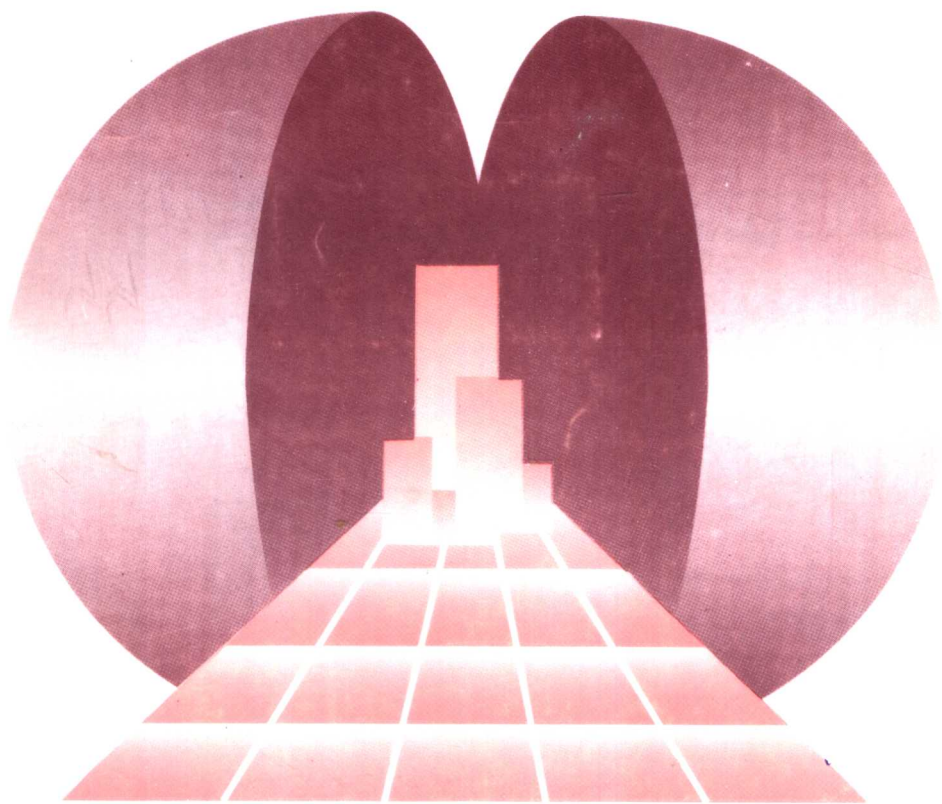


建材院校教学用书 建材工业技术丛书

硅酸盐工业热工技术

蔡悦民 主编



武汉工业大学出版社

内 容 提 要

本书讲述硅酸盐工业热工技术,将相关的热工基础理论、工艺及设备融合于一体。主要内容有:气体的流动、燃料及燃烧技术、传热过程、干燥技术、流态化技术、余热利用技术等(煅烧技术在另册专论)。内容联系生产实际,并对现行的新技术进行了介绍。

本书为高等工程专科学校硅酸盐专业通用教材,也可供成人教育院校使用,对工程技术人员有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

硅酸盐工业热工技术/蔡悦民主编. —武汉:武汉工业大学出版社,1997.2
ISBN 7-5629-1270-X

I. 硅… I. 蔡… III. 硅酸盐-热工学 N. TQ170.1

武汉工业大学出版社出版发行

(武昌珞狮路14号 邮编 430070)

武汉工业大学出版社印刷厂印刷

各地新华书店经销

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 插页:2 字数:440千字

1997年7月第1版 1997年7月第1次印刷

印数:1—3000册

定价:20.00元

前 言

《硅酸盐工业热工技术》上册是根据建材高等工程专科教学指导委员会第二次会议的决定编写的。

本教材根据硅酸盐工艺专业(专科)的培养目标和业务培养规格的要求进行编写,力图突出专科和建材两个特色。

专科特色:工程专科是培养高等工程技术应用型人才,教学要突出理论知识的应用和实际动手能力的培养。因此,在教材中基础理论要以应用为目的,以必需、够用为度。专业部分加强针对性和适用性。以现行工厂的实用技术为主,并介绍即将采用的新技术。

建材特色:本教材密切结合建材行业的硅酸盐产品(以水泥、平板玻璃、建筑卫生陶瓷为主)进行阐述,根据建材行业能耗高、环境污染较严重的特点,加强用能分析,介绍提高能源有效利用率和节约能源、防治污染的方法与途径。

本教材编写分工如下:洛阳工业高等专科学校蔡悦民任主编并编写第一章,第二章第五节,第三章第一、二、三(一、四)、五、六节,第四章第一、二节;西南工学院夏友明编写第二章第一、二、三、四节,第三章第三(二、三)、四节,第四章第三、四节;谭克锋编写第四章第五、六节;盐城工业高等专科学校邓育新编写第五章。

全书由南京化工学院胡道和教授担任主审。

本教材适用学时数为78~90学时。各章建议学时分配为:第一章3学时;第二章13~15学时;第三章28~32学时;第四章22~24学时;第五章12~16学时。

由于编者水平有限,不妥和错误之处敬请读者指正。

编 者

1995年9月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 硅酸盐工业在国民经济中的作用	(1)
第二节 硅酸盐工业的特点	(1)
一、硅酸盐工业是高温化学工业也是高耗能工业	(2)
二、硅酸盐工业对环境造成的污染比较严重	(2)
第三节 能源及硅酸盐工业的节能	(3)
一、能源的概念	(3)
二、一次能源与二次能源	(3)
三、能源的当量值与等价值	(3)
四、硅酸盐工业能源消耗及节能	(4)
第四节 硅酸盐工业热工技术及其发展	(6)
第五节 学习本课程的目的与要求	(7)
第二章 气体流动	(9)
第一节 气体流动的基本原理	(9)
一、气体的物理属性	(9)
二、气体流动的基本原理	(11)
第二节 高温下气体的流动	(12)
一、两气体的伯努利方程	(12)
二、气体的流出和流入	(15)
第三节 气体的特殊流动	(18)
一、喷射流动	(18)
二、旋转流动	(19)
第四节 硅酸盐热工设备系统中气体的流动与装置	(21)
一、高压气体的流出——高压喷嘴	(21)
二、高温气体的流出——烟囱	(23)
三、高速气体引射流动——喷射器	(26)
第五节 气-固流态化	(28)
一、流态化现象	(29)
二、两种不同的流化形式	(31)
三、气-固流化床的性质	(31)
四、气-固流化床的不正常现象	(32)
五、流化床的操作范围	(32)
六、影响流化质量的因素	(37)
七、气-固流化床的优缺点	(39)
八、流态化技术在硅酸盐工业中的应用	(39)
第三章 燃料及燃烧技术	(42)
第一节 硅酸盐工业用燃料	(42)

一、燃料的定义及分类	(42)
二、固体燃料	(42)
三、液体燃料	(52)
四、气体燃料	(55)
五、硅酸盐工业对燃料的选用原则	(58)
第二节 燃烧计算	(59)
一、燃烧计算的目的	(59)
二、燃烧计算的基本概念	(59)
三、燃烧计算方法	(61)
四、燃烧温度的计算	(70)
第三节 燃料燃烧技术	(76)
一、燃料燃烧过程的基本原理	(76)
二、气体燃料的燃烧技术	(82)
三、液体燃料的燃烧技术	(94)
四、固体燃料的燃烧技术	(105)
五、燃烧的污染及防治	(122)
第四节 固体燃料的气化	(124)
一、发生炉煤气的种类	(124)
二、混合煤气的生产	(126)
三、煤气发生炉	(129)
四、煤气发生炉的操作对气化的影响	(131)
五、煤气的净化	(134)
六、硅酸盐工厂煤气输送技术	(136)
第五节 燃料燃烧的节能	(137)
一、合理组织燃烧	(137)
二、改进燃烧技术,提高燃烧效率	(137)
三、提高操作与管理水平,实现全面能源管理	(138)
四、硅酸盐工厂余热的回收利用	(139)
第六节 能源利用的评价指标及分析方法	(140)
一、烟与炆	(140)
二、能级(能质系数)	(140)
三、能源利用的评价指标	(141)
四、能源有效利用的分析方法	(142)
第四章 传热过程	(147)
第一节 概述	(147)
一、传热的基本方式	(147)
二、传热系数	(148)
三、热阻	(148)
第二节 导热	(149)
一、基本概念	(149)
二、导热的基本定律——傅立叶定律	(150)
三、导热系数	(151)
四、稳定导热传热量的计算	(153)

第三节 对流换热	(160)
一、对流换热的机理	(160)
二、对流换热的基本定律——牛顿冷却定律	(161)
三、对流换热系数的求解法	(162)
第四节 辐射传热	(168)
一、基本概念	(168)
二、辐射传热的基本定律	(171)
三、两物体间的辐射传热	(174)
四、通过孔口的热辐射	(179)
五、气体辐射	(179)
六、火焰辐射	(185)
七、强化辐射传热的途径	(186)
第五节 综合传热	(186)
一、对流和辐射同时存在时的综合传热	(186)
二、通过器壁的综合传热	(187)
三、炉膛内综合传热分析	(190)
四、炉体表面散热计算	(191)
第六节 换热器和锅炉	(193)
一、换热器	(193)
二、锅炉	(198)
第五章 干燥技术	(205)
第一节 概述	(205)
一、干燥的定义	(205)
二、干燥技术在硅酸盐工业中的应用	(205)
三、干燥方法	(205)
四、干燥系统的组成	(206)
第二节 干燥介质的性质	(206)
一、湿空气的湿度	(207)
二、湿空气的密度和比容	(209)
三、湿空气的热含量	(209)
四、湿空气的干球温度、湿球温度和露点	(210)
第三节 湿空气的 I - x 图及其应用	(212)
一、 I - x 图的组成和制作	(212)
二、 I - x 图的应用	(214)
第四节 干燥计算	(217)
一、干燥计算的目的	(217)
二、干燥器的物料平衡	(217)
三、干燥器的热量平衡	(219)
四、干燥过程的图解法	(221)
第五节 干燥过程的基本原理	(226)
一、物料中水分的性质	(226)
二、物料干燥过程机理	(227)
三、干燥速率及干燥过程	(227)

四、影响干燥速率的因素	(229)
五、制品在干燥过程中的收缩和变形	(231)
第六节 干燥设备	(231)
一、硅酸盐工业对干燥设备的要求	(231)
二、干燥设备的分类	(232)
三、回转烘干机	(232)
四、隧道干燥器	(242)
五、链式干燥器	(244)
六、喷雾干燥器	(246)
七、室式干燥器	(250)
八、其他干燥方法及设备	(250)
九、干燥过程的节能途径	(253)
附录一 常用局部阻力系数及综合阻力系数	(259)
附录二 常用耐火材料、隔热材料、建筑材料的物理参数	(266)
附录三 烟气的物理参数	(267)
附录四 常压下空气的物理参数	(268)
附录五 在饱和线上水蒸汽的物理参数	(269)
附录六 在饱和线上水的物理参数	(270)
附录七 各种材料的黑度 ϵ	(271)
附录八 热工设备不同温差、不同风速的散热系数	(272)
附录九 湿空气的相对湿度(%)	(273)

第一章 绪 论

第一节 硅酸盐工业在国民经济中的作用

生产硅酸盐制品或材料的工业称硅酸盐工业。传统的硅酸盐制品有水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、砖瓦和搪瓷等。

水泥是基本建设的基础材料。目前,水泥品种已达一百余种。普通水泥大量用于工业与民用建筑;油井水泥用作石油开采的固井材料;道路水泥用于公路、机场建设;中热和低热硅酸盐水泥用于筑坝发电、防洪固岸等水利工程;抗硫酸盐水泥用于海洋工程和防侵蚀的隧道工程;某些特种性能的水泥还可用于防辐射等特殊要求的工程。水泥还可与多种材料组成复合材料,满足各种新型工业建设的需要。我国水泥年产量已达4亿t,居世界第1位。

玻璃是工业、建筑业、交通运输业和高技术领域不可缺少的配套材料。如平板玻璃、中空玻璃、隔声隔热的泡沫玻璃在现代建筑中被普遍采用;夹层玻璃用于汽车、飞机等交通工具的风挡和门窗;光学玻璃用以制造光学仪器的核心部件;玻璃化学仪器是化学、生物学等必备的实验用具;玻璃大型设备与管道可以满足化学工业耐温耐蚀的特殊要求;玻璃纤维、玻璃棉及其纺织品是电气绝缘、化工过滤和隔声、隔热、耐蚀的优良材料,它们与各种树脂制成的玻璃钢用以制造绝缘器件和各种壳体(如船舶和火箭发动机的壳体);印刷制板玻璃是现代微电子技术、摄影、测绘技术和空间精密技术领域不可缺少的材料。

陶瓷对人民日常生活、经济建设以及科学技术的发展有极为重要的作用,它和金属材料、有机高分子材料并称为当代三大固体材料。日用陶瓷是日常生活必需品,在发展对外贸易中有很重要的作用;各种建筑、卫生陶瓷(如各种陶瓷锦砖、彩釉砖、卫生洁具)大量用于现代化建筑工程;特种陶瓷广泛应用于宇航技术、电子技术、生物工程和原子能、机械、化学工业中。如:陶瓷绝缘材料;耐腐蚀的化工设备;燃气轮机用的耐高温、高强度、高韧性陶瓷部件;与热核聚变、核探测器及地下核试验等工程配套使用的陶瓷制品;用于人工牙齿、人工骨、人工心瓣、膜、人工眼的生物陶瓷等等。

耐火材料可用作高温窑、炉等热工设备的结构材料以及工业用的高温容器和部件,因其能承受各种物理化学作用及机械作用,因此在冶金、硅酸盐、化工、动力、石油、机器制造等工业中得到广泛的应用。近十几年来由于高温技术的迅速发展,特殊耐火材料的应用领域不断扩大。

随着科学技术的发展,硅酸盐工业的产品品种不断增加,质量提高,应用领域不断扩大,在国民经济中起着越来越重要的作用。

第二节 硅酸盐工业的特点

硅酸盐制品虽然性能和用途不同,但它们的生产都有着以下共同的特点:

一、硅酸盐工业是高温化学工业也是高耗能工业

能耗是能源消耗的简称,它反映规定的耗能体系如一个国家、一个地区、一个行业或一个企业的能源消耗水平,一般情况下它主要与企业生产规模及其工艺构成有关。

硅酸盐工业属高温化学工业,绝大多数硅酸盐制品的生产都离不开各种高温窑炉。其中不仅有着能量传递等常规热工过程的特点,同时还伴随着复杂的物理化学反应。为了维持热工过程和化学反应的进行,必须耗费大量的热能,该过程的能耗在产品总能耗中占 60%~80%。例如:水泥窑煅烧熟料,窑内物料烧成温度要达 1450℃;玻璃熔窑熔制玻璃,玻璃液的温度要达 1400℃。要保持这样的高温条件,所需热量均须由燃料的燃烧来提供。

据统计,1990 年建材工业(水泥、平板玻璃、建筑卫生陶瓷、砖瓦等)耗标煤 1.19 亿 t,占全国一次能源总产量的 11%,而建材工业总产值只占国民经济总产值的 4%;万元产值的综合能耗为 21.33t 标煤,为全国平均水平的 2.3 倍,居各行业榜首。

硅酸盐工业能耗居高不下的原因,其中很重要的一条是因为硅酸盐工业中具有先进技术与先进装备的大、中型企业很少。绝大部分是技术及设备比较陈旧落后,机械化、自动化程度低,管理水平低,技术人员缺乏的小型企业。因此,导致单位产品耗能高,窑炉热效率低,能源消耗高。与国外先进水平相比,我国主要硅酸盐产品的能耗要高出 40%~200%,建筑陶瓷的某些企业,竟达到 10 倍以上。因此,节约能源,采用先进技术和装备降低单位产品能耗,提高热工设备(燃烧室、窑炉、干燥器)的热效率是提高硅酸盐生产企业经济效益的重要环节。

二、硅酸盐工业对环境造成的污染比较严重

硅酸盐产品生产过程的原料开采、粉碎、运输过程会产生大量的粉尘;燃料的燃烧会产生有害气体(NO_x 和 SO_2 等)和烟尘;磨机和风机运行会产生噪音,造成对环境的污染,其中燃料燃烧造成的大气污染尤为严重。

粉尘不仅危害操作工人的身体健康,污染环境,而且会增加机械磨损和影响电器自动控制系统和微机系统的正常工作。

在硅酸盐工业中大量使用煤作燃料,煤含有大量灰分,并含有硫、氮等杂质。据测算,每燃烧 1t 煤,约排放 440kg 的二氧化碳、20kg 的二氧化硫、260kg 灰渣和 15kg 烟尘。燃煤排放的有害气体是造成全球许多地区出现酸雨现象和温室效应的直接原因,对人体、生物、设备、建筑物都造成危害。例如:在自然界 SO_2 的浓度达到 0.03ppm 时植物生长缓慢,达 0.05ppm 时人们的呼吸器官就会受到损伤。所以煤被称为肮脏燃料。

噪声对人的危害很大,长期在 90 分贝(dB)的条件下工作,有 20%左右的人患噪声性耳聋。此外,噪声还会引起多种疾病,如心率改变、血压升高、消化功能紊乱和神经系统疾病。噪声超过 140dB 会引起视觉模糊,呼吸、脉搏、血压发生波动。一座年产 100 万 t 的水泥厂约有 100 个大于 90dB 的噪声源。在工程技术上控制噪声常采用吸声、隔声、消声、隔振阻尼等技术措施。

由上可知,能耗高与环境污染是硅酸盐产品生产过程中存在的两个问题。它们均与生产技术、管理水平以及生产设备的种类和结构有密切的关系。所以,节约能源、降低单位产品的热耗及改善环境状况是当今硅酸盐工业热工技术要解决的问题。通过对这些问题的逐步改进,热工技术也将不断地得到发展。

第三节 能源及硅酸盐工业的节能

一、能源的概念

能源是指自然界蕴藏的各种资源,它能够转换成为机械能、热能、光能、电磁能、化学能等而被人们用来获取生产和生活中所需要的热和动力。

地球上存在着各种形式的自然能源,除燃料能(化学能)之外,还有太阳能、水能、风能、潮汐能、波力能、地热能等。这些能源都是巨大的,但至今仍有大部分未得到充分的利用。自发现原子能后,原子能的利用即展现了远大的前景。现在人们不仅成功的利用原子核的裂变来发电,而且正在研究热核反应堆,希望从根本上解决能源问题。自然界为我们提供了无限的能源,而大力开发利用它们,正是我们面临的一个重要任务。

尽管自然界存在着各种形式的能源,但当今得到利用的能源主要是燃料能(煤、石油和天然气)、水能和核能。从目前世界上能源使用情况看,燃料能仍占 90%左右。现代工业生产主要是利用燃料燃烧后产生的热能。在硅酸盐工业中所使用的天然燃料主要是煤和石油。

二、一次能源与二次能源

一次能源是从自然界直接取得,且不改变其基本形态的能源。如天然气、石油、煤、水力、太阳能、风能、地热能等。它们在未开发之前,处于自然赋存状态,称能源资源。世界各国的能源产量和消费量,一般均指一次能源而言。我国习惯上把各种一次能源统一折算为标准煤,每千克标准煤的发热量规定为 $29.27 \times 10^3 \text{kJ}$ 。

二次能源是将一次能源进行加工转换而得到的另一种形态的能源。如电能、氢、石油制品(汽油、煤油、柴油等)和煤制品(煤气、焦炭等)。此外,工业生产中的余热、余压也是一种二次能源。在二次能源中,电能、液体燃料、煤气和氢等具有清洁、便于输送和使用、热效率高等突出的优点。

三、能源的当量值与等价值

对工矿企业,能源利用的水平集中反应在生产单位产品的综合能耗上。而产品的综合能耗则与企业的技术水平、装备水平、管理水平、职工教育水平等多种因素有关。

企业的综合能耗项目应包括主要生产系统、辅助生产系统、附属生产系统所消耗的一次能源、二次能源以及耗能工质等。企业消耗的二次能源是由一次能源加工转换过来的,除了直接消耗掉二次能源本身所含的能量外,还间接消耗了加工转换过程所消耗和损失的能量。例如:每度电能提供相当于 $3.6 \times 10^3 \text{kJ}$ 的能量,而发电厂把煤的化学能转换为电能的过程要消耗和损失能量,即生产 3600kJ (1度)电能,需要实际消耗 $12 \times 10^3 \text{kJ}$ 的化学能。

在生产过程中,有时需要消耗水、蒸汽、氧气、压缩空气等,这些物质统称为耗能工质。它本身不是能源,只是取得它必须消耗能源。例如:水通过水泵抽吸上来,再经过一系列处理后才能使用;蒸汽通过煤炭在锅炉中燃烧,使水吸热后转换为蒸汽。因此,减少耗能工质的消耗,就是间接地节省了能源。

为使企业的不同能源具有相同的基准,需把消耗掉的二次能源、耗能工质折算成一次能源。一般用标准煤作为能耗的统一基准。为把二次能源、耗能工质的消耗量折算成标准煤耗量需了解两个概念:

1. 能源的当量值 任何形式的能源之间存在的数量上的当量关系称能源的当量值。即二

次能源本身所具有的实际能量,如1度电的当量值为3600kJ,折算成标准煤为0.123kg。它是不随时间、地点、技术水平而变的。

2. 能源的等价值 生产某当量值二次能源(耗能工质)所实际消耗一次能源的能量值,为二次能源的等价值。它受一个国家能源转换技术水平的限制。如1987年生产1度电要消耗 $11.82 \times 10^3 \text{ kJ}$ 的一次能源,折算成标准煤为0.404kg。而1979年1度电的等价值为 $12.35 \times 10^3 \text{ kJ}$,相当于消耗0.422kg标准煤。

能源的当量值与等价值的关系为:

$$\text{能源的等价值} = \frac{\text{能源的当量值}}{\text{二次能源制备系数}}$$

某些二次能源和耗能工质的等价值和当量值分别列于表1-1及表1-2中。

某些二次能源的平均等价值和当量值

表 1-1

类 别	单 位	当量值		等价值		备 注
		kJ	折标煤(kg)	kJ	折标煤(kg)	
电	kW·h	3600	0.123	11825	0.404	1987年
低压蒸汽	kg	2760	0.094	3376	0.129	1982年
汽油	kg	43056	1.471	44783	1.530	1982年
重油	kg	41827	1.429	41827	1.429	
渣油	kg	37641	1.286	37641	1.286	
焦炭	kg	28433	0.971	28433	0.971	1987年
城市煤气	Nm ³	16725	0.571	16725	0.571	1987年
液化石油气	Nm ³	50169	1.714	50178	1.714	1987年

某些耗能工质的平均等价值

表 1-2

类 别		单 位	等 价 值	
			kJ	kg 标准煤
各 种 水	自来水	t	7530	0.257
	循环水	t	4180	0.143
	软化水	t	14220	0.486
鼓 风		Nm ³	880	0.030
压缩空气		Nm ³	1170	0.040
二氧化碳		Nm ³	6270	0.214
氧 气		Nm ³	11710	0.400
氮 气		Nm ³	19660	0.672

四、硅酸盐工业能源消耗及节能

(一)我国能源概况

我国号称能源大国,水力的理论蕴藏量为6.18亿kW,居世界第1位,其中可开发的为3.7亿kW;已探明的煤储量为6400亿t,其中可开采储量约1700亿t,居世界第3位;石油探明储量为71亿t,其中可开采储量为25.24亿t,居世界第11位;天然气探明储量为3900亿m³,其中可开采储量1800亿m³,居世界第16位。从资源的绝对量来看是很高的,但按人均资源占有量计算,还不到世界平均数的1/2,是美国的1/10,是前苏联的1/7。因此,我国实际上又是一个资源相对短缺的国家。

据专家预测,到2000年,国内石油低限需求量为2.3亿t,但生产量仅能达到1.5亿t左

右;原煤需求量为 17 亿 t,生产量只能达到 13 亿 t。届时,我国能源缺口将达 5 亿 t~6 亿 t 标准煤。弥补这么大的缺口,出路只有两条,一是开发新能源,一是节能。据专家测算,每节约 1t 标准煤所需的投资仅相当于开发 1t 标准煤综合投资的 50%,故投资于节能有很可观的经济效益。目前,节能已成为世界各国经济和社会发展的重大战略问题。面临严峻的能源形势,节约能源,提高能源的利用率是当前的紧迫任务。美国政府预测,在不减少国民生产总值和不改变生活方式的前提下,全美能源节约有 20%~70% 的巨大潜力。我国工业节能潜力也很大。由于不少企业生产技术落后、设备陈旧、管理水平低、生产规模小及产业结构不合理等情况,使我国能源利用率低。先进国家的能源利用率一般为 40%,先进水平可达 50%;而我国仅为 30% 左右。这一差距意味着我国每年多用标准煤 6 亿 t。我国单位能耗所创造的国民生产总值比较低,仅为世界平均水平的 1/7,日本的 1/12。从每吨标煤创造的价值看,中国是 420 美元,日本为 2500 美元,法国为 1800 美元。可见,在能源利用上我国与发达国家尚有较大的差距。

我国能源消费结构 75% 是煤炭,而发达国家煤炭消费只占总量的 17% 至 30%。目前,消耗在工业炉的燃料占全国燃料总消耗的 20% 左右。所以,从环保和国民经济发展的状况看,节约能源、提高能源的利用率具有很高的战略意义和紧迫性。

(二)硅酸盐工业的能耗

硅酸盐工业是耗能大户,能源消耗居全国各产业部门之首。据统计,1989 年建材工业总的能源消耗量为 11860 万 t 标煤,其中煤耗约 9000 万 t,电耗 357 亿 kW·h,油耗 250 万 t。在总的能源消耗中,砖瓦行业的能耗占 53%,水泥行业的能耗占 36%,玻璃及玻璃纤维的能耗占 3%,其他产品能耗占 8%。

能源消耗是建材产品生产最重要的物质消耗,在生产成本中所占的比重很大,如水泥能源费用占产品成本 35%~45%,砖瓦为 25%~35%,平板玻璃为 20%~30%。能源消耗高主要反映在单位产品能耗高,如我国水泥回转窑每吨熟料平均煤耗为 190kg 标煤,比日本 80 年代水平高 70%~80%。大、中型玻璃厂平均煤耗为 29.5kg 标煤/重箱,而英国皮尔金顿公司 1985 年的煤耗为 14.1kg 标煤/重箱,美国 PRG 公司为 14.9kg 标煤/重箱;而小型玻璃厂的能耗比大、中型玻璃厂还要高两倍。陶瓷工业年耗标煤 300 多万吨,其中烧成耗标煤占总量的 80%,单位产品能耗是国外的 2~12 倍,国内厂际之间相比同类产品的能耗相差也很大,这与烧成用的燃料品质和燃烧设备有重要关系。

根据建材工业 10 年发展规划,到 2000 年,建材工业总产值将达 1000 亿元~1100 亿元,需标准煤两亿多吨,约占全国能源总产量的 1/7,显然国力不能承受,从而制约建材工业的发展。因此,节约能源是摆在我们面前的极其艰巨和重要的任务。

(三)硅酸盐工业的节能

1. 节能的概念

节能是指在不降低产品价值的情况下减少能源的消耗量。即采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可接受的措施,来更有效地利用能源。节能的核心是提高能源的利用水平。即以最小的能源消耗取得最大的经济效益。节能要从能源生产开始,在开采、运输、加工、转换及使用等各个环节都减少损失和浪费,才能提高其有效利用程度。

2. 节能途径

(1)加强能源的科学管理,对老企业进行节能技术改造,提高能源利用率,降低单位产品或产值的能源消耗量。近几年,硅酸盐工厂的节能技术改造取得很大成绩,如水泥机械化立窑利

用预加水成球、闭门操作、微机控制等新技术进行节能技术改造,使立窑烧成水泥熟料热耗由 5MJ/kg 下降到 3.5MJ/kg;平板玻璃生产采用了玻璃熔窑保温密封技术、新型蓄热室及提高热回收率技术、新型节能喷枪及合理燃烧技术等多项节能技术使平板玻璃的单位产品能源消耗有所下降;在陶瓷隧道窑上采用蓄热量很低的轻型纤维窑车、快速调温煤气燃烧器、低温快速烧成等新技术也取得了很好的节能效果。

(2)通过调整企业结构和产品结构,加强节能监测,降低原燃材料消耗,提高产品质量,提高劳动生产率,达到少用能源的目的。例如:建设采用先进工艺和技术的节能型工厂(水泥工业发展新型干法水泥生产线;平板玻璃工业发展大型浮法玻璃生产线;陶瓷工业发展辊道窑生产线等),并逐步增加技术先进的大、中型企业产品的比重。

(3)加强余热的回收和利用。各种硅酸盐窑炉排放的烟气中含有大量的热量,可根据窑炉排出烟气的温度,水平分级回收利用。即在满足窑炉自身加热(如加热物料、燃料或空气)的前提下,拟定余热回收利用系统。作为动力回收利用,有条件的可利用余热锅炉发电或供热(蒸汽或热水)。

第四节 硅酸盐工业热工技术及其发展

硅酸盐工业的热工过程主要是指预热、干燥、烧成过程和余热利用过程。这些过程是从获取热源开始,通过气体载热流动与被加热物料(或物体)进行换热来实现的。而热工技术就是为完成上述热工过程将有关的热工基本理论、生产工艺过程及相关的设备三者紧密结合起来进行综合并予以实施。热工技术需要在理论的指导下不断地进行工艺及设备的改进以求提高产品质量和设备的产量,降低能源消耗;反过来,通过生产实践中出现的新问题又要进一步加深理论研究,这样促使热工技术不断提高和发展。热工技术的发展始终与产量、质量、节能、环保密切相关。

硅酸盐工业用的各种类型的窑炉都受着燃料燃烧规律、热传递规律和热力平衡分布规律的制约。不同的燃烧条件,不同的热传递条件,在窑炉系统就有不同的热力分布,也同时产生不同的生产技术和相应的窑炉系统。例如,在 50 年代末,水泥生产出现了悬浮预热技术。即在回转窑窑尾加一悬浮预热器使原来在窑内呈堆积状态进行的物料预热及部分碳酸盐分解功能,移到窑后预热器中在悬浮状态下进行,从而改变了热传递状态。物料在悬浮状态下与热气流充分接触,传热面积比回转窑内成千倍的增加,因而传热速率大大加快,使在窑内约需 1h 的预热和部分碳酸盐分解过程,在预热器中缩短到 30s 即可完成,从而使窑的产量大幅度增加、产品质量提高、能耗下降,是水泥工业的一次重大技术突破。到 70 年代,日本石川岛公司和秩父水泥公司研制成功预分解技术,即在悬浮预热器与回转窑之间增设一个分解炉,在其中加入 30%~60% 的燃料,改变燃烧条件,使燃料燃烧的放热过程与生料分解吸热过程同时在悬浮(或流态化)状态下极其迅速的进行,分解率达 85%~95%,从而使窑系统生产效率大幅度提高,产量上升,能耗下降,燃料选用面加宽,窑炉热效率提高到 50% 左右(湿法技术为 25% 左右),环境污染也得到改善。20 多年来预分解技术还在不断改进和完善,分解炉型式已达 30 余种,预分解技术是继悬浮预热技术之后的又一次重大的技术突破,它已成为当今水泥煅烧技术发展的主导方向,也是我国水泥工业发展的主要途径。

我国是生产陶瓷最早的国家,已有几千年的历史。陶瓷烧成使用的窑炉从古代的古窑、龙

窑、阶梯窑等发展到现代的倒焰窑、梭式窑、隧道窑和辊道窑。燃料的结构不断改变,从烧柴到烧煤到适用于使用各种燃料(煤、重油、煤气等);在窑炉结构、制品运载方式、燃烧设备等方面也有了重大的改进。在每一个窑炉结构突变时期都带来陶瓷工业的一次飞跃发展。例如:1958年建成我国第一条用煤焙烧日用陶瓷的隧道窑,1959年建成第一条用发生炉煤气焙烧建筑卫生陶瓷的隧道窑,使全国建筑卫生陶瓷工业得到很大的发展,1960年全国卫生陶瓷的产量为1949年的235倍。1966年建成首座多孔道推板窑,节约能耗25%以上。70年代研制成功半隔焰预燃式隧道窑,坯体直接叠装在窑车上入窑,使釉面砖的素烧甩掉了匣钵,不仅提高产量30%,而且单位制品燃料消耗降低25%~30%。1973年又成功研制了单层釉烧辊道窑,并得到普遍推广,为发展低温一次快速烧成新工艺创造了条件。进入80年代,卫生陶瓷以净化气体为燃料,采用宽断面明焰裸烧隧道窑技术和瓷砖的气烧辊道窑技术取得良好效果。国家建材研究院研制成功的双层烧油辊道窑,烧釉面砖时比用隧道窑烧同类产品单位热耗下降40%,比单层辊道窑单位热耗下降33%,节能效果明显,而且产量、质量都有提高。

我国玻璃工业有100多年的历史,1913年出现的平板玻璃有槽垂直引上成型法是平板玻璃生产技术的第一次突破,但仍存在熔窑热效率低、能耗大的问题。1959年英国皮尔金顿兄弟公司发明浮法生产工艺是第二次技术突破,它很快被许多国家引进并加以应用。我国于60年代开始对浮法生产技术进行研究,并解决了浮抛技术、设备和操作等一系列问题,确立了适宜的热工制度和工艺条件。1971年中国第一条浮法生产线在洛阳玻璃厂投产,继而他们与科研、设计等有关部门密切合作,经过三个窑期的试生产,使具有中国特色的浮法生产技术日益完善,在1981年通过国家鉴定,宣告中国平板玻璃浮法工艺技术研究成功并定名为“洛阳浮法玻璃工艺”,成为世界三大浮法之一。这是中国平板玻璃工业史上划时代的事件。今后我国平板玻璃工业的发展应以该项现代平板玻璃生产技术为中心。目前该项技术得到很大发展,窑炉趋向大型化,窑炉结构和燃烧设备不断改进,并采用全窑保温、富氧燃烧等许多新的节能新技术,使产量、质量、熔窑热效率都有明显的提高。如池窑大型化有利于自动化和成型快速化,且燃料消耗比中、小型窑降低10%~20%。据国内21座保温池窑统计,采用保温措施后,节约燃料20%~22%,并在相同火焰温度下使玻璃液温度平均提高50℃左右。采用增氧助燃技术,使用含23%~30%的增氧空气,可节省燃料8%~15%。

70年代以来,我国在热工技术的理论研究上做了大量的工作,并在引进、消化、吸收先进技术的基础上结合我国国情设计、制造了许多新型、高效的热工设备,推动了硅酸盐工业生产技术的发展。目前,一种新的科学方法——反求工程已开始在硅酸盐工业中加以应用。反求是技术开发、研究、设计、制造的逆过程。反求工程是对引进技术和传统技艺进行消化、吸收、理论升华和创新改造的一种方法。根据积累的大量科学反求资料,集中同类技术的优点,提出新观点,作为开发新技术、新设备的依据。利用反求工程建立的窑炉诊断技术,对现行窑炉存在的问题进行科学的诊断,并提出有效的改进方法,对窑炉的发展和改进起到了良好的指导作用。

第五节 学习本课程的目的与要求

在硅酸盐产品生产中,热工过程是最重要的环节。热工过程组织得好坏、燃料、热工参数、热工设备选择是否合理、能源消耗是否经济都直接影响到产品的产量、质量和成本。所以,热工技术是硅酸盐工厂的关键技术。通过本课程的学习应掌握热工技术的有关基础理论、规律以及

相关的工艺和设备。为此本课程主要内容为：窑炉系统气体的流动、燃料及燃烧技术、传热过程、干燥技术、流态化技术、烧成技术和余热利用技术等。其中，烧成技术及其相关的余热利用技术将在下册讨论。

根据工程专科教育的培养目标，在学习本课程时要突出理论与生产实践相结合的特点，一方面要掌握热工技术中的一些基本概念、基本原理和基本计算方法，对燃烧设备、干燥设备能进行特点分析、设计及选型；另一方面要将理论结合生产实际加以应用，对正在采用的技术要掌握，对即将发展和使用的新技术应有所了解，以跟上硅酸盐工业发展的进程。此外，还要掌握热工设备的节能和余热利用的途径和方法。因此，必须将课堂讲授与工厂的生产实践紧密结合，以达到最佳的学习效果。

第二章 气体流动

硅酸盐工业窑炉绝大部分是以燃料燃烧提供热能。高温的气态燃烧产物(载热体)放出热量用以熔融、煅烧物料或加热制品。余热的回收利用和烟气的排出等,都离不开气体流动。本章主要介绍窑炉系统内气体运动的基本规律。

气体流动的基本理论是研究窑炉内热量传递、质量传递、燃料燃烧过程的基础。窑炉内压力、温度的分布,以及热交换条件等,都与窑内气体流动状况有着密切的关系。因此,了解和掌握气体流动的基本规律,正确处理和解决气体的输送和排出、火焰组织以及传热条件等热工问题,对于窑炉的操作、设计和计算都是非常重要的。

第一节 气体流动的基本原理

气体流动遵循流体力学的原理,但是气体特别是热气体自身具有的特殊性,使其流动规律又有相应的特点。因此,为了正确讨论和准确运用气体流动的基本原理,首先应该熟悉气体的属性。

一、气体的物理属性

影响流动规律的气体属性主要是力学和热学性质。

(一)膨胀性与压缩性

对于理想气体,其温度、压强和体积之间的关系服从理想气体状态方程:

$$pV = nRT \quad (2-1)$$

或

$$p = \rho \frac{R}{M} T \quad (2-1a)$$

$$pv = \frac{R}{M} T \quad (2-1b)$$

式中: p ——气体的绝对压强, N/m^2 或 Pa ;

V ——气体的体积, m^3 ;

n ——气体的摩尔数, kmol ;

R ——气体常数, $8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

T ——气体的热力学温度, K ;

ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

M ——气体的分子量, kg/kmol ;

v ——气体的比容, m^3/kg 。

窑炉系统的气体主要是空气和烟气,由于压强不太大,温度不太低,可以近似当作理想气体处理。

在等温条件下, $T = \text{常数}$, 状态方程可以简化为:

$$pv = \text{常数} \quad (2-2a)$$

或

$$p/\rho = \text{常数} \quad (2-2b)$$

由式(2-2a)和式(2-2b)可知,随着气体压强的增加,气体体积缩小,密度增大,表现为气体的压缩性。

在大多数工业窑炉内,气体压强变化不大,不会引起体积和密度的显著变化,所以仍可视作不可压缩流体来处理。但是,对于压强差较大,流速较高,温度和密度都有显著变化的气体流动,压缩性就不能忽略,如喷射器、高压烧嘴内的气体流动,密度不是常数,属于可压缩气体流动。

在等压的条件下, $p=\text{常数}$,状态方程可以简化为:

$$v/T = \text{常数} \quad (2-3a)$$

或

$$\rho T = \text{常数} \quad (2-3b)$$

由式(2-3a)和式(2-3b)可知,气体的比容或体积与温度成正比,随着温度的升高,气体体积增大而密度减小,表现为气体的膨胀性。

令标准状态下的气体体积为 V_0 ,气体密度为 ρ_0 ,气体流速为 w_0 ,则在101325Pa(1大气压)下温度为 $t^\circ\text{C}$ 时气体的体积 V_t 、密度 ρ_t 和流速 w_t 为:

$$V_t = V_0 \frac{273+t}{273} \quad (2-4)$$

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273+t} \quad (2-5)$$

$$w_t = w_0 \frac{273+t}{273} \quad (2-6)$$

(二)粘度

气体的内部质点或流层间因相对运动而产生内摩擦力(切应力)以反抗相对运动的性质,叫做粘性。此内摩擦力称为粘滞力。

气体流动所产生的内摩擦力可由牛顿内摩擦定理表达:

$$\tau = \mu \frac{dw}{dy} \quad (2-7)$$

式中: τ ——切应力, N/m^2 ;

$\frac{dw}{dy}$ ——速度梯度, $1/\text{s}$;

μ ——粘度,也称动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在工程计算上也经常出现 $\nu = \mu/\rho$,称为运动粘度,单位为 m^2/s 。

与液体不同,气体的粘度随温度升高而增大,其关系可表达为:

$$\mu_t = \mu_0 \left(\frac{273+C}{T+C} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{1.5} \quad (2-8)$$

式中: μ_t, μ_0 ——温度分别为 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时气体的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

T ——气体的绝对温度, K ;

C ——与气体性质有关的常数。

某些气体的 μ_0 与 C 值列表于表2-1。

(三)气体的浮力

根据阿基米德浮力原理,单位体积流体在大气中所受到的浮力,等于排开单位体积空气的重力,浮力的方向与重力相反。液体在空气中受到的浮力影响常常忽略不计,而对窑炉中的热