

王德钹 刘可超 陈邠源 等 编著

搪瓷生产 热工原理 与设备

轻工业出版社

责任编辑：邢相禹 邹力行

封面设计：茅韵声

ISBN 7-5019-0007-8/TS·0007

科技新书目：173—151 定价：3.65元

TQ

搪瓷生产热工原理与设备

王德钹 刘可超 陈邠源 编著

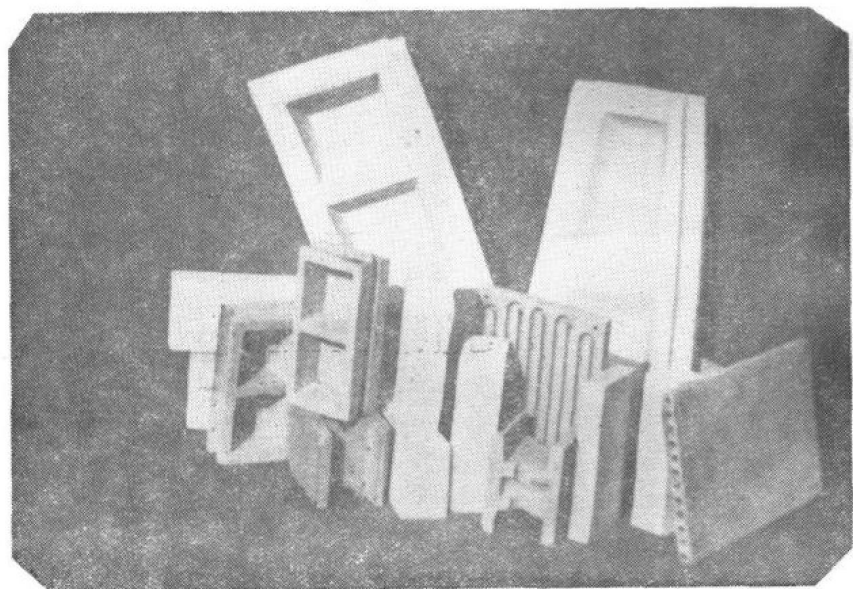
闻瑞昌 审校

轻工业出版社

碳化硅、刚玉耐火材料

山东省长清县马山化工厂生产各种高级耐火材料。主要产品有：刚玉质制品、锆刚玉制品、锆英石制品、碳化硅制品和碳化硅刚玉复合制品。这些产品具有高导热性、高耐火度、高热稳定性和良好的耐化学侵蚀、耐机械冲刷性能，节能效果明显。

该厂产品多年来行销全国各地的冶金、陶瓷、化工、机械、玻璃等行业，深受用户赞誉。尤其是用做搪瓷窑炉的炉底板、传热壁凹心砖和磁砖及衬砖等更是倍受欢迎。该厂地处山东耐火材料基地，就地取材，价格低廉，货真价实，对产品实行包退包换，代办包装运输。该厂厂长吴芳文、销售科长周培岭欢迎用户去联系业务。联系地址是山东济南长清县马山化工厂，电话是长清县马山总机转。



内 容 提 要

本书阐述了搪瓷生产热工设备的原理及其应用,全面系统介绍了搪瓷工业热工设备的类型及其基本结构,总结了我国解放三十多年来搪瓷生产热工设备的设计、砌筑和操作的基本经验,同时还介绍了国内外搪瓷热工设备的最新发现概况,指出了我国搪瓷工业窑炉的改进方向。书中也阐明了开展热平衡、热工检测与自动调节控制等方面的专业理论和技术知识。本书可供搪瓷工业工程技术人员、管理人员和操作工人阅读,也可作为有关大专和中等专业院校硅酸盐专业师生及搪瓷企业职工技术培训的教学参考用书。

前 言

大家知道，搪瓷釉的熔制和搪瓷制品的烧成是靠搪瓷窑炉来完成的。脱脂酸洗后的湿坯和湿法涂搪瓷釉后的坯体烘干是在干燥器中进行的。搪瓷生产热工设备的好坏对搪瓷制品的产量、质量及其它经济技术指标的完成有着重要影响。因此，搪瓷窑炉和干燥器等热工设备是搪瓷工业生产中必不可少而又极其重要的设备。

我国的搪瓷热工设备近些年来虽有较大发展，但同陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料等硅酸盐工业热工设备比较还相当落后，仍存在不少问题需要广大热工工作者努力去解决，还有许多技术难关需要大家去攻克，搪瓷热工技术的基础理论也需要大家在总结实践经验的基础上不断完善和提高。当前，摆在我国搪瓷热工工作者面前的任务是很艰巨的。我们不仅要研究对搪瓷的热工理论深入进行研究和探讨，通过加强热工检测、进行模拟试验和总结实际操作经验，以提高技术水平，而且还要结合我国国情，有选择地吸收国外先进技术和经验，研制出无污染或少污染、热效率高、能耗低、机械化自动化程度高、经济技术指标先进的搪瓷热工设备。

为争取早日制造出具有我国特色、适合我国能源特点和生产实际的现代化搪瓷热工设备，并迎接行将开展的行业技术和设备改造，我们根据多年积累的经验和资料编写了本书。为了广泛适应广大工程技术人员、热工管理人员、司炉和砌炉操作人员的需要，书中取材着眼于基础理论的叙述和实际操作经验的介绍，因而内容有浅有深，不同读者可根据自己实际需要加以取舍。

本书第一、二篇由王德钹、刘可超、陈邠源共同编写，第三篇由刘可超、王德钹编写，第四篇由陈邠源、王德钹编写。书中

插图主要由刘可超、王德钺描绘。全书请闻瑞昌同志审校。北京陶瓷搪瓷工业公司何葦玲同志、北京化工设备厂陈传祖同志曾对本书编写提出过宝贵建议。本书在编写过程中还得到轻工业部一轻局、玻璃搪瓷工业科学研究所、全国轻工搪瓷窑炉节能组、华东地区搪瓷工业科技情报站及有关厂领导、工程技术人员和工人师傅的积极支持，并提供许多技术资料。在此，谨向他们表示由衷感谢。

由于编者水平所限，理论研究和实践不够，参阅文献不多，作为我国第一本这方面的专业技术编著，书中错误缺点自然不少。欢迎广大专家和读者多多给予批评指正。

编著者于1985年10月

目 录

第一篇 搪瓷热工原理

第一章 气体力学及其在搪瓷窑炉中的应用.....	2
第一节 气体的基本性质及有关概念.....	2
第二节 气体力学原理及定律.....	5
第三节 窑炉中气体运动的阻力及其对操作的影响.....	12
第四节 窑炉的通风设备.....	19
第二章 传热学原理及传热计算.....	34
第一节 传热的基本概念及方式.....	34
第二节 传热定律与传热计算.....	37
第三章 干燥原理及过程.....	53
第一节 干燥基本概念及方法.....	53
第二节 湿空气的性质及其焓—湿量图.....	58
第三节 干燥机理与干燥过程.....	64
第四节 干燥过程的计算.....	69

第二篇 燃料、燃烧及搪瓷窑炉

第四章 燃料、燃烧及燃烧计算.....	80
第一节 燃料的种类和组成.....	80
第二节 燃料的性质及选用.....	84
第三节 燃烧基本原理与燃烧计算.....	99
第五章 燃烧过程及燃烧设备.....	118
第一节 固体燃料的燃烧过程及设备.....	118

第二节	液体燃料的燃烧过程及设备	127
第三节	气体燃料的燃烧过程及设备	148
第四节	辐射管燃烧加热器	153

第三篇 搪瓷工业窑炉和干燥设备

第六章	搪瓷釉熔炉	170
第一节	熔炉的类型及发展	170
第二节	坩埚炉	172
第三节	回转炉	182
第四节	池炉	187
第七章	搪瓷烧成炉	196
第一节	烧成炉的类型及发展	196
第二节	室式马弗炉	205
第三节	燃煤隧道式马弗炉	209
第四节	燃油隧道式马弗炉	238
第五节	辐射管炉	242
第六节	电炉	250
第七节	工业搪瓷炉	260
第八节	烧成炉的设计、砌筑与操作	264
第八章	搪瓷生产干燥设备	281
第一节	干燥设备类型及发展	281
第二节	干燥设备的设计与计算	288
第九章	搪瓷热工设备常用耐火材料	292
第一节	耐火材料的技术指标	292
第二节	搪瓷工业窑炉常用耐火制品	295
第三节	耐火泥与耐火涂料	300
第四节	隔热材料	307
第五节	不定形耐火材料	310

第四篇 搪瓷热工设备的热平衡、热工检测与自动控制

第十章 热平衡与热平衡计算.....	319
第一节 热平衡的基本概念及内容.....	319
第二节 热平衡的计算方法.....	323
第三节 烧成炉及与之配套的干燥设备的热平衡计算.....	328
第十一章 热工检测与自动控制.....	341
第一节 热工检测与自动控制的基本概念.....	341
第二节 常用检测与控制仪表.....	342
第三节 电子计算机在搪瓷生产上应用简介.....	352
第十二章 搪瓷生产热工设备的改革与节能.....	359
第一节 改革方向与措施.....	359
第二节 节能途径探讨.....	364
本书主要参考文献.....	366
附表.....	368

第一篇 搪瓷热工原理

当前,在我国搪瓷工业生产中,绝大多数窑炉都是以固体、液体和气体燃料作为热能的来源。这些燃料在燃烧过程中产生的气态燃烧产物成为窑炉内的载热体,在其流动过程中把热能传递给搪瓷制品或瓷釉物料。由此可见,均匀有效地对炉内制品或物料进行加热是和热气体的流动有着密切关系。另一方面,炉内的废烟气经废热回收设备,例如与搪瓷烧成炉配套的干燥器、换热器等而从烟囱排出,燃烧所需空气以及把气体或液体燃料送入炉内燃烧,窑炉的溢气等都与气体流动有关。这些问题能否得到妥善解决,直接关系到搪瓷热工设备的设计和操作。搪瓷热工原理就是研究如何在搪瓷热工设备中应用气体力学、传热学和干燥原理的一门应用学科。

热工学的基本原理近几十年来有了较大发展。虽然在搪瓷生产热工设备中的应用研究不多,但在其它硅酸盐工业热工设备和冶金工业窑炉中的研究已取得了许多新进展。大家知道,在窑炉系统的高温下,气体的流动过程总是伴随着化学变化和热交换,有时温度和密度变化较大,而有时化学变化并不激烈,压力和密度变化也不大。因此,掌握气体力学的一些基本原理及定律,熟悉传热学的一些基本概念和原理,了解湿空气的性质等干燥原理,对搪瓷热工工作者来说是非常必要的。

第一章 气体力学及其在 搪瓷窑炉中的应用

第一节 气体的基本性质及有关概念

物质是以固态、液态和气态三种形式存在于自然界和宇宙间的，统称为物质的三态。为了研究的方便，人们把气态和液态物质统称为流体。流体的共性是其质点几乎有无限的流动性，而且几乎可以毫无阻力地分裂或改变自己的形状。

气体的特点是其体积有很强的压缩性，受热时体积膨胀较大，其密度随压强与温度的变化有很大改变，无一定的表面。液体的特点是其体积几乎不具压缩性，受温度的变化很小，同时具有一定的表面。所以我们在讨论气体力学原理及定律之前，需要熟悉和掌握流体的特性及有关名词和概念。

1. 流体密度 每单位体积流体的质量称为流体的密度，以 ρ 表示。流体的密度等于流体的质量 m 除以流体的体积 V ，单位是千克/米³ (kg/m^3)。表1-1列出了部分气体在标准状态下的密度 (ρ_0)。

因为物体的重力等于物体的质量乘以重力加速度，即：

$$G=mg \quad \text{牛顿 (N)}$$

则质量为1千克的物体所受重力为：

$$G=1\text{kg} \times 9.80665\text{m/s}^2 = 9.80665\text{N}$$

物体用杆秤称量时是质量，用弹簧秤称量时是重力。在国际单位制中取消重度 γ ，用密度乘以重力加速度代之： $\gamma=\rho \cdot g$ 。

2. 流体压力 流体每单位面积上所受到的作用力称为压力，以 P 表示，单位为帕斯卡，简称为帕 (Pa)。压力也可用巴 (bar) 为单位， $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ ， $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$ 。

表1-1

一些气体在标准状态下的密度, kg/m^3

气体名称	ρ_0	气体名称	ρ_0	气体名称	ρ_0
空气	1.293	C_4H_{10}	2.840	CO	1.250
CO_2	1.977	C_5H_{12}	3.218	CH_4	0.717
N_2	1.251	C_6H_{14}	3.840	C_2H_4	1.260
烟气 (平均密度)	1.295	C_6H_6	2.712	C_3H_6	2.020
H_2	0.0898	水蒸汽 (H_2O)	0.804	C_4H_8	2.50
C_2H_6	1.356	O_2	1.429	C_3H_8	1.173
C_3H_8	2.020	SO_2	2.927	H_2S	1.539

工程制单位与国际制单位的关系是:

$$1\text{mmHg}=133.3224\text{ Pa}$$

$$1\text{mmH}_2\text{O}=1\text{千克力/米}^2=9.80665\text{N/m}^2=9.80665\text{Pa}$$

3. 相对压力和表压 (工作压力) 窑炉内或其它容器里的气体压力超过大气压的数值叫相对压力, 可直接用气压表测得, 所以又称表压。对空气压缩机而言, 5个表压就是指压出的空气压力比外界大气压高5个大气压, 即其压力 (又称绝对压力) 实际为6个大气压; 对鼓风机而言, 300毫米水柱是指鼓风机的绝对压力比外界大气压高300毫米水柱, 即其绝对压力为10300毫米水柱。由此可见, 表压等于绝对压力减去大气压。

当窑炉或容器内的气体压力小于外界气体压力时, 此时的工作压力为负压 (又叫真空度), 而当窑炉或容器内的气体压力大于外界气体压力时, 此时工作压力为正压。不过, 实际上搪瓷窑炉中各部位的压力与大气压十分相近, 往往只相差2~30毫米水柱, 因此, 其对气体体积的影响是很小的, 可以忽略不计。

4. 温度 温度是表示物质冷热程度的物理量。根据分子运动论, 气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度,

是与气体分子平均速度有关的一个统计量。如果气体温度愈高，则表明气体分子的平均动能愈大。根据国家法定计量单位，热力学温度 T 是基本温度，单位是开尔文，代号为 K 。热力学温度 T 俗称为“绝对温度”， $T=273.16K$ 。绝对温度 T 与水的冰点的热力学温度 T_0 （ T_0 为 $273.15K$ ）之差为摄氏温度 t ，则

$$t=T-T_0$$

工程计算时，一般把绝对温度 T 和 T_0 取为 $273K$ 就可以了。

5. 比热 单位数量的气体温度每变化 $1K$ 时所吸入和放出的热量，就叫该气体的比热。目前我国搪瓷热工计算中度量热量常用千卡（ $kcal$ ）为单位。国家法定计量单位采用焦耳为单位，代号为 J 。 $1kcal=4186.8J=4.1868kJ$ 。热工上气体的质量单位可以取为 1 千克， 1 标准米³或 1 千摩尔，于是就有相应的质量比热、容积比热和摩尔比热。在压力不变或容积不变时测得的气体比热分别叫定压比热 C_p 或定容比热 C_v 。气体在定压下受热时，在温度升高的同时，还因需克服外力而膨胀作功，所以同样升高 $1^{\circ}C$ ，比在定容下加热时需更多热量。

6. 粘度 流体的粘度系指流体的粘滞程度，它是企图阻挠流体质点流动的因素。液体和气体的粘度需由实验测定，一般可从手册或有关表格中查出，用 μ 表示，其单位为牛顿·秒/米²或帕·秒（ $Pa \cdot s$ ）， 1 帕·秒= 10 泊（ P ）。

液体的粘度随温度升高迅速减小，气体的粘度随温度升高而增大。所以在窑炉系统中，温度愈高气体的粘度就愈大，摩尔阻力也就愈大。前面说过，搪瓷工业窑炉内的压力与外界相差不大，所以在搪瓷窑炉内压力对粘度的影响可以忽略不计。

7. 流速和流量 流体在导管中流动时，每单位时间内流经任一截面的流体容积称为容积流量；而单位时间内通过导管任一截面的流体质量称为质量流量。流体质点单位时间内所流经的距离称为流体的流速。工业上一般以导管截面积除以容积流量所得的值来表示流速。其单位为米/秒（ m/s ），用 w 表示。

8.层流与湍流 所谓层流就是气体流动时层次分明，不互相干扰，在垂直于流动的方向上速度为零，就是说都向一个主流方向流动。湍流则呈紊乱状态，所以又叫紊流。它有一个主流方向，但在流动过程中又有垂直方向的流动。我们希望搪瓷窑炉内的气体流动处于湍流状态。因为湍流可使燃料和空气混合均匀，迅速燃烧，同时又能使冷热气体混合均匀，减小温差，克服气体分层现象，使炉内温度分布均匀，并且易将热量传给制品或物料表面，从而可提高热的利用率。

气体流速越大，通道越大，粘度越小时，就越容易形成湍流。工程上为了更好地表示气体的流动状态，常把和层流、湍流有关的这几个因素合并为一个无单位的数群，即雷诺准数，用 Re 表示：

$$Re = \frac{Dw\rho}{\mu} \quad (1-1)$$

式中 D ——气体通道的内直径，米（ m ）；

w ——气体流速，米/秒（ m/s ）；

ρ ——气体密度，千克/米³（ kg/m^3 ）；

μ ——气体绝对粘度，帕·秒（ $Pa \cdot s$ ）。

根据大量实验验证，当 Re 值大于2320时，气体以湍流状态为主；当 Re 值小于2320时，气体以层流状态为主；当 Re 值大于10000时，气体则处于稳定的湍流状态；当 Re 值小于2000时，气体处于稳定层流状态；当 Re 值处于2000~10000时，气体则处于过渡状态； Re 值越小，层流的可能性和稳定性也就越大。

第二节 气体力学原理及定律

在窑炉系统中应用的气体力学原理及定律主要有：阿基米德的浮力原理；气体状态方程式；气体流动的连续性方程式——气体重量守恒定律；气体能量守恒定律——适用于气体的伯努利方

程式及气体动量方程式——气体动量守恒定律。

1. 阿基米德浮力原理 阿基米德认为,固体浸入液体后失去的质量,等于被固体排开的液体容积的质量。这个原理也适用于气体。如图1-1所示,设有一倒置的容器高为 H ,截面积为 F ,容器内盛满密度为 ρ 的热气体,四周是密度为 $\rho_{\text{空}}$ 的冷空气。由于热气体比四周的冷空气轻,所以它要往上升,其上升力等于其排开的空气的质量减去热气体本身的质量。

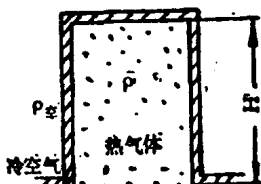


图 1-1 阿基米德浮力原理示意图

热气体的质量 $G = HF\rho$, 千克 (kg)

热气体排开冷空气质量 $G_{\text{空}} = HF\rho_{\text{空}}$, 千克 (kg)

热气体在冷空气中的重力:

$$G_{\text{重}} = HF(\rho - \rho_{\text{空}})g \text{ 牛顿 (N)} \quad (1-2)$$

因为 $\rho_{\text{空}} > \rho$, 所以 $G_{\text{重}}$ 为负值, 就是说热气体在空气中具有上升力。若式(1-2)两边同除以 F , 则单位面积上的气柱所具有的上升力可写成:

$$h = H(\rho_{\text{空}} - \rho)g \quad \text{牛顿/米}^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (1-3)$$

在窑炉系统中, 由于热气体的密度小于周围大气中冷空气的密度, 所以热气体所受到的浮力大于重力。在没有引入外界机械能的情况下, 热气体会靠浮力的作用自行由低处流向高处。在烟囱中, 由于热烟气的密度比外界冷空气密度小, 就是说热烟气受到的浮力大于重力, 所以热烟气会靠浮力的作用向上流动。例如, 搪瓷烧成炉中燃料燃烧产生的废热烟气由较高的烟囱排入大气中去。

2. 气体的状态方程式 物理学中讲过, 对于理想气体来说, 可用下式表示气体压力、温度、体积三者之间的关系,

$$PV = RT \quad (1-4)$$

式中 P ——气体的压力, 牛顿/米²;

T ——气体的绝对温度 (K), T 等于摄氏温度 $t + 273K$;

V ——单位质量气体容积，米³/千克；

R ——气体常数，其单位为焦耳/千克·开尔文。

在0°C，一标准大气压的“标准状态”下，1千克分子（量）或1千摩尔（kmol）的任何气体都将占据22.4标准米³的容积。设气体的分子量为 n ，则：

$$R = \frac{8314.3}{n} \quad \text{焦耳/千克·开尔文(J/kg·K)}$$

对于空气来说，因为它是氧气、氮气等气体的混合物，其相当分子量约为29，故其 R 的值约为287J/kg·K。在同温同压下，不同气体每千克所占据容积可能会有很大差别，但是其 $n \cdot R$ 的值均等于8314.3J/(kmol·K)，故8314.3/(kmol·K)又称为通用气体常数。

设 V_0 和 T_0 为标准状态下气体的容积和绝对温度， V_1 为一定量气体在同一压力作用下，温度为 T_1 时的容积，由式（1-4）可得：

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_0 T_1}{T_0} = V_0 \frac{273 + t_1}{273} = V_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right) \\ &= V_0 (1 + \beta t_1) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 $\beta = \frac{1}{273}$ 为气体的体积膨胀系数，1/°C；

t_1 ——对应于 T_1 时的摄氏温度，°C。

若式（1-5）中的 V_0 和 V_1 表示单位时间内流过某一截面的气体容积量（米³/秒），以截面积除以式（1-5）的两边，便可得到对应于 V_0 和 V_1 的流速 w_0 和 w_1 （米/秒）的计算公式：

$$w_1 = w_0 (1 + \beta t_1) \quad (1-6)$$

式（1-5）中的 V 也可代表1千克质量气体的容积，于是

$$\rho_1 = \frac{1}{V_1}, \quad \rho_0 = \frac{1}{V_0}, \quad \rho_1 \text{ 和 } \rho_0 \text{ 分别代表 } T_1 \text{ 和 } T_0 \text{ 时气体的密度，}$$

千克/米³，则。