中同样是辊道窑,使用焦炉煤气的明焰裸烧辊道窑的容积生产强度比前两种的高很多,单位热耗为隔焰裸烧的 22%。

表 2-2 中同样是卫生陶瓷隧道窑,由于燃料不同,烧成方式就不同,使得总烧成时间、容积生产强度及单位热耗有很大差别。

表 2-3 列出了卫生陶瓷隧道窑三种烧成方式的一些性能的统计数据。

从表 2-3 可以看出,明焰裸烧方式不论在窑温均匀性、总烧成时间、窑容积生产强度或是单位热耗方面都是最优的。

综上所述,燃料品种决定了陶瓷窑炉的烧成方式,而烧成方式又决定了窑炉的主要性能。