

陶瓷工业窑炉

刘振群 羊淑子 黄炳钧

中国建筑工程出版社

16

陶 瓷 工 业 窑 炉

刘振群 羊淑子 黄炳钧

中国建筑工程出版社

本书全面介绍了陶瓷工业中常用的各种窑炉——隧道窑、倒焰窑、电热窑炉及其他一些新型窑炉，简单地介绍了窑炉的热工测量和调节。全书以隧道窑为重点，通过一条隧道窑的设计实例，系统地介绍了窑炉的基本结构、工作原理及设计计算。干燥器的工作原理及设计计算与窑炉类同，因此书中也介绍了干燥器的有关知识。

本书可供陶瓷工厂从事窑炉设计和操作的人员参考，也可供高等院校陶瓷专业学员参考。

陶瓷工业窑炉

刘振群 羊淑子 黄炳钧

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米1/32 印张：9 5/16 插页：3 字数：250千字

1978年5月第一版 1978年5月第一次印刷

印数：1—6,000册 定价：0.93元

统一书号：15040·3422

前 言

生产陶瓷的一个很重要的工序是烧成。烧成是在热工设备——窑炉中进行的。一些原料和半成品在烧成之前要在干燥器中经过干燥，或在窑炉中预烧。一个陶瓷工厂热工设备的基建费占全厂生产基建费的25~45%。在烧成过程中，往往由于设备构造和操作的缺点，使前面各个生产过程中（粉碎、配料、成型等）所作的工作全部作废。所以，热工设备在陶瓷工业中是很重要的设备。

我国是创建窑炉最早的国家之一，从西安半坡村遗址的发掘中证明，远在五千多年前，我国劳动人民就用双手建造了升焰式窑烧陶器。二千多年前，长江以南群众又依山倾斜建造了烧柴的龙窑（江苏宜兴，浙江、广东佛山石湾、大埔高坡、潮安枫溪、饶平新丰等地龙窑最多）。稍后又有阶梯窑（福建德化、湖南礼陵等地古老的陶瓷窑）及景德镇蛋形窑，长江以北则有烧柴和烧煤的半倒焰式馒头形窑，在这些窑内烧出了著名的中国瓷器。馒头窑是倒焰窑的前身，倒焰窑就是由升焰窑、半倒焰窑发展而来的。而龙窑则是隧道窑的前身，隧道窑是机械化了的龙窑。这说明我国劳动人民在窑炉建设方面早就作出了卓越的贡献。

解放后在毛主席的无产阶级革命路线指引下，陶瓷工业有了很大的发展，窑炉也日益发展，电热窑炉和倒焰窑普遍了，隧道窑增多了。近几年来，许多单位自力更生，就地取材，土法上马，兴建了很多简易隧道窑，大大减少了投资；有的单位则向机械化、自动化、高温、隔焰方向发展，兴建了快速烧成的截面小的推板隧道窑和辊底隧道窑。同时进行了大量技术革新，提高了产品的产量和质量，降低了燃料消耗，降低了成本，使窑炉技术水平前进了一大步。

本书原是我校 1970 年为学生讲窑炉课编写的参考资料，在 1975 年由广东省轻工业局陶瓷公司组织省内几个陶瓷产区的工人和技术人员加以审查，作了多次修改而成。为便于读者自学，书中尽量避免繁杂的公式推导，并以一条隧道窑为例，讨论了炉窑的基本结构、工作原理及设计计算，目的是使读者掌握使用窑炉、改造窑炉和设计窑炉的基本原理。

窑炉就其外形和操作来分，有间歇式倒焰窑及连续式隧道窑；就热源来分，有使用燃料的火焰窑（烧煤、煤气或重油等）及电热窑炉；就火焰是否与产品接触来分有明焰窑及隔焰窑（马弗窑）。但必须指出：任何窑炉的构造原理、设计计算和操作控制都是相似的，它们均包括三个部分：操作室、燃烧设备（或电热设备），以及通风设备。故书中介绍的隧道窑的设计原则及基本的计算方法与步骤对其他窑炉同样都是适用的。

干燥器的工作原理与设计计算与窑炉有许多类似之处，故书中也同时介绍了干燥器的有关内容，供参考。

目 录

第一章 隧道窑的结构	1
第一节 概述	1
第二节 隧道窑的结构特性	3
第三节 隧道窑的发展	40
第二章 隧道窑的工作原理	48
第一节 气体力学	48
第二节 燃料燃烧	79
第三节 窑内传热	109
第四节 隧道窑的操作原理	136
第三章 隧道窑的设计和计算	138
第一节 总体设计	138
第二节 窑体材料及厚度的确定	144
第三节 燃料燃烧及燃烧设备的计算	146
第四节 管道计算、阻力计算和风机选型	162
第五节 其他	167
第四章 倒焰窑	168
第一节 概述	168
第二节 倒焰窑结构特性	171
第三节 倒焰窑的工作原理	176
第四节 倒焰窑设计计算	179
第五节 旋风倒焰窑	190
第六节 近代间歇窑的改进	193
第五章 电阻炉及其它电热窑炉	196
第一节 概述	196
第二节 电阻炉的分类	198
第三节 电热元件的特性	203
第四节 电热元件的单位表面功率	215

第五节	电阻炉功率的确定	219
第六节	电热元件尺寸的计算	222
第七节	电阻炉的功率调节	229
第八节	电阻炉的安装与使用	234
第九节	其它电热窑炉简介	241
第六章	干燥	251
第一节	概述	251
第二节	水蒸气-空气混合物的性质	254
第三节	干燥水分及所需空气量的计算	257
第四节	干燥器类型和设计计算	259
第七章	窑炉热工测量和调节	267
第一节	温度测量和调节	267
第二节	压强测量和调节	273
第三节	流速、流量测量和调节	275
第四节	烟气分析方法	279
附表1~7	283

第一章 隧道窑的结构

第一节 概 述

隧道窑是陶瓷工业中较现代化的窑炉。它具有产量高，质量好，燃料消耗少，操作过程可机械化、自动化，劳动条件好，连续操作时间长等优点，在我国正得到越来越广泛的应用。

隧道窑与铁路山洞的隧道相似，内有轨道和彼此相连的装满坯体的窑车，由于推车器的推动，窑车在隧道内迎着气流连续地或间歇地移动。干燥至一定水分的坯体进入窑内，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。坯体在烧成带被火焰及燃烧产物加热到一定的温度而烧成。烧成的制品进入冷却带，将热量传给入窑的冷空气，而制品本身被冷却、出窑。被加热的空气部分作为助燃空气，部分抽去供干燥坯体或作其他之用。图1-1为隧道窑的工作系统图。

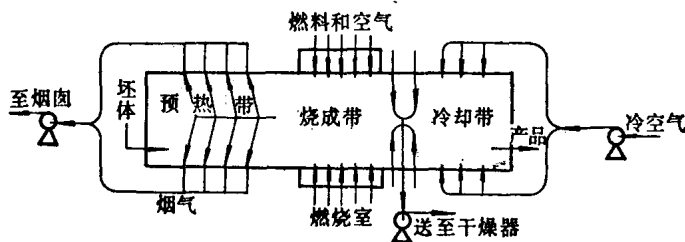


图 1-1 隧道窑的工作系统

不论是简单的隧道窑，还是较先进的隧道窑，都可划分为三带：预热带、烧成带和冷却带。必须注意，这里的预热、烧成、冷却是指制品，而不是指气体，因为气体的加热和冷却是恰恰相反的。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，前后各为预热带及冷却带。但是，考虑到陶瓷坯体的物化反应，900°C以下设置燃烧室的地段，仍称为预热带。

象任何一种火焰窑炉一样，隧道窑包括三部分：窑体（操作室），燃烧设备及通风设备。

窑体是由窑墙、窑顶、窑底围成的操作室，在隧道窑中就是隧道，隧道底是指窑车耐火材料平面。在操作室里，燃料燃烧的产物将热传给坯体，使其煨烧成产品。

燃烧设备包括燃烧室（又称火箱）和喷嘴，在这里进行燃料的燃烧，燃烧产物与火焰进入操作室，将所带的热量传给坯体，使坯体烧成。

通风设备包括送风系统、排烟系统以及各种气体循环和气幕装置。它们是由鼓风机、排烟机、烟囱及各种管道组成的。通风设备的作用是：使窑内的气体按照一定的方向流动；供给燃料燃烧所需的空气；排除烟气；并维持窑内一定的压力制度、气氛制度，以利烧成。

此外，隧道窑尚有检查坑道、窑车、推车器，钢架结构等。

隧道窑的窑体砌筑在坚固的钢筋混凝土基础上，窑车、车上制品及匣钵的重量也由这个基础来承受，基础应能长期保持轨道严格水平和窑体位置正确。

隧道窑是连续性窑炉，它的停窑大修常常是由于材料的损坏。因此，必须很好的选择窑体的砌筑材料，既要满足窑体对材料的要求，又要经济合算。一般窑墙、窑顶内衬用耐火材料，外壁用红砖，中间则砌以保温隔热的轻质耐火材料。在窑墙、窑顶上，每隔3~10米留一热胀缝，窑的基础部分在三带交接处也设热胀缝。在温度曲线的转折点及需要的地方，设有测温、测压孔及看火孔，车下部位也应设测温、测压孔。

为使窑车上部操作室与窑车下部及坑道分开，以使操作室密闭，常采用砂封的办法。砂封是由窑车侧面的裙板、窑墙内侧的砂封槽、砂子、加砂孔构成。

隧道窑由于它的结构特点，可以利用烟气来预热坯体，使废气排除的温度只在 250°C 左右；又能够利用制品冷却时放出的热来预热空气，同时使出窑制品的温度仅 80°C 左右；且为连续性窑炉，窑墙、窑顶的温度基本不变，只有散热损失，无积热损失。因此，在所有的窑炉中它的热耗最低。

由于采用气体、液体燃料（或机械加煤），隧道窑能够机械化、自动化操作，且装出车在窑外室温的情况下进行，并能实现机械化，因此，大大改善了工人的劳动条件，并有利于产量、质量的提高。

随着工业的发展，目前国内外都出现了多种较先进的窑炉，如隔焰窑（马弗窑），火焰不与制品接触，且坯体不需装钵；半隔焰窑，火焰及燃烧产物部分进入窑内，但不直接冲击制品，坯体也不需装钵；可与前后工序连成自动线的烧制小件制品的多通道隧道窑；辊底窑；传送带式窑；以及各种升温快、热耗低、易自动化的电热隧道窑；等等。

第二节 隧道窑的结构特性

一、窑体

窑体即为操作室，是由窑墙、窑顶和窑底围成的。在隧道窑中没有固定的窑底，它的窑底是由活动的窑车组成的。窑车下部的检查坑道也可视为窑体的一部分。

1. 窑墙

窑墙的作用：（1）与窑顶一起，将操作空间与外界分隔。在操作室内，燃烧产物与坯体进行热交换。因此，窑墙必然要承受高温的作用。（2）窑墙要支撑窑顶，承受一定的重量。（3）隧道窑是连续性窑炉，窑各带温度稳定，窑墙没有因温度的升高或降低而积蓄损失的热量。但窑墙内壁接触热气体，其温度等于制品的温度，而外壁接触大气，温度远比内壁温度低，因此，有热量自内壁通过窑墙向外散失。

因此，窑墙应具备三个条件：（1）能耐高温；（2）具有一定的强度；（3）保温，使向外散失的热量小。

要耐高温，内壁必须用耐火材料砌筑。所用材料的种类则由产品煅烧的温度决定。一般 1300°C 以下用耐火粘土砖，1300~1600°C 用高铝砖，1600°C 以上用镁砖、镁铝砖或刚玉砖。耐火材料厚度在 65~460 毫米之间，视温度及材料而定。

为具有一定的机械强度，又节省材料，外壁多为建筑红砖，其厚度在 120~500 毫米之间（当外壁为钢壳结构时，则不砌红砖）。

为减少窑墙散热，又不使窑墙太厚，占地太多，则中间砌以轻质隔热材料，如轻质粘土砖，轻质硅砖，硅藻土砖等等，厚度在 0~470 毫米之间。

因此，一条窑各段的各层材料种类和厚度是根据该段的温度来决定的。但必须注意：

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

（3）各种砖的规格一般是：耐火砖及轻质砖：长 230 毫米，宽 113 毫米，高 65 毫米；红砖：长 240 毫米，宽 120 毫米，高 53 毫米。

（4）灰缝越小，窑墙使用寿命越长。郑州某厂耐火砖灰缝 1 毫米，十多年来窑未大修过。因此，在砌筑技术可能的情况下，灰缝越小越好。一般耐火砖及轻质砖灰缝 2~5 毫米，红砖 8~10 毫米。

确定了窑墙的材料及厚度，决定了窑的结构后，可进行窑墙所需材料的概算。即分段求出该种砖的体积，由表 1-1 查出砌 1 米³窑墙所需砖材的重量或砖数，则该种砖的用量可以求得。

砌 1 米³ 窑 墙 所 需 材 料 表 1-1

砌 体 部 位	用红砖砌		用硅藻土砖砌		用轻砖砌		用高铝砖		用镁砖		用耐火粘土砖			用硅砖			
	红 砖 (块/%)	浆 (米³)	硅 藻 土 砖 (块/%)	硅 藻 土 粉 (公 斤)	硅 藻 土 耐 火 泥 (公 斤)	轻 砖 (吨/%)	高 铝 砖 (吨/%)	高 铝 耐 火 泥 (公 斤)	镁 砖 (吨/%)	镁 质 耐 火 泥 (公 斤)	灰 缝 厚 度 (毫 米)	粘 土 耐 火 泥 (公 斤)	粘 土 耐 火 泥 (公 斤)	灰 缝 厚 度 (毫 米)	硅 砖 (吨/%)	硅 质 耐 火 泥 (公 斤)	
																	砂
直 墙 及 底	560/3.5	0.28	528/2	147	63	0.951/2	190	2.304/3	180	2.711/1.5	140	1	2.112/3	150	1	1.911/3	150
圆 弧 状 砌 体	627/4.5	0.3	595/2	147	63	0.955/3	190	2.34/4.5	170	2.71/1.5	140	1	2.075/3.5	150	1	1.877/3.5	150
球 形 顶								2.524/9	170	2.71/1.5	140	1	2.147/6.5	150	1	1.934/7	150
												2	2.047/3.5	150	2	1.851/3.5	150
												2	2.136/6.5	150	2	1.942/7	150

注：分子数为材料用量，包括损耗在内；分母为材料损耗百分数。

例 1-1 某隧道窑，预热带750~970°C处之窑墙长 5.1 米，高1.5米，内衬为 I 级粘土砖，厚230毫米，灰缝 2 毫米，中间为轻质粘土砖，厚348毫米，外层为红砖，厚380毫米，试对砌筑该段所需之各种砖、耐火泥及砂浆量进行概算。

解 (1) 两侧耐火粘土砖的体积为：

$$2 \times \text{该段长} \times \text{墙高} \times \text{该种砖墙厚} = 2 \times 5.1 \times 1.5 \times 0.23 \\ = 3.52 \text{ 米}^3$$

查表 1-1，当灰缝为 2 毫米时，用耐火粘土砖每砌 1 米³直墙需 2.06 吨，且需耐火泥 150 公斤。

所以该段需粘土砖： $3.52 \times 2.06 = 7.30$ 吨

$$\text{需耐火泥：} 3.52 \times 150 = 528 \text{ 公斤}$$

(2) 两侧轻质粘土砖体积为：

$$2 \times 5.1 \times 1.5 \times 0.348 = 5.33 \text{ 米}^3$$

查表 1-1，用轻质粘土砖每砌 1 米³直墙需 0.951 吨，且需耐火泥 195 公斤。

所以该段需轻质粘土砖： $5.33 \times 0.951 = 5.07$ 吨

$$\text{需耐火泥：} 5.33 \times 190 = 1012 \text{ 公斤}$$

(3) 两侧红砖体积为：

$$2 \times 5.1 \times 1.5 \times 0.380 = 5.82 \text{ 米}^3$$

查表 1-1，用红砖每砌 1 米³直墙需 560 块，且需砂浆 0.28 米³。

所以该段需红砖： $5.82 \times 560 = 3260$ 块

$$\text{需砂浆：} 5.82 \times 0.28 = 1.63 \text{ 米}^3$$

2. 窑顶

窑顶的作用与窑墙相似，但窑顶支撑在窑墙上，且在较为恶劣的条件下操作。因此，除了必须耐高温，积散热小及具有一定的机械强度外，窑顶还必须具备：

- (1) 结构好，不漏气，不倒塌；
- (2) 重量小，减轻窑墙负荷；
- (3) 横推力小，少用钢材；
- (4) 尽量减少窑内气体分层。

一般的窑炉都采用拱形的顶，拱顶严密，砖形简单，坚固耐用，节约钢材。拱顶结构参考图1-2，示意图参考图1-3。

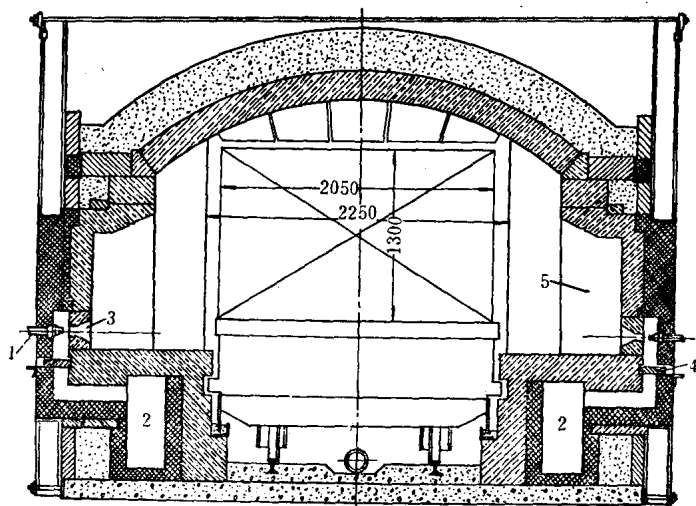


图 1-2 隧道窑截面图

1—烧嘴；2—热空气通道；3—烧嘴砖；4—闸板；5—燃烧室

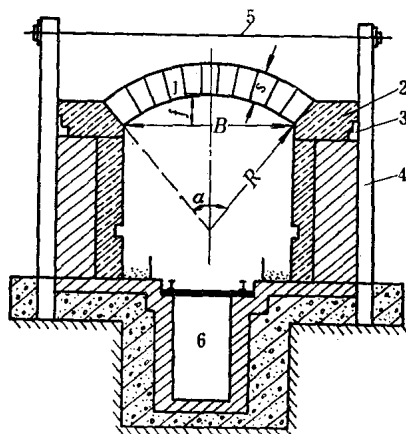


图 1-3 隧道窑截面示意图

1—拱顶；2—拱脚；3—横梁；4—立柱；5—拉杆；6—检查坑；
 R —拱半径； B —跨度； α —拱心角； s —拱厚； f —拱高

拱顶由楔形砖加平行砖砌成。拱顶通过拱脚砖支撑在两侧窑顶上，拱顶的横推力靠横梁传给立柱。横梁是在拱脚处沿窑长度方向水平安置的槽钢、角钢、或钢筋混凝土长杆。立柱是紧靠窑墙两侧直立的工字钢、槽钢或钢筋混凝土柱，立柱下端埋在基础内，上端用拉杆拉紧，拉杆上有松紧螺丝。当开窑点火，温度上升，拱顶略有膨胀时，逐渐调节放松，不使拱顶压坏。

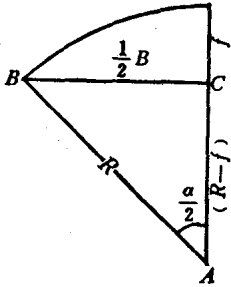


图 1-4

常用拱高 f 与跨度 B (窑内宽) 的关系来说明拱的情况:

$$\text{半圆拱: } f = \frac{1}{2} B$$

$$\text{标准拱: } f = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{7} \right) B$$

$$\text{倾斜拱: } f = \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) B$$

$$\text{平拱: } f = 0$$

要选用拱顶楔形砖，计算窑顶散热，计算拱顶横推力及窑的钢架结构，都必须先知道拱半径 R 及拱心角 α 。在实际生产中为了直接选用标准楔形砖及拱脚砖，而不需设计计算，常常用 60° 拱及 90° 拱，即拱心角 $\alpha = 60^\circ$ 或 90° 。根据拱高与跨度的大小，可用三角形法则求出 R 及 α 。参考图1-4，在 $\triangle ABC$ 中：

$$R^2 = (R - f)^2 + \left(\frac{1}{2} B \right)^2$$

$$R^2 = R^2 - 2Rf + f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2$$

因此
$$R = \frac{1}{2f} \left[f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right] \quad (1-1)$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{B}{2}}{R} = \frac{\frac{B}{2}}{\frac{1}{2f} \left[f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right]} = \frac{f \cdot B}{f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2}$$

$$(1-2)$$

如果拱心角 $\alpha = 60^\circ$ ，由上式可算出 $f = 0.134 B$

跨度 B 及拱高 f 是先设计好的，利用公式 (1-1)、(1-2)，即可求出 R 及 α 。

当窑的一些具体尺寸 B 、 f 、 R 、 α 确定后，可进行窑顶所需材料及楔形砖尺寸的计算。参考图 1-5，以一砖厚为例：若砌一圈拱顶用 n 块楔形砖，每块砖的内宽（下宽）为 b ，外宽（上宽）为 a ，灰缝 c ，拱厚 s ，则外弧长：

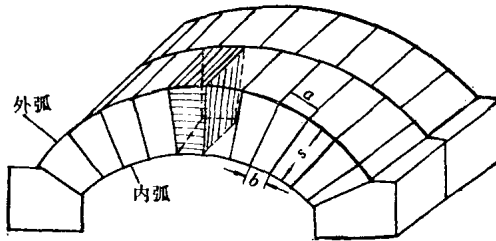


图 1-5 用楔形砖砌拱顶

$$n(a+c) = 2\pi(R+s) \frac{\alpha}{360} \quad (1-3)$$

内弧长：

$$n(b+c) = 2\pi R \frac{\alpha}{360} \quad (1-4)$$

两式相除，得：

$$\frac{n(a+c)}{n(b+c)} = \frac{2\pi(R+s) \frac{\alpha}{360}}{2\pi R \frac{\alpha}{360}}$$

$$\text{即：} \quad \frac{a+c}{b+c} = \frac{R+s}{R} \quad (1-5)$$

在公式 (1-5) 中， s 是已知的，灰缝 c 是根据要求定出的， R 已由公式 (1-1) 求出，则 a 、 b 与 R 、 s 的关系可求。可据此选用标准拱形砖，或自行设计楔形砖。

又由公式(1-4)可得:

$$n = \frac{2\pi R\alpha}{(b+c) \cdot 360} \quad (1-6)$$

则每圈用砖块数可求。

例 1-2 某隧道窑长63米, 内宽0.8米, 拱高0.107米, 其拱顶内层为耐火粘土砖, 厚230毫米, 灰缝2毫米, 求粘土拱砖尺寸及用砖块数。

解 由公式(1-1)计算拱半径 R :

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{2f} \left[f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right] \\ &= \frac{1}{2 \times 0.107} \left[0.107^2 + \left(\frac{0.8}{2} \right)^2 \right] = 0.8 \text{米} \end{aligned}$$

由公式(1-2)计算拱心角 α :

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{f \cdot B}{f^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2} = \frac{0.107 \times 0.8}{0.107^2 + \left(\frac{0.8}{2} \right)^2} = 0.5$$

查反三角函数表, 得 $\frac{\alpha}{2} = 30^\circ$, 即 $\alpha = 60^\circ$

代入公式(1-5), 得:

$$\frac{R+s}{R} = \frac{0.8+0.23}{0.8} = 1.29$$

拱顶楔形砖应尽量选用标准型, 不用自己设计, 节省投资费用, 维修方便。查《筑炉工手册》^①表2-63, 选用T-18型厚楔形砖, 尺寸为: 230×113×75×55毫米(图1-6)。

即 $a = 75$ 毫米, $b = 55$ 毫米, $c = 2$ 毫米

则 $\frac{a+c}{b+c} = \frac{75+2}{55+2} = 1.35$

与 $\frac{R+s}{R}$ 相近, 认为可以(实际砌时应加平行砖)。

砌窑顶一圈所用的砖数, 由公式(1-6)计算:

$$n = \frac{2\pi R\alpha}{(b+c) \cdot 360} = \frac{2 \times 3.14 \times 0.8 \times 60}{(0.055 + 0.002) \times 360} = 14.7 \text{块}$$

①《筑炉工手册》冶金部《筑炉工手册》编写组, 中国工业出版社, 1970年。