

硅酸盐工业热工过程及设备

下 册

陶瓷工业热工设备

华南工学院 清华大学 编



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

硅酸盐工业热工过程及设备

下册

陶瓷工业热工设备

华南工学院
清华大学 编

中国建筑工业出版社

前 言

本书根据1978年5月建筑材料工业部召开的“陶瓷专业教材会议”制订的教学大纲编写的，作为高等工科院校陶瓷专业的试用教材，讲课66学时。

此教材以目前用得最多的现代化明焰车式隧道窑为典型，讲解陶瓷工业窑炉的结构、操作、工作原理和设计计算。希望学生学完这门课程后，具有使用、改进和设计窑炉以及初步进行科研的能力。

本书由华南工学院刘振群主编，清华大学江尧忠、华南工学院羊淑子、黄炳钧等参加编写，具体分工为：第一、五章刘振群；第二章黄炳钧；第三章江尧忠；第四章羊淑子。

本书由南京化工学院沈慧贤主审，西北轻工业学院黄照柏、轻工业部刘秉诚、天津大学宋崑、西北建筑设计院姚玉桂、建材部科教局张礼本等参加审稿。姚玉桂提供不少资料和图纸，并进行了认真的修改。

编 者

一九八二年一月

目 录

绪论	1
第一章 隧道窑	3
第一节 合理的烧成制度	3
一、烧成过程(3) 二、烧成制度的确定原则(5) 三、烧成制度举例(5)	
第二节 砌窑的耐火材料和隔热材料	6
一、耐火材料的主要性能(6) 二、砌窑用的耐火材料(7) 三、砌窑用的耐火混凝土(8) 四、砌窑用的隔热材料(8)	
第三节 工作系统(流程)及结构	10
一、工作系统及分带(10) 二、结构(12)	
第四节 工作原理	35
一、隧道窑内的气体流动(35) 二、隧道窑内的传热(42)	
第五节 操作控制	54
一、各带温度的控制(54) 二、烧成带的气氛控制(55) 三、各带的压力控制(56)	
第六节 隧道窑设计	57
一、原始资料的收集(57) 二、窑体主要尺寸的计算(58) 三、工作系统的确定(60) 四、窑体材料及厚度的确定(61) 五、燃料燃烧的计算(62) 六、用经验数据决定燃料消耗量(62) 七、预热带及烧成带的热平衡计算(63) 八、冷却带热平衡计算(69) 九、烧嘴的选用及燃烧室的计算(72) 十、烟道和管道计算,阻力计算和风机选型(72)	
第七节 其他隧道窑	76
一、隔焰隧道窑(又叫马弗隧道窑)及半隔焰隧道窑(半马弗隧道窑)(76) 二、非窑车式隧道窑(80) 三、多通道隧道窑(82)	
第二章 间歇窑	86
第一节 倒焰窑的流程与结构	86
一、窑体(86) 二、燃烧设备(89) 三、通风设备(91)	
第二节 倒焰窑的工作原理	93
一、窑内气体流动(93) 二、窑内传热(94) 三、燃料燃烧的操作控制(95)	
第三节 近代间歇窑	96
一、梭式窑(96) 二、钟罩窑(100)	
第三章 电阻炉及其他电热窑炉	101
第一节 电热元件的性能	102
一、钨(103) 二、钨(104) 三、镍铬合金(105) 四、铁铬铝合金(105) 五、硅碳棒(106) 六、二硅化钼电热元件(107) 七、石墨(110) 八、碳(110)	
第二节 电阻炉的设计计算	113
一、电阻炉功率的确定(113) 二、电热体的单位表面功率(115) 三、电热体尺寸的计算(117) 四、电阻炉的安装与使用(119) 五、硅碳棒电阻炉(126) 六、钼丝炉(128)	

第三节 电阻炉的供电电路及功率的调节.....	134
一、供电电路(134) 二、功率的调节(134)	
第四节 其他电热窑炉简介.....	136
一、感应炉(136) 二、电弧炉(138) 三、弧象炉(139) 四、电子束炉(140) 五、	
等离子炉(141) 六、太阳炉(142)	
第四章 干燥原理及干燥器	145
第一节 湿空气的性质.....	145
一、湿空气中水蒸汽的含量(145) 二、空气的热含量(147) 三、温度参数(147)	
第二节 I-X图及其应用	148
一、I-X图中各线的作法及意义(148) 二、I-X图的应用(150)	
第三节 干燥过程的物料平衡及热平衡.....	151
一、物料平衡(151) 二、热平衡(153) 三、干燥过程的图解法(155)	
第四节 干燥机理.....	159
一、物料中水分的性质(159) 二、干燥机理(160) 三、干燥速率及干燥时间(161)	
第五节 干燥方法及干燥设备.....	164
一、对流干燥及快速对流干燥(164) 二、近、中红外线干燥及远红外线干燥(167)	
三、工频电干燥(169) 四、高频电干燥(170) 五、微波干燥(170) 六、喷雾干燥(171)	
第六节 干燥器的设计计算.....	172
一、干燥器主要尺寸的计算(172) 二、预热设备的设计计算(174) 三、通风设备的	
设计计算(175)	
第五章 窑炉热工测量和自动调节	177
第一节 隧道窑热工测量点的确定.....	177
一、温度的测量(177) 二、窑内压力的测量(180) 三、窑内气氛的测量和空气过剩	
系数的测量(180) 四、管道内和烟道内气体流速、流量的测量(182) 五、燃料用量的	
测定(183)	
第二节 隧道窑的热工标定.....	183
第三节 隧道窑自动调节.....	184
一、隧道窑烧成带的温度自动调节(184) 二、隧道窑烧成带的气氛自动调节(186)	
三、隧道窑预热带压力自动调节(186) 四、隧道窑冷却带的压力自动调节(187)	
五、烧油明焰隧道窑的温度、压力自动调节系统举例(187) 六、电子计算机控制隧道	
窑(188) 七、间歇窑的自动控制(188) 八、喷雾干燥器的自动调节举例(188)	

绪 论

陶瓷工业在社会主义建设、国防科学和人民生活中都占有重要的地位。

生产陶瓷的一个重要过程是烧成，烧成是在热工设备中进行的，热工设备这里指的是窑炉及其附属设备。

陶瓷工业所用的窑炉，其发展过程是由低级到高级，由产量、质量低，燃料消耗大，劳动强度大，烧成温度低，不能控制气氛，发展到产量、质量高，燃料消耗低，烧成温度高，能控制气氛，以及机械化和自动化。最古老的陶器是无窑烧成的，后来才发展为烧陶器的穴窑、升焰式圆窑和方窑，烧瓷器的馒头窑、龙窑、阶级窑和景德镇窑，直至现代的倒焰窑和隧道窑。

原始的窑炉是烧木柴的，由于社会生产力的发展，必须寻找另外的燃料来烧窑，就出现了烧煤的窑炉。产品的质量和数量要求高了，烧成温度也高了，就要求把自然通风改为机械通风，要求预热空气，使用气体燃料和液体燃料。生产力进一步发展，规模大了，要求产量高、节约燃料，建立大型的连续生产的窑炉。

陶瓷的发展和窑炉的改革密切相关，一定结构的窑炉才能烧出一定品质的陶瓷来。陶瓷的发展需要窑炉相配合，而窑炉的改进必然会促进陶瓷的发展。在每一个窑炉结构突变时期，也就是陶瓷发展的飞跃阶段。

我国是世界文明古国之一，是创造陶器最早国家之一。也是发明瓷器最早的国家。自商代（距今约三千五百年）起已有原始瓷。所以，我国是创建窑炉最早的国家。从西安半坡村遗址发掘中，证明远在五千年前我国劳动人民就用双手建造了烧陶器的竖穴窑、横穴窑。随后又建造了升焰式圆窑和方窑。这些窑基本上是烧氧化气氛的，最高温度可以达到 1200°C ，例如陕西张家坡出土的西周原始瓷，其烧成温度已达 1200°C 。又从广东增城，浙江绍兴，河北武安以及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代，我国南方建造了烧陶瓷的倾斜式龙窑，北方建造了半倒焰的馒头窑。龙窑可以利用烟气来预热制品，又利用产品冷却之热来预热空气。龙窑和馒头窑最高烧成温度可达 1300°C ，并可控制还原气氛。例如山西侯马出土的原始瓷，含氧化亚铁 0.22% ，烧成温度为 1230°C 。南方一带也出土了大量战国和汉代原始瓷和青瓷，烧成温度达 1300°C 。自宋代（距今约一千年）起山东淄博、陕西耀州等地，部分馒头窑已用煤作燃料来焙烧瓷器。明代（距今约六百年）在福建德化创建了阶级窑，明末清初（距今约四百年）在江西景德镇创建了蛋形窑（简称景德镇窑）在这些窑中烧出了著名的中国瓷器。景德镇窑已经利用了空气隔热层保温，而且有一个砌筑技术高超的高达 $17\sim 18$ 米的薄壁烟囱。这些窑对西欧有很大的影响，英国的纽卡斯特尔窑（Newcastle kiln）及德国的卡塞勒窑（Kasseler Ofen），就是仿照景德镇窑设计的。半倒焰的馒头窑是倒焰窑的前身，龙窑是隧道窑的前身^[1]。机械化的隧道窑是1899年才由法国的福基罗（Faugeron）创建成功，用于焙烧陶器，其后德国用于焙烧瓷器，经过逐渐改进发展成为现代化的隧道窑。

历史上我国劳动人民在窑炉方面是取得很大成绩的。但解放前长期处于封建主义，帝国主义，官僚资本主义的压迫下，生产发展很慢，窑炉的发展停滞不前。解放前，倒焰窑不多，隧道窑全国只有一座，还未正式生产。解放后陶瓷工业有了很大发展，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，一方面我国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条用煤焙烧日用瓷的隧道窑，1959年西北建筑设计院设计，在咸阳陶瓷厂建成了第一条用发生炉煤气焙烧建筑卫生陶瓷的隧道窑，1965年湖南建湘瓷厂建造了第一条用重油焙烧日用瓷的隧道窑，1971年西北建筑设计院设计，在唐山陶瓷厂建成了第一条用重油焙烧建筑卫生陶瓷的隔焰隧道窑，其后各地兴建了不少现代化的辊底隧道窑，推板隧道窑，多通道隧道窑，目前正在向快速烧成和自动化方向发展。

间歇式倒焰窑也作了不少的改进，1974年山东淄博硅酸盐研究所建成了第一座用轻柴油焙烧日用瓷，采用中速烧嘴的梭式窑。其后如西安高压电瓷研究所和西安高压电瓷厂也建成了用高速调温烧嘴烧发生炉煤气的梭式窑，用于焙烧电瓷。

第一章 隧道窑

焙烧陶瓷的窑炉类型很多，同一种制品可在不同类型的窑内烧成，同一种窑也可焙烧不同的制品。所以选择窑炉时，应充分了解窑炉的类型及其优缺点。窑炉有间歇式和连续式之分。间歇式窑，如倒焰窑，其优点是灵活性大。其缺点是产量低，燃料消耗多，劳动强度大。近年来采取了一些重大技术改革，改进了上述缺点，其灵活性的优点更加显示出来了。连续式窑，如隧道窑，产量高，燃料消耗低，劳动条件好，易机械化、自动化，是目前用得最多，最现代化的窑炉。所以隧道窑是本书讨论的重点。隧道窑又可划分为表1-1几种类型。

隧道窑分类表

表 1-1

分类根据	窑名	特 点	备 注
按热源分	1. 火焰隧道窑 2. 电热隧道窑	以煤、煤气或油为燃料 利用电热元件加热	
按火焰是否进入隧道来分	1. 明焰隧道窑 2. 隔焰隧道窑 3. 半隔焰隧道窑	火焰直接进入隧道 在火焰和制品间有隔焰板(马弗板)，火焰加热隔焰板，隔焰板再将热辐射给制品 隔焰板上开有孔口，让部分燃烧产物与制品接触，或只有烧成带隔焰，预热带明焰	电热窑炉也有隔焰式(马弗窑)，用隔焰板将电热元件和制品分开
按窑内运输设备分	1. 窑车隧道窑 2. 推板隧道窑 3. 辊底隧道窑 4. 输送带隧道窑 5. 步梁隧道窑 6. 气垫隧道窑		
按通道多少分	1. 单通道隧道窑 2. 多通道隧道窑		

无论设计或操作隧道窑，都要符合工艺要求，保证优质，高产，低热耗和满足工厂技术经济指标等。所以，从事窑炉工作者，要充分了解陶瓷制品的烧成工艺过程及要求，并根据这个过程和要求制订合理的烧成制度，以确保满足烧成工艺的要求。

第一节 合理的烧成制度

一、烧成过程

在隧道窑中烧成普通粘土质陶瓷制品可分成下列几个过程来考虑。

1. 在预热带20~200°C阶段排除残余水分。在此阶段如果制品入窑水分过高，则不宜

升温过快，以免引起制品不均匀收缩，产生变形和开裂。若制品入窑水分控制在临界水分（约1%）以下，则可快速升温而不使制品开裂。快速烧成的窑，要求更严，入窑水分应小于0.5%。在隧道窑进口温度超过300°C的情况下，残余水分在几分钟内可以排除完毕，制品并不变形和开裂，此时窑的预热带可以大大缩短。

2. 在200~500°C阶段排除结构水。结构水指粘土矿物中的结晶水和层间水。其中高岭土 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 中结晶水的分解属于一级化学反应，温度每提高100°C，其分解速度就可以加快一倍，分解速度很快，制品不致开裂。现在快速烧成窑脱水温度提高到700°C，只要几分钟就可以到达完全脱水的程度。所以这一阶段属安全阶段。

3. 在500~600°C阶段，石英晶型转化，由 $\beta\text{-SiO}_2$ 转化为 $\alpha\text{-SiO}_2$ 体积膨胀0.82%，如果控制不当，这是一个危险阶段。但我们知道这个反应本来是很快，只要几分钟就可以完成。目前生产中出现石英晶型转化而使制品开裂的现象，原因是窑内温度不均匀，使制品各部分膨胀不均匀而引起。掌握这一阶段的关键是窑内温度均匀，使整个制品能均匀膨胀，即使快也是安全的。

4. 在600~1050°C阶段，属氧化阶段。从窑炉结构来说，自900°C左右的氧化炉起已进入烧成带。在这一阶段要把制品中的硫化铁氧化变成氧化铁，并放出二氧化硫，碳酸盐分解放出二氧化碳，有机物中的碳氧化，生成二氧化碳。这些反应都要在釉面玻化以前完成，以便生成的气体排除干净。否则，在釉面玻化时如果还在进行这些反应，气体排不出，就会使制品起泡，叫做坯泡。若硫化铁没有完全氧化的话，则在以后的阶段，又会引起制品坯体起黑点和青边。这一阶段是很重要的，要保证一定的时间，一定的温度和足够的氧化气氛，才可避免坯泡的产生。但氧化阶段的温度也不能过高，如果制品超过玻化温度才进入还原阶段，则制品发黄。

5. 在1050~1200°C是制品进入烧成带的还原阶段，燃烧产物中含有2~4%的一氧化碳，能将制品中的氧化铁 Fe_2O_3 （褐黄色）还原成氧化亚铁 FeO （青色），使坯体白里泛青。

有的原料含铁量较少，含钛量较高，则不宜在还原气氛，而应在氧化气氛中烧成。

6. 1200~1300°C为烧结阶段。坯体中出现了玻璃相，达到密实化而烧结。制品通过烧成带的时间长短决定于氧化、还原和烧结速度的快慢。这些反应都和制品内部的气相、液相和固相扩散有关，而扩散速度则与坯体厚度的平方成反比，所以烧成时间与制品厚度的平方成正比。

7. 1300~700°C属冷却带的急冷阶段。此时产品还处于塑性阶段，可以急冷而不开裂（但是也要均匀急冷，否则还是会开裂的）。急冷宜采用急冷气幕，即直接吹风急冷。直接吹风急冷还有阻挡烟气倒流，防止产品熏烟的作用。

有些产品不宜直接吹风急冷，也可采用间接急冷。

8. 700~400°C缓冷阶段，产品中的石英晶型转化，有体积收缩。必须注意窑内温度均匀，使产品冷却均匀，才不会开裂。

9. 400~80°C阶段可以直接鼓风冷却，但温度低而快不了。

从上述各阶段的分析可以看出，只要窑内温度均匀，各个阶段都可以快。但氧化、还原和烧结却要按反应所需时间来控制。总的说来，普通陶瓷制品可以在1~2小时内烧成，甚至可以再缩短这个时间。要注意这是就单个产品的物化性质而言，在制订合理的烧

成制度时，还要考虑窑炉的结构，究竟升温 and 降温速度多少，才能使窑内温度（指上下及两侧温度）均匀，以保证整个横截面上的制品烧熟。

其他陶瓷制品的烧成工艺过程，可参考有关工艺书籍。

二、烧成制度的确定原则

根据制品的烧成工艺过程，可以制订一个合理的烧成制度，以便设计和操作有所遵循，使工艺要求得以满足。

烧成制度包括温度制度，气氛制度和压力制度。压力制度是为了保证温度制度和气氛制度的。

制品的烧成制度，从理论上说，可以根据制品各阶段的物理-化学反应过程，结合窑炉类型及制品内部的不稳定导热来编制。但实际上往往是到类似工厂调查，收集数据；或根据半工业性试验，取得数据，来制订烧成制度。不同的制品有不同的烧成制度，同一制品在不同的窑内也有不同的烧成制度。应在制品和窑炉允许的条件下，制订合理的烧成制度。

由此可知，合理的烧成制度是和原料的性质，制品的大小、形状、厚度，生坯入窑水分，坯体的机械性能，电气性能，釉面光洁度，燃料种类，燃烧方法，窑炉结构等条件有关，合理烧成制度的确定原则如下。

1. 在各阶段应有一定的升(降)温速率，不得超过。根据上面的分析，陶瓷制品在烧成过程中产生废品的原因是制品内部温度分布不均匀，其膨胀和收缩程度不同，产生应力，使制品变形或开裂。而内部温度不均又和升(降)温速度有关，升(降)温速度愈快，制品内部温度愈不均匀。要使制品内部温度均匀，各阶段应该有一定的升温或降温速率，不得超过，以免内外温差过大形成破坏应力。同时还要考虑在该阶段中所进行的物理——化学变化所必需的时间。

2. 在适宜的温度下应有一定的保温时间，以使制品内外温度趋于一致，皆达到烧成温度，保证整个制品内外烧结。

3. 在氧化和还原阶段应保持一定的气氛制度，以保证制品中的物理——化学过程的进行。

4. 全窑应有一个合理的压力制度，以确保温度制度和气氛制度的实现。

同一种制品可在较高的温度下和较短的时间内烧成，也可以在较低的温度下（当然要在允许的温度内，不能无限降低温度）和较长的时间内烧成。在设计新窑和制定烧成制度时要按工艺条件考虑。如能低温快速烧成，当然是最好的设计。

三、烧成制度举例

现以焙烧日用瓷或建筑卫生陶瓷为例，列举其烧成制度曲线如图1-1。

烧成制度曲线包括沿窑长的温度曲线，气氛曲线和压力曲线。

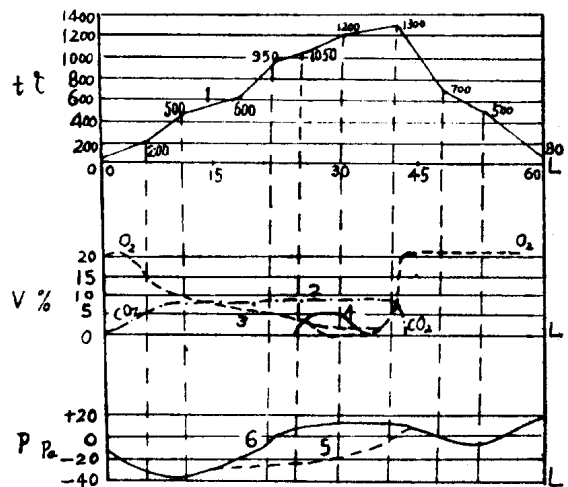


图 1-1 隧道窑烧成制度举例

1—烧成温度曲线；2—窑内CO₂曲线；3—窑内O₂曲线，在1050~1250°C范围内，上部为烧氧化气氛曲线，下部为烧还原气氛曲线；4—烧还原气氛时，在1050~1250°C范围内的CO曲线；5—煤烧隧道窑内压力曲线；6—油烧或煤气烧隧道窑内压力曲线。L—横坐标窑长，m；t—纵坐标温度，°C；V—纵坐标气体%；P—纵坐标窑内静压，Pa

温度曲线是指安置在窑顶的多支热电偶测出的温度。900°C以前为预热带，900°C至最高温度为烧成带，最高温度以后为冷却带。

气氛曲线有O₂、CO及CO₂百分含量的变化。烧氧化气氛的窑，自预热带进车端至烧成带气体中的氧自21%逐渐降至1~2%。烧还原气氛的窑，在1050°C以后到1200°C，几乎不存在游离氧，而有2~4%的CO。过后，又接近中性气氛，气体中的CO及游离氧均甚微。随着氧的减少，烟气中的CO₂逐渐增多。在冷却带为空气，其氧含量为21%，无CO₂及CO。

压力曲线表明预热带为负压，而以主烟道入口处（400°C附近）负压最大。除烧煤的自然抽风隧道窑外，烧成带均为正压。冷却带急冷鼓风及窑尾直接鼓风处为正压，抽热风处为负压。

第二节 砌窑的耐火材料和隔热材料

砌窑要用耐火材料和隔热材料。耐火材料必需具有一定的强度和耐火性能，以便保证窑炉烧到要求的温度而不倒塌。隔热材料的作用是减少窑炉墙壁的积热和散热，节约燃料。随着新型高温窑炉的出现，现在有了不少新型耐火材料和隔热材料，而且在试制高强、高温隔热材料，将来利用一种材料就可以砌筑理想的窑炉。

一、耐火材料的主要性能

耐火材料的好坏，应从它的耐火度、荷重软化点、热稳定性和抗化学腐蚀性、高温体积稳定性等几方面来决定。

1. 耐火度：指材料在高温下抵抗熔化的性能。耐火度的测定是将试样制成一个上底每边为2毫米，下底每边为8毫米，高30毫米，截面呈等边三角形的三角锥。把三角锥试样和用来比较的标准锥放在一起加热，当试样因受热和其本身重量的影响，顶部弯倒接触底平面时的温度，就是这个试样的耐火度。要注意耐火材料不能使用到耐火度的温度。

2. 荷重软化点：是指耐火砖在一定压强下（2公斤/厘米²）加热，发生一定变形（压缩4%和压缩40%）和坍塌时的温度。

3. 热稳定性又叫耐急冷急热性，或温度急变抵抗性。烧窑时要把窑墙由常温加热至高温，冷窑时又要将窑墙由高温冷至常温，即使是连续性的隧道窑，开窑点火是把窑墙由常温加热至高温，停窑冷修是把窑墙由高温冷至常温，一热一冷，由于耐火砖内部晶形转变产生体积变化或热胀冷缩等原因，使耐火砖开裂，剥落而不能使用。热稳定性的测定是将耐火砖加热至850°C，然后放于20°C流动的冷水中，再加热至850°C，又放在冷水中，待砖块因破裂、掉落而失去原重量的20%时，所经受的冷热交换次数。耐急冷急热次数多的砖好用。

4. 抗化学腐蚀性：是指耐火砖和熔渣、煤渣接触时，抵抗侵蚀的能力。

5. 高温体积稳定性：是指材料在高温下长期使用时，体积发生不可逆变化（收缩或膨胀）的性能通常以残余收缩或膨胀来表示。

耐火材料性能好坏的决定因素主要是化学成分，其次是生产时的工艺过程。在生产耐火砖时，作为骨架的瘠性物料颗粒配比，成型压力和烧成好坏三个因素占重要地位。要求有高的熔点的化学成分，瘠性材料颗粒配比要求大、中、小颗粒配合成最紧密的堆积，成型

压力要求高，烧成时希望烧熟而不过烧。

二、砌窑用的耐火材料

1. 粘土质耐火砖（简称粘土砖）：含 Al_2O_3 30~46%， SiO_2 50~65%，碱金属与碱土金属氧化物5~7%。它是采用含 Al_2O_3 不小于30%的耐火粘土作原料，一部分预先烧成熟料，研碎作瘠性材料，其余一部分不预烧的软质粘土作粘结剂，便于成型，成型后在1300~1400°C烧成。粘土砖属于弱酸性耐火材料，热稳定性较好，荷重软化开始温度在1250~1300°C以上，软化开始和终了温度间隔很大。粘土砖在工业上使用甚广，广泛用于砌筑陶瓷工业窑炉，使用温度在1300°C以下。普通粘土砖理化指标参考《筑炉工手册》表2-7。

2. 半硅砖：含 Al_2O_3 小于30%， SiO_2 大于65%。是采用天然的含石英杂质的粘土或高岭土，如沙质石英岩，酸性粘土，泡沙石等作为原料。也可用石英或砂粒作瘠性材料掺在耐火粘土中来制造半硅砖。半硅砖属半酸性耐火材料，其荷重软化开始温度比粘土砖稍高，急冷急热性比硅砖好，但比粘土砖稍差。砌筑一般窑时可以采用。

3. 高铝砖：含 Al_2O_3 46%以上。以天然高岭石和含水铝氧石（波美石，水铝石）为主要矿物组成的高铝矾土为原料，在1450~1500°C左右烧成。高铝砖的耐火度及荷重软化点比粘土砖的高，开始软化温度在1420~1500°C以上，抗化学腐蚀性也较好，但其热稳定性较低。使用温度，根据含 Al_2O_3 的多少在1400~1600°C。普通高铝砖的理化指标，参考“筑炉工手册”表2-26。

4. 硅砖：含 SiO_2 93%以上。以石英岩为原料，加入铁磷，石灰乳作矿化剂，以亚硫酸纸浆废液等作粘结剂，在1350~1430°C烧成。属酸性耐火材料，荷重软化开始温度高，一般在1620°C以上。热稳定性差，不适宜于砌筑间歇性的窑炉。普通硅砖理化指标，参考“筑炉工手册”表2-40。

5. 镁砖：含 MgO 80~85%，是碱性耐火材料。镁砖分烧结镁砖和不烧镁砖。烧结镁砖是用煅烧良好，组织均匀的烧结镁石作原料，用亚硫酸纸浆废液作粘合剂，加压成型后，在1600~1700°C烧成。镁砖耐火度甚高，一般超过2000°C，荷重软化点低，1500°C就开始软化，热稳定性不好。不烧镁砖是将烧结镁砂加卤水（含水氯化镁）捣打而成。镁砖理化指标，参考“筑炉工手册”表2-48。

6. 镁硅砖：是以方镁石（ MgO ）为主要矿物组成，以镁橄榄石（ $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ）作为基质结合的一种镁质耐火材料。用高镁硅石或在镁橄榄石原料中加入烧结镁砂制成。制造工艺和理化性能与镁砖相同，其烧成温度1620~1650°C，荷重软化开始温度约在1550°C以上。

7. 镁铝砖：含 MgO 大于80%， Al_2O_3 5~10%，用含钙少的烧结镁砂加入约8%的工业 Al_2O_3 粉，共同研磨，以亚硫酸纸浆废液作粘合剂，高压成型后，在1580°C烧成。其耐火度很高达2130°C，荷重软化点和热稳定性都比镁砖好。各种镁砖使用温度在1700~1900°C。

8. 刚玉砖：以电熔刚玉砂或工业氧化铝为原料，加入1%以下的氧化钛，在1600~1800°C左右烧结而成。含 Al_2O_3 99%以上，体积密度达3.8克/厘米³，使用温度在1800°C以下。

9. 碳化硅耐火制品：用粘土作结合剂的碳化硅制品，其组成变化甚大。根据使用要求，粘土结合剂用量在5~20%，可以外加高铝矾土，工业氧化铝，或熔融石英，与碳化硅一

起配料烧结而成。制品中含SiC: 35~87%; SiO₂: 10~50%; Al₂O₃: 3~30%。其荷重软化温度自1400~1620°C。

用电炉在2300°C熔融制得的再结晶碳化硅制品, 含SiC达99%, 体积密度为2.55克/厘米³, 在1730°C没有变形。

碳化硅耐火制品具有高的导热系数, 随着SiC含量的增加, 自20增至100千焦/米·小时·°C。它有高的荷重软化温度, 1400~1700°C; 高的温度急变抵抗性, 加热至使用温度, 吹风急冷, 反复可在50~150次; 并有高的抗渣性和耐磨性。是很好的匣钵, 棚板材料和隔焰板(马弗板)材料。不过在900~1100°C容易氧化, 应在表面涂抹一层抗氧化材料。

10. 含锆耐火材料^[4]: 锆英石砖含ZrO₂: 35~65%, SiO₂: 32~55%, Al₂O₃: 0~8%。荷重软化温度在1400~1650°C。

锆氧砖含ZrO₂93.5%, 耐火度在1850°C以上, 体积密度为4.40克/毫米³。

11. 其他高温耐火材料, 可参考表1-2。

高温耐火材料表

表 1-2

名 称	理论密度, g/cm ³	晶 系	熔 点, °C
1. 氮化硅Si ₃ N ₄	3.44	斜 方	1900
2. 氮化硼BN	2.27	六 方	3000
3. 碳化硼B ₄ C	2.52	菱 形	2470
4. 氧化铝Al ₂ O ₃	3.97	六 方	2050
5. 氧化铍BeO	3.02	六 方	2530
6. 氧化镁MgO	3.60	等 轴	2800

三、砌窑用的耐火混凝土

砌筑窑炉时, 也可以不用耐火砖, 而直接采用耐火混凝土, 制成需要的窑炉内衬和窑顶。耐火混凝土有矾土水泥耐火混凝土, 磷酸盐耐火混凝土和镁质耐火混凝土。

矾土水泥耐火混凝土是以高铝矾土熟料作为骨料, 掺一部分高铝矾土熟料粉, 用矾土水泥作胶结剂, 加适当的水, 倒入模板中捣制, 脱模后, 以水、空气养护而成。使用温度在1300~1400°C。详细配比和性能参考《筑炉工手册》表2-119、表2-120。

磷酸盐耐火混凝土是用高铝矾土熟料或锆英石(ZrO₂大于64%, SiO₂小于32%)作骨料, 掺一部分粘土熟料粉, 用工业磷酸(浓度80~85%)和磷酸铝溶液(用浓度为40%的工业磷酸和工业Al₂O₃按重量比7:1调制而成磷酸铝溶液)作为胶结剂, 倒入模板捣制而成, 一般要经过300~500°C以上的热处理才硬化固结, 使用温度1400~1600°C, 详细配比和性能参考《筑炉工手册》表2-122。以电熔刚玉为骨料, 以磷酸为胶结剂的磷酸盐耐火混凝土, 使用温度可达1800°C。

镁质耐火混凝土就是不烧镁砖, 其详细配比和性能参考《筑炉工手册》表2-124。

四、砌窑用的隔热材料

砌筑窑炉时往往要用到轻质隔热材料。一般轻质隔热砖是在制造耐火砖时加入特殊发泡物质, 生成一种多气孔的轻质耐火材料。特殊发泡物质分三类:

在制砖时加入可燃炭末、锯木屑等, 使制品烧成后有一定的气孔。

在制砖时加入松香等泡沫剂, 并以机械方法使之起泡, 烧成后获得多孔制品。

在制砖时加入白云石或方镁石和石膏，并加入硫酸，使其发生化学反应，生成气泡，经过烧成后获得多孔制品。

轻质耐火砖机械强度低，耐磨性和热稳定性差，不能直接用于和火焰接触的部位。

轻质耐火砖有：轻质硅砖、轻质耐火粘土砖、轻质高铝砖。其理化指标参考《筑炉工手册》表2-57、2-59、2-61。

现在国内外已生产高级耐火隔热材料，如高铝空心球砖和硅酸铝耐火纤维^[5]。

高铝空心球砖是将工业氧化铝，或焦宝石，铝矾土等耐火材料，在电弧炉熔融(2000°C)后，用压缩空气喷吹而成大小直径不同的空心高铝球。然后经颗粒配比，并加入适量的硫酸铝 $Al_2(SO_4)_3$ 水溶液作粘结剂，成型后，在1500~1750°C温度下烧结而成。这种砖的高温绝热性好，收缩性小，机械强度大，耐磨性好，抗腐蚀性强。具体性能见表1-3。

高铝空心球砖性能表

表 1-3

名 称	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	耐火度	真气孔	密 度	1 公斤/厘米 ² 荷重软化温度 °C	导热系数 kJ/m·h·°C
	%	%	%	%	%	°C	%	g/cm ³		
我国某厂	>99	<0.3	<0.1			>1960	>65	<1.23	>1700	3.0
我国某厂	>55		<2.0			1750		0.8	>1180	
日本“美浓”	>97	<2	<1	<0.5	<0.5	1960	>35	<2.5	>1700	3.8
日本“美浓”	>75	<24	<1.5	<0.5	<0.5	1920	>50	<1.50	>1550	3.4

硅酸铝耐火纤维（陶瓷棉）：是一种新型耐火隔热材料，它是用焦宝石，铝矾土等耐火材料，在电弧炉中熔融（2000°C），然后用高压空气喷吹而成棉花状的纤维。可作为散装填充材料，也可加粘结剂作成毡，纸，板，圈和绳使用。它具有高耐火度，低导热系数，低蓄热量，轻质，吸音，耐热冲击，耐腐蚀等性能。采用这种材料砌窑，与普通耐火砖比，有如下优点：

陶 瓷 棉 性 能 表

表 1-4

名 称	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	CaO	MgO	纤维长 mm	直径 μ	使用温度 °C	熔点 °C
	%	%	%	%	%	%					
我国某厂陶瓷棉	44~54	42~52	0.6~1.1	—	0.29~ 1.13	0.8~ 1.16	0.12~ 0.59	2~100	2~8	1260	1750
我国某厂陶瓷棉	47~53	43~54	0.6~1.8	—	—	0.1~ 0.3	—	10~250	2~8	1300	>1790
我国某厂陶瓷棉	52~60	40~46	0.41~ 0.86	—	—	0.3	0.19	10~100	2~4	1300~ 1500	—
日本“东芝”短纤维	52	48	—	—	—	—	—	80	3		
日本“东芝”长纤维	45	50	—	5	—	—	—	80~250	6.15		
高温用纤维	62	38	—	—	—	—	—	80	3		

(1) 减少窑壁厚度1/3~1/2;

(2) 减少窑体重量;

(3) 节约砌筑钢材20~30%;

(4) 节约燃料消耗10~30%。

这种材料的性能参考表1-4。

陶瓷棉的导热系数, 在900~1000°C时为:

$$\lambda = 0.5 \sim 1.2 \text{ kJ/m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C};$$

其密度为:

$$\rho = 100 \sim 350 \text{ kg/m}^3.$$

900°C开始再结晶, 有收缩1.6~3%

1100°C 收缩2~4.2%。

制成棉毡, 棉板, 其体积密度为60~130kg/m³, 其导热系数为0.4~0.8kJ/m·h·°C。

此外尚有其他纤维, 可作耐火隔热材料用, 见表1-5。

耐火隔热纤维

表 1-5

名 称	直 径 μ	使用温度°C	名 称	直 径 μ	使用温度°C
玻璃纤维	10	700~850	ZrO ₂ 纤维		2650
石英纤维	35	1600	C纤维	8~10	3650
Al ₂ O ₃ 纤维		2040	SiC纤维	>6	2960

第三节 工作系统(流程)及结构^[6]

隧道窑工作系统又叫工作流程, 是指窑内气体输送系统, 即气体流向及其有关设备。例如排烟系统, 气体搅动系统, 冷却系统等。最简单的隧道窑只有一个系统。一般隧道窑的预热和烧成带工作系统与冷却带工作系统是分开的。随着工作系统的不同, 窑的结构也有所不同。本节先分析比较几种有代表性的工作系统, 然后具体讨论窑的结构。

一、工作系统及分带

隧道窑与铁路山洞的隧道相似, 故名。目前用得更多的是单通道, 明火焰, 窑车隧道窑。内有轨道, 彼此相连的装有坯体的窑车, 由于推车机的推动, 在隧道内迎着气流连续地或间歇地移动。不论窑的结构简单或复杂, 任何隧道都可划分为三带: 预热带、烧成带、冷却带。这里的预热、烧成和冷却是指制品而不是气体, 因为气体的加热和冷却恰恰相反。对于三带的具体划分各有不同, 有以砌筑体分, 有以温度分。但多数以燃烧室的设置来分, 设有燃烧室的部分为烧成带, 前后各为预热及冷却带。要注意900°C以下设有高速调温烧嘴的地段仍为预热带。干燥至一定水分的坯体入窑, 首先经过预热带, 受来自烧成带的燃烧产物(烟气)预热, 然后进入烧成带, 燃料燃烧的火焰及生成的燃烧产物加热坯体, 使达到一定的温度而烧成。燃烧产物自预热带的排烟口, 支烟道, 主烟道经烟囱排出窑外。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。被加热的空气一部分作为助燃空气, 送去烧成带, 另一部分抽出去作坯体干燥或气幕用。隧道窑最简单的工作系统如图1-2。

这是一个烧煤的自然抽风的隧道窑工作系统, 没有鼓风机和抽风机, 只依靠烟囱把冷

空气自炉栅下吸入作为一次空气，将煤燃烧后，燃烧产物被吸入烧成带，再流至预热带，经排烟口由烟囱排出窑外。同时利用烟囱把冷空气自冷却带吸入，将产品冷却，空气本身得到预热，然后也进入烧成带作二次空气用，并成为烟气由排烟口排走。这种窑结构简单，但缺点甚大，全窑处于负压下操作，预热带负压更大，易从外界漏入大量冷空气，使窑内温度分布不均，产生气体分层，上下温差甚大。而且大量温度不高的空气自冷却带流进烧成带，使烧成温度降低，不易维持还原气氛，产品有时烧不熟，有时发黄。这种简易系统，目前很少采用。现在烧煤的隧道窑，在冷却带有急冷阻挡气幕，窑尾直接鼓风冷却，并由冷却带抽取热空气送去干燥坯体，和烧油时相同。参考烧油的工作系统。

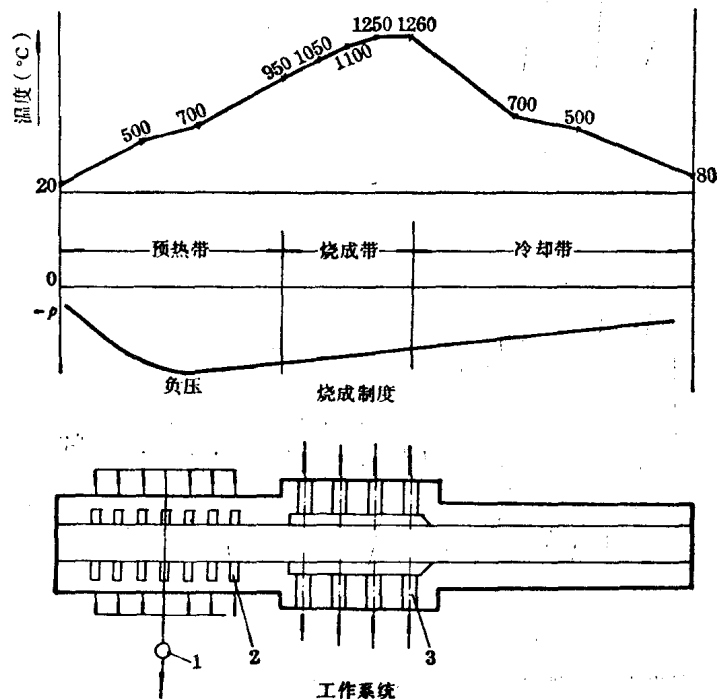


图 1-2 隧道窑最简单的工作系统图

1—烟囱；2—排烟孔；3—烧煤燃烧室

一般烧油或煤气的隧道窑，其工作系统如图1-3。

这个工作系统是将油或煤气自烧成带的燃烧室喷入，烧成带呈微正压。烟气在预热带用排烟机抽走。预热带有窑头封闭气幕，搅拌气幕，使窑内上下温差减少。冷却带有急冷送风，窑尾送风和抽热风设备。冷却带工作系统较完善，急冷风和窑尾直接鼓入的风都由热风机抽走，达到平衡，自成一个系统。既少或没有冷风进入烧成带，容易提高燃烧温度和维持还原气氛。急冷风又有阻挡烧成带烟气倒流的作用，可以防止产品熏烟。冷却带在微正压下操作，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、低能耗创造条件。焙烧日用瓷的隧道窑，要烧还原气氛，在烧成带的氧化炉和还原炉之间还有氧化气氛幕。

以上两种工作系统，都是明焰隧道窑，火焰直接进入隧道和制品接触或和匣钵接触。至于隔焰隧道窑的工作系统，可见图1-4。

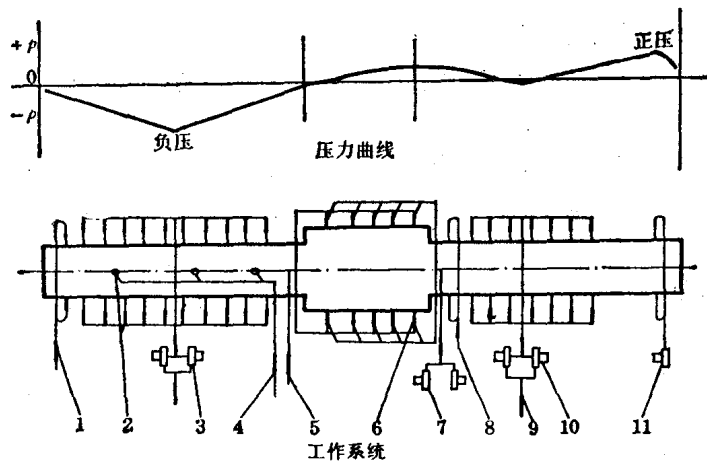


图 1-3 一般隧道窑的工作系统图

1—封闭气幕送风，2—搅拌气幕，3—排烟机，4—搅拌气幕送风，5—重油或煤气，6—烧嘴，7—雾化或助燃风机，8—急冷送风，9—热风送干燥，10—热风机，11—冷风机

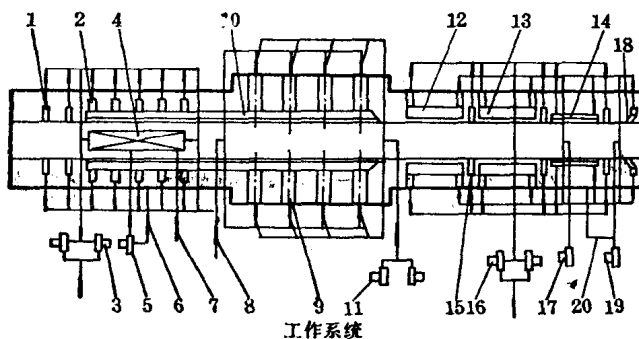


图 1-4 隔焰隧道窑工作系统图

1—排温孔，2—烟气排出孔，3—排烟机，4—换热器，5—换热器送风机，6—车下风抽出，7—换热后的热风送干燥，8—重油，9—燃烧室，10—隔焰道，11—雾化风机，12—间接急冷，13—间接冷却，14—金属管冷却，15—热风抽出，16—热风机，17—冷风机，18—直接冷风送入，19—冷风机，20—车下冷风送入

这个工作系统的特点是重油喷入隔焰道中燃烧，烟气不进入隧道而自烧成带的隔焰道流至预热带，经排烟口进入窑顶换热器，降低温度后，经排烟机、烟囱排走。将车下抽出的温度不高的空气送进换热器，升高温度后送干燥或助燃用。冷却带基本上采取间接冷却，只窑尾鼓入直接冷风，将产品冷却后，同时和间接风一起被抽风机抽走作干燥用。

隧道窑的特点是它能利用烟气来预热坯体，使废气排出温度只在 200°C 左右。又能利用产品冷却放出之热来加热空气使出窑产品温度仅 80°C 左右。且为连续性窑、窑墙、顶温度不变，不积热，所以它的热耗很低。

二、结构⁽¹⁾

目前陶瓷工业隧道窑一般长度在 $15\sim 100$ 米，内宽和内高（自车台面起到拱顶）都在 2 米以下。

概括地说，隧道窑包括四个部分：窑体，燃烧设备，通风设备和窑内输送设备。