

无机非金属材料 工业窑炉

张美杰 程玉保 编著

WUJI FEIJINSHU CAILIAO GONGYE YAOLU



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

无机非金属材料工业窑炉

张美杰 程玉保 编著

北 京
冶金工业出版社
2008

内 容 提 要

本书较全面系统地介绍了无机非金属材料专业各种主要工业窑炉的工作原理、基本结构、热工制度及设计计算等相关知识,以达到正确设计、合理操作和制备优质产品的目的。同时,还尽可能反映目前国内外有关窑炉的新技术、新成果及其发展趋势。

本书既可作为高等院校无机非金属材料或硅酸盐专业教材,又可供从事相关专业的工程技术人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料工业窑炉/张美杰,程玉保编著. —北京:
冶金工业出版社, 2008. 4
ISBN 978-7-5024-4522-5

I. 无… II. ①张… ②程… III. 无机材料: 非金属材料—工业炉窑—基本知识 IV. TK175

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 053179 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 朱华英 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4522-5

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 4 月第 1 版, 2008 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.25 印张; 217 千字; 168 页; 1-3000 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

能源危机和自然环境的日益恶化已引起全世界的关注,作为能源消耗的大户——工业窑炉,作为无机非金属材料工业的核心设备之一,常被比喻为无机非金属材料工厂的“心脏”,其主要技术经济指标及热效率已成为热工工作者研究的热点。新材料、新设备的出现促进了工业窑炉的改革,环保节能型窑炉逐渐推广与应用。我国自改革开放以来,无机非金属材料工业窑炉技术也取得了长足进步,自行设计、建造的各类工业窑炉,其主要技术经济指标,有不少已达到或接近世界先进水平;窑炉种类也较齐全。

本书是作者在总结长期从事无机非金属材料工业窑炉设计与改造、无机非金属材料专业“热工基础”及“窑炉学”教学经验,并在参考了国内外相关文献的基础上,为适应无机非金属材料工业科学技术的发展和工程技术人才培养的需要而编写的,内容覆盖本专业的各种窑炉,包括用于水泥及原料煅烧的竖窑、回转窑,陶瓷及耐火材料行业广泛应用的隧道窑,几种应用广泛的间歇式窑炉,原料轻烧炉,玻璃工业用的玻璃池窑及坩埚窑,电阻炉及电热炉,此外还介绍了微波烧结炉及太阳炉等。

在编写过程中,本书考虑到各种工业窑炉的共性与内涵:焙烧过程的工艺过程特点与热工过程特点,热平衡计算,筑炉材料,窑炉的砌筑与烘烤,燃烧设备及热工设备的自动控制等,并根据实际生产要求,较全面系统地介绍了本专业各种工业窑炉的工作原理、基本结构、热工制度及设计计算等,旨在使读者能够正确设计、合理操作,从而制备出优质产品,因此,其实用性强。同时,本书尽可能反映目前国

内外有关窑炉的新技术、新成果及其发展趋势。

节约能源是我国的基本国策之一，而窑炉又是能源消耗大户，本书十分重视国内外热工工作者为此所做的各种贡献与创新。书中既注意介绍有关理论，又注重各种卓有成效的节能措施。这对于降低能耗，尤其是合理燃烧，提高窑炉的热效率，降低成本，改善操作环境等无疑都是十分有益的。

本书既可作为四年制本科无机非金属材料或硅酸盐专业教材，又可供相关专业工程技术人员及研究生参考。

本书的出版得到了武汉科技大学材料与冶金学院的大力支持，在文字录入及图片处理过程中，武汉科技大学无机非金属材料专业薛海涛硕士生、黄奥博士生等做了大量工作，谨向所有帮助过本书出版的校院领导、老师及研究生表示感谢。

由于编者水平所限，书中不妥之处，敬请读者不吝指正。

编 者

2008年2月

目 录

1 概述	1
1.1 热工过程的特点	1
1.2 窑炉分类	2
1.3 筑炉材料、窑炉砌筑与烘烤	4
1.4 热工测量装置	5
1.5 热工窑炉的自动控制	5
2 竖窑	6
2.1 结构	6
2.1.1 窑体形状	7
2.1.2 内径与高度	8
2.1.3 窑体砌筑材料	9
2.1.4 布料装置	11
2.1.5 出料装置	12
2.1.6 密封装置	14
2.1.7 通风与排烟装置	16
2.2 工作原理	16
2.2.1 窑内物料运动	16
2.2.2 窑内气流运动	17
2.2.3 窑内燃料燃烧	19
2.2.4 窑内热交换	21
2.3 热工计算	21
2.3.1 确定窑容积及主要尺寸	21
2.3.2 燃料消耗量的确定	22
2.3.3 计算风量与风压	23
2.4 高温竖窑	24
2.4.1 结构特点	26
2.4.2 燃料及燃烧方式	26
2.4.3 严格控制空气过剩系数	27

2.4.4 严格操作制度	27
2.4.5 良好的轻烧工艺条件	27
2.5 并流蓄热式竖窑	28
2.5.1 并流蓄热式竖窑的发展	28
2.5.2 并流蓄热式竖窑的优点	29
2.5.3 并流蓄热式竖窑的操作原理与结构	29
2.5.4 并流蓄热式石灰石竖窑的热工特性	30
2.5.5 并流蓄热式竖窑的自动化控制	30
2.5.6 并流蓄热式石灰竖窑衬用耐火材料	31
3 回转窑	32
3.1 回转窑结构	33
3.1.1 筒体	33
3.1.2 支撑与传动装置	34
3.1.3 窑口及密封装置	35
3.2 生料预热装置	37
3.2.1 炉算式加热机	37
3.2.2 悬浮预热器	39
3.3 熟料冷却装置	40
3.3.1 筒式冷却机	40
3.3.2 算式冷却机	42
3.4 窑内燃料燃烧	43
3.4.1 对煤质的要求	43
3.4.2 煤粉的制备	43
3.4.3 煤粉燃烧过程	44
3.4.4 窑内火焰长度及位置	46
3.5 窑内物料与气体流动	47
3.5.1 物料运动	47
3.5.2 气体运动	49
3.6 窑内热交换	50
3.7 窑外分解技术	51
3.7.1 工艺流程	52
3.7.2 分解炉的类型与结构	52
3.8 回转窑选型计算	55
3.8.1 回转窑规格的计算	55

3.8.2 燃料消耗量的确定	55
4 隧道窑	57
4.1 隧道窑结构	59
4.1.1 断面尺寸和长度	59
4.1.2 窑顶结构	61
4.1.3 窑墙结构	64
4.1.4 各带结构及装置	65
4.1.5 窑车和窑体的密封结构	69
4.2 隧道窑的温度制度	70
4.2.1 制定合理的温度制度	70
4.2.2 预热带温差形成的原因	72
4.2.3 减小预热带上下温差的措施	72
4.3 隧道窑压力制度	74
4.3.1 窑内压力制度的形成	74
4.3.2 压力制度对温度制度的影响	75
4.3.3 压力制度的调整	75
4.4 隧道窑的码垛原理	76
4.4.1 码垛的稳定性	76
4.4.2 砖垛阻力	77
4.4.3 砖垛通道当量直径对气体流速和流量的影响	78
4.4.4 砖垛通道当量直径对传热的影响	79
4.4.5 码垛的技术操作	80
4.5 隧道窑的热平衡	82
4.5.1 预热带、烧成带热平衡	82
4.5.2 冷却带热平衡计算	85
4.5.3 全窑热平衡及热效率	86
4.6 高温隧道窑	88
4.7 其他类型隧道窑	91
4.7.1 顶燃式隧道窑	91
4.7.2 隔焰式及半隔焰式隧道窑	93
4.7.3 非窑车式隧道窑	95
4.7.4 多通道隧道窑	98
5 间歇式窑	100
5.1 倒焰窑	100

· VI · 目 录

5.1.1	倒焰窑结构	100
5.1.2	倒焰窑工作原理	105
5.1.3	倒焰窑的节能途径	107
5.1.4	设计简介	108
5.1.5	高温倒焰窑	110
5.2	梭式窑	112
5.2.1	结构	112
5.2.2	燃烧技术	114
5.2.3	控制技术	115
5.3	钟罩窑	116
5.4	蒸笼窑	116
6	原料轻烧炉	118
6.1	多层炉	118
6.2	沸腾炉	119
6.3	悬浮炉	120
7	玻璃工业窑	122
7.1	玻璃的熔制过程	122
7.1.1	硅酸盐形成阶段	122
7.1.2	玻璃液形成阶段	122
7.1.3	玻璃液澄清阶段	123
7.1.4	玻璃液均化阶段	123
7.1.5	玻璃液冷却阶段	123
7.2	玻璃池窑	123
7.2.1	玻璃池窑的分类	123
7.2.2	玻璃池窑结构	125
7.2.3	玻璃池窑的工作原理	129
7.3	坩埚窑	133
7.3.1	坩埚窑的分类	133
7.3.2	坩埚窑的构造	134
8	电阻炉及电热炉	137
8.1	电阻发热元件	138
8.1.1	钼	139

8.1.2 钨	139
8.1.3 铂	140
8.1.4 镍铬合金	140
8.1.5 铁铬铝合金	141
8.1.6 硅碳棒	141
8.1.7 二硅化钼	142
8.1.8 石墨	143
8.1.9 碳	144
8.2 电阻炉的设计计算	144
8.2.1 设计计算内容	144
8.2.2 电阻炉功率的确定	144
8.3 电阻炉的安装与使用	146
8.3.1 一般要求	146
8.3.2 电阻发热元件的安装	147
8.3.3 电阻炉的使用	148
8.4 电阻炉的调节	151
8.4.1 供电电路	151
8.4.2 功率调节	151
8.4.3 电阻炉内温度的控制调节	153
8.5 电磁感应炉	153
8.5.1 电磁感应的加热原理	154
8.5.2 感应炉的电源设备	155
8.6 电弧炉和弧像炉	155
8.6.1 电弧炉	155
8.6.2 弧像炉	157
8.7 电子束炉	159
8.8 等离子炉	160
8.8.1 产生等离子体装置的工作原理	161
8.8.2 等离子体炉的应用	162
8.9 微波烧结炉	163
8.10 太阳炉	164
思考题	166
习 题	167
参考文献	168

1 概 述

所有无机非金属材料几乎都要经过高温制备而成。而产生高温就需要热量。产生热量、利用热量的设备称作热工设备。热工设备的主要代表就是窑炉。本书所涉及的热工设备就是在无机非金属材料领域内所使用的主要热工设备。

那么,什么是窑炉呢?窑炉实际上就是指这样一些结构空间,它能够用加热的方法,按照工艺所要求的焙烧制度,使原料(生料)或坯体(半成品)经过一系列的物理化学变化变成产品(熟料或制品)。目前,加热的热量主要来自燃料燃烧所产生的热能或用电能所产生的热能。热工设备(窑炉)的先进性主要体现在:在保证稳定的产品质量及产量的前提下,要具有最大的热效率,即最低的单位产品热量消耗(简称热耗)和电能消耗(简称电耗)。所以,从事无机非金属材料专业的本科生和科技工作者,必须掌握有关热工设备(窑炉)的结构、工作原理、热工制度的调整等相关知识,以达到正确设计、合理操作和制备优质产品的目的。

各种类型的无机非金属材料热工窑炉,尽管其具体产品种类不同,而且在结构、流程等诸多方面也存在很大差异,但它们都是热工设备,都具备下列共性与内涵:焙烧过程的工艺过程特点与热工过程特点,热平衡计算,筑炉材料,窑炉的砌筑与烘烤,燃烧设备及热工设备的自动控制等。

1.1 热工过程的特点

无机非金属材料工艺过程的特点之一就是,不管使用哪一种焙烧方法,使原料(生料)或坯体(半成品)变成产品(熟料或制品),大体上都要经历预热、焙烧和冷却这三个阶段(过程),只是具体的产品在这三个阶段中的具体细节有所不同。而热工窑炉必须在其结构和焙烧制度上来满足这些要求。这样,就有两种类型的热工窑炉可供选择:一类是在同一设备结构空间内,在不同时间来满足不同阶段的工艺要求,这类窑炉称为间歇式热工窑炉,也就是要一炉一炉的焙烧产品。另一类是在其结构空间内的不同区域来满足不同阶段的工艺要求,即原料(生料)或坯体(半成品)在这类热工窑炉内经过预热区、焙烧区和冷却区后成为产品(熟料或制品)。这类热工设备的每一点,其热工参数(如温度、压力、气氛等)基本上是稳定不变的。这类窑炉称为连续式热工窑炉。另外,还有些热工窑炉介于上述二者之间,称为半连续式热工窑炉。

间歇式热工窑炉是传统的热工窑炉,其优点是结构较简单、建造成本相对较低、机动性较强,适合于多品种、产量不大的产品,或用于实验室;其缺点是余热得不到充分利用,窑炉的热效率较低,劳动强度大,难以实现机械化和自动化,产品质量受人为因素影响较大,因而传统的间歇式热工窑炉目前已逐渐被淘汰。

连续式热工窑炉由于其烟气和产品的余热可以被有效地利用,其热效率较高,容易实现自动化与机械化,因而生产成本相对较低,且产品质量优良而稳定,工人的劳动强度较小等,因而目前无机非金属材料工业领域广泛采用这类热工窑炉进行生产。本章将重点介绍这类热工窑炉。至于半连续式热工窑炉,其缺点类似于间歇式热工窑炉,因而在现代工业规模生产中也基本上被淘汰。

1.2 窑炉分类

无机非金属材料工业大致包括耐火材料水泥、玻璃、陶瓷、建筑材料(砖、瓦等)、搪瓷、磨料等行业。这些行业所用的热工窑炉分类方法很多,如既可按上述行业来分,也可按其用途来分(如焙烧什么产品,就称为什么窑炉),也可按焙烧温度来分等。在这些分类方法中,有些窑炉为某些行业专用(如玻璃行业用的池窑、坩埚窑等),有些窑炉则为多个行业所共用,如隧道窑就广泛应用于陶瓷、耐火材料、建筑材料等行业。以下主要就上述有关行业所用窑炉作一简介。

耐火材料工业所用热工窑炉种类较多。大致可分为三大类:一类为原料煅烧窑炉,如竖窑和回转窑;第二类是制品烧成窑炉,如隧道窑、倒焰窑、梭式窑等;第三类是原料(一般为高纯原料)轻烧窑炉,如多层炉、沸腾炉、悬浮轻烧炉等。此外,煅烧活性石灰用的回转窑、双梁竖窑等也属轻烧窑炉。当然,也还有一些不烧制品用的烘烤设备。

水泥工业主要热工窑炉为回转窑和立窑。传统的回转窑又有湿法、干法及半干法之分。随着科技的进步,以悬浮预热和窑外分解技术为核心的新型干法水泥回转窑系统已经取代了传统的回转窑,在水泥生产中取得了优势地位。而立窑在水泥工业中虽不属先进的热工设备,但目前国内仍大量存在,故也应有所了解。

玻璃工业热工窑炉主要是池窑和坩埚窑。目前,坩埚窑除一些特殊玻璃产品外,已基本上不再使用。而池窑一般又分为平板玻璃池窑和日用玻璃池窑,其中,用锡槽进行平板玻璃成型的浮法工艺已显示其强大的生命力。当然,成型后的玻璃产品需要进一步加热退火才能成为高质量的玻璃产品,因而就有退火炉。

陶瓷和建材工业热工窑炉主要指隧道窑(连续式)、倒焰窑及由此发展起来

的梭式窑（间歇式）、生产砖瓦用的轮窑（半连续式）。陶瓷工业所用连续式生产的隧道窑最早为窑车式隧道窑，以后出现了非窑车式隧道窑，如辊道窑、推板窑、步进窑和气垫窑等，尤其是辊道窑的出现，使得快速烧成、全自动控制和低污染生产成为可能，这就为焙烧高质量、高品位、高档次的陶瓷产品提供了极大的方便。当然，由于辊道窑自身结构的限制，目前还不能完全代替窑车式隧道窑。梭式窑是在倒焰窑基础上借鉴隧道窑中的窑车技术而发展起来的一种小型现代化窑炉，其炉衬几乎全部用高质量的保温材料砌筑，窑体蓄热量较低，其热工制度可根据制品需要随时调整，又非常机动灵活，非常适合于实验室研究、新产品开发中的小试、中试以及一些小批量产品的焙烧等。这种窑炉还适用于高技术陶瓷材料（又称特种陶瓷或功能陶瓷等）的小批量生产，因其产品技术含量高，故产品的附加值较高，因而颇受科技工作者、中小企业家和新技术推广人员的欢迎。与梭式窑工作原理相类似的还有钟罩窑、蒸笼窑和升降窑等。

在窑炉分类中，还有一类为电热窑炉，它是利用电能而不是靠燃料燃烧而获得的热能来焙烧（或熔制）产品的窑炉。按产生热能的机理不同，可分为电阻炉、电磁感应炉、电弧炉与弧像炉、电子束炉和等离子炉等。电阻炉是利用电热体（电热元件）通电发热的原理来产生热能。但有的电热体发热时极易被氧化而损坏，因而这类电阻炉内应通入保护性气体或抽成真空。电磁感应炉是利用电磁感应的作用原理在导体内产生感应电流，而此电流因导体的电阻而产生热能。电弧炉是利用电弧的作用而产生热能。弧像炉仍是利用电弧为热源，其不同之处在于：弧像炉要利用一个适当的光学装置将热能聚焦到被加热的材料上，从而形成一个辐射圆锥，使热源在圆锥的尖端处成像，该成像处温度最高。电子束炉是利用高速运动电子的能量作为热源。等离子炉是从电能产生的等离子体能量中获得热能。一般的火焰炉所能达到的温度都有一定的限度，通常难以超过 2000℃，而电热窑炉则能够产生极高的温度，除某些电阻炉外，其他电热窑炉都能产生几千摄氏度的高温，有的电热窑炉（如等离子体炉）能够产生 10000℃ 以上的高温。目前，制约电热窑炉发展的因素是电能的价格较高，故大规模的商业化生产很少采用电热窑炉。电热窑炉大多只在实验室和一些特殊场合使用。所谓特殊场合，是指那些材料制备时需要温度极高的场合。除此之外，利用太阳能聚焦产生高温的太阳炉也是很有发展前途的一种窑型，目前只因受气候和气象条件的影响较大而受限。

此外，为了充分利用热工设备的余热，余热锅炉的开发已提到议事日程，尤其是传热效率极高的热管技术的应用，使得低温余热（锅炉）发电成为可能，其成功的范例就是应用在新型干法水泥熟料煅烧系统和浮法玻璃池窑中的锅炉。耐火材料工业中，煅烧原料用高温竖窑的汽化冷却炉衬及隧道窑中的余热锅炉（产生蒸汽）也属于余热利用例证。

1.3 筑炉材料、窑炉砌筑与烘烤

窑炉是一个能够产生高温的空间,构成这个空间的材料称为筑炉材料。而筑炉材料应包括耐火材料和保温材料(或隔热材料)两大类。此外,为了增强窑体的结构强度,筑炉材料还应包括普通建筑材料(如灰渣砖等)和金属材料等。

从热工窑炉的角度来看,我们的着重点应当放在如何正确、合理地各类热工窑炉选择耐火材料、保温材料等筑炉材料,从而保证窑炉既经久耐用,且造价合理,又能使焙烧过程的成本降低。在无机非金属材料工业中,由于不同行业焙烧的品种各异,要求不同,所选用的热工窑炉必然各不相同,故所选用的筑炉材料差异也较大。如水泥窑炉常用的耐火材料是黏土砖、高铝砖、镁质制品及浇注料等;玻璃窑常用硅砖和电熔锆刚玉砖等;陶瓷和耐火材料工业窑炉所用耐火材料及保温材料品种较为广泛;而其他焙烧温度相对较低的热工设备,其常用耐火材料为价格较低的黏土砖等。当然,要对某一具体工业窑炉选用合适的筑炉材料是一项相当复杂而慎重的的工作,必须针对该窑炉所焙烧产品的要求,确定该窑炉不同部位或不同阶段所要求的温度、压力、气氛及耐腐蚀性能等,选用最合适的材料,真正做到物尽其用、各取所长,且造价合理等。这些内容在介绍每种工业窑炉时将分别予以简介。

近些年来,随着新型耐火材料及保温材料的出现,窑炉的结构也朝着轻质、保温、耐久和装卸简单、方便的方向发展,这是科技进步的必然发展趋势。如在陶瓷工业领域,轻质保温耐火砖、优质耐火纤维制品的出现,已经彻底改变了传统窑炉笨重的现象,使之变得既轻巧又节能。目前,轻质耐火砖陶瓷窑、全耐火纤维陶瓷窑已成为现代化陶瓷窑炉的一个重要标志。

既然窑炉是一个产生高温从而能焙烧出合格新产品的结构空间,那它就是一种特殊的建筑结构,这就意味着它的砌筑除了符合一般建筑规范外,还要符合一些特殊的筑炉规范及要求。如内衬灰缝与膨胀缝要按规定留设,对窑体应有相应的紧箍结构,对湿法砌筑的窑炉,要选用合适的耐火泥浆等。一般说来,窑炉应由有资质的专业筑炉队施工,且由有资质的管理人员进行监理,施工结束时,应组织专班按相关标准及规范进行检查与验收,验收合格后,方可投入使用。

新砌筑的热工窑炉,其砌体一般均含有较多的水分,随着窑炉的加热升温,这些水分将会被排除,而砌体的体积将会收缩。另外,某些耐火材料(如硅砖等)在某些温度范围内还会发生晶型转变,同时伴随体积变化。而生产过程是按被焙烧产品所需要的升温速度进行加热的。对窑炉而言,这种加热速度很难刚好适应耐火材料砌体的上述体积变化,从而会在上述砌体内造成较大的应力。如果其应力超过了筑炉材料能够承受的最大应力,将会造成整个砌体的破坏。故新建窑炉在正式投产之前,都要按有关规定制订烘窑方案和烘烤曲线,并对其进行

烘烤,以排除其砌体中的水分,完成其相应的晶型转变,从而确保窑炉能安全稳定地进行生产。

1.4 热工测量装置

对热工窑炉的有关参数进行检测非常重要。这些参数是热工窑炉的“耳目”。通过检测窑炉有关的温度、压力、流量、气氛等,我们就能对窑炉的运行情况了如指掌,发现问题,可以通过这些参数分析原因,针对存在的问题采取相应措施,以确保窑炉正常运行。目前,有关的检测仪器、仪表等种类繁多,也很精确,既可显示,也可实现无纸记录与储存,还可以通过网络实现远程监控等,非常方便。热工工作者只要正确选用与安装调试即可。值得注意的是,这些检测装置是不可或缺的,且要正常维护与使用,否则便会成为聋子的耳朵。

1.5 热工窑炉的自动控制

为使热工窑炉能够严格地按照工艺所确定的热工制度长期、安全、稳定地运行,热工窑炉还应有现代化的自动控制技术。目前,现代化工厂一般都设有中央控制室。所采用的自动控制方法多为集散型计算机控制系统。该系统具有通用性强、系统组态灵活、控制功能完善、数据处理方便、显示操作集中、人机界面友好、安装简单规范、测试方便、动作安全可靠等特点。当然,不同厂矿、不同窑炉,要求与条件各异,自动控制的内容与程度差异较大。对这方面有兴趣的读者可查阅其他详细的文献资料或专著。

2 竖 窑

竖窑（又称立窑）是我国目前应用较为广泛的耐火原料（如镁石、白云石、高铝矾土、硬质黏土等）、冶金石灰和水泥熟料的煅烧设备，它与这些物料的另一煅烧设备——回转窑相比，具有结构简单、投资较省、热效率较高、燃料消耗较低等优点。但由于大多数竖窑目前仍以焦炭为燃料，故要消耗较多的冶金焦，且燃料灰分夹杂于熟料中，降低了产品质量，对于高纯原料，如白云石、镁石等，当采用一步煅烧时，由于达不到所要求的煅烧温度，难以烧结，故欠烧率较高，其原料入窑块度要求也较大，以致大量碎料不能直接利用；窑内温度难以控制，沿窑断面的煅烧温度不均匀，往往易造成欠烧与过烧，影响产品质量；操作不当时，还会出现粘窑、结碛等现象，妨碍正常生产。

回转窑具有生产能力大、对原料适应性强、产品质量较均匀稳定、机械化程度高等优点，但也有热效率较低、燃料消耗量较高、设备投资较大、排出废气中含有较多粉尘、除尘设备较复杂等弊端。

为了提高原料煅烧质量，充分利用矿山资源，节约焦炭，对耐火原料煅烧设备宜采用竖窑、回转窑联合使用，在大型厂矿更应如此，对高纯原料，宜采用二步煅烧工艺。目前，我国在这方面已取得长足的进步。

2.1 结构

竖窑为一筒状窑体，物料从顶部加入，由底部卸出，而燃料燃烧所需空气由底部进入，燃烧产物（烟气）由顶部排出，故其属于逆流热工设备。

竖窑大致分为三带，即预热带、煅烧带、冷却带。物料在预热带借助于烟气的热量而预热，在煅烧带由燃料燃烧所放出的热量进行煅烧，在冷却带已煅烧好的物料与窑底鼓入的冷空气进行热交换，物料被冷却，而加热后的空气进入煅烧带供助燃用。为保证物料良好煅烧，上述三带应分别保持一定高度，并力求稳定。

竖窑的种类很多，分类方法多种多样，既可按其不同特征进行分类，如按不同燃料分为固体、液体、气体燃料竖窑；也可按煅烧物料种类分类，如黏土、高铝、镁石、白云石、水泥、石灰竖窑等；还可以按通风方式、体积大小、机械化程度、煅烧温度等进行分类等。但其基本结构大致相同。

2.1.1 窑体形状

窑体形状对物料在窑内的运动和气流在窑内的分布无疑都有重要影响。对其基本要求是应保证窑内物料均匀下沉和顺行,应使气流沿窑截面均匀分布。其形状大致有如下4种形式。

(1) 直筒形。即上下内径相同的圆筒形,它适用于煅烧各种耐火原料和使用各种燃料,因而被广泛采用,其结构如图2-1所示。

这种竖窑结构简单,坚固,有利于物料顺行与下沉,且砌筑方便。但物料一旦烧结,体积便会收缩,故物料在窑内自上而下运动时,必然会在收缩处与窑壁间形成环形缝隙,使气体在窑周边的阻力比窑中间的要小,物料在窑壁处也较中部疏松,从而使竖窑同一断面通风不均,以致物料煅烧不均。

(2) 喇叭形。为克服上述弊端,可将煅烧带内径略加收缩,从而可减少物料与窑壁间的间隙,使气流沿窑截面分布较为均匀。对使用汽化冷却炉衬的竖窑,还可使周边物料在下沉过程中有可能向内翻动从而改善物料的煅烧条件,减少欠烧品,如图2-2所示。

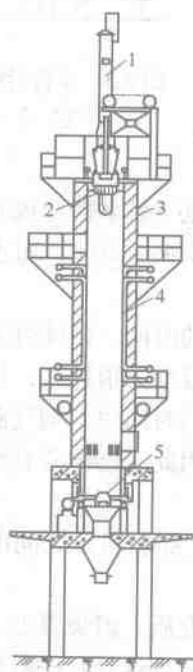


图2-1 直筒形机械化竖窑

1—烟囱; 2—布料器; 3—内衬;
4—汽化冷却炉衬; 5—出料器

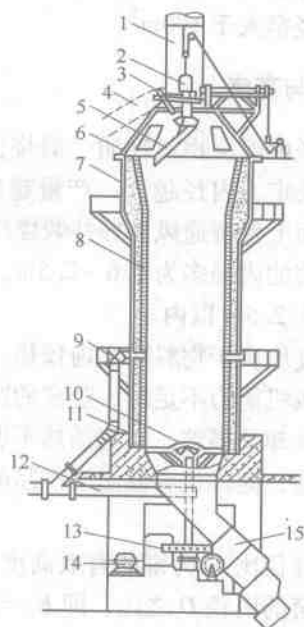


图2-2 机械化水泥竖窑

1—烟囱; 2—钢丝绳防扭器; 3—传动装置; 4—皮带加料机;
5—撒料溜子; 6—窑罩; 7—窑体; 8—耐火砖; 9—腰风管;
10—卸料算子; 11—铸铁窑衬; 12—底风管; 13—涡轮
传动装置; 14—电动机; 15—卸料密封装置(三道闸门)