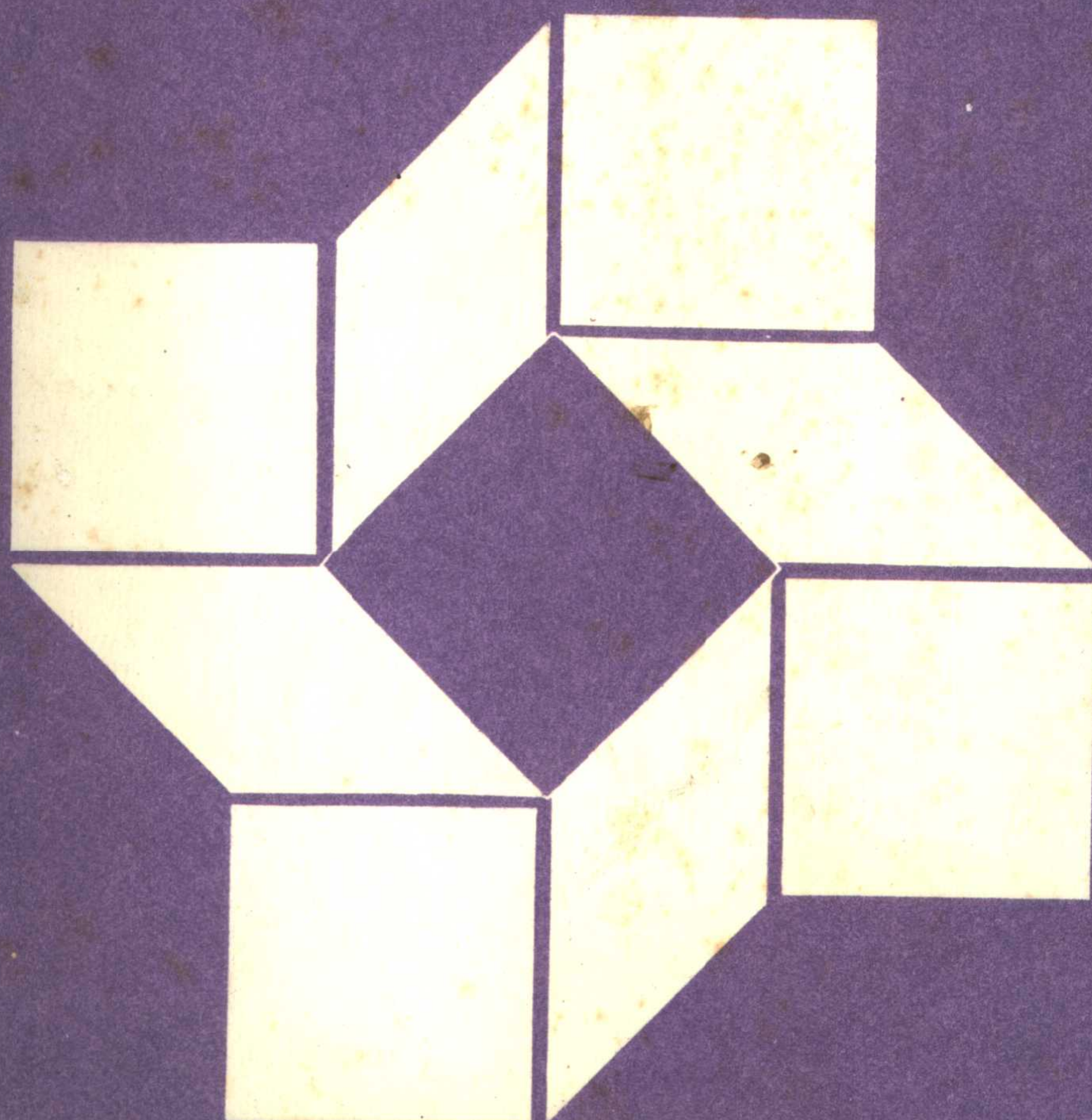


陶瓷工业热工设备

刘振群 主 编

高等学校试用教材



武汉工业大学出版社

陶瓷工业热工设备



高等学校试用教材

陶瓷工业热工设备

刘振群 主编

武汉工业大学出版社

内 容 提 要

本书经高等学校无机非金属材料类专业教材编审委员会审定为陶瓷专业本科教学用书。

· 本书重点介绍陶瓷隧道窑的结构特性、工作原理、操作控制 and 设计计算。对间歇窑、电阻炉、各种电热窑炉以及窑炉热工测量和自动调节也作了介绍。

· 本书也可供有关研究、设计和生产技术人员参考。

高等学校试用教材

陶瓷工业热工设备

· 刘振群 主编

责任编辑 王忠林

*

武汉工业大学出版社出版(武汉市武昌珞狮路14号)

新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销

中南三〇九印刷厂印刷

*

开本: 787×1092mm 1/16 印张 10.75 插页: 2 字数: 252千字

1989年10月第一版 1990年7月第二次印刷

印数: 1501-3500册 定价: 2.20元

ISBN 7-5629-0228-3/TQ·0008

前 言

本书是根据1988年6月在广州召开的“热工教材编写组会议”制订的修订大纲，在第一版的基础上修改而成的，作为高等工科院校无机非金属材料专业的试用教材，讲课时数约40学时。

此教材仍以目前用得最多的明焰车式隧道窑为典型，也有间歇窑及电热窑炉内容。至于干燥原理及干燥器，则移至《热工基础增补本》，本书不再涉及。

本书由华南理工大学刘振群主编，并修订第一、四两章，黄炳钧修订第二、三两章。本书由天津大学宋嵩主审。

编者
1988年8月

附：原第一版前言

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

1982年1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	34
一、隧道窑内的气体流动	34
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	61
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(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.....	81
三、多通道隧道窑.....	84
第八节 隧道窑热工性能的评价.....	86
一、隧道窑热工参数间的关系.....	86
二、隧道窑的热效率.....	87
三、单位质量产品热耗.....	88
第二章 间歇窑.....	90
第一节 倒焰窑的流程与结构.....	90
一、窑体.....	90
二、燃烧设备.....	93
三、通风设备.....	95
第二节 倒焰窑的工作原理.....	97
一、窑内气体流动.....	97
二、窑内传热.....	98
三、燃料燃烧的操作控制.....	99
第三节 新型间歇窑.....	100
一、梭式窑(抽屉窑).....	100
二、钟罩窑.....	104
第三章 电热窑炉.....	105
第一节 电热元件的性能.....	107
一、钨.....	108
二、钨.....	109
三、镍铬合金.....	110
四、铁铬铝合金.....	110
五、硅碳棒.....	110
六、二硅化钼电热元件.....	112
七、石墨.....	115
八、碳.....	115
第二节 电阻炉的设计.....	115
一、炉体主要尺寸的计算.....	115
二、电阻炉功率的确定.....	118
三、电热体的单位表面功率.....	119
四、电热体尺寸的计算.....	120
第三节 电阻炉的安装与使用.....	124
一、电阻炉的安装.....	124
二、电阻炉的使用.....	128
第四节 其他电热窑炉简介.....	130
一、感应炉.....	131
二、电弧炉.....	133

三、弧象炉.....	134
四、电子束炉.....	136
五、等离子炉.....	136
六、太阳炉.....	138
第四章 窑炉热工测量和自动调节.....	140
第一节 隧道窑热工测量点的确定.....	140
一、温度的测量.....	140
二、窑内压力的测量.....	143
三、窑内气氛的测量和空气过剩系数的测量.....	143
四、管道内和烟道内气体流速、流量的测量.....	145
五、燃料用量的测定.....	146
第二节 隧道窑的热工标定.....	146
第三节 隧道窑自动调节.....	147
一、隧道窑烧成带的温度自动调节.....	147
二、隧道窑烧成带的气氛自动调节.....	149
三、隧道窑预热带的压力自动调节.....	149
四、隧道窑冷却带的压力自动调节.....	150
五、烧油明焰隧道窑的温度、压力自动调节系统举例.....	150
六、电子计算机控制隧道窑.....	151
七、间歇窑的自动控制.....	151
八、喷雾干燥器的自动调节举例.....	151

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，这里热工设备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、梭式窑、车式隧道窑和辊底隧道窑(即辊道窑)等。

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，生产规模扩大了，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，是创造陶器最早的国家之一。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。从西安半坡遗址的发掘中，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。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][2]}。机械化的隧道窑是1899年才由法国的福基罗(Faugeron)创建成功，用于烧成陶器，其后德国用于烧成瓷器，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。

八十年代，我国从国外引进了不少焙烧日用瓷、建筑卫生瓷、电瓷的以煤气或轻柴油为燃料的、用微型计算机控制的轻型结构车式隧道窑和焙烧墙、地彩釉砖的、以微型计算机控制的烧煤气的辊道窑。1986年广东佛山石湾化工陶瓷厂在消化吸收国外技术的基础上，自己设计建造了以重油为燃料的辊道窑，华南理工大学并在这座窑上安装了微型计算机高级调节控制系统，此窑已向国外输出。

同时，还引进了不少具有轻型结构、带高速烧嘴的微型计算机控制焙烧建筑卫生瓷、电瓷及日用瓷的梭式窑〔3〕。

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。近年来采用轻质耐火材料(如陶瓷棉毡)砌窑及窑车，并用高压瓷嘴，使间歇窑(如梭式窑)烧成周期缩短，能耗降低，其灵活性更加突出，甚至可以和连续性窑相竞争。而轻型窑车隧道窑及辊道窑更显示连续性的优点。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(辊道窑) 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，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。

(一)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。

(二)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。

(三)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。但这个反应本来是很快的,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。

(四)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。

(五)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。

(六)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。

(七)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。

(八)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。

(九)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、还原和烧结却要按照反应所需时间来控制。总的说来,普通陶瓷制品可以在1~2 h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,究竟升温和降温速度多少,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。温度制度是指沿窑长装在窑顶或窑侧的热电偶测得的窑内温度曲线。在低温阶段,接近气体温度;在高温阶段,接近制品温度。气氛制度是指窑内含游离氧或一氧化碳的情况。

制品的烧成制度实际上是到同类工厂调查,收集数据,或根据开发性试验,取得数据来制订的。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。

从理论上说,温度制度的制订,可用有限差法或有限元法,用计算机数值求解,求出烧成各阶段制品内部的温度场,最大温差和温度梯度。然后根据制品内部允许的最大温差来制订最合理(最快)的升、降温曲线〔4〕。

(一)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。

(二)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。

(三)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。

(四)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。

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

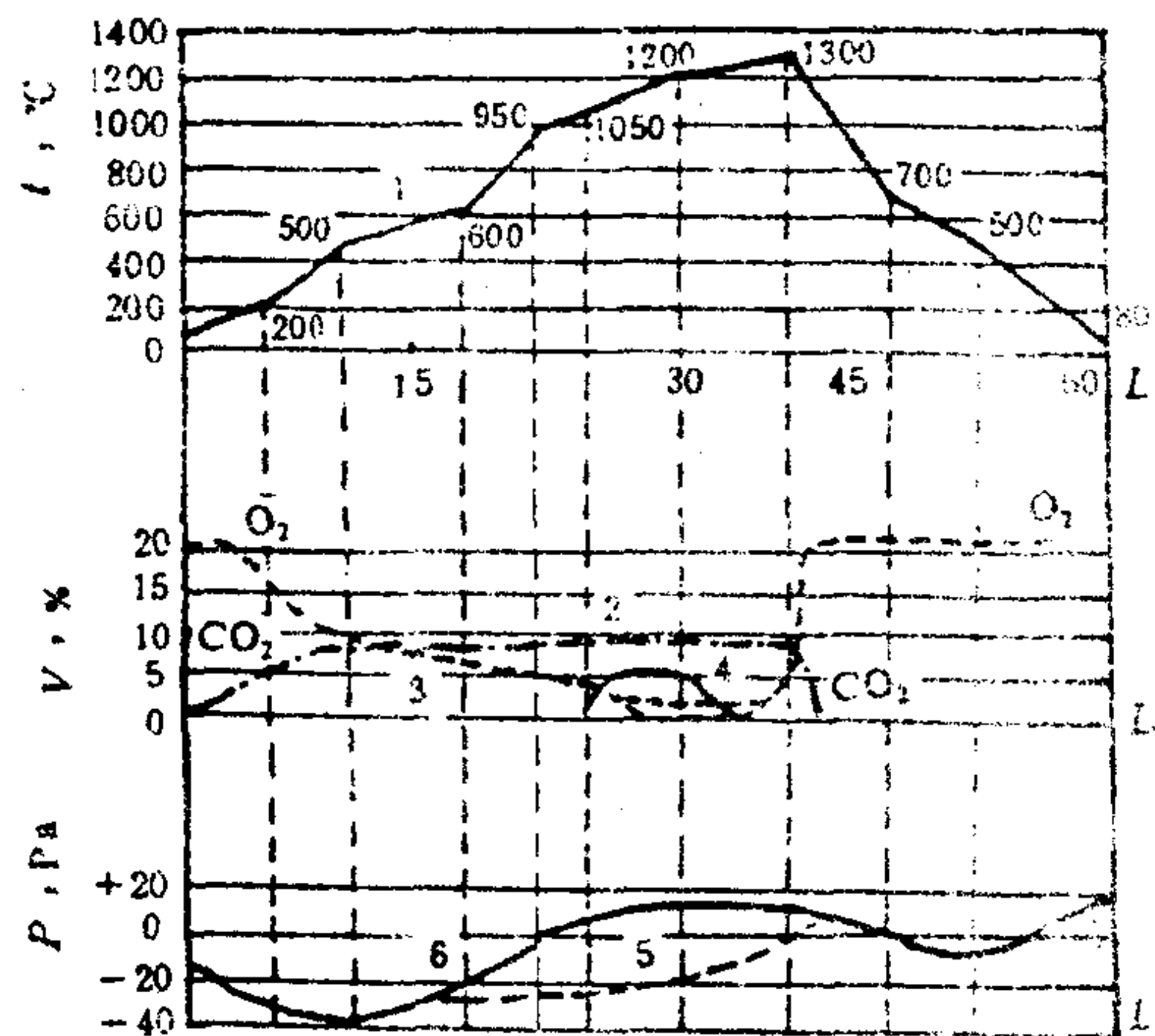


图 1-1 隧道窑烧成制度举例

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

高温为烧成带，最高温度以后为冷却带。

气氛曲线有 O_2 、 CO 及 CO_2 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 CO_2 逐渐增多。在冷却带为空气，其氧含量为21%，无 CO_2 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。

(一)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 mm，下底每边为8 mm，高30 mm，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所受重力的影响，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。

(二)荷重软化点：是指耐火砖在一定压强下（ $1.96 \times 10^5 Pa$ ）加热，发生一定变形（压缩4%和压缩40%）和坍塌时的温度。

(三)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、掉落而失去原质量的20%时，所经受的冷热交换次数。耐急冷急热次数多的砖好用。

(四)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。

(五)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

(一)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,软化开始和終了温度间隔很大。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》⁽⁵⁾表2-7。

(二)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。

(三)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。另外,以硅线石矿物为主制成的高铝质硅线石砖,是筑窑的好材料。

(四)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。

(五)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。

(六)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。

(七)镁铝砖:含 MgO > 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1530°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。

(八)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 g/cm³,使用温度在1800°C以下。

(九)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%; SiC_2 : 10~50%; Al_2O_3 : 3~30%。其荷重

软化温度为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2.55g/cm³，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100kJ/m·h·°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。

(十)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1400~1650°C。

锆氧砖含ZrO₂93.5%，耐火度在1850°C以上，体积密度为4.40g/cm³。

(十一)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按质量比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：

在制砖时加入可燃烧炭末、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 °C	真气孔率 %	密 度 g/cm ³	0.98×10 ⁵ Pa 荷重软 化 温 度 °C	导热系数 kJ/m·h·°C
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：

减少窑壁厚度1/3~1/2；减少窑体质量；节约砌筑钢材20~30%；节约燃料消耗10~30%。

这种材料的性能参考表1-4。

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 μm	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	8		