

建材情报资料

总第8126号

陶瓷类 3

国外陶瓷烧成窑炉与节能

建材部技术情报标准研究所

1981年10月



目 录

一、浅谈低温快烧窑炉的发展方向	(1)
二、节约燃料的窑炉结构和窑炉材料	(4)
三、关于窑炉的节能问题	(8)
四、关于隧道窑窑车的节能问题	(11)
五、室式窑采用氧化铝纤维节约燃料	(13)
六、喷涂窑衬节能	(17)
七、隧道窑面砖烧成制度的改进	(20)
八、关于烧成的若干问题	(23)
九、用于单层快烧窑的装卸及存放制品的自动化设备	(27)
十、双层辊道窑的使用情况	(31)
十一、隧道窑和辊道窑主要工作指标的比较	(34)
十二、日本辊道窑的改进	(38)
十三、传统烧成的隧道窑和快速烧成的隧道窑之间生产成本比 较	(39)
十四、白瓷生产中连续烧成和间歇烧成的优缺点	(45)
十五、地砖理想烧成制度的计算法	(48)

浅谈低温快烧窑炉的发展方向

近年来,能源危机已成为世界性问题,我国能源也日趋紧张。由于我国工业技术比较落后,经营管理不得当,甚至有些企业只抓产值,不顾能源消耗,所以我国能源利用率极低,就陶瓷工业窑炉而言,热利用效率仅是工业发达国家的一半左右。

陶瓷工业节约能源,就烧成方面而言,首先应着手研究、设计能耗低、产量大的低温快烧窑炉,同时要研究改革现有的工业窑炉结构及燃烧器结构。

新设计的窑炉应是优质、高产、低消耗,且劳动条件好的,这是衡量窑炉好坏的重要标志。

目前国内使用的低温快烧窑炉有辊道窑、小断面隧道窑、多孔窑等,这些快烧窑炉具有各自的优点,但也存在着一些问题,结合各个工厂的规模和实际条件,这些窑炉均已用于生产面砖。

小断面隧道窑,横截面小,窑内温度分布比较均匀,烧成带上下温差仅有 20°C 左右,窑车轻便,窑车的热容量也比一般隧道窑窑车小。至今这种窑炉是比较好的快烧窑炉,但该窑预热带温差仍旧达一百余度,要进一步快烧仍有困难,必须在预热带采取热工措施,使上下温差缩小,则该窑就能进一步缩短烧成周期。从热利用效率而言,一般说来,大窑总是比小窑热利用效率高。随着高速等温烧嘴的出现,加快了气流速度,可以使窑内造成气流的再循环和强烈的搅动,减少窑内水平方向、垂直方向的温差,这样就可以使坯体均匀的快速加热。国外,已经把高速等温烧嘴应用到大型隧道窑的预热带部分,用来缩小预热带的温差,因而制品烧成周期可以大大缩短。我国高速等温烧嘴也正在研究试验中,一旦高速等温烧嘴研究成功并在隧道窑上应用,隧道窑的截面就不会是这样小了,随着高速等温烧嘴速度的增加,隧道窑的宽度和高度就会相应的增加,尤其是宽度增加较大。国外,焙烧卫生瓷的隧道窑,采用了高速等温烧嘴后,其宽度已达六米。对于快烧隧道窑来说,尽管大型隧道窑预热带增设了高速等温烧嘴,使传热速度加快了,窑内温差缩小了,但和中型隧道窑比较起来,烧成周期总是要长些,温差还是要大些,这是由于使窑内温度分布均匀还需要一定的时间,所以今后低温快烧隧道窑应用高速等温烧嘴后,其宽度大约是二米左右比较适宜,所以小截面隧道窑不是今后快烧窑炉的发展方向,而仅是当前较好的快烧窑炉罢了。

综上所述,中型隧道窑在预热带增设高速等温烧嘴后,窑内温差缩小了,因而烧成周期可以缩短。因此,该种结构的中型隧道窑,作为低温快烧窑炉是有发展前途的,但是,我国目前经济现状,不可能给予更多拨款供研究窑炉结构的经费。尽管如此,若干年以后,作为低温快烧釉面砖用的中型隧道窑总是要进行研究的。

目前一些工厂广泛使用多孔窑生产面砖,这种窑不用窑车或用轻便窑车,故窑体结构简单,投资费用少,但该窑孔与孔间的温差较大,一般为 50°C 以上,如果所有孔都烧同一产品,这就很难得到质量好的产品了,假如各孔烧制不同产品,这也就难以控制合适的烧成制度,所以这种多孔窑必须进行改革,采用一系列的热工措施,来缩小孔间的温差,才能成为较好的快烧窑炉,但是多孔窑要解决孔间的温差,是一个较难的课题,仅用单层多孔并采取一些热工措施来缩小孔与孔间的温差,还不如一条小断面隧道窑,在其预热带增设小烧嘴来缩小预热带上下温差来得容易。从能耗角度看,多孔窑比小断面隧道窑能耗大,故该窑作为快烧窑发

展，前途并不乐观。

辊道窑实质上是一条小断面隧道窑，其通道截面狭小，在辊子上上下下加热，所以升温快，温度分布均匀，便于操作控制，窑内温差小，如果装了自动控制仪表，窑内温差可控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，所以该窑烧成周期短，烧成周期一般为30~90分钟。辊道窑的热源可用电、各种燃油、煤气或其他天然气。辊道窑不用窑车，坯体可直接放在辊子上单片烧制。用于生产的辊道窑，一种是不用窑具的多层多孔辊道窑（单片或数片烧制），另一种采用钵具或垫板烧制坯体。辊道窑由于温度分布均匀，所以烧制品的质量好，是一种好的快烧窑炉。

辊道窑在意大利、苏联、日本、美国等国已用于面砖和日用瓷的生产，尤其是意大利和苏联已广泛用辊道窑生产面砖。

苏联杜列夫瓷厂素烧瓷辊道窑，长27.11米、宽2.26米（外形）、高2.226米、窑道截面 $250 \times 1100\text{m/m}$ 。

辊道窑与隧道窑数据对比 表 1

指 标	隧 道 窑	辊 道 窑
标准燃料耗量（公斤/公斤瓷器）	0.382	0.12~0.11
耐火器具耗量（公斤/公斤瓷器）	0.081	0.009
素烧时间（小时）	15~19	6.25~7
需要的功率（瓩）	120	8
耐热金属耗量（公斤/公斤瓷器）	—	0.00032
素烧吸水率（%）	13~21	18~19

由表1可以看出：辊道窑单位重量制品能耗低，产品吸水率稳定（也就是产品质量稳定），烧成周期短。

苏联建筑陶瓷科学研究所设计的焙烧陶瓷面砖辊道窑（单孔） 表 2

指 标 名 称	150×150m/m 饰面砖			100×100 ×10m/m 地 砖	浇 注 马 赛 克
	一 次 烧 成	素 烧	二 次 烧 成 釉 烧		
年 产 量（千米 ² ）	200	250	250	200	200
长（米）	33.6	19.6~22.4	29.2~42	42	23
宽（米）	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
辊 距（m/m）	70	70	70	52	120
烧成温度（℃）	1050	1080	1000	1100	1020
烧成时间（分）	30	16	26	40	34

由表2可以看出：窑长在30米左右的两条辊道窑，在确保窑烧成带的一定长度下，素、釉烧面砖，可以缩短周期，面砖年产量可达20万米²以上。

目前我国缺乏高温耐热钢管，同时高温瓷管平直度也差，若建造长30米以上的辊道窑，

不解决瓷管问题，通道平面有效利用率就低了，窑产量就小了，能耗就大。尽管如此，辊道窑还是有前途的，只要窑炉工作者们，共同努力设法提高辊道窑的单位时间产量，同时降低单位重量制品能耗，使能耗指标比隧道窑低，那辊道窑就有实用价值了。

提高辊道窑产量，降低能耗有如下三种途径：

(一)建造多层多孔辊道窑，该窑产量高，能耗低，但要控制好孔与孔间的温差是比较难的，同时传动机构也比较复杂，传动部件也不易平稳可靠，目前国外虽有使用，但也不够普遍。根据我国现有条件，高温耐热钢管不好解决，同时燃料质量也有问题，但可先进行双层四孔辊道窑试验研究。

(二)辊道窑加宽加长也能提高产量、降低能耗。窑体要加长，首先要解决的是瓷管平直和瓷管变形问题。解决瓷管变形，可考虑适当的增加瓷管的 Al_2O_3 含量，使瓷管在使用温度下不变形就可以了，不要使 Al_2O_3 含量太高，而大大提高瓷管的烧结温度，从而大大增加瓷管的成本，另外经过加工研磨，可使瓷管平直。辊道窑加宽后最好还做成平拱，这样可保证窑内温度的均匀性和能耗低。现在通道可加宽到1~1.2米，长度在40米以内，如果采用经过加工研磨的瓷管，窑宽和窑长还可适当的加大。由于管子平直度不够理想，所以窑体不要过长，以防制品走偏斜，而影响通道有效利用率。

(三)用匣钵做载体焙烧面砖则窑的产量会大大增加，能耗会明显降低。这种方法是可行的，因为匣钵运行可靠，不会因某根管子运转不好而打搅。匣钵质量的好坏，是该窑的技术关键问题之一，所以快烧匣钵不仅具有低的热膨胀系数、高的热稳定性，同时具有高的抗弯强度，否则，匣钵在运行过程中会破裂，清除废匣钵工作需要花费较长时间，因而影响窑的产量和增加能耗。目前，这种辊道窑长15~20米，宽0.8~1米，高250~300毫米，辊子直径 $\varnothing 45\sim 60$ 毫米。该窑素烧面砖年产量在25万 m^2 以上，釉烧面砖年产量在22万 m^2 以上，是中型面砖厂的合适窑炉。

素、釉烧面砖窑产量、能耗 表 3

窑 型	素 烧		釉 烧	
	产量 (块/小时)	能耗 (大卡/公斤面砖)	产量 (块/小时)	能耗 (大卡/公斤面砖)
辊 道 窑 长15米 宽920毫米	480	2100	450	2300
某 厂 隧 道 窑	—	1670	—	2430
四 孔 窑 长23.8米 宽390毫米	—	—	1440	2300
新 设 计 辊 道 窑 (载匣钵)	1536	1470	1382	1500

最近几年来，低温快烧釉面砖的研究工作已取得了不少成果，可是到目前为止，还没有能耗低、产量大的低温快烧窑和它配套，这就要窑炉工作者们共同努力，克服各种困难，研究设计出能耗低、产量高的快烧窑炉，投入到生产中去，为四化的早日实现多做贡献。

二、节约燃料的窑炉结构和窑炉材料

(一)前言

采用节约燃料的窑炉结构和窑炉材料的目地,在于有效利用燃料,即最大限度地有效利用制品中所用原料的特性。由于对窑炉结构进行了合理的调整,加速了加热过程及提高了所需热量的传热效率。为此必须研究原料加热过程的特性,以及为了有效地进行烧成,需对所需的热量进行精确的计算,以找出问题对症下药,与此同时,为了防止窑炉热量损失,还应针对砌筑炉衬的方法以及烧嘴进行研究,研究的重点应放在热量损失的回收方面。就窑炉材料而言,采用陶瓷纤维、不定形耐火材料、保温砖、耐火砖等砌筑于合适的位置也可节省能源。

(二)从节省能源观点研究结构调整

关于结构的调整,一般说产品要经过原料配方、成型、干燥、然后经上釉、干燥工序。在窑炉中烧成要进行升温烧结及冷却等过程,产品在上述工艺过程中有各种各样的热变化,为此,可以说了解这些热变化,进行合理的加强与节约能源有密切的关系。

如以陶瓷器为例,原料一般为粘土、石英、长石系统,在升温过程中有排出吸附水、有机物质碳化、脱去结晶水、结晶转化、长石玻璃化等热变化,这些热变化对产品的影响大小,随产品的形状、原料的特性而各不相同。加热变化所产生的热膨胀和热收缩,特别是放热反应和收热反应也是不同的。

然而,这些热变化所产生的热应力,虽有各种原因,但主要是温度分布不均所致。解决

温度不均的方法,一般是采用延长烧成时间,也就是说在热变化大的温度区域控制其温度分布均匀,如果不引起急剧的反应,就可能使烧成时间缩短,使热量能充分利用。正如大家所公认的蒸笼窑(严格地说是以较高的压力,使燃烧气体通过渗透产品的孔隙中,促进烧结反应)。辊底窑也是主要为了改善温度分布而设计的。

(图1为蒸笼窑的示意图)也就是说,使各个制品的均匀受热,进行快速烧成的方法要比把制品成堆的装在窑车上的烧成法,消耗的燃料要少。

图2列出了陶瓷的吸水率随着窑结构

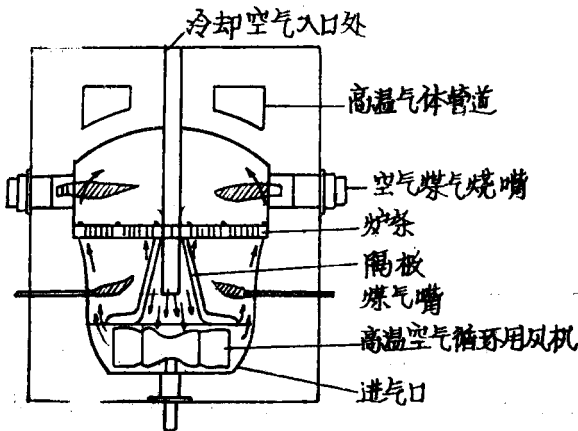


图1 燃烧煤气的蒸笼窑简图

的调整和烧成温度变化的关系，若以吸水率的大小来判断陶瓷器的物理性能，可知随原料配方不同，烧成温度约有 120°C 的波动，从产品质量来看，烧成固然有许多问题值得研究，但有关原料的颗粒组成、成型压力等也应考虑。

这些问题如果按烧结性考虑就能说明，即固体加热时，由于热振动，固体内相邻接的两个颗粒就相互结合，这样，表面自由能减少，使之稳定，增加结合面积，如这时把烧结机理理解成两个颗粒合成体，烧结温度就可适当下降了，尤其是在液相析出期间，由于液相温度不变所以这时不需要更高的温度。从窑炉热效率角度来看，说明温度越高越不利。

谈到节省能源，自然就会想到提高温度就要热能的问题，但根据作者的经验，如果能在冷却过程中，考虑将制品、窑具、窑砖、窑墙所蓄的这部分热量有效回收的话，那末在冷却时采取相应的措施，对节省能源是一个非常重要因素。

例如，隧道窑除特殊情况外，冷却带的长度都设计得长，其原因是考虑产品在冷却过程中不因受热冲击而破坏，具体对陶瓷而言，产生热膨胀与热收缩变化的温度区域在 573°C 左右， α -方石英变化温度在 $210\sim 280^{\circ}\text{C}$ ，鳞石英为 $115\sim 165^{\circ}\text{C}$ ，为了冷却安全，将窑炉长度建造得长，就冷却而言是一个好经验。

然而，由于增加了冷却带的长度，窑墙的散热也增加了，另外由于热交换区域的增长，窑炉基建投资费用也提高，根据作者的经验，在关键的温度区域预先吹入可控制的热风，结果证明可大大地缩短冷却带的长度，采用控制窑炉的压力，这个方法更为有效，特别在窑的废品率高、冷却时温度分布不均匀的情况下，更加有效。

以上从节省能源的角度，叙述了窑炉结构的改进，还应从原料配方到冷却，研究用少量的热能进行烧成的方法。

(三)从节省能源角度来研究窑炉结构

目前使用的窑炉有许多种类，可按输送机构和热量的流动方向进行分类。不同种类的窑炉，各有其优缺点，绝对完美无缺的窑炉，目前尚未研制成功。但按照烧成制品来说，也有效率很高的。要是考虑热效率，作为输送机构，可以说连续式比间歇式有利，而作为热量的流动，采用与产品直接进行热交换的形式比通过匣钵等窑具的间热加热有利，这样，先前所谈的蒸笼窑、辊式窑，其产品和燃烧气体能直接进行热交换，从节约能源来讲是有效的。但这些窑炉除用于烧成陶瓷器以外，要用于更高的温度还存在着一定的问题。

作者曾研制了局部区域加热的半连续式的隧道窑，但在最近产品研制不断发展的情况下，由于隧道窑采用各温度区域的热量循环、余热回收方法以及烧成温度制度能适应批量小、品种多的制品后，就能有助于热量的有效利用。总之匣钵等窑具不仅是必要的，而且对匣钵、窑具形状和材质应进行研究，以减少热损失。热效率高的窑是指能大量生产的高温烧成窑，比现有的隧道窑装载的产品更少，也许这种窑解决了单一产品烧成的问题。

(四)从节省能源角度考虑窑炉材料

目前使用的窑炉材料有：以耐火砖为代表的成型制品；捣制料、塑性材料与熔铸材料等不定形耐火材料，以及陶瓷纤维和陶瓷纸板等。这些材料可按其化学成分——二氧化硅、氧化铝、氧化镁、铬、锆与白云石等进行分类，他们的性能、特点以及用途各不相同，窑炉材料选用时，必须对其使用情况充分了解基础上进行选择。对陶瓷窑来说，窑炉材料使用于还原气氛中，耐火材料中的铁分易受 CO 气氛的影响。图3示出了试样随 Fe_2O_3 含量和加热温度的变化，耐火材料在 CO 的气氛中 C 的析出量。试验结果得出：在还原气氛中使用耐火材

料要求适当的高温而且铁分要少。此外还受到氢氧与碱蒸气的影响，需要加以注意。如从节省能源观点来看，可以说陶瓷纤维及陶瓷纸板、不定形耐火材料在技术上的发展，都与制品工艺方法的发展有关，并将成为有效的窑炉材料。将陶瓷纤维、陶瓷纸板组合作成镶板，再将此镶板组合成预制品，采用这种工艺方法也能降低成本，看来将愈益得到发展。众所周知，陶瓷纤维在钢铁用的退火炉方面已取得了很大成绩，在烧砖瓦的煤气窑上也广泛使用着，可是在陶瓷烧成窑炉上，在1200℃以上把它直接用作内衬材料的实例还不多，根据作者所知，目前在九州有田地区的窑炉有效容积约为4米³的吊顶窑，其内衬材料使用陶瓷纤维，在约1251℃的温度下进行本烧和低温素烧交替使用，获得了周转140次的实际成绩。在陶瓷纤维中虽有少量结晶出现，但对烧成操作无妨，目前正受到重视。

(五)节省能源与窑炉问题

以上着重叙述了直接节约燃料的问题，但用一般的热处理设备解决不了，必须进一步从各个方面考虑如何节省能源，可从燃料转换成热能的转换率（如烧嘴的燃烧效率），烧窑操作、机械化、防止公害，乃至窑炉材料的损坏、投资费用以及包括烧成操作所需电能的消耗量等广泛地去考虑节省能源的问题。这些问题，因涉及面广，本文仅局限于目前的窑炉如何改进的方面。首先，目前要使用好窑炉就应了解如何利用好窑炉的热量，最简便的方法是进行精确的热量计算，在进行计算时应注意如下几点：

- ①窑墙等砌筑炉衬的方法是否合适；
- ②对于制品的传热效率是否好；
- ③燃烧装置有无问题；
- ④余热及其它热量是否回收，充分利用。

除此之外，还有其它各种注意事项，本文就上述四点进行研究。

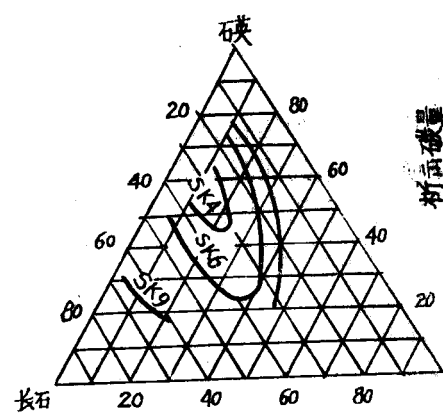
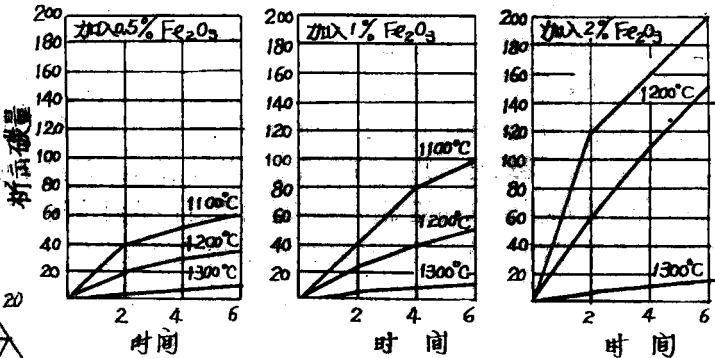


图2 瓷件吸水率为1%时的烧成温度区



试样1.5×1.5×2.0cm，
加热温度550℃；CO流量2升/小时。
图3 添加含Fe₂O₃的粘土，在CO气氛中c的析出量

关于砌筑炉衬的方法，最主要的应使其有最小的散热量及蓄热量，然而，连续操作和间歇操作又不尽然相同，从节省燃料的角度来分析，连续操作的窑炉重点应由减小窑墙的蓄热量转移到减少散热量方面来，而对间歇式操作的窑炉重点则反之。但应注意为了减少散热量也并不是说只要增厚保温材料就行了。图4示出了锅炉的蒸汽管道的保温，其保温层的厚度有一个最经济合理的厚度。

同时应综合考虑每年的经费,即保温材料的价格、用于设备的人工费、采用保温节约能源的费用等尽量减少。此外,除保温材料外的其它材料投资等费用其与窑炉的运转时间和寿命等因素有关,故必须分析这些因素。一般认为费用最低的时候是与当时经济形势有关的,但作为今后的方向,保温层的厚度仍是一个主要因素。

下面以隧道窑为例,产品的传热效率是否良好,对窑内的有效高度而言,往往由于因燃烧气体的上升气体偏向上部流动,从而导致温度分布不均,妨碍了对流传热的效果。为了消除这种现象,在采用合理的装窑方法的同时,应采取控制窑压和燃烧气体的再循环,安装下垂拱,调整通往烟道口的位置等措施。根据作者经验,将隧道窑的窑顶作成水平结构,结果具有很好的对流传热效果。除了个别情况之外,迄今为止,隧道窑基本上不采用水平结构的窑顶,其原因是烧嘴装于两侧,有效宽度有限,所以在有限范围内还不如在结构施工方面采用普通的拱形法较好,可是如考虑按上所述的烧成单一产品又具有良好热效率的话,则应该研究这样的隧道窑:降低产品的装窑高度、增加窑宽、烧嘴安装在上部。图5说明了烧嘴由上往下与水平方向排列时燃烧气体的流动方向。

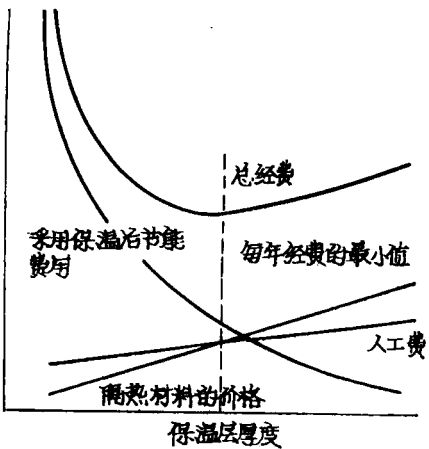


图4 保温材料与经济价值的关系

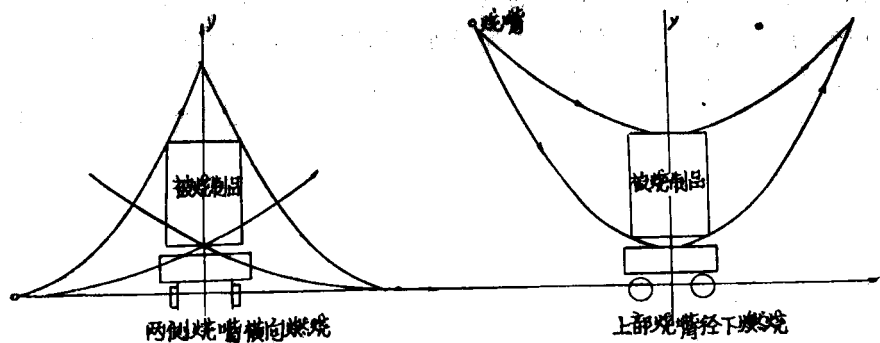


图5 燃烧气体的分布和方向

从图5可知,燃烧气体的温度分布是有区别的,包括最高温度部分的范围内也存有差别,隧道窑中的气体横向燃烧,在产品下部亦即在窑具砖或窑车砖的轨道附近,靠近烧嘴中心经常发现窑车的金属部分与砖的损失严重,从节省能源角度看恰相反,这种不是用于加热产品的热消耗,实际上是热能的浪费。作者对烧成砖瓦的窑炉采用顶式进行了试验,发现燃料的消耗可节约24%。表4为一般的烧成窑炉与试验窑炉的比较。

从表4可知,试验窑的烧成时间能比一般窑炉缩短一半多,这种窑炉因有效高度有限,但为了烧成一定数量的制品,必然要增加窑炉宽度。窑顶为水平结构的窑炉是人们所熟知的,德脱里荷结构和梅尔茨结构就是水平窑顶结构,常用于炼钢铁的加热炉等中,方法是使用金属件把砖吊起,中间用能配合的砖或用塑性材料与捣固料等不定形耐火材料进行联接。

表 4

	石 州 砖 瓦 窑 8 行装 1 层	石 州 砖 瓦 窑 3 行装 2 层	试 验 窑
烧成时间(小时)	17.0	19.0	8.0
生产量(片/日)	150,000	380,000	46,000
窑炉长(米)	50.0	80.0	10.5
单位耗燃料量(立升/片)	0.48	0.42	0.37
烧成温度 ℃	1290	1300	1270

其次,应考虑的是燃烧设备,为了改善窑内的温度分布,一般是将燃烧容量较小的烧嘴排列得密一些效果较好,另外除了高温所必须外,烧嘴大都采用低压烧嘴。也就是说利用烧嘴口,把在烧嘴中产生的高温燃烧气体调整所需的温度进行燃烧,这样, NO_x 的生成量增加,公害也随之增加。如果从减少 NO_x 量进行考虑,应尽量降低并控制烧嘴的燃烧温度,但由于 NO_x 能加速燃烧气体的速度,提高传热效应,因此就有必要特别设计一种适用于进行烟气循环的高速烧嘴窑炉,关于降低 NO_x 与下面叙述的空气预热温度是矛盾的,解决这个矛盾,是今后研究的课题。

再有一个方法是余热回收,从增加投资费用,窑炉连续运行中的维护检查、材料等问题看来,除了部分高温窑炉外,目前余热回收设备的利用率在窑业界较小,在烧成陶瓷窑方面,因为燃烧气体的流动方向还与陶瓷制品的色泽等有关,因此阻碍了有效进行热交换措施的实现,但仍然应致力于利用热风和控制窑压等来进行热量回收,对于陶瓷窑也应事先掌握有关进行热量回收,有效利用热量的资料。

除此之外,不同种类的窑炉还存在着各种问题,但只要小的问题能解决,节省能源的大问题也就迎刃而解了。

(六)结语

本文以“节约燃料的窑炉和窑炉材料”为题就一些问题加以叙述。拿节省能源来说,产品的生产,应以降低烧成温度为目标,重点着重于原料的选择与配方,控制其颗粒度并根据烧结理论进行烧成。另外,在窑炉结构方面,按被烧制品而选用最适宜的炉材,甚至砌筑方法也要注意节约,其次关于制品的传热方法,对目前的情况良好与否要对燃烧设备和热回收设备进行研究,目前正在研制不同结构的窑炉,从中选择最能节省能源的窑炉。

最后,应当强调的是节省能源,从小处着手,积少成多尤为重要。

严幼良译自《耐火物》27—302 张颂第校

三、关于窑炉的节能问题

(一)前言

最近出版了多种节能文献,这些文献所提出来的建议,是针对如何提高窑炉的热效率而言的,但也是用于生产中窑炉的节能方针,同时也是我们窑炉制造者设计新型窑炉的基础。

解决节能每一个小问题，与节能的大问题关系很大。

(二) 节能措施及其实况

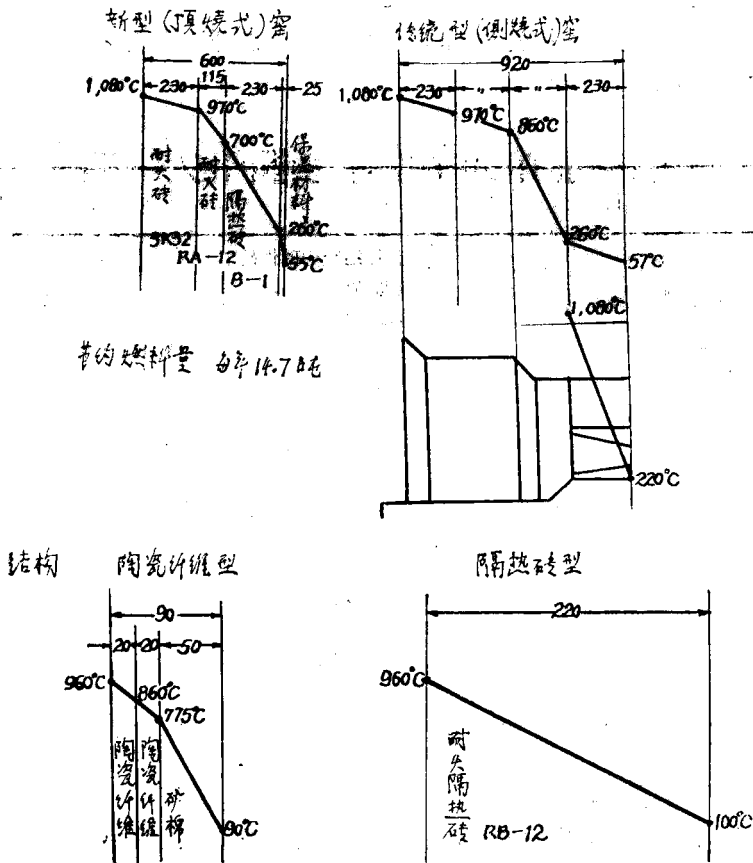
1. 从窑炉操作方面的措施及其主要因素

- 1) 燃料与空气量的合理比例(空燃比)，(O_2 气体分析， CO_2 气体分析)；
- 2) 烧成带及冷却带，是否有多余的外气侵入窑中(O_2 气体分析、 CO_2 气体分析)；
- 3) 制品是否按适宜的烧成速度烧成？(校正温度曲线，急冷效果是否好)；
- 4) 制品是否均匀烧成？(测定上下各处的温度)；
- 5) 油的温度是否适合于燃烧？(测定油的温度，并保温)；
- 6) 空气的温度是否适于燃烧？(测量空气的温度)；
- 7) 采用的烧嘴是否适应于燃烧空气的压力(测定空气压力)；

2. 烧成方法和装窑方法的措施及其主要因素

- 1) 能否缩短烧成时间(燃料几乎与烧成时间成正比)；
- 2) 能否减少窑具比例(装窑方法和减轻窑具重量)；
- 3) 装窑方法要均匀化。

3. 结构及装置方面的措施及其主要因素



降低窑墙的热量损失

- 1) 隔热性与节约燃料(其1)，(连续式窑炉外气15°C，黑度0.85)；

2)隔热性与节约燃料(其2)，(间歇窑外气15℃，黑度0.85)。

4.热回收(依靠热交换装置的示例)

燃料—城市煤气，HU4000千卡/牛顿米³ $\mu = 1.2$

1)排热煤气的温度A = 400℃

2)预热空气温度250℃

3)排煤气量 $t_2 = 5.6\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$

4)排煤气比热CP = 0.34Kcal/Nm³

5)予热空气量4.9Nm³/Nm³

6)空气比热0.32Kcal/Nm³

7)预热空气的显热 $q_r = 4.9 \times 0.32 \times 250 = 392$

∴

$$\frac{HU - A \times CP \times t_2}{HU + q_r - A \times CP \times t_2} = 0.892$$

因此，可节约10.8%的燃料。

5.减少排热损失

1)采用扁形窑拱

2)调节窑车底部的通风

(三)高砂式“底部火焰系统隧道窑”根据幻灯照片和讲师的说明。

热回收实验如表5：

表 5

项	目	记	事
烧成制品		直接结合的碱性砖	
烧成温度		1850℃	
烧成时间		100小时	
生产量(合格率98.7%)		903吨/月 × 98.7% = 890吨/月 = 1.24吨/小时	
装窑砖使用量		130吨/月 = 0.18吨/小时	
出窑窑车数		288台/月 = 9.6台/天	
窑车尺寸		宽1350 × 长800 × 高865毫米	
窑车装载量		坯体3140公斤，窑具450公斤	
重油使用量		215500升/月 = 300升/小时	
重油消耗量		242升/吨	
氧使用量		22664米 ³ /月 = 31.6米 ³ /小时	
氧消耗量		25.4米 ³ /吨	
出窑制品温度		100℃	
用于燃烧2次空气温度		350℃(回收率9.3%)	
排废气温度		340℃	

(四)耐火砖用于隧道窑的实例

1.因为是一种具有特殊结构的窑车，构成的燃烧室必须改变窑车顶上耐火砖的结构形式。

根据设计方法，包括上部结构可达到与传统窑炉相同的重量。

2.以前的侧烧方式，二次空气温度大多数情况只用80~100℃左右。由冷却带容易回收

400~500℃左右的热风。利用这热风改变烧嘴，随之对节约燃料起很大作用。

3.从目前来看，传统的隧道窑，排出废气的热损失和窑墙散热损失约占70~80%。因此降低排出烟气的热损失和降低窑墙的热损失是很必要的。

4.如果改善上述各点，比传统的窑炉，用底部燃烧方式可降低排废气热损失和窑墙热损失20%。利用热风估计降低 $\frac{+15\sim17\%}{35\sim37\%}$ 的燃料费用。

5.特征：

- 1) 窑炉的设计面积是以前侧烧式隧道窑的一半。
- 2) 与以前的窑炉相比，可降低67%的燃料费用。
- 3) 因为在窑侧墙上部只有一个火口，故局部热效应少。
- 4) 因下部燃烧方式，故予热带予热充分。
- 5) 窑内气氛调整非常良好
- 6) 窑内断面处没有上下误差(在1800℃时，约为6℃)。
- 7) 缩短烧成时间，增加生产额。
- 8) 制品出窑温度低。
- 9) 与传统窑比较空燃比小可以燃烧。

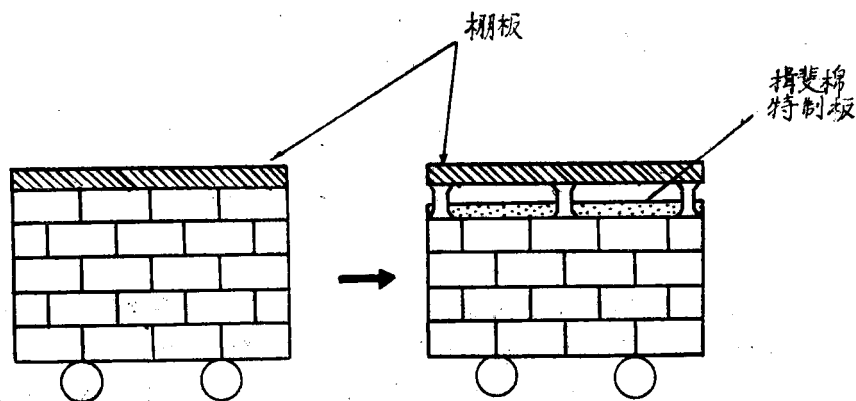
张颂第译自《耐火物》38—382

四、关于隧道窑窑车的节能问题

(一)概要

烧成陶瓷的隧道窑窑车由于采用揖斐川陶瓷棉特制板进行隔热，燃料消耗可降低10~15%。

隧道窑窑车由于保持烧成产品的稳定性，所以用的耐火材料要求制作得非常牢固，而且这个窑车还要承担烧成产品的搬送工作，并与烧成产品一样在10~20小时之间进行升温 and 冷却，窑车本身和烧成制品加热到相同的温度。



传统式窑车

节能式窑车

为此，在窑车顶部衬垫揖斐川陶瓷棉特制板，进行隔热使窑车重量减轻，由于蓄热量、散热量减少，可使燃料消耗大幅度地降低。

(二) 施工概要

将窑车顶铺一层耐火砖，然后再在耐火砖上衬垫一层薄的揖斐川陶瓷棉（以下简称揖斐棉）特制板，然后放置棚板（见上图）。当超过 1200℃ 和风速大的时候，陶瓷棉有飞散的可能性，采用揖斐棉涂料板（专利在申请中）。

由于在整个窑车顶部全部铺上了揖斐棉特制板，故可取得最佳效果，但有时担心烧成制品倒塌请采用旋空支承部件。

(三) 施工特点：

1. 蓄热量降低：窑车顶部采用了揖斐棉，蓄热量变小，提高工作温度，缩短窑车在窑内停留时间，很多优点。工作温度 1200℃ 烧成时间是 20 小时，燃料消耗降低约 8%。

2. 减少散失热量：是这种隔热窑车的特点，约减少 2% 的散热量。

3. 节约窑车的维修费：窑车经常反复升温 and 冷却，窑车顶部的损伤是厉害的。因为揖斐棉比传统的耐火材料耐剥落性好，所以这种窑车使用寿命长。

(四) 烧成温度均匀

以前，因为窑车蓄热量大、散热大，所以一般下部产品烧成不好，但采用衬垫揖斐棉板后，使烧成温度变得均匀。

(五) 实例

窑炉名称：陶瓷烧成隧道窑。

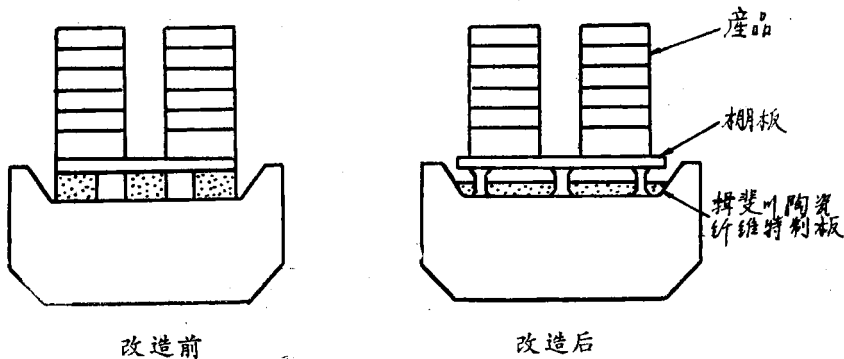
工作温度：1200℃。

燃料：重油 A。

窑炉规格：宽 2 米 × 高 2 米 × 长 25 米。

窑车在窑停留时间：20 小时（窑车面积 1125 × 640 毫米²）。

施工：如下图。



改善的情况：在窑车顶上衬垫揖斐棉特制板进行隔热。由于衬垫这种板，使得窑车下部的制品烧成良好，把烧嘴位置提高 20 厘米以上，而且减少了燃料消耗。

效果：燃料消耗降低 15%（从每天消耗 930 升降到每天消耗 780 升）。窑车的蓄热量减少 8%。窑车的散热量减少 2%。烧成制品支承物重量减轻了 5%。减少制品烧成不合格率。

张颂第译自 日本技术资料 S-005

五、室式窑采用氧化铝纤维节约燃料

(一)室式窑炉的热效率

室式窑在相当宽的范围內，能够调节烧成制度、烧成温度和产品产量等，是使用方便的窑炉，但另一方面，正因使用方便，更加需要提高窑炉的热效率。

实际上当烧成时，排烟气温度高，窑体的蓄热量大，窑墙的散热量大，因此，往往窑的热效率极低。现将室式窑的热平衡计算一例，在表6中给出。从这表可知，产品进行烧成所需要的热量只有9.8%，用于蓄热、排烟气以及其它散热损失合计大约为90.2%。把减少这些热损失放在首位，才能提高窑炉的热效率，是节约燃料的关键措施。

(二)减少热损失的措施

减少热损失的措施，可举出以下主要三方面：1.减少排废气的热损失；2.减少窑墙的散热损失；3.减少窑体的蓄热量。下面根据这些措施加以叙述。

1.减少排废气热损失的措施

正象众所周知的措施，应进行严格燃烧管理，在不影响烧成产品的质量情况下，过剩空气系数应接近于理论值。由于这样做减少了排烟气的量，因此也就减少了排烟气带走的热量。例如，在窑炉温度为1300℃的情况下，将过剩空气系数 m 从1.4减少到1.2，节约燃料的百分率也达到26%。

但是，这种情况下不能忘记，从烧嘴以外的地方吸入窑内的空气量，已超过了预计值。例如：窑门的气隙，窑的砌缝空隙和装窑部分，连接缝，看火孔。如果是窑半式的窑，从窑车下边的空隙吸入空气至窑内。由于堵住缝隙，能够减少相当的空气量。

不使用氧化铝纤维的室式窑的热平衡

表 6

项	目	热 收 入		热 输 出	
		10 ³ 千卡	%	10 ³ 千卡	%
吸 入 热	燃料的燃烧热	3715.3	98.4		
	燃料的显热	1.8	0.0		
	用于燃烧的空气带对热	14.9	0.4		
	窑炉本身所蓄的热	45.6	1.2		
	总 热 收 入	3777.6	100.0		
散 出 热	烧成时所需要的热			370.5	9.8
	对窑体所蓄的热			1000.1	26.5
	燃烧排烟气的显热			1529.6	40.5
	用于辐射传热其它热损失			877.4	23.2
	总 热 输 出				
烧成制品的热效率		10.0%			

2.由窑墙的辐射、传导等热损失的防止措施

近年来，为了提高耐火材料的质量，所以制作隔热性能好的耐火材料，即使高温烧成窑

炉也能建造得重量轻。可是与其相反，拱和窑墙砌筑得薄，在高温时窑墙的表面温度越不能降低，窑炉内温度 1300°C 时，窑墙表面温度变得相当高达到 $80\sim 170^{\circ}\text{C}$ 。

为了防止从窑墙表面散热有以下办法：

在窑墙外是否安装适当厚度的隔热材料，或喷涂在外墙上，降低表面温度，防止散热。

在窑炉内墙上安装适当厚度的隔热材料，减少向窑墙的传热，降低窑墙表面温度，防止散热。

但是，第一种情况时，由于表面保温，故隔热材料里面即原窑墙表面的温度上升相当高，要引起注意。第二种情况，由于减少了传向窑墙的热量，所以降低了窑墙外面的温度。但是窑内隔热材料应选择对窑内温度十分安全可靠的材料。

3. 减少窑体的蓄热量的措施

燃烧的热量在加热产品的同时，对于窑体也进行加热蓄热。如果是连续式窑，蓄热量可以保持不变，但是由于室式窑是不连续的窑炉，所以，为了将烧成产品出窑，必须使之冷却，因此，窑体蓄热量就会全部变成热损失。如果能减少窑体的蓄热量，就等于减少了供给热，其结果也就是减少燃料。

因为窑炉的结构材料重量是一定的，为了减少蓄热量必须降低窑体的温度。为此，在窑内墙表面上有称做隔热材料，必须使传向窑体的热量减少。

(三) 用于高温的隔热材料
隔热材料的品种很多，但对于高温来说，一般采用硅藻土砖。可是，硅藻土砖也是使用温度范围，如果超过了温度范围就产生收缩，而且用于高温的隔热材料比重变大后隔热性能下降，对于高温窑炉来说是存在的问题。

目前采用的含有大量的空气孔的氧化铝质泡沫耐火砖，是具有隔热性能的氧化隔热耐火砖，在市场上销售，在建造窑炉上应用很广。可是这种砖也有比重的范围限制，制作得薄而大，隔热性就不好了。

近年来，陶瓷纤维的研究和生产，不得不改变对高温隔热材料的看法。陶瓷纤维具有优异的耐热、隔热、重量轻等特性。硅酸铝纤维，氧化铝纤维是稳定的材料，一般都能使用。因为这种材料是棉状的东西，可以加工成纸、布、毯、板，还可制作成管、砖等形状，可用于不同的用途。市场上出售的各种陶瓷纤维制品的特性如表7所列。氧化铝纤维也有结晶的和非结晶的。在高温下使用时，非结晶质的氧化铝纤维随着时间的变化而逐渐转化为结晶质的纤维，就容易折断，纤维变成为很细的粉末，因有时会飞散，采取的预防办法是将表面涂一层涂料。但是，使用结晶质的氧化铝纤维就不必担心了。

在本公司的室式窑中，因为窑内温度高达 $1350\sim 1450^{\circ}\text{C}$ ，所以采用了很少劣化的结晶质氧化铝纤维。

(四) 梭式窑施工实例

为了在室式窑内墙上安装氧化铝纤维，其作法是采用柱状螺栓、固定金具等使之固定，以及用砂浆粘贴的办法，砂浆法简单，经过数月后检验结果，没有剥离和劣化，由于粘接牢固所以采用了砂浆粘贴法。

进行施工的室式窑是容积为6立方米的梭式窑，粘贴范围是窑拱、侧墙、窑底总计17平方米。氧化铝纤维使用了 $305\times 305\times 51$ 的大小砌块180块。

在施工上应注意的地方，搞清洁所贴付的墙面，预先削平窑墙表面的凸起物，砂浆预先

陶瓷纤维特性表(各公司产品目录)

表 7

公 司	材 质	耐 火 度 (℃)	纤维直径 (微米)	纤维长度 (毫米)	熔 点 (℃)	比 热 (千卡/ 公斤·℃)	体 比 重	Al ₂ O ₃	SiO ₂	导 热 率 (千卡/米· 小时·度)
T	硅酸铝	1260	2~3	45~100	1760	0.27	0.1~0.13	51.7	47.6	
		1430	2~3	40~100	1930	0.27		63.2	37.2	
I	硅酸铝	1260	23	100	1760	0.26	0.1~0.16	50.1	49.3	0.1(350℃时)
		1400	29	75				60.2	38.7	
	氧化铝	1600	3	40	2000	0.24	0.1~0.15	95.0	5.0	0.23 (1000℃时)
A	依索拉托耐火砖	800~1500					0.5~0.7			0.13 (350℃时)
	铝隔热砖	1800					1.0~1.4	75~98	1.5~2.5	0.65(350℃)

准备好放置在纤维面上，砂浆在纤维平面上的厚度要涂均匀，采用纤维板在窑墙上使它压贴牢固。在施工上如果注意到这几点，就会防止剥离，取得良好的结果。

另外，在角落部分的空隙和异形空隙中，填入按其形状剪切的纤维和切屑等，将散状的纤维填进使之既坚固又耐用。

施工后，先进行干燥，第一次如果慢慢升温到 800℃ 后再升到烧成温度，不必要空烧。

(五)工作效果

在施工后的操作中，与原来的施工前的窑炉操作方法，工作程序有很大变化，下面举出主要的一些情况：

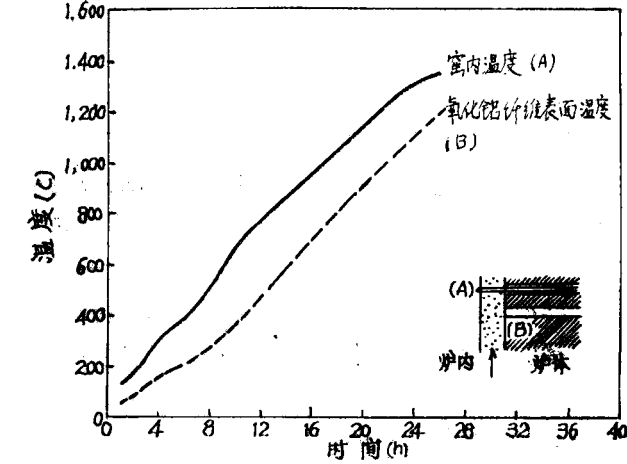


图10 氧化铝纤维表面升温曲线

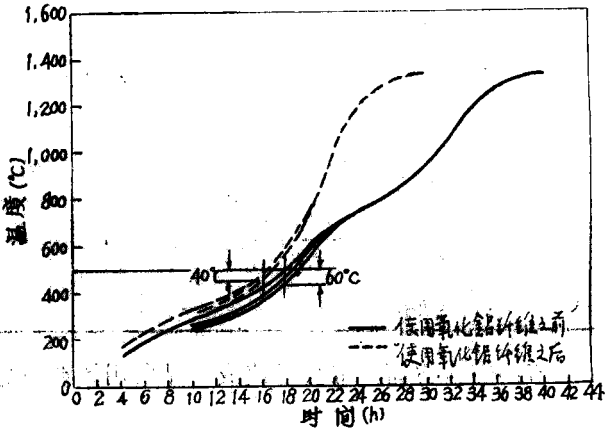


图 9 窑炉内升温曲线

1. 窑内温度上升变得加快；
2. 铺贴陶瓷纤维后，减少了侵入的冷空气；
3. 提高了排烟气温度。

为了保持原来的窑炉操作而提高了排烟气的温度，加大了排烟气热损失，结果燃料没有减少。因此温度上升得快，在对产品没有影响的情况下，就缩短了烧成时间。边调整燃料与空气量，边检验空气中氧气，减小风压后排烟气温度下降，这样需要窑