

高等学校教材

电子陶瓷烧结设备

黄炳钧 羊淑子 编

华南理工大学出版社

1.6

电子陶瓷烧结设备

黄炳钧 羊淑子 编

华南理工大学出版社

内 容 简 介

该书讨论了气体力学、燃料及燃烧计算、传热学方面的基础理论；以电热隧道窑为典型，详细介绍电阻炉的结构特点、设计和操作原理，并对可控气氛电阻炉、真空电阻炉、火焰窑炉及常用筑炉材料作必要介绍；对烧结炉热工测量与控制也作相应介绍。

该教材适用于电子材料与元器件专业大学生，也可供从事热工工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子陶瓷烧结设备/黄炳钧 羊淑子编. —广州: 华南理工大学出版社, 1994. 10

ISBN7-5623-0685-0

I. 电…

II. 黄…

III. 电子陶瓷—设备

IV. TQ17

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山·邮码510641)

佛冈县印刷厂印装 各地新华书店经销

1994年10月第1版 1994年10月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12

字数: 277千 印数: 1—2000

定价: 9.90元

前 言

本教材系按中国电子工业总公司的工科电子类专业教材1991~1995年编审出版计划，由电子材料与固体器件教材编审委员会电子材料与器件编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为熊茂仁。

本教材由华南理工大学黄炳钧担任主编，华中理工大学李标荣担任主审。

本课程的参考学时数为45学时，其主要内容为热工基础理论及电子陶瓷烧结设备。基础理论包括气体力学、燃料及燃烧计算和传热学，是设计和使用烧结设备的热工基础。烧结设备包括电阻炉、火焰窑炉及热工测量，并以窑车式电热隧道窑为典型，详细讲述电子陶瓷烧结设备的结构特性、设计和选用的方法；对烧结炉常用的耐火材料、隔热材料，常用的热工测量仪表的原理及电阻炉的温度自动控制，进行必要的介绍。各章均选编了例题、习题和各种图表。使用本教材时，各专业应根据本专业的具体情况，全部或部分讲述教材的内容。

本教材由羊淑子编写第一、二、三章，黄炳钧编写第四、五、六章并统编全稿。李标荣、熊茂仁等教授为本书的编写工作提出许多宝贵意见，特表诚挚的感谢。由于编者水平所限，不足之处殷切希望广大读者批评指正。

编 者

绪 论

电子陶瓷在电子工业、航空工业、国防工业等领域的应用中都占有重要地位。

生产电子陶瓷的一个重要过程是烧结，因此，烧结设备（又称窑炉）是生产电子陶瓷不可缺少的必需设备。烧结设备的结构和性能以及操作和控制等情况，都直接影响电子陶瓷生产的产量、质量和成本。电子陶瓷烧结设备主要是引用陶瓷工业窑炉和金属热处理炉，这些窑炉按所使用的热源有燃料燃烧的火焰窑和电能转化为热能的电阻炉。

我国是创建窑炉最早的国家。从西安半坡遗址的发掘中，证明远在五千年以前我们的祖先就创造了烧陶瓷器的竖穴窑、横穴窑；以后，窑炉和陶瓷又不断地发展。明末清初，在江西景德镇创建了蛋形窑（又称景德镇窑），在这些窑中烧出了驰名世界的中国瓷器。远在二千五百年前，我国南方建造的烧陶瓷的倾斜式龙窑，就是1899年法国的福基罗创建成功的机械化隧道窑而后经过不断改进发展成为现代化的隧道窑的前身；二千五百年前我国北方建造的半倒焰式馒头窑，则又是目前仍在使用的倒焰窑的前身。

由于几千年的封建统治和一百多年的帝国主义侵略，使我国的工业在解放前相当落后，电子陶瓷的生产是空白。解放后，在中国共产党的正确领导下，不仅古老的陶瓷工业获得了新生，电子陶瓷也作为一个行业迅速地发展。但与先进的国家比较，电子陶瓷的生产在产量、质量、劳动生产率、单位产品的能量消耗等各项技术经济指标仍有相当大的差距，电子陶瓷烧结设备的机械化、自动化程度和水平仍很低。

改革开放以来我国已经向技术先进的国家引进了一些电子陶瓷生产线，其中包括烧结设备（窑炉）。我们一方面应很好地消化、吸收国外的先进技术，另一方面应研制出适合于我国电子陶瓷生产的烧结设备，加速发展我国电子陶瓷的生产。为此，首先要掌握好关于烧结设备的基础理论，即气体力学、燃料及燃烧计算和传热学。然后以基础理论科学地总结目前生产中使用的烧结设备（包括自己设计的和国外引进的），并用基础理论指导设计和操作控制。实践证明，基础理论的指导意义是十分明显的，例如，不符合气体运动规律设计的烧结设备，将造成火焰窑炉内温度分布不均匀；不了解燃料燃烧规律和传热规律，所设计的烧结设备热效率低，甚至不能达到工艺要求的烧成制度。同样，没有基础理论来指导操作控制，即使设计得很好的烧结设备，也不能达到设计的经济技术指标，不能及时解决烧结设备在使用中出现的问题。所以，本书前三章介绍烧结设备的基础理论。

电子陶瓷烧结设备的类型很多，从使用能源来分有电热窑炉（电阻炉）和火焰窑炉两大类；从操作上分有连续操作和间歇操作两大类。但不管哪一种烧结设备，其基本的结构是相同或相似的，有关设计计算的步骤和方法也是相同或相似的。本书第四章详细介绍电热隧道窑的结构特性，电热材料的性能与电热元件的尺寸计算，电阻炉的设计方法与步骤，电阻炉安装与使用。第五章简要介绍连续操作和间歇操作的火焰窑，还有新型倒焰窑。

不论是设计制造新的烧结设备或改造现有的烧结设备，最主要的任务是使烧结设备在完成生产目的的同时降低能耗。为了节能，选用轻质耐火材料和陶瓷耐火纤维作炉衬，

或炉壳设遮热罩（板），以减少烧结炉体本身的积热及向外界散热；增强烧结设备的严密性，以减少各种散热损失。为了节能，提高烧结设备的机械化、自动化程度和水平，应用电子计算机进行准确的控制，从而提高烧结设备的生产率和提高产品的烧结质量，同样可达到节能目的。

目 录

绪论	(1)
第一章 气体力学	(1)
第一节 窑炉系统气体流动的特点	(1)
一、气体状态方程	(1)
二、窑炉系统气体流动的特点	(2)
第二节 气体流动的基本方程式	(2)
一、流体静力学基本方程	(2)
二、连续性方程	(3)
三、流体动力学基本方程——柏努利方程	(3)
第三节 柏努利方程在窑炉系统中的应用	(7)
一、气体通过小孔的溢出和吸入	(7)
二、气体通过窑门的溢出和吸入	(9)
三、烟囱计算	(10)
习 题	(14)
第二章 燃料及燃烧计算	(16)
第一节 燃料的种类、组成及其表示方法	(16)
一、燃料的种类	(16)
二、燃料的组成、表示方法及其换算	(16)
第二节 燃料的热值	(19)
一、高、低位热值的换算	(19)
二、热值的计算	(19)
第三节 燃烧计算	(20)
一、燃烧所需空气量的计算	(21)
二、燃烧生成烟气量的计算	(22)
三、燃烧温度的计算	(25)
四、近似计算	(28)
五、操作计算	(29)
习 题	(32)
第三章 传热学	(33)
第一节 基本概念	(33)
一、传热的基本形式	(33)
二、温度场	(33)
三、温度梯度	(34)
四、传热的一般方程式	(34)
第二节 传导传热	(35)
一、导热的基本定律——傅立叶定律	(35)
二、平壁稳定导热	(35)
三、圆筒壁稳定导热	(38)

四、形状不规则物体的导热.....	(39)
第三节 对流传热	(40)
一、基本概念.....	(40)
二、对流传热的基本定律——牛顿冷却定律.....	(41)
三、影响对流传热的因素.....	(42)
四、对流传热系数 α 的计算.....	(42)
第四节 辐射传热	(44)
一、基本概念.....	(44)
二、热辐射的基本定律.....	(46)
三、两固体间的辐射传热.....	(48)
四、有遮热板时的辐射传热.....	(51)
五、通过窑墙孔口的辐射传热.....	(53)
六、气体辐射.....	(54)
七、火焰辐射.....	(58)
第五节 综合传热	(59)
一、平壁窑墙的综合传热.....	(59)
二、圆筒壁窑墙、窑拱顶的综合传热.....	(60)
习 题	(63)
第四章 电阻炉	(64)
第一节 电阻炉的类型	(64)
一、连续操作电阻炉.....	(65)
二、间歇操作电阻炉.....	(66)
第二节 电热隧道窑的结构	(70)
一、窑体.....	(70)
二、窑车、砂封与曲封及推车机.....	(76)
三、供热设备.....	(77)
四、通风设备.....	(78)
五、窑炉基础.....	(79)
第三节 常用筑炉材料	(79)
一、耐火材料的主要性能.....	(80)
二、常用的耐火材料.....	(80)
三、隔热材料.....	(82)
四、耐火泥浆.....	(87)
第四节 电热材料的性能	(88)
一、电热元件材料的性能要求.....	(88)
二、常用电热材料的性能.....	(89)
三、电热元件的单位表面功率.....	(94)
第五节 电阻炉的设计	(99)
一、原始资料的收集.....	(99)
二、炉体主要尺寸的计算.....	(99)
三、电阻炉的功率确定.....	(101)
四、电热元件尺寸的计算.....	(105)

第六节 电阻炉的安装与使用	(111)
一、电阻炉的安装.....	(111)
二、炉体砌筑材料的结构与选择.....	(116)
三、电阻炉的使用.....	(116)
第七节 其它电阻炉	(119)
一、可控气氛电阻炉.....	(119)
二、真空电阻炉.....	(125)
习 题	(139)
第五章 火焰窑炉	(140)
第一节 连续操作火焰窑	(140)
一、隧道窑的工作系统.....	(140)
二、燃烧设备.....	(142)
三、非窑车式隧道窑.....	(145)
第二节 间歇操作火焰窑	(148)
一、倒焰窑的流程.....	(148)
二、倒焰窑的结构.....	(149)
三、新型倒焰式窑.....	(151)
习 题	(153)
第六章 烧结炉热工测量	(154)
第一节 温度测量	(154)
一、温度测量仪表的结构、原理和选用.....	(154)
二、电阻炉温度自动控制.....	(158)
第二节 压力与测量	(160)
第三节 流速与流量测量	(163)
参考文献	(169)
附 录:	(170)
A. 常用局部阻力系数及综合阻力系数.....	(170)
B. 常用筑炉材料的物理参数.....	(178)
C. 某些材料在法线方向上的黑度.....	(181)

第一章 气体力学

气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的科学。

电子陶瓷烧结设备（又称窑炉）中的一大类是利用燃料燃烧作为供热热源的。燃烧时要供给一定量的空气，燃烧产生的烟气又要由窑内排除出去，产品冷却也要送入空气。窑炉内气体的流动，窑内的气氛、压力制度的控制，直接影响电子陶瓷烧结的产量、质量、能耗及窑炉的使用寿命。所以，要研究窑炉的气体力学。

第一节 窑炉系统气体流动的特点

一、气体状态方程

气体和液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性；压强和温度的改变，对气体密度的影响很大。在温度不过低、压强不过高时，压强、温度和气体密度三者间的关系服从理想气体状态方程：

$$Pv = RT \quad \text{或} \quad \frac{P}{\rho} = RT \quad (1-1)$$

式中 P ——气体的绝对压强， N/m^2 ；
 v ——气体的比容， m^3/kg ；
 ρ ——气体的密度， kg/m^3 ；
 T ——气体的绝对温度， K ；
 R ——气体常数， $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。

R 表示质量为 1kg 的气体，在定压下加热，温度升高 1 度时所做的膨胀功。在标准状态^①下， $R = \frac{8314}{M} \text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ， M 为气体的分子量。

当气体压强不变时，式（1-1）变为：

$$\frac{v}{T} = C \quad \text{或} \quad \rho T = C \quad (1-2)$$

式中 C ——常数。

式（1-2）表明，等压情况下，气体体积与温度成正比，气体密度与温度成反比。令标准状态下气体体积为 V_0 、密度为 ρ_0 、流速为 w_0 ，则在 0.1MPa 下，温度为 t （以 $^{\circ}\text{C}$ 计）时的体积 V_t 、密度 ρ_t 和流速 w_t 为：

$$V_t = V_0 \cdot \frac{273+t}{273} \quad \text{m}^3 \text{ 或 } \text{m}^3/\text{h} \text{ 或 } \text{m}^3/\text{s}$$

^①“标准状态”为 0.1MPa ， 273K 。本章凡标准状态的参数均标以下角码“0”，并在单位中以“B”表示“标准”。

$$w_t = w_0 \cdot \frac{273 + t}{273} \quad \text{m/s}$$

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-3)$$

二、窑炉系统气体流动的特点

1. 稳定流动

在连续操作的窑炉系统中，气体流动多属稳定流动。稳定流动是指气流中任一点的物理量（如温度、压力、流速等）都不随时间而变的流动。稳定流动是指不同时间而在同一点上的物理量不变，但在同一时间不同点上的物理量却可以不相同。

2. 层流与湍流

气体的流动分为层流（滞流）和湍流（紊流）。区别层流和湍流用雷诺准数 Re 来判断：

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (1-4)$$

式中 w ——气体的流速，m/s；
 μ ——气体的粘度，Pa·s；
 ρ ——气体的密度，kg/m³；
 d ——通道的内直径，m。

当 $Re < 2300$ 时为层流， $Re > 10000$ 为湍流， $2300 < Re < 10000$ 为过渡流。但过渡流不稳定，气流稍遇障碍即转变为湍流。所以，工程上常以雷诺准数2300为层流与湍流互变的临界值。

3. 不可压缩性

气体虽具有压缩性，但由于窑炉内气流速度不大，且窑炉内各部位的压强变化一般仅在几十Pa，所以，对气体体积的影响很小；窑炉内气体温度的变化是连续的，就某一小段而言，温度的变化对气体体积的影响也是很小的，若取该段的平均温度来计，则温度对体积的影响可忽略。所以，可认为气体在窑炉系统中流动时密度不变，将窑炉系统中的气体视为不可压缩的流体。

第二节 气体流动的基本方程式

一、流体静力学基本方程

在静止的流体中，取一上、下底截面为 F 、质量为 G 的流体柱，如图1-1所示。其上、下底面与基准面的距离为 H_1, H_2 ，静压强为 P_1, P_2 。由于流体柱静止，所以受力平衡：

$$P_1 F + G = P_2 F \quad (1-5)$$

若流体的密度为 ρ ，则质量 $G = (H_1 - H_2) F \rho g$ ，上式变为：

$$H_1 \rho g + P_1 = H_2 \rho g + P_2 \quad \text{N/m}^2 \quad (1-6)$$

写成通式:

$$H \rho g + P = C \text{ (常数)} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-7)$$

式中 $H \rho g$ ——单位体积流体所具有的位能, 又称位压头, N/m^2 (Pa);

P ——单位体积流体所具有的压力能, 又称静压头, N/m^2 (Pa)。

式(1-7)为流体静力学方程式, 它表明在重力作用下, 在静止流体中, 任一截面上的位能与压力能之和为一常数。

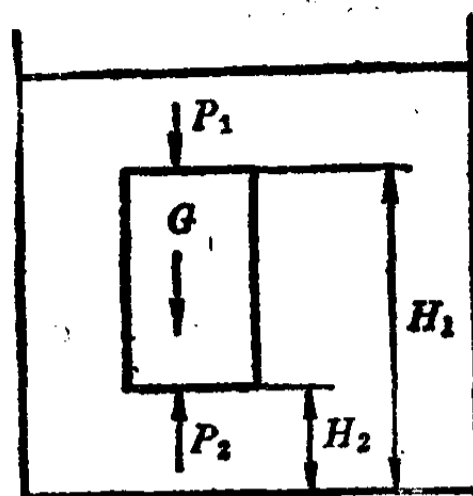


图 1-1

二、连续性方程

气体连续性方程是质量守恒定律在气体力学中的应用。根据质量守恒定律, 气体在管道或窑炉内稳定流动时, 若无向内添加又无向外漏损, 则单位时间内气体通过管道任一截面的质量流量不变。即:

$$F_1 w_1 \rho_1 = F_2 w_2 \rho_2 = \dots = M \quad \text{kg/s} \quad (1-8)$$

式中 F_1, F_2 ——分别为管道 1-1、2-2 处的截面积, m^2 ;

w_1, w_2 ——通过截面 1-1、2-2 处的气体平均流速, m/s ;

ρ_1, ρ_2 ——通过截面 1-1、2-2 处的气体密度, kg/m^3 ;

M ——气体的质量, kg/s 。

在窑炉系统中的气体可视为不可压缩性气体, 各截面处气体的密度 ρ 不变, 则式(1-8)变为:

$$F_1 w_1 = F_2 w_2 = \dots = V \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-9)$$

式中 V ——气体的体积, m^3/s 。

上式表明, 气体在管道内稳定流动时, 气体在各截面处的流速与其截面面积成反比。

三、流体动力学基本方程——柏努利方程

流动气体的柏努利方程是能量守恒定律在气体力学中的应用。根据能量守恒定律, 气体在管道或窑炉内稳定流动时, 通过管道任一截面的总能量相等。

在流动的气体中, 能量主要有机械能和内能。对于不可压缩的气体, 由于密度不变, 内能不变, 所以只有机械能。因此, 柏努利方程是单位流体机械能守恒定律。

(一) 单一流体的柏努利方程

静止的流体具有位能、压力能, 运动的流体尚有动能。单位体积流体以速度为 w 运动时, 其动能为 $\frac{w^2}{2} \rho$ 。实际流体有粘性, 流动时因克服内摩擦力而消耗能量。所以,

根据能量守恒定律，可写出单位体积流体作稳定流动时的柏努利方程：

$$H_1 \rho g + P_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho = H_2 \rho g + P_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho + \Sigma h_l \quad \text{Pa} \quad (1-10)$$

写成通式为：

$$H \rho g + P + \frac{w^2}{2} \rho + \Sigma h_l = C \quad \text{Pa} \quad (1-11)$$

式中 $\frac{w^2}{2} \rho$ —— 单位体积流体所具有的动能，又称动压头， N/m^2 或 Pa ；

Σh_l —— 单位体积流体由一截面流至另一截面的能量损失，又称压头损失， N/m^2 。

上式表明，处于稳定流动的流体，其任一截面的位能、压力能、动能及能量损失之和为一常数。

(二) 二流体柏努利方程

由于窑炉系统有高度，窑炉内流动的是密度较窑炉外冷空气小的热气体，在位压头的作用下，热气体有向上运动的趋势；又因窑内气体与窑外大气存在压强差，在这压强差的作用下，也会造成窑内气体的运动。为了从方程中看出窑内气体流动的方向，并计算引起气体流动的力的大小，将窑内热气体与窑外冷空气各机械能相比较，得出适用于窑炉系统气体流动的柏努利方程，即二流体柏努利方程。

1. 二流体柏努利方程的推导

如图 1-2 所示，取高度的基准面在下方，列出窑炉内热气体在 1-1、2-2 截面间流动的柏努利方程：

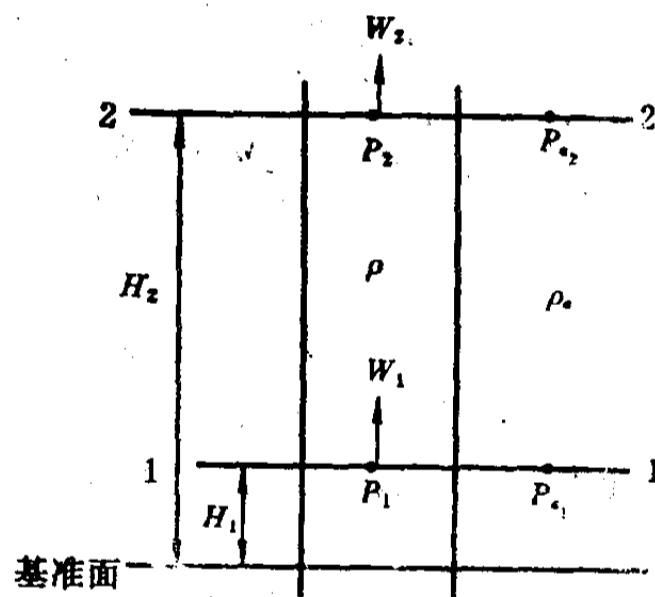


图 1-2

$$H_1 \rho g + P_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho = H_2 \rho g + P_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho + \Sigma h_{l(1-2)} \dots \dots (1)$$

列窑外静止冷空气在 1-1、2-2 截面间的柏努利方程：

$$H_1 \rho_a g + P_{a1} = H_2 \rho_a g + P_{a2} \dots \dots (2)$$

式 (1) 减式 (2) 得：

$$H_1 g (\rho - \rho_a) + (P_1 - P_{a1}) + \frac{w_1^2}{2} \rho = H_2 g (\rho - \rho_a) + (P_2 - P_{a2}) + \frac{w_2^2}{2} \rho +$$

$$\Sigma h_{l(1-2)} \dots \dots (3)$$

由于 $\rho < \rho_a$ ，为方便计算，将高度基准面取在上方，向下量为正高度；由于在窑炉系统的高度范围内，窑外大气压强变化很小，即 $P_{a1} = P_{a2}$ ，所以，上式 (3) 可写为：

$$H_1 g(\rho_a - \rho) + (P_1 - P_a) + \frac{w_1^2}{2} \rho = H_2 g(\rho_a - \rho) + (P_2 - P_a) + \frac{w_2^2}{2} \rho + \sum h_{l(1-2)} \quad \text{Pa} \quad (1-12)$$

写成通式为：

$$Hg(\rho_a - \rho) + (P - P_a) + \frac{w^2}{2} \rho + \sum h_l = C \quad \text{Pa} \quad (1-13)$$

或 $h_{ge} + h_s + h_k + \sum h_l = C \quad \text{Pa} \quad (1-14)$

2. 柏努利方程式中各项的物理意义

(1) 相对位压头 (又称过剩位压头、几何压头)

$$h_{gl} = Hg(\rho_a - \rho) \quad \text{Pa}$$

表示窑炉内 1 m^3 热气体与窑外 1 m^3 冷空气的位压能之差。几何压头不能直接测得，但可通过测量高度 H 、温度 t 来计算。几何压头造成的气流方向为由下向上。要使热气体由下向上流动，几何压头是推动力；反之，使热气体由上向下流动，这个几何压头为阻力。

(2) 相对静压头 (又称过剩静压头、静压头)

$$h_s = P - P_a \quad \text{Pa}$$

表示窑内 1 m^3 热气体与窑外 1 m^3 冷空气的静压能之差。静压头可用压强计测得。静压头使气体由压强大流向压强小的地方。

当 $P - P_a > 0$ ，表示窑内压强大于外界大气压强，此时窑内为正压，有热气体自窑内溢出。

当 $P - P_a = 0$ ，表示窑内压强等于窑外大气压强，此时窑内称为零压。

当 $P - P_a < 0$ ，表示窑内压强小于窑外大气压强，称窑内为负压，此时有冷空气漏入窑内。

(3) 动压头 (又称速度头)

$$h_k = \frac{w^2}{2} \rho$$

表示窑内 1 m^3 热气体具有的动能。动压头可用皮托管和压差计测得。动压头的方向即为流速的方向。

(4) 压头损失 (又称能量损失)

气体流动时，由于内摩擦力的存在，产生能量损失。内摩擦力的成因一是气体有粘性，二是气体流动产生涡流。所以，压头损失分为摩擦阻力损失和局部阻力损失两大类。

1) 摩擦阻力损失 h_f

气体在管道中流动时，由于气体质点间的内摩擦以及与管道壁间的外摩擦作用而造成的能量损失。

$$h_f = \lambda \frac{w^2}{2} \rho \frac{L}{de} \quad \text{Pa} \quad (1-15)$$

式中 L ——管道的长度，m；

d_e ——管道的当量直径, m;

λ ——摩擦阻力系数。

圆形管道的当量直径就是其直径; 对于非圆形管道, 当量直径可用下式求出;

$$d_e = \frac{4F}{l} \quad \text{m} \quad (1-16)$$

式中 F ——管道的截面积, m^2 ;

l ——被气体浸润的周边长, m。

摩擦阻力系数与气体流型及管壁的粗糙度有关。层流时, $\lambda = 64/Re$ 。湍流时, $\lambda = A/R^n$ (光滑金属管 $A = 0.32$ 、 $n = 0.25$, 粗糙的金属管 $A = 0.129$ 、 $n = 0.12$; 砖砌管道 $A = 0.175$ 、 $n = 0.12$)。

在窑炉系统计算摩擦阻力时, 摩擦阻力系数常取经验数据, 金属管道 $0.02 \sim 0.04$, 砖砌管道为 $0.05 \sim 0.06$ 。

2) 局部阻力损失 h_l

当气体流经的管道其截面发生局部变化或气流的方向发生突然变化, 造成气流冲击管壁和气流本身质点的相互碰撞, 结果使气体中的部分能量损失。

$$h_l = \xi \frac{w^2}{2} \rho \quad \text{Pa} \quad (1-17)$$

式中 ξ ——局部阻力系数, 见附录 A。

3) 料垛阻力损失 h_{se}

气体在窑炉中流经成型制品 (陶瓷、电子陶瓷等) 所堆叠的料垛时, 由于料垛使气体产生摩擦与局部阻力损失, 造成的能量损失统称为料垛阻力损失。但由于窑炉的结构及所烧制的制品种类不同, 料垛的间隙、堆叠情况也不同, 很难用公式计算料垛阻力损失, 目前一般采用气流流经 1 m 料垛能量损失 1 Pa 这个经验数据。

3. 压头的转换

能量不仅守恒, 还可以相互转换。

(1) 几何压头与静压头的相互转换

如图 1-3 所示, 热气体在等径的管道中由下向上流动。写出气体在两截面间的柏努利方程:

$$h_{ge1} + h_{s1} + h_{k1} = h_{ge2} + h_{s2} + h_{k2} + \sum h_{l(1-2)}$$

因为等径管道, 所以 $w_1 = w_2$, 即 $h_{k1} = h_{k2}$; 取高度基准面在 2-2 截面, 则 $h_{ge2} = 0$ 、 $h_{ge1} > 0$; 若忽略摩擦阻力损失, 即 $\sum h_{l(1-2)} = 0$ 。于是, 上式变为:

$$h_{ge1} + h_{s1} = h_{s2}$$

上式表明, $h_{s2} > h_{s1}$ 。也就是说, 热气体由 1-1 流至 2-2 时, h_{ge} 由正值逐渐变为零, 而 h_s 由小逐渐变大。即几何压头逐渐转换为静压头。反之, 当热气体由 2-2 流至 1-1 时, 静压头转换为几何压头。

(2) 静压头与动压头间的相互转换

如图 1-4 所示, 气体在水平的膨胀管内由 1-1 流至 2-2 截面。写出气流在两截

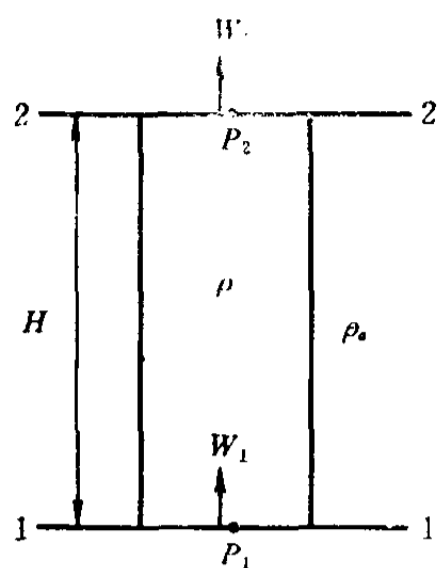


图 1-3

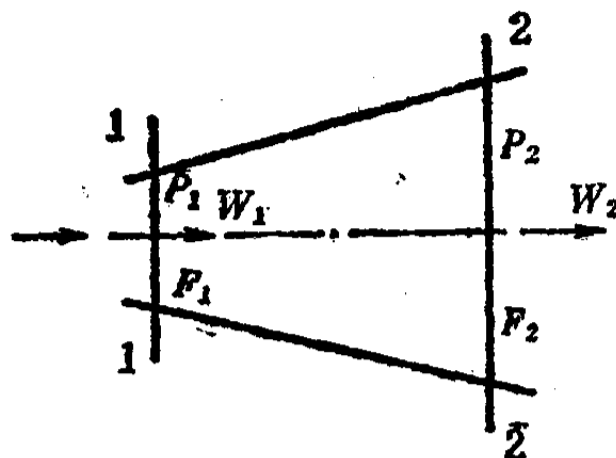


图 1-4

面间的柏努利方程:

$$h_{ge1} + h_{s1} + h_{k1} = h_{ge2} + h_{s2} + h_{k2} + \sum h_{l(1-2)}$$

因为是水平管道, $H_1 = H_2$, 所以 $h_{ge1} = h_{ge2}$; 忽略阻力损失, 即 $\sum h_{l(1-2)} = 0$ 。则上式变为:

$$h_{s1} + h_{k1} = h_{s2} + h_{k2}$$

又因为 $F_1 < F_2$, 所以, $w_1 > w_2$, $h_{k1} > h_{k2}$ 。因此, h_{s2} 必定大于 h_{s1} 。由此说明, 气体在上述流动过程中, h_k 减小而 h_s 增加, 即部分动压头转换成静压头。反之, 当气体由由 2-2 流至 1-1 截面, 则静压头部分转换成动压头。

在柏努利方程中, 各压头间转换规律概括如下: 几何压头、静压头、动压头三者之间皆为可逆转换; 只要有动压头存在, 就有压头损失, 即压头损失是通过动压头转换, 而且是不可逆转换。

第三节 柏努利方程在窑炉系统中的应用

在窑炉系统中, 大部分地方不是处于正压就是处于负压。因此总有热气体向外界溢出, 或是冷空气被吸入窑炉内。而这些气体在流动中密度变化不大, 可视为不可压缩气体的流动, 因此可用柏努利方程式来计算这些气体的流量。此外, 不少窑炉是靠烟囱将窑炉内的废气排出窑外至高空处, 烟囱的计算同样可应用柏努利方程式。

一、气体通过小孔的溢出和吸入

当气体由较大的空间经小孔突然收缩流动时, 在惯性的作用下, 气流股会发生收缩而自动地形成一最小的截面, 这种现象称为缩流。气流最小截面 f_2 与小孔截面 f 的比值称为缩流系数 ϵ 。

$$\epsilon = f_2 / f \quad (1-18)$$

如图 1-5 的窑墙上有一小孔, 面积为 f ; 小孔距窑底的高度为 H , 并设窑底的静压

头为零。在气流方向上，截面1—1取在窑内，截面2—2取在气流最小截面处，写出1—1与2—2截面间的柏努利方程：

$$h_{ge1} + h_{s1} + h_{k1} = h_{ge2} + h_{s2} + h_{k2} + \Sigma h_{l(1-2)}$$

由于是水平流动， $h_{ge1} = h_{ge2}$ ；窑内气流速度远小于最小截面处流速，即 $w_1 \ll w_2$ ， h_{k1} 可忽略；同时 $P_2 = P_a =$ 大气压强，即 $h_{s2} = 0$ ；为计算方便，先忽略 $\Sigma h_{l(1-2)}$ ，则柏式 为：

$$h_{s1} = h_{k2}$$

即

$$P_1 - P_a = \frac{w_2'^2}{2} \rho$$

于是

$$w_2' = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_a)}{\rho}} \quad \text{m/s} \quad (1-19)$$

若考虑阻力损失 $\Sigma h_{l(1-2)}$ ， w_2 必定比上式计算 w_2' 小，所以应乘上小于1的速度系数 φ ，

$$w_2 = \varphi \sqrt{\frac{2(P_1 - P_a)}{\rho}} \quad \text{m/s} \quad (1-20)$$

为简化计算，将静压头 $(P_1 - P_a)$ 用几何压头 $Hg(\rho_a - \rho)$ 代替，得：

$$w_2 = \varphi \sqrt{\frac{2Hg(\rho_a - \rho)}{\rho}} \quad \text{m/s} \quad (1-21)$$

这样，通过小孔的溢气量 V_2 应为：

$$V_2 = w_2 f_2 = \varepsilon f \varphi \sqrt{\frac{2Hg(\rho_a - \rho)}{\rho}} = \mu f \sqrt{\frac{2Hg(\rho_a - \rho)}{\rho}} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-22)$$

式中 H ——小孔中心线至窑内零压面的距离，m；

f ——小孔面积， m^2 ；

ρ 、 ρ_a ——窑内气体、窑外空气的密度， kg/m^3 ；

μ ——流量系数， $\mu = \varepsilon \varphi$ 。

μ 与窑墙厚薄有关。判断窑墙的厚薄应视窑墙厚度 L 与小孔当量直径 d_e 的比值。

当 $L \geq 3.5d_e$ 时，为厚墙，此时 $\varepsilon = 1$ 、 $\varphi = 0.82$ 、 $\mu = 0.82$ ；当 $L < 3.5$ 时，为薄墙，此时 $\varepsilon = 0.64$ 、 $\varphi = 0.97$ 、 $\mu = 0.62$ 。

当窑内处于负压时，会有冷空气经小孔吸入窑内，同理可得其吸入空气量 V_a 为：

$$V_a = \mu f \sqrt{\frac{2Hg(\rho_a - \rho)}{\rho_a}} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-23)$$

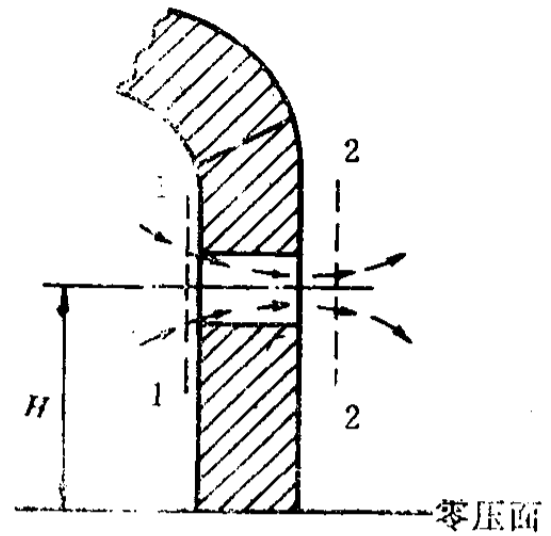


图 1-5